



Nikon Research R e p o r t

Vol.5 2023

刊行の趣旨

株式会社ニコンが行った研究開発活動の成果を、広く紹介することが刊行の趣旨である。ニコンのコア技術である「光利用技術」と「精密技術」をベースにした研究開発成果として、新製品に盛り込まれた技術と、学会等の機関から評価を頂いた技術を中心に紹介している。

巻 頭 言



代表取締役 兼 社長執行役員

馬立 稔和

国際情勢の不安定化などにより、世の中は様々な課題に直面しています。我々はそのような中、お客様の課題のみならず社会や環境の課題を解決する策を考え、サステナブルな社会の実現に貢献していきたいと考えています。

2022年4月に発表した中期経営計画、2030年にニコンがやりたい姿「人と機械が共創する社会の中心企業」を実現するべく、主要事業である映像や精機の安定強化に加え、戦略事業のヘルスケア、コンポーネント、デジタルマニュファクチャリングにおいて事業化やスケール化を進めています。これらの事業を通して、社会の期待に「信頼」で応え、「創造」を通じて社会に貢献できるよう愚直に取り組んでいきます。

本レポートでは、現業を支える製品の開発や将来のキーとなる要素技術に加え、環境負荷低減に貢献する材料加工技術など、ニコンの技術開発の一端をお伝えします。

エグゼクティブ・フェロー
先進技術開発本部長

土肥 正明



変化が激しく予測が困難な時代の中、技術開発においてはこれまで以上に多様性と柔軟性、そしてスピード感が求められています。ニコンの研究開発の現場でも、多様化するお客様のニーズに応え、2030年のやりたい姿を実現するため、様々な創意工夫を重ね、日々技術開発に取り組んでいます。特に中期経営計画で定めた戦略事業においては、これまでに続けてきた技術開発の成果が実績として目に見える形となってきています。

これら戦略事業の技術開発の取り組みを中心に、2022年度に発売・発表した製品を中心とした技術解説と、様々な学会に投稿・発表して高い評価を頂いた論文テーマを本レポートにまとめ、ニコングループの研究・開発成果として、今年も皆様にお伝えします。ニコンの技術開発の一端ではありますが、我々の取り組みを皆様に知っていただくとともに、ニコンの技術が社会や環境に役立つ契機になれば幸いです。

Nikon Research Report Vol.5

目次／CONTENTS

技術解説/Technical Reports

- 1 燃費改善, CO₂ 排出量削減を実現する, 航空機向けリブレット技術の開発
小野明人, 懸田隆史
Development of Riblet Technology for Aircraft to Improve Fuel Efficiency and Reduce CO₂ Emissions
Akito ONO and Takafumi KAKEDA
- 7 大規模歪に対応した Roll-to-Roll マスクレス露光装置の開発
堀 正和, 内藤一夫, 中野貴之, 伊倉良幸, 橋場成史, 鬼頭義昭
Development of Roll-to-Roll Maskless Exposure System for Large-Scale Pattern Deformation
Masakazu HORI, Kazuo NAITO, Takayuki NAKANO, Yoshiyuki IGURA, Seiji HASHIBA and Yoshiaki KITO
- 16 SPPC アレイ検出器を用いた共焦点超解像イメージング
大川潤也, 小森谷大介, 楠井雄太
Confocal Super-Resolution Imaging using SPPC Array Detector
Junya OHKAWA, Daisuke KOMORIYA and Yuta KUSUI
- 24 産業用カメラ「LuFact」シリーズの開発
笹井義史, 大河内潤, 中野雅弘, 吉岡玄史, 金丸謙介, 本 佳弥, 近藤俊介
Development of Industrial Camera “LuFact” Series
Yoshifumi SASAI, Jun OKOCHI, Masahiro NAKANO, Genshi YOSHIOKA, Kensuke KANAMARU,
Yoshiya MOTO and Shunsuke KONDO

研究開発論文/Research and Development Reports

- 28 ガスタービン用 TBC へのレーザー加工によるリブレット形成と熱サイクル耐久性評価
綿引健二, 蘆田憲一, 土橋晋太郎, 土橋広和
Riblet Patterning by Laser Ablation on the Thermal Barrier Coating (TBC) for Gas Turbines and
Evaluation of Its Resistance to Cyclic Heating
Kenji WATAHIKI, Kenichi ASHIDA, Shintaro TSUCHIHASHI and Hirokazu TSUCHIHASHI
- 34 広角ダブルレットメタレンズに於ける誘電体メタサーフェス素子の種類の違いによる影響
鳥羽英光, 高木英嗣, 大橋道雄, 大滝 桂, 瀧川雄一
Influence on Wide-Angle Doublet Metalenses Due to Different Types of All-Dielectric Metasurfaces
Hidemitsu TOBA, Hidetsugu TAKAGI, Michio OHASHI, Katsura OTAKI and Yuichi TAKIGAWA
- 46 スポーツフィールドにおける自己校正を使った観客の注視領域推定
阿部和広, 高山侑也, 大坪洋介, 小池哲也
Estimating Attention Area of Spectator using Self-calibration in Sports Fields
Kazuhiro ABE, Yuuya TAKAYAMA, Yosuke OTSUBO and Tetsuya KOIKE

52

リアルタイムシステム同定法に基づくモデル構築（制御系の異常検知に適したモデル構築手法の提案）

箱田文彦

Model Construction Based on Real-Time System Identification Method (Proposal of a Model Construction Method for Anomaly Detection of Control Systems)

Fumihiko HAKODA

58

プロセス機能展開表を活用した光学ガラスの溶解技術開発

佐藤幸太, 嘉指伸一

Development of Optical Glass Melting Technology using a Process Task Visualization Chart

Kota SATO and Shinichi KAZASHI



技術解説

Technical
Reports

燃費改善, CO₂ 排出量削減を実現する, 航空機向けリブレット技術の開発

小野明人, 懸田隆史

Development of Riblet Technology for Aircraft to Improve Fuel Efficiency and Reduce CO₂ Emissions

Akito ONO and Takafumi KAKEDA

リブレットはサメ肌構造を模した生物模倣技術の一種であり、流体機器表面の流線に沿って設けられた微細な溝により、乱流境界層の粘性抵抗が低減することが知られている。これを輸送機器や回転機器に応用することにより、その燃費改善や CO₂ 排出量削減を実現することができる。とりわけ表面積が大きく高レイノルズ数領域で乱流摩擦抵抗の寄与が大きな航空機においては、実用化に向けた取り組みが盛んに進められているが、いまだ本格的な実用化には至っていない。我々は、レーザーによるリブレット施工技術を開発し、その実用化を目指している。本稿では、航空機へのリブレット技術適用に向けた我々の取り組みについて紹介する。

Riblets are a type of biomimetic technology with shark-skin structure. Riblets reduce the skin friction in a turbulent boundary layer due to the fine grooves provided along the streamlines on the surface of objects in fluids. Applying this technology to transportation and rotating devices, for example, can improve fuel efficiency and reduce CO₂ emissions. For aircraft in particular, where the surface area is large and the contribution of skin friction is significant at high Reynolds number, efforts to practical use of riblets are actively progressing. However, this is yet to be achieved. We have developed a riblet processing technology using laser and our goal is to put it into practical use. In this paper, we introduce our efforts towards the application of riblet technology to the aircrafts.

Key words リブレット, レーザー加工, 粘性抵抗低減, CO₂ 排出量削減, 航空機
riblet, laser processing, drag reduction, CO₂ emissions reduction, aircraft

1 はじめに

航空機をはじめとする高速移動体が受ける流体抵抗は、圧力抵抗（慣性抵抗）と摩擦抵抗（粘性抵抗）に大別される。特に高レイノルズ数の乱流領域においては、壁面境界層に強いヘアピン渦が発生し、それに伴って壁面ごく近傍に低速ストリークとよばれる構造によって連続的に縦渦が生じ、層流に比べて大きな壁面乱流摩擦抵抗が発生する [1]。この摩擦抵抗を低減することは航空機のエネルギー効率を向上させる大きな課題の 1 つである。

一方、速く泳ぐ種のサメにおいて鱗の 1 つ 1 つの表面に 35~100 μm 程度の微小な縦溝があることが知られていた [2], [3]。流れに沿ったこの縦溝はリブレット (riblet) と呼ばれ、平滑面に対して 8~10% 程度の乱流摩擦抵抗低減を引き起こすことが実験的にも明らかにされている [4]。リブレットは、縦渦が壁面から離れて壁面との相互作用が抑制される効果を持つ [5]。Fig. 1 にリブレットと縦渦の相互作用の模式図を表す。壁面近傍の縦渦の寸法は壁剪断

応力に依存するため、最適ナリブレットピッチ（リブレットの嶺トップの間隔）も各所の壁剪断応力に依存し、壁剪断応力が大きいほど最適ナリブレットピッチは小さくなる。リブレットによる摩擦抵抗の低減量は縦渦の寸法、すなわち流速によって変化する。リブレットピッチ s を次の式のように無次元化した s^+ という尺度においては、 $s^+ = 17$ 付近で摩擦抵抗の低減効果が最大となる。

$$s^+ = \frac{s \sqrt{\tau_w}}{\nu \rho} \quad (1)$$

ここで、 τ_w は壁剪断応力、 ρ は流体の密度、 ν は流体の動粘度である。これより流速が相対的に遅く、もしくはリブレットピッチが小さくなると摩擦抵抗の低減効果はゼロに漸減する。一方、流速が相対的に速く、もしくはリブレットピッチが大きくなると摩擦抵抗の低減効果はゼロを超えて逆に摩擦抵抗が増大する。この挙動を表したものが Fig. 2 である [6]。とりわけ表面積が大きく高レイノルズ数領

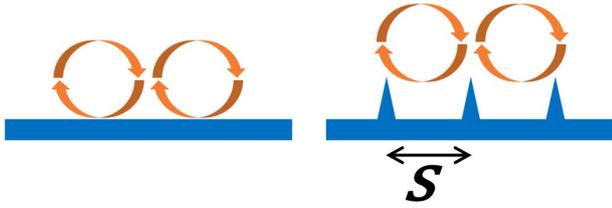


Fig. 1 Eddy-wall interaction without and with riblets. The flow is in the depth direction of the paper.

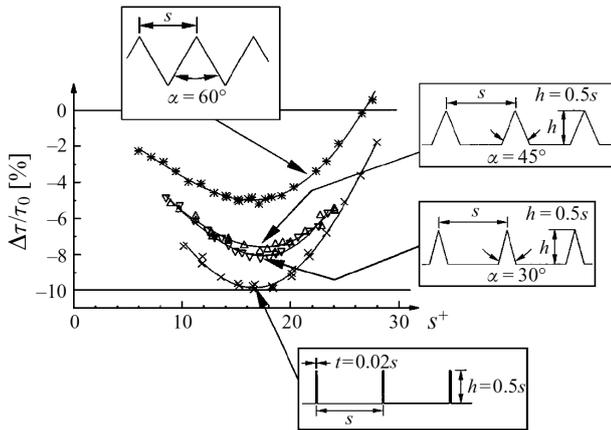


Fig. 2 Drag reduction effect by riblets with various cross section. The number s^+ is a dimensionless riblet size.

