平成	$2\ 3$	年度~平成	27	年度私立大学	戦略的研	究基盤形成支援	事業
研		究	成	果	報	告	書

ホログラフィ技術による次世代記録媒体作製技術 および四次元流体計測技術の開発

平成 28 年 5 月 20 日

学校法人名 東京理科大学 大 学 名 東京理科大学 研究組織名 総合研究院 先端ホログラフィ技術研究開発センター

研究代表者 山本 学

東京理科大学 基礎工学部教授

## 目 次

1. はしがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2. 研究成果報告書の概要(様式2)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
3. ホログラフィックメモリ構築グループの研究結果詳細・・・・・・・・・ 57
3-1. ホログラフィックメモリ用データ生成・・・・・・・・・・ 57
3-2. 電子ビーム露光で用いる真空中ステージの開発・・・・・・・・ 65
3-3. 電子ビーム露光法による原盤作製技術の確立・・・・・・・・・ 72
3-4. 転写原盤表面の摩擦・摩耗特性の評価 ・・・・・・・・・・ 79
3-5. 離型層の形成と転写性評価・・・・・・・・・・・・・ 83
3-6. ナノインプリント金型表面の顕微・位相差レーザー分光分析・・ 87
4.ホログラフィ応用計測グループの研究結果詳細・・・・・・・・・・・・ 94
4-1. 導波路ホログラフィ計測技術の確立・・・・・・・・・・・ 94
4-2. ホログラム画像圧縮に関する研究・・・・・・・・・・・・ 99
4-3. ホログラフィによる沸騰現象の観察・・・・・・・・・・・・ 104
4-4. ホログラフィ計測用屈折率調合法の開発・・・・・・・・・・ 108
<ol> <li>まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li> <li>114</li> </ol>
付録・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 116

116

1.はしがき

本研究成果報告書は、文部科学省平成 23 年度~平成 27 年度私立大学戦略的研究基 盤形成支援事業「ホログラフィ技術による次世代記録媒体作製技術および四次元流体計 測技術の開発」に関するものである。主催となる研究組織は「総合研究院 先端ホログ ラフィ技術研究開発センター」で、センター長は山本 学 教授(東京理科大学 基礎 工学部 電子応用工学科)である。

本研究成果報告書の構成は、はしがきに続いて、研究成果報告書の概要(様式2)を 示し、その後、2グループ研究結果詳細を紹介し、最後にまとめる。また、巻末には、 「研究成果報告書の概要」に記されている米印のついた主要論文の内容を掲載している。

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

# 平成 23 年度~平成 27 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」 研究成果報告書概要

- 1 学校法人名 \_\_\_\_\_ 東京理科大学 \_\_\_\_ 2 大学名 \_\_\_\_ 東京理科大学
- 3 研究組織名 \_\_\_ 総合研究院 先端ホログラフィ技術研究開発センター
- 4 プロジェクト所在地 <u>〒125-8585</u> 東京都葛飾区新宿 6-3-1 東京理科大学葛飾キャンパス
- 5 研究プロジェクト名 <u>ホログラフィ技術による次世代記録媒体作製技術および四次元流体</u> 計測技術の開発
- 6 研究観点 研究拠点を形成する研究
- 7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
山本 学	基礎工学部	教授

- 8 プロジェクト参加研究者数 10 名
- 9 該当審査区分 (理工·情報) 生物·医歯 人文·社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

研究者名	所属·職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
山本 学	基礎工学部·教授	ホログラフィックメモリ用データ 生成	ホログラフィックメモリの生成 と再生
吉本 成香	工学部第一部·教授	電子ビーム露光で用いる真空 中ステージの開発	真空中回転ステージの開発
佐々木 信也	工学部第一部·教授	転写原盤表面の摩擦・摩耗特 性の評価	原盤寿命の向上による量産 技術の確立
向後 保雄	基礎工学部·教授	離型層の形成と転写性評価	耐久性向上のための離型層 の形成と評価
谷口 淳	基礎工学部·教授	電子ビーム露光法による原盤 作製技術の確立	ナノオーダー精度の原盤作製
由井 宏治	理学部第一部·教授	ナノインプリント金型表面の顕 微・位相差レーザー分光分析	金型表面の離型層の化学分 析
佐竹 信一	基礎工学部·教授	導波路ホログラフィ計測技術の 確立	導波路ホログラフィ計測技術 の確立と測定
松田 一朗	理工学部·教授	ホログラム画像圧縮に関する 研究	ホログラム画像圧縮技術の 確立
(共同研究機関) 鈴木 康一	山口東京理科大学・ 教授		ホログラフィによる沸騰現象の観察

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

<sup>  結城・和久</sup> 教授 法の開発 調合法の適用
-----------------------------------

<研究者の変更状況(研究代表者を含む)>

辞退

プロジェクトでの研究課題	所属·職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割	
界面現象の CIP シミュレー ションによる解析	山 口 東 京 理 科 大 学·教授	内海 隆行	界面現象の CIP シミュレー ションによる解析	

(変更の時期:平成 24 年 3 月 31 日)

プロジェクトでの研究課題	所属·職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割	
ホログラフィによる界面付 近の泡の挙動の観察	理工学部·助教	洪 定杓	ホログラフィによる界面付近 の泡の挙動の観察	

(変更の時期:平成 24 年 9 月 30 日)

プロジェクトでの研究課題	所属·職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割	
ホログラフィによる超音波 の影響の観察	理工学部·助教	本澤 政明	ホログラフィによる超音波の 影響の観察	

(変更の時期:平成 25 年 3 月 31 日)



追加

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理学部第一部·准教授	理学部第一部·教授	由井 宏治	金型表面の離型層の化 学分析

11 研究の概要(※ 項目全体を10枚以内で作成)

(1)研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

く目的・意義>

光技術は、21 世紀の情報機器や計測に必要不可欠なものとなっている。例えば、記録媒体では、従来 の磁気テープ媒体から大容量化やランダムアクセス性に優れた CD、DVD などの光記録媒体に置き換わっ ている。これらの原理は 20 世紀に確立し、既存の情報機器の置き換えという形で市場導入が進められた。 今世紀ではさらにビッグデータの蓄積、長期情報アーカイブなどでさらなる光メモリの高機能化、大容量化 が必要であり大胆な技術革新が求められる。これを可能にする技術として、光の位相情報を活用するホロ グラフィ技術がある。この技術により、記録媒体としては DVD を遙かに凌駕する大容量の情報記録が可能 となる。

法人番号	131065	
プロジェクト番号	S1101014	

ー方、自然界や産業界で現れる流れや、それに伴う熱、物質の輸送現象は、空間的な広がりを持った 渦構造に支配されることが多く、これらの流動を把握することは、物理的メカニズムの解明、数値予測モデ ルの開発、人為的な制御方法の構築などに極めて重要である。本プロジェクトでは、世界に先駆けてプロ ジェクトメンバーで開発されたホログラフィを用いた PIV(Particle Image Velocimetry)手法を用いて、マイクロ 領域の4次元の流体の流れ、および界面付近の計測技術を開発し、界面付近の挙動を明らかにする。

本プロジェクトではメモリ技術と流体計測技術の相互連携を効率よく実施し、両者のシナジー効果のもと 高精度なホログラム媒体作製技術、流体計測技術を構築する。また、実用化を目指した研究も行い新産 業育成に貢献する。

<計画の概要>

本プロジェクトは、ホログラフィによる記録媒体の作製、転写、記録・再生を行う「ホログラフィックメモリ構 築グループ」と、四次元の流体計測を行う「ホログラフィ応用計測グループ」の2グループからなる。前者の グループでは、高精度な ROM(Read Only Memory:読込みのみの記録媒体)の作製を目指して、ナノオー ダーの形状創製が可能な電子ビーム露光法により原盤を作製し、これを樹脂へ転写することにより大量生 産技術を確立する。後者のグループでは、界面付近での流体の流れを観察するために導波路ホログラム を用いた計測技術を確立する。これは、導波路にレーザーを入射させ垂直方向から他媒質へ漏れ出す光 を用いたもので、界面の流体計測を可能にする。また、マイクロ及びマクロスケールにおける既存のデジタ ルホログラム手法と、画像圧縮技術や屈折率調整法などとを組み合わせることで流体計測の応用分野を 広めることも目的としている。

また、定期的に一般公開の研究報告会を開催して、ホログラフィ技術によるメモリおよび流体計測技術 の研究拠点としての認知度を高めるとともに、両グループ間の研究者間の密接な意見交換を行い、協調 的なシナジー効果の発揮に努める。

メモリ構築グループの中間目標は、平成25年度末には、転写されたROMの再生を行い、0.3Tbits/inch<sup>2</sup> の記録密度を目指す。最終目標は、1Tbits/inch<sup>2</sup>の記録密度のROM技術を確立することである。また、計 測グループの中間目標は、平成25年度末までに、導波路ホログラムによる流体計測の原理実証を終え、 最終目標は、サブミクロンでの流体計測を実現させることである。

各グループの詳細研究項目は以下のようになる。

【1】ホログラフィックメモリ構築グループ

- ① ホログラフィックメモリ用データ生成と転写 ROM の再生
- ② 真空中回転ステージの開発
- ③ 電子ビーム露光法による原盤作製技術の確立と転写による ROM の作製
- ④ 原盤の耐久性向上のための離型層の形成と評価
- ⑤ 原盤寿命向上のための離型層の形成と評価
- ⑥ 金型表面の離型層の化学分析

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

【2】ホログラフィ応用計測グループ

- ① 導波路ホログラフィ計測技術の確立
- ② ホログラム画像圧縮に関する研究
- ③ ホログラフィによる沸騰現象の観察

④ ホログラフィ計測用屈折率調合法の開発

#### (2)研究組織

<組織の構成>

【1】研究体制

研究代表者はプロジェクトの総括、学内外への情報発信、状況に応じた予算の傾斜配分を行ない、重要テーマの進展を加速させるように配慮した。また、本プロジェクトの研究者は、2つの研究グループ(ホロ グラフィックメモリ構築グループ・ホログラフィ応用計測グループ)のいずれかに属し、それぞれの役割を担った。各グループにグループ長を置き、各研究者間の調整を行った。

【2】研究チーム間の連携状況

メモリ構築グループでは、高精度な樹脂流動の解明が必要であり、ホログラフィ応用計測グループの技術活用が重要である。ホログラフィ応用計測グループの導波路ホログラムを用いた流体計測では、微小領域でのホログラム再生メカニズムの解明が必要であり、メモリ構築グループの微細加工技術が必要である。このようにグループ間で連携して研究を進めた。

【3】研究支援体制

この研究プロジェクトのための、施設、実験室、実験機器の多くは構成する研究者の所属する学部・研 究科に依存している。運営面においては、大学から協力を得ている。

【4】共同研究機関等との連携状況

山口東京理科大学 鈴木 康一教授、結城 和久教授とも、定期的に打ち合わせを行い、緊密に研究を 進めた。

【5】研究プロジェクトの参加状況

平成 23 年度	研究者:12名、大学院生:約50名
平成 24 年度	研究者:11 名、大学院生:約 50 名
平成 25 年度	研究者:10 名、大学院生:約 50 名
平成 26 年度	研究者:10 名、大学院生:約 50 名
平成 27 年度	研究者:10 名、大学院生:約 50 名

(3)研究施設・設備等

<研究施設> 使用総面積:約200 m<sup>2</sup>、使用者数:約50名/年 <研究設備> 全反射エバネッセント蛍光顕微鏡(平成23年度導入)

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

利用状況:100 時間/年、使用者数:約10 名/年 ICP プラズマ装置 EIS-700(平成24年度導入) 利用状況:500 時間/年、使用者数:約10名/年 微小摩擦力測定装置(平成24年度導入) 利用状況:700 時間/年、使用者数:約20名/年 高速度 CCD カメラ(平成24年度導入) 利用状況:100 時間/年、使用者数:10名/年 高時間分解能ホログラム計測観察用光源システム(既存) 利用状況:150 時間/年、使用者数:10名/年

(4)研究成果の概要 ※下記、13及び14に対応する成果には下線及び\*を付すこと。

<成果の概要>

本プロジェクトの目標は、ホログラフィ技術によるメモリおよび流体計測技術の研究拠点形成(プロジェクト参加研究者の交流と若手研究者育成を含む)および各研究テーマの遂行である。以下にグループごとに 各研究項目について達成状況を記載した。

【1】ホログラフィ技術によるメモリおよび流体計測技術の拠点形成

①ホログラフィ技術によるメモリと流体計測技術の研究拠点としての認知度の向上

②研究者間のシナジー効果の発揮

③高度な人材の輩出

を目的に、一般公開での両グループの研究報告会を5回開催した。最終年度は、平成27年10月30日に 国際シンポジウムを開催した。これらの報告会あるいはシンポジウムを通して、メモリと計測分野の研究者 間のシナジー効果の促進はもちろんであるが、研究成果を背景として「東京理科大学 先端ホログラフィ技 術研究開発センター」の周知が進められた。それぞれの報告会には大学院生の積極的な参加を促し、分 野横断的交流能力と国際性を身に付けた高度な人材育成を心掛けた。その成果として、本プロジェクトに 所属する大学院生の英語論文の発表、国際学会での発表件数が大幅に増加する結果が得られた。さらに 国際会議での学生の受賞、あるいは各学会での本研究センター所属の研究者の受賞が増え、拠点形成 に大きく貢献した。

また、本プロジェクトの拠点形成の成果として、出版物への執筆が進められた。

i)シーエムーシー出版(2011 年)において、本センターメンバーの谷口教授が「ロール to ロール技術の 最新動向 -プロセス最適化への課題と解決策における UV ナノインプリントにおけるモールド作製と離型 性」、さらに同年「ナノインプリントの開発とデバイス応用」についてそれぞれの最新の成果を執筆した。

ii)講談社著書(2015 年)において本センターメンバーの由井教授が「高分子赤外・ラマン分光法」について最新の成果を執筆した。

iii) Wiley; 238 pages, 2013 において、本センターメンバーの谷口教授が「Nanoimprint Technology: Nanotransfer for Thermoplastic and Photocurable Polymers」を筆頭編集者として執筆した。

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

これらの刊行物によって、ホログラフィ技術によるメモリおよび流体計測技術の研究拠点としての認知度 を日本国内だけでなく、海外にも高めることができている。

さらに、本プロジェクトは設立当初よりメモリ構築グループにおける研究成果の産業化を念頭に進められ てきた。その結果、研究センターのスタートより特許出願が急増し、5年間で10件の特許出願を果たし、外 国出願も行われた。また、本研究センターのスタート時点より、本センターメンバーにおいて外部資金導入 (公的あるいは企業などとの共同研究)が急増し、5年間で年平均億単位の外部資金導入となっている。

以上示した特許出願あるいは外部資金導入の状況は、本研究センターが研究拠点として国内外で認知 されたことを示している。

このようなことから、「研究拠点を形成する」という当初の目的を達成することができたといえる。

【2】各グループの研究成果の概要

i)ホログラフィックメモリ構築グループ

① ホログラフィックメモリ用データ生成と転写 ROM の再生

<u>ホログラムの最適化から電子ビーム描画用マスクデータ生成まで一貫した設計手法を確立した(\*1,\*</u> 2)。位相型 DOE の設計手法として画素数の多い大規模な DOE の場合、Gerchberg-Saxton(GS)アルゴリ ズムが有効であることを見いだし、具体的にサンプル作製に適用して有効性を確認した。またホログラム ROM の再生光学系として開口多重方式を実現可能な光学系を確立した。これらの設計手法および再生光 学系は、具体的なサンプル作製と再生実験によりその有効性が検証できた。さらに 1Tbits/inch<sup>2</sup> の高密度 記録におけるピクセルサイズでの再生、振幅の多値記録がそれぞれ可能であることをシミュレーションおよ び実験によって明らかにした。多重記録については、種々の方式についてシミュレーションを行い、開口多 重方式が有効であることを見いだした。開口多重について多重化のデータパターンの作成ソフトウエアを 立ち上げ、原理確認として 2 多重の記録および再生実験を行った。実験の結果、再生像の分離を確認で き、方式の有効性を検証できた。多重化法は複数のホログラムを複合して8 階調の回折光学素子として記 録し、再生時にすべてのホログラムからの再生光から開口多重法で目的とするホログラム再生像のみを 分離する方式である。また、シミュレーションにより本方式で25~75多重の分離再生が可能であることを数 <u>値解析により検証できた。以上の結果を基に特許出願を行った(\*3)</u>。最終的には、ホログラムサイズ、1 ページビット数(微小ピクセルサイズ)、振幅多値記録再生、および4多重記録を実現し、1 Tbits/inch<sup>2</sup>の記 録密度を達成した。

## ② 真空中回転ステージの開発

真空中で ROM 原盤を回転させるために、軸受け部分に真空中でも蒸発しない<u>イオン液体を用いた回転</u> <u>ステージを設計、製作した(\*4)</u>。静圧型真空対応回転ステージで回転非同期振れ(NRRO)が 30nm 未満 を達成し、この値は、回転しながら電子ビーム露光を行うのに十分な性能である。さらに、実際に電子ビー ム露光装置内に回転ステージを導入し描画を行った結果、数 100nm のパターンが回転しながらの電子ビ ーム露光で描画可能なことが分かった。また、電子ビームの照射量を変えることにより深さも変化すること がわかり、<u>ホログラム ROM の原盤作製にも用いることが可能であることが分かった(\*5)</u>。

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

③ 電子ビーム露光法による原盤作製技術の確立と転写による ROM の作製

電子ビーム露光法を用いて、三次元のホログラフィックメモリ ROM の作製に成功した。電子ビームレジ ストに電子ビームを照射すると、照射量によって深さを変化させた窪みをナノオーダーで作製できる。ただ し正確に深さを変化させるには、レジストの選定と電子ビーム照射量の調整が必要であり、その最適化の 結果、設計値と得られた深さの誤差が 17nm 以下に抑えることが可能となった。この精度で<u>8階調のホログ</u> <u>ラム ROM 原盤を作製して、再生にも成功した(\*2)</u>。次に量産に向けた開発として、この原盤を用いてナノ インプリントリソグラフィにより転写し ROM を作製した。ナノインプリントリソグラフィは原盤に光硬化性樹脂 を滴下し基板を被せ、その上から紫外光を照射して樹脂を硬化させ、原盤と凹凸反転の樹脂製の複製形 状を得るという手法である。ここでは、原盤でホログラフィの再生ができているので、2 回転写させて樹脂製 の複製 ROM を作製した。その結果、複製 ROM でも再生可能なことがわかり、量産が可能であることが分 かった。また、サブ波長オーダーのピクセルサイズの ROM 作製も可能であり(\*6)、これによって、記録密 度が向上できた。

④ 原盤の耐久性向上のための離型層の形成と評価

ナノインプリントを行う際に、樹脂への繰り返し転写が可能になるように、離型層が必要である。ここで は、その評価方法と離型剤の種類による寿命の関係を調べた。フッ素系シランカップリング剤(離型剤)を シリコン(Si)モールド上に塗布し、ピンオンプレート型往復動摩擦試験機と赤外分光により評価を行った。 その結果、フッ素鎖が長い離型剤の場合、低い動摩擦係数が得られた(\*7)。このような傾向が見られた ので、ナノパターンを有するシリコン原盤を用いて離型剤による寿命の評価を行った。離型剤の種類は、フ ッ素鎖の長い離型剤と短い離型剤を用いた。評価方法は、ナノインプリントにより繰り返し光硬化性樹脂へ 転写して、原盤表面の接触角の変化と、エラー率の評価を行った。原盤はフッ素系コーティングが施されて いるので、撥水性があり、初期は110°くらいの接触角であるが、これが転写回数とともに徐々に接触角が 低くなっていった。しかし、これだけでは2種類の離型剤の優劣がつけがたく、引き続き、エラー率を評価し た。エラー率は、転写側のパターンにどれだけエラーが含まれているかを見た値で、1000回以上転写を 行い評価した。エラー率 0.0001%を越えた転写回数で寿命と判断する。その結果、フッ素鎖が長いほうがエ ラー率は低くなり、寿命も伸びることがわかった(\*8)。例としてフッ素鎖が短い方は 300 回、長い方は 400 回である。さらに、2種類の離型剤を混ぜると1400回の寿命が達成できた。また、ホログラム原盤は高さ が異なり、かつ、離型剤の塗布状況などをも把握する必要がある。このような測定のために、差動型微分 <u>干渉誘導ラマン顕微鏡の開発(\*9)</u>を行い、サブミクロンの構造を持つ原盤に関して、表面画像計測が行 えた。この手法も原盤の高さおよび離型層の評価には有効である。

⑤ 原盤寿命向上のための離型層の形成と評価

ホログラム ROM 原盤(Si)の寿命向上のため、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜の成膜を試みた。その結果、中間層を入れることで Si 上に強固にフッ素含有 DLC が成膜できることがわかった。また、<u>1000 回</u> の転写においても DLC 膜は剥がれず転写可能であることがわかった(\*10)。離型層として、シランカップ リングだけでなく、中間層を取り入れた DLC も有効であることがわかった。

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

以上の技術を結集した結果、1Tbits/inch<sup>2</sup>の記録密度を持つホログラフィックメモリ ROM 作製技術を確立 することができた。

ii)ホログラフィ応用計測グループ

① 導波路ホログラフィ計測技術の確立

界面付近での流体の流れを観察するために導波路ホログラムを用いた計測技術の確立についての進 捗は、MgF<sub>2</sub>の膜を製作しレイヤーTIRF法及びエバネッセント光を用いたホログラム法の校正において使 用可能となった。さらに最終年度では、メックスフロンを用いたナノステップを有する校正プレートの作製に <u>成功した(\*11)</u>。メックスフロン校正プレートに水をいれるとパターンが全く見えなくなってしまう。これはTI RF法及びエバネッセント光を用いたホログラム法の校正を水中での使用が可能であることを示している。 このパターンの高さをあらかじめ計測しておけば蛍光粒子の高さが正確に知ることができる。これによりTI RF法では3次元計測を可能にする校正曲線の取得に成功しており光軸方向の輝度値を劣化させることな く画像を取得できる。このプレートを用いてエバネッセント光を用いたホログラム法の校正にも成功しており PIVの<u>国際会議であるPIV2015においてアクセプトされた(\*12)</u>。これには、動的に粒子が動いていると ころも捕えられている。この導波路ホログラフィ計測技術により、サブミクロンでの流体計測が実現できた。

② ホログラム画像圧縮に関する研究

本研究課題では、ホログラフィによる流体計測に伴って発生する大量の画像データを、利便性を損ねる ことなく効率的に圧縮する手法の開発を目指す。この手法は、静止画像符号化の国際標準である JPEG 方式との間で画像データを無歪で変換できることを特徴とし、その制約条件の下で高い圧縮性能を達成す ることが克服すべき課題である。中間評価までの期間を、基本的なアイデアの実証フェーズと位置付け、 ベースとなるソフトウェアの実装と予備実験を実施した。そこで得られた知見に基づき、流体計測精度への 影響を無視できる画質を保ちつつ、圧縮率を最大化することを最終目標と定めた。特に、ハイスピードカメ ラで撮影された画像では時間方向の相関が極めて高いことに着目し、動画像符号化に一般的に採用され ている動き補償予測の技術の導入について重点的に取り組んだ。その結果、動画像フレームの符号化順 序を変更し、過去と未来の両方向から内挿的な予測を行う手法により、全体の圧縮率を約 6%改善できるこ とを明らかにしている。得られた成果の一部は国際会議論文(査読あり2編)(\*13,\*14)および国内会議 予稿(査読なし2編)(\*15,\*16)により公表済みである。

③ ホログラフィック PTV、UVP による円管内乱流の計測

ホログラフィック PTV により、実際に基礎的な流動場において流動計測を行い、この流れ場について UVP でも同様に流体計測を行った。これにより、ホログラフィック PTV の計測結果と UVP の計測結果の比 較を行うことを目標とする。 管内流において、ホログラフィック PTV と UVP による計測を実施し、計測結果 にはよい一致が見られた。光と音による流体計測を実施し比較でき、当初の目標は達成した。また、<u>国際</u> 会議論文(査読あり1編)(\*17)を発表済みである。

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

④ ホログラフィによる沸騰現象の観察

沸騰気泡は温度上昇も伴うため壁面近傍の気泡をとらえることは難しい。従って中間評価までは、変形 を伴わない単一気泡を生成し、ほぼ真球状態のマイクロバブルの上昇の計測を行い気泡自体の速度と周 囲の速度のトラッキングを同時に行えるようホログラム計測プログラムを開発し3次元可視化を行った。単 一気泡として電気分解によって生じる気泡を対象とした上昇バブルに関して発表され(\*18)、また光触媒 バブルの計測は国際会議で発表した(\*19)。さらにプログラムと計測方法をFC72などの沸騰実験に用 いられる冷媒中の気泡について適用した。

⑤ ホログラフィ計測用屈折率調合法の開発

屈折率調合法(Refractive Index Matching(IM)法)は、作動流体と管内部構造物の屈折率をマッチング させる手法である。このIM法を用いた進捗は以下のようになる。目標は、世界に先駆けてペブル充填層の 複雑 3 次元流動場を計測することを目的としている。特に本研究では、IM 法に DHPTV 法(Digital Holographic PTV)を組み合わせるため、非常に厳しい屈折率の調整が必要となる。Nal を用いた溶媒によ <u>るペブル計測はすでに成功している(\*20)</u>。 さらに水への応用のために<u>メックスフロン球を用いた可視化</u> <u>実験に成功した(\*21)。</u>容器内の水なし水ありのメックスフロン球に水をいれるとメックスフロン球越しに 背後のグラフの升目が歪まずに見える。またNalを用いるよりも扱いやすく、またアクリル球とも異なり透過 度が高いためクリアなホログラム像が得られ取得粒子数が増大した。

以上示したように、ホログラフィ応用計測グループは導波路ホログラフィ計測技術が確立され、サブミクロンでの流体計測を実現できた。

<優れた成果があがった点>

【1】ホログラフィックメモリ構築グループ

従来のホログラム ROM はフォトポリマーなどでの記録型ホログラムを転写する方法に依っている。この 方法は大量生産に向かず、また高密度化は雑音等の転写で 1 Tbits/inch<sup>2</sup> はとうてい困難であった。本プ ロジェクトでは、ホログラムメモリ ROM 作製において、ナノインプリント法により作製したスタンパにより大量 生産が可能であること、および当初より 1 Tbits/inch<sup>2</sup>の条件のもとで記録および再生を行い、その記録密 度の性能を確認できるレベルまで達したこと、また、高密度記録の転写性、離型性の確立の目途を得たこ とは、学術的にも産業的にも極めて大きな成果と考えられる。

【2】ホログラフィ応用計測グループ

本グループでは具体的には以下の成果を得た。

①水中においてメックスフロンナノステップを用いることにより輝度値を劣化させることなく画像を取得できたため、このプレートを用いてエバネッセント光を用いたホログラム法の校正が水中で可能となった。
 ②時間発展したホログラム画像圧縮において動画像フレームの符号化順序を変更し、過去と未来の両

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

方向から内挿的な予測を行う手法により、全体の圧縮率を約6%改善できることを明らかにした。 ③ペブル球をメックスフロンで作成することにより、流動媒体において水を使用できるため、従来法であ るNaIを用いるよりも扱いやすく、またアクリル球とも異なり透過度が高いためクリアなホログラム像が 得られ取得粒子数が増大した。

以上により、界面付近での流体の流れを観察するための導波路ホログラムを用いた計測技術が確立さ れたこと、マイクロ及びマクロスケールにおける既存のデジタルホログラム手法と、画像圧縮技術や屈折 率調整法などとを組み合わせることで、流動場の計測が可能となったことなど、学術的に極めて大きな成 果が得られた。また、流体計測の応用分野を格段に広げる大きな成果が得られた。

く課題となった点>

本プロジェクトでは、各要素、テーマが複雑に絡み合って進捗している。そのため、どこかのテーマが遅 れると全体が遅れてしまうという課題があった。これを防止するために緊密に連携を確認してプロジェクト を進行させた。その結果、ホログラム ROM については、媒体の作製におけるカッティングデータのシミュレ ーション技術および多重化法、真空中回転ステージ、電子ビーム露光法による原盤作製技術の確立と転 写、原盤の耐久性向上のための離型層、原盤寿命向上のための離型層の形成などホログラム ROM 作製 における一連のすべてのプロセスが連携されて高密度の記録および再生を達成できた。

<自己評価の実施結果と対応状況>

本プロジェクトの研究成果については、年1回の学内で開催される「総合研究院フォーラム」で成果報告 を行い、学内の研究者から評価を受けている。また年1回のプロジェクト成果の公開報告会を実施してい る。さらにセンターメンバーで活動状況の評価と調整を行い、同時に学内の評価結果を検討し、研究資源 の配分について年度ごとの臨機応変の調整を行っている。本プロジェクトに係る費用対効果については、 上記の「研究成果の概要および優れた成果があがった点」でも述べたように、十分な成果が上がっている ことから、費用対効果は高い。

<外部(第三者)評価の実施結果と対応状況>

本センターは、外部評価委員会を設置している。外部評価委員下記7名(大学:5名(内、理科大:2名)、 企業:2名)の方に委嘱した。

1.千葉大学大学院 工学研究科 伊藤智義教授
2.東京大学生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター 鹿園直毅教授
3.大阪大学大学院 工学研究科 芝原正彦教授
4.セイコーインスツル株式会社 高塚事業所 中島邦雄研究開発センター長
5.株式会社 ダイセル 研究統括部 三宅弘人氏
6 東京理科大学 工学部第一部 山本誠教授
7.東京理科大学 理学部第一部 石井行弘教授
報告会の内容および年報の査読等によって、本プロジェクトを総合的に評価して頂いている。評価会は

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

平成25年7月25日と平成27年7月29日と計2回行われた。双方とも評価結果は、A-(A、A-、B、B -、C の五段階評価中2番目に良い評価)であり、高い評価を受けた。また、評価委員から拠点としての外 部への発信が不足との指摘があり、これを受けて平成27年10月30日に国際シンポジウムを開催した。 このシンポジウムでは、国内外の著名な先生方を招待講演でお呼びし、積極的に交流を行った。また、本 センターの詳細に関しては、センター構成員全員によるポスターセッションを行い、国内外の来場者へアピ ールし、拠点として外部へ発信できた。

<研究期間終了後の展望>

ホログラフィ技術の研究拠点として、国内外から高い評価を受ける拠点形成が達成できたので、これまで培ってきたコミュニティ(人材交流)を通して、個々人が自立してホログラフィ技術を発展させてゆく予定である。

ホログラム ROM はホログラムメモリの実用可能性が高まっている中で、日本発のメモリ技術として市場 に展開される可能性がある。具体的に実用化、企業化を検討しており、必要となる特許出願を行った。特 許については今後さらに新たな特許を固めていくとともに、外国出願も行い、企業化の核となる技術の囲 い込みを図っていく予定である。

流体計測については、蛍光粒子を使わずにホログラムの原理を用いて、界面付近のサブミクロンオーダ ーの流体の挙動把握を可能にした。現状、界面付近の流れを詳しくみた研究発表はなく、大きな研究成果 と言える。本プロジェクトにより学内においての研究が進展したため、今後はさらにホログラフィ研究をベー スとしたホログラフィ流体計測技術に関する研究拠点の形成を推進していく。

<研究成果の副次的効果>

【1】ホログラフィメモリでは、ROM 作製における離型性の確保や離型性の評価技術が確立でき、これは、 ナノインプリント技術をはじめとするナノ製造工程に応用できると考えている。

【2】流体計測では、マイクロ領域のインデックスマッチングされた構造物周りのマイクロ流れの計測までも が可能となったため、今後、このような研究成果をもとに流体計測の応用分野を展開できることが可能とな った。

12 キーワード(当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。)

(1) <u>デジタルホログラム</u>	(2) <u>画像処理流速計</u>	(3) <u>屈折率調整法</u>
(4) 画像圧縮法	(5) <u>マイクロバブル</u>	(6) <u>ホログラムメモリ</u>
(7) ナノインプリント	(8) 電子ビーム露光	

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

13 研究発表の状況(研究論文等公表状況。印刷中も含む。) 上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには\*を付すこと。

#### <雑誌論文>

9.「13 研究発表の状況」については、複数の研究テーマがある場合は、各研究テーマごとに分けて作成してく ださい。また、「著者名」及び「発表者名」については、共著者又は共同発表者全員を記載してください。(当該テ ーマ参加者には下線を付してください。)

## 2015 年度(平成 27 年度:5 年目)学術論文

- Fabrication of nanostep for total internal reflection fluorescence microscopy to calibrate in water, Noriyuki Unno, Asao Maeda, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Takahiro Tsuji</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, <u>Microelectron. Eng. 133, pp 98–103, 2015</u>(査読有) \*11
- Fabrication of eight-step diffractive optical element for hologram-ROM, Yuta Shinonaga, Keito Ogino, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto, Jun Taniguchi, Microelectron</u>. <u>Eng. 141, pp 102–106, 2015 (査読有) \*2</u>
- 3. Removal of residual layer by liquid transfer imprint lithography using roll-to-roll UV-NIL, Masatoshi Moro, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 141, pp 112–116, 2015 (査読有)
- Evaluation of ultraviolet-nanoimprint-lithography release agent properties by using <u>TriboIndenter, Kota Funakoshi, Chiharu Tadokoro, Ian Thomas Clark, Toshiro Okawa, Jun</u> <u>Taniguchi, Shinya Sasaki, Microelectron. Eng. 141, pp 150-154, 2015(査読有) \*7</u>
- 5. Fabrication of a high-resolution mask by using variable-shaped electron beam lithography with a non-chemically amplified resist and a post-exposure bake, Hidetatsu Miyoshi, <u>Jun Taniguchi</u>, Microelectron. Eng. 143, pp 48–54, 2015 (査読有)
- 6. Diffraction model of peristrophic multiplexing with spherical reference wave, Shuhei Yoshida, Yosuke Takahata, Shuma Horiuchi, and <u>Manabu Yamamoto</u>, J. Opt. Soc. Am. A 32, pp. 224-227, 2015 (査読有)
- Development of a vacuum-compatible hydrodynamic spindle using an ionic liquid as a lubricant, Takao Okabe, Keita Utsumi, Kei Somaya, Masaaki Miyatake, Shigeka Yoshimoto, Jun Taniguchi, Shinya Sasaki, Precision Engineering, 40, pp. 124-130, 2015(査読有) \*4
- 8. Static Characteristics of Aerostatic Thrust Bearings With Multiple Porous Inlet Ports, Takako Hosokawa, Kei Somaya, Masaaki Miyatake and <u>Shigeka Yoshimoto</u>, Trans. ASME, J. of Tribology, 137-2, pp. 021702-1-021702-8, 2015 (査読有)
- 9. Nanosecond time-resolved microscopic spectroscopy for diagnostics of an atmospheric-pressure discharge plasma formed in aqueous solution, Motohiro Banno, Kenta Kanno, Yuu Someya, <u>Hiroharu Yui</u>, Japanese Journal of Applied Physics, 54, 066101, 2015 (査 読有)
- 10. 有機分子集合体を用いた極性・荷電ナノ空間の創出と内部水の新規な構造・物性の発現,<u>由井宏治</u>,鈴木光,森作俊紀,BUNSEKIKAGAKU, in press,第 64 巻第 4 号 2015.4(査読有)
- 11. ナノ粒子バイポーラス構造膜上での液滴沸騰/蒸発特性, <u>結城和久</u>, 杉浦鉄宰, <u>鈴木康</u>
   一, 日本機械学会論文集, 81 巻, 824 号, 2015(査読有)
- 12. <u>Three-dimensional flow measurement of a water flow in a sphere-packed pipe by digital</u> <u>holographic PTV, Shin-ichi Satake, Yusuke Aoyagi, Takuma Tsuda, Noriyuki Unno, Kazuhisa</u>

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Yuki, Fusion Engineering and Design, 98-99, pp. 1864-1867, 2015(査読有) \*21

- 13. Gas-Cooled Divertor Concept with High Thermal Conductivity Porous Media, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Makoto Hattori, <u>Koichi Suzuki</u>, Fusion Science and Technology, 2015 (掲載決定) (査読有)
- 14. Lossless Re-encoding of Holographic Images Stored in JPEG Format for 3D Flow Field Measurement, Takayuki Shikakura, Ichiro Matsuda, Yusuke Kameda, Susumu Itoh, Shin-ichi Satake, Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Imaging (ICAI 2015), pp.261-264, 2015 (査読有) \*14
- 15. Semi-Automatic 2D-3D Conversion of Still Images Using Partially Designated Depth Information, Yuki Nakamura, Ichiro Matsuda, Yusuke Kameda, Susumu Itoh, Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Imaging (ICAI 2015), pp.300-303,2015 (査読 有)
- 16. 誘導ラマン散乱光干渉計を用いたメゾスコピックスケールの分子識別的立体・断層画 像計測への試み,<u>由井宏治</u>,伴野元洋,近藤隆之,材料の科学と工学:日本材料科学会 誌 52, pp 22-25, 2015(査読有)
- 17. Spectroscopic study of the melting and reconstruction of sodium bis(2-ethylhexyl) sulfosuccinate (AOT) reverse micelles from their frozen states, Akira Suzuki, <u>Hiroharu Yui</u>, Journal of Colloid and Interface Science 443, pp 188–196, 2015 (査読有)
- 18. Electron beam mastering system using a vacuum-compatible hydrodynamic spindle, Takao Okabe, Keita Utsumi, Keito Ogino, Yuta Shinonaga, Masaaki Miyatake, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, <u>Jun Taniguchi, Shinya Sasaki</u>, Microelectron. Eng., 142, pp. 64-69, 2015 (査読有)
- 19. Durability of DLC release coating in ultraviolet nanoimprint lithography, <u>Jun Taniguchi</u>, Noriyuki Unno, <u>Yasuo Kogo</u>, Masaru Takahashi, Proc. of The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2015 年 10 月(査読有プロシーディング)
- 20. The depth control of circular grooves fabricated by rotational electron beam machining, Takao Okabe,Kai Ojima,Yuta Shinonaga,Noriyuki Unno,Masaaki Miyatake,Jun Taniguchi,Shigeka <u>Yoshimoto,Shinya Sasaki</u>, Proc. of The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2015 年 10 月(査読有プロシーディング)
- Digital holographic PTV for complicated flow in a water by two cameras and refractive index-matching method, Masataka Kuniyasu, Yusuke Aoyagi, Noriyuki Unno, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Yohji Seki, Optical Review, DOI 10.1007/s10043-016-0203-0, 2016 (査読有)
- 22. Threshold speed of instability of a herringbone-grooved rigid rotor with a bearing bush flexibly supported by straight spring wires, Kei Somaya, Koki Okubo, Masaaki Miyatake, <u>Shigeka</u> <u>Yoshimoto</u>, ASME TurboExpo 2015, pp. GT2015-43161, 2015 (査読有)
- 23. Development of direct gas injection system to atmospheric-pressure in-solution discharge plasma for plasma degradation and material syntheses, Motohiro Banno, Kenta Kanno, <u>Hiroharu Yui</u>, RSC Advances **6**, 16030-16036, 2016(査読有)
- 24. Structural Transition of *Bombyx mori* Liquid Silk Studied with Vibrational Circular Dichroism Spectroscopy, Toshinori Morisaku, Sho Arai, Kohzo Konno, Yu Suzuki, Tetsuo Asakura, <u>Hiroharu Yui</u>, Analytical Science **31**, 763–768, 2015(査読有)
- 25. Thermal Denaturation of Type I Collagen Fibrils Investigated with Vibrational Circular Dichroism Spectroscopy, Tosinori Morisaku, Yusuke Sohara, <u>Hiroharu Yui</u>, Kobunshi Ronbunshu **72**, 746–751, 2015 (査読有)

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 26. Two Stage Inter-frame Prediction using Pixel- and Block-wise Motion Compensation, Yusuke Kameda, Junpei Takeichi, Masaki Ishibashi, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of the 22nd International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP 2015), pp.145-148, 2015 (査読有)
- 27. 可変ブロックサイズ適応予測を用いた RGB カラー動画像の可逆符号化, 田嶋周, 亀田 裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 情報処理学会研究報告, Vol.2015-AVM-91, No.27, pp.1-5, 2015 (査読無)
- 28. ICAI 2015 レポート, <u>松田一朗</u>, 映像情報メディア学会誌, Vol.69, No.8, pp.873-878, 2015 (査読無)巻頭言 8K スーパーハイビジョン符号化への期待, <u>松田一朗</u>, NHK 技研 R&D, No.155, pp.2-3, 2016(査読無)
- 29. A Study on Image Sensor Communication Using 2D OFDM and QPSK, Hayata Tsukitani, Yusuke Kameda, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of the 19th International Workshop on Advanced Image Technology 2016 (IWAIT 2016), No.P.1B-8, pp.23-25, 2016 (査読有)
- 30. An Image Coding Method Using Recursive and Non-Recursive Type Intra Prediction, Yuta Ishida, Yusuke Kameda, Ichiro Matsuda, Susumu Itoh, Proceedings of the 19th International Workshop on Advanced Image Technology 2016 (IWAIT 2016), No.P.2A-3, pp.7-10, 2016 (査 読有)
- 31. SIMD implementation of Red-Black Gauss-Seidel Method for Optical Flow Computation with Numerical Stability, Taira Komatsuzaki, Yusuke Kameda, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of the 19th International Workshop on Advanced Image Technology 2016 (IWAIT 2016), No.P.2B-3, pp.9-12, 2016 (査読有プロシーディング)
- 32. Spatial run-length limited code for reduction of hologram size in holographic data storage, Shuhei Yoshida, Yosuke Takahata, Shuma Horiuchi, <u>Manabu Yamamoto</u>, Opt. Commun. 358, pp.103-107, doi:10.1016/j.optcom.2015.08.088, 2016(査読有).

## 2014年度(平成 26年度:4年目)学術論文

- 33. A study on in-situ observation of the micro flow of lubricant on the textured surface, M.Kai R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, Procedia Engineering, 68, 12-18,2014(査読有)
- Effect of Surface Texturing Arrangement for Improving Anti-Seizure Property of Lead-Free Copper Alloy, Y. Kuroiwa A. Amanov R. Tsuboi <u>S. Sasaki</u> S. Kato, Jurnal Teknoloji, 66,3, 81-89, 2014
- 35. Tribological Reactions of Ionic Liquids Under Vacuum Conditions, S. Kawada S. Watanabe Y. Kondo R. Tsuboi <u>S. Sasaki</u>, Tribology Letters, 54,3,309-315, 2014 (査読有)
- 36. Super resolution technique for sub-100 nm nanoimprint mold via mechanical deformation method, Toru Miebori, Noriyuki Unno, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 123, pp 38-42, 2014 (査読有)
- 37. Electron beam direct writing of nanodot patterns on roll mold surfaces by electron beam on–off chopping control, Masahi Saito, <u>Jun Taniguchi</u>, Microelectron. Eng. 123, pp 89-93, 2014 (査 読有)
- 38. Defect analysis and lifetime evaluation of a release-coated nanoimprint mold, Masanori Okada, Daisuke Yamashita, Noriyuki Unno, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 123, pp 117–120, 2014 (査読有) \*8

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- <u>Computer generated hologram-ROM fabrication and duplication by EBL and UV-NIL, Keito</u> <u>Ogino, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, Jun Taniguchi, Microelectron.</u> <u>Eng. 123, pp 163–166, 2014</u>(査読有) \*6
- 40. Development of release agent-free replica mould material for ultraviolet nanoimprinting, Yuma Otsuka, Shin Hiwasa, <u>Jun Taniguchi</u>, Microelectron. Eng. 123, pp 192–196, 2014 (査読有)
- 41. Fabrication of double-sided self-supporting antireflection-structured film by ultraviolet nanoimprint lithography, Nurhafizah Binti Abu Talip[a]Yusof and Jun Taniguchi, Jpn. J. Appl. Phys. 53, pp 06JK03-1 06JK03-5, 2014 (査読有)
- 42. Thermal roll-to-roll imprinted nanogratings on plastic film, Noriyuki Unno, Tapio Mäkelä, and <u>Jun Taniguchi</u>, J. Vac. Sci. & Technol. B 32, pp 06FG03-1 06FG03-5, 2014 (査読有)
- 43. Fabrication of antireflection structure film by roll-to-roll ultraviolet nanoimprint Lithography, Masatoshi Moro, <u>Jun Taniguchi</u>, and Shin Hiwasa, J. Vac. Sci. & Technol. B 32, pp 06FG09-1 - 06FG09-9, 2014 (査読有)
- 44. Numerical Model of Radical Photopolymerization Based on Interdiffusion, Shuhei Yoshida, Yosuke Takahata, Shuma Horiuchi, Hiroyuki Kurata, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Int. J. Polym. Sci. 2014, 243895, 2014 (査読有)
- 45. Numerical ray tracing method for an eccentric radial gradient-index rod lens, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, J. Opt. Soc. Am. A 32, pp. 2131-2134, 2014 (査読 有)
- 46. Fast GPU-based ray tracing in radial GRIN lenses, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Appl. Opt. 53, pp. 4343-4348, 2014 (査読有)
- 47. Shift-Peristrophic Multiplexing for High Density Holographic Data Storage, Zenta Ushiyama, Hiroyuki Kurata, Yu Tsukamoto, Shuhei Yoshida and <u>Manabu Yamamoto</u>, Appl. Sci. 4, pp. 148-157, 2014 (査読有)
- 48. Static characteristics of a water-lubricated hydrostatic thrust bearing using a membrane restrictor, Makoto Gohara, Kei Somaya, Masaaki Miyatake, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, Tribology International, 75, pp. 111-116, 2014 (査読有)
- 49. Static characteristics of small aerodynamic foil thrust bearings operated up to 350,000 r/min, Kei Somaya, Tatsuma Kishino, Masaaki Miyatake, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, Journal of Engineering Tribology, 228-9, pp. 928-936, 2014 (査読有)
- 50. Dehydration-induced Initial Conformational Change of Hydrated Proteins Detected by the Changes in Vibrational Circular Dichroism Activity, Toshinori Morisaku, Sho Arai, <u>Hiroharu</u> <u>Yui</u>, Analytical Sciences 30, pp 961–969, 2014(査読有)
- 51. 不凍糖タンパク質によって成長抑制された新しい氷結晶形態,森作俊紀,北澤卓也,鈴 木光,<u>由井宏治</u>,高分子論文集 71, pp 554–561, 2014(査読有)
- 52. Crystallization of Confined Water Pools with Radii Greater Than 1 nm in AOT Reverse Micelles, Akira Suzuki, <u>Hiroharu Yui</u>, Langmuir 30, pp 7274–7282, 2014(査読有)
- 53. <u>Three-dimensional flow measurement of a sphere-packed pipe by a digital hologram and refractive index-matching method, S. Satake, Y. Aoyagi, T. Tsuda, N. Unno, K. Yuki, Fusion Engineering and Design, 89, pp. 1064-1067,2014(査読有) \* 20</u>
- 54. Measurements of flow distribution in a thin resin layer during ultraviolet nanoimprint lithography by means of digital holographic particle-tracking velocimetry, Noriyuki Unno, <u>Shin-ichi Satake</u>, Jun Taniguchi Microelectronic Engineering 123, pp 187-191,2014(査読有)

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 55. Subcooled Boiling with Microbubble Emission : Effect of Roughness of Heating Surface, Chen Yan, <u>Kazuhisa Yuki</u> and <u>Koichi Suzuki</u>, Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, Paper No.53, 2014 (査読有)
- 56. Subcooled Boiling with Microbubble Emission: Application to High Heat Flux Cooling Technology in Power Electronics, <u>Koichi Suzuki</u>, <u>Kazuhisa Yuki</u> and Chen Yan, Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, Paper No.74, 2014 (査読有)
- 57. Heat Transfer Performance of High Velocity Impinging Jet in High Thermal Conductivity Porous Media, M. Hattori, <u>K. Yuki</u> and <u>K. Suzuki</u>, Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, Paper No.113, 2014 (査読有)
- 58. 数値的安定性を保証したシーンフロー推定法, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 映像情報メディア学会誌, Vol.68, No.7, pp.J292-J298, 2014(査読有)
- 59. Coefficient-Wise Intra Prediction for DCT-Based Image Coding, <u>Ichiro Matsuda</u>, Yusuke Kameda, Susumu Itoh, Proceedings of 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2014), pp.196-200, 2014(査読有)
- 60. Numerically Stable Estimation of Scene Flow Independent of Brightness and Regularizer Weights, Yusuke Kameda, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2014), 2014(査読有)
- 61. Lossless Coding of RGB Color Video with Spatiotemporal Partitioning in Predictor Design, Shu Tajima, Yusuke Kameda, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of 2014 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2014), SS2-01, pp.91-94, 2014(査読 有)
- 62. Example-Based Context-Adaptive Probability Modeling for Lossless Image Coding, Naoya Nakajima, Yusuke Kameda, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of 2014 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2014), SS2-02, pp.95-98, 2014 (査読 有)
- 63. Region-Oriented Depth Map Coding Based on Voronoi Diagrams, Hironao Abe, Yusuke Kameda, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of 2014 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2014), SS2-03, pp.99-102, 2014(査読有)
- 64. 私の研究開発ツール—第 77 回— 超高精細・高色域標準画像, <u>松田一朗</u>, 正岡顕一郎, 池川秀彦, 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, No. 8, pp.643-647, 2014(査読無)

## 2013 年度(平成 25 年度:3年目)学術論文

- 65. The Influence of Micro-Scale Dimples and Nano-Sized Grains on the Fretting Characteristics Generated by Laser Pulses, A.Amanov T.Watabe <u>S.Sasaki</u>, JOURNAL OF NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY, 13, 12, 8176-8183, 2013 (査読有)
- 66. Molecular Behavior of Room-temperature Ionic Liquids under Lubricating Condition, S.Watanabe K.Takiwatari M.Nakano K.Miyake R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, TRIBOLOGY LETTERS, 1, 6, 2013(査読有)
- 67. Tribological Properties of Ionic Liquids, Y.Kondo T.Koyama <u>S.Sasaki</u>, Ionic Liquids New Aspects for the Future, 127, 141, 2013 (査読有)
- 68. Tribological properties of aluminium12 wt% silicon alloy surface treated with dispersed hard particles during sliding against different steels, Takuya KAWASE Shinji KATO Takashi KOBAYASHI Shinya SASAKI, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

MECHANICAL ENGINEERS PART J-JOURNAL OF ENGINEERING TRIBOLOGY, 227,5, 423-432, 2013 (査読有)

- 69. Tribo-Film Formation of Lubricant Additives on Cr-Plated Surface Sliding Against Nitrile Butadiene Rubber, H.Oe R.Tsuboi S.Kato <u>S.Sasaki</u>, Tribology Letters, 51, 2, 253-260, 2013 (査読有)
- 70. Tribological Performance of Halogen-Free Ionic Liquids as Lubricants of Hard Coatings and Ceramics, Y.Kondo T.Koyama R.Tsuboi M.Nakano K.Miyake <u>S.Sasaki</u>, Tribology Letters, 51, 2, 243-249, 2013 (査読有)
- 71. Friction and Fretting Wear Characteristics of Different Diamond-Like Carbon Coatings Against Alumina in Water-Lubricated Fretting Conditions, T.Watabe A.Amanov R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 13, 12, 8167-8175, 2013 (査読有)
- 72. イミダゾリウム系イオン液体の腐食摩耗に対する水の影響, 渡部誠也 中野美紀 三宅 晃司 坪井涼 佐々木信也, 日本機械学会論文集(C2編),2013(査読有)
- 73. Dwell time adjustment for focused ion beam machining, <u>Jun Taniguchi</u>, <u>Shin-ichi Satake</u>, Takaki Oosumi, Akihisa Fukushige, and <u>Yasuo Kogo</u>, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 307, 248-252, 2013 (査読有)
- 74. Correlation between Optical Properties and Hardness of Diamond-Like Carbon Films, Masanori HIRATSUKA, Hideki NAKAMORI, <u>Yasuo KOGO</u>, Masayuki SAKURAI, Naoto OHTAKE, and Hidetoshi SAITOH, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 7(2), 187-198, 2013 (査読有)
- 75. Extraordinary deposition rate of diamond-like carbon film using HIPIMS technology, Masanori Hiratsuka, Akiyoshi Azuma, Hideki Nakamori, <u>Yasuo Kogo</u>, Ken Yukimura, Surface and Coating Technology, 229, 46-49, 2013 (査読有)
- 76. Fabrication of self-supporting antireflection-structured film by UV–NIL, Nurhafizah Binti Abu Talip[a]Yusof, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 110, pp 163-166, 2013 (査読有)
- 77. Super-resolution technique for nanoimprint mold using elastic UV-curable resin, Noriyuki Unno, <u>Shin-ichi Satake, Jun Taniguchi</u>, Microelectron. Eng. 110, pp 167-172, 2013 (査読有)
- 78. Fabrication of antireflection structure with antifouling-effect surface by ultraviolet nanoimprint lithography, Keita Yajima, Kaoru Adachi, Yasuhisa Tsukahara, <u>Jun Taniguchi</u>, Microelectron. Eng. 110, pp. 188-191, 2013 (査読有)
- 79. Fabrication of high-aspect-ratio pattern via high throughput roll-to-roll ultraviolet nanoimprint lithography, Hiroshi Yoshikawa, Jun Taniguchi, Go Tazaki, Toshiyuki Zento, Microelectron. Eng. 112, pp 273-277, 2013 (査読有)
- 80. <u>Three-dimensional hologram-read-only memory duplication by nanoimprint lithography</u>. <u>Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, Hideaki Akamatsu, Manabu Yamamoto, Shin-ichi Satake, Jun</u> <u>Taniguchi, J. Vac. Sci. Technol. B 31, pp 06FB01 - 06FB01-5, 2013 (査読有) \*1</u>
- 81. Multi-Dimensional Shift Multiplexing Technique with Spherical Reference Waves, Shuhei Yoshida, Takaaki Matsubara, Hiroyuki Kurata, Shuma Horiuchi, and <u>Manabu Yamamoto</u>, IEICE Trans. Electron. E96-C, pp. 1520-1524, 2013 (査読有)
- 82. High-Density Holographic Data Storage Using Three-Dimensional Shift Multiplexing with Spherical Reference Wave, Shuhei Yoshida, Hiroyuki Kurata, Shohei Ozawa, Kaito Okubo, Shuma Horiuchi, Zenta Ushiyama, <u>Manabu Yamamoto</u>, Shogo Koga, and Asato Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 09LD07, 2013 (査読有)

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 83. Simulation of modulation transfer function using a rendering method, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Opt. Express 21, pp. 7373-7383, 2013 (査読有)
- 84. Running performance of an aerodynamic journal bearing with squeeze film effect, Tomohiro Shou, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, Tadeusz Stolarski, International Journal of Mechanical Sciences, 77, pp. 184-193, 2013 (査読有)
- 85. Vertical attractive force generated in a noncontact chuck using ultrasonic vibration, <u>Shigeka</u> <u>Yoshimoto</u>, Tomohiro Shou, Kei Somaya, Precision Engineering, 37-4, pp.805-811, 2013 (査 読有)
- 86. Microscopic Optical Discharge Cell for Micro-Spectroscopic Measurements of Plasma in Solutions and Its Chemical-contrasted Imaging, <u>Hiroharu Yui</u>, Yuu Someya, Yuta Kusama, Kenta Kanno, Hotaka Takakuwa, BUNSEKIKAGAKU 62, pp 19-24, 2013(査読有)
- 87. Fine structures in vibrational circular dichroism spectra of chiral molecules with rotatable hydroxyl groups and their application in the analysis of local intermolecular interactions, Kohzo Konno, Isamu Shiina, <u>Hiroharu Yui</u>, Journal of Molecular Structure 1035, pp 260–266, 2013 (査読有)
- 88. Molecular dynamics simulation of Ga+ ion collision process, <u>S. Satake</u>, K. Ono, M. Shibahara, <u>J. Taniguchi</u>, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 307, 235-239, 2013 (査 読有)
- 89. Divertor Cooling With Sub-Channels-Inserted Metal Porous Media (Effects of the Sub-Channel volume and location on Heat Transfer Characteristics), <u>Kazuhisa Yuki</u>, Hidetoshi Hashizume, Saburo Toda, Akio Sagara, Fusion Science and Technology, vol. 64, no. 2, pp. 325 330, 2013 (査読有).
- 90. <u>Three dimensional holographic-PTV measurement of a rising microbubble caused by photocatalytic reaction, Noriyuki Unno, Takuma Tsuda, Shin-ichi Satake and Koichi Suzuki, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, 2013年6月16日-20日, Lisbon, Portugal (査読有) \*19</u>
- 91. Microbubble Emission Boiling of Binary Mixtures (Advanced cooling technology for future power electronics),<u>Koichi Suzuki</u>, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Gang Chen (Xi-an Jiao Tong Univ.), Cyungpyo Hong (Kagoshima Univ.), ICMF-2013;International Conference on Multiphase Flow, ICMF2013-946, 2013. (査読有)
- 92. Visualization of a rising microbubble position and flow surrounding the microbubble caused by phtocatalytic reaction, N. Unno, T. Tsuda, <u>S. Satake</u> and <u>K. Suzuki</u>, The 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2013年11月1日~5日, Yamaguchi, Japan, pp. 224-227. (査読無)
- 93. Subcooled Boiling with Microbubble Emission (Application for high heat flux cooling device in Power electronics), <u>Koichi Suzuki</u>, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Yen Chen, Proceedings of the 9<sup>th</sup> UK-J Japan Seminar on Multi-Phase Flow, UKJ2013, 2013. (査読無)
- 94. Subcooled Boiling of Water Mixture of Anti-Freezing Liquid with Microbubble Emission, <u>Koichi Suzuki</u>, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Hiroshi Kawamura, Haruhiko Ohta, Yoshiyuki Abe, Proceedings of ITTWS2013 on Two-Phase Systems for Ground and Space, ITTWS2013, 2013. (査読無)

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 95. 時空間予測と色信号間予測を統合したカラー動画像符号化方式, 増川裕樹, 宮本真生, 深井寛修, 松田一朗, 伊東 晋, 映像情報メディア学会誌, Vol.67, No.8, pp.J306--J309, 2013(査読有)
- 96. Interpolative Intra Prediction by Adapting Processing Order in Block-Based Image Coding, Ichiro Matsuda, Yosuke Ohtake, Shinta Mochizuki, Hironobu Fukai, Susumu Itoh, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2013), pp.1646-1650, 2013 (査読有)
- 97. Simplified Probability Modeling of DCT Coefficients for Lossless Re-encoding of MPEG-1 Video, Nobutoshi Sugai, <u>Ichiro Matsuda</u>, Yusuke Kameda, Susumu Itoh, Proceedings of 2013 International Workshop on Smart Info-Media System in Asia (SISA 2013), SS-AVM-1, pp.177-179, 2013 (査読有)
- 98. Visual Quality Enhancement for the Image Coding Scheme Allowing Lossless Conversion to JPEG Bitstreams, Riku Tsuto, <u>Ichiro Matsuda</u>, Yusuke Kameda, Susumu Itoh, Proceedings of 2013 International Workshop on Smart Info-Media System in Asia (SISA 2013), SS-AVM-1, pp.180-183, 2013 (査読有)
- 99. 手持ちカメラとカラー点群マーカを用いた三次元モデリングシステム, 衣川彰, <u>松田</u> 一朗, 画像ラボ, Vol. 24, No. 11, pp. 53-59, 2013 (査読無)
- 100. Holographic Image Compression Utilizing a JPEG Framework for 3D Flow Field Measurements, Yoshiaki Natori, Kazuya Tashiro, Hironobu Fukai, Ichiro Matsuda, Susumu Itoh, Mei Nagashima, Tsuyoshi Tsutsuda, Shin-ichi Satake, Proceedings of 2013 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT 2013), pp.152-157, 2013 (査読有) \*13

#### 2012 年度(平成 24 年度: 2 年目)学術論文

- 101. Lubricity of halogen-free ionic liquids for hard coatings, <u>S.Sasaki</u>, Y.Kondo H.Koyama R.Tsuboi, Proceedings of 18th International Colloquim Tribology, 161, 2012(査読有)
- 102. Tribological Properties of Spark-Plasma-Sintered ZrO2(Y2O3)Al2O3?BaxSr12xSO4 (x 5 0.25 0.5 0.75)Composites at Elevated Temperature, Yu-Feng Li, Jia-Hu Ouyang, <u>Shinya</u> <u>Sasaki</u>, TRIBOLOGY LETTERS, 45, 291-300, 2012 (査読有)
- 103. Effects of Applied Heat and Stress on Stractural Changes of DLC Film, Yuuki TOKUTA Masahiro KAWAGUCHI Aya SHIMIZU Shinya SASAKI, Tribology Online,7, 3, 119-126, 2012(査読有)
- 104. Size effect on deformation mechanism of nanopillars by FIB-CVD using double cantilever testing, Yoji Shibutani, Takuya Nakano, Hiro Tanaka, <u>Yasuo Kogo</u>, Journal of Materials Research, 27 (3), 521-527, 2012 (査読有)
- 105. Three-dimensional measurements of UV-imprint process by micro-digital holographic-PTV, <u>Shin-ichi Satake</u>, Jun Taniguchi, Takahiro Kanai, Noriyuki Unno, Microelectron. Eng. 97, pp 51-54, 2012 (査読有)
- 106. A technique for transferring metal nano patterns from a plastic replica mold by using a metal oxide release layer, Noriyuki Unno, Hironobu Tamura, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 97, pp 72-76, 2012 (査読有)
- 107. Fabrication of roll mold using electron-beam direct writing and metal lift-off process, Hiroki Maruyama, Noriyuki Unno, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 97, pp 113-116, 2012 (査読有)
- 108. Lifetime evaluation of release agent for ultraviolet nanoimprint lithography, Daisuke

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Yamashita, <u>Jun Taniguchi</u>, Hokuto Suzuki, Microelectron. Eng. 97, pp 109-112, 2012(査読有) 109. Improving the lifespan of the cantilever during electron assisted AFM lithography, Takao

- Inoue, Jun Taniguchi, Toshihiko Ochi, Microelectron. Eng. 98, pp 288-292, 2012(査読有) 110. High-density pattern transfer via roll-to-roll ultraviolet nanoimprint lithography using replica
- mold, <u>Jun Taniguchi</u>, Hiroshi Yoshikawa, Go Tazaki and Toshiyuki Zento, J. Vac. Sci. Technol. B 30, pp 06FB07-1 - 06FB07-5, 2012(査読有)
- 111. Application and evaluation of quasi-Monte Carlo method in illumination optical systems, Shuhei Yoshida, Shuma Horiuchi, Zenta Ushiyama, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Opt. Express 20, pp. 9692-9697, 2012 (査読有)
- 112. Ultrahigh-Speed Micro-Milling End Mill with Shank Directly Supported by Aerostatic Bearings, Fumitaka NISHIKAWA, <u>Shigeka YOSHIMOTO</u>, Kei SOMAYA, JOURNAL OF ADVANCED MECHANICAL DESIGN SYSTEMS AND MANUFACTURING, 6-6, pp. 979-988, 2012 (査読有)
- 113. Direct numerical simulation of turbulent mixed convection in a vertical channel in a wall-normal magnetic field, <u>Shin-ichi Satake</u>, Kazuki Sone, Keito Furumi, Tomoaki Kunugi, Fusion Engineering and Design 87, pp 798-802, 2012 (査読有)
- 114. Optimizations of a GPU accelerated heat conduction equation by a programming of CUDA Fortran from an analysis of a PTX file, <u>Shin-ichi Satake</u>, Hajime Yoshimori, Takayuki Suzuki, Computer Physics Communications, Volume 183, Issue 11, pp. 2376-2385, 2012(査読有)
- 115. MHD turbulent flow with buoyancy by DNS, <u>S. Satake</u>, K.Sone, A. Sagara, T.Kunugi, MAGNETOHYDRODYNAMICS Vol. 48, No. 1, pp. 25-30, 2012(査読有)
- 116. Development of Functional Porous Heat Sink for Cooling High-Power Electronic Devices, <u>Kazuhisa Yuki</u>, <u>Koichi Suzuki</u>, Transactions of The Japan Institute of Electronics Packing, vol. 5, no.1, pp. 69-74, 2013 (査読有)
- 117. High Heat Flux Cooling Technology for Power Electronics (Subcooled Boiling of Water Mixture of Antifreez Coolants), <u>K. Suzuki</u>, K. Yuki, G. Chen and C. Hong, Proceedings of the ISTP23, Electronic Flash Media, paper No.222, 2012. (査読有)
- 118. 平均値座標に基づいた適応イントラ予測の検討, <u>松田一朗</u>, 望月慎太, 青森 久, 伊東 晋, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J95-D, No.9, pp.1658-1660, 2012(査読有)
- 119. Lossless Image Coding by Cellulear Neural Networks with Backward Error Propagation Learning, Keisuke Takizawa, Seiya Takenouchi, Hisashi Aomori, Tsuyoshi Otake, Mamoru Tanaka, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2012: A part of WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence), pp.303-308, 2012 (査読有)
- 120. An Image Approximation Method Using Deformable Continuous Functions, Takahiro Shimizu, Hisashi Aomori, <u>Ichiro Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA 2012), pp.419-424, 2012 (査読有)
- 121.講座:基礎からの画像符号化[第 5 回]フレーム内予測, <u>松田一朗</u>, 映像情報メディ ア学会誌, Vol. 67, No. 3, pp.240-243, 2013(査読無)
- 122. 平均値座標に基づいた適応イントラ予測方式, 望月慎太, <u>松田一朗</u>, 深井寛修, 伊東 晋, 河村 圭, 内藤 整, 情報処理学会研究報告, Vol.2012-AVM-77, No.12, pp.1-6, 2012 (査 読無)

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 123.手持ちカメラと点群マーカを用いた 3 次元モデリングシステム, 衣川 彰, <u>松田一朗</u>, 深井寛修, 伊東 晋, 情報処理学会研究報告, Vol.2012-AVM-79, No.5, pp.1-6, 2012(査読 無)
- 124.部分的な奥行き指定に基づく映像コンテンツの疑似3次元化,成田祐介,松田一朗,深 井寛修,伊東 晋,電子情報通信学会技術研究報告,Vol.112, No.335, pp.53-58, 2012(査読 無)
- 125.動き補償と時空間フィルタによる低照度映像の画質改善,水田辰也,<u>松田一朗</u>,深井 寛修,伊東晋,情報処理学会研究報告, Vol.2013-AVM-80, No.4, pp.1-6, 2012(査読無)

#### 2011 年度(平成 23 年度:1年目)学術論文

- 126. Extraordinary deposition-rate of diamond-like carbon (DLC) film using HIPIMS technology, Masanori Hiratsuka, Akiyoshi Azuma, Hideki Nakamori, <u>Yasuo Kogo</u>, Ken Yukimura, Proceedings of 11th International Workshop on Plasma Based Ion Implantation & Deposition, (2011.9) on CD-ROM (R-110717) (査読無し)
- 127. Fabrication of less than 20-nm-diameter nanodot arrays using inorganic electron beam resist and post exposure bake, <u>Jun Taniguchi</u>, Testuro Manabe, Kiyoshi Ishikawa, INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMATION TECHNOLOGY 5, pp 349-352, 2011 (査読有)
- 128. Degradation of release layer on high aspect ratio mold by contact angle measurement, Junki Takahashi, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 88, pp 2141-2144, 2011 (査読有)
- 129. Fabrication of a seamless roll mold using inorganic electron beam resist with post exposure bake, Noriyuki Unno, Jun Taniguchi, and Kiyoshi Ishikawa, J. Vac. Sci. Technol. B 29, pp 06FC06-1 06FC06-4, 2011 (査読有)
- 130. Macro-optical inspection method for deterioration evaluation of release-coated mold surfaces for nanoimprint lithography, <u>Jun Taniguchi</u>, Junki Takahashi, Mitsuru Uda, Atushi Kohayase, and Kenichi Kotaki, J. Vac. Sci. Technol. B 29, pp 06FC02-1 06FC02-4, 2011 (査読有)
- 131. Fabrication of the metal nano pattern on plastic substrate using roll nanoimprint, Noriyuki Unno, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 88, pp 2149-2153, 2011 (査読有)
- 132. Transparent Roll Mold Fabrication Method and Transfer to Photo-curable Polymer, Noriyuki Unno and Jun Taniguchi, J. Photopolym. Sci. Technol. 24, pp 57-62, 2011 (査読有)
- 133. Large-diameter roll mold fabrication method using a small-diameter quartz roll mold and UV nanoimprint lithography, <u>Jun Taniguchi</u>, Noriyuki Unno, and Hiroki Maruyama, J. Vac. Sci. Technol. B 29, pp 06FC08-1 06FC08-5, 2011 (査読有)
- 134. Performance Evaluation of GRIN Lenses by Ray Tracing Method, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, Zenta Ushiyama, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Opt. Quant. Electron. 42, pp. 81-88 (2011). (査読有)
- 135. Numerical calculation and experimental verification of static and dynamic characteristics of aerostatic thrust bearings with small feedholes, Uichiro NIshio, Kei Somaya, <u>Shigeka</u> <u>Yoshimoto</u>, Tribology International, 44-12, pp. 1790-1795, 2011 (査読有)
- 136. Numerical Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Water Hydrostatic Porous Thrust Bearings, Y.Nishitani, <u>S Yoshimoto</u>, K Somaya, Int. J. of Autometion Tech., 5-6, pp. 773-779, 2011 (査読有)
- 137. Special-purpose computer for Particle Image Velocimetry, <u>Shin-ichi Satake</u>, Gaku Sorimachi, Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Ito, Computer Physics Communications, Volume 182, Issue 5,

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

pp. 1178-1182, 2011(査読有)

- 138. Three-dimensional simultaneous measurements of micro-fluorescent-particle position and temperature field via digital Hologram, <u>Shin-ichi Satake</u>, Takafumi Anraku, Fumihiko Tamoto, Kazuho Sato, Tomoaki Kunugi Microelectronic Engineering 88, pp 1875-1877, 2011 (査読有)
- 139. Detection of microbubble position by a digital hologram, <u>Shin-ichi Satake</u>, Yukihiro Yonemoto, Tadashi Kikuchi, Tomoaki Kunugi, Applied Optics, Vol. 50 Issue 31, pp.5999-6005, 2011 (査読有)
- 140. DNS of MHD Turbulent Flow with Buoyancy, <u>Shin-ichi Satake</u>, Keito Furumi, Hidenori Chikamasa and Tomoaki Kunugi, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 2, pp.90-94, 2011 (査読有)
- 141. Matched Refractive-index PIV Visualization of Complex Flow Structure in a 3-Dimentionally Connected Dual Elbow, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Shunsuke Hasegawa, Tsukasa Sato, Hidetoshi Hashizume, Kosuke Aizawa, Hidemasa Yamano, Nuclear Engineering and Design, vol. 241, pp. 4544-4550, 2011 (査読有).
- 142. Sub-channels-inserted Porous Evaporator for Efficient Divertor Cooling, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Hidetoshi Hashizume, Sabro Toda, Fusion Science and Technology, vol. 60, pp. 238-242, 2011 (査読有)
- 143. Unsteady Elbow Pipe Flow to Develop a Flow-Induced Vibration Evaluation Methodology for Japan Sodium-Cooled Fast Reactor, Hidemasa YAMANO, Masaaki TANAKA, Takahiro MURAKAMI, Yukiharu IWAMOTO, <u>Kazuhisa YUKI</u>, Hiromi SAGO and Satoshi HAYAKAWA, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 48, no. 4, pp. 677-687, 2011 (査読有).
- 144. Application of Boiling Heat Transfer to High Heat Flux Cooling Technology in Power Electronics, <u>Koichi Suzuki</u>, Kazuhisa Yuki, Masataka Mochizuki, Transaction of the Institute of Electronics Packaging, Vol.4, No.1 巻 127-133 頁, 2011. (査読有)
- 145. Subcooled Boiling with Microbubble Emission; On Mechanism of MEB Generation, <u>Koichi</u> <u>Suzuki</u>, Kazuhisa Yuki, Cyungpyo Hong, Proceedings of the 22nd Intertnational Symposium on Transport Phenomena, Paper No. 106 巻, 2011. (査読有)
- 146.イントラ予測と算術符号を用いた JPEG 画像のロスレス再符号化, 松田一朗, 橋本峻 弥, 須田貴志, 池田 悠, 青森 久, 伊東 晋, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-D, No.8, pp.1486-1495, 2011(査読有)
- 147. Lossless Image Coding by Cellulear Neural Networks with Minimum Coding Rate Learning, Keisuke Takizawa, Seiya Takenouchi, Hisashi Aomori, Tsuyoshi Otake, Mamoru Tanaka, <u>Ichiro</u> <u>Matsuda</u>, Susumu Itoh, Proceedings of the 2011 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2011), pp.33-36, 2011 (査読有)
- 148. Rate-Distortion Optimized Image Coding Allowing Lossless Conversion to JPEG Compliant Bitstreams, <u>Ichiro Matsuda</u>, Shunya Hashimoto, Hiroyuki Koike, Hisashi Aomori, Susumu Itoh, Proceedings of 19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2011), pp.574-578, 2011 (査読有)
- 149.形状可変な連続関数群を用いた画像近似の試み,清水貴裕,青森 久,<u>松田一朗</u>,伊東 晋,電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.19, pp.25-30, 2011(査読無)
- 150. PSOによるロスレス画像符号化のための CNN 予測器の符号化レート最小化学習法, 瀧 澤恵介, 竹之内星矢, 青森 久, 大竹 敢, 田中 衛, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 電子情報通信学

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

会技術研究報告, Vol.111, No.106, pp.119-124, 2011(查読無)

- 151.JPEG 準拠のビットストリームに可逆変換可能な画像符号化方式,小池弘幸,<u>松田一朗</u>, 青森 久,伊東 晋,情報処理学会研究報告, Vol.2011-AVM-73, No.5, pp.1-6, 2011 (査読 無)
- 152.多峰性確率モデルを用いた動ベクトルの算術符号化に関する基礎検討, 伊藤祐也, 青森久, <u>松田一朗</u>, 伊東晋, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.284, pp.19-24, 2011 (査読無)
- 153.複数の予測器出力に連動する多峰性確率モデルによる静止画像の可逆符号化, 柴崎俊亮, 青森久, 松田一朗, 伊東晋, 情報処理学会研究報告, Vol.2011-AVM-75, No. 7, pp.1-6, 2011(査読無)

#### く図書>

#### 2015 年度(平成 27 年度:5 年目)

1. (著書・分担執筆)伴野元洋,<u>由井宏治</u>,「高分子赤外・ラマン分光法 第1部6章 ラ マン分光法」, pp.118-145, 講談社, 2015.

#### 2013 年度(平成 25 年度:3年目)

2. Nanoimprint Technology: Nanotransfer for Thermoplastic and Photocurable Polymers, <u>Jun</u> <u>Taniguchi</u>, Hiroshi Ito, Jun Mizuno, Takushi Saito, Wiley; 238 pages (筆頭編集者), 2013

#### 2011 年度(平成 23 年度:1年目)

- 3. ロール to ロール技術の最新動向 -プロセス最適化への課題と解決策-第3章2節 UV ナノインプリントにおけるモールド作製と離型性, 谷口 淳, シーエムシー出版, pp 83-90 (総 249 ページ), 2011
- 4. ナノインプリントの開発とデバイス応用 第9章1節 離型不良・課題, 谷口 淳, シーエムシー出版, pp 138-144 (総282ページ), 2011

#### <学会発表>

### 国際学会での発表

#### 2015 年度(平成 27 年度:5 年目)

- Theoretical analysis of diffraction characteristics for peristrophic multiplexing with spherical reference wave, Holography: Advances and Modern Trends, Shuhei Yoshida, Jun Mori, <u>Manabu Yamamoto</u>, Proc. SPIE 9508, 950808, Prague, Czech, 2015 年 4 月 15 日
- 2. Wettability and Evaporation enhancement for Heat Transport Devices by High Performance Oxide Layer, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Katsuki Fukushima, Akihiro Takemura, and Koichi <u>Suzuki</u>, Proceedings of the 2015 International Conference on Electronics Packaging & iMAPS All Asia Conference, (2015), Kyoto Japan, 2015 年 4 月 15 日 ~4 月 17 日.
- Transfer properties of moth-eye structure film by RTR UV-NIL, T. Uchida, M. Moro, S. Hiwasa, <u>J. Taniguchi</u>, 2015 International Conference on Electronics Packaging & iMAPS All Asia Conference, Kyoto Japan, 2015 年 4 月 16 日
- Lifetime Prolongation of Release Agent on Antireflection Structure Molds by Means of Partial-filling Ultraviolet Nanoimprint Lithography, Nurhafizah Binti Abu Talip[a]Yusof, Tatsuya Hayashi, <u>Jun Taniguchi</u>, and Shin Hiwasa, 2015 International Conference on Electronics Packaging & iMAPS All Asia Conference, Kyoto Japan, 2015 年 4 月 16 日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 5. Study on Integrated Characteristics of a High Precision Spindle Supported by Aerostatic Bearings, Daisuke Wakabayashi, Masaaki Miyatake, Kei Somaya, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(ICMDT2015), Okinawa Convention Center,OKINAWA, 2015 年 4 月 24 日
- 6. Dynamic Characteristics of Small Aerodynamic Foil Thrust Bearing, Satoshi Mizushima, Kei Somaya, Masaaki Miyatake, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(ICMDT2015), Okinawa Convention Center,OKINAWA, 2015 年 4 月 24 日
- 7. Static Characteristics of Water-Lubricated Hydrostatic Thrust Bearings with Porous Land Region and Fixed Restrictor, Masanori Kuniyoshi, Naoki Hanawa, Masaaki Miyatake, Kei Somaya, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(ICMDT2015), Okinawa Convention Center,OKINAWA, 2015 年 4 月 24 日
- 8. Static and Dynamic Characteristics of Water-lubricated Hydrostatic Thrust Bearings with Self Controlled Restrictor, Kazuki Fukuyama, Yusuke Iwahashi, Masaaki Miyatake, Kei Somaya, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(ICMDT2015), Okinawa Convention Center, OKINAWA, 2015 年 4 月 24 日
- 9. A Method of Reducing the Windage Power Loss of a High Speed Rotor Using a Viscous Vacuum Pump Combined with Aerodynamic Step Bearing Pads, Fumiya Asami, <u>Shigeka Yoshimoto</u>, Masaaki Miyatake, Kei Somaya, Eitaro Tanaka, Takuma Yamauchi, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015), Okinawa Convention Center, OKINAWA, 2015 年 4 月 24 日
- 10. Magnetic Ionic Liquid for Vacuum-compatible Non-contact Seal, Takao Okabe, Daichi Moritaka, Kei Somaya, Masaaki Miyatake, Jun Taniguchi, Yukishige Kondo, Shigeka Yoshimoto, Shinya Sasaki, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(ICMDT2015), Okinawa Convention Center,OKINAWA, 2015 年 4 月 24 日
- Theoretical analysis of diffraction characteristics for peristrophic multiplexing with spherical reference wave, Shuhei Yoshida, Jun Mori, <u>Manabu Yamamoto</u>, Holography: Advances and Modern Trends, Proc. SPIE 9508 (950808), Prague, Apr. 2015.
- 12. Boiling/Evaporation Characteristics of a Droplet on a Nano-Particles-Accumlated Bi-Porous Layer, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Katsuki Fukushima, <u>Koichi Suzuki</u>, Proceedings of the International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Icrosystems (InterPACK 2015), (2015), San Fransisco USA, 2015 年 7 月 6 日 ~7 月 9 日.
- Development of stimulated Raman scattering interferometer and application to analysis of thin film materials, Eri Omori, Motohiro Banno, <u>Hiroharu Yui</u> (poster) RSC Tokyo International Conference 2015, Makuhari-Messe, Makuhari, 2015 年 9 月 3,4 日
- 14. Chemical-contrast imaging of microstructures on water/substrate interface with stimulated Raman scattering interferometer, Sumire Takahashi, Motohiro Banno, <u>Hiroharu Yui</u> (poster) RSC Tokyo International Conference 2015, Makuhari-Messe, Makuhari, 2015 年 9 月 3,4 日
- 15. <u>3D</u> measurement of gold particle via evanescent digital holographic particle tracking velocimetry, Shin-ichi Satake, Noriyuki Unno, Shuichiro Nakata and Jun Taniguchi, PIV 2015,

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Santa Barbara, USA, 2015 年 9 月 14 日~9 月 16 日 \* 12

- 16. Thermal nanoimprint using lift-off patterns made by a polymer resin to fabricate a calibration plate for layer-total-internal reflection-fluorescence method in water, Nakata Shuichiro, Noriyuki Unno, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, Proc. of 41st Micro and Nano Engineering, Netherlands, The Hague, 2015 年 9 月 21 日 ~24 日
- 17. Investigation of light propagation methods used to calculate wave-optical PSF, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, Optical Systems Design 2015: Computational Optics, Proc. SPIE 9630 (963013), Jena, Sep. 2015.
- 18. Durability of DLC release coating in ultraviolet nanoimprint lithography, <u>Jun Taniguchi</u>, Noriyuki Unno, <u>Yasuo Kogo</u>, Masaru Takahashi, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Kyoto Research Park, Kyoto, Japan, 2015 年 10 月 21 日
- 19. The depth control of circular grooves fabricated by rotational electron beam machining, Takao Okabe, Kai Ojima, Yuta Shinonaga, Noriyuki Unno, Masaaki Miyatake, Jun Taniguchi, Shigeka Yoshimoto, Shinya Sasaki, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), Kyoto Research Park, Kyoto, Japan, 2015 年 10 月 21 日
- 20. Development of stimulated Raman scattering interferometer and measurement of chemical contrast image from buried interface, Eri Omori, Sumire Takahashi, Motohiro Banno, <u>Hiroharu</u> <u>Yui</u> (poster) International Symposium on Leading-Edge Holography Technologies, Tokyo University of Science, Tokyo, 2015 年 10 月 30 日
- Chemical-contrast imaging of microstructures fabricated on substrates with stimulated Raman scattering interferometer, Sumire Takahashi, Eri Omori, Takayuki Kondo, Motohiro Banno, <u>Hiroharu Yui</u> (poster) International Symposium on Leading-Edge Holography Technologies, Tokyo University of Science, Tokyo, 2015 年 10 月 30 日
- 22. Investigation of optical system of holographic data storage using photopolymer medium with reflective plate, Jun Mori, Yurina Ishibashi, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, <u>Manabu</u> <u>Yamamoto</u>, International Symposium on Optical Memory 2015 Tu-I-14, Toyama, Oct. 2015.
- Tilt-shift multiplexing for card-type media, Yurina Ishibashi, Jun Mori, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, International Symposium on Optical Memory 2015 Tu-I-17, Toyama, Oct. 2015.
- 24. Development of stimulated Raman scattering interferometer and its application to the chemical contrasted imaging of buried layers and interfaces, Motohiro Banno, Takayuki Kondo, <u>Hiroharu Yui</u> (oral) The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015), Hawaii Convention Center, Honolulu, 2015 年 12 月 15 日.

## 2014年度(平成 26年度:4年目)

25. Cooling technology of on-vehicle inverters with functional nano-porous foam layer - Enhancement of Wettability and boiling heat transfer toward inverter cooling –, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Tessai Sugiura,<u>Koichi Suzuki</u>, Proceedings of 2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2014), Toyama Japan, 2014 年 4 月 23 日~4 月 25 日.

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 26. <u>Durability of DLC Release Coating in Ultraviolet Nanoimprint Lithography, Yasuo Kogo,</u> <u>Masaru Takahashi, Jun Taniguchi, THE 58th INTERNATIONAL CONFERENCE on</u> <u>ELECTRON, ION, and PHOTON BEAM TECHNOLOGY & NANOFABRICATION, Omni</u> <u>Shoreham Hotel, Washington, DC, US, 2014年5月27~30日\*10</u>
- 27. Three-Dimensional Flow in a Sphere-Packed Pipe by Digital-Holographic-PTV and Numerical Simulation, <u>Shin-ichi Satake</u>, Yusuke Aoyagi, Takuma Tsuda, Noriyuki Unno, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Proceedings of the 5th International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering, Howaii USA, 2014 年 7 月 22 日 ~7 月 27 日.
- 28. Application of Nanoparticles-Assembled Bi-Porous Structures to Power Electronics Cooling, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Tessai Sugiura, <u>Koichi Suzuki</u>, Proceedings of the 5th International Conference on Porous Media and its Applications in Science and Engineering, Howaii USA, 2014 年 7 月 22 日~7 月 27 日.
- 29. Four-dimensional flow measurements of UV curable resin at a thermally-assisted nanoimprint process, Asano Motoharu, Noriyuki Unno, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, The 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15, Kyoto, Japan, Kyoto International Conference Center, 2014 年 8 月 10 日 ~ 8 月 15 日
- 30. Evaporation of a water droplet deposited on a nano-patterned transparent film fabricated by UV nanoimprint, Noriyuki Unno, Motoharu Asano, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, The 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15, Kyoto, Japan, Kyoto International Conference Center, 2014 年 8 月 10 日 ~ 8 月 15 日
- Shift-peristrophic multiplexing for holographic data storage, Hiroyuki Kurata, Jun Mori, Yu Tsukamoto, Keiko Yamamoto, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Proc. SPIE 9201, 92010W, San Diego, US, 2014 年 8 月 17 日
- 32. Molecular dynamics simulation of forming of the diamond stylus tip having a radius of nano-order, Shin-ichi Satake, Akira Obara, Sadao Momota, Jun Taniguchi, The 19th International Conference on Ion Beam Modification of Materials (IBMM 2014), Leuven, Belgium, the Aula Pieter de Somer, 2014 年 9 月 14 日  $\sim$  9 月 19 日
- 33. Flow behavior of UV curable resin at nanoimprint process with varying temperature, Noriyuki Unno, Motoharu Asano, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, The 40th International Conference on Micro and Nano Engineering, Lausanne, Switzerland, 2014 年 9 月 23 日
- 34. Evaluation of UV-NIL Release Agent Properties by using Tribo-Indenter, Kota Funakoshi, Chiharu Tadokoro, Ian Thomas Clark, Toshiro Okawa, Jun Taniguchi, Shinya Sasaki, The 40th International Conference on Micro and Nano Engineering, Lausanne, Switzerland, 2014 年9月 23 日
- 35. Fabrication of Eight Steps Diffractive Optical Element for Hologram-ROM, Yuta Shinonaga, Keito Ogino, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, The 40th International Conference on Micro and Nano Engineering, Lausanne, Switzerland, 2014 年 9 月 24 日
- 36. Liquid Transfer Imprint Lithography for Roll to Roll UV-NIL, Masatoshi Moro, Jun Taniguchi, The 40th International Conference on Micro and Nano Engineering, Lausanne, Switzerland, 2014年9月24日
- 37. Residual Layer Control of Liquid Transfer Imprint Lithography by Roll Press Method, Tatsuya Hayashi, Jun Taniguchi, The 40th International Conference on Micro and Nano Engineering,

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Lausanne, Switzerland, 2014年9月 24日

- 38. <u>Development of Electron Beam Nano-Mastering Equipment using a Vacuum-Compatible</u> <u>Hydrodynamic Spindle, Takao Okabe, Keita Utsumi, Kei Somaya, Masaaki Miyatake, Shigeka</u> <u>Yoshimoto, Yuta Shinonaga, Keito Ogino, Jun Taniguchi, Shinya Sasaki, The 40th International</u> <u>Conference on Micro and Nano Engineering, Lausanne, Switzerland, 2014 年 9 月 24 日 \* 5</u>
- 39. Fabrication of High Resolution Mask using Variable Shaped Electron Beam Lithography by Means of Non-Car Resist Plus Post Exposure Bake, Hidetatsu Miyoshi, <u>Jun Taniguchi</u>, Sanjeewa Dissanayake, The 40th International Conference on Micro and Nano Engineering, Lausanne, Switzerland, 2014 年 9 月 25 日
- 40. Three-dimensional flow measurement of a water flow in a sphere-packed pipe by digital holographic PTV, Shin-ichi Satake, Yusuke Aoyagi, Noriyuki Unno, Kazuhisa Yuki, Yohji Seki, Mikio Enoeda, The 28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastian, Spain, Kursaal Congress Center, 2014 年 9 月 29 日  $\sim$  10 月 3 日
- 41. Examination of maximum multiplexing number using shift-peristrophic recording method, Hiroyuki Kurata, Keiko Yamamoto, Yu Tsukamoto, Jun Mori, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, International Symposium on Optical Memory 2014, Hsinchu, Taiwan, 2014 年 10 月 22 日
- 42. Fine Diffractive Optical Elements for Storage Usage, Shuhei Yoshida, Noriyuki Unno, Keito Ogino, Keiko Yamamoto, Jun Taniguchi, <u>Manabu Yamamoto</u>, International Symposium on Optical Memory 2014, Hsinchu, Taiwan, 2014 年 10 月 22 日
- 43. Heat Transfer Performance of High Velocity Impinging Jet in High Thermal Conductivity Porous Media, M. Hattori, <u>K. Yuki</u> and <u>K. Suzuki</u>, Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, Krabi Thailand, 2014 年 11 月 5 日~11 月 7 日.
- 44. Subcooled Boiling with Microbubble Emission Effect of Roughness of Heating Surface, <u>Koichi</u> <u>suzuki</u>, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Yan Chen, PCTHE, 25th International Symposium on Transport Phenomena, Krabi, Thailand, 2014 年 11 月 5 日~7 日
- 45. Study on Vacuum Compatible Fiuid Film Bearings using Ionic Liquid, Keita Utsumi, Takao Okabe, Kei Somaya, Masaaki Miyatake and <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 6th International Conference on Positioning Technology,ICPT2014, Kitakyushu International Conference Center,Kitakyushu-shi Fukuoka, 2014 年 11 月 20 日
- 46. Glass sheet deformation across the large gap in non-contact transportation devices for large LCD glass sheet, Hirohisa Akahori,Kei Somaya,Masaaki Miyatake and <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 6th International Conference on Positioning Technology, ICPT2014, Kitakyushu International Conference Center,Kitakyushu-shi Fukuoka, 2014 年 11 月 20 日
- 47. Water Lubricated Hydrostatic Thrust Bearing with a Self-Controlled Porous Restrictor, Kyousuke Sasou, Yusuke Iwahashi, Kei Somaya, Masaaki Miyatake and <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 6th International Conference on Positioning Technology, ICPT2014, Kitakyushu International Conference Center,Kitakyushu-shi Fukuoka, 2014 年 11 月 20 日

#### 2013 年度(平成 25 年度:3年目)

48. Numerical analysis of volume holograms with spherical reference wave based on Born approximation, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Holography: Advances and Modern

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Trends III, Proc. SPIE 8776, 877607, Prague, Czech, Apr. 15, 2013.

- 49. Three-dimensional multiplexing method with spherical reference beam, Hiroyuki Kurata, Shohei Ozawa, Kaito Okubo, Takaaki Matsubara, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, Holography: Advances and Modern Trends III, Proc. SPIE 8776, 87760H, Prague, Czech, Apr. 16, 2013
- 50. Development of three-dimensional velocity measurement technique for complicated flow by a digital hologram and refractive index-matching method, <u>S. Satake</u>, Y. Aoyagi, T. Tsuda, N. Unno, <u>K. Yuki</u>, Digital Holography and 3-D Imaging (DH), 21-25, Hawaii USA, 2013 年 4 月 21 日~4 月 25 日
- Diffractive optical element for optical data storage, Modeling Aspects in Optical Metrology IV, Shuhei Yoshida, Noriyuki Unno, Hideki Akamatsu, Kai Yamada, <u>Jun Taniguchi</u>, <u>Manabu</u> <u>Yamamoto</u>, Proc. SPIE 8789, 87891E, Munich, Germany, May 13, 2013.
- 52. Measurements of velocity profiles in a turbulent pipe flow: a comparison of digital holographic PTV and UVP method, S. Satake, M. Motozawa, T. Tuda and T. Kunugi, The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal - Hydraulics, NURETH-15, Pisa, Italy, 2013 年 5 月 12 日 ~ 5月 17 日 \* 17
- 53. Study on Relationship between m-V Characteristics and Viscoelasticity of Surface Reaction Films Originated from Additives, H.Choi, S.Kato, <u>S.sasaki</u>, R.Tsuboi, The 5th International Conference on Manufacturing Machine Design and Tribology Proceedings, Busan, South Korea, 87, 2013 年 5 月 22 日~25 日
- 54. Analysis of Correlation between Boundary Lubrication Property and Geometry Parameters of Surface, C.Sasaki, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, A.Korenaga, Y.Tokuta, The 5th International Conference on Manufacturing Machine Design and Tribology Proceedings, Busan, South Korea, 243, 2013 年 5 月 22 日~25 日
- 55. Improvement in the Tribological Characteristics of Si-DLC Coating by Laser Surface Texturing at Elevated Temperatures, A.Amanov, T.Watabe, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, The 5th International Conference on Manufacturing Machine Design and Tribology Proceedings, Busan, South Korea, 158, 2013 年 5 月 22 日~25 日
- 56. A Study on Nano-mechanical Properties of Adsorption Layers Derived from Lubricant Additives, Y.Suzuki, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, The 5th International Conference on Manufacturing Machine Design and Tribology Proceedings, , Busan, South Korea, 241, 2013 年 5 月 22 日~ 25 日
- 57. Water-Lubricated Hydrostatic Thrust Bearings with Porous Land Region, S. Saito, Naoki Hanawa, Kei Somaya and <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, BEXCO (Busan, Korea), 2013 年 5 月 22 日 ~ 5 月 25 日
- 58. Static Characteristics of Small-Sized Aerodynamic Foil Thrust Bearing, Tatsuma Kishino, Kei Somaya and <u>Shigeka Yoshimoto</u>, The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, BEXCO (Busan, Korea), 2013 年 5 月 22 日~ 5 月 25 日
- 59. Durability assessment of mold release agents for ultraviolet nanoimprint lithography, K.Funakoshi, S.Shirato, J.Taniguchi, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, The 57th International Conference on Electoron Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication, Nashville, Tennessee, 2013 年 5 月 28 日~31 日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 60. Three dimensional holographic-PTV measurement of a rising microbubble caused by photocatalytic reaction, Noriyuki Unno, Takuma Tsuda, <u>Shin-ichi Satake</u> and <u>Koichi Suzuki</u>, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Lisbon, Portugal, 2013 年 6 月 16 日 ~ 6 月 20 日
- An enhancement of water evaporation on nano-conical structure formed by an irradiated ion beam, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, Yukihiro Yonemoto, Noriyuki Unno,Tadashi Kikuchi, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Lisbon, Portugal, 2013 年 6 月 16 日 ~ 6 月 20 日
- 62. Three-dimensional measurement with two cameras of a turbulent pipe flow by digital holographic-PTV, Tsuda Takuma, <u>Shin-ichi Satake</u>, Noriyuki Unno, <u>Jun Taniguchi</u> and Tomoaki Kunugi, Delft, The Netherlands, 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, 2013 年 7 月 1 日 ~ 7 月 3 日
- 63. Boiling/Evaporation Heat Transfer Augmentation Using Subchannels-Inserted Metal Porous Media, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Masahiro Uemura, <u>Koichi Suzuki</u>, Ken-ichi Sunamoto, Proceedings of the 2013 ASME Summer Heat Transfer Conference, 2013, Minneapolice USA, 2013 年 7 月 14 日~7 月 19 日.
- 64. Holographic recording method using shift multiplexing system with spherical reference beam, Yuta Nagao, Hiroyuki Kurata, Kaito Okubo, Yu Tsukamoto, Takaaki Matsubara, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIV, Proc. SPIE 8841, 884119, San Diego, US, Aug. 26, 2013.
- 65. High Density Shift Multiplexing Method Using Both Transmission and Refraction Type of Spherical Reference Beam, Hiroyuki Kurata, Kaito Okubo, Yu Tsukamoto, Takaaki Matsubara, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, Shogo Koga, Asato Tanaka, International Symposium on Optical Memory 2013, Incheon, Korea, Aug. 20, 2013.
- 66. Signal Quality Improvement of Holographic Data Storage by Using a Volterra Equalizer, Takaaki Matsubara, Hiroyuki Kurata, Kaito Okubo, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, International Symposium on Optical Memory 2013, Incheon, Korea, Aug. 20, 2013.
- High-Dimensional Shift Multiplexing with Spherical Reference Waves, Yu Tsukamoto, Hiroyuki Kurata, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, Shogo Koga, Asato Tanaka, International Symposium on Optical Memory 2013, Incheon, Korea, Aug. 20, 2013.
- 68. Optical Data Storage Using Diffractive Optical Elements, Shuhei Yoshida, Kai Yamada, Noriyuki Unno, Jun Taniguchi, Manabu Yamamoto, Progress In Electromagnetics Research Symposium 2013, Stockholm, Sweden, Aug. 13, 2013.
- Multi-dimensional Shift Multiplexing for Holographic Data Storages, Shuhei Yoshida, Keiko Yamamoto, Hiroyuki Kurata, <u>Manabu Yamamoto</u>, Progress In Electromagnetics Research Symposium 2013, Stockholm, Sweden, Aug. 13, 2013.
- 70. Development of stimulated Raman scattering interferometer, Motohiro Banno, Takayuki Kondo, Ami Nagashima, <u>Hiroharu Yui</u> (Poster, Awarded), 7th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy, Kobe Convention Center, Kobe, 2013 年 8 月 29 日
- 71. How does the water mixed into Ionic Liquids behave under lubricating condition?, S.Watanabe, M.Nakano, K.Miyake, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Book of Abstract of the 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 134, 2013 年 9 月 4 日~6 日
- 72. Tribological properties of halogen-free ionic liquids against sintered ceramics, Y.Kondo,

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

S.Kawada, S.Watanabe, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Book of Abstract of the 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 44, 2013 年 9 月 4 日~6 日

- 73. Study on Ionic Liquids in the Electric Field, S.Kawada, Y.Kondo, T.Koyama, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Book of Abstract of the 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 136, 2013 年 9 月 4 日~6 日
- 74. Effects of Doping Elements on the Tribological Properties of DLC films, H.Fukuda, K.Oshima, A.Amanov, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Book of Abstract of the 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 25, 2013 年 9 月 4 日~6 日
- 75. Effects of hydrogen on friction and wear behavior of DLC films, <u>S.Sasaki</u>, K.Oshima, R.Tsuboi, M.Kawaguchi, Extended Abstracts of 5th World Tribology Congress, Torino, Italy, 2013 年9月8日~13日
- 76. Tribological Behavior of Cr-doped and Non-doped DLC Films Deposited on Ti-6Al-4V Alloy by Unbalanced Magnetron Sputtering, A.Amanov, T.Watabe, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Extended Abstracts of 5th World Tribology Congress, Torino, Italy, 2013 年 9 月 8 日~13 日
- 77. The Effect of Surface Conformation of Imidazolium-based Ionic Liquids on Friction Property,
   S.Watanabe, M.Nakano, K.Miyake, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Extended Abstracts of 5th World
   Tribology Congress, Torino, Italy, 2013 年 9 月 8 日~13 日
- 78. Tribological properties of halogen-free ionic liquids against hard materials, Y.Kondo, R.Tsuboi,
   <u>S.Sasaki</u>, Extended Abstracts of 5th World Tribology Congress, Torino, Italy, 2013 年9月8日
   ~13 日
- 79. Tribochemical Reaction of Ionic Liquids under Vacuum Condition, S.Kawada, S.Watanabe, Y.Kondo, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Extended Abstracts of 5th World Tribology Congress, Torino, Italy, 2013 年 9 月 8 日~13 日
- 80. Study on metal doping effect on tribological properties of DLC, H.Fukuda, K.Oshima, A.Amanov, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Extended Abstracts of 5th World Tribology Congress, Torino, Italy, 2013 年 9 月 8 日~13 日
- 81. Three-dimensional flow measurement of a sphere-packed pipe by a digital hologram and refractive index-matching method, <u>S. Satake</u>, Y. Aoyagi, T. Tsuda, N. Unno, <u>K. Yuki</u>, 11th Int. Symp. Fusion Nuclear Technology, Barcelona, Spain, 2013 年 9 月 16 日  $\sim$  9 月 20 日
- 82. Computer generated hologram-ROM fabrication and duplication by EBL and UV-NIL, Keito Ogino, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, The 39th International Conference on Micro and Nano Engineering, London, England, 2013 年 9 月 17 日~9 月 19 日
- 83. Electron beam direct writing of nano dots pattern on roll mold surface, Masashi Saito, Jun <u>Taniguchi</u>, The 39th International Conference on Micro and Nano Engineering, London, England, 2013 年 9 月 17 日~9 月 19 日
- 84. Development of release agent free replica mold material for UV-NIL, Yuma Otsukaa, Jun <u>Taniguchi</u>, The 39th International Conference on Micro and Nano Engineering, London, England, 2013 年 9 月 17 日~9 月 19 日
- 85. Improvement of super-resolution technique for nanoimprint mold, Toru Miebori, Noriyuki Unno and <u>Jun Taniguchi</u>, The 39th International Conference on Micro and Nano Engineering, London, England, 2013 年 9 月 17 日~9 月 19 日
- 86. Defect analysis and lifetime estimation of release coated NIL mold, Masanori Okada, Daisuke

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Yamashitaa, Noriyuki Unno, <u>Jun Taniguchi</u>, The 39th International Conference on Micro and Nano Engineering, London, England, 2013 年 9 月 17 日~9 月 19 日

- 87. Flow distribution measurements of a thin resin layer at UV-NIL process by using digital-holographic-PTV, Noriyuki Unno, <u>Shin-ichi Satake</u> and <u>Jun Taniguchi</u>, The 39th International Conference on Micro and Nano Engineering, London, England, 2013 年 9 月 17 日~9 月 19 日
- 88. DNS of MHD turbulent flow via the HELIOS supercomputer system at IFERC-CSC, <u>S. Satake</u>, M. Kimura, H. Yoshimori, T. Kunugi, K. Takase, SNA + MC2013, Joint international conference on Supercomputing in Nuclear Application and Monte Carlo, Paris, France, 2013 年 10 月 27 日 ~10 月 31 日
- 89. A study on in-situ observation of the micro flow of lubricant on textured surface, M.Kai, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, Malaysian International Tribology Conference 2013, Sabah, Malaysia, 2013 年 11 月 18 日~20 日
- 90. Analysis of Imidazolium-Based Ionic Liquids Adsorbed at Frictional Surface Using Infrared-Visible Sum-Frequency Generation Vibrational Spectroscopy, K.Miyake, S.Watanabe, M.Nakano, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, International Nanotribology Forum, Kerala, India, 2014年1月 6日~10日
- 91. Examination of systematization of the holographic data storage, Yuta Nagao, Hiroyuki Kurata, Shuhei Yoshida, <u>Manabu Yamamoto</u>, Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, Proc. SPIE 9006, 90061E, San Francisco, US, 2014 年 2 月 5 日

## 2012 年度(平成 24 年度:2年目)

- 92. Improvement method of the optical MTF by using Bayes theorem and application results to a rod lens optical system, Kotaro Okada, Shuma Horiuchi, Shuhei Yoshida, Zenta Ushiyama and <u>Manabu Yamamoto</u>, Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications II, Proc. SPIE 8436, 843611, Brussels, Belgium, Apr. 17, 2012.
- 93. <u>Three-dimensional simultaneous measurements of a rising microbubble position and flow surrounding the microbubble by a digital hologram, Shin-ichi Satake, Tadashi Kikuchi, Takuma Tsuda, Tomoaki Kunugi, 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2012 年 6 月 9 日 ~ 6 月 12 日 \*18</u>
- 94. Effect of surface roughness of steel on friction and wear property of polyamide 66, T.Ozaki S.Kato R.Tsuboi S.Sasaki, the Book of Abstract of the NordTrib 2012 conference, Trondheim, Norway, 151, 2012 年 6 月 12 日~15 日
- 95. Study on Tribological property of Halogen-free Ionic Liquids for Hard Coatings, Y.Kondo T.Koyama R.Tsuboi M.Nakano K.Miyake <u>S.Sasaki</u>, the Book of Abstract of the NordTrib 2012 conference, Trondheim, Norway, 80, 2012 年 6 月 12 日~15 日
- 96. Molecular Behavior of Room-temperature Ionic Liquids under Lubricating Condition, S.Watanabe K.Miyake K.Takiwatari M.Nakano K.Miyake R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, the Book of Abstract of the NordTrib 2012 conference, Trondheim, Norway, 62, 2012 年 6 月 12 日~15 日
- 97. CFD Analysis of Hydrodynamic Lubrication on Textured Surface Considering with Caviation and Flow Pattern, R.Tsuboi A.Nakano Y.Oshima <u>S.Sasaki</u>, the Book of Abstract of the NordTrib 2012 conference, Trondheim, Norway, 99, 2012 年 6 月 12 日~15 日
- 98. Evaluation of mechanical properties of tribo-films using AFM micro-scratch and macro-sliding

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

tester, S.Shirato R.Tsuboi K.Miyake<u>S.Sasaki</u>, the Book of Abstract of the NordTrib 2012 conference, Trondheim, Norway, 60, 2012 年 6 月 12 日~15 日

- 99. Consideration about Generation of Cavitation around Surface Texturing under Hydrodynamic Lubrication, A.Nakano Y.Oshima R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, the Book of Abstract of the NordTrib 2012 conference, Trondheim, Norway, 179, 2012 年 6 月 12 日~15 日
- 100. Tribo-film formation of lubricant additives on Cr-coated surface sliding against NBR rubber, H.Oe S.Kato R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, the Book of Abstract of the NordTrib 2012 conference, Trondheim, Norway, 100, 2012 年 6 月 12 日~15 日
- 101. Tribological properties of ionic liquids for hard coatings, SIS2012, 19th International Symposium on surfactants in Solution, <u>S.Sasaki</u> Y.Kondo H.Koyama R.Tsuboi, Edmonton, Canada, 39-40, 2012 年 6 月 24 日~28 日
- 102. Effect of surrounding hydrogen gas on friction and wear characteristics of DLC films, K.Oshima Y.Tokuta R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u> M.Kawaguchi, Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 903-904, 2012 年 7 月 22 日~27 日
- 103. RESEARCH ON LUBRICITY OF IONIC LIQUIDS ON METAL ALLOYS, T.Koyama Y.Kondo R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u> K.Miyake M.Nakano, Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto, Portugal, 901-902, 2012 年 7 月 22 日~27 日
- 104. EFFECT OF FATTY ACIDS ON LUBRICITY OF VEGETABLE OILS, Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics, R.Ishida R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, 905-906, Porto, Portugal, 2012 年 7 月 22 日~27 日
- 105. Friction and Fretting Wear Characteristics of Different DLC Coatings Against Alumina in Water-lubricated Fretting Conditions, T.Watabe A.Amanov R.Tsuboi <u>S.Sasaki</u>, NANO KOREA 2012 PROCEEDINGS, South Korea, Seoul, 2012 年 8 月 16 日~18 日
- 106. Influence of Dimples and Nano-sized Grains on Tribological Characteristics of Cu-based Alloy under Oil-lubricated Fretting Conditions, A.Amanov, T.Watabe, <u>S.Sasaki</u>, NANO KOREA 2012 PROCEEDINGS, South Korea, Seoul, 2012 年 8 月 16 日~18 日
- 107. Correlation between Mechanical Properties and Optical ones of Diamond-Like Carbon Films, Masanori Hiratsuka, Hideki Nakamori, <u>Yasuo Kogo</u>, Masayuki Sakurai, Naoto Ohtake, Hidetoshi Saitoh, The 3rd Asian Symposium on Materials & Processing (ASMP2012), IIT Madras; Chennai, India, 2012.8.30
- 108. Molecular dynamics simulation of Ga+ ion collision process, <u>Shin-ichi, Satake</u>, Kenji, Ono, Masahiko, Shibahara and <u>Jun, Taniguchi</u>, The 18th conference on ion beam modification of materials (IBMM 2012), Qingdao, China, 2012 年 9 月 2 日 ~ 9 月 7 日
- 109. Relationships Between Processing Condition and Mechanical Properties in Micrometer Order DLC Structure Produced by FIB-CVD, N. Sakamoto, Y. Akita, T. Yasuno, <u>Y. Kogo</u>, International Conference on Diamond and Carbon Materials, Granada, Spain, 2012.9.3~6
- 110. CFD analysis of real-textured surface processed by laser, Y.Oshima, A.Nakano, R.Tsuboi, <u>S.Sasaki</u>, 39th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, UK, Leeds, 2012 年 9 月 4 日~7 日
- 111. Tribological Properties of aluminium-12% silicon alloy surface-treated with dispersed hard particles during sliding against different steels, T.Nakase S.Kato T.Kobayashi <u>S.Sasaki</u>, 39th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, UK, Leeds, 2012 年 9 月 4 日~7 日
- 112. DNS of turbulent flow in a vertical channel with buoyancy effect under a uniform magnetic field, <u>S. Satake</u>, K. Sone , and T. Kunugi, 9th European Fluid, Mechanics Conference (EFMC

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

9), Rome, 2012年9月9日~9月13日

- 113. Fabrication of High Aspect Ratio Pattern via High Throughput Roll to Roll Ultraviolet Nanoimprint Lithography, Hiroshi YOSHIKAWA, Jun TANIGUCHI, The 38th International Conference on Micro and Nano Engineering, Toulouse, France, 2012 年 9 月 16 日~9 月 20 日
- 114. Fabrication of self-support antireflection structure film by UV-NIL, NURHAFIZAH ABU TALIP[A]YUSOF, Jun TANIGUCHI, The 38th International Conference on Micro and Nano Engineering, Toulouse, France, 2012 年 9 月 16 日 ~ 9 月 20 日
- 115. Fabrication of anti-reflection structure with antifouling effect surface by Ultraviolet nanoimprint lithography, Keita YAJIMA, Jun TANIGUCHI, The 38th International Conference on Micro and Nano Engineering, Toulouse, France, 2012 年 9 月 16 日 ~ 9 月 20 日
- 116. Pre-hardening Ultraviolet nanoimprint lithography using opaque mold, Yuya KAICHI, <u>Jun</u> <u>TANIGUCHI</u>, The 38th International Conference on Micro and Nano Engineering, Toulouse, France, 2012 年 9 月 16 日 ~ 9 月 20 日
- 117. Super-resolution technique for nanoimprint mold using elastic UV curable resin, Noriyuki UNNO, <u>Shin-ichi SATAKE</u>, <u>Jun TANIGUCHI</u>, The 38th International Conference on Micro and Nano Engineering, Toulouse, France, 2012 年 9 月 16 日 ~ 9 月 20 日
- 118. Advanced Cooling Technology for Next Generation Power Electronics, <u>Koichi Suzuki</u>, 7<sup>th</sup> International Symposium on Two-Phase Systems for Ground and Space applications (招待講 演), 北京 香山飯店会議場, 2012 年 9 月 17 日~21 日
- 119. Extremely High Heat Flux Removal Technique using a Metal Porous Evaporator with sub-channels, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Chen Gang and <u>Koichi Suzuki</u>, Proceedings of the Seventh International Symposium on Two-Phase Systems For Ground And Space Applications, Beijing China, 2012 年 9 月 17 日~9 月 22 日.
- 120. GPU-accelerated direct numerical simulation of Burgers equation by CUDA Fortran, <u>Shin-ichi</u> <u>Satake</u> and Hajime Yoshimori, 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Palermo, 2012 年 9 月 24 日  $\sim$  9 月 27 日
- 121. Three-dimensional measurements of microbubbles in a turbulent pipe flow by digital-holographic PTV, <u>Shin-ichi Satake</u>, Tadashi Kikuchi, Hirotaka Iida, Tomoaki Kunugi, 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Palermo, 2012 年 9 月 24 日 ~ 9 月 27 日
- 122. High-density holographic data storage using shift and angle multiplexing with spherical reference wave, Hiroyuki Kurata, Shohei Ozawa, Kaito Okubo, Shuhei Yoshida, <u>Manabu</u> <u>Yamamoto</u>, Shogo Koga and Asato Tanaka, International Symposium on Optical Memory, Tokyo, Japan, Oct. 4, 2012.
- 123. Experimental and Numerical Investigation of the High-speed Instability of Aerodynamic Foil Journal Bearings for Micro Turbomachinery, Kei Somaya, Toru Yamashita, <u>Shigeka</u> <u>Yoshimoto</u>, ASME / STLE International Joint Tribology Conference, Denver, Colorado, USA, 2012 年 10 月 10 日
- 124. Aberration and defocus correction using Richardson-Lucy deconvolution with optical design data, Zenta Ushiyama, Shuhei Yoshida, Shuma Horiuchi, Kotaro Okada, and <u>Manabu</u> <u>Yamamoto</u>, International Conference on Optics and Photonics, Venice, Italy, Nov. 15, 2012.
- 125. Analysis of Volume Holograms with Spherical Reference Wave Based on Born Approximation, Atsushi Arai, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, International Workshop
| 法人番号     | 131065   |
|----------|----------|
| プロジェクト番号 | S1101014 |

on Holography and related technologies, Taoyuan, Taiwan, Nov. 12, 2012.