域で乱流摩擦抵抗の寄与が大きな航空機や風力タービン翼の分野でリブレットの研究が進んでおり [7], [8], 産業用コンプレッサーやジェットエンジンなどターボ機械にも有効と考えられている [9], [10], [11]. 民間用航空機の飛行条件において最適なリブレットピッチはおよそ 100 μm で, 人の髪の毛の太さとほぼ同等である.

2 航空機とリブレット

航空機におけるリブレットの効果は以前から注目されており, 1990年代には Boeing, Airbus 各社によって実機テストが行われるなど [7], 今日に至るまで技術開発が進められているが, 施工性や耐久性の課題によって未だに本格的な実用化には至っていないのが現状である.

遷音速巡航飛行時の空力抵抗内訳のうち粘性抵抗が占める割合は50%を超える [12]. リブレットの粘性抵抗低減率は6%程度であり, 機体表面積の80%にリブレットを施工した場合, 全抵抗の約2%を削減することが出来る. これを国内大手エアライン1社が保有する全飛行機に展開した場合, ジェット燃料を年間9.5万トン節減でき, 年間の燃油費は80億円削減, CO₂排出量は30万トン削減できる効果があると試算されている. これは, 平均して1機当たり年間で数千万円の燃料費削減効果に相当する. カーボンニュートラルの実現が社会課題となっている今, リブレット加工は地球に優しいテクノロジーとも言える.

リブレット技術は, リブレットフィルムによる適用, または, 機体塗装面への直接施工を行うことにより, 既存航空機に対してレトロフィットが可能な技術であることも重要な利点である.

航空機へのリブレット技術を実用化するためには, 施工性, 空力性能, 耐久性をバランスよく兼ね備える必要がある. ニコンはこれらの技術開発を, 研究機関, エアライン, 他企業と協業し進めている. 以降の章より, 各技術課題に対する我々の取り組みについて紹介していく.

3 施工性

リブレットによって得られる運行利益は燃費削減効果から施工コストを差し引いたものとなるため, 施工コストを十分に抑えることが重要となる. また航空機は待機時間の増加に伴い莫大な営業損失が発生する. そのため, 大型・大面積の対象物に対し, リブレット施工を短時間で行うことが重要となる. 現時点で実用化されているリブレットフィルム方式は, フィルム貼付作業のみでおよそ2週間を要し, 数千万円のコストがかかっている.

航空機への大面積施工を実現する手段の一つとして, 我々はレーザーアブレーション加工により所定の形状のリブレットを形成する技術を開発した. レーザーアブレーション (laser ablation) とは, ナノ秒, ピコ秒, フェムト秒のパルス幅を持つ極短パルスレーザーによって非熱的に材料表面の物質を除去する技術である [13], [14].

Fig. 3 にレーザーによるリブレット施工の模式図を示す. $f\theta$ レンズによって数十 μm 程度に集光したレーザービームスポットをワークに対し照射すると, 照射された部分の材質が瞬時に溶解, 気化し, 除去される. ガルバノミラーによってビームスポットをリブレット方向に高速で連続的にスキャンし, 所望の寸法, 深さのリブレット形状を作成することが出来る.

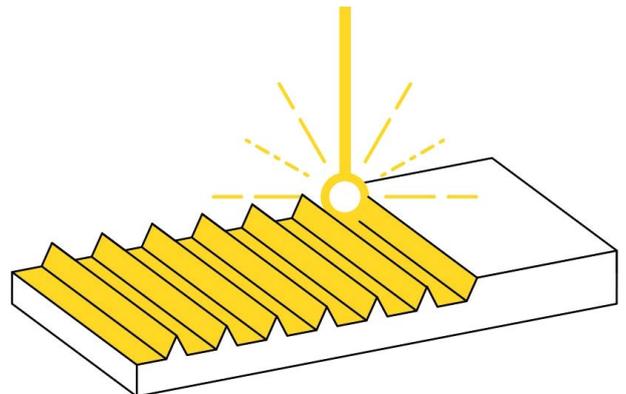


Fig. 3 Schematic diagram of a laser processing for forming riblets on the surface of an object

レーザーによるリブレット施工には以下に示すような利点がある.

最適なレーザー光源（波長, 出力, パルス幅, 等）を選択することで, 塗料やフィルム, 金属といった様々な材質に対して高精度な除去加工が可能となる。

ガルバノミラーによるスキャンパターンを工夫することで様々なリブレット形状が作成可能となる。直線だけでなく, 流体解析 (CFD) に基づき, Fig. 4 に示すような最適な流線でリブレットを施工することが可能である。また, 従来型の台形溝リブレットだけでなく, より高効率な次世代リブレット形状の作成も可能となる。

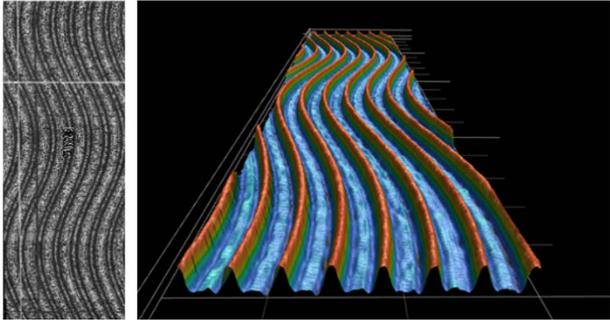


Fig. 4 Smooth curved riblets generated by laser processing

加工ワークの形状に対する自由度も高く, 湾曲したワーク面の形状に沿って最適な加工パスを作成し, レーザー光をワーク表面に沿って焦点を追従させながらスキャンすることで, 物体の形状に合わせたリブレット施工が可能である。Fig. 5 に複雑形状へのリブレット施工事例を示す。



Fig. 5 Riblet processing on a 3D curved surface

レーザーアブレーション加工は熱影響が少ないため, 材質を変質させず, 塗膜やフィルムといった材質本来の耐久性を維持したままリブレットを施工することが可能である。これにより, 交換サイクルが長い部品でも長期的なリブレットの効果が見込める。

また, レーザー施工はワークに対し非接触で反力を受けることなく加工ができることから, 自動化との親和性が高い施工方法と言える。大型マニピュレータとレーザー加工ヘッドを組み合わせることで, 自律制御の加工機が, 航空機に自ら近づき, 自動でリブレット加工を行うことが可能になる (Fig. 6)。

我々はレーザーを用いた大面積リブレット施工の実現に

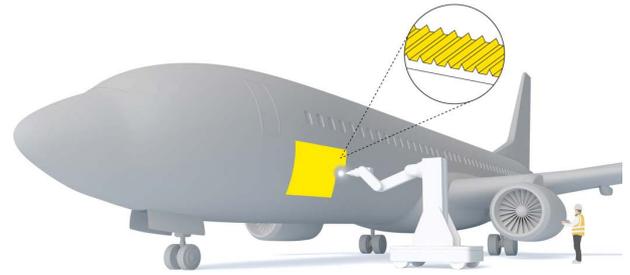


Fig. 6 Conceptual diagram of riblet processing on a large object

向け, 各種要素技術の開発を進めている。

レーザー加工ヘッドにおいては, 既存のリブレット加工機に対し飛躍的に加工速度を高めた光学系の開発を進めている。レーザー加工機において一般的なシングルビームを用いた光学系は, 単位時間当たりの除去体積が小さく加工速度に課題があった。我々はこの課題を解決するため, マルチビームを形成しそれをスキャンしてリブレットを加工する技術を開発中である。この技術を用いて将来的には航空機 1 機 (Boeing737-800型機を想定) へのリブレット施工を 1 日で完了させることが目標である。

また, 数 μm オーダーの加工精度を達成するためには, 振動への対策が不可欠となる。大型マニピュレータとレーザー加工ヘッドを組み合わせた加工機を用いて整備場内で機体に対しリブレット施工を実施する際, 整備場内の環境振動がマニピュレータによって増幅されることで加工ヘッドと機体間の相対振動が発生する。これによって加工精度が悪化するリスクがある。このため, 整備場にて採取した床振動データを用いてマニピュレータの振動応答解析を行い, マニピュレータの最適な構成の検討を進めている。さらに, 相対振動をキャンセルするアクティブ除振システムの開発を進めている (Fig. 7)。

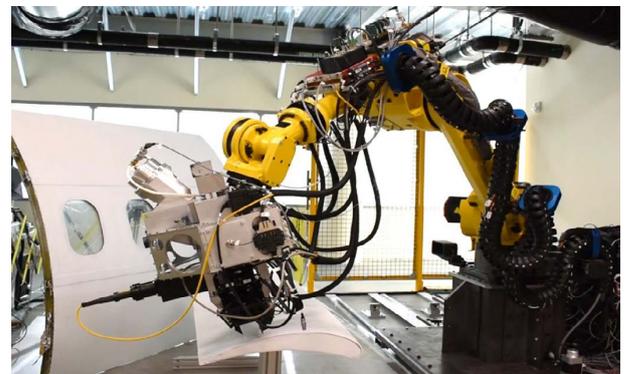


Fig. 7 Riblet processing technology development for large objects

4 空力性能評価 (風洞実験)

施工したリブレットによってどれだけの燃費削減効果を得られるかは空力性能によって決まる。空力性能はリブ

レット形状、形状精度、適用箇所、適用面積に依存する。形状に関しては効果が高く、かつ、施工性、耐久性に優れたリブレット形状の研究が各社で進められている [15], [16]。形状精度に関しては理想形状からの形状変化が及ぼす影響について実験、解析両面で様々な研究がおこなわれている [17]。また、効果を生みやすい場所に対し、場所によって異なる最適リブレット形状設計を実現するCFD解析技術や、広い範囲に対して適用可能で、高い形状精度を実現できる施工技術の開発が求められている。航空機の機体表面のどの部位にでも施工できたとした場合、胴体よりも主翼の方がリブレット施工面積当たりの抵抗低減効果が大きいという研究報告がなされている [18]。

ニコンはレーザー施工リブレットの抵抗低減効果に関する検証を宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」）と共同で進めている。JAXAが設計したリブレット形状を、ニコンがレーザー施工技術により作成し、JAXA所有の風洞（Fig. 8）において抵抗低減効果の評価を行っている。計測手法はピトーレイクを用いた境界層内の速度分布計測である。また、JAXAがDirect Numerical Simulation（DNS）を用いて設計した次世代高効率リブレット形状での効果検証も行っている。これまでに、従来型の台形溝リブレットで5%以上の抵抗低減効果を確認しており、さらなる効果改善のため、リブレット形状精度の改良を進めている。