- 126. The 3 Dimensional Shift Multiplexing Method for High Density Holographic Data Recording, Hiroyuki Kurata, Shohei Ozawa, Kaito Okubo, Shuhei Yoshida, and <u>Manabu Yamamoto</u>, International Workshop on Holography and related technologies, Taoyuan, Taiwan, Nov. 12, 2012.
- 127. Static Characteristics of Aerostatic Thrust Bearings with Multiple Porous Feed Ports, K. Somaya, <u>S. Yoshimoto</u>, The 5th International Conference on Positioning Technology, Kaohsiung City, Taiwan, 2012 年 11 月 14 日 ~ 11 月 15 日
- 128. Actively-controlled hydrostatic thrust bearing using a parallel leaf spring and a voice coil motor, S. Saito, <u>S. Yoshimoto</u>, K. Somaya, The 5th International Conference on Positioning Technology, Kaohsiung City, Taiwan, 2012 年 11 月 14 日 ~ 11 月 15 日
- 129. Actively-Controlled Water-Lubricated Hydrostatic Thrust Bearing Using a Floating Disk with a Voice Coil Motor, T. Kanebako, <u>S. Yoshimoto</u>, K. Somaya, The 5th International Conference on Positioning Technology, Kaohsiung City, Taiwan, 2012 年 11 月 14 日 ~ 11 月 15 日
- 130. Heat Transfer Characteristics of Metal Porous Heat Sink for Cooling Power Electronic Devices, <u>Kazuhisa Yuki, Koichi Suzuki</u>, Proceedings of the 23rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-23), Auckland New Zealand, 2012 年 11 月 19 日~11 月 22 日.
- 131. High Heat Flux Cooling Technology for Power Electronics (Subcooled Boiling of Water Mixture of Antifreeze Coolants), <u>K. Suzuki</u>, <u>K. Yuki</u>, G. Chen and C. Hong, ISTP23, Aucland University, New Zee Land, 2012 年 11 月 19 日~22 日

# 2011 年度(平成 23 年度:1年目)

- 132. Application of Boilong Heat Transfer to High Flux Cooling Technology in Power Electronics, <u>鈴木康一</u>, <u>結城和久</u>, 望月正孝, International Conference on Electronics Packaging, 奈良国 際会議場, 2011 年 4 月 13 日
- 133. An analysis method for evaluating gradient-index fibers based on Monte Carlo method, Shuhei Yoshida, Shuma Horiuchi, Zenta Ushiyama and <u>Manabu Yamamoto</u>, Optical Sensors 2011, Proc. SPIE 8073, 80731I, Prague, Czech, Apr. 18, 2011.
- 134. Actively-Controlled Hydrostatic Bearing Using Elastic Hinges and a Voice Coil Motor, S.Saito, K.Somaya, <u>S.Yoshimoto</u>, The 4th Int. Conf. on Manufactuirng, Machine Design and Tribology, Gamagori-City, Hotel Takeshima, Japan, 2011 年 4 月 26 日
- 135. Experimental and numerical investigations of bearing characteristics of aerostatic thrust bearings with small feed holes, U.Nishio, K.Somaya, <u>S.Yoshimoto</u>, The 4th Int. Conf. on Manufactuirng, Machine Design and Tribology, Gamagori-City, Hotel Takeshima, Japan, 2011 年4月26日
- 136. Analysis of servomechanisms for high-density optical disks with the vectorial and scalar diffraction theory, Shuhei Yoshida, Shuma Horiuchi and <u>Manabu Yamamoto</u>, Modeling Aspects in Optical Metrology III, Proc. SPIE 8083, 808318, Munich, Germany, May 23, 2011.
- 137. Roll Diameter Amplification Method using Direct Transfer of Fine Patterned Small Roll Mold Fabricated by Electron Beam Lithography, <u>J. Taniguchi</u>, N. Unno, H. Maruyama, THE 55th INTERNATIONAL CONFERENCE on ELECTRON, ION, and PHOTON BEAM TECHNOLOGY & NANOFABRICATION, Las Vegas, Nevada, USA, 2011 年 6 月 1 日
- 138. Deterioration Evaluation of Release Coated Surface for Nanoimprint by Macro Optical

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Inspection Method, <u>J. Taniguchi</u>, J. Takahashi, M. Uda, A. Kohayase, K. Kotaki, THE 55th INTERNATIONAL CONFERENCE on ELECTRON, ION, and PHOTON BEAM TECHNOLOGY & NANOFABRICATION, Las Vegas, Nevada, USA, 2011 年 6 月 1 日

- 139. Fabrication of the seamless roll mold using inorganic electron beam resist with post exposure bake, Noriyuki Unno, <u>Jun Taniguchi</u>, Kiyoshi Ishikawa, THE 55th INTERNATIONAL CONFERENCE on ELECTRON, ION, and PHOTON BEAM TECHNOLOGY & NANOFABRICATION, Las Vegas, Nevada, USA, 2011 年 6 月 1 日
- 140. Surface deformation of Ga+ ion collision process via molecular dynamics simulation, <u>S.</u> <u>Satake</u>, A. Fukushige, <u>J. Taniguchi</u>, Y. Kogo, M. Shibahara, THE 55th INTERNATIONAL CONFERENCE on ELECTRON, ION, and PHOTON BEAM TECHNOLOGY & NANOFABRICATION, Las Vegas, Nevada, USA, 2011 年 6 月 1 日
- 141. Dwell Time Adjustment for Focused Ion Beam Machining, <u>J. Taniguchi</u>, <u>S. Satake</u>, T. Oosumi, A. Fukushige, Y. Kogo, THE 55th INTERNATIONAL CONFERENCE on ELECTRON, ION, and PHOTON BEAM TECHNOLOGY & NANOFABRICATION, Las Vegas, Nevada, USA, 2011 年 6 月 1 日
- 142. Application of Matched Refractive-Index PIV Method to Single-Phase and Two-Phase Flows with Complex Geometry, <u>Kazuhisa Yuki</u>, <u>Koichi Suzuki</u>, Proceedings of the 11th Asian Symposium on Visualization, Niigata Japan, 2011 年 6 月 5 日~6 月 9 日.
- 143. Heat Transfer Characteristics of Sub-Channels-Inserted Porous Media for Divertor Cooling, <u>Kazuhisa Yuki</u>, Hidetoshi Hashizume, Saburo Toda, Akio Sagara, The International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Nashville USA, 2011 年 8 月 27 日~8 月 31 日.
- 144. Quantum molecular dynamics study on energy transfer to an emitted electron in surface collision process of particle, Masahiko Shibahara, Takeaki Yokoi, <u>Shin-ichi Satake, Jun Taniguchi</u>, The 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Fukuoka, Japan, 2011 年 9 月 4 日~ 9 月 9 日
- 145. DNS of MHD turbulent flow with buoyancy by DNS, <u>Satake, S.</u>, Sone, K., Sagara, A., Kunugi, T., 8th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD. Borgo - Corsica, France, 2011 年 9 月 5 日 ~ 9 月 9 日
- 146. Direct Numerical Simulation of combined forced and natural turbulent convection in a vertical plane channel under a magnetic field, <u>Shin-ichi Satake</u>, Kazuki Sone, Keito Furumi, Tomoaki Kunugi, 10th Int. Symp. Fusion Nuclear Technology, Portrand, Oregon, USA, 2011 年 9 月 11 日 ~ 9 月 16 日
- 147. Three-dimensional measurements of UV-imprint process by micro- digital Holographic-PTV, <u>Shin-ichi Satake</u>, <u>Jun Taniguchi</u>, Takahiro Kanai, Noriyuki Unno, The 37th International Conference on Micro and Nano Engineering, Berlin, Germany, 2011 年 9 月 19 日 ~ 9 月 23 日
- 148. Fabrication of roll mold using electron beam direct writing and metal liftoff process, Hiroki Maruyama, Noriyuki Unno and Jun Taniguchi, The 37th International Conference on Micro and Nano Engineering, Berlin, Germany, 2011 年 9 月 19 日 ~ 9 月 23 日
- 149. Lifetime evaluation of release agent for ultraviolet nanoimprint lithography, Daisuke Yamashita, <u>Jun Taniguchi</u>, and Hokuto Suzuki, The 37th International Conference on Micro and Nano Engineering, Berlin, Germany, 2011 年 9 月 19 日 ~ 9 月 23 日
- 150. Ultra high speed micro-milling spindle directly supporting endmill shank by aerostatic

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

bearings, Humitaka Nishikawa, <u>S. Yoshimoto</u>, Kei Somaya Proc. of the 6th Int. Conf. On Leading Edge Manufacturing in 21st Century, Omiya Sonic City, Saitama, Japan, 2011 年 11 月 9 日

## 国内学会での発表

## 2015 年度(平成 27 年度:5 年目)

- 151.誘導ラマン散乱光音響トモグラフィーの開発と散乱体に埋もれた試料の化学種識別的 計測,伴野元洋,長島亜美,<u>由井宏治</u>(ロ頭)第75回分析化学討論会、山梨大学、 甲府、2015年5月23日
- 152. 銅粒子ポーラス体を用いた高熱流束除去デバイスの検討,高井貴生,<u>結城和久</u>,<u>鈴木</u> <u>康一</u>,第52回日本伝熱シンポジウム,福岡県福岡市,2015年6月3日~5日.
- 153.酸化膜制御による濡れ性促進と熱輸送機器への応用,<u>結城和久</u>,福島克樹,<u>鈴木康一</u>, 竹村明洋,第52回日本伝熱シンポジウム,福岡県福岡市,2015年6月3日~6月5日
- 154. 二台カメラを有する DHPTV 法による水中におけるペブル充填された円管内流れの三 次元可視化, 國安 政孝, 青柳 湧介, 海野 徳幸, <u>佐竹 信一</u>, 関 洋治, 榎枝 幹 男,第 52 回日本伝熱シンポジウム, 福岡国際会議場、福岡市 2015 年 6 月 3 日~6 月 5 日
- 155.誘導ラマン散乱光干渉計による撥水機能性材料の表面化学計測,高橋 すみれ,大森 絵梨,近藤 隆之,伴野 元洋,<u>由井 宏治</u>(ポスター),日本材料科学会平成 27 年度学 術講演大会、工学院大学、東京、2015 年 6 月 5 日
- 156.映像データ圧縮のための画素毎の動き補償予測, 亀田裕介, 武市惇平, 石橋雅貴, <u>松</u> <u>田一朗</u>, 伊東 晋, 第 18 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2015), ホテル阪急エ キスポパーク, 2015 年 7 月 30 日
- 157.シフト多重の高密度化方法と複数トラックの並列再生,石橋友理菜,森淳,堀内秀真, 吉田周平,<u>山本学</u>,磁気記録・情報ストレージ研究会 MR2015-11,新宿区早稲田大学, 2015 年 7 月
- 158.DCT 符号化のための係数単位の外挿/内挿イントラ予測の検討,石川 調, <u>松田一朗</u>, 亀田裕介, 伊東 晋, 2015 年映像情報メディア学会年次大会,東京理科大学葛飾キャン パス, 2015 年 8 月 28 日
- 159.誘導ラマン散乱光干渉計による水に埋もれた基板表面微細構造の分子種識別的断層画 像計測,伴野 元洋,高橋 すみれ,<u>由井 宏治</u>(口頭)日本分析化学会第64年会、九 州大学伊都キャンパス、福岡、2015年9月9日
- 160.球面参照光における反射型媒体構成,森淳,石橋友理菜,堀内秀真,吉田周平,山本 学,電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-7-1,仙台市東北大学,2015年9月
- 161.シフト多重記録の同一トラック上重ね書き方式,石橋友理菜,森淳,堀内秀真,吉田 周平,<u>山本学</u>,電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-7-2,仙台市東北大学,2015 年 9月
- 162.インデックマッチング法と全 反射蛍光顕微鏡による水中におけるマイクロ構造体周 りの3次元計測,仲田 修一郎,海野 徳幸,<u>佐竹 信一</u>,<u>谷口 淳</u>,日本機械学会流体 工学部門講演会講演論文集,東京理科大学,2015年11月7日~11月8日
- 163.数値安定なオプティカルフロー推定法のベクトル演算に関する検討,小松崎泰良,亀田裕介,<u>松田一朗</u>,伊東晋,第20回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2015),ラフォーレ修善寺,2015年11月19日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 164.2 次元 OFDM と QPSK を用いたイメージセンサ通信の検討, 槻谷隼太, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 第20回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2015), ラフォーレ修 善寺, 2015 年 11 月 19 日
- 165. DCT 領域のシーム幅変換処理に基づいた空間階層符号化の検討, 津山和也, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東晋, 第30回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2015), ラフォーレ修善寺, 2015 年11月19日
- 166.誘導ラマン散乱光干渉計の開発と多層薄膜材料分析への応用,大森 絵梨,伴野 元洋, 由井 宏治(ポスター賞受賞)第3回表面・界面のメゾスコピックサイエンスとプロセッシング研究会講演会、千葉工業大学 東京スカイツリータウンキャンパス、東京、2015年11月25日
- 167.水に埋もれた Si 基盤表面微細構造の分子識別計測, 高橋 すみれ, 大森 絵梨, 伴野 元 洋, <u>由井 宏治(</u>ポスター)第3回表面・界面のメゾスコピックサイエンスとプロセッ シング研究会講演会、千葉工業大学 東京スカイツリータウンキャンパス、東京、2015 年11月25日
- 168.イントラ予測モードの推定に基づく付加情報量削減のための基礎検討,金森光彦,松 田一朗,亀田裕介,伊東晋,2015年映像情報メディア学会冬季大会,早稲田大学,2015 年12月15日
- 169. 両方向フレーム間予測と輝度補償に基づいた流体計測用 JPEG 画像のロスレス再符号 化, 鹿倉貴之, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 亀田裕介, <u>佐竹信一</u>, 2015 年映像情報メディア学会 冬季大会, 早稲田大学, 2015 年 12 月 15 日
- 170. Light Field Camera データの可逆符号化のための適応予測に関する検討,木崎元博,松 田一朗,伊東晋,亀田裕介,2015年映像情報メディア学会冬季大会,早稲田大学,2015 年12月15日
- 171.限定色画像の可逆符号化のための RGB 色空間上の予測処理に関する検討, 五十嵐知樹, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 亀田裕介, 2015 年映像情報メディア学会冬季大会, 早稲田大学, 2015 年 12 月 15 日
- 172.ホログラフィックデータストレージにおける記録再生実験機の試作,森淳,石橋友理 菜,堀内秀真,吉田周平,<u>山本学</u>,磁気記録・情報ストレージ研究会 MR2015-29,松 山市愛媛大学,2015年12月
- 173.動き補償と距離変換に基づいた動画像の半自動 2D-3D 変換,中村有揮,<u>松田一朗</u>, 亀田裕介,伊東晋,2016年電子情報通信学会総合大会,九州大学,2016年3月15日
- 174. 画素毎の動き推定を用いた奥行きマップの動き補償と奥行き補償, 笠井翔太, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 2016年電子情報通信学会総合大会, 九州大学, 2016年3月16日
- 175. 数値的安定性を保証した YUV-D フロー推定法, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 2016 年 電子情報通信学会総合大会, 九州大学, 2016 年 3 月 16 日
- 176. 画素毎とブロック毎の動き補償予測を併用した動画像の可逆符号化,岸浩志,亀田裕介, 松田一朗,伊東晋,2016年電子情報通信学会総合大会,九州大学,2016年3月17日
- 177.段階的 DCT 符号化のための係数単位の円弧に沿った両方向イントラ予測,中馬高明, 松田一朗, 亀田裕介, 伊東 晋, 2016 年電子情報通信学会総合大会, 九州大学, 2016 年 3 月 17 日
- 178. 事例探索と予測を併用した確率モデリングによる静止画像の可逆符号化,墨 龍, 稲村 勇太, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2016 年電子情報通信学会総合大会, 九州大学, 2016 年3月17日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

## 2014年度(平成 26年度:4年目)

- 179.気泡微細化沸騰の冷却技術への応用(加圧下の沸騰),陳燕,<u>鈴木康一</u>,<u>結城和久</u>,日本伝熱シンポジウム,浜松市,2014年5月21日
- 180.ナノパターニングされた透明体フィルム上の液滴蒸発特性,海野 徳幸,浅野 元晴,<u>佐</u> 竹 信一,谷口 淳(東京理科大),第51 回日本伝熱シンポジウム,アクトシティ浜松・ コングレスセンター(静岡県浜松市)2014年5月21日 ~ 5月23日
- 181.ナノインプリント圧着過程中の UV 硬化性樹脂流動に対する基板温度の影響,浅野 元晴,海野 徳幸,<u>佐竹 信一</u>,谷口 淳,第 51 回日本伝熱シンポジウム,アクトシティ 浜松・コングレスセンター (静岡県浜松市)2014 年 5 月 21 日 ~ 5 月 23 日
- 182.高熱伝導ポーラス体を用いた核融合炉ダイバータのガス冷却の可能性, 結城和久, 服部宗仁, 鈴木康一, 第51回日本伝熱シンポジウム, H312, 静岡県浜松市, 2014年5月21日~5月23日.
- 183.誘導ラマン散乱光干渉計の構築と分子識別的断層画像計測への展開,近藤隆之,伴野 元洋,<u>由井宏治</u>(口頭),第74回分析化学討論会、日本大学工学部、郡山、2014年 5月24日
- 184.分子識別的サブ µm 分解断層画像装置の開発と薄膜材料分析への応用,大森 絵梨,近藤 隆之,伴野 元洋,<u>由井 宏治</u> (ポスター)日本材料科学会平成 26 年度学術講演大会、工学院大学、東京、2014 年 6 月 6 日
- 185.金属粒子焼結型ポーラスヒートシンクによるダイバータガス冷却, 結城和久, 服部宗 仁, 川本誠, <u>鈴木康一</u>, 第10回 核融合エネルギー連合講演会, 茨城県つくば市, 2014 年6月18日~6月20日.
- 186. Numerically Stable Scene-Flow Estimation, 第17回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU 2014), 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 岡山コンベンションセンター, 2014 年 7 月 31 日
- 187. 固有空間法に基づいた眼領域画像からの視線推定法の検討, 2014 年映像情報メディア 学会年次大会, 安藤俊博, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 大阪大学, 2014 年 9 月 1 日
- 188.静止画像の半自動 2D-3D 変換における奥行き伝搬処理の高速化, 2014 年映像情報メディア学会年次大会, 中村有揮, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋,大阪大学, 2014 年 9 月 1 日
- 189.回転不変なHOG特徴量を用いた俯瞰画像からの人物検出, 2014年映像情報メディア学会年次大会,藤本達也, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東晋, 大阪大学, 2014年9月1日
- 190.DCT 符号化における係数単位の内挿予測方式, 2014 年映像情報メディア学会年次大会, 菅井修甫, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 大阪大学, 2014 年 9 月 2 日
- 191.等間隔シームの同時削除に基づいた静止画像の空間階層符号化, 2014 年映像情報メディア学会年次大会, 菅原瞭介, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 大阪大学, 2014 年 9 月 2 日
- 192. 動画像符号化のための DCT 領域の Shrinkage 処理に基づいたブロック適応時空間予測, 2014年映像情報メディア学会年次大会, 宮本真生, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 大阪 大学, 2014年9月2日
- 193.球面参照波を用いた体積ホログラムの波長選択性,塚本悠,森淳,吉田周平,山本学, 映像情報メディア学会年次大会,大阪,2014年9月2日
- 194.シフト・ペリストロフィック多重ホログラム多重記録数の検討,倉田博之,五味裕秋, 吉田周平,山本学,映像情報メディア学会年次大会,大阪,2014年9月2日
- 195. ミニチャンネルフィンを用いた核融合炉ダイバータの沸騰冷却特性, 鶴田高大, 三明

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

裕治,<u>結城和久</u>,<u>鈴木康一</u>,日本原子力学会中国・四国支部 第8回研究発表会,広島県広島市,2014年9月12日.

- 196.ナノ粒子バイポーラス構造体を用いた沸騰伝熱促進に関する基礎研究, 福島克樹, 杉 浦鉄宰, <u>結城和久</u>, <u>鈴木康一</u>, 日本原子力学会中国・四国支部 第8回研究発表会, 広 島県広島市, 2014 年 9 月 12 日.
- 197.8 階調ホログラム読み出し専用メモリの回折光学素子の作製, 篠永悠太, 荻野慧人, 海 野徳幸, 吉田周平, 山本 学, 谷口 淳, 2014 年度精密工学会 秋季大会学術講演会, 鳥取大学 鳥取キャンパス(鳥取市、鳥取県) 2014 年 9 月 16 日
- 198. ロールプレス方式を用いた液体分離方式インプリントによる残膜制御,林 竜也, <u>谷</u> <u>口</u> 淳, 2014 年度精密工学会 秋季大会学術講演会, 鳥取大学 鳥取キャンパス(鳥取 市、鳥取県) 2014 年 9 月 16 日
- 199.誘導ラマン散乱光干渉計による埋もれた界面のサブミクロン深さ分解分子種識別断層 画像計測,伴野元洋,近藤隆之,長島亜美,<u>由井宏治</u>(ロ頭)日本分析化学会第 63年会、広島大学東広島キャンパス、東広島、2014年9月17-19日
- 200. 微分干渉型ヘテロダイン誘導ラマン散乱顕微鏡の開発と分子識別表面微細構造計測への展開,近藤隆之,伴野元洋,<u>由井宏治</u>(ロ頭)日本分析化学会第63年会、広島大学東広島キャンパス、東広島、2014年9月17-19日
- 201.シフト・ペリストロフィック多重ホログラフィック・メモリ記録方式のための光学設計,山本桂子,牛山善太,吉田周平,<u>山本学</u>,応用物理学会秋季学術講演会,札幌, 2014年9月19日
- 202.シフト・ペリストロフィック多重ホログラフィック・メモリ記録方式の高密度多重特性, 塚本悠, 石原良真, 吉田周平, <u>山本学</u>, 応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 2014 年9月19日
- 203. ホログラフィック・メモリ記録のためのフーリエ変換レンズの光学設計, 森淳, 倉田 博之, 吉田周平, 牛山善太, <u>山本学</u>, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 徳島, 2014 年9月 25 日
- 204. 球面波参照波を用いた peristrophic 記録方式の回折モデル,塚本悠,中村俊彦,吉田周 平,<u>山本学</u>,電子情報通信学会ソサイエティ大会,徳島,2014年9月25日
- 205.読み出し専用体積型ホログラフィックデータストレージの検討齋藤玲奈, 倉田博之, 吉田周平, 山本学, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 徳島, 2014 年 9 月 25 日
- 206. ポリビニルアルコール薄膜への金属パターン転写技術を用いた全反射照明蛍光顕微鏡 用校正プレートの作製,海野 徳幸,前田 麻夫, <u>佐竹 信一</u>, 辻 隆浩,<u>谷口 淳</u>,日本機 械学会第6回マイクロ・ナノ工学シンポジウム (島根県)2014 年 10 月 20 日
- 207. 鰹節の摩擦・摩耗特性に関する研究, 宮武 正明, <u>佐々木</u>信也, <u>吉本</u>成香, トラ イボロジー会議 2014 秋, 盛岡市, 岩手県, 2014 年 11 月 6 日
- 208. 非等速運動に対応可能なマルチフレーム動き補償予測, 第29回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2014), 津藤 陸, <u>松田一朗</u>, 亀田裕介, 伊東 晋, ラフォーレ修善寺, 2014 年 11月 12 日
- 209. マイクロレンズの周期的構造を利用した Light Field Camera データの可逆符号化, 第29 回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2014), 木崎元博, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, ラフ オーレ修善寺, 2014 年 11 月 12 日
- 210. 円弧に沿った両方向イントラ予測の検討,第 29 回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2014),中馬高明, <u>松田一朗</u>, 亀田裕介, 伊東 晋, ラフォーレ修善寺, 2014 年 11 月 12 日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 211. 不均一な幅のシームを用いた画像の非線形縮小法, 第19回映像メディア処理シンポジ ウム(IMPS 2014), 倉地一輝, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, ラフォーレ修善寺, 2014 年 11月14日
- 212. ホログラフィックデータストレージにおける球面参照波を用いた Peristrophic 記録方式 の理論的解析と評価,吉田周平,中村俊彦,塚本悠,山本学,マルチメディアストレージ研究会,松山,2014年12月12日
- 213.参照フレーム間の動き検出に基づいたマルチフレーム時空間予測, 2014 年映像情報メ ディア学会冬季大会, 武市惇平, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 東京理科大学森戸記念 館, 2014 年 12 月 17 日
- 214. ベイヤ型カラーフィルタを用いて撮影された Light Field Camera データの可逆符号化,
  2014 年映像情報メディア学会冬季大会,加藤 諒, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 東京
  理科大学森戸記念館, 2014 年 12 月 17 日
- 215. 両方向イントラ予測における内挿関数の検討, 2014 年映像情報メディア学会冬季大会, 金森光彦, 松田一朗, 亀田裕介, 伊東 晋, 東京理科大学森戸記念館, 2014 年 12 月 17 日
- 216.形状可変な連続関数群を用いた奥行きマップ符号化の検討, 2014 年映像情報メディア 学会冬季大会, 菅谷温人, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 東京理科大学森戸記念館, 2014 年 12 月 17 日
- 217.ペンライトアート風のインターフェースによる映像への図形描画, 2014 年映像情報メ ディア学会冬季大会,作 晃介, <u>松田一朗</u>, 亀田裕介, 伊東 晋, 東京理科大学森戸記念 館, 2014 年 12 月 17
- 218.誘導ラマン散乱光干渉計を用いたメゾスコピックスケールの分子識別的立体・断層画 像計測の試み,<u>由井 宏治</u>(招待講演),材料科学会第2回メゾスコピック研究会、東 京電機大学、東広島、2015年3月2日
- 219. 高熱流東環境における液冷ミニチャンネルフィンの最適化,川本航平,<u>結城和久,鈴</u> <u>木康一</u>,日本機械学会 中国四国学生会 第 45 回学生員卒業研究発表講演会,418,広島 県福山市,2015 年 3 月 5 日~3 月 6 日.
- 220.ホログラフィックデータストレージにおける直流信号成分の除去のための位相パターン最適化,倉田博之,吉田周平,<u>山本学</u>,磁気記録・情報ストレージ研究会,名古屋, 2015年3月6日
- 221.ホログラフィックデータストレージにおける直流信号成分の除去のための位相パター ン最適化,倉田博之,吉田周平,<u>山本学</u>,電子情報通信学会総合大会,滋賀,2015 年 3月13日
- 222.誘導ラマン散乱光干渉計による水に埋もれた Si 表面微細構造の化学分析,高橋 すみれ,大森 絵梨,近藤 隆之,伴野 元洋,<u>由井 宏治</u> (ポスター)先端ホログラフィ技術研究開発センター第 4 回シンポジウム、東京理科大学葛飾キャンパス、東京、2015 年 3 月 13 日
- 223. 非近傍画素も参照可能な再帰型イントラ予測の検討, 2015 年電子情報通信学会総合大会, 伊藤真也, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 立命館大学, 2015 年 3 月 13 日
- 224. 再帰型および非再帰型手法の併用によるイントラ予測の性能改善, 2015 年電子情報通 信学会総合大会,石田裕太,亀田裕介,<u>松田一朗</u>,伊東 晋,立命館大学, 2015 年 3 月 13 日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

225. 両方向動き補償予測を用いた流体計測用JPEG 画像の再圧縮, 2015 年電子情報通信学会 総合大会, 鹿倉貴之, 松田一朗, 亀田裕介, 伊東 晋, 佐竹信一, 立命館大学, 2015 年 3 月 13 日 \* 16

## 2013年度(平成 25年度:3年目)

- 226.誘導ラマン散乱光干渉計の開発(1):装置開発と干渉信号の検出,長島 亜美,近藤 隆之,伴野 元洋,<u>由井 宏治</u>(口頭),第73回分析化学討論会、北海道大学、函館、2013年5月18日
- 227.誘導ラマン散乱光干渉計の開発(2):透過・反射配置の検討,近藤 隆之,長島 亜美, 伴野 元洋,<u>由井 宏治</u>(口頭),第73回分析化学討論会、北海道大学、函館、2013 年5月18日
- 228. デジタルホロ紫外線ナノインプリントリソグラフィ用離型剤の耐久性評価に関する 研究, 舟越皓太, 坪井涼, 谷口淳, 佐々木信也,トライボロジー会議春 2013 予稿集, 東 京, 2013 年 5 月 20 日~22 日
- 229.真空中におけるイオン液体内の不純物によるトライボケミカル反応への影響,川田将 平 渡部誠也,近藤ゆりこ,坪井涼,佐々木信也,トライボロジー会議春 2013 予稿集, 東京,2013 年 5 月 20 日~22 日
- 230.表面改質アルミ合金に対する生分解性基油の潤滑性に関する研究,小江弘伸,中瀬拓 也,加藤慎治, M.Woydt, 坪井涼, 佐々木信也,トライボロジー会議春 2013 予稿集,東 京, 2013 年 5 月 20 日~22 日
- 231.境界潤滑性能を支配する吸着膜のナノ物性評価, 鈴木悠介, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, ト ライボロジー会議春 2013 予稿集, 東京, 2013 年 5 月 20 日~22 日
- 232.H-freeDLC に対するハロゲンフリーイオン液体の潤滑メカニズムに関する研究, 近藤 ゆりこ, 川田将平, 小山貴大, 坪井涼, 佐々木信也, トライボロジー会議春 2013 予稿 集, 東京, 2013 年 5 月 20 日~22 日
- 233. 添加剤由来表面反応膜の粘弾性と μ-V 特性との関連性に関する研究, 崔学詠, 加藤慎治, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, トライボロジー会議春 2013 予稿集, 東京, 2013 年 5 月 20 日 ~22 日
- 234. 各種元素ドーピング DLC 膜の境界潤滑特性, 福田宙央, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, 田村徹 弥, 加藤慎治,トライボロジー会議春 2013 予稿集, 東京, 2013 年 5 月 20 日~22 日
- 235.湿度がイミダゾリウム系イオン液体のトライボケミカル反応に及ぼす影響,渡部誠
   也,中野美紀,三宅晃司,坪井涼,佐々木信也,トライボロジー会議春 2013 予稿集,東
   京,2013 年 5 月 20 日~22 日
- 236.減圧水素環境下における DLC 膜の超低摩擦現象に関する研究, 大嶋健太, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, 川口雅弘, トライボロジー会議春 2013 予稿集, 東京, 2013 年 5 月 20 日 ~22 日
- 237.小型ターボ機械用気体動圧フォイルジャーナル軸受に関する研究,渡辺大樹,杣谷啓, <u>吉本成香</u>,2013 年日本トライボロジー学会春季講演会,国立オリンピック記念青少年 総合センター,渋谷区,東京都,2013 年 5 月 20 日~5 月 22 日
- 238. 多数多孔質絞りをもつ気体静圧スラスト軸受の軸受特性に関する研究,細川貴子,杣 谷啓,<u>吉本成香</u>,2013年日本トライボロジー学会春季講演会,国立オリンピック記念 青少年総合センター,渋谷区,東京都,2013年5月20日~5月22日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

239.ナノインプリント圧着過程における UV 硬化性樹脂の 4 次元流動計測,共同発表者 名,海野 徳幸, 筒田 剛, <u>佐竹 信一</u>, 谷口 淳, 第 50 回日本伝熱シンポジウム,ウェステ ィンホテル仙台および仙台トラストシティ, 仙台, 2013 年 5 月 29 日~5 月 31 日

240. 多次元シフト多重方式を用いたホログラムメモリの記録再生特性,山本桂子,倉田博 之,松原昂亮,吉田周平,山本学,マルチメディアストレージ研究会,仙台,2013 年 6月 21 日

- 241. 正則化係数と画像に依存しない安定なシーンフロー計算, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会年次大会, 工学院大学, 2013 年 8 月 29 日
- 242. ボロノイ図に基づいた奥行きマップの領域分割符号化,阿部広尚, 亀田裕介, 松田一 <u>朝</u>, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会年次大会,工学院大学, 2013 年 8 月 30 日
- 243. 画像信号の可逆符号化を目的とした事例ベースの適応的確率モデリング,中嶋直也, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会年次大会,工学院大学, 2013 年 8 月 30 日
- 244. 色信号内と色信号間のブロック適応予測を統合したカラー画像符号化, 伊藤真也, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会年次大会, 工学院大学, 2013 年 8 月 30 日
- 245.算術符号を用いた MPEG-1 動画像のロスレス再符号化における確率モデルの簡略化, 菅井修甫, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会年次大会,工学 院大学, 2013 年 8 月 30 日
- 246. JPEG のビットストリームに可逆変換可能な画像符号化方式の主観画質改善, 津藤 陸, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会年次大会, 工学院大学, 2013 年 8 月 30 日
- 247.RGB 色空間上の予測処理に基づいた限定色画像の算術符号化, 榊原直紀, 山崎 駿, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会年次大会, 工学院大学, 2013 年 8 月 30 日
- 248.ナノインプリントによるホログラムメモリの作製, 荻野慧人、海野徳幸、吉田周平、 山本 学、谷口 淳, 2013 年度精密工学会 秋季大会学術講演会, 関西大学 千里山キャンパス (吹田市、大阪府) 2013 年9月 12 日
- 249.反射防止構造を持つ透明自立膜の作製と評価,毛呂将俊、山木 繁、稲吉輝彦、<u>谷口</u> <u>淳</u>,2013年度精密工学会 秋季大会学術講演会,関西大学 千里山キャンパス(吹田市、 大阪府) 2013年9月 12日
- 250.伸張性を持つ紫外線硬化型樹脂を用いた微細構造転写,三重堀 徹、海野徳幸、谷口 <u>淳</u>,2013年度精密工学会 秋季大会学術講演会,関西大学 千里山キャンパス(吹田市、 大阪府),2013年9月 12日
- 251.離型剤の要らないレプリカモールドの開発と転写特性,大塚裕真、日和佐 伸、谷口 <u>淳</u>,2013年度精密工学会 秋季大会学術講演会,関西大学 千里山キャンパス(吹田市、 大阪府),2013年9月12日
- 252.多孔質ランド部を持つ水潤滑静圧スラスト軸受に関する研究,塙 直紀,宮武正明, 杣谷 啓,<u>吉本成香</u>,2013 年精密工学会秋季大会学術講演会,関西大学,吹田市,大 阪府,2013 年 9 月 12 日
- 253. ダイアフラムを用いた可変絞り水潤滑静圧スラスト軸受に関する研究, 郷原 真, 杣谷 啓, 吉本成香, 宮武正明, 2013 年精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学, 吹田市, 大 阪府, 2013 年 9 月 12 日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 254.誘導ラマン散乱光干渉計の開発:光軸方向空間分解能の検討,伴野 元洋,近藤 隆之, 長島 亜美,<u>由井 宏治</u>(口頭),日本分析化学会第 62 年会、近畿大学東大阪キャン パス、東大阪、2013 年 9 月 12 日
- 255. 球面波シフト多重と Peristrophic 多重記録を併用した記録方式の検討, 森淳, 倉田博之, 吉田周平, 山本学, 応用物理学会秋季学術講演会, 京都, 2013 年 9 月 18 日
- 256. 球面参照波を用いた Peristrophic ホログラム記録の数値解析,仲田修一郎,荒井敦志, 吉田周平,山本学,応用物理学会秋季学術講演会,京都,2013 年 9 月 18 日
- 257. 球面参照波を用いた Peristrophic ホログラム記録方式,林浩気,荒井敦志,吉田周平, 山本学,電子情報通信学会ソサイエティ大会,福岡,2013 年 9 月 19 日
- 258.媒体厚さ方向のシフト選択性を利用したホログラムの多層記録,大久保海斗,齋藤修 一,吉田周平,山本学,電子情報通信学会ソサイエティ大会,福岡,2013年9月19日
- 259. FT-IR を用いた添加剤由来摩擦反応膜の分析手法について,小江弘伸,坪井涼, 佐々木 信也,トライボロジー会議秋 2013 予稿集, 福岡, 2013 年 10 月 23 日~26 日
- 260. 不飽和脂肪酸が示す油性効果及び吸着特性に関する研究, 鈴木悠介, 坪井涼, 佐々木 信也, トライボロジー会議秋 2013 予稿集, 福岡, 2013 年 10 月 23 日~26 日
- 261.NBR ゴムと Cr の摺動における添加剤由来表面反応膜の粘弾性と μ-V 特性との関連性 に関する研究, 崔学詠, 加藤慎治, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, トライボロジー会議秋 2013 予 稿集, 福岡, 2013 年 10 月 23 日~26 日
- 262. 焼結セラミックスに対するイオン液体の潤滑性に及ぼす分子構造の影響について、近藤ゆりこ、渡部誠也、川田将平、坪井涼、佐々木信也、トライボロジー会議秋 2013 予稿 集,福岡、2013 年 10 月 23 日~26 日
- 263. グラムと屈折率調整法によるペブル充填された円管内流れの3次元計測,青柳 湧介, 津田 拓真,海野 徳幸,<u>佐竹 信一</u>,<u>結城 和久</u>,日本機械学会熱工学コンファレンス 2013,青森県弘前市,2013年10月19日~10月20日.
- 264. 次世代高熱流束冷却技術(気泡微細化沸騰の実用化にむけて),<u>鈴木康一,結城和久</u>,日本混相流学会混相流シンポジウム 2013,信州大学,2013 年 9 月 16 日~17 日
- 265.気泡微細化沸騰の高熱流束冷却技術への応用,鈴木康一,結城和久,陳 燕,日本機械学 会 熱工学コンファレンス,弘前大学,2013年10月19日~20日
- 266.シフト多重とペリストロフィック多重を複合した記録方式による高密度化,長尾雄大, 吉田周平,山本学,マルチメディアストレージ研究会,福岡,2013年10月24日
- 267. ブロック単位の走査順序適応化による内挿的イントラ予測の検討,大竹庸介, <u>松田一</u> <u>朗</u>, 亀田裕介, 伊東 晋, 吉野知伸, 内藤 整, 第 28 回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2013), ニューウェルシティ湯河原, 2013 年 11 月 7 日
- 268. DCT 領域のシーム幅変換処理に基づいた画像の非線形縮小法, 倉地一輝, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 第18回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2013), ニューウェル シティ湯河原, 2013 年 11 月 8 日
- 269.DLC 膜の摩擦特性に及ぼす水素の影響,大久保光,坪井涼,<u>佐々木信也</u>,M&P2013,第 21 回機械材料・材料加工技術講演会,東京,2013 年 11 月 8 日~10 日
- 270. ZnDTP/MoDTC 添加潤滑油下における元素ドーピング DLC 膜のトライボ特性に関す る研究,福田宙央,坪井涼,佐々木信也,田村徹弥,加藤慎治,M&P2013,第21 回機械 材料・材料加工技術講演会,東京,2013 年 11 月 8 日~10 日
- 271.親水性および疎水性表面におけるイオン液体の分子構造が摩擦特性に及ぼす影響,渡 部誠也, 中野美紀, 三宅晃司, 坪井涼, 佐々木信也, 第33回表面科学学術講演会講

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

演要旨集, 茨城, 2013 年 11 月 26 日~28 日

- 272.シフト-ペリストロフィック多重記録方式のシミュレーションおよび実験,齋藤修一, 荒井敦志,吉田周平,山本学,磁気記録・情報ストレージ研究会,松山,2013年12月
   12日
- 273.擬似濃淡画像への QR コード埋め込み法, 飯岡鷹山, <u>松田一朗</u>, 亀田裕介, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会冬季大会, 芝浦工業大学, 2013 年 12 月 18 日
- 274.安定性が保証されたシーンフロー計算の性能評価, 2013 年映像情報メディア学会冬季 大会, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 芝浦工業大学, 2013 年 12 月 18 日
- 275. 円弧に沿った方向性イントラ予測の検討, 2013 年映像情報メディア学会冬季大会,中馬高明, 亀田裕介, <u>松田一朗</u>, 伊東晋, 内藤整, 吉野知伸, 芝浦工業大学, 2013 年 12 月 19 日
- 276. 複数フレームを用いた色信号内予測と色信号間予測に基づいたカラー動画像符号化, 武市惇平, 亀田裕介, 松田一朗, 伊東 晋, 2013 年映像情報メディア学会冬季大会,芝浦 工業大学, 2013 年 12 月 19 日
- 277.誘導ラマン散乱光干渉計による分子識別的サブミクロン空間分解断層画像計測法の開発,伴野元洋,近藤隆之,長島亜美,<u>由井宏治</u>(ポスター),先端ホログラフィ技術研究開発センター第3回シンポジウム、東京理科大学葛飾キャンパス、東京、2014年1月24日
- 278. 差動型ヘテロダイン誘導ラマン散乱顕微鏡を用いたナノインプリントモールドの分子 識別表面微細構造計測,近藤隆之,伴野元洋,<u>由井宏治</u>(ポスター),先端ホログ ラフィ技術研究開発センター第3回シンポジウム、東京理科大学葛飾キャンパス、東 京、2014年1月24日
- 279. 異なる記録・再生波長を用いた球面波参照光シフト多重記録シミュレーションと実験, 仲田修一郎,荒井敦志,吉田周平,<u>山本学</u>,磁気記録・情報ストレージ研究会,名古 屋,2014年3月7日
- 280.2 次元 OFDM を用いたイメージセンサ通信の検討, 坂本健人, <u>松田一朗</u>, 亀田裕介, 伊 東 晋, 2014 年電子情報通信学会総合大会, 新潟大学, 2014 年 3 月 18 日
- 281.シミュレーションによるシフト-ペリストロフィック多重記録の評価,齋藤修一,荒井 敦志,仲田修一郎,吉田周平,<u>山本学</u>,磁気記録・情報ストレージ研究会,名古屋, 2014年3月
- 282.時空間領域毎に最適化された予測器による RGB カラー動画像の可逆符号化,田嶋周, 亀田裕介,<u>松田一朗</u>,伊東晋,2014年電子情報通信学会総合大会,新潟大学,2014年3 月 20日
- 283.シームカービングを用いた空間階層符号化のためのパス探索法,木幡 匠,亀田裕介, 松田一朗,伊東 晋,2014年電子情報通信学会総合大会,新潟大学,2014年3月20日
- 284.ホログラムメモリにおけるランレングス制限符号の検討,吉川憲吾,吉田周平,山本 学,電子情報通信学会総合大会,新潟,2014年3月18日

## 2012 年度(平成 24 年度:2年目)

- 285.イオン液体中のトライボケミカル反応における水の影響, 渡部誠也, 滝渡幸治, 中 野美紀, 三宅晃司, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, 日本機械学会第 12 回機素潤滑設計部門講 演会, 愛媛, 173-174, 2012 年 4 月 23 日~24 日
- 286.硬質材料に対するハロゲンフリーイオン液体のトライボ特性に関する研究, 近藤ゆり

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

こ,小山貴大,坪井涼,三宅晃司,中野美紀,<u>佐々木信也</u>,トライボロジー会議春 2012 予稿集,東京, 373-374, 2012 年 5 月 14 日~16 日

- 287.摩擦面におけるイミダゾリウム系イオン液体分子挙動のその場観察,渡部誠也, 滝 渡幸治, 中野美紀, 三宅晃司, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>,トライボロジー会議春 2012 予 稿集,東京, 371-372, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 288.表面テクスチャリングを用いた流体潤滑の CFD 解析-流れ場の変化を用いた考察-,坪 井涼, 中野彬, 大島康嗣, <u>佐々木信也</u>,トライボロジー会議春 2012 予稿集,東京, 323-324, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 289. 潤滑油添加剤によって形成される反応膜の物性測定, 白戸翔, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, 三宅晃司, トライボロジー会議春 2012 予稿集, 東京, 69-70, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 290. テクスチャを施した表面に成膜したナノ積層コーティングのトライボ特性に関する 研究,古山道生, 佐々木信也, 坪井涼, 加藤慎治,トライボロジー会議春 2012 予稿 集,東京, 331-332, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 291. 流体潤滑下における表面テクスチャによる気泡発生の原因に関する研究,中野彬, 大島康嗣, 坪井涼, 佐々木信也,トライボロジー会議春 2012 予稿集,東京, 327-328, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 292. ポリアミド 66 の摩耗に及ぼす高次構造と相手材表面粗さの影響, 尾崎剛寛, <u>佐々木</u> <u>信也</u>, 坪井涼, 加藤慎治, トライボロジー会議春 2012 予稿集, 東京, 31-32, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 293. CFD によるレーザーテクスチャ表面の流れ場解析における実表面形状データ利用の 意義について,大島康嗣, 中野彬, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>,トライボロジー会議春 2012 予稿集,東京, 325-326, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 294. NBR ゴムと鋼の摺動における添加剤由来トライボフィルムの形成に関する研究,小江 弘伸 佐々木信也, 坪井涼, 加藤慎治,トライボロジー会議春 2012 予稿集,東京, 227-228, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 295.DLC コーティングの耐フレッチング性に関する研究,渡部司, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, トライボロジー会議春 2012 予稿集,東京, 125-126,2012 年 5 月 14 日~16 日
- 296. 面接触下の潤滑特性に及ぼすディンプル寸法の影響, 是永敦, 積康太朗, 三宅晃司, 中野美紀, 加納誠介, <u>佐々木信也</u>, トライボロジー会議春 2012 予稿集, 東京, 319-320, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 297. 軸受鋼に対するイオン液体の潤滑性に関する研究,小山貴大, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, トライボロジー会議春 2012 予稿集,東京, 365-366, 2012 年 5 月 14 日~16 日
- 298. ワイヤを用いた弾性支持高速回転スピンドルの開発, 伊藤洋平, 杣谷啓, <u>吉本成香</u>, 日本トライボロジー学会春季大会,国立オリンピック記念青少年総合センター,渋谷 区,東京都, 2012年5月15日~5月16日
- 299.ジャッキアップシステムを持つ空気フォイルスラスト軸受に関する研究,中坂上達郎 杣谷啓 <u>吉本成香</u>,日本トライボロジー学会春季大会,国立オリンピック記念青少年総 合センター,渋谷区,東京都,2012年5月15日~5月16日
- 300. 超音波振動を用いたスクイーズジャーナル空気軸受の回転特性, 庄智宏 杣谷啓 <u>吉</u> 本成香, The 日本トライボロジー学会春季大会, 国立オリンピック記念青少年総合セン ター, 渋谷区, 東京都, 2012 年 5 月 15 日~5 月 16 日
- 301.多数多孔質絞りを持つ静圧空気スラスト軸受に関する研究, 杣谷啓 新村悠 吉本成 査, 日本トライボロジー学会春季大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 渋

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

谷区, 東京都, 2012年5月15日~5月16日

- 302. サブチャンネル装荷型ポーラスヒートシンクの高発熱密度機器への応用, <u>結城和久</u>, <u>鈴木康一</u>, 第49回日本伝熱シンポジウム, F134, pp. 189-190, 富山県富山市, 2012年5月 29日~5月31日.
- 303. CUDA FORTRAN 及び C を用いた GPU による熱流体方程 式の高速化, <u>佐竹信一</u>, 吉森 本,鈴木 貴之,第49回伝熱シンポジュウム,富山国際会議場、(富山県富山市) 2012 年 5 月 29 日~6 月 1 日
- 304. サブチャンネル装荷型金属多孔質体によるダイバータ冷却, <u>結城和久</u>, <u>鈴木康一</u>, 第9 回核融合エネルギー連合講演会, 28A-67p, 兵庫県神戸市, 2012 年6月 28日~6月 29日.
- 305. 微小重力環境における高熱流束輸送技術にむけて(多孔質体を用いた熱輸送技術の展望と課題), <u>結城和久</u>, <u>鈴木康一</u>, 日本混相流学会年会講演会 2012 第 31 回混相流シンポジウム, 千葉県柏市, 2012 年 8 月 9 日~8 月 11 日.
- 306.頭部搭載プロジェクタによる球体スクリーンへの映像投影,白石知明,小畠 武,深井 寛修,<u>松田一朗</u>,伊東 晋, 2012 年映像情報メディア学会年次大会,広島市立大学, 2012 年8月 29日
- 307.カラー動画像符号化のための時空間予測と色信号間予測の統合, 増川裕樹, 深井寛修, 松田一朗, 伊東 晋, 2012 年映像情報メディア学会年次大会, 広島市立大学, 2012 年 8 月 29 日
- 308.動き補償と色信号間予測に基づいた可逆符号化方式のための予測器の設計法,林 杏 輔,深井寛修,<u>松田一朗</u>,伊東 晋,2012 年映像情報メディア学会年次大会,広島市立大 学,2012 年 8 月 29 日
- 309. 再帰型イントラ予測における走査方向の切り替えに関する検討,千代島智也,深井寛 修,<u>松田一朗</u>,伊東晋,2012年映像情報メディア学会年次大会,広島市立大学,2012年 8月29日
- 310.形状可変な連続関数群を用いた画像近似手法とその符号化への応用,浅川和宏,深井 寛修,<u>松田一朗</u>,伊東 晋,河村 圭,内藤 整,2012 年映像情報メディア学会年次大会, 広島市立大学,2012 年 8 月 29 日
- 311.硬質材料に対するハロゲンフリーイオン液体のトライボ特性に関する研究,近藤ゆり こ,<u>佐々木信也</u>,日本機械学会2012年度年次大会講演論文集,石川,2012年9月9日~ 12日
- 312.1 Tbit/in<sup>2</sup>の記録密度を超えるホログラム記録方式の検討,小澤尚平,大久保海斗,倉 田博之,吉田周平,<u>山本学</u>,電子情報通信学会ソサイエティ大会,富山,2012年9月 13日
- 313. ボルン近似に基づく体積ホログラムの数値解析,荒井敦志,吉田周平,山本学,電子 情報通信学会ソサイエティ大会,富山,2012年9月13日
- 314.電子ビーム露光法を用いたナノパターンロールモールドの作製, 齋藤 匡, 谷口 淳, 2012 年度精密工学会 秋季大会学術講演会, 九州工業大学(北九州市、福岡県), 2012 年9月14日
- 315. レプリカモールドを用いたロールナノインプリントに関する研究,吉川 寛史, 谷口
   <u>淳</u>, 2012 年度精密工学会 秋季大会学術講演会,九州工業大学(北九州市、福岡県), 2012
   年9月14日

法人番号	131065		
プロジェクト番号	S1101014		

- 316.2 段階 UV 硬化ナノインプリントによるナノパターン転写,鶏内 裕也,<u>谷口 淳</u>,
   2012 年度精密工学会 秋季大会学術講演会,九州工業大学(北九州市、福岡県), 2012
   年9月14日
- 317.電子ビーム露光法によるロール上へのパターニングとロールナノインプリント特性, 吉田 勇平, 谷口 淳, 2012 年度精密工学会 秋季大会学術講演会,九州工業大学(北 九州市、福岡県), 2012 年9月14日
- 318.UV ナノインプリントによる防汚性を持つ反射防止構造の作製, 矢島 圭太, 谷口
   <u>淳</u>, 2012 年度精密工学会 秋季大会学術講演会, 九州工業大学(北九州市、福岡県), 2012 年 9 月 15 日
- 319.離型剤と離型処理の違いによるモールドの耐久性, 岡田 真昇, 谷口 淳, 2012 年 度精密工学会 秋季大会学術講演会, 九州工業大学(北九州市、福岡県), 2012 年 9 月 15 日
- 320.境界潤滑性能向上のための表面テクスチャリング, <u>佐々木信也</u>トライボロジー会議 秋 2012 予稿集,北海道, 49-50, 2012 年 9 月 16 日~18 日
- 321.イオン液体-材料表面の水親和性が界面構造に及ぼす影響-,渡部誠也,中野美紀,三宅 晃司,坪井涼,佐々木信也,トライボロジー会議秋 2012 予稿集,北海道,221-222,2012 年9月16日~18日
- 322. テラビットメモリを目指したホログラム記録再生方式,倉田博之,小澤尚平,大久保 海斗,吉田周平,山本学,電子情報通信学会電子部品・材料研究会,東京,2012年9 月 25日
- 323. AFM やメゾ摩擦試験機、マクロ摩擦試験機を用いた添加剤由来のトライボ反応膜の機 械的性質に関する研究, 白戸翔, 舟越皓太, 坪井涼, 三宅晃司, <u>佐々木信也</u>, 第 4 回マ イクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 福岡, 287-288, 2012 年 10 月 22 日~24 日
- 324. AFM を用いたナノインプリント金型用剥離剤の耐久性評価, 舟越皓太, 白戸翔, 谷口 <u>淳</u>, 坪井涼, 佐々木信也, 第 4 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 福岡, 289-290, 2012 年 10 月 22 日~24 日
- 325. 平均値座標に基づいた外挿/内挿適応イントラ予測方式, 望月慎太, <u>松田一朗</u>, 深井 寛修, 伊東 晋, 河村 圭, 内藤 整, 第 27 回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2012),ニュー ウェルシティ湯河原, 2012 年 10 月 24 日
- 326.カメラ姿勢の推定に適した点群マーカの配置に関する検討, 衣川 彰, <u>松田一朗</u>, 深井 寛修, 伊東 晋, 第 17 回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2012),ニューウェルシテ ィ湯河原, 2012 年 10 月 26 日
- 327. プロジェクタと半球型スクリーンを用いた視点追随ディスプレイの試作,隅田間静, <u>松田一朗</u>,深井寛修,伊東 晋,第17回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2012),ニ ューウェルシティ湯河原,2012 年 10 月 26 日
- 328.部分的に指定された奥行情報の動き補償に基づいた動画像の疑似 3 次元化,成田裕介, <u>松田一朗</u>,深井寛修,伊東 晋,第 17 回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2012),ニ ューウェルシティ湯河原,2012 年 10 月 26 日
- 329.高熱流東対応型ポーラスヒートシンクの伝熱性能,<u>結城和久</u>,<u>鈴木康一</u>,日本機械学会熱工学コンファレンス 2012,熊本県熊本市,2012年11月17日~11月18日.
- 330. 高発熱密度電子機器の沸騰冷却について,<u>鈴木康一</u>,陳 剛, <u>結城和久</u>, 日本機械学会 熱工学コンファランス 2012, 熊本大学, 2012 年 11 月 17 日~18 日,

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 331.イオン液体の界面構造がトライボロジー特性に及ぼす影響,渡部誠也,中野美紀,三 宅晃司,坪井涼,佐々木信也,第32回表面科学学術講演会講演要旨集,宮城,103-104, 2012年11月20日~22日
- 332.デジタルホログラムによる 単一上昇するマクロバブルの3次元位置測定とその周囲 流れの計測,<u>佐竹信一</u>,津田拓真,菊池正,功刀資彰,日本機械学会熱工学コンファレ ンス2012 熊本大学、(熊本県熊本市) 2012 年 11 月 27 日~11 月 28 日
- 333.DLC 膜のグリース潤滑特性に及ぼす表面テクチャの影響, 李育衡, 福田宙央, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>, M&P2012, 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会, 大阪, 2012 年 11 月 30 日~12 月 2 日
- 334.減圧水素環境下での DLC 膜の潤滑性に関する研究,大嶋健太,坪井涼,<u>佐々木信也</u>, 川口雅弘, M&P2012,第20回機械材料・材料加工技術講演会,大阪,2012年11月30 日~12月2日
- 335. PTX の解析を用いた CUDA FORTRAN プロ グラミングによる GPU 化されたバーガス 方程式の DNS の最適化,<u>佐竹信一</u>,鈴木 貴之,吉森 本,第 26 回数流体力学シンポジ ウム,日本流体力学会,国立オリンピック記念青少年総合センター(東京) 2012 年 12 月 18 日 ~ 12 月 20 日
- 336. ブロック適応ポストフィルタによる JPEG 画像の画質改善, 高石圭佑, 鈴木 源, 深井 寛修, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2012 年映像情報メディア学会冬季大会,東京理科大学森戸記 念館, 2012 年 12 月 18 日
- 337.機械学習による画素適応予測を併用した可逆符号化方式, 榊原直紀, 深井寛修, <u>松田</u> 一朗, 伊東 晋, 2012 年映像情報メディア学会冬季大会, 東京理科大学森戸記念館, 2012 年 12 月 18 日
- 338. 事例ベースの確率モデリングによる静止画像の可逆符号化の検討, 中嶋直也, 深井寛 修, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2012 年映像情報メディア学会冬季大会,東京理科大学森戸記念 館, 2012 年 12 月 18 日
- 339.形状可変な連続関数群を用いたカラー画像の近似法,五十嵐俊介,深井寛修,松田一 <u>朗</u>,伊東 晋,2012年映像情報メディア学会冬季大会,東京理科大学森戸記念館,2012年 12月18日
- 340.真空中におけるイオン液体のトライボケミカル反応に関する研究,川田将平,坪井涼, 佐々木信也,日本機械学会関東学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 東京,517-518,2013 年 3 月 15 日
- 341.境界潤滑性能を支配する吸着膜のナノ物性評価に関する研究, 鈴木悠介, 坪井涼, 佐々木信也, 日本機械学会関東学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 東京, 619-620, 2013 年 3 月 15 日
- 342.境界潤滑特性の支配的因子としての表面幾何形状パラメーターに関する研究, 佐々木 千明, 坪井涼, 佐々木信也, 日本機械学会関東学生会第52回学生員卒業研究発表講演 会講演前刷集, 東京, 627-628, 2013 年3月15日
- 343. 元素ドーピングによる DLC のトライボ特性向上に関する研究, 福田宙央, 坪井涼, 佐々木信也, 日本機械学会関東学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 107-108, 東京, 2013 年 3 月 15 日
- 344. 添加剤由来表面反応膜の物性が µ-V 特性に及ぼす影響に関する研究, 崔学詠, 坪井涼, 佐々木信也, 日本機械学会関東学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 421-422, 東京, 2013 年 3 月 15 日

法人番号	131065		
プロジェクト番号	S1101014		

- 345.紫外線ナノインプリント用離型剤の耐久性評価に関する研究, 舟越皓太, 坪井涼, 佐々木信也, 日本機械学会関東学生会第 52 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 419-420, 東京, 2013 年 3 月 15 日
- 346.回折光学素子を用いたホログラフィックメモリーの検討,吉田周平,赤松秀紀,山田 海伊,山田剛史,海野徳幸,<u>谷口淳</u>,山本学,電子情報通信学会総合大会,岐阜,2013 年3月19日
- 347.DCT 係数の段階的予測に基づいた JPEG 画像のロスレス再符号化, 市川一樹, 大竹庸介, 望月慎太, 深井寛修, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 2013 年電子情報通信学会総合大会, 岐阜大学, 2013 年 3 月 21 日
- 348.エントロピー拘束量子化を用いた静止画像の DST 符号化,伊藤真也,深井寛修, <u>松田</u> 一<u>明</u>,伊東 晋, 2013 年電子情報通信学会総合大会,岐阜大学, 2013 年 3 月 21 日
- 349. フレーム間相関を用いた流体計測用 JPEG 画像の再圧縮、西田保裕、深井寛修、松田 一朗,伊東 晋,名取慶亮,山口小波,筒田剛史,佐竹信一,2013 年電子情報通信学会総 合大会,岐阜大学,2013 年 3 月 21 日 \* 15

## 2011 年度(平成 23 年度:1年目)

- 350.環境対応型アクティブ制御水潤滑スラスト軸受,金箱孝則,<u>吉本成香</u>,杣谷啓,日本 トライボロジー学会春季大会,国立オリンピック記念青少年総合センター,渋谷区, 東京都,2011年5月23日
- 351.超小型静圧空気スラスト軸受の軸受特性に関する研究,中村一樹, <u>吉本成香</u>, 杣谷啓, 日本トライボロジー学会春季大会,国立オリンピック記念青少年総合センター,渋谷 区,東京都, 2011年5月23日
- 352. サブクール沸騰; 気泡微細化沸騰のメカニズム、について,<u>鈴木康一, 結城和久</u>, 洪 定 杓,第 48 回日本伝熱シンポジウム, 2011 年 6 月 2 日, 岡山コンベンションセンター
- 353. 微細重力環境における高熱流束輸送技術にむけて;気泡微細化を伴うサブクール沸騰, <u>鈴木康一</u>,結城和久,陳 剛,日本混相流学会年会講演会 2012(招待講演),千葉県柏市 東京大学柏キャンパス, 2011 年 8 月 9 日~11 日
- 354.動き補償と色信号間予測を併用した RGB カラー動画像の可逆符号化 —色信号間の動 ベクトル共有による付加情報の削減—,林 杏輔,青森 久,<u>松田一朗</u>,伊東 晋,第 10 回情報科学技術フォーラム(FIT 2011),函館大学・函館短期大学,2011年9月7日
- 355. 再帰型イントラ予測を用いた JPEG 画像のロスレス再符号化, 橋本峻弥, 小池弘幸, <u>松</u> <u>田一朗</u>, 青森 久, 伊東 晋, 第 10 回情報科学技術フォーラム(FIT 2011), 函館大学・函館 短期大学, 2011 年 9 月 8 日
- 356.ステレオ動画像符号化のための多峰性確率モデルによる動き/視差ベクトル表現, 増 川裕樹, 青森 久, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 第10回情報科学技術フォーラム(FIT 2011), 函館 大学・函館短期大学, 2011 年 9 月 8 日
- 357.部分的な奥行き指定に基づく静止画像の疑似3次元化,成田裕介,松田一朗,青森久, 伊東 晋,第10回情報科学技術フォーラム(FIT 2011),函館大学・函館短期大学,2011年 9月9日
- 358. 視体積交差法のための点群マーカを用いたカメラ姿勢の推定, 衣川 彰, <u>松田一朗</u>, 青森 久, 伊東 晋, 第10回情報科学技術フォーラム(FIT 2011), 函館大学・函館短期大学, 2011 年 9 月 9 日
- 359. ベイズの定理を用いたロッドレンズの MTF の改善, 堀内秀真, 吉田周平, 牛山善太,

法人番号	131065		
プロジェクト番号	S1101014		

山田剛史,山本学,電子情報通信学会ソサイエティ大会,札幌,2011年9月14日 360.ベイズの定理を用いた画像処理における GPU による高速化の検討,堀内秀真,吉田周

平, 牛山善太, <u>山本学</u>, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 札幌, 2011 年 9 月 14 日 361.LM 法を用いたデータフィッティングによるフォトポリマーのホログラム記録特性の 解析, 田中一幸, 吉田周平, <u>山本学</u>, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 札幌, 2011 年 9 月 15 日

- 362. ロッドレンズにおける準モンテカルロ法を用いた MTF 解析,吉留健太,堀内秀真,吉田周平,山本学,電子情報通信学会ソサイエティ大会,札幌,2011 年 9 月 15 日
- 363.磁性イオン液体を用いた高真空対応小型静圧回転スピンドルの開発, 倉茂一樹, <u>吉本</u> <u>成香</u>, 杣谷啓, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 金沢大学, 金沢市,石川県, 2011 年 9 月 21 日
- 364. 複数の予測器出力に連動する多峰性確率モデルによる画像の可逆符号化,柴崎俊亮, 青森久, <u>松田一朗</u>, 伊東晋, 第26回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2011),ニューウェル シティ湯河原, 2011 年 10 月 26 日
- 365.動画像の準可逆符号化におけるレート制御法, 横田達朗, 青森 久, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 第 26 回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2011),ニューウェルシティ湯河原, 2011 年 10 月 27 日
- 366. JPEG 準拠のビットストリームに可逆変換可能な画像符号化方式 —再帰型イントラ予測の導入—,小池弘幸,松田一朗,青森久,伊東晋,第26回画像 符号化シンポジウム(PCSJ 2011),ニューウェルシティ湯河原,2011年10月27日
- 367. 再帰型イントラ予測を用いた MPEG-1 動画像のロスレス再符号化, 須田貴志, 名取慶 亮, <u>松田一朗</u>, 青森 久, 伊東 晋, 第 26 回画像符号化シンポジウム(PCSJ 2011), ニュー ウェルシティ湯河原, 2011 年 10 月 27 日
- 368.カラー点群マーカによるカメラ姿勢の推定, 衣川 彰, <u>松田一朗</u>, 青森 久, 伊東 晋, 第16回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2011), ニューウェルシティ湯河原, 2011 年10月27日
- 369. 成田裕介, <u>松田一朗</u>, 青森 久, 伊東 晋, 部分的な奥行指定に基づくカラー静止画像の 疑似 3 次元化, 第 16 回映像メディア処理シンポジウム(IMPS 2011), ニューウェルシテ ィ湯河原, 2011 年 10 月 28 日
- 370.マイクロデジタルホログラフィック PTV による UV インプリントプロセスの計測, 佐竹 信一, 谷口淳, 金井高弘,海野徳幸,日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 静岡大学、浜松、2011年10月29日~10月30
- 371. 屈折率調合法を用いた多孔質内流動場のPIV可視化実験,<u>結城和久</u>,<u>鈴木康一</u>,日本機 械学会熱工学コンファレンス 2011,静岡県浜松市,2011 年 10 月 29 日~10 月 30 日.
- 372.ベイズ統計を用いた医療画像の高解像度化の検討, 堀内秀真, 吉田周平, 牛山善太, 山田剛史, 山本学, 日本光学会年次学術講演会, 大阪, 2011年11月28日
- 373.準モンテカルロ法による照明光学系の評価手法およびロッドレンズ光学系への適用, 吉留健太,堀内秀真,吉田周平,牛山善太,<u>山本学</u>,日本光学会年次学術講演会,大 阪,2011年11月29日
- 374.ベイズの定理を用いたロッドレンズのMTFの改善およびGPUによる高速計算処理法, 堀内秀真,吉田周平,牛山善太,岡田孝太郎,山本学,日本光学会年次学術講演会, 大阪,2011年11月30日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

- 375. 画像符号化のための平均値座標に基づいたイントラ予測方式, 望月慎太, <u>松田一朗</u>, 青森 久, 伊東 晋, 2011 年映像情報メディア学会冬季大会,芝浦工業大学, 2011 年 12 月 21 日
- 376. ビデオモザイキングのためのフレーム選択と繋ぎ合わせに関する一検討,土屋崇希, 松 田一朗, 青森 久, 伊東 晋, 2011 年映像情報メディア学会冬季大会,芝浦工業大学, 2011 年 12 月 22 日
- 377.超磁歪素子を用いた流体潤滑軸受用ピストンポンプの開発、岡部貴雄, <u>吉本成香</u>, 杣谷啓, 2012 年度精密工学会春季大会, 首都大学東京, 八王子市, 東京都, 2012 年 3 月 16 日
- 378.液晶用大型ガラスの非接触搬送に関する研究(多孔質フィルムを絞りに用いた場合), 津野洋明, 杣谷啓, <u>吉本成香</u>, 2012 年度精密工学会春季大会,首都大学東京,八王子 市,東京都, 2012 年 3 月 16 日
- 379. 超音波振動を用いた非接触チャックに関する研究 –吸引力の発生について–,<u>吉本成</u> <u>香</u>, 杣谷啓, 2012 年度精密工学会春季大会, 首都大学東京, 八王子市, 東京都,2012 年 3月16日
- 380.動き補償と時空間フィルタによる低照度映像の高画質化,水田辰也,松田一朗,青森 久,伊東 晋,2012年電子情報通信学会総合大会,岡山大学,2012年3月20日
- 381. 夜景への情報重畳を目的とした可視光通信による LED 電飾の識別, 赤熊高行, 衣川 彰, <u>松田一朗</u>, 青森 久, 伊東 晋, 2012年電子情報通信学会総合大会,岡山大学, 2012年3 月 21 日
- 382.動画像符号化における再帰型時空間ポストフィルタの検討,高石圭佑,青森久,松田一朗,伊東晋,2012年電子情報通信学会総合大会,岡山大学,2012年3月21日
- 383. Kinect センサにより取得した立体映像の表示法,大竹庸介,成田裕介,松田一朗,青森 久,伊東 晋,2012年電子情報通信学会総合大会,岡山大学,2012年3月22日
- 384. 再帰型イントラ予測と DST を用いた静止画像の符号化,千代島智也,青森久,松田一 朗,伊東晋,2012年電子情報通信学会総合大会,岡山大学,2012年3月23日
- 385.動き補償予測を用いた Motion-JPEG 動画像のロスレス再符号化,名取慶亮,松永健公, <u>松田一朗</u>,青森 久,伊東 晋,2012年電子情報通信学会総合大会,岡山大学,2012年3月 23日
- 386. テンプレート正規化手法に基づくセルラニューラルネットワークを用いた画像の階層 的可逆符号化,木幡 匠,瀧澤恵介,青森 久,<u>松田一朗</u>,伊東 晋,2012 年電子情報通信 学会総合大会,岡山大学,2012 年 3 月 23 日
- 387.安富猶記, 青森 久, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 可逆符号化におけるレートを最小化する予測 器の設計に関する一検討, 2012 年電子情報通信学会総合大会, 岡山大学, 2012 年 3 月 23 日
- 388.潤滑特性を支配する添加剤由来表面反応膜に関する研究,小江弘伸,加藤慎治,坪 井涼,佐々木信也,日本機械学会関東学生会第51回学生員卒業研究発表講演会講演前 刷集,千葉,431-432,2012年3月9日
- 389.材料表面と潤滑剤・添加剤分子の相互作用と摩擦特性-せん断場における分子挙動のその場観察手法を用いた解析-,渡部誠也, 渡幸治, 中野美紀, 三宅晃司, 坪井涼, 佐々木信也, 日本機械学会関東学生会第 51 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 千葉, 445-446, 2012 年 3 月 9 日

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

390.硬質コーティングに対するイオン液体のトライボ特性に関する研究,近藤ゆりこ, 坪井涼, <u>佐々木信也</u>,日本機械学会関東学生会第 51 回学生員卒業研究発表講演会講 演前刷集,千葉,449-450,2012 年 3 月 9 日

391. UBMS 法により成膜した DLC 膜の摩擦特性に及ぼす加熱処理の影響, 草野雄翔 坪井 涼 <u>佐々木信也</u>, 日本機械学会関東学生会第 51 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷 集, 千葉, 453-454, 2012 年 3 月 9 日

392. 反復フーリエ変換アルゴリズムによる ROM 型ホログラムメモリの設計,山田海伊, 武川峻介,吉田周平,山本学,電子情報通信学会総合大会,岡山, 2012 年 3 月 22 日

<研究成果の公開状況>(上記以外)

シンポジウム・学会等の実施状況、インターネットでの公開状況等 ※ホームページで公開している場合には、URLを記載してください。

<既に実施しているもの>

現在までに、下記のシンポジウム等を開催した。シンポジウムは毎年開催し、拠点形成の一 助となっている。 第1回シンポジウム 主催:総合研究機構 先端ホログラフィ技術研究開発センター 日時:平成24年1月30日(月) 会場:東京理科大学 神楽坂キャンパス ポルタ 7階 第2、3会議室 講演者:山本 学、谷口 淳、佐竹 信一(先端ホロセンター)、ポスターセッション(11 件) 参加者:27名 第2回シンポジウム 主催:総合研究機構 先端ホログラフィ技術研究開発センター 日時: 平成 25 年 1 月 29 日 (火) 会場:東京理科大学 野田キャンパス カナル会館 3階 大会議室 講演者:山本 学(先端ホロセンター)、伊藤 智義(千葉大)、三宅 弘人(ダイセル) ポスターセッション (20件) 参加者:47名 第3回シンポジウム 主催:総合研究機構 先端ホログラフィ技術研究開発センター 開催日時:平成26年1月24日(金) 会場:東京理科大学 葛飾キャンパス 図書館大ホール、ホワイエ 講演者:山本 学、谷口 淳、佐竹 信一(先端ホロセンター)、ポスターセッション(15件) 参加者:33名 第4回シンポジウム 主催:総合研究機院 先端ホログラフィ技術研究開発センター 開催日時:平成27年3月13日(金) 会場:東京理科大学 葛飾キャンパス 図書館大ホール、ホワイエ 講演者:山本 学、由井 宏治、岡部 貴雄、佐竹 信一、結城 和久、松田 一朗(先端ホロ

法人番号	131065		
プロジェクト番号	S1101014		

センター)、ポスターセッション(10件)
参加者:37名
第5回シンポジウム
主催:総合研究機構 先端ホログラフィ技術研究開発センター
開催日時:平成27年10月30日(金)
会場:東京理科大学 葛飾キャンパス 図書館大ホール、ホワイエ
講演者:JamesW.M.Chon (Faculty of Science,Engineering,and Technorogy,Swinburne University of Technology) 佐竹 信一、結城 和久、松田 一朗(先端ホロセンター)、吉田 修平、海野 徳幸(東理大 基礎工学部)、岡部 貴雄(東理大 工学部)

ホームページの URL は下記になる。 http://sslbws03.te.noda.tus.ac.jp/index.html

# 14 その他の研究成果等

## <特許>

## 2015 年度(平成 27 年度:5 年目)

- 1. 山本学、谷口淳、吉田周平「記録媒体およびホログラム記録再生装置」 特願 2015-102691 (2015 年 5 月 20 日) \* 3
- 2. 山本 学、中村 優、瀬戸 律夫、中島 豊 「記録再生方法」 特願 2015-102692 (2015 年 5 月 20 日)
- 3. 山本 学、吉田 周平、中村 優 「記録再生方法」 特願 2015-102694 (2015 年 5 月 20 日)
- 4. 山本 学、 吉田 周平、中村 優 「記録再生方法およびホログラム記録再生装置」 特願 2015-102693 (2015 年 5 月 20 日)

# 2014年度(平成 26年度:4年目)

- 5. 吉本 成香「回転機構」特願 2014-193189 (2014 年 9 月 23 日)
- 6. 吉本 成香「化合物及びその製造方法、磁性流体組成物及びその製造方法並びに磁性 流体シール」特願 2014-226961 (2014 年 11 月 7 日)

# 2012 年度(平成 24 年度:2年目)

- 7. 吉本 成香「ワーク浮上装置」特願2012-118928(2012年5月24日)
- 8. 吉本 成香「ワーク浮上装置用通気ユニット、ワーク浮上装置」特願2012-11 8929 (2012年5月24日)
- 9. 吉本 成香、津野 洋明、杣谷 啓、「ワーク浮上装置」特願2012-228928
   (20012年5月24日)
- 10. <u>由井 宏治「光干渉計、情報取得装置、及び情報取得方法」出願番号: PCT/JP2012/74962</u> (平成 24 年 9 月 27 日) アメリカ・ドイツにおいても国際特許認定済み\*9

# く受賞等>

# 2015 年度(平成 27 年度:5 年目)

 Konica Minolta Outstanding Poster Award, PB1-05 "Lossless Re-encoding of Holographic Images Stored in JPEG Format for 3D Flow Field Measurement", Takayuki Shikakura, Ichiro Matsuda, Yusuke Kameda, Susumu Itoh, Shin-ichi Satake, The 1st International Conference on

法人番号	131065
プロジェクト番号	S1101014

Advanced Imaging, National Center of Science, Tokyo, JAPAN, 2015 年 6 月 17 日~6 月 19 日.

- 2. 國安 政孝, 優秀プレゼンテーション賞, 公益社団法人 日本伝熱学会 第52回日本伝 熱シンポジウム, 福岡, 2015 年6月3日
- 3. 第3回表面・界面のメゾスコピックサイエンスとプロセッシング研究会講演会 ポス ター賞(2015年11月25日) "誘導ラマン散乱光干渉計の開発と多層薄膜材料分析へ の応用",大森 絵梨,伴野 元洋,<u>由井 宏治</u>

# 2013 年度(平成 25 年度:3 年目)

4. Analytical and Bioanalytical Chemistry (ABC) Poster Award in the Seventh International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy (2013. 8. 29).

Development of stimulated Raman scattering interferometer, Motohiro Banno, Takayuki Kondo, Ami Nagashima, <u>Hiroharu Yui</u>

7th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy, Kobe Convention Center, Kobe.

# 2012 年度(平成 24 年度:2 年目)

5. 日本機械学会フェロー、吉本成香

# 2011 年度(平成 23 年度:1 年目)

- 6. 日本機械学会生産加工·工作機械部門優秀講演論文表彰、吉本成香
- エレクトロニクス実装学会ベスト論文賞、エレクトロニクス実装学会 ICEP2011、 結城和久,鈴木康一、2011 年 4 月 19 日
- 8. (社)電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ活動功労賞、松田一朗

法人番号	131065		
プロジェクト番号	S1101014		

15 「選定時」及び「中間評価時」に付された留意事項及び対応

<「選定時」に付された留意事項> 留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。 該当なし。

<「選定時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

該当なし。

<「中間評価時」に付された留意事項> 留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。

以下の項目について、検討の必要があることが示された。

- (1) 事業実施体制:研究拠点の位置づけを明確にする。
- (2) 施設・設備の活用。
- (3) 報告書における成果の纏め方が不十分。
- (4) 外部評価の実効性。

# <「中間評価時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

(1)「事業実施体制:研究拠点の位置づけを明確にする。」

この項目に関しては、研究拠点は、メモリについては産業化の拠点、計測については高度研究拠 点としての位置付けで事業終了後も継続して行く。本研究期間中に先端のホログラフィ技術が完成し つつあり、この成果を平成27年10月30日の国際シンポジウムで公開した。また、産業化の拠点を 見据えて、合計10本の特許申請という多くの成果があがった。

(2) 「施設・設備の活用。」

本学では、機器センターへの登録により、広く学内で使用ができる体制も整っており、プロジェクト 終了後も継続して、研究の推進が図れる活用体制となっている。

(3) 「報告書における成果の纏め方が不十分。」

成果論文の選択や論文リストについて掲載の適切な仕方について留意する。今回の報告書ではこの点に配慮して作成した。

(4) 「外部評価の実効性。」

外部評価については、より実効性の上がる方法で実施した。具体的には、研究開発と拠点形成で の2項目に分けて助言を受けた。外部評価は、平成27年7月29日に実施した。

## 3. ホログラフィックメモリ構築グループの研究課題と進捗報告

ホログラフィックメモリ構築グループの各メンバーの研究課題を下記に記す。

- ・山本 学: ホログラフィックメモリ用データ生成
- ・吉本 成香:電子ビーム露光で用いる真空中ステージの開発
- ・谷口 淳:電子ビーム露光法による原盤作製技術の確立
- ・佐々木 信也:転写原盤表面の摩擦・摩耗特性の評価
- ・向後 保雄:離型層の形成と転写性評価
- ・由井 宏治:ナノインプリント金型表面の顕微・位相差レーザー分光分析

次に各メンバーの進捗について記す。

#### 3-1. ホログラフィックメモリ用データ生成(山本 学)

#### (1) 最終目標

DOE の多重化による大容量化の実現.数値目標としては,H27年度には,1Tbits/inch<sup>2</sup>の記録密度達成.

#### (2) 原理

回折光学素子(Diffractive Optical Element: DOE)は回折現象を利用して光の波面を変換し, 所望の分布を得るための光学素子で,レーザーの断面強度分布を成形するビームシェイパ ーや回折レンズに用いられている. DOE の設計は,入射する波面と作動位置での波面(再 生波面)を所与として,それらと矛盾のない DOE の振幅または位相分布を求める逆問題の 一種と考えられる.

DOE は振幅型と位相型に大別できる.振幅型は波面の変換関数を(複素)振幅分布として実装する方法,位相型は位相分布として実装する方法である.前者の例としてはゾーン プレート,後者の例としてはキノフォームが挙げられる.振幅型 DOE の+1 次回折効率は1 0%程度である一方,位相型 DOE では100%近くの+1 次回折効率を実現できる(表1).

種類	階調数	0次	+1 次	-1 次
振幅型	振幅2階調	25%	10.1%	10.1%
	位相2階調	0%	40.5%	40.5%
	位相4階調	0%	81.1%	0%
位相型	位相8階調	0%	95.0%	0%
	位相 16 階調	0%	99.7%	0%
	連続位相	0%	100%	0%

表 1. DOE の種類と回折効率(スカラー回折理論による評価)

位相型 DOE の位相階調数と回折効率の関係を図1に示す.8 階調あれば十分な回折効率を 実現できると言える.多階調の位相型 DOE を実装する方法としては図2に示した表面レリ ーフ構造が挙げられる.この方法では、空間的に分割されたピクセルごとに、位相に応じ た深さを与えることで、入射光の波面の位相を変調する.再生光の波長をλ、媒質の屈折率 を n、位相を φ とすると、ピクセルの深さ d は次の式で与えられる.

$$d = \frac{\lambda}{2(n-1)} \left( 1 - \frac{\phi}{2\pi} \right) \tag{1}$$





図1. 位相階調数と回折効率の関係

図 2. 表面レリーフ構造

多くの逆問題がそうであるように,DOEの設計も最適化問題の一種として定式化できる. 次の表2にDOE最適化の方法を示す.位相型DOEの設計手法としては様々なアルゴリズ ムが提案されているが,ピクセル数の多い大規模なDOEの場合,反復フーリエ変換アルゴ リズム(IFTA)の一種であるGerchberg-Saxton (GS)アルゴリズムが有効である.GSアルゴリ ズムでは入射光の波面と目標となる強度分布を制約条件として与え,位相を保存しながら 伝搬と逆伝搬を繰り返すことで位相の最適化を行う.このとき,再生波面の振動を抑えて 再生強度分布の一様性を改善するために,反復計算中に正則化を行う場合がある.図3に GS アルゴリズムの概要を示す.

アルゴリズム		アナログ	位相	大面積	計算
		形状	最適化	DOE	時間
<b>出</b> 一些句件	DBS 法	×	0	×	長
単─111円11生 - 年 注	焼きなまし法	×	0	×	超長
于伝	IDO	×	0	0	長
IFTA アルゴリズム	Gerchberg-Saxton	0	0	0	短
	Ferwarda	0	0	0	短
	ピンポン	0	×	0	普通
	Yang-Gu	0	o/×	0	長
進化	遺伝的	×	0	×	超長
プログラム	アルゴリズム				
包括的 アルゴリズム	反復符号化	×	0	×	超長
	アルゴリズム				
	エラー拡散	×	0	0	超長

表 2. DOE 最適化の方法



図 3. Gerchberg-Saxton アルゴリズムの概要

次の図4に,GSアルゴリズムにより最適化された位相分布の例を示す.左は目標強度分布, 右はそれに対して最適化された位相分布である.  $\lambda = 405$  nm, 作動距離は5 mm としている.



図4. 目標強度分布と最適化された位相分布の例

DOE は重ね合わせの原理に基づいて、複数の機能を単一の素子に実装できる.単一の D OE から複数の再生像を得るための方法としては開口多重が挙げられる.図5に開口多重の 原理を示す.開口多重 DOE の最適化は、GS アルゴリズムの伝搬・逆伝搬の計算過程中に、 開口マスクによって光が一部遮断されるプロセスを組み込むことで実現できる.このとき、 各マスクはそれぞれ開口部が重ならないように直交関係が成り立たなければならない.各 マスクを用いて最適化された位相を重ね合わせることで開口多重 DOE が得られる.多重化 された DOE の再生像は、再生光路上にマスクを設置することで分離する.



図5. 開口多重の原理

#### (3) 実験結果および考察

最適化により得られた位相分布は量子化し、表面レリーフ構造として実装する.表面 レリーフ構造は、UV ナノインプリントリソグラフィー(UV-NIL)により作製する.

UV-NIL により作製された DOE は図 6 に示す光学系を用いて再生する.再生には $\lambda$  = 40 5 nm のレーザーを用いる.  $\lambda/4$  板を用いることで DOE からの再生光の偏光を変え, PBS に より入射光と再生光を分離する.このとき,リレーレンズの焦点の比によって作動距離を 調整することができる.



図 6. 再生光学系

ピクセル数は1000×1000,作動距離 f = 5 mm とし,目標強度分布は図4とした.各 DOE の再生像を図7に示す.いずれも入射光の強度は0.8 mW としている.



図 7. DOE 再生

4 階調,8 階調とも目標強度分布で設定した"TUS"という文字列が再生されていることが分かる.再生像を比較すると,8 階調の方が鮮明に再生されており,また輝度も高いことが分かる.

次に開口多重 DOE の再生像を図 8 に示す. 目標強度分布は"A"および"B"という文字とし, 開口マスクで右半分を遮蔽した場合は"A"が再生され, 左半分を遮蔽した場合は"B"が再生 されるように設計した.



(a) マスクなし



(b) 右半分を遮蔽図 8. 開口多重 DOE の再生像



(c) 左半分を遮蔽

多重化された DOE が開ロマスクによって分離再生できていることが分かる.この結果より, 開口多重が原理的に有効であることが確認できた.同様に4多重の開口多重 DOE の再生結 果を示す.目標強度分布は"A", "B", "C", "D"という文字に設定し,上下左右 1/4 ずつ遮蔽 することで分離できるように設計した.図9に"A"と"C"の再生像を示す.





(a) "A"の再生像(b) "C"の再生像図 9. 開口多重 DOE の再生像(4 多重)

再生像は一部不鮮明ながら、分離再生ができていることが分かる.これらの結果より、開 口多重 DOE による大容量光ストレージ実現のための原理確認ができたと言える.

DOE を用いた ROM 型ホログラムメモリのさらなる大容量化を目指すため,開口多重 による多重ホログラムを作成し,その有効性を検証した.図10に開口多重の原理を示 す.



図 10. 開口多重の原理

開口多重では,多重化したホログラムからの再生像を分離するために,直交した開ロマ スクを用いる.また DOE の反復最適化において,伝搬と逆伝搬の過程に開ロマスクを 挿入し,計算結果を足し合わせることで多重ホログラムを設計する.

図 11 及び図 12 に今回の再生実験で使用した光学系の図を示す. レーザーから照射された波面は歪みを含んでおり,またゴミによって回折リングが生じる. これらを避けるため,ビーム整形にスペイシャルフィルタを用いた. スペイシャルフィルタによって発散光となったレーザーをレンズによって並行光とし,この状態で DOE に照射する. DO E を通過したレーザー光は, DOE から距離 5 mm に開ロマスクを設置することでさらに 5 mm 先の位置で結像する. 今回の実験系では,  $f = 80 \text{ mm} \geq f = 150 \text{ mm}$ のリレーレンズで再生像を拡大した. 最後に適切な光量で観測できるよう ND フィルタを設置し, CCD カメラで撮像する.



図 11. DOE 評価光学系



図 12. DOE 評価光学系実機

図 13 には開口マスクなし,図 14 には開口マスクを設置したときの再生像をそれぞれ 示す.



図 13. 再生像(開口マスクなし)



図 14. 再生像(開口マスク有り)

開ロマスクを用いることで4つの画像を独立して再生することはできたが,開口部と閉 口部での輝度に大きな差があること,開口部の対角位置では信号が再生されていないこ とが確認でき,その再生品質には課題が残った.再生像の品質を向上させるための方法 として開ロマスクの構造の変更,それに伴うDOEの再設計が考えられる.信号がマス クの閉口部で再生されなかった原因として,マスク開口部から対角位置まで信号光が十 分に回折しなかったことが考えられる.この問題を回避するには再生像の結像距離を十 分に長くとり,信号光が十分に回折できるようにする方法が考えられるが,この方法で は信号光が伝播中に散乱するなどして劣化すること,再生系が大型化する等の問題が発 生する.そこで,開口マスクの開口パターンを変更することによってこれらの問題を回 避する.図15のような開口パターンのマスクを使用することで,信号光の再生品質向上が期待できる.



図 15. 新規パターン開口マスク

図 15 のような開口マスクを使用したときのシミュレーションによる再生像は図 16 のようになった.



図 16. シミュレーションによる再生像

このように開口マスクの設計を変更することで上記の問題を回避できる.

#### (4) 目標に対する達成度

ホログラムの最適化から電子ビーム描画用マスクデータ生成まで一貫した設計手法を確 立した.1 Tbits/inch<sup>2</sup>の高密度記録におけるピクセルサイズでの再生,振幅の多値記録が それぞれ可能であることをシミュレーションおよび実験によって明らかにした.多重記録 については,種々の方式についてシミュレーションを行い,開口多重方式が有効であるこ とを見いだした.開口多重について多重化のデータパターンの作成ソフトウエアを立ち上 げ,原理確認として4多重の記録および再生実験を行った.実験の結果,再生像の分離を 確認でき方式の有効性を検証できた.現状の4多重ではホログラムサイズ,1ページビット 数(微小ピクセルサイズ),振幅多値記録再生および多重記録を総合すると,1 Tbits/inc h<sup>2</sup>の記録密度が達成できた。

#### 3-2. 電子ビーム露光で用いる真空中ステージの開発(吉本 成香)

## (1) 最終目標

真空対応型回転ステージと電子線描画を組み合わせたデータ記録用パターン創生技術 の確立

#### (2) 原理

電子線を光源に用いる回転描画で十分なデータ量を持つ ROM 原盤を作成する場合,ナノ メートルオーダの回転精度を持つ回転機構が必要である.電子線を用いたデータ記録用の 加工では,高真空中での加工が必須であり,回転中に加工対象や電子銃等を汚染するアウ トガスの発生が十分に小さいことと,10<sup>4</sup> Pa 以下の高真空が維持できることが要求される.

これらの条件を満たす回転機構として,高真空対応気体軸受が提案されている.これら の機構は気体軸受とシール機構からなり,この構造は,真空チャンバ中に高精度な回転が 可能な回転軸を導入することができるが,装置が大型で複雑であることに加え,回転が真 空度を変化させる.本研究では,回転精度と小型化を両立し,回転が真空に影響を与えな いイオン液体を潤滑液とする動圧軸受を提案し,実際に回転描画を行い,その有用性を確 認した.

#### (3) 実験装置および方法

#### ① 開発した回転機構

図 1 に開発した回転機構の模式図を示す. この機構は回転軸とテーブル,軸受およびブラ シレス DC モータ(定格 10 W)で構成されている. この回転機構は,潤滑流体として表 1 に 示すイオン液体を使用しており,これが 3 µm の軸受すきまを満たしている. 液体の使用量 は約 0.5 ml と少量である. 軸に設けられたスパイラス溝により,回転中は圧力が発生し, 非接触支持される. 回転は,ビルトインブラシレス DC モータによって行う. 流体の供給 装置やシール構造を必要としないため,装置全体で直径 60 mm,高さ 26.6 mm と,真空用 気体軸受と比較して大幅に小型である.

#### ② 回転精度測定

図 1 には提案する回転機構に加えて回転時の半径方向および軸方向振れを測定するための変位計が 2 か所に設置されている様子が示されている。測定は、静電容量型非接触変位計(Micro Sense 3401HR; Japan ADE Ltd., Tokyo, Japan)を用いて測定した。原盤の電子線描画において、本研究では、実際に電子線で描画するパターンの半径方向の幅、深さ、電子線のビーム径から精度を逆算して、半径方向精度 50 nm 以下、軸方向精度 40 nm 以下を目標値とした。





Manufacturer	Kanto Chemical Co. Inc. (Tokyo)
Product name	N,N-Diethyl-N-methyl-N- (2-methoxyethyl)Ammonium bis(trifluoromethanesulufonyl)imide
Structural formula	$\begin{array}{c} H_{3}CH_{2}C \\ H_{3}CH_{2}C \\ H_{3}CH_{2}C \end{array} \xrightarrow{\begin{subarray}{c} CH_{3} \\ CH_{2}CH_{2}CH_{2}OCH_{3} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} CH_{2}CH_{2}OCH_{3} \\ H_{3}CH_{2}C \\ H_{3}CH_{2}OCH_{3} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} CH_{2}CH_{2}OCH_{3} \\ H_{3}CH_{2}OCH_{3} \\ H_{3}CH_{3}OCH_{3} \\ H_{3}CH_{3}OCH_{3} \\ H_{3}CH_{3}OCH_{3} \\ H_{3}CH_{3}OCH_{3} \\ H_{3}OCH_{3} \\ H_{3}O$
Molecular weight	426.4
Density	1.42 g/ml (20 °C)
Viscosity	120 cP (20 °C)
Vapour pressure	Less than 10 <sup>-10</sup> Pa
Characteristic	Hydrophobicity, Colorless, Transparent

表1 潤滑液として使用したイオン液体の詳細

## ③ アウトガス評価

回転機構を真空チャンバ中に設置して回転させ、のアウトガス評価および回転中の真空 度変化測定を行った.アウトガス評価には四重極質量分析計(e-vision2; mks Co.,)を用い, 真空計は冷陰極電離真空計(PKR251; Pfeiffer Vacuum Technology, Asslar, Germany)を用 いた.

#### ④ 回転描画

図2に回転描画を行った際の構成を示す. 描画装置はSEM(ERA-8800FE; ELIONIX Co., Tokyo, Japan)に対して描画機能を付加したものを用いた. 提案の回転機構はアタッチメン トとしてSEMの真空チャンバ中に取り付けることができるため,気体軸受を使用する方法 と比較して回転描画装置の大幅な小型化, 簡素化が可能である. 回転テーブルに, ポジ型 ZEP-520A (Zeon Corp., Tokyo, Japan)で1 µm 厚のコーティングされたウエハを, 導電性 両面テープを用いて固定し,回転させながら電子線の照射位置を半径方向にずらすことで 同心円溝を加工した.



## 図2 提案の回転機構を用いた回転描画装置の構成



# (4) 結果および考察

# ① 回転精度測定

図3に回転数が500 rpmから 3000 rpm まで500 rpm おき の軸方向回転振れ量(Axial run-out)と周方向回転振れ 量(Radial run-out)を示す. 回転精度は,回転テーブル上 に半導体ウエハ(Sample)を 乗せた場合と,何も乗せてい ない場合の2通りを測定し た.

回転数の増加に伴い,周方向 成 回転振れ量が低下している. 回転数の増加による精度の低下は,

装置の組み立て時に生じる不釣り 合いや,モータへの回転波形の不 正確性によるものと考えられる. しかし,2500 rpmまでは,目標値 を満たし周方向の回転精度に関し ては,十分に電子線露光に使用可 能である.また,軸方向の回転精 度は目標値を満たしており,なお かつ電子顕微鏡の焦点深度よりも 小さい値であるため,十分な精度 であるといえる.

#### ② アウトガス評価

図4に回転機構回転時の真空チャンパ内真空度の推移を示す.本装 置は構造上,初回回転時に,軸受 組立時に潤滑液に混入した気泡が

軸受すきまから排出されるため,一時的に真空度が悪化することがあるが,真空引きの 過程で軸受を回転させておくことでこれを回避できる.図4より,1分間の回転中も真 空チャンバは真空度10<sup>-6</sup> Pa 台を維持しており,回転によって真空度に影響しないこと がわかる.この特徴は真空用気体軸受に対して優位である. 図5に四重極質量分析計によるアウトガスの質量スペクトルを示す.半導体ウエハや チャンバ中を汚染することが懸念される成分は,潤滑液として使用しているイオン液体 の構成元素から,質量数SO<sub>2</sub>(64),CF<sub>3</sub>(69),H<sub>2</sub>S(34)が予想される.しかし,これらを含 めて,分圧は各成分10<sup>-7</sup> Pa以下であり描画に大きな影響を与えるとは考えにくい.ま た,回転前後で大きな変化が見られないことからも,アウトガスの面からも提案の機構 は電子線描画に使用できると判断した.



#### ③ 回転描画

図 6(a), 図 6(b)は, SEM に 提案した回転機構を取り付 け,電子線による回転描画で 1 μm の ZEP コーティングさ れた半導体ウエハに対して 加工したパターンのレーザ 一顕微鏡写真である.直径 6 mm の同心円溝には 12 本のバ ンドが半径方向に 10 μm 間隔 で加工されている. 各バンド

はトラックピッチ100 nmの 10本の溝から成るように設 定した.描画は回転数 2000 rpm,加速電圧5 kV,電流1 00 pAで行われた.図6(c) に Dose 量が 124.8 µC/cm<sup>2</sup> のバンドの写真を例に示す. このバンドを構成する溝の 最小溝幅は 24 nm,実際の溝 間隔は約 100 nm である.こ のことから,提案の回転機 構が,ホログラフィデータ

のための回転描画機構として十分な回転精度を持ち,電子線加工に対して悪影響を与え ていないことがわかる.本実験によって,提案の機構が電子線回転描画に有用であるこ とが示された.



図 6(a) 回転描画で製作された同心円溝





図 6(c) Dose 量 = 124.8 µC/cm<sup>2</sup>のバンド
④ イオン液体を用いた低速回転用静圧スピンドルの開発



図7 製作した低速回転用静圧スピンドル

円盤型光学メディアの記録容量増加の要求に応えるため,記録媒体上に,より高密度 かつ精密な記録パターンを加工する手法が,数多く検討されている.このパターンは, 高精度な回転が可能な回転テーブル上に,レジストを塗布した原盤を設置し,ディスク を回転させながら光源を原盤に当てることで形成される.現在,波長の短い電子線を用 い,テーブルを100 rpm 以下の低速で回転させることで,より高密度で精密な記録パ ターンを加工できる電子線露光装置の開発が進められている.しかし電子線を使用する ためには,高真空環境が必須であるため,高精度な低速回転機構を高真空環境に導入す る必要がある.サブミクロンメータの高い回転精度が得られる軸受としては,空気や油 を潤滑流体とした流体潤滑静圧軸受が挙げられるが,これまで高真空対応の静圧空気軸 受が提案され研究されている.静圧空気軸受の場合,導入した空気をチャンバ外に排出 するために,多数の真空ポンプや排気管を必要とし,装置が複雑で大型になるという問 題があった.また真空対応の潤滑油を用いた流体潤滑軸受でも,高真空中においては潤 滑油が蒸発し,真空度の低下やチャンバ内の汚染を生じるという問題があった.

そこで本研究では蒸気圧が極めて低いイオン液体を静圧軸受の潤滑剤として使用し, 真空対応の潤滑流体加圧用ポンプ,磁性流体シールを用いた高真空対応型静圧回転機構 を提案する.そして提案する回転機構が,高真空環境において,低速回転で高い回転精 度を達成できる機構であること,電子線の露光に問題を生じるようなアウトガスを発生 しないことを実験的に明らかにすることを目的とした.結果として,100 rpm で NRRO 100 nm 以下, RRO 8 μm 以下の回転精度を,10<sup>-3</sup>Pa の真空中で達成できることを確認し た.

## (5) 目標に対する達成度

提案する機構は実際に電子線を用いた回転描画に使用することができ、その回転精度 は、本プロジェクトのホログラフィックメモリを露光するための要求精度を満たしてい ることが明らかになった.