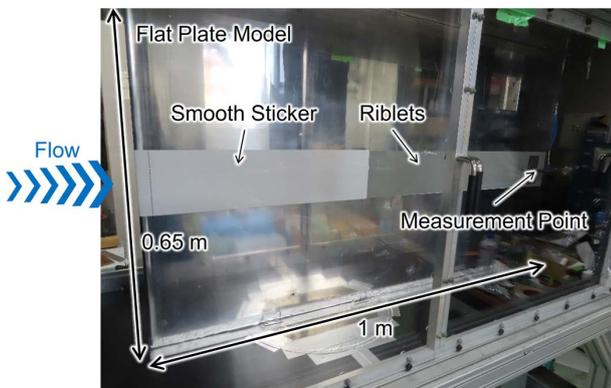


Fig. 8 Riblets on the flat plate model installed in the wind tunnel test section

5 耐久性評価（飛行試験）

前章で述べた通り、リブレットの空力性能はリブレットの形状に応じて変化することが分かっている。よって、施工したリブレット形状が航空機の実運用環境においてどれだけ初期形状を維持できるかによって長期的な燃費改善効果は変化する。機体上のリブレットがさらされる環境は極めて特殊である。高度 10000 m を巡航時、機体は -50°C の大気中を時速約 900 km で飛行し、高強度の紫外線にさらされる。汚染の観点ではオイル、グリース、エンジン排気ガス、黄砂などの大気汚染物質、離着陸時の泥はね、タイヤ摩耗による飛散にさらされる。定期的実施される機体

洗浄に対する耐久性も求められる。我々はこのような実運用環境におけるリブレットの耐久性を評価するため、国内主要エアライン 2 社、および、JAXA と協業で飛行実証試験を進めている。

ニコンは全日本空輸株式会社（以下「ANA」）と 2022 年 10 月よりリブレットフィルムを機体表面に試験装着した合計 2 機の Boeing787 型機の運航を開始し（機体番号：国際線 JA871A、国内線 JA874A）、形状を定期的に測定する耐久性飛行試験を行っている。リブレットフィルムを試験装着した航空機の運航は、日本の航空会社として ANA が初めてとなる。当該機体では、運航中、気流の激しい部分である「主翼付け根付近」と「胴体上面」に、ニコンがレーザー技術により施工した 155 mm 角のリブレットフィルムをそれぞれ 6 枚ずつ、合計 12 枚を試験的に装着している（Fig. 9）。今後は、数年規模の長期間運航における各種データを取得し、リブレットフィルムの耐久性評価をはじめとした継続的検証を行っていく。なお、機体装着から 100 日以上経過した時点（JA871A：2023 年 1 月、JA874A：同年 3 月）においても有意な形状変化がないことを確認している。

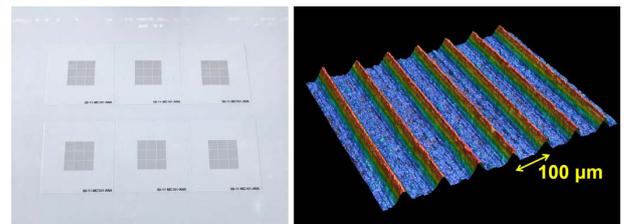


Fig. 9 Riblet film attached to the fuselage and its surface shape

更にニコンは日本航空株式会社（以下「JAL」）、JAXA と共同で、世界で初めて、機体外板の塗膜表面にレーザーによって直接リブレットを施工した航空機による飛行実証試験を 2022 年 10 月より開始した。リブレット形状の研究、開発を行う JAXA が、ニコンのレーザー加工技術に着目し、JAL グループが所有する航空機の運用経験、および、機体塗装知識や経験を用いてリブレットの実機適用に向けた取り組みを推進している。Boeing737-800 型機（機体番号：JA334J）の機体胴体下部のサービスパネル上に、ニコンのレーザー加工技術を活用した直接施工により 75 mm 角のリブレットを 2 面施工し（Fig. 10）、形状を定期的に測定する耐久性飛行試験を行っている。2023 年 4 月時点で機体装着から 150 日以上が経過し、飛行による有意な形状変化がないことを確認している。この評価においてニコンは、空港内整備場においてサービスパネルに対するリブレット施工を行うため、可搬型のレーザー加工機を開発した。この加工機にて施工したリブレット加工サンプルを用いた塗膜の付着性試験、美観性試験、ヒートダメージチェック等の基礎評価を行い、レーザー施工による塗膜への影響がない事を実証した。これらのエビデンスを基に、機体への施工に対

し技術的な懸案はないとの見解を Boeing より取得した。

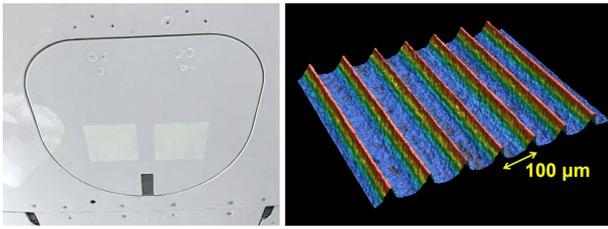


Fig. 10 Riblet application area (2 locations) and its surface shape

6 まとめ

航空機へのリブレット技術適用に向けたニコンの取り組みを紹介した。ニコンは独自のレーザー加工技術を活用し、航空機やタービンブレードなど、様々な対象に適したリブレットを素材表面に直接加工するほか、リブレット加工されたフィルムを装着することによってエネルギーロス低減を実現していく。さらに、ニコンが得意とする光学技術やレーザー加工技術にモビリティを組み合わせることで、将来的には自律制御の加工機が、航空機や風力タービンブレードなどの大型な対象物に自ら近づき、自動でリブレット加工を行う、そんな未来を実現したいと考えている。ニコンは、リブレット加工技術を活かした事業開拓を進め、燃費改善や CO₂ 排出削減などを通じ、持続可能な社会の実現に貢献していく。

引用文献

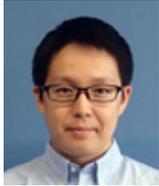
- [1] 三宅裕, “壁乱流の渦”, *ながれ*, vol. 22, no. 1, pp. 29–34, 2003.
- [2] 鈴木雄二, 笠木伸英, “壁面乱流の知的能動制御”, *セーブレーション・レビュー マイクロフローセンサ特集号*, pp. 50–57, 2001.
- [3] D. W. Bechert, G. Hoppe and W.-E. Reif, “On the drag reduction of shark skin,” in *Proc. 23rd Aerospace Sciences Meeting*, 1985, doi: 10.2514/6.1985-546.
- [4] D. W. Bechert, M. Bartenwerfer, G. Hoppe and W.-E. Reif, “Drag reduction mechanisms derived from shark skin,” in *Proc. 15th Congr. ICAS*, Sep.1986, pp. 1044–1068.
- [5] B. Dean and B. Bhushan, “Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A Review,” *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, vol. 368, no. 1929, pp. 4775–4806, 2010.
- [6] D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J. G. T. van der Hoeven and G. Hoppe, “Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry,” *J. Fluid Mech.*, vol. 338, pp. 59–87, 1997.
- [7] “戦略的省エネルギー技術革新プログラム 省エネルギー技術開発事業の重要技術に係る周辺技術・関連課題の研究 革新的リブレットによる高速移動体の省エネルギー化技術の調査研究,” 成果報告書 2018年3月, NEDO, 2018.
- [8] P. A. Leitl, V. Stenzel, A. Flanschger, H. Kordy, C. Feichtinger, Y. Kowalik, S. Schreck and D. Stübing, “Riblet surfaces for improvement of efficiency of wind turbines,” in *Proc. AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, doi: 10.2514/6.2020-0308.
- [9] P. A. Leitl, E. Göttlich, A. Flanschger, A. Peters, C. Feichtinger, A. Marn and B. Reschenhofer, “Numerical investigation of optimal riblet size for TCF strut flow and their impact on the performance,” in *Proc. AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, doi: 10.2514/6.2020-0307.
- [10] P. A. Leitl, M. L. Garcia De Albeniz and A. Flanschger, “Nano- and microstructured riblet surfaces for centrifugal industrial compressors,” in *Proc. Conf. Sustainable PolyEnergy Generation and HaRvesting (SUPEHR)*, 2019, pp. 32–38.
- [11] 稲崎慎也, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, P. A. Leitl, A. Flanschger, S. Schreck and R. Benauer, “超小型ジェットエンジンの最適リブレット計算とそのレーザー加工, およびエンジン性能での効果検証,” 第49回日本ガスタービン学会定期講演会, A-25, 2021.
- [12] “エコな航空機を実現するための空力技術,” 平成23年度, IADF.
- [13] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben and A. Tünnermann, “Femtosecond, picosecond, and nanosecond laser ablation of solids,” *Appl. Phys. A*, vol. 63, no. 2, pp. 109–115, 1996.
- [14] M. C. Richardson, “New opportunities with intense ultrashort-pulse lasers,” in *Proc. of SPIE*, vol. 1410, 1991.
- [15] Kie OKABAYASHI, “Direct numerical simulation for modification of sinusoidal riblets,” *JFST*, vol. 11, no. 3, 2016.
- [16] B. R. Smith, P. Yagle and P. D. McClure, “Computational simulation of staggered 3-D riblets for skin friction drag reduction,” *AIAA SCITECH 2023 Forum*. doi: 10.2514/6.2023-1763.
- [17] P. A. Leitl, C. Feichtinger, G. Schatzdorfer and A. Flanschger, “Numerical study of riblet defects and their impact on performance,” *AIAA SCITECH 2023 Forum*. doi: 10.2514/6.2023-1764.
- [18] P. A. Leitl, A. Flanschger, *et al* (2021) “Investigation of the impact of different Riblet layouts on a long- and medium-range Aircraft model,” *AIAA SCITECH 2022 Forum*. doi: 10.2514/6.2022-0919.