#### 3-3. 電子ビーム露光法による原盤作製技術の確立(谷口 淳)

# (1) 最終目標

ホログラム ROM 用の原盤作製技術の確立と転写した樹脂(ROM)でのホログラム再生確認。回転ステージの深さを変えた描画技術の確立。

## (2) 原理

ホログラム ROM 原盤の三次元形状を電子ビーム露光により作製する。この原盤の形状 は、再生に使うレーザーの波長を 405nm とし、反射型のホログラムとして計算により求 める。図1に反射型ホログラム ROM 原盤の概念図を示す。原盤の三次元形状は、高さが 8 諧調、最小画素 A は、450nm 角となっている。ここで、深さを変えるには、電子ビー ム露光のドーズ量を変化させて作製する。



# 反射型ホログラムメモリ

の深さdを求める式

$$d = \frac{\lambda}{2(n-1)} \left( 1 - \frac{\phi}{2\pi} \right)$$

樹脂の屈折率n = 1.52 で計算

位相 $\phi$ (rad)	理論値の 深さ <i>d</i> (nm)
$\pi/4$	506.3
$\pi/2$	434.8
$3\pi/4$	361.3
π	289.9
$5\pi/4$	216.4
$3\pi/2$	144.9
$7\pi/4$	71.5

図1. 反射型ホログラム ROM 原盤の概念図

作製された ROM 原盤は、ナノインプリントにより転写し、樹脂製の ROM を複製する。 この複製された樹脂製 ROM に関してもホログラム再生を確認する。また、ROM はディス ク状に作製する必要がある。そのため、回転ステージを取り付けた電子ビーム露光装置 を開発し描画特性を出し深さを変化させた描画が可能かどうか調べる。

#### (3) 実験装置および方法

電子ビーム露光は、走査型電子顕微鏡(SEM) ERA-8800FE(エリオニクス社)に電子 ビーム描画ができるようにブランキング信号が導入できるように改造したものを用い た。描画するパターンは、パソコンのビットマップ(BMP)ファイルで制御できるよう にしている。実験のプロセスを図2に示す。



図2. ホログラム原盤作製と複製プロセス

原盤の作製は、Si 基板の上に電子ビームレジストとして、Spin-On-Glass (SOG)を 塗布したものを用いた。SOGは、ポジ型のレジストでありフッ酸緩衝溶液で現像できる。 このレジスト層に、電子ビームの加速電圧 20 kV、電流 50 p A で、図1のような深さを えるために、電子ビームのドーズ量を変えて露光を行った(図2の1)。例えば、一番 深い 506.3 nm を得るには、267 µ C/cm<sup>2</sup> のドーズが必要であった。電子ビーム露光後に 現像を行い(図2の2)、原盤が完成する(図2の3)。これをマスターモールドとす る。作製されたマスターモールドは、Si 上のレジストパターンであるため、これを樹 脂で一度転写して(図2の4)、反転モールドを作製した(図2の5)。この時の転写 は、マスターモールドに UV 硬化樹脂を滴下し、ポリエステルフィルムをかぶせて UV 光 を 3J/cm<sup>2</sup> 照射した。押し付け圧力は 0.3MPa で 5 分間の保持時間で行った。この反転モ ールドから Si 基板上へもう一度 UV ナノインプリントで転写し(図 2 の 6)、ROM を複 製した(図 2 の 7)。

次に、ディスク状への描画方法について説明する。図3に回転ステージを電子ビーム 露光装置に取り付けた様子を示す。





SEM形式:ERA-8800FE(Elionix社製) SEMチャンバサイズ: 300mm×300mm×300mm

図3. 回転ステージの取り付け様子

回転ステージは、イオン液体を用いた動圧軸受けを用いており、特徴としては真空中で も動作可能である。また、小型のため、図3のように SEM 内の試料ホルダーに直接設置 して使用可能である(真空対応回転ステージの詳細は 25 ページ参照)。深さを変化さ せるのに、電子ビームのドーズ量を変化させておこなった。

# (4) 実験結果および考察

電子ビーム露光、現像により作製されたマスターモールドの形状を図4に示す。



図4. マスターモールドの形状(左)上面図、(右)斜め上からの図

図4左写真は、レーザー顕微鏡による上面図であり、図4右図は、原子間力顕微鏡(A FM)による鳥瞰図である。設計値との誤差はあるが、8段の階調作製できていることが わかる。

次に、このマスターモールドから2回ナノインプリントにより転写して作製した複製のホログラム ROM の形状を図5に示す。



図5. 複製ホログラム ROM の形状(左)上面図、(右)斜め上からの図

図5左写真はレーザー顕微鏡による上面図であり、図5右図は、AFMによる鳥瞰図で ある。図4とは、違う場所を測定しているが、8階調作製できているのがわかる。

次に、これらのホログラム ROM を再生した結果を図6に示す。再生レーザーの波長は、 405 nm である。



図6.マスターモールドと複製 ROM の再生結果

今回のホログラムは、図6左上にあるようなTUSという白抜きの文字が再生すると出 てくるように設計してあり、再生の結果、TUSの文字が出てきた。また、4 諧調は中間 評価までに作製できており[1]、この4 諧調と今回作製した8 階調では、再生の精度が 上がっていることがわかる。これにより、ホログラムの作製、複製、再生が確認できた。

また、今回の理論上の深さ、マスターモールドの深さおよび複製ホログラム ROM の深 さを比較したのを図7に示す。



この図より、誤差は最大でも17nm以内に抑えられており、高精度でホログラムROM

まで作製する技術を確立した[2]。

1µm

次に回転ステージを用いて同心円状に微細パターンを行った結果を図8に示す。実験 条件は、加速電圧 10kV、電流値 100pA、現像時間 30 秒であった。



同心円状の線パターンの SEM 観察画像 図8.

この結果より、40 nm の微細線パターンの描画が可能であることがわかった[3,4]。 次に、深さ変化をさせるために、電子ビームのドーズ量を変えて同心円状に描画した パターンを図9に示す。



図9. 深さ変化させた場合の同心円状パターンと断面 SEM 写真

深さ: 650nm

1µm

深さ: 1.03µm

1µm

Rさ: 293nm

図9左上のSEM 写真は、同心円状に線パターンを描いた時の結果である。この描画後、 深さを測定するために断面を割り、深さを測定した。断面を割った様子が図9右上のS EM 写真であり、ドーズ量の違いによる線パターンの深さ、幅の変化は図9の下の SEM 写真になる。レジストの膜厚は2 µm とし、電子ビームの条件は、加速電圧 20 kV,電 子ビームの電流値 20pA,現像時間 45 s で行った。ドーズ量は、電子ビームの照射時 間を変化させて行った。図9の結果から、深さ 293,650,1030 nm と変化させることが 可能であった。線幅は 300 nm 程度に抑えられており、ホログラムパターンを描画する 解像度を持っていることがわかる。ホログラムを描画するには、回転方向にパターンを 描画する必要があるが、これは電子ビームのオンオフを制御することにより可能である。

## (5) 目標に対する達成度

現時点で8階調のホログラムの作製方法と再生が確認できた。この8階調のホログラム ROM の記録密度は、0.3 Tbits/inch<sup>2</sup>に該当する。4多重(多重化に関しては17ページ参照)を行うことにより、記録密度は4倍となるため、0.3 Tbits/inch<sup>2</sup> x 4多重=1.2 Tbits/inch<sup>2</sup>が達成された。

また、ディスク状へ描画するための回転ステージの開発および深さ制御電子ビーム描 画技術の確立も完了した。

#### 参考文献

[1] Computer generated hologram-ROM fabrication and duplication by EBL and UV -NIL, Keito Ogino, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, Jun Tanigu chi, Microelectron. Eng. 123, pp 163–166, 2014 (査読有)

[2] Fabrication of eight-step diffractive optical element for hologram-ROM, Y uta Shinonaga, Keito Ogino, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, J un Taniguchi, Microelectron. Eng. 141, pp 102–106, 2015 (査読有)

[3] Electron beam mastering system using a vacuum-compatible hydrodynamic spi ndle, Microelectron. Eng. 142, pp 64–69, 2015(査読有)

[4] The depth control of circular grooves fabricated by rotational electron b eam machining, Takao Okabe, Kai Ojima, Yuta Shinonaga, Noriyuki Unno, Masaaki Miyatake, Jun Taniguchi, Shigeka Yoshimoto, Shinya Sasaki, Proc. of The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2015 年 10 月 (査読有プロシーディング)

# 3-4. 転写原盤表面の摩擦・摩耗特性の評価(佐々木 信也)

## (1) 最終目標

原盤寿命向上のための離型剤耐久性評価方法の確立

## (2) 原理

紫外線ナノインプリントリソグラフィ (ultraviolet nanoimprint lithography, UV-NIL) とは, 被加工材である UV 硬化性樹脂にモールドの凹凸パターンを転写する技術である.マイク ロ・ナノ構造を簡便かつ低コストで成形できるため,半導体製造プロセスやバイオデバイ スなど幅広い領域への応用展開が期待されている.しかし,UV 硬化性樹脂は付着性を有 しているため,離型する際に UV 硬化性樹脂がモールドへ移着して転写不良を引き起こす 場合があり,その改善が必須となっている.転写不良の対策として,モールド表面に離型 剤を表面処理する手法が用いられている.しかしながら,繰り返し転写を行う過程で離型 剤の劣化が起こり,十分な耐久性が得られていないのが現状である.

本研究では、先行研究で耐久性が評価されている離型剤等を使用し、実機による転写後の離型剤膜表面や摩耗試験後の離型剤膜表面の機械物性を調査することで、離型剤の劣化 原因の解明を目的に、本報では、4 種類の離型剤で処理したシリコン基板を用い、摩耗試 験後の表面機械物性をトライボインデンターにより測定した.

#### (3) 実験装置および方法

本研究では,離型剤の新しい評価手法としてトライボインデンター(Ti-950 TriboIndenter, Hysitron) による表面機械物性の測定を試みた. 圧子には, 先端を球形(先端 半径:1 μm)に加工したダイヤモンド製圧子を使用した. 試験片には, 離型剤を表面処理 したシリコン基板 (10 mm×10 mm×1 mm) を用いた. 離型剤には Optool DSX (Daikin Co.), (Sigma - Aldrich Japan Co., F3),  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ ( trichloro C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>3</sub>Si (1H,1H,2H,2Hperfluorooctyl) silane, F13) ,  $C_{10}H_4Cl_3F_{17}Si$  (Sigma-Aldrich Japan Co., F17)  $\mathcal{O}$ 4 種類を使用した. 各離型剤の構造式を表 1 に示す. 先行研究では, Optool DSX の方が F13よりも高い耐久性を示すことが報告されている.評価手順を図1に示す.まず,離型処 理したシリコン基板に対し,垂直荷重を制御して摩耗試験を行い,10 μm 四方の摩耗痕を2 種類作製した.一つ目は,40 μN で10 μm × 5 μm の範囲を摩擦した後,70 μN で同範囲 を摩擦し、この工程を2回繰り返し行うことで摩耗痕を作製した. 二つ目は100 µN で10 μm × 5 μmの範囲を摩擦した後,200 μNで同範囲を摩擦し,この工程を2回繰り返し行う ことで摩耗痕を作製した. 凝着力の測定は, 各摩耗痕表面に圧子を押し込み, 300 nm/s で 引き離す過程を測定して凝着力を算出し、各離型剤膜の劣化過程を観察した.

Optool DSX	$ \begin{array}{c}                                     $
F3	$F_3C-CH_2-CH_2-Si-Cl$
F13	$F_3C + CF_2 + CF_2 + CF_2 - CH_2 - Si - Cl$
F17	$F_3C + CF_2 + CH_2 - CH_2 - Si - Cl$ Cl

Table 1 Structural formula of release agent



Fig. 1 Outline of test process

#### (4) 実験結果および考察

4.1 摩耗試験結果

各離型剤膜の摩耗試験前後の表面形状像と断面プロファイルを図2に示す.図2(a)より, 摩耗試験前は,各離型剤膜において表面形状の違いは観察されなかった.図2(b)の表面形 状像より,全ての離型剤膜で摩耗痕が観察された.断面プロファイルより,Optool DSX 膜 は40 µNで摩擦した場合よりも,70 µNで摩擦した場合の摩耗痕の方が深くなった.F3 膜 は40,70 µNで摩擦した場合に,摩耗痕が盛り上がった.一方で,F13,F17 膜の摩耗痕は 観察されたが,摩耗試験前と比較すると断面プロファイルに大きな変化は見られなかった. 図2(c)の表面形状像は,図2(b)の表面形状像よりも各離型剤膜ではっきりとした摩耗痕が 観察された.断面プロファイルより,Optool DSX 膜は100 µN での摩耗試験後よりも, 200 µN で摩擦した場合の摩耗痕の方が深くなった.F3 膜は100 µN で摩擦した場合よりも, 200 µN で摩擦した摩耗痕の方が盛り上がっていた.F13,F17 膜は,100 µN での摩耗痕は 深くなり,200 µN での摩耗痕は盛り上がっていた.

4.2 凝着力の測定結果

各荷重で作製した摩耗痕上の凝着力の測定結果を図3に示す. Optool DSX 膜は,100 µN による摩耗痕上の凝着力が急激に増加し,200 µN による摩耗痕上ではさらに凝着力が上昇 した.F3,F13,F17 膜では40 µN による摩耗痕上の凝着力が急激に増加し,その後,各膜 毎に同程度の凝着力を示した.

4.3 考察

Optool DSX は, F3, F13, F17 よりも長鎖からなる分子であり,分子構造に多くのフッ 素原子を含む.また,Optool DSX は分子同士が絡み合い強固な膜を形成するものと考えら れるのに対し,F13 は分子同士の絡み合い効果は期待できない.分子構造が似ている F3, F17 の場合も,分子同士の絡み合い効果は期待できないと考えられる.そのため Optool DSX は,絡み合い効果により擬似的な多層膜を形成し,F3,F13,F17よりも厚い膜を形成 するものと推察される.さらに Optool DSX と似た構造を持つ C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>F<sub>13</sub>Si(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>の転写後表 面の XPS 分析より,C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>F<sub>13</sub>Si(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>分子は CF<sub>3</sub>寄りの CF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>間で結合が切れて劣化する ことが観察されことから,Optool DSX も基板よりではなく,CF<sub>3</sub>寄りの CF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>間で結合が 切れることが推察されている.

図 2,3 より、Optool DSX 膜は 70  $\mu$ N での摩耗試験では、膜厚が減少しても凝着力 は増加しない.また先行研究<sup>(2)</sup>より、Optool DSX 膜は転写が進むにつれて摩擦力は増 加しても凝着力は変化しないことが判っている.以上より、Optool DSX は、摩耗によ り膜が薄くなると固体接触部の増加により摩擦力は増加するが、分子同士の絡み合い効 果および基板寄りの CF<sub>2</sub>が十分に存在する事から、低い凝着力が保たれるものと推察さ れる.したがって、Optool DSX 膜の劣化は、転写が進むにつれて徐々に分子が切断さ れて十分な量のフッ素原子が表面に存在しなくなるために生じるものと考えられる.一 方で、F3 膜は、40  $\mu$ N での摩耗試験により膜が盛り上がり、F13 と F17 膜は、40  $\mu$ N での摩耗試験で膜形状に変化は無いものの凝着力が急激に増加した.先行研究<sup>(2)</sup>より、 F13 膜は、転写が進むと摩擦力と凝着力がともに急激に増加することが判っている.以上より、F3、F13、F17 は、摩耗試験によって CF<sub>3</sub>に近い結合箇所で各分子が切断されることで凝着力が急激に増加するが、短鎖な分子であるため表面の形状には大きな変化が生じなかったものと考えられる.したがって、F3、F13、F17 膜の劣化は、転写が進むにつれて各分子が切断され、表面にあるフッ素原子数が著しく減少することで進行するものと考えられる.



Fig. 2 Topography images and cross sectional profile of release agent films(a) before (b) wear load: 40, 70 [μN] (c) wear load: 100, 200 [μN]



Fig. 3 Adhesion force between diamon probe and release agents before and after wear test

# (5) 目標に対する達成度

以下の知見を得ており,

これまでの研究より,UV-NIL 用離型剤の耐久性を評価方法の確立に向けてトライボイン デンターを用いた離型剤膜の劣化の原因に関する以下の知見を得ており,概ね,期待通り の成果を挙げることができた.

- (1) Optool DSX は, F3, F13, F17 よりも低い凝着力を維持する.
- (2) Optool DSX 膜は,荷重増加とともに摩耗痕が深くなるが,荷重 70 μN までは凝着力は 一定に保たれる.
- (3) F3, F13, F17 膜は, 摩耗試験によって凝着力の急激な増加を引き起こす.

#### 3-5. 離型層の形成と転写性評価(向後 保雄)

#### (1) 研究プロジェクトにおける研究課題

従来の露光技術を使わず、原版を基板に押し当てることで微細加工を実現するナノイ ンプリントは、高解像度、優れた寸法制御性、低コストなどといった優れた利点があり、 実用化に向けて様々な研究が行われている。この時使用されている原版には、樹脂との 離型性向上のために、離型層として F-SAM(フッ素含有自己組織化膜)が広く使用されて いる。しかし、繰り返しインプリントを行うと物理的・化学的に劣化してしまうため、 繰り返し塗布を行う必要があるといった問題がある。そこで本研究は、転写耐久性に優 れた新規離型層の形成とその転写性評価を行うことを目的とする。

## (2) 最終目標

ナノインプリント用の新規離型層として、DLC(ダイヤモンドライクカーボン)に注目 した。DLCは、硬度が高く、耐摩擦・摩耗性に優れており、反応性の低い不活性な材料 である。中間評価時点までの目標は、次の通りである。①DLC離型層の転写耐久性に寄 与する要因を探る。②F-SAM との比較を行い、DLCの優位性を示す。

# (3) 原理

DLC 成膜に使用したイオン化蒸着装置、RF プラズマ CVD 装置の概略図をそれぞれ Fig. 1、Fig. 2 に示す。



イオン化蒸着法は、真空チャンバー内に原料ガスを導入し、直流アーク放電プラズマ 中で生成されたイオンが、負電圧にバイアスされた基板に衝突することにより成膜する 手法である。一般的に緻密で、密着性高い膜を形成することが出来る。一方、RFプラ ズマ CVD 法は、原料ガスを高周波印加によりプラズマ化させ、基板表面における化学反 応により成膜を行う手法であり、絶縁物への成膜が可能である。

## (4) 実験装置および方法

イオン化蒸着法、RF プラズマ CVD 法により、シリコンウェハー上に DLC の成膜を行 った。DLC の原料ガスは、ベンゼン(C6H6)を用い、フッ素化 DLC(F-DLC)の原料ガ スには6フッ化ベンゼン(Hexafluorobenzene: C6F6)を用いた。中間層には、テトラメチ ルシラン(Tetramethylsilane: TMS)ガスを用いて、a-SiC:H を成膜した。膜厚は DLC150nm、中間層 50nm となるように統一した。また、基板電圧、電力を変化させるこ とによりヤング率の異なる DLC を作製した。成膜は Table1 に示すように条件別に 8 種類 作製した。DLC の硬さ・ヤング率測定には、ナノインデンテーション試験を行い、密着性 評価には、スクラッチ試験を行った。

イオン化蒸着法	ガス種	基板	 RF プラズマ CVD 法	ガス種	基板	
		電圧(V)			電力(w)	
F-DLC 低ヤング率	$C_6F_6$	3	 F-DLC 低ヤング率	$C_6F_6$	80	
F-DLC 高ヤング率	$C_6F_6$	1	F-DLC 高ヤング率	$C_6F_6$	200	
FなしDLC	$C_6H_6$	3	FなしDLC	$C_6H_6$	200	
中間層なしDLC	$C_6F_6$	3	中間層なしDLC	$C_6F_6$	200	

Table1 各種膜別の成膜条件

また、UV 硬化性樹脂(PAK-01(東洋合成製))

を塗布した PET 基板に DLC モールドを押し当て、UV を PET 上部から当てることにより、 UV ナノインプリントを行った。離型後、モールド表面に対する樹脂の付着の有無につ いて観察し、インプリント数回起きに純水の接触角測定を行うことにより、転写耐久性 の評価を行った。最後にパターン付のシリコンモールドを作製し、これに F-DLC を成膜 して耐久試験を行った。パターンの作製方法は、シリコン上にナノインプリントによる マスク作製と、誘導結合型(ICP)プラズマ装置(EIS-700、エリオニクス社製)による 反応性イオンエッチングでパターンを掘り込み作製した。

## (5) 実験結果および考察

作製した各膜種別の初期接触角を Fig. 3 に、200 回の UV インプリント耐久試験の結果を Fig. 4 に示す。



DLC に F を含有することにより、初期接触角が 10°程度向上していることが Fig.3 より分かる。成膜方法や機械特性による初期接触角の違いは見られなかった。

Fig.4 より、中間層が入っていない試料において、2 試料とも 200 回のインプリント前に 表面に樹脂の付着が見られることから、膜の密着性が繰り返し転写の耐久性に寄与するこ とが分かった。これは、中間層が入っていない試料は膜の剥離・破壊が起きているためだ と考えられる。また、F を含むことにより、初期接触分、耐久性が向上していることが確認 された。成膜方法や機械特性が耐久性に与える影響については、不明である。

次に、中間層・DLCの膜厚を変化させた場合における転写耐久性への影響を Fig.5 に示 す。また、各膜種別の UV インプリント耐久試験において、最も耐久性の高かった RF プラ ズマ CVD 法にて作製した高ヤング率 F-DLC について、2 種類の F-SAM との 1000 回のイ ンプリント耐久試験の比較を行った結果を Fig.6 に示す。



Fig.5より、膜厚が薄くなるにつれ、初期の接触角が減少し、耐久性が低下している ことが確認された。これは、F-DLCの極薄化に伴い、Fの含有率の低下していることが 原因であると考えられる。このため、パターンが付いているモールドに成膜を行う際に は、膜厚の最適な設計が必要であるといえる。

Fig.6より、初期の接触角はF-SAMに劣るものの、長期のインプリントにおいて、DLCの優位性が見られた。

次にパターン付シリコンモールドに F-DLC を成膜して転写耐久試験を行った。成膜方法は RF プラズマ CVD 法を用いて、中間層を 20nm、高ヤング率 F-DLC を 30nm 成膜した。 この成膜を施したシリコンモールドも用いて、UV-NIL で 1000 回転写した後のモールド 表面の SEM 写真を Fig. 7 に示す。



Fig.7 1000 回転写後の F-DLC30nm のシリコンモールド表面

Fig.7に示すように、DLC層は剥がれてきており、耐久性が無いことがわかる。次に中間層 20nm、F-DLC層 100nm 成膜した場合の結果を Fig. 8 に示す。



(a) 成膜後のモールド
 (b) 1回転写後のパターン
 (c) 1000回転写後のパターン
 Fig. 8 F-DLC 成膜後のモールド表面と転写後のパターン表面の SEM 写真

Fig.8に示すように、F-DLCを100nm 成膜した場合は、1000回転写後もモールドからのF-DLCの剥離はなく、1000回転写も可能であることがわかった。パターン幅は800nmである。これらの結果から、中間層は必要であり、また、F-DLCの膜厚も100nm程度は必要であることがわかった。

#### (6) 目標に対する達成度

今回の結果より、DLCの転写耐久性に与える要因(Fの有無、中間層の有無、膜厚)と インプリントの耐久試験において、DLCの優位性が確認できた。また、パターン付シリ コン上にも成膜が可能であり、モールドとして使用できることがわかった。

#### 3-6. ナノインプリント金型表面の顕微・位相差レーザー分光分析(由井 宏治)

#### (1) 最終目標

モールド基板上に塗布したフッ素系離型剤の、振動分光法を用いた分布・劣化状態計測

(2) 目的

ホログラフィック材料は、シリコン(Si)などの基板表面上にマスターとなる微細構 造を形成し、高分子基板など他の基板上に熱転写することによって大量生産される。こ の際、マスターである金型と熱転写後の高分子基板とを、微細構造をつぶさずに剥離す る必要がある。この過程を可能とするために、金型上にフッ素(F)系シランカップリ ング剤のような離型剤が塗布される。しかし熱転写の繰り返しによって離型剤は剥離・ 劣化してしまう。したがって、この塗布状況のモニタリングが必須である。この目的に 対して我々は、

①離型剤分子の基準振動数計算と赤外スペクトル計測による劣化状態のマーカーバ

- ンド同定と、試料の赤外スペクトル計測の条件最適化
- ②分子種識別的・高深さ分解表面画像計測を可能とする差動型微分干渉誘導ラマン顕 微鏡の開発とサブミクロン以下の構造を持つ試験試料の表面画像計測
- ③分子種識別的画像を、精密な深さ定量を行いつつ計測する事を可能とする誘導ラマン お乱光干渉計の開発と試験試料の表面計測
- の3つの手法を用いてアプローチした。

## (3) 実験装置および方法

(4) 実験結果および考察

これらの項目は、次の3つの手法それぞれに関して記す。

#### ①離型剤分子の基準振動数計算と赤外スペクトル計測

実験方法

F系離型剤はその構造中に CF 鎖を持っており、CF 鎖の劣化具合が剥離性能を左右す

ると考えられている。したがって、CF 鎖由来の振動バンドが離型剤の塗布・劣化状況 の有用なマーカーと期待される。我々はまず現在離型剤として実用化されている F13 と オプツール DSX (図1に分子構造を示す)の振動スペクトルを理論計算から求め、これ らの離型剤由来の振動バンドが計測される波長域を特定した。さらにF13とオプツール DSX の赤外吸収スペクトルを計測し、理論計算の結果と比較した。具体的には以下の操 作を行った。

- 1. CF 鎖の振動領域同定のため、Gaussian03 を用い、計算条件 DFT\_B3LYP\_6-31G(d) に て構造最適化と基準振動数計算を行った。
- 2. 基板上に塗布した離型剤の IR スペクトルを、一般的な透過測定法と基板サンプルに 有利な外部反射測定法により取得し、両測定法により取得した IR スペクトルから、 良好な解析が行える測定法について検討した。なお離型剤は、本センターの中心研究 課題であるホログラフィック技術において最も一般的な Si 基板に塗布した。





図1. 実用化されているフッ素系離型剤(左: F13,右: オプツール DSX)

図2. 理論計算と全反射測定法の比較(左: F13,右:オプツールDSX)

Wavenumber / cm<sup>-1</sup>



1. F系離型剤分子の、計算により得た最適構造における振動スペクトルと全反射測

定法により得た液体状態の IR スペクトルを図2に示す。両サンプルで、1,350-1,100 cm<sup>-1</sup>の領域(図2中黄色)に CF 鎖由来の振動モードが複数存在することがわかった。

2. 透過測定法及び外部反射測定法によって得た IR スペクトル(CF 鎖領域)を図3 に示す。その結果、外部反射測定法よりも透過測定法においてより良好な IR スペ クトルを得ることができた。一般的には表面の分光計測には外部反射計測法が有用 とされているが、今回用いた Si 基板は IR 透過性が高く、外部反射測定法では赤外 光が基板表面で正常に反射しないため、ベースラインの激しい歪みを引き起こして しまったと考えられる。このように、Si 基板表面の分析には透過測定法が有効で あることがわかった。

# ②差動型微分干渉誘導ラマン顕微鏡の開発とSi 基板表面の分子種識別凹凸画像計測

実験方法

ラマン分光法は赤外分光法とならび振動スペクトル計測の主要な方法であり、共焦点 顕微鏡と組み合わせることでミクロン程度の空間分解能で計測が可能である。ところが、 ホログラフィック材料の金型表面には深さが最小70 nm ピッチの微細構造が刻まれる ため、金型表面における離型剤の分布や化学状態を計測するには、サブミクロン以下の 高深さ方向分解能で信号を計測する手段が必須である。一方、光干渉を原理として応用 することによって用いる光の波長の十分の一以下という高空間分解能で画像計測が可 能な光コヒーレンストモグラフィ(Optical Coherence Tomography, OCT)が多くの分 野で応用されている。そこで我々は分子種選択的信号であり、かつ自発ラマン散乱光と は異なり可干渉性を持つ誘導ラマン散乱(Stimulated Raman Scattering, SRS)光と呼 ばれる信号に着目し、光干渉法を組み合わせることでサブミクロン以下の高空間分解能 で分子種識別的信号の計測が可能であると着想した。本研究では、SRS信号を光干渉さ せた信号を検出可能とする差動型微分干渉 SRS 顕微鏡を開発し、試験試料として Si 基 板表面の分子種識別的・高深さ分解画像計測を行った。

SRS 信号発生の過程を図4に示す。SRS 過程を誘起するには、励起光、ストークス光 と呼ばれる波長の異なる2つの光を同時に試料に入射させる。2つの光の光子エネルギ ーの差が、試料に含まれる分子の振動エネルギーと一致する共鳴条件においては、試料 を通過した後の励起光の強度が減少(誘導ラマンロス)し、ストークス光の強度が増加 (誘導ラマンゲイン)する。これらの信号は、入射させた励起光、ストークス光と位相 が揃っており、可干渉性を持つため、あらかじめ分け取っておいた同波長の光と空間・ 時間的に重ね合わせることで光干渉信号を計測することができる。一方、励起光とスト ークス光の光子エネルギー差が試料中の分子の振動エネルギーと異なる非共鳴条件に おいては、SRS 信号は発生しない。したがって、SRS 光干渉信号を用いることで、分子 種識別的・高深さ分解計測を行うことが可能となる。

開発した差動型微分干渉 SRS 顕微鏡の原理図を図5に示す。SRS 過程誘起に用いるレ

ーザー光をWollaston プリズムで2つに分割した後に試料表面に集光する。試料表面で 発生した信号は入射光と同じ光路を戻り、前記プリズムによって再度1つに合わせられ た後に検出される。この時光干渉によって、2つの光が集光される点の高さが異なると その高さの違いに応じて信号強度が変化する。



図4. 誘導ラマン過程のイメージ



図 5. 差動型微分干渉誘導ラマン顕微鏡の原理。発生した信号の強度によって試料表面 の凹凸構造深さΔdを計測することが可能である。

観測される信号強度は、2つの光が同じ高さで反射され、光路長差がゼロとなる時に最 も大きくなり、表面凹凸構造によって2つの光が反射される高さが異なると、その高度 差に応じて信号強度が減少する。したがって、試料上の各点における信号強度をプロッ トすることで分子種識別的表面凹凸画像が得られる。

試料としてはまず、深さ 50 nm、300 nm の溝構造が表面に形成された Si 基板の表面 画像を、Si に由来する SRS 信号を用いて計測した。得られた画像から、50 nm 深さの構 造を検出可能であるかを検証した。一方、Si モールド表面の離型剤塗布状況の評価基 準として表面を水に埋めた際の水滴の接触角が用いられており、そのような「水などの 液体に埋もれた Si モールド表面」も本センター課題における重要な計測対象である。 そこで、4 µmおきに幅3 µm、深さ200 nmの溝構造が形成されたSi 基板表面を準備 し、その表面を液晶5-シアノペンチルビフェニル(5CB)で埋めた試験試料を対象とし た計測を行った。その際、「埋もれた」Si-5CB界面画像を、Si に由来するSRS 信号と 5CBに由来するSRS 信号の両者を用いて計測した。本研究で用いた表面微細加工された Si 基板は、本研究センター・谷口淳教授のグループにご提供頂いた。

## 実験結果および考察

深さ 50 nm、350 nm の溝構造を形成した Si 基板表面の断面模式図と、開発した装置 を用いて計測した Si のラマンバンド(520 cm<sup>-1</sup>)に由来する SRS 信号強度をプロットす ることで得られた画像を図6に示す。図6に見られるように、深さ 50 nm、深さ 350 n m の微細構造を空間分解した画像の計測に成功した。したがって本手法を用いて、本セ ンター課題におけるホログラフィック材料の深さピッチである 70 nm を十分に分解し つつ、化学種識別表面画像を計測することが示された。

液晶で埋めた Si 表面の模式図と、Si および 5CB に由来する SRS 信号強度から構築した画像を図7に示す。図7の結果から、Si、5CB の両者に由来する信号を用いて、深さ200 nm の溝構造を計測することに成功した。したがって本手法を用いて、「埋もれた」Si 基板表面の微細構造についても分子種識別的画像計測が可能であることが示された。



図6. Si 基板表面・溝構造(深さ50 nm, 350 nm)の差動型微分干渉 SRS 画像



図7. Si 基板表面に形成した溝構造の模式図(左上)と上方から計測した顕微画像(右上)。基板表面を液晶 5CB で埋めた試料の模式図(左下)と差動型微分干渉 SRS 顕微鏡 を用いて計測した 5CB/Si 界面の画像(右下)。

# ③誘導ラマン散乱光干渉計の開発とSi基板表面サブミクロン凹凸深さの定量評価 実験方法

上記項目②で開発した差動型微分干渉誘導ラマン顕微鏡を用いることで、深さ50 nm の凹凸構造を持つ基板表面の分子種識別的画像を計測することに成功した。本計測法で は、試料由来の誘導ラマン散乱信号光を、分け取った参照光と干渉させた際の干渉信号 の強度を用いて凹凸構造の画像化を行った。ところが、計測された信号強度は、試料由 来の信号そのものの強度や、参照光を分取する際の分割強度比によって大小が変化する ため、凹凸構造が存在することは分かるものの、その凹凸深さの定量を行うことは困難 であった。

そこで、基板表面を分子種識別的に、かつ深さ定量性を持って計測する手法として、 図8に示したような干渉計を組み入れた誘導ラマン散乱光干渉計の開発を行った。本装 置においては、試料由来の誘導ラマン散乱信号光と、あらかじめ分け取った参照光との 光路長差を、ピエゾステージを用いて 0.1 nm の精度で精密制御可能であるため、誘導 ラマン散乱光干渉信号の位相を正確に計測でき、サブミクロン以下の凹凸構造深さを定 量可能である。

実験結果と考察

開発した装置を用いて、表面を水で満たした Si 基板表面(表面に 200 nm の凹凸構造 を形成)からの信号を計測した結果を図9に示す。Si 基板の水平方向の位置をピエゾ ステージで掃引しつつ信号を計測したところ、計測位置によって試料表面の凹凸構造に 対応して、信号の位相が異なっていた。計測された信号をサイン関数でフィットするこ とで位相を求め、求められた位相を用いて計測した各点における表面高さをプロットし たものを図9に示した。実際の深さ283 nmに対して、本実験で計測された深さはおよ そ300 nmであった。このように、本実験で開発した誘導ラマン散乱光干渉計を用いて、 従来の化学種識別計測では困難であったサブミクロン以下の凹凸構造を10%以下の誤差 範囲で定量計測できることを示した。



図8.誘導ラマン散乱光干渉計の概略図



図9. 測定試料の表面凹凸構造(上)と計測した界面構造(下)

## (5) 目標に対する達成度

実験①により、F素系離型剤において、ナノインプリント転写時の劣化具合の評価基 準である CF 鎖の振動領域が 1,350 - 1,100 cm<sup>-1</sup>であることがわかった。さらに、Si モ ールド表面に塗布された離型剤の赤外吸収スペクトルを計測するには、一般的に用いら れる外部反射測定法よりも透過測定法が有用であることがわかった。また実験②、③に より、差動型微分干渉 SRS 顕微鏡を応用することで、深さ数十 nm 以下のモールド表面 の微細構造や、埋もれた Si 表面のサブミクロン構造を計測可能であることが示された。 本手法を用いて、Si モールド表面における離型剤の分布を、十分な深さ分解能で計測 する技術が確立できた。

# 4. ホログラフィ応用計測グループの研究課題と進捗報告

ホログラフィ応用計測グループの各メンバーの研究課題を下記に記す。

- ・佐竹 信一:導波路ホログラフィ計測技術の確立
- ・松田 一朗:ホログラム画像圧縮に関する研究
- ・鈴木 康一:ホログラフィによる沸騰現象の観察
- ・結城 和久:ホログラフィ計測用屈折率調合法の開発

次に各メンバーの進捗について記す。

## 4-1. 導波路ホログラフィ計測技術の確立(佐竹 信一)

#### (1) 導波路ホログラフィ計測技術の確立

サブマイクロ粒子の動きを捕えるために導波路ホログラフィを用いたホログラム光 学系を用いることにより実現する。

(2) 最終目標

既存の方法である全反射顕微鏡とナノオーダの粒径を組み合わせたレイヤーTIR F法を用いて壁面からの粒子の高さを校正しZ方向の精度を確認し、これと同じ校正方 法で導波路ホログラフィを用いたホログラム光学系装置の精度の確認を行う。

(3) 原理

① レイヤーTIRF法

参照校正データを構築するためのレイヤーTIRF法と導波路ホログラフィを用いたホログラム法の原理について下記に記載する。



## 図1 レイヤーTIRF法の模式図

レイヤーTIRF とはヨダらが開発した TIRFM の擬似的な三次元計測法である[1][2]。 図1のようにレイヤーTIRF はエバネセット光により蛍光発光した粒子が壁面から離れ るにつれて光強度が減衰することを利用して高さ方向の光強度からの3つ領域の階段 関数で高さ方向の粒子の位置を決定する方法である。

## ② 導波路光を用いたホログラム法

近年ではMEMS技術がより発展しNEMSなどと呼ばれるようになった。よりスケ ールの小さい加工に伴う熱流動現象の解明および予測、 液滴やマイクロバブルなどの 界面近傍の物理現象の解明及び予測が必要とされている。そこで新たな原理に基づく壁 近傍のサブミクロン粒子をもちいることが可能なホログラムを用いた流速測定法を提 案する。





図2 導波路ホログラムの光伝搬過程

本手法では、図2にあるような導波路型のホログラムを用いる。導波路から入射した 光は垂直方向へ投影され、この方向にCCD等の受光面を置けばホログラム撮影は可能 である。投影面上にシーディング粒子を含む検査流体をおくことで粒子の回折像が得ら れる。この原理はすでにホログラムメモリで使われておりメモリーのパターンがサブミ クロン以下でも投影画像が得ることができ、計算機ホログラムで再生可能であることか ら流体計測にも適用可能であると考えられる。したがって、本研究テーマではこの原理 を用いた導波路型のホログラム流速計を構築することを目的とし界面近傍の流体計測 へ応用する。

# (4) 実験装置および方法



図3 MgF<sub>2</sub>膜を利用した校正方法概略図

レイヤーTIRF法により粒子位置の校正を行う。図3 に示すように、ガラスプレ ート上に厚さ数百ナノメートルの化マグネシウム(MgF<sub>2</sub>)の層(レイヤー)を作る。次に、 蛍光粒子を混入した1-propanolをコーティングしたプレートの上に滴下し、ガラスと MgF<sub>2</sub>の表面上に蛍光粒子を付着させる。そして、ガラスプレートをTIRF顕微鏡にて観 察する。MgF<sub>2</sub>の屈折率(n<sub>m</sub>)は1-propanolの屈折率(n<sub>p</sub>)とほぼ同じであるため、ガラ スプレートの下方から観察する際、MgF<sub>2</sub>面に付着した粒子が浮遊しているような状態 と見える。その理由として、レーザーを入射しエバネッセント光で粒子を蛍光させると MgF<sub>2</sub>面に付着した粒子はガラス面に付着した粒子と比べて蛍光輝度値が低いからであ る。前述したように、ガラス境界面と離れるほどエバネッセント光の強度は指数関数的 に減衰するからである。MgF<sub>2</sub>層の厚みをさらに厚くし、粒子の輝度値の減衰率を求め、 z軸方向の位置校正を行う。その結果、粒子の輝度値から、その粒子の擬似的なz軸 方向の座標を算出することができる。

# (5) 実験結果および考察



図4 理論減衰直線と粒子の蛍光強度

図4にエバネッセント光の理論減衰直線と計測された粒子の蛍光強度を示す。レイヤーTIRFの校正実験ではナノ生体粒子の擬似的なz軸方向の座標を取得した。Invitrog en Blue F8811を用いた計測の時もっとも理論値と近い値が得られた。そして、レイヤーTIRFを用いてナノ生体粒子の3次元ブラウン運動を計測することができた。結果から、最小二乗法を用いた計測は、レイヤー関数を用いた計測よりRMSの値が理論値と近くなることが分かった。

## (6) 水中における校正とエバネッセントホログラム法による計測

メックスフロンを用いたナノステップを有する校正プレートの作製に成功した[3]。 図5では、メックスフロン校正プレートの水なし水ありの写真(a)から水をいれるとパ ターンが全く見えなくなってしまう写真(b)のようになる。これはTIRF法及びエバ ネッセント光を用いたホログラム法の校正を水中で用いることができる。このパターン の高さをあらかじめ計測しておけば蛍光粒子の高さが正確に知ることができる。これに よりTIRF法では3次元計測を可能にする校正曲線の取得成功しており光軸方向の 輝度値を劣化させることなく画像を取得できる。



図5 (a) メックスフロンパターン (水なし), (b) メックスフロンパターン (水あり)

## (7) 目標に対する達成度

MgF<sub>2</sub>の膜を安定的に製作しレイヤーTIRF法及びエバネッセント光を用いたホロ グラム法の校正において使用可能となり、さらにメックスフロンを用いたナノステップ を有する校正プレートの作製に成功し、このパターンの高さをあらかじめ計測しておけ ば蛍光粒子の高さが正確に知ることができた。これによりTIRF法では3次元計測を 可能にする校正曲線の取得成功しており光軸方向の輝度値を劣化させることなく水中 で画像を取得できる。このプレートを用いてエバネッセント光を用いたホログラム法の 校正にも成功しておりPIVの国際会議であるPIV2015においてアクセプトさ れ2015年9月に発表した[4]。これには、動的に粒子が動いているところも捕えら れている。以上により、導波路ホログラムによる流体計測手法が確立され、サブミクロ ンでの流体計測を実現することができた。

[1] H. Li, R. Sadr, M. Yoda Multilayer nano-particle image velocimetry Experiments in Fluids,2006,41:185-194

[2] H. F. and M.Yoda Multilayer nano-particle image velocimetry (MnPIV) in microscal e Poiseuille flows Meas. Sci. Technol. ,2008,19 075402

[3] Fabrication of nanostep for total internal reflection fluorescence microscopy to calibra te in water, Noriyuki Unno, Asao Maeda, Shin-ichi Satake, Takahiro Tsuji, Jun Taniguc hi, Microelectron. Eng. 133, pp 98–103, 2015 (査読有)

[4] 3D measurement of gold particle via evanescent digital holographic particle tracking velocimetry, Shin-ichi Satake, Noriyuki Unno, Shuichiro Nakata and Jun Taniguchi, PIV 2015, Santa Barbara, USA, 2015 年 9 月 14 日  $\sim$  9 月 16 日

## 4-2. ホログラム画像圧縮に関する研究 (松田 一朗)

#### (1) 最終目標

本研究課題では、ホログラフィによる流体計測に伴って発生する大量の画像データを、 利便性を損ねることなく効率的に圧縮・保存する手法の開発を目指している。この手法 は、静止画像符号化の国際標準である JPEG 方式との間で画像データを無歪で相互変換 できることを特徴とし、その制約条件の下で優れたレート・歪特性を達成することが最 終的な目標である。

#### (2) 原理

ホログラフィによる4次元流体計測においては、高解像度かつ高フレームレートのホ ログラム像を連続撮影する必要があり、大量に発生する画像データを効率的に蓄積・保 存する技術が求められている。現在本プロジェクトでは、1024×1024 画素の解像度を 有する画像を毎秒1000 フレーム取得可能なハイスピードカメラを使用しているが、こ のカメラで撮影した画像をリアルタイム圧縮するためには、画像1枚当たりの処理時間 を1 msec 以下に抑える必要があり、動き補償予測のような演算量の大きな冗長度削減 技術を直接導入することは困難である。そこで、撮影時にはフレーム単位の簡易な符号 化処理を施すことで、ストレージへの書き込み帯域の上限を超えない程度に圧縮を行い、 さらにオフラインで高度な冗長度削減処理を加えることで、最終的な圧縮率の大幅な向 上を図ることとする。

このような2段階の符号化処理は、圧縮コンテンツのフォーマット変換のためにしば しば行われる再符号化(もしくはトランスコーダ)の一種とみなせる。一般的な再符号 化では、若干の符号化歪と引き換えに高い圧縮効率を実現する非可逆符号化方式が用い られるため、再生画質の低下が避けられない。本プロジェクトでは、ホログラム画像の 品質が流体計測の精度に影響を与えるため、再符号化の際に新たな符号化歪が発生する ことは極力避ける必要がある。そこで、再生画質を一切低下させることなく、符号化効 率のみを改善可能なロスレス再符号化と呼ばれる技術の導入を図る。また、1段目の符 号化には静止画像データの記録フォーマットとして広く普及している JPEG 方式を採用 し、再圧縮したデータから JPEG 互換の形式に無歪で変換するツールを提供する。これ により、ホログラム再生をはじめとする様々な画像処理用途のアプリケーションが、特 殊なプラグインを用意することなく直接画像データを読み込むことが可能となり、圧縮 データの利便性が飛躍的に向上すると考えられる。

## (3) 実験装置および方法

図1に、提案する2段階符号化方式の基本構成を示す。まず、カメラより転送された RAW形式の画像データに対し、1段目の符号化処理として JPEG 方式によるリアルタイム 圧縮処理を適用する。1980年代に静止画像符号化の国際標準として開発された JPEG 方 式は、ブロック単位の DCT(離散コサイン変換)に基づいた比較的単純なアルゴリズム で構成され、現在の計算機能力をもってすれば極めて高速な符号化・復号処理が可能で ある。ただし、一般的な JPEG 符号器は、人間の視覚特性を利用して符号化歪を目立た なくするため、量子化マトリクスと呼ばれるテーブルを参照して周波数成分ごとに DCT 係数の量子化精度を調整している。一方、本手法で扱うホログラム画像データは、人間 が直接観察することを前提としていないため、2 乗誤差規範の下でより優れた符号化効 率を達成し得る、一様な値の量子化マトリクスを採用する。



図1 提案する2段階符号化方式の基本構成

1段目の符号化によって画像データのサイズを数十分の1に削減でき、ネットワーク 回線などを介した低速なストレージデバイスへの書き込みも可能となるが、高フレーム レートで撮影した画像データは時間方向の相関が極めて高いため、動き補償予測を用い た動画像符号化方式を直接適用した場合に比べると、符号化効率は必ずしも高いといえ ない。そこで、一旦ストレージに蓄積したフレーム単位の JPEG 画像系列を動画像デー タとみなし、さらなるデータサイズの削減を目的として2段目の再符号化処理を導入す る。この際、隣接フレームの再生画像を用いた動き補償予測を適用することで、時間方 向の冗長度が除去され、符号化効率を大幅に改善できると見込まれる。ただし、一般的 な動き補償予測のように画像信号領域で予測残差信号を求めると、再符号化のための量 子化が必要となり、新たな画質劣化を招いてしまう。この問題を回避するため、本手法 では動き補償により得られた予測画像に DCT とスケーリングを施し、周波数領域で量子 化済み DCT 係数との差分を算出することとする。これにより得られた DCT 係数の予測誤 差信号は離散的な性質を保っており、再量子化を経ることなく無歪の符号化を施すこと が可能となる。また、効率的な符号化を実現するためにはエントロピー符号器の性能向 上も重要であるため、JPEG で使用されているハフマン符号の代わりに多値算術符号を 使用することを前提とし、予測誤差信号の確率密度関数を高精度にモデル化するアルゴ リズムも開発した。

さらに動き補償予測の効率を高めるため、時間方向に連続する画像系列の符号化順序 を変更する手法についても検討を加える。これにより、過去と未来の2枚の符号化済み 画像を同時に利用した両方向予測と呼ばれる予測技術を周期的に導入することが可能 となる。一般的な動画像向け非可逆符号化方式では、片方向の予測のみを適用するPピ クチャと両方向予測を適用可能なBピクチャを混在させ、それぞれの再生画質をコント ロールすることで全体の符号化効率を改善できることが知られているが、画質のコント ロールが及ばないロスレス再符号化において両方向予測の導入を図った例は皆無であ り、画像符号化技術の分野に新しい知見を与える独創的な試みであると言える。 また上記の検討過程において、ホログラム撮影の光源に用いるレーザーパルスの駆動間 隔が一様ではないことに起因し、各フレームの輝度レベルが一定とはならないことを見 出しており、その対策として予測画像の輝度レベルを一定サイズのブロックごとに補償 する技術の導入も図っている。

#### (4) 実験結果および考察

まず、1段目の符号化によって生じる画質劣化が流体計測精度にどの程度の影響を及 ぼすかを評価するため、ハイスピードカメラで撮影したホログラム動画像(1024×102 4 画素、フレームレート 1000 fps)の各フレームに対し、JPEGの量子化マトリクスの 値を変化させながら符号化・復号の処理を施し、さらにホログラム再生と粒子追跡のア ルゴリズムを適用した上で、奥行き方向の計測精度の比較を行った。評価に使用したホ ログラム画像の例を図2に示す。この評価実験により、再生画像の客観品質を表す PSN R がおよそ 35 dB 以上であれば、流体計測精度への影響がほとんど無視できる程度であ ることが明らかとなった。この画質は、一様な量子化マトリクスを使用した JPEG によ って約 1/20 の圧縮率を施した場合に相当する。



フレーム#1

フレーム#2

フレーム#3

## 図2 実験に使用したホログラム画像の例

次に、提案する再符号化アルゴリズムをソフトウェア実装し、動き補償予測に関して 図3に示す3通りの条件を課した際の符号化効率について調査した。ここでI, P, Bの 記号は適用可能な予測の種類に応じたピクチャタイプを表しており、それぞれIピクチ ャ(動き補償予測なし)、Pピクチャ(片方向予測のみ)、Bピクチャ(両方向予測) と呼ばれる。表1は図2に示す3枚の画像に対して、量子化精度を一律に Q=5 と設定し た際の再符号化後の符号化レートを測定した結果である。ここで、フレーム#2はI,P, Bの3通りのピクチャタイプによる符号化結果が全て揃っており、その内訳からB>P >Iの順に高い圧縮効率が得られている様子を確認できる。3枚平均の符号化レートを 比較した場合についても、符号化順序を変更した上で各フレームのピクチャタイプをI BPと設定した場合の特性が最も優れており、両方向予測がロスレス再符号化の性能 改善策として有効であることがわかる。



図3 符号化順序とピクチャタイプ

ピクチャタイプ	フレーム#1	フレーム#2	フレーム#3	3 枚平均
ΙΙΙ	1.79	1.75	1.80	1.78
ΙΡΡ	1.79	1.73	1.25	1.59
ΙΒΡ	1.79	1.48	1.25	1.50

表1 ピクチャタイプと符号化レートの関係 (bits/pel)

最後に、再符号化後のレート・PSNR 曲線を図4に示す。これより再符号化によって1 段目の符号化結果(JPEG-baseline)に比べて符号量を32.5~46.8%削減している様子 を確認できる。その結果、静止画像符号化の国際標準方式として最も高性能とされるJ PEG 2000を上回る符号化効率を達成することに成功している。JPEG 2000はウェーブレ ット変換係数の導出や、その算術符号化に多くの演算量を要するため、流体計測画像の ような高フレームレートの画像データのリアルタイム圧縮の用途に用いることは困難 であるが、提案する2段階符号化方式によって、計算量の問題を克服しつつ高い符号化 効率を達成できることが明らかとなった。



図4 符号化特性

## (5) 目標に対する達成度

本研究課題に関して設定した目標は達成されており、得られた成果の一部は国際会議 論文(査読あり2編)および国内会議予稿(査読なし3編)により公表済みである。

参考文献

[1] Holographic Image Compression Utilizing a JPEG Framework for 3D Flow Fiel d Measurements, Yoshiaki Natori, Kazuya Tashiro, Hironobu Fukai, <u>Ichiro Matsu</u> <u>da</u>, Susumu Itoh, Mei Nagashima, Tsuyoshi Tsutsuda, <u>Shin-ichi Satake</u>, Proceedi ngs of 2013 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT 2013), pp. 152-157, 2013 (査読有)

[2] Lossless Re-encoding of Holographic Images Stored in JPEG Format for 3D F low Field Measurement, Takayuki Shikakura, <u>Ichiro Matsuda</u>, Yusuke Kameda, Sus umu Itoh, <u>Shin-ichi Satake</u>, Proceedings of the 1st International Conference o n Advanced Imaging (ICAI 2015), pp. 261-264, 2015 (査読有)

[3] フレーム間相関を用いた流体計測用 JPEG 画像の再圧縮,西田保裕,深井寛修,<u>松</u> <u>田一朗</u>,伊東 晋,名取慶亮,山口小波,筒田剛史,<u>佐竹信一</u>,2013年電子情報通信学 会総合大会講演論文集,No.D-11-66,2013年3月(査読無)

[4] 両方向動き補償予測を用いた流体計測用 JPEG 画像の再圧縮, 鹿倉貴之, <u>松田一朗</u>, 亀田裕介, 伊東 晋, <u>佐竹信一</u>, 2015年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-11-42, 2015年3月(査読無) [5] 両方向フレーム間予測と輝度補償に基づいた流体計測用 JPEG 画像のロスレス再符 号化, 鹿倉貴之, <u>松田一朗</u>, 伊東 晋, 亀田裕介, <u>佐竹信一</u>, 2015 年映像情報メディア 学会冬季大会講演予稿集, No. 12B-2, 2015 年 12 月(査読無)

## 4-3. ホログラフィによる沸騰現象の観察(鈴木 康一)

# (1) ホログラフィによる沸騰現象の観察

単一上昇沸騰気泡とその周囲の流速の測定することを目的とする。

## (2) 最終目標

沸騰気泡は温度上昇も伴うため壁面近傍の気泡をとらえることは難しい。従って中間 評価までは、変形を伴わない単一気泡を生成し、ほぼ真球状態のマイクロバブルの上昇 の計測を行い気泡自体の速度と周囲の速度のトラキングを同時に行えるようホログラ ム計測プログラムを開発し3次元可視化を行う。単一気泡として電気分解によって生じ る気泡と光触媒によって生じる気泡を対象とした

# (3) 原理



再生を行うと、図1のように粒子の位置に対して奥行き方向に影が伸びた3次元空間が

再構築される。流速ベクトルを得るためにはこの中から粒子の真の座標を決定する必要 がある。この粒子を中心に奥行き方向に輝度値の分布を調べるとこのように粒子を中心 とした山なりの分布となる。XY座標に対してZ方向に最大輝度値の探査を行いこの1 つやまに対して決定しこれを粒子座標とする。一方、マイクロバブルの再生では図2の ように2つ山になることが理論的にわかっている[1]。そのためZ方向に最大輝度値の 探査を2回行うことで2つのピークを検出し、そのピーク間の中心をマイクロバブルの z方向の位置座標とした。



## (4) 実験装置および方法

図3 電気分解による気泡の測定

単一の光源からのレーザー光の位置を示した実験装置の概略図を図3に示す。本実験で は、繰り返し1kHzダブルパルスレーザーNd:YLF laser ( $\lambda$ = 527 nm)を光源としてを使 用した。また、図3で示されている試験部は高さ= 62 nm、幅=24mm、深さ= 10 nm でありガラスで作成されたものである。本実験では40 $\mu$ mのナイロン球状粒子を使用し、 0.2%の塩化ナトリウム水溶液を流体と作動した。本実験におけるホログラム画像は、解 像度2336 x 1728 (7  $\mu$ m / pixel)でレンズレスの高解像度デジタルCCDカメラ(IDT N R5S2)で撮影されたもので、カメラそのものは1kHz で 1024 x 1024 ピクセルを全画像 範囲として使用し画像の撮影を行った。

カメラとレーザーはパルスジェネレータで同期され、露光時間は100 μs に設定した。 このシステムは1kHz のサンプリングレートでのメモリを使用して、800 フレームで撮 影する。マイクロバブルは、白金電極に組み込まれたポテンショスタットの電圧を3.1 Vに設定することで発生させた。 (5) 実験結果および考察



図4 電気分解によって生じたバブルの再生像;t=279msec

図4は観察領域を流れるトレーサ粒子とマイクロバブルのホログラム像を示す。本画像は、それぞれのホログラム画像をA点、B点と円形の印で指示した。DHPTVにて、水素気泡位置と速度ベクトルを3次元的に探索できることが確認できた。電気分解によって生じる水素気泡は、球体のまま上昇していくと推測されることが確認できた。



図5 光触媒効果で発生する上昇バブル計測装置と観察領域

図5のように電気分解によるバブル発生の実験系と同じ光学装置に光触媒を発生させ
る観察系を導入してマイクロバブルの計測を行った。光触媒を担持した板に垂直にUV を照射してバブルを発生させた。レーザーやホログラムの計測条件は同じである。



図6 光触媒効果で発生する上昇バブルのホログラムフリンジ

図6は発生したバブルのホログラム像である。通常のイメージより輝度値が全体に高いのは、UV光の影響である。図7はホログラム像を再生してバブルの位置と周囲のパ ーティクルを再生した。両者とも同時にとらえられている。



図7 再生された上昇バブルとその周囲の粒子像

#### (6) 目標に対する達成度

沸騰気泡は温度上昇も伴うため壁面近傍の気泡をとらえることは難しい。従って中間 評価までは、変形を伴わない単一気泡を生成し、ほぼ真球状態のマイクロバブルの上昇 の計測を行い気泡自体の速度と周囲の速度のトラッキングを同時に行えるようホログ ラム計測プログラムを開発し3次元可視化を行った。単一気泡として電気分解によって 生じる気泡を対象とした上昇バブルに関して発表され[2]、また光触媒バブルの計測は 国際会議で発表した[3]。さらにプログラムと計測方法をFC72などの沸騰実験に用 いられる冷媒中の気泡について適用した。以上を考慮して、設定していた目標は達成さ れた。

[1] Satake S, Yonemoto Y, Kikuchi T, Kunugi T (2011) Detection of microbubble posit ion by a digital hologram," Applied Optics, http://dx.doi.org/10.1364/AO.50.005999
[2] 佐竹信一,津田拓真,菊池正,功刀資彰," デジタルホログラムによる 単一上昇す るマクロバブルの3次元位置測定とその周囲流れの計測,"日本機械学会熱工学コン ファレンス 2012 講演論文集, 2012.11.17-18, 熊本大学、熊本,B221, PP. 349-350, (2012).
[3] Noriyuki Unno, Takuma Tsuda, Shin-ichi Satake and Koichi Suzuki,"Three-dimension al holographic-PTV measurement of a rising microbubble caused by photocatalytic reacti on", Proc. of 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, an d Thermodynamics June 16-20, 2013, Lisbon, Portugal.

### 4-4. ホログラフィ計測用屈折率調合法の開発(結城 和久)

#### (1) 最終目標

多孔質体内における種々の反応・輸送現象は、殆どの学問分野で古くから注目されお り、その特徴である表面積の大きさを活かして機械・土木・海洋・医療など非常に多く の分野で活用されている。一方、単に多孔質体内と言っても、その構造は多種多様であ る。しかしながら、多孔構造が比較的単純な球状粒子を細密充填したような多孔質体で さえ、内部気孔部における細かい流動構造を実験的に明確にすることは容易ではなく、 多くの場合、2次元簡易モデル系での可視化実験が殆どである。

そこで本研究では、作動流体と管内部構造物の屈折率をマッチングさせる屈折率調合法 (Refractive Index Matching (IM)法)を用いて、世界に先駆けてペブル充填層の 複雑3次元流動場を計測することを目的としている。

#### (2) 原理

流体計測分野において今後解決しなければならない大きな問題として、複雑な流路形 状を有する流れや物体周りの流れを如何にして効率的かつ高精度で計測するかという ことが挙げられる。その解決方法の一つとして、作動流体の屈折率と構造物の屈折率を マッチングさせることで構造物を透明化し、構造物背後の流れ場を計測する屈折率調合 法(IM法)がある。構造物をそれと屈折率の異なる液体で浸すと構造物界面で光の屈 折・反射や散乱が生じ、構造物が透明化されることはない。しかしながら、構造物がそ の屈折率と合致する液体に浸されると、構造物界面での光の反射・屈折や散乱を抑える ことができるため構造物を透明化することができる。この状態は流体計測において理想 的な状態であり、これにより可視化の際に必要となるシーディング粒子を構造物越しに 可視化することが出来る。

一般に、構造物を有する管内の3次元複雑流動場を計測する場合、作動流体と等しい 屈折率を有する透明材料を導入するか、もしくは作動流体の屈折率を調整して透明構造 物の屈折率に合わせるかの2つの手法が考えられる。通常、後者の手法を適用する場合 が多い。本研究では、IM法により完全に屈折率が一致する可視化体系をペブル充填層 に対して構築し、更にDHPTV法によってシーディング粒子のホログラム像の時間的変化 から流れ場の3次元流動構造を評価する。

#### (3) 実験装置および方法

実験で使用する可視化計測系とペブル充填層容器の概略を図1に示す。使用するアク リル球の直径は8.0 mm であり、22mm×16mm×40mmの矩形容器の内部に合計10個のア クリル球を敷き詰めている。アクリル球は、球表面が十分に研磨されたものであり0.0 3 µm の表面粗さを有している。IM 法のために使用する流体は化学的安定性の高いヨウ 化ナトリウム水溶液であり、ヨウ化ナトリウムの粉末を純水に溶解しながら屈折率計に より屈折率の変化を評価する。

更に実際のペブル充填管内流れ場の可視化実験について、①作動流体として屈折率調整された上記のヨウ化ナトリウム水溶液を使用(ペブル材はアクリル)、②ペブル材として水と同等の屈折率を有するメックスフロン球を使用(作動流体は水)、の二つのIM技術について評価した。両実験ともペブル球のサイズは管内径の1/2サイズであるが、①および②の場合のペブル直径はそれぞれ8.0mm、5.0mm、管内径はそれぞれ16mm、10mmである。図2はヨウ化ナトリウム水溶液を作動流体として用いた場合の装置概要である。ペブル材としてメックスフロン球を用いる場合も装置の概要はほぼ同じである。



図1 計測系の概略および粒子の充填状況



図2 ヨウ化ナトリウム水溶液を使用する際の実験装置概要

#### (4) 実験結果および考察

ヨウ化ナトリウム水溶液とアクリルペブルを組み合わせた IM 法を高精度に実施する ため、平成 24 年度までに先ず、作動流体となるヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率に対 する濃度と温度の依存性を詳細に評価した(図3参照)。水溶液の温度変化特性は緩や かであり、IM 法に用いる作動流体として適していることが確認できた。更に実際の流 動計測系を想定し、温度 20~25℃、屈折率 1.490~1.494 の間で最も構造物が透明化す る条件を評価した。液温が 20.0℃の場合、62.9 wt(%)の NaI 水溶液を用いる流体とし て最適であり、同条件にてペブル充填層を可視化した。図4 に純水中のペブルと水溶液 中のペブルの撮影画像を示す。純水中では屈折率の違いにより背景の格子模様が歪むが、 屈折率調合された水溶液中では屈折率の違いから生じる像の歪みが無くなり背景の格 子模様を確認することが出来る。これにより、アクリルペブルの屈折率とマッチングす る濃度・温度条件を特定することに成功したと言える。更にレーザ光、CCDカメラを用 いてホログラム像を撮影し、再生を試みた。IM法を組み合わせた DHPTV 法により、ペ ブルを充填した容器内のシーディング粒子の3次元座標を取得することが出来た。



図3 ヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率に対する液温・濃度の影響



図4 ヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率に対する液温・濃度の影響

図5(左)はシーディング粒子を含む流体を試験部であるペブル充填部に流したとき のホログラム像を表している(メックスフロン球を使用した場合)。可視化領域はペブ ル充填管の一部にフォーカスされたものであり、ペブル球の存在が確認できる。この画 像からシーディング粒子のみを残して他の背景を排除処理したものが図5(右)であり、 鮮明な粒子のみのホログラム像を確認することができる。図6および図7はそれぞれ、 ヨウ化ナトリウム水溶液を用いた流れ場の可視化結果およびメックスフロン球を用い た流れ場の可視化結果である。流動条件はそれぞれ Re=700、Re=634 である。何れの結 果においても、これまで解明されていた2次元流れ場の詳細な3次元構造が、世界に先 駆けて明確に可視化できていることが分かる。特に空隙率が高い領域で形成される高速 流れや、球後方で形成される複雑な渦構造、更に淀み域の存在など、興味深い知見を得ることができた。



図5 ホログラム像(左:オリジナル像、右図:背景を除去したホログラム像)



図6 ヨウ化ナトリウム水溶液を用いた流れ場の可視化結果



図 7 メックスフロン球を用いた流れ場の可視化結果 (上図:3次元ベクトル図、下図:2次元断面でのベクトル図)

## (5) 目標に対する達成度

IM 法に DHPTV 法を組み合わせるためのヨウ化ナトリウム水溶液屈折率調整、ならび に DHPTV 法による二つの屈折率調合可視化実験が最終段階にあり、結果の公表も含め予 定通りの達成度を得ている。

## 5. まとめ

先端ホログラフィ技術研究開発センターの進捗結果をまとめる。まず、ホログラフィ ックメモリ構築グループの進捗結果であるが、下記の図1のようになる。



図1ホログラフィックメモリ構築グループの進捗結果

ここで、H27年度末までに、高密度化1 Tbits/inch<sup>2</sup>の達成が目標であるが、現時点 で4多重の再生に成功しており、1.2 Tbits/inch<sup>2</sup>が達成できている。また、回転ステ ージに関しては、真空中での描画が可能であり、ディスク上に深さを変えて描画できる ところまで確認している。細かいホログラムパターンに関しては、調整する必要がある が、原理的に作製可能であることがわかっている。以上をまとめると、メモリ構築グル ープの達成度は、申請段階の目標は全て達成できた。

次に、ホログラフィ応用計測グループの進捗結果を図2に示す。

	2011年		2012年		2013年		2014年		2015年	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
① 導波路ホログ ラムの開発	校正	プレート	◆ 校正プI (こよる)	レート  巨離同定	<ul> <li>中間</li> <li>原理</li> <li>完了</li> </ul>		▶ バブル	観察など	→ サブミ での湯	ジロン 充体計測
<ol> <li>②四次元計測 (バブル、屈折 率調整など)・ データ圧縮技術 開発</li> </ol>	バブ 「 に が 「 に が 「 に が 」 「 に が 」 「 で 」 「 で 」 「 で 」	ル観察 率調整技 タ圧縮技 波計測と	<ul><li>術</li><li>術</li><li>の比較</li></ul>							

図2 ホログラフィ応用計測グループの進捗結果

導波路ホログラムの開発は完了しており、サブミクロンの流体計測も実現できた。その他の、沸騰バブル観察、屈折率調整技術、データ圧縮技術も目標を達成しており、申 請段階の目標は全て達成した。

以上を考慮してセンター全体としても、申請時の設定目標を全て達成することができ た。 \*1 Three-dimensional hologram-read-only memory duplication by nanoimprint lithography, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, Hideaki Akamatsu, Manabu Yamamoto, Shin-ichi Satake, Jun Taniguchi, J. Vac. Sci. Technol. B 31, pp 06FB01 - 06FB01-5, 2013 (査読有)

# Three-dimensional hologram-ROM duplication by nanoimprint lithography

Running title: Three-dimensional hologram-ROM duplication Running Authors: Unno et al.

> Noriyuki Unno<sup>a), b), c)</sup>, Shuhei Yoshida<sup>a)</sup>, Hideaki Akamatsu<sup>a)</sup>, Manabu Yamamoto<sup>a)</sup>, Shin-ichi Satake<sup>a)</sup>, and Jun Taniguchi<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585

<sup>b)</sup> Research Fellow of the Japanese Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083

c) Electronic mail: n.unno@rs.tus.ac.jp

Because the amount of multimedia data is continually increasing, there is growing demand for high-speed, large-capacity, read-only memory (ROM) to facilitate data hologram-ROM (CGH-ROM) has distribution. Computer-generated received considerable attention in relation to its potential to meet this rising demand. CGH-ROM requires a nanoscale-precision structure, as well as nano-steps. Because of its process simplicity, nanoimprint lithography (NIL) is a promising method for cost-effective fabrication of complex and high-precision patterns. We have demonstrated CGH-ROM duplication by ultraviolet NIL (UV-NIL) from a three-dimensional (3D) master mold fabricated by electron-beam lithography (EBL). The calculated depths of the CGH were converted into four tones to permit easy fabrication of the CGH while retaining a high diffraction efficiency. EBL using a spin-on glass and super-resolution technique with a post-exposure bake was used to fabricate the 3D master mold. The developed depth was controlled by changing the EB exposure dose, with higher EB doses tending to produce deeper patterns. The pattern was duplicated by means of UV-NIL and the reconstruction image corresponded to the design pattern. Moreover, we have succeeded in fabricating a grey-scale multilevel CGH-ROM and in producing its reconstruction.

## I. INTRODUCTION

The demand for higher resolution content of pictures, videos, and various data files has been increasing steadily year by year. Because of its low cost and ease and rapidity of production, the read-only memory (ROM) optical disk, generally fabricated by plastic injection molding, is a suitable medium for the rapid and widespread distribution of large quantities of data. The storage capacity of optical discs has been increasing as a result of improvements in the track pitch size, the read-out wavelength, and the numerical apertures of lenses. In the case of the Blu-ray Disc,<sup>1</sup> for example, the read out wavelength is as low as 405 nm. However, it is difficult to decrease this wavelength any further because the radiation from an ultraviolet-range laser would be absorbed by the plastic substrate of the optical disk. For these reasons, the computer-generated hologram-ROM (CGH-ROM)<sup>2,3</sup> has received a great deal of attention as the next-generation ROM because of the possibility that it could meet the rising demand for data storage and distribution. Data on the CGH-ROM is read from a block area, so the readout speed is greater than that of a conventional optical disk, which is read by line by line. In addition, the CGH-ROM can record multilevel data by using techniques such as angle multiplexing.<sup>4</sup> The fabrication of a CGH-ROM, which consists of nanoscale threedimensional (3D) patterns, is however a time-consuming process and combinations of electron-beam lithography (EBL), lift-off, and etching processes are required, resulting in high costs and low throughputs.

Because of its process simplicity, nanoimprint lithography (NIL) is a promising method for the cost-effective fabrication of complex and high-precision CGH patterns.<sup>5</sup> We have demonstrated CGH-ROM duplication by ultraviolet NIL (UV-NIL)<sup>6</sup> through the

use of a 3D master mold fabricated by 3D EBL with a variable EB dose. In this method, the developed depth is typically controlled by the EB dose, with a higher EB dose tending to produce a deeper pattern. However, higher EB doses also tend to generate wider developed patterns because of the proximity effect, so that it can be difficult to obtain a fine 3D pattern. We therefore used a super-resolution technique with a post-exposure bake<sup>7</sup> to fabricate the CGH pattern. As a result, we succeeded in fabricating a CGH pattern and in duplicating it by UV-NIL. The reconstructed duplicated pattern corresponded to the design pattern. Moreover, we succeeded in fabricating a gray-scale multilevel CGH-ROM and in reconstructing the image from it.

## **II. EXPERIMENTAL SETUP AND METHODOLOGY**

Figure 1 shows the fabrication process for the CGH-ROM. NIMO-P0701 (Tokyo Ohka Kogyo Co., Ltd., Tokyo), which is based on spin-on glass (SOG), was used as the EB resist on a silicon wafer.<sup>8</sup> The thickness of the resist was about 1 µm. A buffered hydrofluoric acid solution [50% HF (35 mL/L) and 40% NH<sub>4</sub>F (18.75 mL/L)] was used as the developer. The sample was installed in a scanning electron microscope (SEM) with an EB writing system (ERA-8800FE; Elionix Co., Tokyo). Then, without moving the SEM stage, the sample was exposed three times to changing EB doses and design patterns produced by a spot 10-kV EB with a current of 50 pA. The reflective-type CGH pattern was previously prepared by means of the Gerchberg–Saxton (GS) algorithm in conjunction with the angular spectrum method.<sup>3,9</sup> The calculated depths of the CGH were converted into four tones (three design bitmap patterns and one unprocessed area) to permit easy fabrication of the CGH while retaining a high diffraction efficiency. The

exposed sample was then baked for 5 min in air at 300 °C as a post-exposure bake (PEB) process. Next, the EB-exposed area of the resist was developed for 90 s. By using the master CGH pattern mold, the replica mold was duplicated by UV-NIL onto a poly(ethylene terephthalate) (PET) substrate. In this case, we used PAK-01 (Toyo Gosei Co., Tokyo) as a UV-curable resin. Finally, the CGH pattern was transferred onto a silicon wafer by UV-NIL, once again by using the replica mold. When UV-NIL carried out, the sample was coated with a release agent (Optool DSX; Daikin Industries Co., Tokyo). The height of the sample was examined with an atomic-force microscope (AFM) (SPM-9600; Shimadzu Co., Kyoto).

Figure 2 shows the optical setup for the reconstruction of the fabricated reflectivetype CGH-ROM. In this study, a continuous-wave (CW) blue laser (wavelength  $\lambda = 405$  nm) was used as the light source. The laser power was about 1.1 mW. The blue laser beam was directed onto the duplicated CGH-ROM on the silicon substrate and then passed through relay lenses and a beam expander (×10) to form the reconstructed CGH pattern, which was recorded by CCD camera (Allied Vision Technologies Co., Stadtroda, Germany). The CCD pitch size was 4 µm and the resolution was 1628 × 1236. The recording process was carried out in a darkroom.

## **III. RESULTS AND DISCUSSION**

## A. Fabrication of the 3D master mold by using a spin-on glass resist with post-exposure bake and its UV-NIL duplication

Figure 3 shows a laser micrograph of the fabricated master mold produced by using the PEB effect. In this case, the size of the CGH was  $900 \times 900 \mu m$  and the step width was 900 nm. This resist is hard enough to permit the UV-NIL process to be carried

out directly, thereby eliminating the need for an etching process. The calculated target depths were 379.7, 253.1, and 126.6 nm. Figure 4 shows an SEM image of the replica mold of the CGH pattern. The heights of the replica mold were  $376 \pm 27$  nm,  $239 \pm 33$ nm, and  $106 \pm 18$  nm. Although no proximity correction was performed in this study, the variation in depth was about 17% at maximum, as a result of the PEB effect. Figure 5(a) and 5(b) show the AFM images of a part of duplicated CGH-ROM pattern without or with PEB. The master molds of these CGH-ROM patterns were fabricated by same EB condition, except for with or without PEB process. The pattern depths without PEB were  $390 \pm 56$  nm,  $284 \pm 69$  nm,  $152 \pm 51$  nm. In contrast, the pattern depths with PEB were  $357 \pm 38$  nm,  $247 \pm 45$  nm,  $113 \pm 34$  nm. The variations in depth of duplicated patterns with PEB were smaller than that of duplicated patterns without PEB. Moreover, the pattern shape of CGH-ROM with PEB was sharper than that without PEB. Although we changed the EB conditions and tried to optimize them, the sharper pattern without PEB did not obtain because of the large proximity effect. As a result, it was cleared that the PEB process suppresses the proximity effect. This property is useful for sharpening the shape and fewer variations in depth compare to target values. Consequently, the PEB process is required for fabrication of CGH-ROMs master pattern. Figures 6(a) and 6(b) show the design bitmap image and the reconstructed image from the duplicated CGH-ROM. Although there are some small defects, the reconstructed image corresponded approximately to the design bitmap. We believe that the reconstruction image could be improved by the application of proximity correction.

## B. Fabrication of a gray-scale multilevel CGH-ROM

Next, we examined the fabrication of a gray-scale multilevel CGH-ROM. In this case, the multilevel CGH-ROM was reconstructed by using the master mold directly to permit examination of the resolution of our 3D patterning technique. Figure 7 shows the design bitmap of the gray-scale multilevel CGH-ROM. In this case, the size of the CGH was  $450 \times 450 \mu$ m and the step width was 450 nm. The resolution of the design bitmap was therefore  $1000 \times 1000$  pixels. The width of each square pattern was  $100 \times 100$  pixels and its pitch was 100 pixels. Figures 8(a), 8(b), and 8(c) show the reconstructed images of the CGH-ROM for focal lengths of 10, 5, and 1 mm, respectively. The minimum recognizable intensity value for the 1-mm design bitmap was 61, whereas for the 10-mm design it was 112. The reconstructed image for the 1 mm focal length therefore has a clearer pattern edge and a higher contrast. The reconstruction performance should be improved by the use of error-correction code and proximity correction at the EBL.

## **IV. SUMMARY AND CONCLUSIONS**

We have demonstrated the duplication of CGH-ROMs by means of UV-NIL using a 3D master mold fabricated by EBL. The PEB effect with spin-on glass permitted the production of easily reconstructed CGH-ROMs without the need for any other complex processes. In particular, we succeeded in fabricating a 3D master mold by a single EBL process with no etching process. Therefore, the throughput of this process is much higher than that of a conventional combination method involving EBL, lift-off, and etching. Moreover, the minimum size of the resulting CGH was  $450 \times 450 \mu m$  and its step width was 450 nm. In addition, we also fabricated a gray-scale multilevel CGH-ROM, and it should be possible to improve its capacity markedly. We believe that our method has considerable potential for duplication of high-density CGH-ROMs with high throughput and that the density of CGH-ROM could be improved by control of the acceleration voltage in the EBL (CAV-EBL).<sup>10</sup>

## ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011) and a grant-in-aid for fellows of the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

## References

- <sup>1</sup> M. Ikeda and S. Uchida, Phys. Status Solidi A, **194**, 407 (2002).
- <sup>2</sup> S. Satake, J. Taniguchi, T. Anraku, H. Kanamori, T. Kunugi, K. Sato, and T. Ito, J. Phys.: Conf. Ser. **191**, 012018 (2009).
- <sup>3</sup> S. Yoshida, T. Sano, M. Yamamoto, M. Nakajima, and T. Kobayashi, "ROM Type Holographic Disk Using Computer Generated Hologram," Presented at Digital Holography and Three-Dimensional Imaging Conference, Vancouver, Canada, June 18, 2007. Available online at http://dx.doi.org/10.1364/DH.2007.DTuB3.
- <sup>4</sup> S. Campbell and P. Yen, Appl. Opt., **35**, 2380 (1996).
- <sup>5</sup> S. Y. Chou, P. R. Krauss, W. Zhang, L. Guo, and L. Zhuang, J. Vac. Sci. Technol. B **15**, 2897 (1997).
- <sup>6</sup> J. Haisma, M. Verheijen, K. van den Heuvel, and J. van den Berg, J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 4124 (1996).
- <sup>7</sup> N. Unno, J. Taniguchi, M. Shizuno, and K. Ishikawa, J. Vac. Sci. Technol. B **26**, 2390 (2008).
- <sup>8</sup> K. Ogino, J. Taniguchi, S. Satake, K. Yamamoto, Y. Ishii, and K. Ishikawa, Microelectron. Eng. 84, 1071 (2007).
- <sup>9</sup> R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, Optik (Stuttgart) 35, 237 (1972).
- <sup>10</sup> N. Unno, J. Taniguchi, and Y. Ishii, J. Vac. Sci. Technol. B. 25, 2361 (2007).

## **Figure Captions**

Figure 1. (Color online) The fabrication process for the CGH-ROM.

Figure 2. (Color online) The optical setup for the reconstruction of the image from the fabricated reflective-type CGH-ROM.

Figure 3. Laser micrograph of the master mold fabricated by using the PEB effect.

Figure 4. SEM image of the CGH pattern mold.

Figure 5. (Color online) The AFM images of a part of duplicated CGH-ROM pattern (a) without PEB, (b) with PEB.

Figure 6. (a) The design bitmap image and (b) the reconstructed image from the duplicated CGH-ROM.

Figure 7. The design bitmap for the gray-scale multilevel CGH-ROM.

Figure 8. Reconstructed images of the CGH-ROM for focal lengths of (a) 10 mm, (b) 5 mm, and (c) 1 mm.

## (1) Master mold by 3D-EB lithography



Fig. 1 Noriyuki Unno et al.



Fig. 2 Noriyuki Unno et al.



Fig. 3 Noriyuki Unno et al.



Fig. 4 Noriyuki Unno et al.



Fig. 5 Noriyuki Unno et al.



Fig. 6 Noriyuki Unno et al.



Fig. 7 Noriyuki Unno et al.



Fig. 8 Noriyuki Unno et al.

\* 2 Fabrication of eight-step diffractive optical element for hologram-ROM, Yuta Shinonaga, Keito Ogino, Noriyuki Unno, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 141, pp 102-106, 2015 (査読有)

## Fabrication of eight-step diffractive optical element for hologram-ROM

Yuta Shinonaga<sup>a</sup>, Keito Ogino<sup>a</sup>, Noriyuki Unno<sup>a,b</sup>, Shuhei Yoshida<sup>a</sup>,

Manabu Yamamoto<sup>a</sup>, Jun Taniguchi<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku,

Katsushika, Tokyo 125-8585, Japan

<sup>b</sup>Japan Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo

102-0083, Japan

\*Corresponding author. Tel: +81-3-5876-1717. E-mail: junt@te.noda.tus.ac.jp

## Abstract

Computer-generated-hologram read-only memory (CGH-ROM) is expected to be a next-generation optical recording medium because it has a higher recording density and readout speed than those of conventional optical media. However, CGH-ROM is difficult to produce in large volumes at low cost because it needs precision multilevel submicrometer steps. Therefore, to cost-effectively fabricate the complex and high-precision pattern, the authors have employed a combination of electron beam lithography (EBL) and nanoimprint lithography (NIL). Our previous study reported the fabrication process of a four-step diffractive optical element (DOE) using EBL and NIL. However, DOEs with higher diffraction efficiencies are desired to obtain a lower noise holographic image. Increasing the number of submicrometer step levels is an effective method for improving the diffraction efficiency and reducing the quantizing error and reconstruction noise. In this study, a DOE with eight steps was fabricated using dose-modulated EBL with an inorganic positive-type EB resist. The fabricated eight-step DOE was also duplicated using NIL. As a result, we have succeeded in improving the multilevels of the master mold, and the replicated pattern was able to be reconstructed by a charge-coupled-device camera.

Keywords: Nanoimprint, Electron beam lithography, Diffractive optical element, Hologram-ROM, Inorganic EB resist

### 1. Introduction

To distribute large quantities of various data widely and rapidly, read-only memory (ROM) optical discs are a suitable media because of their low cost. Although the storage capacity of conventional ROM such as compact discs, digital versatile discs, and blu-ray discs has been increasing as the readout wavelength decreases, further improvement in the capacity is a challenging problem because an ultraviolet-range laser would be absorbed by the plastic substrate of the optical disc. For these reasons, computer-generated-hologram ROM (CGH-ROM) [1-3] has received a lot of attention as a next-generation ROM because of its high readout speed and huge recording capacity. On the other hand, CGH-ROM requires nanoscale three-dimensional (3D) patterns, and thus, a simple patterning method to produce multilevel submicrometer steps is expected. There have been some reports about the fabrication of nanoscale 3D patterns using electron beam lithography (EBL) [4] or thermal processes [5]. To fabricate CGH-ROM effectively at a high throughput, we have developed a fabrication process that combines EBL and ultraviolet nanoimprint lithography (UV-NIL) without the lift-off and etching processes [6,7]. In the case of our method, there is no additional dry etching process because we use a spin-on-glass material as the positive-type EB resist and because it is possible to carry our UV-NIL directly. This is advantageous for reducing fabrication errors. In our previous study, we fabricated a diffractive optical element (DOE) with four submicrometer steps. However, the diffraction efficiency of the fabricated DOE was not sufficiently high. The diffraction efficiency of a multilevel surface relief DOE  $\eta_m$  is expressed as

$$\eta_m = \left[\frac{\sin\left(\frac{m\pi}{N}\right)}{\frac{m\pi}{N}}\right]^2,\tag{1}$$

where *m* and *N* represent the diffraction order and multilevel number, respectively [8]. Equation (1) does not include a grating period  $\Lambda$ , and so it is effective only for the condition  $\Lambda \gg \lambda$  (where  $\lambda$  is the wavelength) because it is obtained from scalar diffraction theory. Hence, the diffraction efficiency of the first order  $\eta_1$  descends rapidly in the domain of  $\Lambda < \lambda$  [9]. Figure 1 shows the relationship between the diffraction efficiency (plus the first order) and the step level. We believe that a DOE with eight steps will be efficient for fabricating CGH-ROM because it has a favorable balance of fabrication of a DOE with eight steps using EBL and NIL is possible. It also becomes clear that the quality of the reconstruction image was improved by increasing the number of the submicrometer steps from four to eight. Moreover, we have succeeded in the reconstruction of a duplicated CGH-ROM with a 450-nm step width.

#### 2. Experimental method

Figure 2 shows the fabrication process of the CGH-ROM. NIMO-P0701 (Tokyo Ohka Kogyo Co., Ltd., Tokyo), which is based on spin-on glass, was used as the EB resist on a silicon wafer [10]. The thickness of the resist was about 1 μm. A buffered hydrofluoric acid solution [50 % hydrofluoric acid (35 mL/L) and 40 % NH<sub>4</sub>F (18.75 mL/L)] was used as the developer. The sample was installed in a scanning electron microscope (SEM) with an EB writing system (ERA-8800FE; Elionix Co., Tokyo). Then, without moving the SEM stage, the sample was exposed seven times to various

EB doses [11], and designed patterns were produced by a 20-kV EB spot with a current of 50 pA. The reflective-type CGH pattern was prepared previously by means of the Gerchberg–Saxton algorithm in conjunction with the angular spectrum method [3,12]. The calculated depths of the CGH were converted into eight tones (seven design bitmap patterns and one unprocessed area). The EB-exposed area of the resist was then developed for 120 s. By using the master CGH pattern mold, an inverted mold was duplicated by UV-NIL onto a polyester film substrate (Cosmoshine A4300; Toyobo Co., Osaka). In this case, we used PAK-01CL (Toyo Gosei Co., Tokyo) as the UV-curable resin, and the fabricated mold was processed directly by UV-NIL, thus eliminating the etching processes [13]. Finally, the CGH pattern was transferred onto a silicon wafer by NIL with the inverted mold. When UV-NIL was carried out, the sample was coated with a release agent (Optool DSX; Daikin Industries Co., Tokyo) [14]. The combination of the EB resist and the release agent allows UV-NIL duplication of a pattern with a high aspect ratio (over 3) [15]; the aspect ratio of our target pattern is at the most 1.2. At this time, the residual layer thickness (RLT) of the mold does not influence the reconstructed image [5]. The height of the sample was examined with an atomic force microscope (AFM) (SPM-9600; Shimadzu Co., Kyoto). We measured pattern heights for 36 points over the DOE pattern and calculated the average step height at each step. Figure 3 shows the relationship between the EB dose and the developed pattern depth. The depths of each step pattern were controlled using this relationship. In this case, the target depths of 71.5, 144.9, 216.4, 289.9, 361.3, 434.8, and 506.3 nm, as shown in Figure 4, were fabricated by EB doses of 37, 76, 114, 153, 190, 229, and 267  $\mu$ C/cm<sup>2</sup>, respectively. The contrast curve of the EB dose is typically a nonlinear curve [10,16,17], which means it is difficult to control the pattern height precisely in the nonlinear area

because a small variation in the EB dose generates a large height difference. Therefore, we chose an optimal EB condition that would assume a linear trend. Since the design patterns of each step were located at almost random positions, we did not apply the proximity correction to clear the potential of our technique.

Figure 5 shows the optical setup for the reconstruction of the fabricated reflective-type CGH-ROM. The light source was a continuous-wave blue laser ( $\lambda = 405$  nm). The blue laser beam, directed onto the duplicated CGH-ROM on the silicon substrate, was reflected by the silicon substrate, and phase differences developed in the step pattern because of the differences in the length of the light path owing to the step heights. The interfered light passed through relay lenses and a beam expander (×10) to form the reconstructed CGH pattern, which was recorded by a charge-coupled-device (CCD) camera (Allied Vision Technologies Co., Stadtroda, Germany). The CCD pitch size was 4 µm, and the resolution was 1628×1236. The focal length was 5 mm. The recording process was carried out in a darkroom.

### 3. Results and discussion

Figure 6(a) and (b) show a design image of the CGH-ROM and a laser microscope image of the fabricated master mold, respectively. The size of the CGH was  $450 \times 450$  µm, and the step width was 450 nm. As shown in Figure 6(b), the characters "TUS" could not observed at this time. Figure 7 shows AFM images of part of the fabricated and duplicated CGH patterns, and Figure 8 shows the fabricated pattern and target depths. The depths of the duplicated pattern corresponded to those of the master mold and target depth, and thus, a DOE with eight submicrometer steps was obtained using EBL and UV-NIL. Figure 9(a) and (b) show reconstructed images of the molds and

duplicated patterns with a four-step DOE, and Figure 9(c) and (d) show those of the eight-step DOE. As shown in Figure 10, the edges of the black square area and the reconstructed characters are clearer when reconstructed with the eight-step DOE rather than the four-step DOE. Note that the grating period  $\Lambda$  of the four-step DOE was 300 nm, which is shorter than the wavelength of the blue laser. This situation also decreased the diffraction efficiency, as noted in Ref. 6. Unfortunately, fabrication of the eight-step DOE with a  $\Lambda$  of 300 nm was difficult, and thus, we could not compare images generated under the same  $\Lambda$  condition. There was still reconstruction noise caused by the quantizing error, the convergence error in the CGH-ROM pattern calculation, and the variation in the pattern shape. Although the first and second error source are unavoidable, the variation in the pattern shape can be improved by using proximity correction and control of acceleration voltage EBL (CAV-EBL) [18]. Finally, we compared the diffraction efficiencies of the four- and eight-step DOEs. The diffraction efficiency was calculated from the sum of the brightness of the "TUS" letters divided by the sum of the brightness and the background brightness. The resulting diffraction efficiencies of the four- and eight-step DOEs were 80% and 90%, respectively. Consequently, we have succeeded in improving the diffraction efficiency with an eight-step DOE.

## 4. Conclusion

We have demonstrated the duplication of CGH-ROM with eight submicrometer steps by means of UV-NIL using a 3D master mold. The mold was fabricated by EBL with no etching process and no proximity correction. The size of the duplicated CGH-ROM with eight steps was  $450 \times 450 \mu m$ , and the step width was 450 nm. Moreover, it became clear that the level of submicrometer steps is required to be at least eight to obtain a clear reconstructed image. However, fabrication of the eight-step DOE with a  $\Lambda$  of 300 nm was difficult, and thus, we could not compare images generated under the same  $\Lambda$  condition. Furthermore, there was still reconstruction noise caused by the quantizing error, the convergence error in the CGH-ROM pattern calculation, and the variation in the pattern shape. We believe that the use of CAV-EBL and the proximity correction will be advantageous in reducing the noise and allowing the fabrication of an eight-step DOE with a  $\Lambda$  of 300 nm, which would result in a higher recording density. In the future, we will examine the possibility of fabricating an eight-step DOE with a  $\Lambda$  of 300 nm using EBL and UV-NIL.

## Acknowledgments

This study was supported by the MEXT-Supported Program for the Strategic Research Foundation at Private Universities, 2011–2015.

### References

[1] J.A. Rajchman, Promise of optical memories, J. Appl. Phys. 41 (1970) 1376–1383.
 http://dx.doi.org/10.1063/1.1658952

[2] S. Satake, J. Taniguchi, T. Anraku, H. Kanamori, T. Kunugi, K. Sato, T. Ito,
Calibration plate for digital holographic particle tracking velocimetry, J. Phys. Conf. Ser.
191 (2009) 012018. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/191/1/012018

[3] S. Yoshida, T. Sano, M. Yamamoto, M. Nakajima, T. Kobayashi, ROM type holographic disk using computer generated hologram, presented at Digital Holography and Three-Dimensional Imaging Conference, Vancouver, Canada, June 18, 2007. http://dx.doi.org/10.1364/DH.2007.DTuB3.

[4] F. Hu, S.-Y. Lee, Dose control for fabrication of grayscale structures using a single step electron-beam lithographic process, J. Vac. Sci. Technol. B 21 (2003) 2672–2679. http://dx.doi.org/10.1116/1.1627808

[5] A. Schleunitz, V.A. Guzenko, M. Messerschmidt, H. Atasoy, R. Kirchner, H. Schift, Novel 3D micro- and nanofabrication method using thermally activated selective topography equilibration (TASTE) of polymers, Nano Converge. 1 (2014) 7. http://dx.doi.org/10.1186/s40580-014-0007-5

[6] N. Unno, S. Yoshida, H. Akamatsu, M. Yamamoto, S. Satake, J. Taniguchi, Three-dimensional hologram-read-only memory duplication by nanoimprint lithography,
J. Vac. Sci. Technol. B 31 (2013) 06FB01. http://dx.doi.org/10.1116/1.4821654

[7] K. Ogino, N. Unno, S. Yoshida, M. Yamamoto, J. Taniguchi, Computer generated hologram-ROM fabrication and duplication by EBL and UV-NIL, Microelectron. Eng. 123 (2014) 163–166. http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2014.06.034

[8] B.C. Kress, P. Meyrueis, Digital Diffractive Optics: An Introduction to Planar

Diffractive Optics and Related Technology, Wiley, Chichester, 2000, Chapter 1.

[9] T. Shiono, M. Kitagawa, K. Setsune, T. Mitsuyu, Reflection micro-Fresnel lenses and their use in an integrated focus sensor, Appl. Opt. 28 (1989) 3434–3442. http://dx.doi.org/10.1364/AO.28.003434

[10] K. Ogino, J. Taniguchi, S. Satake, K. Yamamoto, Y. Ishii, K. Ishikawa, Microelectron. Eng. 84 (2007) 1071–1074. http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.144
[11] T. Fujita, H. Nishihara, J. Koyama, Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography, Opt. Lett. 7 (1982) 578–580. http://dx.doi.org/10.1364/OL.7.000578

[12] R.W. Gerchberg, W.O. Saxton, A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures, Optik (Stuttgart) 35 (1972) 237–246.

[13] N. Unno, J. Taniguchi, M. Shizuno, K. Ishikawa, Fabrication of the nanoimprint mold using inorganic electron beam resist with post exposure bake, J. Vac. Sci. Technol. B 26 (2008) 2390–2393. http://dx.doi.org/10.1116/1.3010735

[14] N.B.A. Talip[a] Yusof, J. Taniguchi, Microelectron. Eng. 110 (2013) 163–166.http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2013.03.041

[15] M. Shizuno, J. Taniguchi, K. Ogino, K. Ishikawa, Effect of post exposure bake in inorganic electron beam resist and utilizing for nanoimprint mold, J. Nanosci. Nanotechnol. 9 (2009) 562–566. http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2009.J040

[16] P.D. Maker, R.E. Muller, Phase holograms in polymethyl methacrylate, J. Vac. Sci.Technol. B 10 (1992) 2516–2519. http://dx.doi.org/10.1116/1.586049

[17] W.H. Wong, E.Y.B. Pun, Exposure characteristics and three-dimensional profiling of SU8C resist using electron beam lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 19 (2001) 732–735. http://dx.doi.org/10.1116/1.1368678
[18] N. Unno, J. Taniguchi, Y. Ishii, Sub-100-nm three-dimensional nanoimprint lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 25 (2007) 2361–2364.
http://dx.doi.org/10.1116/1.2811715

#### **Figure Captions**

Figure 1. Relationship between the diffraction efficiency (plus the first order) and the step level.

Figure 2. Method of CGH-ROM fabrication and duplication.

Figure 3. Relationship between the EB dose and the developed depth.

Figure 4. Schematic view of the calculated target depths.

Figure 5. Optical setup for the reconstruction of the fabricated reflective-type CGH-ROM.

Figure 6. (a) Target image and (b) laser microscope image of the fabricated CGH-ROM master mold.

Figure 7. AFM image of part of the (a) fabricated and (b) duplicated CGH pattern.

Figure 8. AFM measurement results of the CGH-ROM depths of the fabricated mold and duplicated pattern.

Figure 9. Reconstruction images of the fabricated (a) four-step and (b) eight-step master mold and duplicated (c) four-step and (d) eight-step CGH-ROM.

Figure 10. Cross-sectional intensity profiles of the (a) four-step and (b) eight-step CGH-ROM.



Fig. 1





Fig. 3

Step v	Laser wave length vidth $\lambda = 405$ nm		Phase (rad)	Calculated depth d(nm)	EB dose amount (µC/cm <sup>2</sup> )	
∧=4	50nm			$\pi/4$	506.3	267
				$\pi/2$	434.8	229
	$\stackrel{\longleftrightarrow}{\Lambda} d$		,	$3\pi/4$	361.3	190
			π	289.9	153	
				$5\pi/4$	216.4	114
	PAK-01CL			$3\pi/2$	144.9	76
	Si substrate			$7\pi/4$	71.5	37



Fig. 5





(b)



Master mold

Duplicated CGH-ROM



Fig. 8





# Computer generated hologram-ROM fabrication and duplication by EBL and UV-NIL

Keito Ogino\*, Noriyuki Unno\*,\*\*, Shuhei Yoshida\*, Manabu Yamamoto\*, Jun

Taniguchi\*,<sup>†</sup>

\*Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku,

Katsushika, Tokyo, 125-8585, Japan

Tel: +81-3-5876-1717

\*\* Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Kojimachi,

Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083, Japan

<sup>†</sup>e-mail: junt@te.noda.tus.ac.jp

# Abstract

High speed and large capacity read only memory (ROM) is strongly required for the increasing data size of pictures, videos and all other file. Computer generated hologram-ROM (CGH-ROM) that has possibility to meet these demand is receiving a lot of attention as the next generation ROM. However, CGH-ROM is difficult to produce in large volume at low cost because it requires a nano-scale precision structure as well as nano-steps. Therefore, in order to fabricate the complex and high-precision pattern cost-effectively, the authors employed ultraviolet nanoimprint lithography (UV-NIL). The three-dimensional (3D) CGH-ROM master mold was fabricated by electron beam lithography (EBL). In this study, the thickness of residual layer under the CGH pattern was examined. As a result, the target reconstruction image of the authors have succeeded in fabrication of a CGH-ROM with a 300 nm step width and its reconstruction.

Keywords : Nanoimprint, Electron beam lithography, Hologram, Three-dimensional nano pattern

#### 1. Introduction

The resolution of digital contents such as pictures, videos, and various data files has been increasing steadily year by year. Because of low running cost and high throughput, the read-only memory (ROM) optical disk, generally fabricated by plastic injection molding, is a suitable medium for the rapid and widespread distribution of the digital contents. The storage capacity of ROM has been increasing by the contribution of improvements in the track pitch size, the read-out wavelength, and the numerical apertures (NA) of lenses. For instance, Compact Disc (CD) has a read out wavelengths of 785 nm, a track pitch of 1.60 µm and NA of 0.45; the corresponding values for Digital Versatile Disc (DVD) are 655 nm, 0.74 µm, and 0.60, and those of Blu-ray Disc (BD) are 405 nm, 0.32 µm, and 0.85 respectively. As a result, the recording densities of CD, DVD, and BD per single layer are 0.41, 2.77, and 14.73 Gbit/inch<sup>2</sup> [1, 2]. However, it is difficult to decrease the wavelength any further because an ultraviolet-range laser is absorbed by the plastic substrate of the optical disk. In addition, the higher NA lens tends to cause the shallower depth of focus, thus, the smoother surface roughness is required for the disc. In this case, furthermore, a vibration also becomes a major issue. Although a multi-layer medium is typically used to raise the recording density, the fabrication cost is higher than one of a single-layer medium.

For these reasons, holographic memory [3] is considered as the next-generation ROM, which is expected to achieve upward of 1 Tbit/in<sup>2</sup> recording density. In the case of holographic memory, the data is read from a block area, so the readout speed is greater than that of a conventional optical disk, which is read by line by line. Moreover, recording techniques, such as angle [4] and shift multiplexing technique [5], have been reported to increase the recording density. Additionally, it is possible to duplicate the

relief-type hologram [6] using nanoimprint lithography (NIL) [7] since this hologram pattern is formed on the surface of the medium. The problem is that, the fabrication of a master mold in a large area using the optical system is difficult because the optical interference is very sensitive for the vibration of the system and the optical axis deviation.

To fabricate the master mold without the environmental disturbance, computer-generated hologram ROM (CGH-ROM) [8-10] has received a lot of attention. In the case of CGH-ROM, a page data is converted into a hologram by iterative calculation with arbitrary wave front [11]. By means of the calculated result, the master mold, which consists of nanoscale three-dimensional (3D) patterns, is usually fabricated by electron beam lithography (EBL) [12, 13]. Since the control of pattern depths on a nano-scale was very difficult, the step width previously reported was mainly over 1  $\mu$ m. If the step width is 1  $\mu$ m and a step can represent a 1 bit data, the recoding density without the multiple-technique is 0.645 Gbit/in<sup>2</sup>. Thus, the finer step width is strongly desired to obtain the higher density.

By using an inorganic EB resist, we have developed a CGH-ROM fabrication process without lift-off and etching process [14]. However, in order to obtain CGH-ROM pattern over the 12 cm disk area with small residual layer thickness (RLT) [15] variations, a high precision NIL stage and a mirrored surface substrate are required, resulting in very high cost. In this study, therefore, we examined the effect of the RLT under CGH-ROM and compared each reconstruction images. As a result, it becomes clear that the target reconstruction image of the CGH-ROM was obtained regardless of a residual layer thickness. Moreover, we have succeeded in reconstruction of a duplicated CGH-ROM with a 300 nm step width, which is smaller than the read out wave length of 405 nm.

#### 2. Experimental method

Figure 1 shows the fabrication process for the CGH-ROM via EBL. NIMO-P0701 (Tokyo Ohka Kogyo Co., Ltd., Tokyo), which is based on spin-on glass, was used as the positive-type EB resist [16]. The thickness of the resist on a silicon wafer was about 1µm. A buffered hydrofluoric acid solution [50% hydrofluoric acid (35mL/L) and 40% NH<sub>4</sub>F (18.75mL/L)] was used as the developer. The sample was installed in a scanning electron microscope (SEM) with an EB writing system (ERA-8800FE; Elionix Co., Tokyo). Then, the sample was exposed three times to changing EB doses [17] and design patterns without moving the SEM stage. The acceleration voltage and current of EB were 10kV and 50 pA, respectively. The reflective-type CGH pattern was previously prepared by means of the Gerchberg-Saxton algorithm in conjunction with the angular spectrum method [10, 18]. The calculated depths of the CGH were converted into four tones: three design bitmap patterns and one unprocessed area. After EB exposure, the sample was developed for 60 sec. By using the master CGH pattern mold, an inverted mold was duplicated by ultra violet NIL (UV-NIL) onto a Polyester film (COSMOSHINE A4300; Toyobo Co., Osaka) substrate. In this case, we used PAK-01CL (Toyo Gosei Co., Tokyo) as a UV-curable resin because of its high performance [19, 20]. Finally, the CGH pattern was transferred onto a silicon wafer via NIL with the inverted mold. When UV-NIL carried out, the sample was coated with a release agent (Optool DSX; Daikin Industries Co., Tokyo). To control the RLT under CGH-ROM, we employed the spin-coating technique and the obtained RLTs were  $3.5\mu m$ ,  $4.6\mu m$  and  $7.7\mu m$ . The height of the sample was examined with an atomic force microscope (AFM) (SPM-9600; Shimadzu Co., Kyoto). Figure 2 show the relationships

between the EB doses and the developed pattern depth. The depths of each step pattern were controlled using by this relationships. In this case, the target depths of 97.4, 194.7, 292.1 nm, as shown in figure 3, was fabricated by the EB doses of 180, 215, and 290  $\mu$ C/cm<sup>2</sup>, respectively.

Figure 4 shows the optical setup for the reconstruction of the fabricated reflective-type CGH-ROM. In this study, a continuous-wave blue laser (wavelength  $\lambda$  = 405 nm) was used as the light source for reconstruction. The blue laser beam was directed onto the duplicated CGH-ROM on the silicon substrate and then passed through relay lenses and a beam expander (×5). The reconstructed CGH pattern was recorded by CCD camera (Allied Vision Technologies Co., Stadtroda, Germany). The CCD pitch size was 4 µm, and the resolution was 1628×1236. A quantization bit rate of the image intensity was 8 bit. The focal length is 5 mm. The reconstruction process was carried out in a darkroom.

#### 3. Results and discussion

Figure 5(a) and (b) show a target image of CGH-ROM and a SEM image of a fabricated master CGH-ROM mold. In this case, the size of the CGH was  $300 \times 300 \mu m$ , and the step width was 300 nm. This resist is hard enough to permit to carry out UV-NIL process directly, thus, we can eliminate etching processes. Figure 6 shows AFM image of a part of fabricated and duplicated CGH pattern. The 4-steps 3D mold was fabricated in one EBL process and the duplicated pattern was obtained via UV-NIL. Figure 7 shows the AFM analysis result of the fabricated and duplicated CGH patterns. As a result, the depths of the fabricated pattern were deeper than the target depths in this study, because the proximity effect was not considered when the EB doses were

optimized. Further optimization of the EB doses is needed to fabricate more accurate depths. Figure 8(a)(b)(c)(d) show the each reconstruction images with RLT of 3.5 µm, 4.6 µm, 7.7 µm and the simulation result calculated from the target depths via scalar diffraction theory [10]. In spite of no proximity correction, the profiles of reconstructed images were corresponded to the simulation result: for examples, the part of a lack of intensity. In addition, these were recognizable as characters of "TUS", because the reflective-type CGH uses the difference of the pattern depth at each step as the phase difference. Although the moire pattern was caused by interference in the UV curable resin layer, we believe that the moire can be controlled by the irradiation angle. Ultimately, it becomes clear that the reconstruction image does not depend on the RLT under CGH-ROM and CGH-ROM works between 3.5 µm and 7.7 µm RLT.

#### 4. Conclusion

We have demonstrated the duplication of CGH-ROM by means of UV-NIL using a 3D master mold fabricated by EBL with no etching process. The minimum size of the duplicated CGH-ROM was  $300 \times 300 \mu m$  and its step width was 300 nm. In this case, the ideal recording density (without the error correction code) is 7.17 Gbit/in<sup>2</sup> for a single layer. Moreover, we examined the relationships between the RLT and the reconstruction images. It becomes clear that the reconstruction images were corresponded to the simulation result and it was recognizable as original design characters, because the reflective-type CGH uses the difference of the pattern depth at each step as the phase difference. This means that we do not need to use the high RLT accuracy NIL machine and mirrored substrates, resulting in low equipment cost. To improve the reconstruction image, a mold with the further steps of the depth is necessary because the quantizing

error is decreased when we subdivide the computer calculation result into many target depths. We believe that our approach is suitable and cost-effective process for fabrication of CGH-ROM.

# ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011).

#### References

- [1] T. D. Milster, Proceedings of the IEEE, 88, NO. 9, pp. 1480 1490 (2000).
- [2] S. Stallinga, Applied Optics, 44, 6, pp. 849-858 (2005).
- [3] J. A. Rajchman, Journal of Applied Physics 41, 1376 (1970);
- [4] S. Campbell and P. Yen, Applied Optics, 35, 2380 (1996).
- [5] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtis, Optics Letters, 20, 7, pp. 782-784 (1995).
- [6] R. Bartolini, W. Hannan, D. Karlsons, and M. Lurie, Applied Optics, 9, 10, pp. 2283-2290 (1970).
- [7] S. Y. Chou, P. R. Krauss, W. Zhang, L. Guo, and L. Zhuang, Journal of Vacuum Science and Technology B 15, 2897 (1997).
- [8] A. W. Lohmann and D. P. Paris, Applied Optics, 6, 10, pp. 1739-1748 (1967).
- [9] S. Satake, J. Taniguchi, T. Anraku, H. Kanamori, T. Kunugi, K. Sato, and T. Ito, J. Phys. Conf. Ser. 191, 012018 (2009).
- [10] S. Yoshida, T. Sano, M. Yamamoto, M. Nakajima, and T. Kobayashi, "ROM Type Holographic Disk Using Computer Generated Hologram," presented at Digital Holography and Three-Dimensional Imaging Conference, Vancouver, Canada, June 18, 2007. Available online at <u>http://dx.doi.org/10.1364/DH.2007.DTuB3</u>.
- [11] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, JOSA A, Vol. 5, Issue 7, pp. 1058-1065 (1988).
- [12] K. S. Urquhart, R. Stein, and S. H. Lee, Optics Letters, 18, 4, pp. 308-310 (1993).
- [13] R. Petruškevic<sup>\*</sup>ius, J. Baltrusaiti, D. Kezys, M. Mikolajunas, V. Grigaliunas, D.
- Virz onis, Microelectronic Engineering 87, pp.2332–2337 (2010).
- [14] N. Unno, S. Yoshida, H. Akamatsu, M. Yamamoto, S. Satake, and J. Taniguchi,Journal of Vacuum Science & Technology B, 31, 06FB01 (2013).

- [15] H.-J. Lee, H. W. Ro, C. L. Soles, R. L. Jones, E. K. Lin, W.-I. Wu and D. R. Hines,J. Vac. Sci. Technol. B 23 (6), 3023 (2005)
- [16] K. Ogino , J. Taniguchi, S. Satake, K. Yamamoto, Y. Ishii, K. Ishikawa, Microelectronic Engineering 84, 1071 (2007)
- [17] T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama, Optics Letters, 7, 12, pp. 578-580 (1982)
- [18] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, Optik (Stuttgart) 35, 237 (1972).
- [19] N. Unno, J. Taniguchi, and Y. Ishii, J. Vac. Sci. Technol. B. 25, 2361 (2007).
- [20] Nurhafizah Binti Abu Talip[a] Yusof, J. Taniguchi, Japanese Journal of Applied Physics, 53, 06JK03 (2014).