小野明人 Akito ONO
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

懸田隆史 Takafumi KAKEDA
次世代プロジェクト本部 第二開発部
2nd Development Department
Next Generation Project Division



小野明人
Akito ONO



懸田隆史
Takafumi KAKEDA

大規模歪に対応した Roll-to-Roll マスクレス露光装置の開発

堀 正和, 内藤一夫, 中野貴之, 伊倉良幸, 橋場成史, 鬼頭義昭

Development of Roll-to-Roll Maskless Exposure System for Large-Scale Pattern Deformation

Masakazu HORI, Kazuo NAITO, Takayuki NAKANO, Yoshiyuki IGURA, Seiji HASHIBA and Yoshiaki KITO

フレキシブル基材の上に電子デバイスを作製したフレキシブルエレクトロニクスは、その柔軟性により従来のシリコンプロセスでは実現できなかった新しい機能が実現でき、多くの研究・応用がなされている。その製造技術として基材を連続的に処理する Roll-to-Roll 技術を用いると基材のハンドリング難易度が下がり歩留まり・生産性の向上が見込まれている。さらに Roll-to-Roll 技術は長さ方向のサイズ制限を受けず、長大なデバイスが生産できるため、鋭意研究・開発が進んでいる。

ところが、ポリマー材料を始めとするフレキシブル基板は従来のガラス、シリコン等と比較して熱的・機械安定性が格段に低く、電子デバイスの製造工程で従来と比較して100倍以上の大きな変形が生じることが分かっている。従来の露光装置ではこの大きな変形量を補正できず、フレキシブル基材上に電子デバイスを作製することは困難であった。

そこで、基材の変形量に対応できる補正ストロークの大きなマスクレス露光装置の開発を行った。この露光装置は基材の変形計測と露光を並列処理し連続的に露光が行える。開発した装置を使用して、A3サイズフィルムと Roll-to-Roll フィルムに対して露光評価を実施した。A3サイズ基板で実際のデバイス作製に近い条件において重ね合わせ $\pm 1.8 \mu\text{m}$ 、Roll-to-Roll 基板で重ね合わせ $\pm 4.0 \mu\text{m}$ の精度を達成したので詳細を報告する。

Flexible electronics, which is fabricated with electronic devices on flexible substrates, have been researched and applied, because of flexibility which was not realized in conventional silicon processes. By using Roll-to-Roll (R2R) technology, which continuously processes the substrate material, it is expected to reduce the difficulty of handling the substrate material and improve yield and productivity. In addition, R2R technology has merits for long-sized devices which is not subject to size restrictions in the length direction. However, flexible substrates such as polymer materials can be easily deformed during electronic device manufacturing process, like 100 times larger than conventional glass or silicon substrates, because of mechanical and thermal instability. It is difficult to fabricate electronic devices on flexible substrates with conventional exposure apparatuses, because they cannot compensate for large amount of deformation.

We have developed a maskless exposure system with a large correction stroke that can correspond to the amount of base material deformation. This exposure apparatus processes deformation measurement of the base material and exposure in parallel, and exposure is performed continuously. Exposure evaluation was performed for A3 size film and Roll-to-Roll film. We have achieved an overlay accuracy of $\pm 1.8 \mu\text{m}$ for A3 size substrates and $\pm 4.0 \mu\text{m}$ for R2R substrates, so we will report the details.

Key words 露光装置, マスクレス露光装置, フレキシブルエレクトロニクス, 重ね合わせ, ロールトゥロール exposure system, maskless exposure system, flexible electronics, overlay accuracy, roll-to-roll

1 はじめに

硬い基板の上に電子部品を形成してきた従来の電子デバイスに対して、柔らかい基板の上に作製された電子デバイスはフレキシブルエレクトロニクスと呼ばれている。フレキシブルエレクトロニクスは軽く、薄く、柔軟であり、伸縮性も持たせることが可能であるため従来のエレクトロニクスにない応用が期待されている [1]。例えば、基材が柔

軟で曲げや収縮に対応でき生体親和性に優れるため、人体情報を取得するための人体と一体となった人工皮膚や [2]–[4]、軽量で割れに強いモバイル用途のディスプレイや曲面ディスプレイなど幅広い分野での研究がなされている [5]–[7]。

基材として使用されるポリマー基板（以下、フィルム基板）は薄く・柔軟であるがためにハンドリングが課題となっている。ハンドリングの解決方法の一つとして、硬い

基材と張り合わせて従来の工程でデバイスを作製し最後に剥離する方法が提案されている [8]–[10]. この方法は剥離工程が追加に必要な事と、デバイス作製時に発生した応力が剥離工程で一度に発生してしまうことから膜構成の工夫が必要となりコストが増大する要因となる. そこで別の解決方法として、印刷などで古くから使用されている Roll-to-Roll の搬送技術を使う方法が検討されている. Roll-to-Roll の搬送技術とは、ロール状の基材を巻きだして、ローラーでガイドして再びロール状に巻き取る搬送技術のことであり、連続的にシワや座屈を発生させずに基材を取り扱うことができ、生産性の向上や歩留まりの向上が期待できる. また、Roll-to-Roll 工程は連続的にフィルムを取り扱うため、フィルム基板の送り方向がデバイスサイズの制約を受けず、従来にはない長大なデバイスの作製も考えられる [11]–[13].

このような Roll-to-Roll 技術でフィルム基板上にデバイスを作製する試みは広くなされてきたが、主に単層の配線工程やサイズの大きな電極構造の作製などの範囲にとどまり、電子デバイスを試作した例は限られていた. これは、フィルム基板は従来のガラス、シリコン等と比較して熱的・機械的安定性が格段に低く、電子デバイスの製造工程で従来と比較にならない大きな変形が生じることに起因する. 従来の露光装置などではこの大きな変形量を補正できず、フィルム基板上に直接電子デバイスを作製することが困難であった [14].

そこで本課題を解決するためフィルム基板の大きな変形量に対応できるマスクレス露光装置の開発を行った. Fig. 1 に開発した装置の写真を示す. この露光装置は Roll-to-Roll でフィルム基板を搬送しながら、その変形計測と露光を並列処理し搬送を止めることなく連続的に処理できる装置となっている.

フィルム基板上にパターンを形成する上で、解決すべき課題が存在する. 本報告では、装置開発の技術的な課題とそれに対する解決コンセプトの説明を行い、次に開発した装置の概要と露光システムとアライメントシステムについて述べ、それらを評価した結果を示す. 最後に今回開発したマスクレス露光装置を用いて試作したサンプルデバイスと Roll-to-Roll での露光結果を報告する.



Fig. 1 開発した直描露光装置と搬送ユニットの写真

2 技術的課題と対策

フレキシブル基板上に高い重ね合わせ精度での露光を実現するために、以下のコンセプトで装置開発を行った.

①フィルムのハンドリングに対する課題

機械的強度が低いフィルムは搬送時のわずかな張力変動にも敏感に反応して変形を起こしてしまう. このためフィルムをアライメントしてから露光するまでの搬送時に外力が加わるとフィルムは変形を起こし、高精度の重ね合わせ露光が実現できない. アライメントから露光までの間の搬送中はフィルムが変形しないように保持をする必要がある. 一般的な露光装置では平面ステージに基板を吸着させてアライメントと露光を行うが、面で吸着を行うため、薄くて柔軟なフィルムを吸着する場合は吸着時に大きな変形やシワが発生することが問題となってくる. そこで、大きなローラーにフィルムを巻き付かせて摩擦力でフィルムを保持しつつ、ローラーの回転でフィルムを搬送する構成をとる事とした. ローラーにフィルムが接触する瞬間は、線接触で固定されていくため変形が最小限にとどめられる. ロール上でアライメント測定を行い、そのままロール上で露光を実施する構成となるため、センサ類の配置もすべてロールの曲率に沿った配置とした. ローラーはフィルムの搬送用ローラーとしてもそのまま使用するため、Roll-to-Roll で連続的にフィルムを処理できる構成をとっている.

②大きなフィルム変形に対する課題

始めに述べたように、フィルム基板は、工程時の熱や膜応力などによってガラスの100倍の 1000 ppm 近く変形を起こす. また、パターン作製時の加工で部分的に応力が発生し、パターン形状に依存した局所的な非線形変形を引き起こす. そこで、発生する変形に対応でき補正ストロークを大きく取ることが可能なマスクレスの直描露光方式を採用することとした. マスクレスの直描露光方式にはいくつか種類があるが、露光をローラーの曲面上で行う事としたため、面で露光を実施する方式の場合、ロールの稜線から外れた両端分は焦点深度から外れてしまう. そこで、面で露光を行わず一次元の直線で露光することが可能なポリゴンによるスキャン方式とした.

③生産性に対する課題

マスクレス露光装置は画像データを元に露光を実施するため、フィルム基板の変形を測定し、元画像をデジタル的に補正し露光を実施することで大きな補正に対応できる. しかし、測定から画像生成・画像展開には時間が掛り、連続的に処理を実施する時に高い障害となる. また、画像をデジタル的に補正する場合、画像が量子化で段ずれを起こし、配線の断線などにつながる可能性がある. 画像の解像度を上げる事で量子化の影響は低減できるが、データサイズが解像度の2乗に比例して増加する事から、画像処理にさらに時間が掛ってしまう. そこで、露光画像データは変

更せずに光学・機械的に露光パターンを变形させる方式を採用した。また、現実的に量産が行える露光速度を目標とする。詳細に関しては装置説明にて行う。

3 開発装置の詳細

3.1. 装置の全体構造概要

開発した、Roll-to-Roll 直描露光装置の全体構造概略を Fig. 2 に示す。

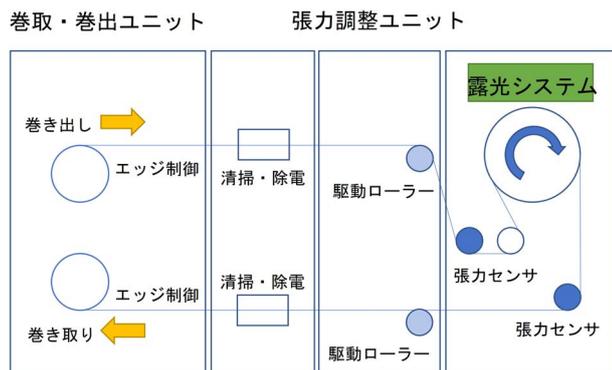


Fig. 2 露光装置の全体構成概略図

ロールから巻き出されたフィルムは、露光ユニットを経由して再びロールとして巻き取られる構成となっている。巻き出しロールと巻き取りロールを同じ側に設置し全体としてU字型にフィルムを搬送し装置の全長を短くしている。

ロールから出た直後のフィルムのエッジをセンサで測定し、フィルムのエッジ位置が装置に対して常に一定となるように巻き出しロールを動かす。これにより露光ユニットに導入されるフィルムの位置が安定化し、蛇行の少ない状態で露光を実施できる。装置に搭載できるロールフィルムは 100 μm 厚のフィルムの場合、最大 200 m まで対応できる。

フィルム基板はロールとの擦れ、剥離などにより帯電する。帯電したフィルムはフィルム上のデバイスを破壊したり空気中のパーティクルを引き寄せたりし、欠陥の原因となる。そのためフィルムを除電するユニットとゴミを除去するための清掃ユニットも併せて取り付けている。フィルム基板は不導体であり複数のローラーで搬送されるため特に除電は重要となってくる。

露光ユニットにあるローラーの回転速度が装置全体の搬送速度となるためメインローラーと呼ぶ。このメインローラーの回転速度を一定に制御することにより、露光位置や露光量の安定性を確保している。フィルムをメインローラーに巻き取る前後のローラーには張力センサがついており、メインローラーに導入されるフィルムの張力を測定している。フィルムの張力は張力調整ユニットによりメイン

ローラーと駆動ローラーの速度差によって一定に制御し、フィルムの搬送方向の伸縮を一定に保っている。

露光システムは連続的に搬送されてくるフィルムに対してアライメント計測を並行で行いながら、アライメントで計測されたパターンの位置に合わせて露光を行う。露光システムの詳細を次に述べる。

3.2. 露光システム

開発した露光システムの概略を Fig. 3 に示す。露光システムは、露光を行う露光モジュール、フィルム形状の計測を行うためのアライメント顕微鏡、メインローラーの位置を検出するためのエンコーダー読み取りヘッドとエンコーダーリングで構成されている。センサ等の構成部品はメインローラーの曲面に沿った配置をとっている。

全体の露光幅を拡大するために、露光モジュールを2列の千鳥配置で計6つ配置している。1つの露光モジュールの露光幅は 50 mm であり、6つの露光モジュールで合計 300 mm 幅の露光領域を確保している。露光モジュールはポリゴンを用いた直描露光方式であり、線状のパターンを露光するため、曲率を持つローラー上でもデフォーカスを生じさせず露光が可能となっている。

直描露光の単位画素サイズは 2 μm □とした。アライメント顕微鏡を各モジュールの継ぎ部に計7本配置し、露光幅全体でアライメント計測が可能となっている。

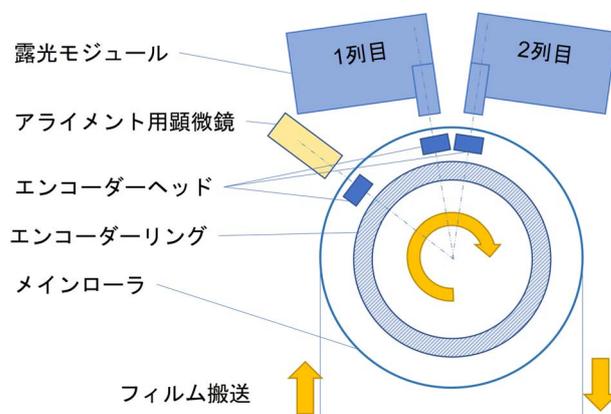


Fig. 3 露光システムの側面概略図

メインローラーの回転量を読み取るために、メインローラーの両側面にエンコーダーリングを配置した。2列配置の露光モジュールに合わせて、エンコーダーヘッドも2列配置としアッペの原理を満たした構成とし測定誤差を低減している。エンコーダーは3相タイプを採用し、それぞれのエンコーダーヘッドはエンコーダーリング上の共通のZ相を用いて各エンコーダーの原点校正がされる。Fig. 3 を平面に展開したものを Fig. 4 示す。

ポリゴンミラーを用いた直描露光方式の場合、露光光がポリゴンミラーの角の部分にかかる間は露光が出来ないため、ポリゴンミラーを100%使用することができない。Fig.

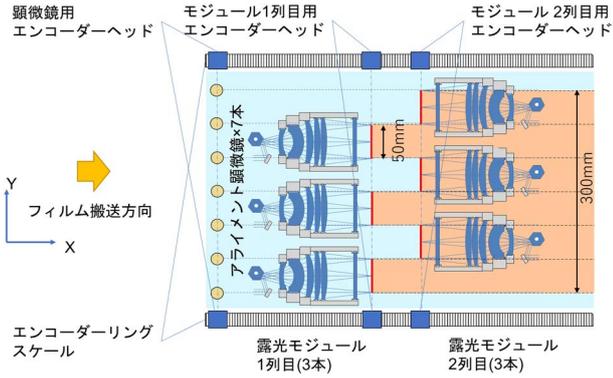


Fig. 4 露光システムの展開概略図

5にポリゴンの利用可能角度と露光タイミングチャートの模式図を示す。下記例では八角形のポリゴン1面の内、例えば1/3の領域しか露光に使用できる角度を確保できない場合、その光源の利用効率は1/3となってしまう。そこで光源を各モジュール間で共通化し、時間分割で3つのポリゴンに分配する方式とし光源の利用効率を高める。そのため各ポリゴンの位相を15度ずつシフトさせて、露光可能なポリゴンの角度が時間的に一致しないように調整する。これにより常にいずれかのポリゴンが露光状態となり、光源利用効率がほぼ100%と高い生産性を確保できる。

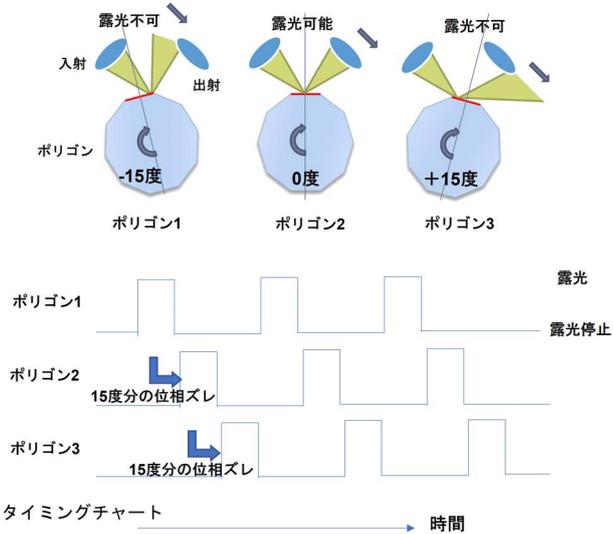


Fig. 5 ポリゴンの高利用率化

3.3. 露光結果

本露光システムを用いて実際に露光した解像力チャートの写真を Fig. 6 に示す。Cu を 100 nm 蒸着した PET フィルム上にフォトレジスト OFPR-5000LB（東京応化工業，神奈川県）を 1 μm コートし，露光を行った。露光後，現像を濃度 2.38% の水酸化テトラメチルアンモニウム (TMAH) で 1 分間行った。Fig. 6 は装置に登録した BMP 形式の画像データを元に露光されており，各モジュール最小で解像力 4 μm L/S が解像していることが確認できる。幅 300 mm の範囲で，実用的には L/S = 6 μm の任意画像デー

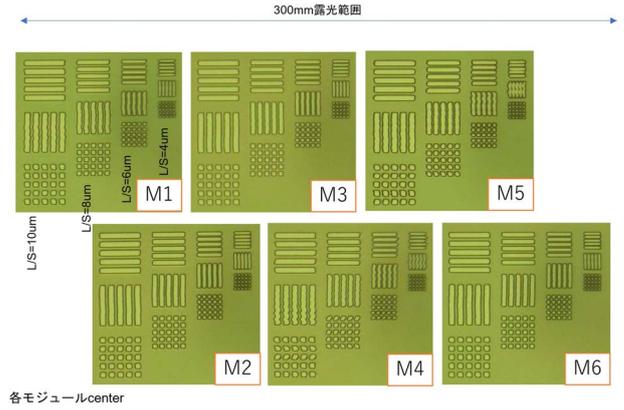


Fig. 6 解像力チャートパターンの露光結果

タを元とするパターンを形成ができることが確認できた。

3.4. 露光パターンの変形手法

開発した露光装置は，露光画像データは変更せずに描画位置を光学的・機械的にリアルタイムに変更させることで露光パターンの変形を実現している。6つの各露光モジュールで分割された領域において，ポリゴンミラーでスキャンされる露光線をリアルタイムに変化させることで，複雑で大きな変形を補正する。変化させる成分は，Fig. 7 に示す4つの成分（シフトY・Y倍率・X倍率・回転）に分けられる。それぞれの成分での変形手法について以下に述べる。

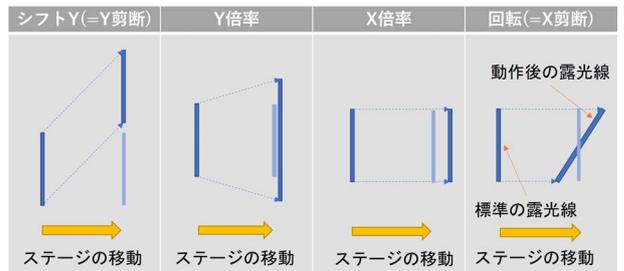


Fig. 7 各補正動作のイメージ

3.4.1. シフト Y (=Y 剪断)

Y 方向はポリゴンスキャンの方向となっている。ポリゴンスキャンの開始タイミングに時間的なオフセットを入れることで露光位置を Y 方向にシフトさせることができる。ローラーの回転とシフト Y 動作を組み合わせることで Y 剪断の変形が可能となっている。Fig. 8 (a) にシフト Y を連続的に変更しながら露光を行った結果のベクトル図を示す。

3.4.2. Y 倍率

Y 倍率は，光源の発光周期を変更させることにより露光間隔を僅かに変更させて，全体としてスケーリングを発生させる。周期変調はポリゴン 1 面毎に変更が可能であり，連続的に倍率を変化させながら露光が行える。Fig. 8 (b) に Y 倍率を連続的に変更させた結果のベクトル図を示す。

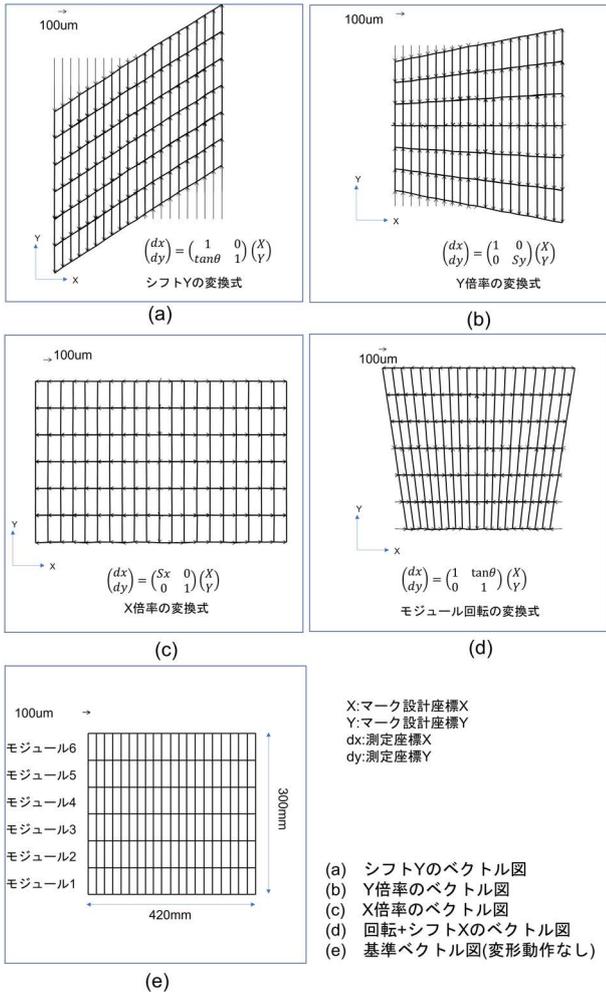


Fig. 8 パターン変形露光結果のベクトル図

3.4.3. X倍率

X方向は、ローラーの回転方向となっている。ローラーの速度とポリゴンの回転速度の関係を変更する事でX倍率の変更を行う。例えば、ステージが等速で動いている状態で、ポリゴンの回転数を上げると露光密度が増えるため露光パターンは縮み、逆に回転数を下げるとパターンは伸びる。Fig. 8 (c) にX倍率をかけた結果のベクトル図を示す。