#### **Figure Captions**

Figure 1. The method of fabrication and duplication with CGH-ROM

Figure 2. Relationships between the EB doses and the developed depth

Figure 3. A schematic view of the calculated target depths

Figure 4. Optical setup for the reconstruction of the fabricated reflective-type CGH-ROM

Figure 5. (a)Target image and (b) SEM image of the fabricated CGH-ROM master mold.

Figure 6. AFM image of a part of (a) fabricated and (b) duplicated CGH pattern

Figure 7. AFM measurement results of the CGH-ROM depths with the fabricated mold and the duplicated pattern.

Figure 8. Reconstruction images of CGH-ROM with each RLT, (a)  $3.5\mu$ m, (b)  $4.6\mu$ m, (c)  $7.7\mu$ m and (d) the simulation result calculated from the target depths



Figure 1



Figure 2



Figure 3



Figure 4



(a)



(b)

Figure 5



Figure 6



Figure 7



Figure 8

# Evaluation of ultraviolet-nanoimprint-lithography release agent properties by using

# **TriboIndenter**

Kota Funakoshi<sup>a</sup>, Chiharu Tadokoro<sup>b</sup>, Ian Thomas Clark<sup>c</sup>,

Toshiro Okawa<sup>c</sup>, Jun Taniguchi<sup>d</sup>, Shinya Sasaki<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo University

of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

<sup>b</sup>Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku,

Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

<sup>c</sup>Omicron NanoTechnology Japan, Hysitron Group, 3-32-42 Higashishinagawa, Shinagawaku,

Tokyo 140-0002, Japan

<sup>d</sup>Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku,

Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

\*Electronic mail: <u>s.sasaki@rs.tus.ac.jp</u>

Telephone: +81-3-5876-1334

### Abstract

The adhesive and friction forces generated in releasing a mold from a resin in the presence of a release agent was investigated by using a TriboIndenter. We investigated the surface tribological properties of two ultraviolet-nanoimprint-lithography release agents, Optool DSX and trichloro(tridecafluoro-octyl)silane  $[C_8H_4Cl_3F_{13}Si]$  (F13), to elucidate the mold-release mechanism. For both release agents, we measured the friction and adhesive forces acting on the substrate. The friction force of Optool DSX was found to be lower than that of F13, whereas F13 showed a lower adhesive force than Optool DSX. Our previous results revealed that the durability of Optool DSX as a release agent was better than that of F13. Examining our previous and current results, we saw that the trends in the contact angle and the number of defects with increasing imprinting counts coincide with the trends in the friction and adhesive forces, respectively, of the release agents. Our method of evaluating the surface properties of release agents in two kinds of tests is shown to be effective.

Keywords: Nanoimprint, Release agent, Tribology, Friction force, Adhesive force, TriboIndenter

#### **1. Introduction**

The rising production costs of photolithography calls for new technology development. One promising alternative is ultraviolet nanoimprint lithography (UV-NIL), which is a useful technique for manufacturing nanoscale patterns [1-5] and a very powerful tool for the fabrication of next-generation devices such as solar cells [6] and antireflection films [7]. However, it is well known that transfer failure is a serious problem when applying nanoimprinting technology to mass production. Transfer failure refers to the presence of defects in the pattern of the UV-curable resin after manufacturing. The use of release agents to coat the surface of the mold is one possible solution for preventing transfer failure; however, improvement of the release agent durability is required. Various tests have been performed to investigate the properties of mold release agents by measuring friction forces [8, 9], contact angles [10–13], Fourier transform infrared (FTIR) spectra [14], and resin shapes after transfer [15, 16]. In our previous studies [17, 18], we examined the durability of the release agents Optool DSX and trichloro (3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluoro-octyl) silane [C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si] (F13) by using actual nanoimprinting equipment. Both release agent of our previous studies was widely used in UV-NIL. Contact angles were measured to determine the surface energy, and the relative number of defects [19] was used to evaluate the durability. Relative number of defects was the number of defects which should be considered during application. Hence, we attempted to determine by using relative number of defects suitable release agents for application. The contact angles of F13 were found to have higher values than those of Optool DSX, but the acceptable relative number of defects of Optool DSX was better than that of F13 [17, 18]. We repeated the experiment of our previous study due to observe the transitions of release agents in more detail. Silicon molds patterned with holes 230 nm in diameter and 230 nm deep (Scivax Co., Ltd., Kawasaki) were treated with fluorinated silane coupling agents. Opool DSX or F13 was used as release agent. The concentration of Optool DSX and F13 was 0.1 wt%. The mold treated with the release agent was used in a repetitive UV-NIL process automatically. The transfer force in the UV-NIL process was 20 N and the UV dose was 200 mJ/cm<sup>2</sup>. The contact angle of both release agnets

was measured at constant intervals by using contact angle-measurement equipment (Drop master-701, Kyowa Interface Science Co., Ltd, Niiza City). The transferred dots patterns were also examined at constant intervals by means of scanning electron microscopy (SEM). In our previous study, we measured more than 100,000 replicated dots on the UV curable resin. The method was used to measure the number of errors. Fig. 1 shows the relationship between the contact angle, the number of defects, and imprinting times. When we measured more than 100,000 replicated dots on the UV curable resin, the acceptable number of error was 10 which was the same as the acceptable error rate for mass production of patterned media [18]. A clear difference in the durabilities of the two release agents was observed. The contact angles of Optool DSX maintained higher values than those of F13. The defect number of Optool DSX was smaller than that of F13. Hence, Optool DSX was concluded to be a suitable release agent. In contact angle, the repeated result was difference from the results of our previous study. It is considered that coating results of Optool DSX varied widely. However, these tests were not able to elucidate in detail the durability of the release agent, and so we aimed to clarify the mechanism with further tests. Fig. 2 shows that in releasing the mold from the UV-curable resin there are two forces, friction and adhesive, which are generated at the same time. These two forces will affect the durability, but the force responsible for degradation is still unknown. In this study, we measured the adhesive and friction forces separately by performing different tests with a TriboIndenter.

# 2. Experimental apparatus and procedures

Silicon substrates (20 mm × 20 mm × 1 mm) were ultrasonically cleaned in acetone and ethanol successively for 15 min; they were then subjected to cleaning with ozone for 1 h at 50 W (BioForce Nanosciences). The cleaned silicon substrates were then treated with fluorinated silane coupling agents. In this study, we used the release agents Optool DSX (Daikin Industries, Ltd., Osaka) and F13 (Sigma-Aldrich Japan Co., Tokyo), each at a concentration of 0.1 wt%. The chemical structures of Optool DSX and F13 are shown in Figs. 3(a) and (b), respectively. The solvents were Optool HD-TH and HFE7300, respectively, each at a concentration of 99.9 wt%. The coating conditions were a dipping time of 24 h, post-rinsing bake temperature of 120 °C, and bake time of 5 min. The rinsing solutions were Optool HD-TH and HFE7300, respectively. We performed several imprints, and measured the adhesive and friction forces with a TriboIndenter (Ti950 TriboIndenter, Hysitron) after 100, 500 counts and initial. In the imprinting process, UV curable resin was separated from mold after indurating. This process was carried out automatically. Therefore, specimens were imprinted by 100 or 500 counts respectively. It is not the imprinted sample the one that was measured, but the silicon "stamp" treated with the release agent after performing imprints with it by using a TriboIndenter. The UV-curable resin used was PAK-01 (Toyo Gosei, Co., Ltd., Tokyo). The transfer force in the UV-NIL process was 20 N, and the UV dose was 200 mJ/cm<sup>2</sup>. TriboIndenter was used in a room with controlled temperature ( $26\pm 2^{\circ}$ C) and humidity  $(35\pm5\%)$  The apex radius of curvature of the diamond probe tip was 20  $\mu$ m. Method A (Fig. 4) was used to simulate friction, and scratch tests were performed to measure the friction forces by sliding the diamond probe over the release agent. The scratch speed was  $0.60 \,\mu$ m/s, and the increment in the vertical load was 100  $\mu$ N/s. Method B (Fig. 5) was used to simulate the adhesive force, which was measured by separating the diamond probe from the release agent. The lifting speed was 40  $\mu$ m/s.

#### 3. Results and discussion

#### 3.1 Measurement of friction force

Fig. 6(a) and (b) show the relationship between the sliding distance and the friction coefficient. As shown in Fig. 6(a), the friction coefficients of Optool DSX increased as the number of imprinting counts increased. The friction coefficients of F13 (Fig. 6(b)) increased when the imprinting counts increased from initial to 100 counts but not from 100 counts to 500 counts. The maximum friction force was generated in releasing the mold from the UV-curable resin, and this force is considered to contribute to the decreased durability when the static friction force changes into a dynamic friction force. The maximum friction forces of the release agents for different imprinting times were therefore compared. Fig. 7 shows the
mean maximum friction coefficients of the release agents determined from seven measurements. The friction coefficient of Optool DSX for initial was lower than that of F13. The friction coefficients of Optool DSX increased with increasing imprinting counts. The friction coefficients of F13 showed a larger increase from initial to 100 imprinting counts than the increase from 100 counts to 500 counts.

## 3.2 Measurement of adhesive force

Fig. 8 shows an example of the relationship between the distance and force during the Method B test. The adhesive force was calculated by subtracting the initial force from the final force, as shown in Fig. 8. The mean adhesive force of Optool DSX and F13 was determined from seven measurements, and as shown in Fig. 9, Optool DSX showed a higher adhesive force than F13 after initial. The adhesive force of F13 increased with increasing imprinting counts, but the adhesive force of Optool DSX did not increase.

## 3.3 Discussion

In our previous work, the contact angle of Optool DSX decreased monotonically with an increase in the imprinting counts (Fig. 1). The decrease in the contact angle of F13 over the first 200 imprinting counts was more drastic than the decrease over 200 to 1000 imprinting counts. From Figs. 1 and 7, we can see that the trend in the decrease of the contact angle coincides with the trend in the increase of the friction coefficients. Optool DSX and F13 have film thicknesses of about 3 nm and less than 1 nm, respectively [20, 21], and the film thickness of Optool DSX is considered to decrease with an increase in the imprinting counts [20]. Hence, this decrease in the film thickness will result in an increase in the friction coefficients of the release agents. However, for F13, the friction coefficients after 500 imprinting counts did not demonstrate an increase as large as that of the friction coefficients after 100 imprinting counts.

We found in previous work that transfer failure occurred at the positions where defects in the UV-curable resin were observed. With increasing imprinting counts, the number of errors increased, and with an accumulation of errors, the relative number of defects increased. From Fig. 9, we can see that the adhesive force of F13 increased with the number of imprinting counts, and Fig. 1 shows that the relative number of defects increased rapidly at the same time. In contrast, the adhesive force of Optool DSX showed little change with increasing imprinting counts and the relative number of defects increased gradually. Therefore, our previous study showed that the acceptable relative number of defects of Optool DSX was better than that of F13 because the smaller change in the adhesive force of Optool DSX causes only a minor increase in the number of UV-curable-resin defects. Our previous results and these current results also indicate that the trend in the relative number of defects coincides with the trend in the adhesive force of the release agents. Optool DSX has a very long chain length, and the molecules of Optool DSX are predicted to become intertwined during the coating process; furthermore, some molecules will not react with the silicon substrate. Hence, the Optool DSX film is a monolayer that behaves like a multilayer. Molecules at the outermost surface of this pseudomultilayer detach, and new surfaces are formed repetitively after each imprint. This allows the Optool DSX to maintain low adhesive forces. The molecules of F13, however, are not predicted to intertwine during the coating process, and thus F13 is unable to create a pseudomultilayer, which results in an adhesive force that increases with increasing imprinting counts.

## 4. Conclusions

Repetitive UV-NIL processes using a silicon mold coated with two different release agents were carried out. The friction and adhesive forces were examined to investigate the properties of the release agents for different imprinting counts by TriboIndenter. Optool DSX maintained a lower adhesive force than that of F13, whereas F13 maintained a higher friction force than that of Optool DSX. From the changes in the maximum friction force and adhesive force, it was found that the friction force accelerated the degradation of Optool DSX and the adhesive force accelerated the degradation of F13. We also found that the trends in the contact angle and the number of defects coincide with the trends in the friction and adhesive forces, respectively, of the release agents. Besides, atomic microscopy (AFM) was usually used to measure adhesive and friction forces on mold surface [22-23]. In AFM measurements,

silicon cantilevers are usually used. The shape of the silicon cantilever can vary widely, and silicon cantilevers also have a low wear resistance. It is difficult to continue using the same silicon cantilever for repeated measurements. Hence, even if the same specimen is used, the measured adhesive and friction force may not always be the same. This is in contrast to the high-wear-resistance diamond probes usually used in the TriboIndenter. It is therefore possible to repeat measurements with the same diamond cantilever, thus maintaining reproducibility.-Also, a more quantitative and stable measurement can be performed by using TriboIndenter compared to AFM. Table 1 lists the evaluations that we conducted. In our previous studies, the contact angle was evaluated regardless of the existence of a mold pattern on the macroscale. In contrast, evaluation of the number of defects was used only when there was a mold pattern on the microscale. Hence, the number-of-defects evaluation provides information on a smaller scale than that of the contact angle. By using the adhesive and friction forces, it was possible to evaluate the degradation of the release agents on the microscale. Table 2 lists the points understood from these evaluation methods. From observations of the contact angle and number of defects, it was considered that the lifespan of the release agent could be estimated by observing the degradation on the macro- and microscales. From the results of the adhesive force and number of defects, we found that when the release agents started to degrade the adhesive force increased suddenly. From the results of the friction force and number of defects, we found that when the release agents started to degrade the friction force increased gradually. It was considered from both of these force evaluations that the occurrence of defects can be predicted with clockwork precision on the microscale. Therefore, from our studies, it was considered that the occurrence of defects can be predicted accurately and the transition of degradation was able to be observed.

#### Acknowledgments

This study was supported by the Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011–2015).

## References

- S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers, Appl. Phys. Lett. 67, 3114–3116 (1995). doi: 10.1063/1.114851
- Y. Kang, Y. Nakai, Y. Haruyama, and S. Matsui, Density measurement of pillar structure fabricated via nanoimprinting using a poly(dimethylsiloxane) mold, J. Vac. Sci. Technol. B 30, 06FB06 (2012). doi: 10.1116/1.4758776
- K. Kuwabara, M. Ogino, S. Motowaki, and A. Miyauchi, Fluorescence measurements of nanopillars fabricated by high-aspect-ratio nanoprint technology, Microelectron. Eng. 73–74, 752–756 (2004). doi: 10.1016/j.mee.2004.03.047
- [4] M.-G. Kang and L. J. Guo, Nanoimprinted semitransparent metal electrodes and their application in organic light-emitting diodes, Adv. Mater. 19, 1391–1396 (2007). doi: 10.1002/adma.200700134
- [5] M.-G. Kang, H. J. Park, S. H. Ahn, and L. J. Guo, Transparent Cu nanowire mesh electrode on flexible substrates fabricated by transfer printing and its application in organic solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 94, 1179–1184 (2010). doi: 10.1016/j.solmat.2010.02.039
- [6] B. Schumm, F. M. Wisser, G. Mondin, F. Hippauf, J. Fritsch, J. Grothe, and S. Kaskel, Semi-transparent silver electrodes for flexible electronic devices prepared by nanoimprint lithography, J. Mater. Chem. C 1, 638–645 (2013). doi: 10.1039/C2TC00247G
- [7] Q. Chen, G. Hubbard, P. A. Shields, C. Liu, D. W. E. Allsopp, W. N. Wang, and S. Abbott, Broadband moth-eye antireflection coatings fabricated by low-cost nanoimprinting, Appl. Phys. Lett. 94, 263118 (2009). doi: 10.1063/1.3171930
- [8] K. Kobayashi, S. Kubo, H. Hiroshima, S. Matsui, and M. Nakagawa, Fluorescent microscopy proving resin adhesion to a fluorinated mold surface suppressed by pentafluoropropane in step-and-repeat ultraviolet nanoimprinting, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 06GK02 (2011). doi: 10.1143/JJAP.50.06GK02
- [9] M. Okada, M. Iwasa, K. Nakamatsu, K. Kanda, Y. Haruyama, and S. Matsui,

Nanoimprinting using release-agent-coated resins, Microelec. Eng. 86, 673–675 (2009). doi: 10.1016/j.mee.2009.01.002

- [10] B.-G. Kim, E. J. Jeong, K. H. Kwon, Y.-E. Yoo, D.-S. Choi, and J. Kim, Controlling mold releasing propensity-the role of surface energy and a multiple chain transfer agent, ACS Appl. Mater. Interfaces 4, 3465–3470 (2012). doi: 10.1021/am3005303
- [11] S. Kubo and M. Nakagawa, Growth behavior of an adsorbed monolayer from a benzophenone-containing trimethoxysilane derivative on a fused silica surface for nanoimprint molds by chemical vapor surface modification, Jpn. J. Appl. Phys. 49, 06GL03 (2010). doi: 10.1143/JJAP.49.06GL03
- [12] A. Kohno, N. Sakai, S. Matsui, and M. Nakagawa, Enhanced durability of antisticking layers by recoating a silica surface with fluorinated alkylsilane derivatives by chemical vapor surface modification, Jpn. J. Appl. Phys. 49, 06GL12 (2010). doi: 10.1143/JJAP.49.06GL12
- [13] S. Iyoshi, M. Okada, T. Katase, K. Tone, K. Kobayashi, S. Kaneko, Y. Haruyama, M. Nakagawa, H. Hiroshima, and S. Matsui, Study of demolding characteristics in step-and-repeat ultraviolet nanoimprinting, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 06GJ04 (2013). doi: 10.7567/JJAP.52.06GJ04
- [14] C. M. Yun, S. Kudo, K. Nagase, S. Kubo, and M. Nakagawa, Silica/ultraviolet-cured resin nanocomposites for replica molds in ultraviolet nanoimprinting, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 06FJ04 (2012). doi: 10.1143/JJAP.51.06FJ04
- [15] S. Kaneko, K. Kobayashi, Y. Tsukidate, H. Hiroshima, S. Matsui, and M. Nakagawa, Morphological changes in ultraviolet-nanoimprinted resin patterns caused by ultraviolet-curable resins absorbing pentafluoropropane, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 06FJ05 (2012). doi: 10.1143/JJAP.51.06FJ05
- [16] T. Eguchi, T. Okuda, T. Matsushima, A. Kataoka, A. Harasawa, K. Akiyama, T. Kinoshita, Y. Hasegawa, M. Kawamori, Y. Haruyama, and S. Matsui, Element specific imaging by scanning tunneling microscopy combined with synchrotron radiation light, Appl. Phys. Lett. 89, 243119 (2006). doi: 10.1063/1.2399348

- [17] D. Yamashita, J. Taniguchi, and H. Suzuki, Lifetime evaluation of release agent for ultraviolet nanoimprint lithography, Microelectron. Eng. 97, 109–112 (2012). doi: 10.1016/j.mee.2012.01.011
- [18] M. Okada and J. Taniguchi, Error rate analysis and lifetime estimation of release coated NIL mold, in: Proceedings of 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 6A-2-3 (2013).
- [19] Z. Ye, J. Fretwell, K. Luo, S. Ha, G. Schmid, D. LaBrake, D.J. Resnick, S.V. Sreenivasan, Defect analysis for patterned media, J. Vac. Sci. Technol. B 28 (2010) C6M7-C6M11.
- [20] Y.Tada, H. Yoshida, A. Miyauchi: "Analysis on Deterioration Mechanism of Release Layer in Nanoimprint Process" J.Vac.Sci.Technol.B 545-548, (2007).
- [21] G.-Y. Jung, Z. Li, W. Wu, Y. Chen, D. L. Olynick, S.-Y. Wang, W. M. Tong, and R. S. Williams, Vapor-phase self-assembled monolayer for improved mold release in nanoimprint lithography, Langmuir 21, 1158–1161 (2005). doi: 10.1021/la0476938
- [22] S. Park, H. Schift, C. Padeste, B. Schnyder, R. Kotz, J. Gobrecht, Anti-adhesive layers on nickel stamps for nanoimprint lithography, Microelectronic Engineering, 73-74, (2004), 196-201.
- [23] M.Okada, Y.Haruyama, K.Kanda, S.Matsui: "Suitability of thin PDMS as an antisticking layer for UV nanoimprinting" J.Vac.Sci.Technol.B 29.
   06FC09-1-06FC09-5 (2011).

## **Figure Captions**

Fig. 1. Influence of the imprint times on the contact angles and the number of defects for Optool DSX and F13.

Fig. 2. Diagram of forces generated during mold release from the UV-curable resin.

Fig. 3. Chemical structural formulas of (a) Optool DSX and (b) F13.

Fig. 4. Friction force model of releasing procedure.

Fig. 5. Adhesive force model between the diamond probe and release agents of releasing procedure.

Fig. 6. Friction coefficients between the diamond probe and release agents determined by scratch test: (a) Optool DSX and (b) F13.

Fig. 7. Mean maximum friction coefficients of release agents.

Fig. 8. Example of calculation method for adhesive force between the diamond probe and release agents.

Fig. 9. Mean maximum adhesive force of release agents.

Table 1 Evaluations conducted

Table 2 Points understood from these evaluation methods



Fig.1



Fig.2

# Optool DSX $O-CH_3$ R{CF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>-O $-CH_3$ O-CH<sub>3</sub>

$$C_8H_4CI_3F_{13}Si, F13$$
 CI  
 $F_3C+CF_2+CH_2-CH_2-Si-CI$   
CI

Fig.3



Fig.4



Fig.5



Fig.6



Fi.g.7



Fig. 8



Fig.9

	Patternless	Pattern	Scale	Evaluation
Contact angle	0	0	Macro	Transition of contact angle
Number of defects	×	0	Micro	Statistic of number of defects
Adhesion force	0	O(>10 µm)	Micro	Tendency of adhesion
Friction force	0	⊖(>10 µm)	Micro	Tendency of sliding

Table 1 Evaluations conducted

		Evaluation	
Number of defects	Contact angle	Observing the degradation of the release agents on	
		the macro- and microscales, allows an estimation of	
		their lifespans.	
	Adhesive force	Adhesive force increases suddenly when the release	
		agents start to degrade. Occurrence of defects can be	
		predicted with clockwork precision on the microscale.	
	Friction force	Friction force increases gradually when the release	
		agents start to degrade. Occurrence of defects can be	
		predicted with clockwork precision on the microscale.	

## Table 2 Points understood from these evaluation methods

## Defect analysis and lifetime evaluation of a release-coated nanoimprint mold

Masanori Okada, Daisuke Yamashita, Noriyuki Unno, Jun Taniguchi\*

Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku,

Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

\*Electronic mail: junt@te.noda.tus.ac.jp

Telephone: +81-3-5876-1440

Abstract

Nanoimprint lithography (NIL) is very useful technique for the fabrication of nanopatterns. In ultraviolet NIL, a release coating on the mold surface prevents the adhesion of the replicating resin. However, this release coating gradually deteriorates as the number of repetitions of NIL transfer increases. It is therefore important to evaluate the lifetime of the release agent. Measurements of the contact angle and release force are normally used in lifetime evaluation; however, these values do not clearly characterize the lifetime behavior because they tend to approach saturation as the number of repetitions increases. We introduce the error rate as a new means of evaluating the lifetime of release coatings. The error rate is derived by statistical treatment of transferred dots patterns. We found that mixing of various types of release agent is effective in reducing the error rate and, therefore, in increasing the lifetime of the NIL mold.

Keywords: Nanoimprint lithography, Error rate, Contact angle, Release agent, Mold lifetime

### 1. Introduction

Ultraviolet nanoimprint lithography (UV-NIL) is a very useful [1, 2] technique for manufacturing nanoscale patterns such as antireflection films [3] and bit-patterned media [4]. However, during mass production, polymer adheres to the mold and errors occur in transferred patterns, even if the mold is coated with a release agent. Although adhering resin can be removed by a cleaning process, errors due to adhering resin are repeated, causing defects. To prevent adhesion of the resin to the mold, it is necessary to form a low-adhesion layer between the mold and the resin [5]. There are several techniques for forming release layers on molds for reducing adhesion [6-10]. In this study, we used a self-assembled monolayer formed by an organic thin film. However, the release coating on mold deteriorated as the number of repetitions of NIL transfer increased [11-17]. It is therefore important to evaluate the lifetime of the release agent. Lifetime is usually evaluated by measuring the release force and the contact angle [18][19]. However, these properties do not clearly characterize the deterioration behavior of the release agent, because they tend to reach saturation as the number of NIL transfers increases and, in this situation, it is difficult to identify a threshold value for the contact angle [20]. Therefore, to characterize the deterioration of a release-coated mold quantitatively, we introduced the error rate as a new assessment value. This error rate is acquired by statistical analysis of transferred replica dots patterns. The acceptable error rate is defined at being less than 0.0001%. This value is the same as the acceptable error rate for mass production of patterned media [21]. Here, we describe our evaluations of the lifetime of a release layer by measuring the contact angle and the error rate in a continually repeated imprint transfer.

#### 2. Experimental apparatus and procedure

Silicon molds patterned with holes 230 nm in diameter and 230 nm deep (Scivax Co., Ltd., Kawasaki) were ultrasonically cleaned in acetone and ethanol successively for 15 min each; they were then subjected to cleaning with ozone for 1 h. The cleaned molds were treated with fluorinated silane coupling agents. In this study, we used **OPTOOL** DSX (Daikin Industries. Osaka). trichloro Ltd.. (3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-tridecafluorooctyl) silane (C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si; Sigma-Aldrich Japan Co., Tokyo), or mixtures of OPTOOL DSX and C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si. The concentration of OPTOOL DSX and of C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si was 0.1 wt%. In the case of the mixed OPTOOL DSX and C8H4Cl3F13Si, the concentration of OPTOOL DSX was 0.1 wt% or 1 wt% and that of C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si was 0.1%. The chemical structures of OPTOOL DSX and  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$  are shown in Figs. 1(a) and 1(b), respectively.

The coating conditions were as follows: dipping time, 24 h; post-rinsing bake temperature, 120 °C; bake time, 5 min. The UV-curable resin that we used was PAK-01 (Toyo Gosei, Co., Ltd., Tokyo). The mold treated with the release agent was used in a repetitive UV-NIL process. Because the silicon mold is opaque to UV radiation, the film was exposed to UV light through a polyester film to harden the UV-curable resin. The transfer force in the UV-NIL process was 20 N and the UV dose was 200 mJ/cm<sup>2</sup>. The experimental process used in this study is illustrated in Fig. 2. The contact angle of the release-coated Si mold was measured at constant intervals by using contact angle-measurement equipment (Drop master-701, Kyowa Interface Science Co., Ltd, Niiza City). The transferred dots patterns were also examined at constant intervals by means of scanning electron microscopy (SEM). The error rate was calculated from the population proportion. In this study, we measured more than 100,000 replicated dots on the UV-curable resin, and this measurement gave a 95% confidence interval. The

method used to measure the number of errors is shown in Fig. 3. To ensure that errors in the replicated pattern were easily identifiable, we choose a mold with a hole pattern. The measurement method was as follows. First, an SEM micrograph at a magnification of 4000× was obtained. Then, each error, such as that shown by the red circle in Fig. 3, was counted. The SEM field was then moved to another field at a given distance, a further SEM micrograph was taken, and the errors were counted as before. We measured 30 fields of replicated dots patterns and counted the total number of errors. These 30 fields of replicated dots pattern included more than 100,000 dots.

Statistical analysis of the error rate was performed by using the following expression:

$$\frac{m}{N} - 1.96\sqrt{\frac{\frac{m}{N}\left(1 - \frac{m}{N}\right)}{N}} \le p \le \frac{m}{N} + 1.96\sqrt{\frac{\frac{m}{N}\left(1 - \frac{m}{N}\right)}{N}}$$

where, *m* is the number of errors, *N* is number of samples (in this case, 114,570), and *p* is the error rate. The resulting error rate is expressed as a 95% confidence interval [22].

## 3. Results and discussion

The contact angle of the mold surface and the number of errors in the imprinted pattern were measured at constant intervals while a repetitive UV-NIL process was carried out. For each error measurement, more than 100,000 dots were examined by SEM, and the total number of errors in the pattern was determined. A typical transfer error is shown by the red circle in Fig. 3. We then calculated error ratio by statistical treatment as described above. Figure 4 shows the relationship between number of repeated imprints, the contact angle, and the error rate for molds coated with OPTOOL DSX and with  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ . The contact angles decreased as the number of repetitions of NIL increased for both release agents. The rate of deterioration of the OPTOOL DSX-coated molds was faster than that of the  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ -coated molds. Furthermore,

after about 400 repetitions of the NIL process, the OPTOOL DSX-treated surface showed adhesion to the UV-curable resin. Therefore, the lifetime of OPTOOL DSX is shorter than that of  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ . However, the error rate for OPTOOL DSX-coated surfaces was less than that for  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ -coated surfaces. OPTOOL DSX has a low friction coefficient and a low sliding force [23], which might contribute to the low error rate. If we consider the release motion of UV-NIL, as shown in Figure 5, friction between the mold and cured resin occurs mainly on the side walls of the mold. Because OPTOOL DSX has a low frictional coefficient, we would expect this release agent to suppress the generation of errors. However, when OPTOOL DSX was used on its own, the coated mold had a short lifetime. To overcome this problem, we found that mixing OPTOOL DSX with  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$  improved the lifetime of the mold and resulted in a lower overall error rate.

Fig. 6 shows the relationship between number of repetitions of the NIL process, the contact angle, and the error rate for the mixture of release agents. The contact-angle behavior of the molds was almost the same, but they showed different error rates. By using the error rate and defining a target error rate (in this case, 0.0001%), the lifetime of release-coated NIL mold can be determined from the relationship between the number of repetitions of the NIL process and the error rate. In Fig. 6, the lifetime of a mixed release agent consisting of 0.1% OPTOOL DSX and 0.1% C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si was around 500 repetitions, although the contact angle was high. On the other hand, the lifetime of a mixed release agent consisting of 1% OPTOOL DSX and 0.1% C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si was more 1400 repetitions, although the contact angle was almost the same as that observed with 0.1% OPTOOL DSX. Therefore, by using the error rate, the lifetime of a release coating on a mold surface can be assessed quantitatively. Furthermore, mixing of different types of release agent is effective in increasing the lifetime of the mold, and the optimal concentration of OPTOOL DSX is 1%.

Fig. 7(a) shows result of the 1400th transfer using a patterned Si mold coated with a mixture of 0.1% OPTOOL DSX and 0.1%  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ ; Fig. 7(b) shows the

corresponding results for a mold coated with a mixture of 1% OPTOOL DSX and 0.1%  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ . Transfer errors are apparent in the former case, but not in the latter.

## 4. CONCLUSIONS

Repetitive UV-NIL processes using hole-patterned silicon mold coated with various release agents were carried out, and the contact angles of the mold surfaces and the error rates in the replicated patterns were examined. We showed that the lifetime of the release-coated mold can be assessed quantitatively by introducing the error rate and defining a target error rate. We found that OPTOOL DSX is effective in realizing a low error rate. Furthermore, a mixture of two types of release agent is effective in suppressing both the adhesion of UV-curable resin (the effect of C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si) and producing a low error rate (the effect of OPTOOL DSX). A mixture of 1% OPTOOL DSX and 0.1% C<sub>8</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>13</sub>Si 0.1% permitted 1400 cycles of transfer in the UV-NIL process to be made without a significant number of errors.

In this study, we selected a replicated pattern consisting of dot pillars, because this pattern facilitates the observation of defects. However, other patterns, such as lines and spaces or mixed line-and-dot patterns, could be evaluated in the same way. In the future, we intend to study the error rates and lifetimes for various combinations of mold patterns and release agents. The error-rate evaluation method would also be an effective technique for use in designing release agents for various mold materials such as quartz or nickel.

## ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011).

## References

 Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, P.J. Renstrom, Nanoimprint lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 14 (1996) 4129-4133.

[2]. J. Haisma, M. Verheijen, K. van den Heuvel, J. van den Berg, Moldassisted nanolithography: A process for reliable pattern replication, J. Vac. Technol. B 14 (1996) 4124-4128.

[3]. J. Taniguchi, Y. Kamiya, N. Unno, Fabrication of Anti-reflection Structure using Photo-curable Polymer, J.Photopolym. Sci. Technol. 24 (2011) 105-110.

[4]. Q. Dong, G. Li, C.-L Ho, M. Faisal, C.-W Leumg, P.W-T Pong, K. Liu, B.-Z Tang,

I. Manners, W.-Y Wong, A Polyferroplatinyne Precursor for the Rapid Fabrication of

L1<sub>0</sub>-F<sub>e</sub>Pt-type Bit Patterned Media by Nanoimprint Lithography, Adv. Mater. 24 (2012) 1034-1040

[5]. L.J Guo, Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements, Adv. Mater. 19 (2007) 495-513.

[6]. G.-Y. Jung, Z. Li, W. Wu, Y. Chen, D.L. Olynick, S.-Y. Wang, W.M. Tong, R.S. Williams, Vapor-Phase Self-Assembled Monolayer for Improved Mold Release in Nanoimprint Lithography, Langmuir. 21 (2005) 1158-1161.

[7]. H. Sun, J. Liu, P. Gu, D. Chen, Anti-sticking treatment for a nanoimprint stamp, Appl. Surf. Sci. 254 (2008) 2955-2959.

[8]. S. Garidel, M. Zelsmann, N. Chaix, P. Voisin, J. Boussey, A. Beaurain, B. Pelissier, Improved release strategy for UV nanoimprint lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 25 (2007) 2430-2434.

[9]. M. Keil, M. Beck, G. Frennesson, E. Theander, E. Bolmsjö, L. Montelius, B. Heidari, Process development and characterization of antisticking layers on nickel-based stamps designed for nanoimprint lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 22 (2004) 3283-3287.

[10]. S. Park, H. Schift, C. Padeste, B. Schnyder, R. Ktöz, J. Gobrecht, Anti-adhesive layers on nickel stamps for nanoimprint lithography, Microelectron. Eng. 73 (2004)

196-201.

[11]. Y. Tada, H. Yoshida, A. Miyauchi, Analysis on Deterioration Mechanism of Release Layer in Nanoimprint Process, J. Photopolym. Sci. Technol. 20 (2007) 545-548.
[12]. F.A. Houle, C.T. Rettner, D.C. Miller, R. Sooriyakumaran, Antiadhesion considerations for UV nanoimprint lithography, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 213103.

[13]. F.A. Houle, E. Guyer, D.C. Miller, R. Dauskardt, Adhesion between template materials and UV-cured nanoimprint resists, J. Vac. Sci. Technol. B 25 (2007) 1179-1185.

[14]. J. Tallal, M. Gordon, K. Berton, A.L. Charley, D. Peyrade, AFM characterization of anti-sticking layers used in nanoimprint, Microelectron. Eng. 83 (2006) 851-854.

[15]. W. Zhou, J. Zhang, Y. Liu, X. Li, X. Niu, Z. Song, G. Min, Y.Z. W, L. Shi, S. Feng, Characterization of anti-adhesive self-assembled monolayer for nanoimprint lithography, Appl. Surf. Sci. 255 (2008) 2885-2889.

[16]. H. Schmitt, M. Zeidler, M. Rommel, A.J. Bauer, H. Ryssel, Custom-specific UV nanoimprint templates and life-time of antisticking layers, Microelectron. Eng. 85 (2008) 897-901.

[17]. D. Truffier-Boutry, M. Zelsmann, J. De Girolamo, J. Boussey, C. Lombard, B. Pépin-Donat, Chemical degradation of fluorinated antisticking treatments in UV nanoimprint lithography, Appl. Phys. Lett. 94 (2009) 044110.

[18]. A. B. D. Cassie, S. Baxter, WETTABILITY OF POROUS SURFACES, Trans.Faraday Soc. 40 (1944) 546-551.

[19]. L. Gao, T.J. McCarthy, How Wenzel and Cassie Were Wrong, Langmuir 23 (2007) 3762-3765.

[20]. D. Yamashita, J. Taniguchi, H. Suzuki, Lifetime evaluation of release agent for ultraviolet nanoimprint lithography, Microelectron. Eng. 97 (2012) 109-112.

[21]. Z. Ye, J. Fretwell, K. Luo, S. Ha, G. Schmid, D. LaBrake, D.J. Resnick, S.V. Sreenivasan, Defect analysis for patterned media, J. Vac. Sci. Technol. B 28 (2010) C6M7-C6M11.

[22]. R.M. Bethea, B.S. Duran, T.L. Boullion, STATISTICAL METHODS for ENGINEERS and SCIENTISTS SECOND EDITION REVISED AND EXPANDED,MARCEL DEKKER inc, New York and Basel, 6 STATISTICAL INFERENCE: ESTIMATION 6.8 ESTIMATION OF THE MEAN, pp. 140-142.

[23]. DAIKIN INDUSTRIES, LTD, OPTOOL<sup>™</sup> Fluoro Coatings Chemicals Division Daikin Industries, Ltd, (http://www.daikin.com/chm/products/coating\_07.html).

## **Figure Captions**

Fig. 1. Chemical structures of release agents OPTOOL DSX (a) and  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$  (b).

Fig. 2. Experiment process for release coating, UV-NIL, and mold evaluation

Fig. 3. The method for measuring the error rate. In this SEM image, 67 dots x 57 dots =

3819 dots. Different 30 fields of SEM images were observed. 3819 dots x 30 fields = 114579 dots.

Fig. 4. The relationship between the number of repetitions of the imprint process and the contact angles and error rates for OPTOOL DSX and  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ 

Fig. 5. Release motion in UV-NIL

Fig. 6. The relationship between the number of repetitions of the imprint process and the contact angles and error rates for the mixed release agents

Fig. 7. (a) Transferred result of the 1400th repetition of NIL using a patterned Si mold coated with a mixture of 0.1% OPTOOL DSX and 0.1%  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ . (b) Transferred result of the 1400th repetition of NIL using a patterned Si mold coated with a mixture of 1% OPTOOL DSX and 0.1%  $C_8H_4Cl_3F_{13}Si$ .





Fig.1

1 Hole pattern Si mold 2 Dipping in release agent 3 Rinse and Bake 4 UV curable resin

Polyester film PAK -01

o G



Error rate



Acetone, Ethanol : 15min Ozone : 1h

Dipping time : 24h

Bake: 120°C; 5min

Fig.2



Fig.3



Fig.4



Fig.5



Fig.6



Fig.7
\*11 Fabrication of nanostep for total internal reflection fluorescence microscopy to calibrate in water, Noriyuki Unno, Asao Maeda, Shin-ichi Satake, Takahiro Tsuji, Jun Taniguchi, Microelectron. Eng. 133, pp 98-103, 2015 (査読有)

# Fabrication of nanostep for total internal reflection fluorescense microscopy to calibrate

## in water

Noriyuki Unno<sup>a,b\*</sup>, Asao Maeda<sup>a</sup>, Shin-ichi Satake<sup>a</sup>, Takahiro Tsuji<sup>a</sup>, Jun Taniguchi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan
<sup>b</sup> Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083, Japan

\*e-mail: n.unno@rs.tus.ac.jp Telephone: +81-3-5876-1717 Abstract

Total internal reflection fluorescence microscopy (TIRFM) is a powerful tool for analyzing x-y-z (3D) fluid flow in nano- or micro-channel. To visualize the 3D fluid flow via TIRFM, intensity calibration of a fluorescent particle is required by using calibration plates, carrying a set of nano-steps of different heights. In an attempt to fabricate a calibration plate to be used in water ambient we employed a polymer with a refractive index close to that of water. In this study, we have developed a lift-off technique for making polymer resin pattern on a glass substrate by employing the use of polyvinyl alcohol film and metal mask previously fabricated by nano transfer printing (nTP). In summary, we have succeeded in the fabrication of nanosteps made of a polymer resin and used it for the calibration of the fluorescence intensity in water.

Keywords: Nanotransfer printing, Liftoff technique, Polyvinyl alcohol, TIRF, Index matching

## 1. Introduction

Micro- and nano-scale fluid flow has received lots of attention because of its well sought out application in lab on a chip, such as in high-precision sensor, high-efficiency chemical reactor, and fast drug discovery, etc. [1-3]. A detailed understanding of the fluid flow in the micro- and nano-scale channel is a key factor to improve the precision and efficiency of lab on a chip. Therefore, various analytical methods for the micro- and nano-scale fluid flow have been investigated in labs around the world. Particle image velocimetry (PIV) [4] and particle tracking velocimetry (PTV) [5] are commonly employed for this purpose. In the cases of PIV and PTV, the fluid flow is analyzed by observing spherical particles suspended within a fluid, at regular time intervals. Recently, the observation methods for x-y-z (3D) fluid flow are reported like the ones for the x-y (2D) fluid flow have been. For instance, stereoscopic PIV [6] and total internal reflection fluorescence microscopy (TIRFM) with multilayer technique and index matching [7] are powerful tools to analyze the micro- and nano-scale fluid flow. However, the resolution of stereoscopic PIV is approximately 10 µm that makes it difficult to measure the flow that is very close to the channel wall. On the other hand, multilayer PIV with TIRFM has sub-micron scale resolution. To visualize the 3D fluid flow via TIRFM, the intensity calibration of a fluorescent particle would be required by using a calibration plate bearing nano-steps with different heights. In a case like this, the refractive indices of the nano-steps and of the fluid must be close to each other. Therefore, a combination of magnesium fluoride (MgF<sub>2</sub>) nano-step on a glass substrate and 1-propanol, is generally used because the thickness of MgF<sub>2</sub> layer is easy to control to a

very precise degree via vacuum deposition method. However, water, although highly desirable for the task cannot be used for the measurement with MgF<sub>2</sub> layer because of the difference of their refractive indices. As a result, the only available fluid for the multilayer TIRF method was 1-propanol.

In an attempt to fabricate the calibration plates for use in water, and to measure the water flow, we employed a material MEXFLON, the refractive index of which is nearly equal to that of water [8, 9]. The conventional calibration plates use nano-steps made of  $MgF_{2}$ , which is an inorganic material, thus, the normal lift-off process with an organic solvent is possible. In contrast, the key point of our technique is using the nano-steps with a polymer, MEXFLON, whose refractive index is close to water. However, the durability of MEXFLON for an organic solvent is not cleared because MEXFLON is expected for using in only water. Although the required pattern width for the calibration plate is micro-scale, the edge shape of the pattern is very important. For instance, we examined vacuum deposition method with a stencil mask. Figure 1 shows the cross-section of the obtained MEXFLON pattern measured by a profilometer (Alpha-Step IQ, KLA-Tencor Co.). However, this sample was impossible to be used as the calibration plate because the width of the slope was over 30 µm, which is wider than a field of view of our TIRFM system of 30  $\mu$ m  $\times$  30  $\mu$ m, and we could not distinguish the pattern edge from the glass surface. Consequently, the lift-off process with water is needed. In this study, therefore, we used polyvinyl alcohol (PVA) for the lift-off process [10, 11] because PVA is soluble in water whereas other organic solvents can cause damage to a polymer resin, and definitely not recommendable. As shown in the references,

some PVA lift-off techniques have already been reported. However, the technique of ref. 10 requires an additional etching process using CHF<sub>3</sub> to obtain a reverse tapered shape, which is helpful to carry out the lift-off process easily. On the other hand, an UV curable resin is used for patterning in ref. 11. In this case, the PVA layer was removed by water. If an oxygen plasma was used for etching the PVA layer, the UV curable resin layer was also etched. As a result, the control of the etching time will be difficult. In comparison with these techniques, we have developed a new technique, which has advantage in the easier process to produce the reverse tapered shape. In this study, we used a combination of PVA film, and metal mask fabricated by nano transfer printing (nTP) with a metal oxide release layer [12]. In summary, we have succeeded in the fabrication of the nano-steps made of MEXFLON and it was able to calibrate the fluorescence intensity in water. We believe that our method will be quite useful in the fabrication of a polymer resin pattern.

## 2. Experimental apparatus and procedure

Figure 2 shows a schematic view of our TIRF measurement system. We used a continuous-wave green laser ( $\lambda$ =561 nm, 85-YCA-025-040, CVI Melles Griot Co.) as an evanescent light source. The TIRFM system, that carried the incident light, comprised NIKON Eclipse Ti-E with a 100x objective lens (NA=1.49, CFI Apo TIRF 100x, Nikon Instruments Inc.). In this system, the green laser source was filtered by a barrier filter so that only the fluorescence could be captured by the EM-CCD camera (Andor, iXon3 860). The

resolution of EM-CCD pixel was 24 µm. For the fluorescent particles R200 (Thermo Scientific Co.) with diameters of 200 nm were used. This particle was diluted by 0.01 % with deionized water. In addition, we added 10 mM NaCl (purity 99.5 %, Showa Chemical Co.) to the solution in order to make solid contact the particle with the glass plate [7]. For the fabrication of the nano-steps a material MEXFLON E-PDx (UNIMATEC Co. LTD.) was used, which has its refractive index about same as that of water. The refractive indices of water and MEXFLON are 1.333 and 1.33, respectively. A glass slide (Micro cover glass No. 1, MATSUNAMI Co.) was used as a substrate. Figure 3 shows a lift-off process by using a metal mask and PVA. At first, the glass substrate was cleaned for 15 minutes in an ultrasonic bath with deionized water for 15 min (Figure 3(a)). After going through a drying process, the substrate was spin coated with PVA (PVA-205, KURARAY Co.) at 5000 rpm, that after a 120 °C prebake resulted into approximately a 500-nm-thick film of PVA (Figure 3(b)). At this point, PVA was diluted by 11% with deionized water.

Second, in order to form a metal mask on the PVA film, nano transfer printing (nTP) was carried out by using a metal oxide release layer [12]. In this case, a replica mold made of PAK-01 (TOYO GOSEI Co.) was prepared from a Si master mold. The replica mold like its master mold has 40  $\mu$ m of width line/space (LS) pattern with a height of 2.2  $\mu$ m. To improve the release properties of the PAK-01 replica pattern it was coated with a release agent chromium oxide (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) layer using a resistively heated vacuum deposition system (VPC-260F, ULVAC KIKO Inc.). To achieve this, approximately 30 nm thick chromium layer was deposited using a vacuum-evaporation system then ventilated to oxidize the

chromium surface to  $Cr_2O_3$ . After that, a gold layer with a thickness of 40 nm was deposited using the same equipment. Subsequently, using the replica mold coated with the gold layer, nTP was done onto the PVA film at 120 °C for 5 min (Figure 3(c)).

Third, the PVA film was then dry-etched by oxygen using an inductively-coupled plasma equipment (EIS-700, ELIONIX Co.) (Figure 3(d)). The sample bias was 50 W or 100 W, and the RF power was constant at 300 W. The oxygen gas flow was 50 SCCM. After the completion of the etching, MEXFLON layer was deposited onto the sample using the same vacuum deposition equipment (Figure 3(e)); and then the PVA film was removed by deionized water (Figure 3(f)). At this point, the MEXFLON layer did not suffer from any damaged from water. The height of the obtained MEXFLON pattern was then examined by an atomic force microscope (AFM, SPM-9600, SHIMADZU Co.).

For the purpose of comparison, we also prepared an MgF<sub>2</sub> calibration plate by using the vacuum deposition method and electron-beam lithography. In this case, ZEP520A and ZDMAC (Zeon Co.) were used as electron-beam resists and a dedicated solvent for lift-off. The MgF<sub>2</sub> was supplied by Koujundo Kagaku Co., and its purity was 99 %. In this case, 1-propanol (SHOWA Co., purity 99.5 %) with the same fluorescent particle was used as a fluid.

## 3. Results and discussion

At the beginning, we examined the etching characteristics of the PVA film. Figure 4(a-d) show the cross-sectional images tilted by 75° of the samples after etching with the

power of 100 W. In this case, we could not obtain the reverse tapered shape. Figure 5(a-d) show the cross-sectional images after etching with the power of 50 W. In contrast, the reverse tapered shape was seen at the edge of the PVA layer since the chemical action between the oxygen plasma with the power of 50 W and the PVA layer is the main role of etching, compared to that with the power of 100 W. Furthermore, the surface of the gold mask was smooth even after the etching for 75 s. This result shows that the metal mask was hard to etch by the oxygen plasma with the power of 50 W. Next, using the profilometer, we measured the height from the etched surface to the top of the gold mask by varying the etching time with the power of 50 W, as shown in figure 6. The measured etching rate for the PVA layer was approximately 23 nm/s and the etching was stopped when the glass slide substrate was reached. Therefore, we can select the etching time widely and our process has high tolerance for etching time because the etching is automatically stopped at the glass slide substrate. As a result, we decided that the bias power and etching time in this study to be 50 W and 60 s, respectively.

Second, we measured the obtained MEXFLON patterns by AFM after the lift-off process with water, as shown in figure 7. The width of the slope obtained by our technique was less than 1  $\mu$ m, and it was easy to distinguish the edge from the glass substrate in the TIRFM system view. Figure 8 shows the optical images of MEXFLON pattern: (a) without deionized water, (b) with partly covered by deionized water, and (c) completely covered by deionized water. In this case, the images were recorded by the standard optical microscope with a halogen lamp. When the deionized water covered the MEXFLON pattern, the

MEXFLON pattern was invisible because these refractive indices were equal to each other.

Next, we evaluated the applicability of our incident-light TIRFM system with the multilayer method by using the calibration plates made of MgF<sub>2</sub> layer and 1-propanol, because the previous study used the TIRFM system with a prism [7]. Figure 9 shows the calculation method for the intensity of fluorescence from a captured TIRF image. Although it was difficult to find the edge when the MgF<sub>2</sub> pattern was covered by 1-propanol, but we did find the edge prior to the use of 1-propanol. As it can be seen in figure 9, the edge of the MgF<sub>2</sub> pattern was not distinguishable because of index matching. By using the captured image, we searched for the brighter intensity pixel above a certain threshold value. We defined two threshold values: one was for on the glass substrate, and the other was for on the pattern. Subsequently, the averaged intensity, which was obtained by using an area defined by 3x3 pixels with a focus on the threshold pixel, was calculated at each other points. Then, the decay ratio of fluorescence intensities was calculated by dividing the sum of the averaged intensities on the pattern by that on the glass substrate. We prepared patterns with various thicknesses, and calculated decay ratios each other

Figure 10(a-c) shows the TIRF images close to the edge of the MgF<sub>2</sub> pattern with the various thicknesses. Although the fluorescence intensities on the glass substrate were almost equal to each other, that on the MgF<sub>2</sub> layer had decreased with the increasing thickness of the MgF<sub>2</sub> layer. Figure 11 shows the relationships between the thickness of the MgF<sub>2</sub> layer and the decay ratio. It is known that evanescent waves have an intensity of fluorescence I(z) that decrease exponentially with distance normal to the interface z [7]:

$$I(z) = I_0 \exp\left\{-\frac{z}{z_p}\right\}.$$
(1)

Here,  $I_0$  is the intensity at the interface, and  $z_p$  is the penetration depth which is calculated by using an angle incidence and refractive indices of MgF<sub>2</sub> and 1-propanol. In this study,  $z_p$  was controlled at 250 nm. As a result, the obtained data was brighter than the expected value, especially in the thicker area. This result denoted the same tendency of Ref. 7.

Ultimately, we examined the calibration plate, made of MEXFLON for our incident-light TIRFM system with the multilayer method. Figure 12(a-c) shows the TIRF images of near the MEXFLON pattern on the glass substrate's varying thicknesses. The thicker MEXFLON film tended to be of a lower intensity of fluorescence. Similarly, we measured the decay ratios of the fluorescent intensity. Figure 13 shows the relationships between the thickness of the MEXFLON layer and the decay ratio. In the case of MEXFLON, similarly, the value of a curve-fit of the obtained data was greater than that of the equation (1). However, it becomes clear that fluorescent particles were visible through the MEXFLON layer. As a result, the fabricated nano-step made of MEXFLON is useful for the calibration of TIRFM. Consequently, we have succeeded in a lift-off process with water by using the PVA film and the metal mask fabricated by nTP process. As a result, we were able to obtain the calibration plate for multilayer TIRFM, which is able to use water as a working fluid. Previously, the only way to calibrate the fluorescence intensity in water was using a precise stage, such a piezo actuator [13]. In this case, however, it is very difficult to obtain the zero point and move a tip in a perpendicular direction to the substrate. In contrast, our calibration plate eliminates the troublesome setting-up of the piezo stage, resulting in a low cost method. We believe that our technique helps to expand the applicable range of multilayer TIRFM.

## 4. Conclusions

We have developed at lift-off technique for a polymer resin by using a combination of PVA film and metal mask, which is fabricated by nTP. In this method, we have succeeded in the nTP process with the gold pattern onto a PVA film using the Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> release layer, and that shows there is no need to use an organic solvent for the lift-off process. Furthermore, the reverse tapered shape was obtained in the PVA layer via the metal mask fabricated with nTP. In addition, the metal mask showed high tolerance for the etching time because the PVA etching is automatically stopped at the glass slide substrate and the metal mask was not etched by oxygen plasma. As a result, the calibration plate for multilayer TIRFM with water was fabricated. We believe that our method will be possible to use for the lift-off process with various polymer resins.

## ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011) and a grant-in-aid for fellows of the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

## References

1. R. A. Vijayendran, K. M. Motsegood, D. J. Beebe, D. E. Leckband, "Evaluation of a Three-Dimensional Micromixer in a Surface-Based Biosensor", Langmuir, 19 (2003) 1824-1828.