3.4.4. 回転 (=X 剪断) / シフト X

50 mm の露光範囲を持つモジュールの中心を回転基準として機械的にモジュールを回転できる機構が搭載されている。この機構によって露光パターンの回転を行うことができる。ローラーでフィルムを搬送する動きと組み合わせることで、X剪断方向の変形となる。

また、モジュールには露光位置をX方向にシフトさせる光学素子が搭載されている。この素子を露光中に駆動させることで、モジュール毎に個別のシフトXを行うことができる。

Fig. 8 (d) に連続的にモジュールを回転させた結果のベクトル図を示す。各モジュールの回転量は同一だが、シフトXと組み合わせることで台形の変形が可能となる。

Fig. 8 に示した各変形動作のリニアリティの測定結果を

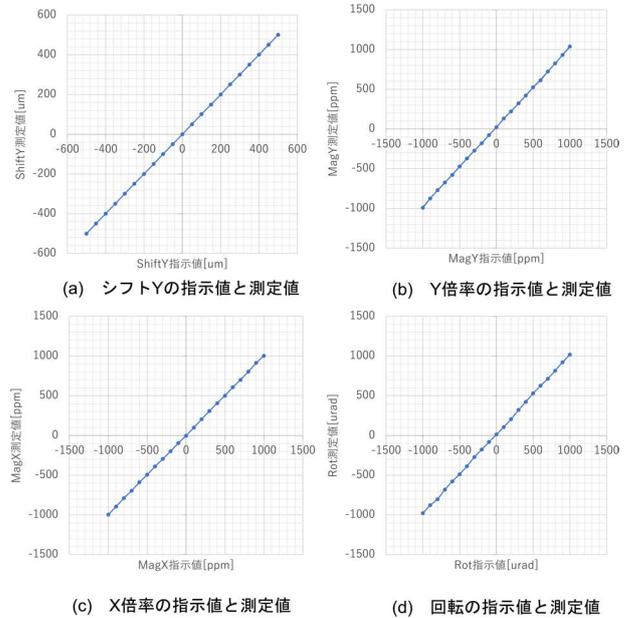


Fig. 9 露光指示値と実測値の関係

Fig. 9 に示す。X軸は露光機目標値で、Y軸が実際に測定した変形量を示している。Fig. 9 (a) のシフトYは $-500\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ の範囲、Fig. 9 (b) のY倍率は $-1000\text{ppm} \sim 1000\text{ppm}$ の範囲、Fig. 9 (c) のX倍率は $-1000\text{ppm} \sim 1000\text{ppm}$ の範囲、Fig. 9 (d) の回転は $-1000\mu\text{rad} \sim 1000\mu\text{rad}$ の範囲でリニアに動作している事が確認できる。

4 重ね合わせ露光

開発した装置のアライメント計測について以下に述べる。フィルムを搬送させながらエンコーダー位置と同期して計測を行うことにより、フィルムのX方向の位置を計測する。アライメント顕微鏡はY方向に配列されているため、顕微鏡基準でフィルムのY方向の計測を行う。アライメント顕微鏡で測定したマークの設計値と計測したマークのズレ量から、フィルムの変形量の計算が可能となる。この動作は各モジュールで行われるが、アライメントカメラは隣り合うモジュールで共通のものを使用するため、モジュール間で連続的な計算が可能となっており、露光モジュールの継ぎ部やアライメント列の切り替えが発生してもパターンの連続性を担保している。アライメント計測結果からパターン変形の各成分の補正値を算出した後は、その補正値に従って露光ユニットが露光を実施する。Fig. 10 にアライメントの計算モデルを示す。アライメント顕微鏡の計測結果と設計座標からモデル式を用いて、補正量を計算する。この計算を列毎に繰り返し実施する事で、Roll-to-Rollのような連続パターンにも対応できるようになっている。

4.1. 重ね合わせ精度評価と結果

アライメント計測および重ね合わせ露光を評価した結果

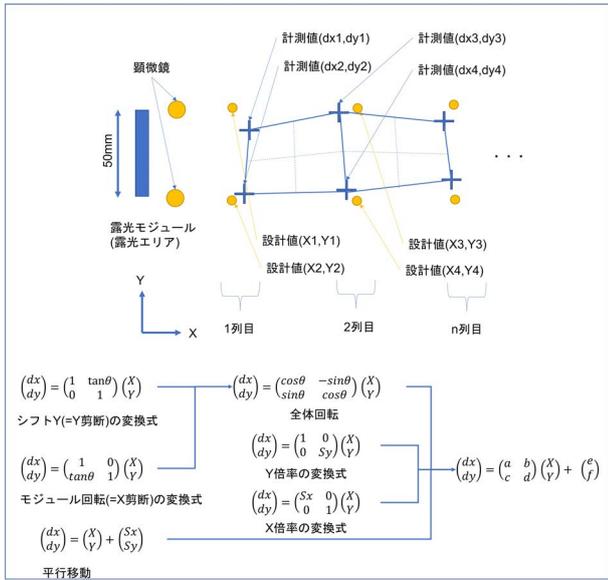


Fig. 10 アライメントの計算モデル

について述べる. A3サイズのフィルムに積層構造体を作製した際の結果と, Roll-to-Rollでフィルムを搬送し積層構造体を作製した結果をそれぞれ示す.

4.1.1. A3サイズフィルムでの評価結果

A3サイズのPIフィルム上にAl/SiO₂/Al/保護膜等からなる多層構造を作製した. 各レイヤーで金属配線の加工・開口パターンの加工をフォトリソグラフィーで実施した. また, 途中のレイヤーでは200度で1時間のアニールも実施した. 保護膜を加工する際のフィルムの形状のベクトル図 Fig. 11 (a) と, 重ね合わせ露光を実施した際の誤差量を測定したベクトル図 Fig. 11 (b) を示す.

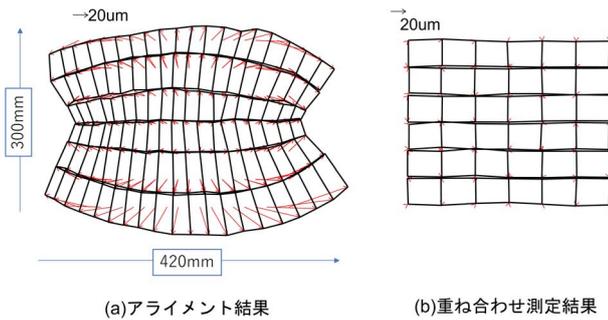


Fig. 11 A3フィルムへの重ね合わせ精度評価結果

Fig. 11 (a) のフィルム形状は, 膜応力・アニール等によってフィルムが長手方向で収縮形状, 短手方向では膨張形状をとっていることが確認できる. 通常の露光装置ではこのような形状に対して重ね合わせ露光をすることは困難であるが, 開発した露光装置はフィルムの変形に沿って露光が行えている. 露光したフィルムの重ね合わせ誤差量のヒストグラムを Fig. 12 に示す. 重ね合わせ精度は平均+3σでX, Yともに±1.8μmとなっている. また, ほかのすべてのレイヤーで装置はフィルムの変形に追従し重ね合わせ露光を行えることが確認できた.

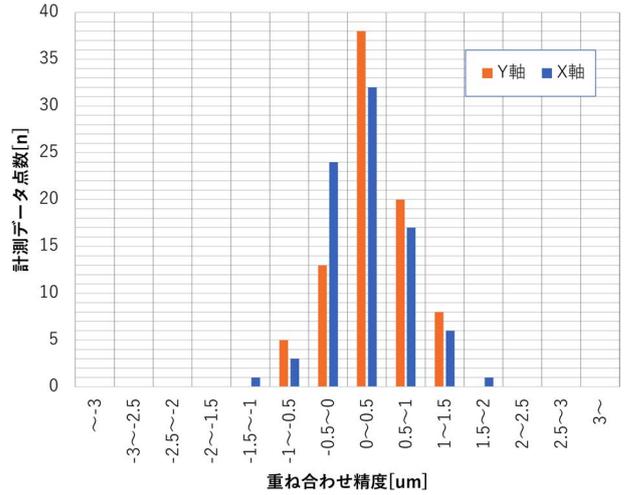


Fig. 12 A3フィルム重ね合わせ誤差量のヒストグラム

4.1.2. Roll-to-Rollでの評価結果

Roll-to-Rollで20mに渡り連続的にAl配線を形成した後, 絶縁層の成膜・アニールを実施した. この状態のフィルムに対してアライメントをしながらフォトリソグラフィーにて開口パターンを形成した. この時フィルム形状と, そのフィルムに対してアライメント露光を行った際の重ね合わせ露光の計測結果を Fig. 13 に示す.

X方向の伸び, およびY方向の蛇行成分, 工程起因と思われる変形がアライメント結果から見て取れるが, 重ね結

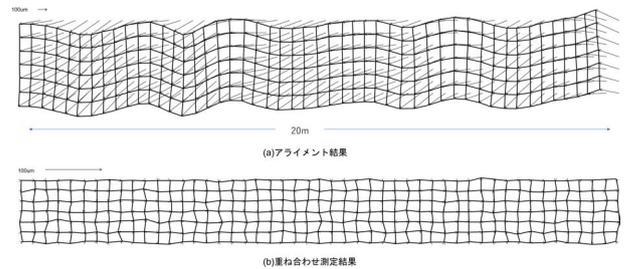


Fig. 13 Roll-to-Roll 露光時の重ね合わせ精度評価結果

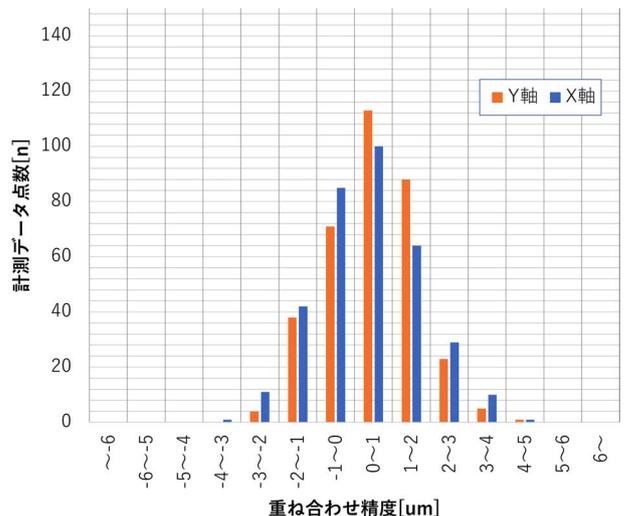


Fig. 14 Roll-to-Roll 重ね合わせ誤差量のヒストグラム

果は十分に補正され Fig. 14 に示すヒストグラムから重ね合わせ精度 $\pm 4 \mu\text{m}$ 以内となっていることが分かる。フィルムに対して以前もパターニングを行った結果を報告したが、その時よりもより実際の工程に近い条件で、高精度に長い距離パターニングができる事が確認できた [15]。

5 パターン作製例

露光装置を用いて積層構造、単層の配線パターンなど、広くフィルム上にパターンが形成可能である事が確認できた。Fig. 15 に実際に試作した長尺のパターンを示す。露光工程以外も Roll-to-Roll 工程に対応した設備を開発し、全 Roll-to-Roll 工程で作製した 20 m 以上の連続的なパターンとなっている。デバイスを試作する際には、各工程でプロセスチェックを行いパターン修正・変更などを実施するが、本装置はマスクレスの直描露光装置であるため、CAD データの変更だけで対応が行え、試作のサイクル、試行頻度を上げることが可能である。また、フレキシブルエレクトロニクスのようにフレキシブル性を利用したデバイスを作製する場合、対象の形状・用途に合わせたデバイス作製が重要となってくる。マスクレスであれば、画像データの更新で個々の用途に応じたオンデマンド製造が可能であり、長尺のフィルム内で複数の異なる形状のデバイス試作なども可能となる。任意のパターンの露光デモとして、富嶽三十六景の画像データから作製したパターンを Fig. 16 に示す。Fig. 16 (b) が元の原画であり、 $800 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ のサイズ

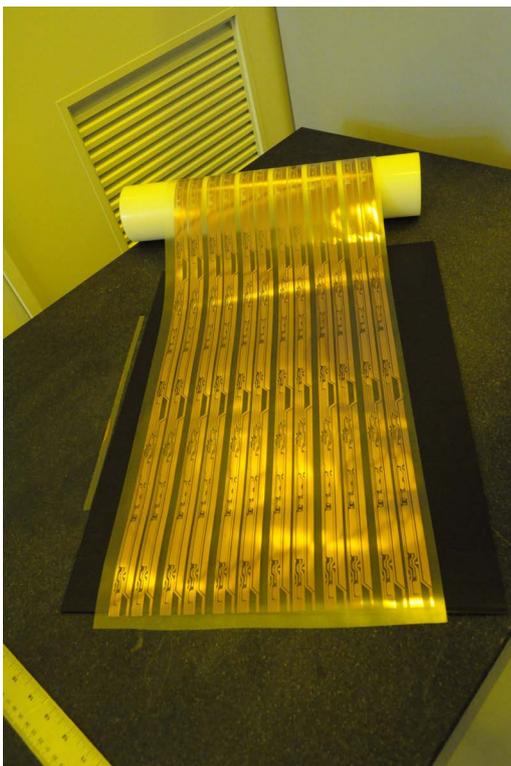


Fig. 15 試作した長尺パターン



(a)



(b)

Artist Katsushika Hokusai
Title Under the Wave off Kanagawa, also known as The Great Wave, from the series Thirty-Six Views of Mount Fuji (Fugaku sanjūrokkai)
Place Japan (Object made in)
Date 1826–1836
 The Art Institute of Chicago

Fig. 16 マスクレス露光機で露光した富嶽三十六景

として露光したものが Fig. 16 (a) となる。微小な領域に水しぶきまで確認できる緻密なパターンが得られていることが分かる。

6 まとめ

変形の大きなフィルムに対して高精度に重ね合わせ露光を行えるマスクレス露光装置を開発した。A3サイズのフィルムから 20 m 以上の長尺フィルムまで、高精細にアライメントが必要な積層構造フィルムを作製できることが確認できた。特に A3サイズでは成膜・アニール工程を経た変形の大きなフィルムに対して $6 \mu\text{mL/S}$ 以下のパターンを全面で $2 \mu\text{m}$ 以下の精度で重ね合わせできることが確認できた。また CAD データの変更のみで露光パターンを変更できるため、試作やオンデマンドのパターンに対して、特に有効な装置であることが確認できた。本露光装置を用いれば多種・多様なフレキシブル電子デバイスを、Roll-to-Roll 方式でオンデマンドに作製することができる。本装置がフレキシブルエレクトロニクスの発展へ寄与することを期待する。

引用文献

- [1] K. Kuribara *et al.* "Organic transistors with high thermal stability for medical applications," *Nature Communications*, Vol. 3, 723, 2012.
- [2] B. Wang *et al.* "Foundry-compatible high-resolution patterning of vertically phase-separated semiconducting films for ultraflexible organic electronics," *Nature Communications*, Vol. 12, 4937, 2021.
- [3] M. Kaltenbrunner *et al.* "Ultrathin, highly flexible and stretchable PLEDs," *Nature Photonics*, Vol. 7, pp. 811-816, 2013.
- [4] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano and H. Hosono, "Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors," *Nature*, Vol. 432, pp. 488-492, 2004.
- [5] L. Zhou, A. Wang, S. Wu, J. Sun, S. Park and T. N. Jackson, "All-organic Active Matrix Flexible Display," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, 083502, 2006.
- [6] I. Yagi *et al.* "A Full-Color, Top-Emission AM-OLED Display Driven," *SID 07 DIGEST*, Vol. 63-2, pp. 1753-1757, 2007.
- [7] M. Mizukami *et al.* "Flexible AM OLED Panel Driven by Bottom-contact OTFTs," *IEEE Electron. Dev. Lett.*, Vol. 27, pp. 249-251, 2006.
- [8] Y. Nakajima *et al.* "Improvement in Image Quality of a 5.8-in. OTFT-Driven Flexible AMOLED Display," *Journal of the SID*, Vol. 19, pp. 94-99, 2011.
- [9] M. Nakata *et al.* "Development of Flexible Displays Using Back-channel-etched In-Sn-Zn-O Thin-film Transistors and Air-stable Inverted Organic Light-emitting Diodes," *Journal of the SID*, Vol. 24-1, pp. 3-11, 2016.
- [10] T. Aoyama *et al.* "An 8.34-inch 1058-ppi 8K x 4K Flexible OLED Display," *SID 2017 DIGEST*, Vol. 24-3, pp. 338-341, 2017.
- [11] J. Yoon *et al.* "World 1st Large Size 18-inch Flexible OLED Display and the Key Technologies," *SID 2015 DIGEST*, Vol. 65-1, pp. 962-965, 2015.
- [12] J. Hong *et al.* "The First 9.1-inch Stretchable AMOLED Display Based on LTPS Technology," *SID 2017 DIGEST*, Vol. 5-5, pp. 47-50, 2017.
- [13] H. Shin *et al.* "Advanced OLED Display Technologies for Large-Size Semi-Flexible TVs," *SID 2017 DIGEST*, Vol. 45-2, pp. 609-612, 2016.
- [14] Y. Kito *et al.* "Direct Imaging Exposure Equipment with High Overlay Accuracy for Flexible Substrate in Roll-to-Roll Method," *Proceeding of IDW 16*, pp. 515-518, 2016.
- [15] Y. Kito *et al.* "Novel Direct Imaging Exposure System with High Productivity for Flexible Substrate in Roll-to-Roll Method," *Proceeding of IDW 17*, pp. 500-512, 2017.

堀 正和 Masakazu HORI
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

内藤一夫 Kazuo NAITO
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

中野貴之 Takayuki NAKANO
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

伊倉良幸 Yoshiyuki IGURA
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

橋場成史 Seiji HASHIBA
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

鬼頭義昭 Yoshiaki KITO
FPD 装置事業部開発統括部 先端技術開発部
Advanced Technology Development Department
Development Sector, FPD Lithography Business Unit

SPPC アレイ検出器を用いた共焦点超解像イメージング

大川潤也, 小森谷大介, 楠井雄太

Confocal Super-Resolution Imaging using SPPC Array Detector

Junya OHKAWA, Daisuke KOMORIYA and Yuta KUSUI

細胞は生き物の体を作る基本的な構成要素である。この数十マイクロメートル程度の大きさの細胞の中には、核、ミトコンドリア、小胞体、ゴルジ体などのたくさんのオルガネラ（細胞内小器官）や、無数の蛋白質が存在し、生命活動を維持するために機能している。オルガネラや蛋白質は蛍光染色が可能で、長年蛍光顕微鏡でイメージングされてきた。近年では、様々な細胞機能や病態生理のメカニズムをより正確に理解するために、より高い空間分解能での観察が求められるようになってきている。

共焦点レーザー顕微鏡システム AX/AX R は、焦点外の不要な光を取り除いた断層像を取得することが出来る蛍光顕微鏡であり、細胞の観察に使用されている。我々は、AX/AX R に超解像検出器ユニット NSPARC (Nikon SPatial ARray Confocal) を新たに搭載した。NSPARC は SPPC アレイという特殊な検出器を用いることで、従来の共焦点顕微鏡の長所を損なうことなく、空間分解能を向上させることが出来る。本稿では、まず NSPARC の空間分解能向上の光学的原理を説明する。続いて、検出器に使用している SPPC アレイ検出器について説明する。最後に、生物サンプルでのアプリケーション例を紹介する。

Cells are the basic elements of living organisms. Cells, which are several tens of micrometers in size, contain numerous organelles such as the nucleus, mitochondria, endoplasmic reticulum, and Golgi apparatus, including countless proteins that function to maintain life activities. Organelles and proteins can be fluorescently stained and have been imaged with a fluorescence microscope for several years. To understand the physiological mechanism more accurately, higher spatial resolution imaging is required.

The confocal laser microscope system AX/AX R is a fluorescence microscope that can acquire thin optical sectioning images without unnecessary out-of-focus light, and is utilized to image cells. We installed a new super-resolution detector unit NSPARC (Nikon SPatial ARray Confocal) on the AX/AX R. NSPARC employs a special detector called an SPPC array to improve spatial resolution without sacrificing the advantages of conventional confocal microscopes. Here, we first explain the optical principle of improving the spatial resolution of the NSPARC, and then explain the SPPC array detector. Finally, we introduce an application model for biological samples.