2. S. J. Haswell, R. J. Middleton, B. O'Sullivan, V. Skelton, P. Watts, P. Styring, "The application of micro reactors to synthetic chemistry", Chem. Commun., 5 (2001) 391–398.

3. L. Y. Wu, D. Di Carlo, L. P. Lee, "Microfluidic self-assembly of tumor spheroids for anticancer drug discovery", Biomed Microdevices, 10 (2008) 197–202.

4. J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe, R. J. Adrian, "A particle image velocimetry system for microfluidics", Exp. Fluids, 25 (1998) 316-319.

5. S. Devasenathipathy, J. G. Santiago, K. Takehara, "Particle Tracking Techniques for Electrokinetic Microchannel Flows", Anal. Chem., 74 (2002) 3704-3713.

 R. Lindken, J. Westerweel, B. Wieneke, "Stereoscopic micro particle image velocimetry", Exp. Fluids, 41 (2006) 161–171.

7. H. Li, R. Sadr, M. Yoda, "Multilayer nano-particle image velocimetry", Exp. Fluids, 41 (2006) 185–194.

8. J. Kobayashi, H. Sato, K. Hayashi, H. Kamide, "Development of Geometry Measurement Technique for Complicated Flow Channel Based on Optical Visualization Image",

JAEA-TECHNOLOGY, 2008-026 (2008), Available from JAEA; URL:

http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Technology-2008-026.pdf

9. S. Someya, D. Ochi, Y. Li, K. Tominaga, K. Ishii, K. Okamoto, "Combined

two-dimensional velocity and temperature measurements using a high-speed camera and luminescent particles", Appl. Phys. B, 99 (2010) 325-332.

10. K. Nakamatsu, K. Tone, S. Matsui, "Nanoimprint and Lift-Off Process Using Poly(vinyl alcohol)", Jpn. J. Appl. Phys., 44, 11 (2005) 8186–8188.

11. S. Jung, Y. G. Choo, T. Ji, "Lift-Off Photolithographic Top-Contact OTFTs Using a Bilayer of PVA and SU8", IEEE Electron Device Lett., 33, 4, (2012) 603-605.

 N. Unno, H. Tamura, J. Taniguchi, "A technique for transferring metal nano patterns from a plastic replica mold by using a metal oxide release layer", Microelectron. Eng., 97 (2012) 72–76.

 Peter Huang, Jeffreys S. Guasto, Kenneths Breuer, "Direct measurement of slip velocities using three-dimensional total internal reflection velocimetry", J. Fluid Mech., 566 (2006) 447–464.

## **Figure Captions**

Fig. 1 Cross-section of the fabricated MEXFLON pattern using a stencil mask.

Fig. 2. Schematic view of TIRF measurement system.

Fig. 3. Line and space patterning process by using a metal mask and lift-off with water.

Fig. 4 The cross-sectional SEM images after (a)30 s, (b)45 s, (c) 60 s etching with the power of 100 W.

Fig. 5 The cross-sectional SEM images after (a)7 s, (b)45 s, (c) 60 s, (d) 75 s etching with the power of 50 W.

Fig. 6 Etching characteristics of PVA film with the oxygen plasma of 50 W.

Fig. 7 AFM images of the typical nano-steps made of MEXFLON.

Fig. 8 Optical images of MEXFLON pattern (a) without DI water, (b) with a part of deionized water and (c) fully covered by deionized water.

Fig. 9 Calculation method of the fluorescence intensity from the TIRF image.

Fig. 10 TIRF images with the calibration plates made of MgF<sub>2</sub> varying the thickness: (a) 90 nm, (b) 162 nm, (c) 236 nm.

Fig. 11 Relationships between the thickness of the MgF<sub>2</sub> layer and the decay ratio.

Fig. 12 TIRF images with the calibration plates made of MEXFLON varying the thickness:

(a) 49 nm, (b) 175 nm, (c) 231 nm.

Fig. 13 Relationships between the thickness of the MEXFLON layer and the decay ratio.



Figure 1



Figure 2











Figure 6







Figure 7



(a)



(c)





(a)

(b)



(c)

Figure 10



Figure 11



(a)

(b)



Figure 12



Figure 13

\*12 3D measurement of gold particle via evanescent digital holographic particle tracking velocimetry, Shinichi Satake, Noriyuki Unno, Shuichiro Nakata and Jun Taniguchi, PIV 2015, Santa Barbara, USA, 2015 年 9 月 14 日  $\sim$ 9 月 16 日

# 3D measurement of gold particle via evanescent digital holographic particle tracking velocimetry

### Shin-ichi Satake<sup>1</sup>, Noriyuki Unno<sup>1</sup>, Shuichiro Nakata<sup>1</sup> and Jun Taniguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, JAPAN satake@te.noda.tus.ac.jp

#### ABSTRACT

This paper reports on a new technique of 3-D measurements of gold nano particle position in water. The technique is based on a digital holography and evanescent wave. In this technique, an intensity profile is taken from a holographic image of a gold particle. In that case, to detect a highly accurate position of a gold particle, its hologram image is recorded on a nano step made of MEXFLON with a refractive index close to that of water, and the particle position is reconstructed by a digital hologram. Its nano step height was measured by a profilometer, and the height of the gold particle digitally reconstructed was found to be in good agreement with the measured value. It was proved that this method can very accurately detect the three-dimensional location of a gold particle in water.

#### INTRODUCTION

The technology which measures fluid behavior in a flow in the microchip in recent years has been developed. These are called micro – particle image velocimetry (PIV), and are performed in micro and nano orders. There exists a Nano-PIV [1] that employs total internal reflection fluorescence microscopy (TIRFM) which is a method of observing particles in the close proximity of some wall. The technique of introducing a particle in a flow field at a very close proximity of a wall makes a fluorescence particle excited in an evanescent wave illumination; and from the fluorescence picture, thus formed, it identifies the location of the particle. Evanescent wave by its very nature forms a wall in a very close neighborhood, and that causes a fluorescence particle to become luminous. However, a quenching of a fluorescence particle exists. On the other hand, total internal reflection (TIR) holography microscopy for cellular biology has been also reported [2, 3]. In addition, there exists a heterodyne holographic microscope that observes sub-micro-territories using a hologram using evanescent wave [4]. Their technique by employing gold particles made the Brownian movement observable. The optical setup in this case employed off-axis alignment, a process that is more demanding when applied on the microscope's upper part than it would be if an in-line alignment were carried out, and where the optical calibration could be a less demanding task. The authors have developed digital-holographic-particle-tracking-velocimetry (DHMPTV) in order to track microorder particles [5], and they have had many successful runs. There has also been reported a work that tracks movement of a gold particle down to 60 nm using a setup of an in-line monitoring scheme [6]. In the present research, an in-line measurement method is developed to transform a probe light into an evanescent wave in a hologram. A hologram system originally developed for the measurement of depth direction was perfected using a nano step made from the same refractive index as that of water [7] and hence by using gold as seeding particle, measuring of more depth directions using gold as a seeding particle was carried out and reported here.

#### EXPERIMENTAL SETUP AND OPTICAL SETUP

Figure 1(a) is a schematic view of the in-line hologram recording via an evanescent wave. A CW laser ( $\lambda$ = 532 nm, 23 mW) was used as a light source. A laser beam is introduced through one of the two end-faces of a cavity (both faces of which were made of polished glass plate substrate of 5mm thickness) produced a total internal reflection (TIR) condition and made an evanescent wave to develop at the observation position. In this experiment, the angle of incidence  $\theta_I = 61.7$  degree, gives a penetration depth  $Z_p = 284$  nm. This evanescent experimental system was placed on the stage of an upright microscope. And using the microscope, equipped with an oil immersion lens (CFI Apo TIRF 100x, Nikon Instruments Inc.) of NA=1.49, and a CCD camera (NX5-S2 MONO, Integrated Design Tools, Inc.), picture of a hologram image was taken.



Figure 1(a) Schematic view of the in-line hologram recording via an evanescent wave.

Figure 1 (b) is an index matching method for the TIR holographic system. The surface of the glass substrate comprises a nanostep fabricated by the same process as in ref [5]. The nano steps is made of MEXFLON E-PDx (UNIMATEC Co. LTD.), with its refractive index being the same as that of water. The heights of the step represent four values: 72, 159, 202, and 257 nm. Therefore, these steps enable the evanescent waves to penetrate without undergoing any optical deformation. Water is introduced onto the glass substrate, and a cover glass is put on the plate. The gold particles (200nm in diameter) (742066, Sigma-Aldrich Co.) are dispersed in the water. And the water is then turned into an electrolytic solution by adding NaCl to it so that gold particle can adhere to the glass and to the nano step. The amount of the water is 10  $\mu$ l and the cover glass thickness is 0.07 mm. The penetration of the evanescent wave affecting the gold particles on the glass and on the nano step caused the formations of hologram fringes that are then detected by the CCD camera through an oil immersion objectives lens.



Figure 1 (b) Index matching method for TIR holographic microscopy.

Figure 2(a) shows the photos of the upright microscope (Eclipse LV100D, Nikon Co.) and the holographic system on its stage. The CCD camera is mounted on the top of an upright microscope. The holographic system is carefully placed on the stage of the microscope. The glass substrate is placed on the holographic system. Figure 2(b) shows the photo of the expanded observation area. There, is shown the optical path in a glass substrate on the holographic system. The actual illumination used in these experiments was the evanescent waves generated by the twice TIR at the glass-water interface.



Figure 2 Photo of the holographic system ; (a) Recording system for the TIR holographic image using the upright microscope, (b) The optical path in a glass substrate.

#### **RESULTS AND DISCUSSION**

Figure 3 shows the fringe images recorded from the TIR holographic system with MEXFLON layers of thicknesses: (a) 72nm, (b) 159nm, (c) 202nm, and (d) 257nm. From each image, we can see the difference in the heights between the particles on the glass and the particles on the MEXFLON step. As the height of the nano step increases, we can notice an increase in the fringe diameter of a hologram.

Figure 4 shows reconstruction results for the recorded hologram images on the glass substrate and on the MEXFLON layer (Thickness: 257nm). The reconstruction procedure of nano particle is used for a digital reconstruction algorithm [3]. The lines indicate the plots of the brightness value in the fringe center position for every reconstructed distance. The solid line shows the distribution on the glass substrate, and the dotted line shows the distribution on the MEXFLON. The difference of the peaks is 274nm, that is in good agreement with the expected value 257nm, as measured by a profilometer (Alpha-Step IQ, KLA-Tencor Co.).



Figure 3 Fringe images recorded from the TIR holographic system with MEXFLON layer thicknesses of (a) 72 nm, (b) 159 nm, (c) 202 nm and (d) 257 nm



Figure 4 Reconstruction results for the recorded hologram images on the glass substrate and on the MEXFLON layer (Thickness: 257 nm).

Figure 5 shows the reconstructed results with the calibration plates fabricated by using the MEXFLON nano-steps. The X axis is the step height measured by a profilometer; in other words, it is the expectation value. Y axis is the averaged reconstructed distance between the particle on the nano step and the particle on the glass plate. Each symbol is made of the reconstructed value from 19 or more particles from 3 or more hologram images. The line y=x is an exact line, that is, the hologram reconstruction denotes high accuracy when the fitting curve from the symbols is coincident with the line. The fitting curve is in good agreement with the line y=x.



Figure 5 Reconstruction results with the calibration plates fabricated by using MEXFLON nano-steps.

Figure 6 shows the fringe images recorded from the TIR holographic system: (a) 0 ms, (b) 33.33 ms, (c) 66.66 ms, (d) 99.99ms. From each image, we can see the difference position in the x-y plane. Figure 7 shows reconstruction results for the recorded hologram images on the glass substrate. The reconstruction procedure of nano particle is used for a digital reconstruction algorithm. The spheres indicate the gold particle position for every reconstructed position. The vector shows the velocity between particles each step.



Figure 6 Hologram image ; (a) 0 ms, (b) 33.33 ms, (c) 66.66 ms, (d) 99.99ms (Camera rate 30 Hz, Exposure time 33.33 ms)



Figure 7 Reconstructed particle trajectory.

#### CONCULUSIONS

In this paper, three-dimensional gold particle position in water was obtained by a digital hologram and evanescent wave.

- (1) The optical system was made of an in-line setup, and gold particle positions were reconstructed.
- (2) The reconstructed position can be obtained from the fringe image of gold particle on a nano step made of MEXFLON.
- (3) The location of the reconstructed gold particle shows good agreement with the height of the nano step measured beforehand.
- (4) The gold particle trajectory could be reconstructed by a digital hologram and evanescent wave.

#### REFRENCES

[1] Li, Haifeng, Sadr, Reza and Yoda, Minami, "Multilayer nano-particle image velocimetry.", Experiments in Fluids 41 (2), 185–194 (2006). http://dx.doi.org/10.1007/s00348-006-0155-4

[2] W. M. Ash III, L. Krzewina, and M. K. Kim, "Quantitative imaging of cellular adhesion by total internal reflection holographic microscopy", Applied Optics, Vol. 48, Issue 34, pp. H144-H152 (2009). http://dx.doi.org/10.1364/AO.48.00H144

[3] A. Calabuig, M. Matrecano, M. Paturzo, and P. Ferraro, "Common-path configuration in total internal reflection digital holography microscopy", Optics Letters, Vol. 39, Issue 8, pp. 2471-2474 (2014) http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.002471

[4] M. Atlan, M. Gross, P. Desbiolles, É. Absil, G. Tessier, and M. C.-Moisan, "Heterodyne holographic microscopy of gold particles", Optics Letters, Vol. 33, Issue 5, pp. 500-502 (2008) http://dx.doi.org/10.1364/OL.33.000500

[5] S. Satake, T. Kunugi, K. Sato, T. Ito, H. Kanamori, and J. Taniguchi, "Measurements of 3D flow in Micro pipe via Micro Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry", Measurement and Science Technology, Vol. 17, pp.1647-1651(2006). http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/17/7/002

[6] A. Sato, Q. D. Pham, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, "Three-dimensional subpixel estimation in holographic position measurement of an optically trapped nanoparticle", Applied Optics, Vol. 52, Issue 1, pp. A216-A222 (2013) http://dx.doi.org/10.1364/AO.52.00A216

[7] N. Unno, A. Maeda, S. Satake, T. Tsuji, J. Taniguchi, "Fabrication of nanostep for total internal reflection fluorescence microscopy to calibrate in water", Microelectronic Engineering 133 (2015) 98–103 http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2014.12.002

## MEASUREMENTS OF VELOCITY PROFILES IN A TURBULENT PIPE FLOW: A COMPARISON OF DIGITAL HOLOGRAPHIC PTV AND UVP METHOD

S. Satake<sup>1</sup>, M. Motozawa<sup>2</sup>, T. Tuda<sup>1</sup>and T. Kunugi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Applied Electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

<sup>2</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510, Japan

<sup>3</sup> Dept. of Nuclear Eng., Kyoto University, Yoshida, Sakyo, Kyoto, 606-8501, Japan

satake@te.noda.tus.ac.jp, motozawa@rs.noda.tus.ac.jp, kunugi@nucleng.kyoto-u.ac.jp

## ABSTRACT

In this research, by using digital holographic PTV and UVP methods, we measured velocity distribution of a turbulent pipe flow with an inside diameter of 20 mm. And then we compared the two methods. Our objective here was to check the validity of the UVP method. For these tests, the Reynolds numbers were set to be 5000, 10000, and 15000. The accuracies of the two experimental methods were confirmed by comparing the results from the two methods with DNS data by Satake et al. (2000) when using the same Reynolds number. The velocity profiles obtained from the two methods were found to be in good agreement with that of the DNS data.

## 1. INTRODUCTION

The Ultrasonic Velocity Profile (hereafter, UVP) method was developed by Takeda more than 20 years ago [1]. The UVP method is a way of measuring a velocity profile along an ultrasonic beam using ultrasonic Doppler shift frequency. It is a useful method employed in the measurement of velocity profiles of non-transparent pipes such as in the pipelines or in nuclear reactors. However, in recent days, digital holographic PTV (hereafter, DHPTV) equipped with high resolution CCD camera and faster computing power have become available [2, 3]. In this research, we measured a velocity distribution using DHPTV and UVP methods in a turbulent pipe flow with an inside diameter of 20 mm; and then we compared the two methods. Our objective was to validate the UVP method. The Reynolds numbers for the tests were set to be 5000, 10000, and 15000. Furthermore, an accuracy of the method was confirmed by comparing the data from the two methods with the DNS data [4] using the same Reynolds numbers. The central region velocity of the UVP is discussed about change of Reynolds number

# 2. EXPERIMENTAL METHODS

# 2.1 Digital holographic PTV (DHPTV)

DHPTV is a technique of measuring three-dimensional velocity profile by a combination of digital holography and particle tracking velocimetry. Reconstruction of the particle positions from the fringe images in the x-y plane are done by a FFT technique employing Fresnel diffraction equation [2,3]. The FFT technique was used for the following transforms:

$$\Phi(I,J) = \int_{-\frac{NI}{2}}^{\frac{NI}{2}} \int_{-\frac{N2}{2}}^{\frac{N2}{2}} I(x,y) G(I,J) e^{-2\pi i (Ix+Jy)} dxdy$$
  
=  $\hat{I}(I,J) G(I,J)$  (1)

Here  $\Phi(I,J)$ , I(x,y),  $\hat{I}(I,J)$  are: reconstruction image in Fourier space, hologram image, and hologram image in Fourier space, respectively. G(I,J) is transform function using Fresnel approximation and includes reconstructed depth in Z-direction. Calculation of the particle locations along the direction away from light source was carried out by looking for local maximum points in the gradation image of the reconstructed particles. For example, in Fig. 1, the profiles of the particles' brightness are shown as a function of distance along the z-axis. After finishing the procedure of particle recognition the brightness pixels then defined the location of the particles. The 3-D tracking of the reconstructed particle positions was used for two frames in the time evolution. Since the pulse interval was short, the time interval of the particle tracking was sufficient for taking the velocity vector.



Figure 1 - Hologram reconstruction algorithm.
### 2.2 UVP method

The UVP method is a way of measuring a velocity profile along the ultrasonic beam using the ultrasonic Doppler shift frequency. Advantages of the UVP method in comparison to the optical methods such as PIV and LDV are as follows: 1) UVP method can be applied in the velocity profile measurement of an opaque fluid flow, 2) UVP method can record the instantaneous velocity profile on a measurement line, and where the instantaneous velocity profile can be confirmed in the real time during the measurement. After the development of UVP method, many difficult measurements for Taylor vortex flow and opaque fluid flow have been made [5, 6]. Those experimental studies have confirmed the efficiency of the UVP method for velocity profile measurement.

In this method, all velocity profile information by the UVP method, such as the instantaneous velocity and the positions from where the ultrasound is reflected, can be detected. The position x from where the ultrasound is reflected can be extracted from the time delay  $\tau$  between the start of pulse burst and reception time as follows:

$$x = c\tau / 2 \tag{2}$$

where c is the ultrasonic propagation velocity in the flow liquid. At the same time, the velocity information is derived from the Doppler shift frequency by the following equation.

$$V = cf_D / 2f_0 \tag{3}$$

where,  $f_D$  and  $f_0$  are the Doppler shift frequency and the original ultrasonic frequency, respectively. Thus, a velocity profile can be obtained along the ultrasonic beam by analyzing the echo signal to derive instantaneous frequencies at each instant.

### **3. EXPERIMENTAL SETTUP**

Figure 2 is a schematic of the experimental setup showing the path of a laser beam from a single source. A Nd:YLF laser (Photonics Industries DS20-527,  $\lambda$ = 527 nm) was used as a light source putting out a pair of laser pulses at a repetition rate of 1 kHz, pulse length of 58 nsec, and a pulse delay of 100 µsec. The laser beam was expanded to illuminate the center of a test section. A pipe made of FEP, 3000 mm in length, and 20 mm in diameter, was used for the test. The test section located at 2800 mm downstream from a water tank was made of glass to preserve the coherency of the laser beam. A water jacket (length = 55 mm, width = 45 mm, and depth = 40 mm) shown here, was also made of glass. Using a pump, the working fluid (water) was circulated at flow rates of 4.6, 9.5, and 14.2 l/ min, with Reynolds numbers as 5000, 1000, and 15000, respectively. Spherical particles of nylon, 40-micron in diameter, were supplied for conducting the test. The hologram fringe images were captured through a digital CCD camera (IDT NR5S2) without a lens, with a resolution of 2336 x 1728 (7 µm / pixel). The captured image at 1 k Hz, used 1024 x 1024 in the full image area. Our system was designed to make a velocity field of four hundred frames so that the system could handle

800 frames by the camera memory of 1 k Hz for a sampling rate. The laser beam after passing through the beam expander was introduced horizontally into the camera.



Figure 2 - Experimental apparatus.

Figure 2 also shows the measurement position of the UVP system in an upstream direction located at 675mm from the observation region of the holographic PTV. The UVP system consisted of UVP monitor (Met-Flow SA, XW-PSi model) and UVP probe. The basic frequency of UVP probe used in this study was 4 MHz and set on the outer wall of the pipe at a 14° angle. Therefore, we could measure the velocity profile along the axis passing through the pipe's center. The UVP method is based on pulsed ultrasound echography. In this technique, an ultrasonic pulse is emitted from a transducer and travels along the measuring line, and then the same transducer receives the echo signal reflected from seeding particles in the flow. When the UVP method is applied to measure the velocity profile of the test fluid, the sound velocity in the test fluid is needed as represented in Eqs. (2) and (3). In this study, we used sound velocity data in pure water obtained by Grosso and Mader [7]. In this test 60-micron Polyamide particles DAIAMID (Daicel-Degussa Ltd.) were used as the seeding particles. Since the particle utilized by the UVP method happened to be quite different from the diameter and material property of the particles used in the holographic PTV, fresh water without seeding particles was used to clean the pipe and water tank after the experiment with the holographic PTV was finished, and before the start of the experiment using the UVP method.

### 4. **RESULTS AND DISSCUSSION**

Figure 3 shows the velocity profile for each Reynolds number. The values of Reynolds number were set by the values from flow meter, and were 5000, 10000, and 15000. In the experiment with DHPTV, the reconstruction layers in the z-direction were 2000 sections. Thus, this threedimensional reconstruction volume (in pixel points) was 1024 x 1024x 2000 along x-, y-, and zdirections. To obtain an averaged velocity profile, the average volume divided by 60 sections in the cross-section of the pipe diameter, and 400 frames were used. An error on the central region velocity of the UVP is increased with increasing of Reynolds number. This is because of a measured velocity is difficult to detect movement of higher particle with increasing of Reynolds number owing to large detection volume. Figure 4 shows the velocity profile for each Reynolds number. The velocity of two experimental methods cannot be normalized by each friction velocity because profiles of both measuring methods are difficult to calculate each friction velocity owing to low-resolution of velocity points near wall region. Therefore, all velocity profiles were normalized by the centreline velocity Uc on the each method. Although the experimental techniques of UVP and DHPTV do not detect a near-wall region, the tendency of its velocity profiles denotes that an increasing Reynolds number enhances a velocity gradient, and the makes velocity profile move toward the pipe wall. The DNS data by Satake et al. (2000) are also shown in the same figures. The velocity profiles thus obtained by the two experimental methods are in good agreement with that of the DNS data.



Figure 3 - Velocity profiles: (a) Re=5000, (b) Re=10000, (c) Re=15000.



Figure 4 - Velocity profiles normalized by each method: (a) Re=5000, (b) Re=10000, (c) Re=15000.

### 5. CONCULSION

The velocity profile in a turbulent flow was measured using the same experimental method as used in UVP and DHPTV experiments. As a result, both techniques were in agreement with the velocity profile result of DNS. In an opaque pipe used in a nuclear reactor, the UVP method is capable of giving highly precise results.

### ACKNOWLEDGEMENT

This research was partially supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011).

### 6. **REFERENCES**

- [1] Y. Takeda, "Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 7, pp. 313-318, 1986.
- [2] S. Satake, T. Kunugi, K. Sato, T. Ito, "Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry for 3-D Transient Flow around an Obstacle in a Narrow Channel", Optical Review, Vol. 11, No. 3, pp L162 - L164, 2004.
- [3] S. Satake, H. Kanamori, T. Kunugi, K. Sato, T. Ito, and K. Yamamoto, "Parallel computing of a digital hologram and particle searching for microdigital-holographic particle-tracking velocimetry", Applied Optics, Vol. 46, Issue 4, pp. 538-543, 2007.
- [4] S. Satake, T. Kunugi, and R. Himeno, "High Reynolds Number Computation for Turbulent Heat Transfer in a pipe flow", Lecture Notes in Computer Science 1940, High Performance Computing, M. Valero et al. (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 514--523, 2000.
- [5] H. Kikura, Y. Takeda, and F. Durst, "Velocity profile measurement of the Taylor vortex flow of a magnetic fluid using the ultrasonic Doppler method", Experiments in Fluids, 26, pp. 208-214, 1999.
- [6] Y. Takeda, "Instantaneous velocity profile measurement by ultrasonic Doppler method", JSME International Journal, Series B, 38, pp. 8-16, 1995.
- [7] V. A. Del Grosso, and C. W. Mader, , "Speed of sound in pure water", Journal of Acoustical Society of America, 52, pp. 1442-1446, 1972.

\*18 Three-dimensional simultaneous measurements of a rising microbubble position and flow surrounding the microbubble by a digital hologram, Shin-ichi Satake, Tadashi Kikuchi, Takuma Tsuda, Tomoaki Kunugi, 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2012  $\oplus$  6  $\exists$  9  $\exists$  ~6  $\exists$  12  $\exists$ 

# Three-dimensional simultaneous measurements of a rising microbubble position and flow surrounding the microbubble by a digital hologram

# Shin-ichi Satake<sup>1</sup>, Tadashi Kikuchi<sup>1</sup>, Takuma Tsuda<sup>1</sup>, Tomoaki Kunugi<sup>2</sup>

1: Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science

2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510, Japan, satake@te.noda.tus.ac.jp

2: Department of Nuclear Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Yoshida, Sakyo, Kyoto 606-

8501, Japan, kunugi@nucleng.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** Three-dimensional simultaneous measurements of the position of a rising microbubble, and of the velocity field surrounding it, are performed by micro-digital holographic velocimetry. The rising position of the microbubble and the many particles surrounding the microbubble can be reconstructed by a digital hologram. This technique has successfully been applied to the 3-D dynamics of a hydrogen microbubble, in a vertical water channel, that emanates from a platinum electrode by electrolysis. The velocity of the microbubble and the flow of particles surrounding the microbubble are simultaneously obtained.

# 1. Introduction

Microbubbles are encountered when working in various fields of industrial applications. Their behaviour within the bulk of water has especially been of great interest. In order to study the effect of the flow of microbubbles, techniques such as PIV, PTV, etc. have been employed to investigate their flow and to make related measurements. Naito et al. [1] proposed combining holography with stereo shadow imaging with two laser beams. Their method was established for measuring the velocity of bubbles with micro- and milli-meter sizes. We have previously shown the construction of intensity profile from a holographic image of a microbubble where the profile exhibited two peaks separated by a distance related to the microbubble's diameter [2]. A 3-D position of a bubble can be determined by the center of the two peaks, and by the center point of the bubble image focused by a digital hologram. This technique has been applied in the determination of rising microbubble position and the 3-D velocity field surrounding the microbubble.

# 2. Experimental setup

Figure 1 is a schematic of the experimental setup that shows the location of a laser beam from one single source. In this experiment, A Nd:YLF laser ( $\lambda$ = 527 nm) was used as a light source outputting a pair of laser pulses at a repetition rate of 1 kHz, and a pulse delay of 100 µsec. The laser beam was expanded to illuminate the center of a test section. The test section (height = 62 mm, width = 24 mm, and depth = 10 mm) shown in Fig. 1, was made of glass. For this test 40-micron nylon spherical particles were used. The working fluid was a 0.2% NaCl solution in water. In this work, the hologram fringe images were captured through a high-resolution digital CCD camera (IDT NR5S2) without a lens with a resolution of 2336 x 1728 (7 µm / pixel), that captured the images at 1 k Hz, and used 1024 x 1024 pixels in the full imaging area. The camera and the laser were synchronized by a pulse generator, and the exposure time was set to 100 µs. The system was design to work with 800 frames using the camera memory with a sampling rate of 1 k Hz. Microbubbles with spherical shapes were generated by a potentiostat built into a platinum electrode.

The voltage was set at 3.1V.



Figure 1 Experimental setup

# 3. Results and discussion

The pictures of the fringe image near an electrode are shown in Figs. 2 (a) and (b). The black rodlike shadow in the picture is the electrode 100 µm in diameter. Moreover, it is believed that the stationary fringes were the ones that remained sticking to the glass side. One fringe image above the electrode is shown moving upward from the bottom toward the top. Many such fringes were captured in individual frames. The pictures of the reconstructed images are shown in Fig. 3, where according to the computer hologram algorithm, the positions of the reconstructed particles were determined to be 14.0 mm away from the CCD surface. For the final picture, the stationary fringes in Fig. 2 representing the electrode were removed. Figure 4 shows hologram images of the microbubble and of the seeding particles flowing into the observation region. For this picture, the images of two fringes were chosen and marked by circles as points A and B. Figure 5 shows distributions of digitally reconstructed profile representing the microbubble and seeding particles flowing into the observation region [1]. Figure 5 (b) shows a seeding particle presenting a peak resulting from its intensity profile. Figure 5 (a) shows that a microbubble presenting two peaks, and those also result from their intensity profiles. Two peaks in the reconstructed intensity were also identified in our previous result [1]. Figures 6 (a) and 2 (b) are the reconstructed images from the two frames. The microbubble that is shown above the platinum electrode is made by digital reconstruction [2]. The diameter of the micro bubble remained approximately within the neighbourhood of 140 µm. The velocity and the diameter obtained from the reconstruction image, and flow parameter gave the estimated values in terms of non-dimensional numbers, where the bubble's Reynolds number was approximately 1.67, and the Eotvos number was 2.67x10<sup>-3</sup>. From the estimation by Clift et al. (1978) [3], these values are distributed in a spherical shape. Therefore, the microbubble is drawn in form of a sphere for 3-D visualization. The figure also shows the reconstruction of particles. The number of seeding particles is approximately 500. The reconstructed volume is 8 x 8 x 10 mm<sup>3</sup>. Almost all particles are uniformly distributed surrounding the microbubble. It can be seen that starting from the bottom the flow is upstream; and that the velocity of the microbubble can be obtained from the two images and found to be approximately 10 mm/sec. The seeding particles on the images do not dramatically change because their flow speed is slower than that of the microbubble. The obtained instantaneous 3-D velocity vectors from the three visual perspectives are shown in Fig. 7, although we photographed the time evolution of these vectors for 0.8 second (not shown). It can be seen that the flow is moving upward, and the quick flow arises especially in the upper part of the microbubble. This is a flow which is made the rising microbubble and it arises. Moreover, the vector distribution around the rising bubble is higher than in any other domain. The reason is the flow induced by the rising bubble only exists. This is because only the existence of the rising bubble causes the flow. The instantaneous velocity vectors on the images do not drastically change because the flow speed is relatively slow. An average of 100 instantaneous velocity vectors was obtained from the 500 particles reconstructed.



Figure 2 Fringe images of a rising microbubble ; (a) t=279 msec, (b) t=379 msec



Figure 3 Reconstruction of a rising microbubble and particles ; (a) t=279 msec, (b) t=379 msec



Figure 4 Hologram images of a rising microbubble and particles ; t=279msec



Figure 5 Distributions of reconstruction profile (a) Micro-bubble A, (b) Seeding particle B



Figure 6 A rising microbubble and particles surrounding the microbubble; (a) t=279msec, (b) t=379msec



Figure 7 Vectors of a rising microbubble and particles between t=279msec and t=379msec

## 4. Conclusions

In this paper, the reconstruction of a rising hydrogen microbubble was obtained by a digital hologram. Profiles of seeding particle were also obtained by the digital hologram. The simultaneous measurements of the bubble and the seeding particles were performed. The interaction between the microbubble and flow around its bubble can be observed by the reconstructed image. This technique will also apply to a similar rising bubble such as boiling bubble.

### Acknowledgement

This research was partially supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011).

### **5. References**

[1] Naito M, Inoue M, Ichiyanagi M, Sato Y and Hishida K (2009) Development of two-color digital holographic PTV for dispersed two-phase flow. Journal of Physics: Conference Series doi:10.1088/1742-6596/147/1/012054

[2] Satake S, Yonemoto Y, Kikuchi T, Kunugi T (2011) Detection of microbubble position by a digital hologram," Applied Optics, http://dx.doi.org/10.1364/AO.50.005999

[3] Clift, R., Grace, J.R., and Weber, M.E., 1978, Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press

# THREE-DIMENSIONAL HOLOGRAPHIC-PTV MEASUREMENT OF A RISING MICROBUBBLE CAUSED BY PHOTOCATALYTIC REACTION

Noriyuki Unno\*\*\*\*, Takuma Tsuda\*, Shin-ichi Satake\* and Koichi Suzuki\*\*\*

\* Dept. of Applied electronics, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan
\*\* Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo 102-0083, Japan
\*\*\* Dept. of Mechanical Eng., Tokyo University of Science, Yamaguchi, 1-1-1 Daigaku-dori, Sanyo-Onoda, Yamaguchi, 756-0884 Japan

E-mail :satake@te.noda.tus.ac.jp

#### ABSTRACT

Three-dimensional simultaneous measurements of the position of a rising microbubble, and of the velocity field surrounding it, are performed by digital holographic velocimetry. In order to generate a micro bubble, we used photo-electrolysis reaction of water with titanium dioxide ( $TiO_2$ ). The  $TiO_2$  made a thin film by sol-gel method. The rising position of the microbubble and the many particles surrounding the microbubble can be reconstructed by a digital hologram. This technique has successfully been applied to the 3-D dynamics of a microbubble, in a vertical water channel, that emanates from the surface of the film. The velocity of the microbubble and the flow of particles surrounding the microbubble are simultaneously obtained.

Keywords : Photocatalytic reaction, Digital holography, Microbubble, UV radiation

#### 1. INTRODUCTION

We have previously shown the construction of the intensity profile from a holographic image of a microbubble where the profile exhibited two peaks separated by a distance related to the microbubble's diameter [1]. A 3-D position of a bubble can be determined by the center of its two peaks, and by the center point of the bubble image focused by a digital hologram. Furthermore, this technique was applied in three-dimensional simultaneous measurements of a rising microbubble position and flow surrounding the microbubble [2]. This technique has been applied in the determination of microbubble positions and the 3-D velocity field surrounding the microbubble in a turbulent pipe flow. The technique of dividing seeding particles and bubbles that the hologram fringe reproduced in a turbulent pipe, has been described [3]. In the present study, the validity of a reconstructed particle and a bubble carried out phocatlysic reacting in an observation region is shown. This technique has been applied in the determination of rising microbubble position and the 3-D velocity field surrounding the microbubble.



Figure 1 Schematic view of the samlple.

In order to generate a micro bubble, we used photo-electrolysis reaction of water with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>). We have prepared a TiO<sub>2</sub> thin film via sol-gel method [4]. In this study, titanium sol-gel material was spin-coated at 3000 rpm on a cleaned Si substrate and cured at 425°C for 10 min, resulting in about

400-nm  $\text{TiO}_2$  film. After that, a platinum layer was deposited by spatter coating method using a micro-size mask, because a platinum layer accelerates photocatalyzed reaction [5]. The thickness of platinum was less than 10 nm. Figures 1 and 2 show schematic view and SEM image of the sample after the deposition.



Figure 2 SEM image of the sample.



Figure 3 Experimental setup

Figure 3 is a schematic of the experimental setup that shows the location of a laser beam from one single source. Moreover, ethanol was employed as a sacrificial reagent and mixed into water to improve the yield of micro bubble [6]. In this experiment, A Nd:YLF laser ( $\lambda$ = 527 nm) was used as a light source out-putting a pair of laser pulses at a repetition rate of 1 kHz, and a pulse delay of 100 µsec. The laser beam was expanded to illuminate the centre of a test section. The test section (height = 20 mm, width = 28 mm, and depth = 20 mm) shown in Fig. 3, was made of glass. 40-micron nylon spherical particles were used. The working fluid was a 10% ethanol solution in water. In this work, the hologram fringe images were captured through a high-resolution digital CCD camera (IDT NR5S2) without a lens with a resolution of 2336 x 1728 (7  $\mu$ m / pixel), that captured the images at 1 k Hz, and used 1024 x 1024 pixels in the full imaging area. The camera and the laser were synchronized by a pulse generator, and the exposure time was set to 100 µs. The system was design to work with 800 frames using the camera memory with a sampling rate of 1 k Hz. Microbubble generating can be done for photocatalytic reaction by UV-light. The TiO<sub>2</sub> thin film on the bottom of the measurement region was irradiated by a UV lamp ( $\lambda$ =365 nm). The UV flux was set to be 170 [mW/cm<sup>2</sup>].



Figure5 Reconstruction of a rising microbubble and particles

#### **3. RESULTS AND DISCUSSION**



Figure 4 Fringe images of a rising microbubble



Figure 6 Hologram images of a rising microbubble and particles







(c)



(d)



Figure 7 Velocity vector of a rising microbubble and particles around the microbubble; (a) t=400msec, (b) t=500msec, (c) t =600msec, (d) t=700msec.



(b)



(c)



(d)



Figure 8 A rising microbubble and velocity vector of particles around the microbubble; (a) t = 400 msec, (b) t =500msec, (c) t=600msec, (d) t=700msec.

The pictures of the fringe image near the TiO<sub>2</sub> thin film are shown in Fig. 4. The black shadow in the picture is microbubbles on the film. Moreover, it is believed that the stationary fringes were the ones that remained sticking to the glass side. One fringe image above the film is shown moving upward from the bottom toward the top. Many such fringes were captured in individual frames. The pictures of the reconstructed images are shown in Fig. 5, where according to the digital hologram algorithm, the positions of the reconstructed particles were determined to be 15.0 mm away from the CCD surface. The stationary fringes in Fig. 5 representing the black shadow were removed in Fig. 6. Figure 6 shows hologram images of the microbubble and of the seeding particles flowing into the observation region. The microbubble that is shown above the Pt thin film is made by digital reconstruction [2]. The diameter of the micro bubble remained approximately within the neighbourhood of 150 µm. The microbubble is drawn in form of a sphere for 3-D visualization in Fig. 7. The figure also shows its vector and the reconstruction of particles. The number of seeding particles is approximately 500. The reconstructed volume is 2 x 2 x 4.24 mm<sup>3</sup>. Almost all particles are uniformly distributed surrounding the microbubble. It can be seen that starting from the bottom the flow is upstream; and that the velocity of the microbubble can be obtained from the two images. The obtained instantaneous 3-D velocity vectors from the four visual perspectives are shown in Fig. 8. It can be seen that the flow is moving upward, and the quick flow arises especially in the upper part of the microbubble.

#### 4. CONCLUSIONS

In this paper, the reconstruction of a rising microbubble caused by photocatalytic reaction was obtained by a digital hologram. Profiles of seeding particle were also obtained by the digital hologram. The simultaneous measurements of the bubble and the seeding particles were performed. The interaction between the microbubble and flow around its bubble can be observed by the reconstructed image. This technique will also apply to a similar rising bubble such as boiling bubble.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This research was partially supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011).

#### REFERENCES

- Shin-ichi Satake, Yukihiro Yonemoto, Tadashi Kikuchi, Tomoaki Kunugi ,"Detection of microbubble position by a digital hologram," Applied Optics, Vol. 50 Issue 31, pp.5999-6005 (2011).
- Shin-ichi Satake, Tadashi Kikuchi, Takuma Tsuda, Tomoaki Kunugi," Three-dimensional simultaneous measurements of a rising microbubble position and flow surrounding the microbubble by a digital hologram," 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 09-12 July, 2012.
- Shin-ichi Satake, Tadashi Kikuchi, Hirotaka Iida, Tomoaki Kunugi ,"Three-dimensional measurements of microbubbles in a turbulent pipe flow by digital-holographic PTV", 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Palermo, September 24th - 27th (2012)

- K. Terabe, K. Kato, H. Miyazaki, S. Yamaguchi, A. Imai, Y. Iguchi, Microstructure and crystallization behaviour of TiO<sub>2</sub> precursor prepared by the sol-gel method using metal alkoxide, Journal of Materials Science, vol. 29, issue 6, pp. 1617-1622, 1994
- Bernhard Kraeutler, Allen J. Bard, Heterogeneous Photocatalytic Decomposition of Saturated Carboxylic Acids on TiO2 Powder. Decarboxylative Route to Alkanes, Journal of the American Chemical Society, vol. 100, no.19, pp 5985–5992, 1978.
- Anna Galińska and Jerzy Walendziewski, Photocatalytic Water Splitting over Pt–TiO2 in the Presence of Sacrificial Reagents, Energy Fuels, vol. 19, No. 3, pp 1143–1147, 2005.

\*21 Three-dimensional flow measurement of a water flow in a sphere-packed pipe by digital holographic PTV, Shin-ichi Satake, Yusuke Aoyagi, Takuma Tsuda, Noriyuki Unno, Kazuhisa Yuki, Fusion Engineering and Design, 98-99, pp. 1864-1867, 2015(査読有)

# Three-dimensional flow measurement of a water flow in a spherepacked pipe by digital holographic PTV

Shin-ichi Satake<sup>1</sup>, Yusuke Aoyagi<sup>1</sup>, Noriyuki Unno<sup>1,2</sup>, Kazuhisa Yuki<sup>3</sup>, Yohji Seki<sup>4</sup>, Mikio Enoeda<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585, Japan

<sup>2</sup> Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083,

Japan

<sup>3</sup>Dept. of Mechanical Eng., Tokyo University of Science, Yamaguchi, Daigaku-dori 1-1-1, Sanyo-Onoda, Yamaguchi, 756-0884 Japan

<sup>4</sup>Japan Atomic Energy Agency, Blanket Technology Group, 801-1 Mukoyama, Naka-shi, Ibaraki-ken, 311-0193 Japan

A water cooled ceramic breeder for ITER and DEMO of a nuclear fusion reactor plays a significant role in the design of a blanket module. Pebbles of a ceramic tritium breeder are packed in a container of the blanket. Investigation of the flow behavior is necessary in an actual environment of a facility where pressure drop takes place under a complex flow such as in case of the container for the pebble bed. For the development of a facility, it is necessary to be able to monitor fluid motion of a basic flow such as a sphere-packed pipe (SPP). In the present study, to discern the complex flow structures in SPP, digital holographic PTV visualization is carried out by a refractive index-matching method using a water employed as a working fluid. The water is chosen to be able to adjust its refractive index to match to that of the MEXFLON sphere with an index of 1.33. Hologram fringe images of particles behind the spheres can be observed, and the particles' positions can be reconstructed by a digital hologram. Consequently, 3-D velocity-fields around the spheres are obtained by the reconstructed particles' positions. The velocity between pebbles is found to be convergence and divergence regions in the SPP.

Keywords: Digital Hologram, Pebble, refractive matching method

#### 1. Introduction

Japan Atomic Energy Agency has been performing research, development and design of a blanket module with a water cooled ceramic breeder (WCCB) for ITER and DEMO of a nuclear fusion reactor [1][2][3][4]. Pebbles of a ceramic tritium breeder are packed in a container of the blanket. Helium gas flows in a tritium recovery system. Investigation of the flow behavior is necessary in an actual environment of a facility where pressure drop takes place under a complex flow such as in case of the container for the pebble bed. For the development of a facility, it is necessary to be able to monitor fluid motion of a basic flow such as a spherepacked pipe (SPP). A basic heat transfer promoter such as packed beds of spheres [5] is one of the technology of the promotion of heat transfer by using the turbulent mixture. Yuki et al. [6] performed PIV visualization to understand the complex structures in a sphere-packed pipe (SPP)[6]. The PIV experiment was conducted using a matched refractive-index method [7] with NaI solution as the working fluid. They found a meandrous bypass with high-flow velocity due to the wall effect. Their visualization was a 2-D velocity field, and based on its information the flow structure was realized. Recently, we carried out 3-D visualization of digital holographic PTV [8][9] to understand the complex flow structures in a sphere-packed pipe (SPP) by using a refractive indexmatching method with a sodium iodide (NaI) solution used as a working fluid[10]. This solution when used as working fluid is deliberately chosen to be able to adjust its refractive index to match to that of the acrylic sphere with an index of 1.49. It is useful for a matching-index method to be able to be visualized by working fluid

without chemical treatment such as a water. Therefore, in the present study, the pebbles is made of MEXFLON [11], whose refractive index is the same as that of a water. Digital holographic PTV visualization is carried out by a refractive index-matching method using a water employed as a working fluid.

# 2. Experiment apparatus and details of the test section

Figure 1 is a schematic of an experimental setup that shows the location where a laser beam from a single source Nd:YLF laser (Photonics Industries DS20-527,  $\lambda$ = 527 nm) was used as a light source putting out a pair of laser pulses at a repetition rate of 1 kHz, and a pulse delay of 100 µsec. The laser beam was expanded to illuminate the center of a test section. A pipe made of FEP, with length and inner diameter of 2000 mm and 10 mm, was used for the experiment. The test section located at 1400 mm downstream from a water tank was made of glass to maintain the coherency of the laser beam. Here the working fluid was a water solution that was designed to match the refractive index of the working fluid to the refractive index of the MEXFLON sphere with an index of 1.33. A water jacket (length = 55 mm, width = 45 mm and depth = 40 mm) shown here, was also made of glass. By using a pump, water (used as a working fluid) was circulated at a flow rate of 0.7 1/ min. The visualization of the flow field is conducted at a Reynolds number ( $Re_d = U_d d / v$ ) of 634, where  $U_d$  and d stand for inlet velocity and sphere diameter. The mean inlet velocity, which is equivalent to the superficial velocity in the SPP, is 0.149 m/s. When the refractive indices between the working fluid and the sphere are

matched, the hologram fringe image of the particles behind the sphere can be observed, and the particle positions can be reconstructed by a digital hologram. The supplied particles in this experiment were 40-micron nylon spherical particles. The hologram fringe images were captured through a high-resolution digital CCD camera (IDT NR5S2) without a lens, which had a resolution of 2336 x 1728 (7 µm / pixel). The captured image at 1 k Hz used 1024 x 1024 in the full image area. The camera and the laser were synchronized by a pulse generator unit, and the exposure time was set to 100 µs. Our system was designed to make a velocity field of four hundred frames, so that the system can process eight hundred frames using the camera memory, and achieve 1 k Hz for a sampling rate. The laser beam after passing through the beam expander enters the camera horizontally. The working fluid shown in Fig. 2(a) was without water; and the working fluid shown in Fig. 2 (b) was water. The state in Fig. 2(a) where the water jacket and the inside of a circle pipe are not filled with water. The states without water make the forms of pebbles clear. When the refractive indices between the working fluid in Fig. 2(b) and the pebble sphere were matched, the pebble sphere became invisible. MEXFLON spheres with diameters of 5 mm were then packed into the observation region thus forming a sphere-packed pipe (SPP) structure as shown in Fig.3.



Fig. 1 Experimental apparatus



Fig. 2 Photo of pebbles and FEP pipe in a water jacket; (a) Without a water, (b) With a water



Fig. 3 The cross plane of an observation region in the y-z plane

#### 3. Result and discussions

Figure 4 shows hologram images of pebbles and particles in water. The hologram fringe images of the particles behind the pebbles are observable. To set 1KHz sampling, the hologram fringe images were captured 1024 x 1024 pixels from 2336 x 1728 pixels in the full imaging area of a high speed camera. Therefore, the full imaging areas are shown in four separate square-shaped segments A and B marked by chain lines





Fig. 4 Hologram image entire domain in the observation region

Figure 5 shows hologram images of the segments separated from the full imaging area in the observation region. The two segmented areas are reconstructed as each volume. When velocity field is taken by the volumes, then velocity fields are merged from the velocity fields of each reconstructed velocity.



Fig.5 Hologram images separated from the full imaging area in Fig. 4

Images taken from the velocity vectors averaged by 2169 frames, reproduced from the 3-D particle positions, are shown in Fig. 6. The images show the profile in the x-y planes. The particles in the right-hand image are moving from left to right and the semicircular velocity profile can also be seen in the image. The velocity vectors between pebbles are higher than those in the other region.



Fig. 6 Velocity vectors in the bird view

The obtained 3-D velocity vectors averaged by 4338 frames from the bird's eye-view are shown in Fig. 6. It can be seen that the flow is mainly moving in a stream-wise direction, and the velocity vectors have around the pebbles. The positions of the pebbles primarily represent as none of the velocity. The velocity vectors were obtained from the reconstructed images. The velocity around as the black arrows is ranged greater than 0.907 m/s. Yuki et al.(2008)[6] that the maximum value of the bypass flow is 6 times higher than the bulk velocity. The result has a similar behavior compare with their resulted velocity.

To examine a three-dimensional structure, we introduce a two dimensional velocity field at the cross section. Figure 7 shows a schematic viewgraph of a longitudinal section: Line A is defined by quarter located from outer diameter of the pipe. Line B is defined by a center located from outer diameter of the pipe. Line C is defined by quarter located from outer diameter of the pipe.

Figure 8 showing a time averaged velocity profile over a period of 2 s is calculated at lines A, B, and C: (a) twodimensional velocity vectors on line A in Fig. 8 at the xy plane, (b) two dimensional velocity vectors on line B in Fig. 8 at the x-y plane, and (c) two-dimensional velocity vectors on line C in Fig. 8 at the x-y plane. A spouting flow between pebbles were captured from the 2D vector field, with which the structures have one divergence and convergence flow. Yuki et al. (2008) [6] has already found the spouting flow. The result has a similar behavior compare with their resulted velocity.



Fig. 7 Schematic viewgraph of visualizing section: a longitudinal section A, a longitudinal section B, a longitudinal section C

(a)



Z ⊗→→ X ↓ Y





Fig.8 A time averaged velocity profile over a period of 2 s is calculated at lines A, B, and C: (a) twodimensional velocity vectors on line A in Fig. 7 at the x-y plane, (b) two dimensional velocity vectors on line B in Fig. 7 at the x-y plane, and (c) twodimensional velocity vectors on line C in Fig. 7 at the x-y plane.

#### 4. Conclusion

The measurement of a flow field in a sphere-packed pipe is performed by refractive index matching and a DHPTV system. The positions of seeding particles were obtained by a clear view through the pebbles in water. Velocity fields in the sphere-packed pipe region were visualized with a time resolution of 100  $\mu$ s and repetition rate of 1 kHz in a 3D measurement volume. For the flow structure between pebbles, a convergence flow and a divergence flow were captured from the 2D vector field. The reason why we can observe this phenomenon is that a threedimensional velocity including the flow structure through the pebbles can be obtained by DHPTV. Our technique can apply other flow field which are seen in an internal flow of fusion design, if its flow channel in the fusion design is made of MEXFLON.

#### Acknowledgments

This research was partially supported by Program for Development of Strategic Research Center in Private Universities supported by MEXT (2011) and KAKENHI 26420158.

#### References

[1] M. Enoeda, et al. (2001). "Conceptual Design of Solid Breeder Blanket System Cooled by Supercritical Water," JAERI-Technol., 2001-078.

[2] Y. Seki, et al. (2007). "R&D of prediction system for tritium transport in pebble bed breeder blanket," Symposium of Code Development and Integration for Simulation of Tritium Behavior in Fusion Reactor in Plasma Conference 2011, Kanazawa, Japan, S-P5-3 in CD-ROM.

[3] Y. Seki, et al. (2011). "Studies on Tritium Breeding Ratio for Solid Breeder Blanket Cooled by Pressurized Water through Nuclear and Thermal Analyses," JAEA- Technol., 2007-067.

[4] Y. Yanagi, et al. (2001). "Nuclear and thermal analyses of supercritical-water-cooled solid breeder blanket for fusion DEMO reactor," J. Nucl. Sci. Technol., 38(11), pp.1014-1018

[5] R.C. Hendricks, M.M. Athavale, S.B. Lattime, M.J. Braun,"Virtual and Experimental Visualization of Flows in Packed Beds of Spheres Simulating Porous Media Flows," NASA/TM 1998-207926

[6] K. Yuki, M. Okumura, H. Hashizume, S. Toda, NB. Morley, A. Sagara,"Flow visualization and heat transfer characteristics for sphere-packed pipes," Journal of Thermophysics and Heat Transfer 22(4), 638-648 (2008).

[7] R.Budwig,"Refrective index matching methods for liquid flow investigations,"Experiments in Fluids, 17 350-355(1994).

[8] S. Satake, T. Kunugi, K. Sato, T. Ito, "Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry for 3-D Transient Flow around an Obstacle in a Narrow Channel", Optical Review, Vol. 11, No. 3, pp L162 - L164, 2004.

[9] S. Satake, H. Kanamori, T. Kunugi, K. Sato, T. Ito, and K. Yamamoto, "Parallel computing of a digital hologram and particle searching for microdigital-holographic particletracking velocimetry", Applied Optics, Vol. 46, Issue 4, pp. 538-543, 2007.

[10] S. Satake, Y. Aoyagi, T. Tsuda, N. Unno, K. Yuki,"Three-dimensional flow measurement of a spherepacked pipe by a digital hologram and refractive indexmatching method," Fusion Engineering and Design, 89 (2014), pp. 1064-1067, DOI:10.1016/j.fusengdes.2014.01.029

[11] S. Someya, D. Ochi, Y. Li, K. Tominaga, K. Ishii, K. Okamoto, "Combined two-dimensional velocity and temperature measurements using a high-speed camera and luminescent particles", Applied Physics B,(2010), Volume 99, Issue 1-2, pp 325-332