Key words 共焦点顕微鏡, 超解像イメージング
confocal microscopy, super resolution

1 はじめに

共焦点顕微鏡 [1] が観察対象とするのは、数百 μm ~ 数 mm 程度の組織切片や細胞塊から数 $10 \mu\text{m}$ の細胞 (Fig. 1 (a)), さらに一番小さいものでは数 100 nm のオルガネラと呼ばれる細胞内の微細構造である。これらのオルガネラは蛍光蛋白質や蛍光色素で染め分けることができ、共焦点顕微鏡で細胞内での動態を観察することが出来る (Fig. 1 (b-e)). オルガネラの構造や細胞内局在は、細胞機能や病態生理と密接に関係しており、ライフサイエンスや創薬をはじめとした産業の分野で観察対象になっている。

しかし、通常の共焦点顕微鏡では、オルガネラの外形を捉えることは出来るが、微細な内部構造を鮮明に捉えるには、後述するように時間分解能の大幅な低下や光ダメージの増加といった大きなトレードオフを伴う問題点があった。そこで我々は、これらのトレードオフを伴わず、従来の共焦点顕微鏡のアプリケーションで空間分解能を改善させることが出来る超解像検出器ユニット NSPARC の開発を行った。

2 NSPARC の光学原理

まず初めに共焦点顕微鏡の概要を説明する。共焦点顕微

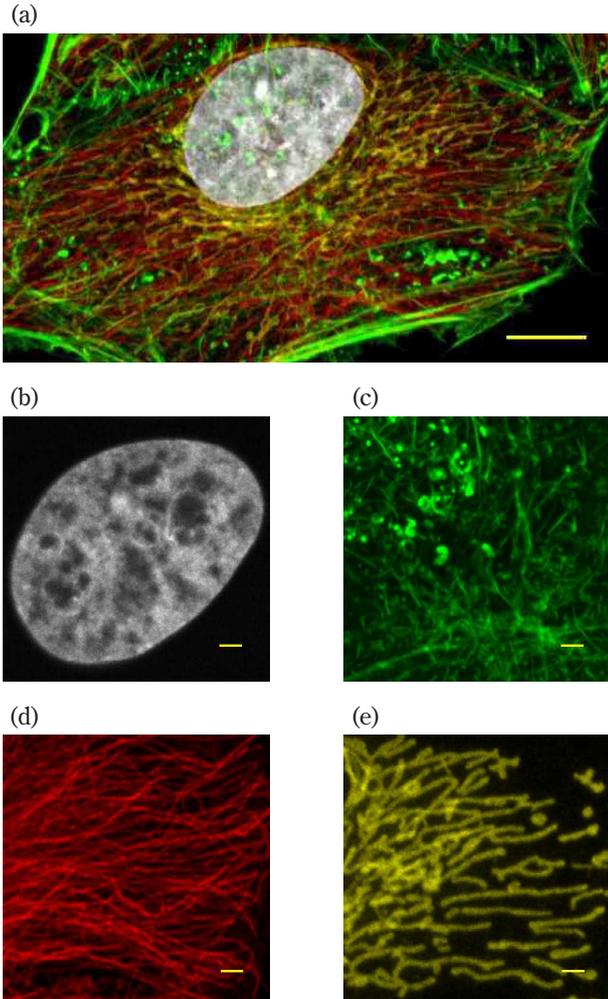


Fig. 1 共焦点顕微鏡で撮影した多重染色画像

(a) HeLa 細胞の4種類のオルガネラを蛍光染色し、共焦点顕微鏡 AX にて撮影。

- 白：核
- 緑：アクチン（細胞骨格）
- 赤：微小管（細胞骨格）
- 黄：ミトコンドリア

(b-e) 各オルガネラを拡大した単色画像。

スケールバー (a) 10 μm, (b-e) 2 μm

鏡はレーザー走査型顕微鏡の一種であり、試料からの蛍光を共焦点ピンホールに通すことで余分な外乱光をカットし、焦点近傍の蛍光のみを取り出している。共焦点光学系によりピンホールとレーザー光源は常に共役関係を保った状態で、試料表面をレーザー走査していく。ピンホールを通った蛍光を PMT 等の光検出器によって光量計測し、スキャンミラーの位置と計測光量に対応付けた光量マップを作成することで標本画像が取得できる (Fig. 2)。ピンホールによる外乱光の抑制により共焦点顕微鏡で取得できる画像は高 S/N (信号雑音比) であるのが特徴である。

S/N を確保しつつ高空間分解能の画像を得るにはピンホール径を蛍光の Point spread function (PSF) の理論計算から算出する結像スポットの大きさである Airy 径と同程度まで絞った条件にする必要がある。共焦点顕微鏡ではピン

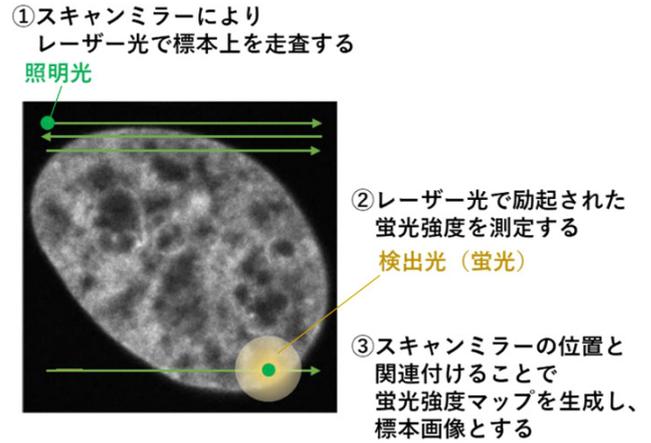


Fig. 2 共焦点顕微鏡による蛍光信号像取得スキーム

ホール径を表すのに AiryUnit (AU) 換算した値を用いるのが一般的で、本稿でも同様の表現で説明する。

一般的な観察では、ピンホール径は空間分解能と S/N のバランスが取れる 1 AU (=1.22 λ/NA) に近い値に設定する。ただし空間分解能を優先とするケースではピンホールを 1 AU 以下に絞る場合もある。ピンホール径を小さくすると、空間分解能は向上するが、1 AU 以下のピンホール径では蛍光信号も大幅にカットしてしまうので結果として S/N は悪化する。ピンホール径の変化に対する空間分解能と蛍光強度の関係を比較すると、1 AU 以下に絞った条件では空間分解能の改善率に比べて、蛍光強度の低下は急峻であることが分かる (Fig. 3)。S/N の悪化は後工程の画像処理であるデコンボリューション (逆畳み込み計算) 結果にも悪影響を及ぼす。したがってピンホールを絞るほど高分解能の画像が得られるという訳ではない。高分解能画像を取得するには S/N を維持したまま、分解能を改善する必要がある。そのため、走査速度を遅くするか、レーザーパワーを強くして、S/N を改善する必要がある。しかしこれらの対策は、時間分解能の低下や試料への光ダメージ増加という大きなトレードオフを伴う。NSPARCはこの空間分解能と S/N のトレードオフの関係を打開した顕微鏡装置で、Image scanning microscopy [2]–[5] (以下 ISM) に基づいた光学系を採用し、高 S/N と高空間分解能を両立した画像取得が可能である。

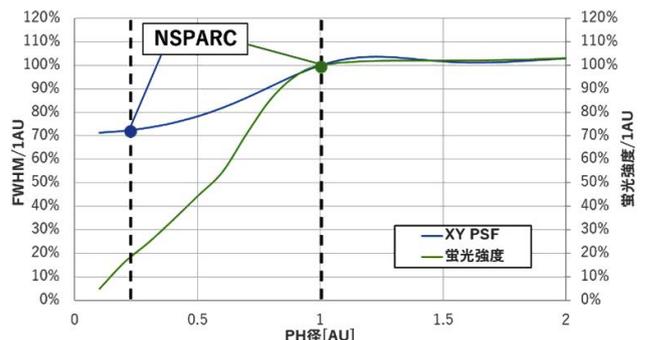


Fig. 3 ピンホール径と輝度・空間分解能の関係
FWHM: Full Width at Half Maximum (半値全幅)

次に NSPARC で使用しているイメージング技術である ISM について説明する。ISM ではピンホールの代わりに 2 次元のアレイ検出器をレーザー光源と共役となる位置に配置する。この検出器はピンホールとしての役割を持ちながら、同時に光量計測も行う。さらにアレイ検出器を使用することで検出面に投影された蛍光を各画素で分割して光量計測することができ、後述する画像処理と合わせることで空間分解能を向上させることができる。標準の観察条件では 5×5 画素のアレイ検出器に 1 AU が内接する条件で投影しており、1 画素当たり 0.2 AU サイズの蛍光を取り込んでいる (Fig. 4)。

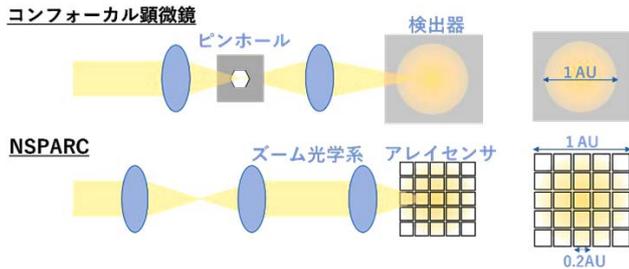


Fig. 4 共焦点顕微鏡と NSPARC の光学系の比較

アレイ検出器の各画素それぞれが光量計測した結果から光量マップを生成し画像として出力する。それら出力画像は各画素が 0.2 AU 径のピンホールとして作用した画像に相当するので空間分解能が向上しているが、1 AU 以下のピンホール条件で撮影された画像となるため暗く S/N の悪い画像である。しかし各画素から得られた画像を合算すると 1 AU 相当の蛍光信号が確保できるため、画像の S/N を上げることができる。ただし各画素で得られる画像間には像ずれが発生しており、ただ合算だけでは空間分解能も 1 AU 相当となってしまふ。ISM では、0.2 AU の空間分解能を保ったまま画像をシフトさせて合算するリアサイメント処理を行うことで従来の共焦点顕微鏡では困難であった高分解能と高 S/N を両立した画像を取得することができる (Fig. 5)。

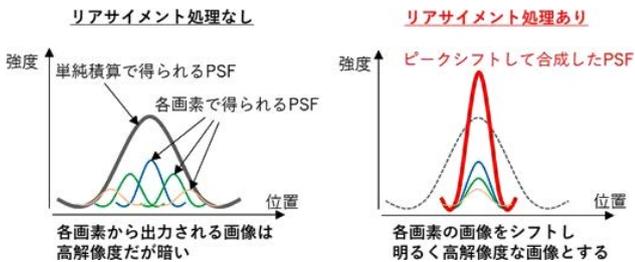


Fig. 5 リアサイメント処理と PSF の関係

ISM で使用している画像処理であるリアサイメント処理について基本原理を説明する。共焦点顕微鏡の結像性能を表す実効 PSF_{eff} は計算により求めることができ、アレイ検出器の各画素の実効 PSF_{eff} も見積もることができる。リア

サイメント処理では理論計算によってアレイ検出器の各画素配置に起因する PSF シフト量を計算し、合成の際に逆方向にシフトさせて各画素の PSF ピーク位置を一致するよう補正している。

共焦点顕微鏡で得られる実効 PSF_{eff} は、励起光学系で決まる PSF_{ex} に蛍光光学系で決まる PSF_{em} とピンホール関数 PH から (1) 式で求まる。

$$PSF_{eff}(r) = PSF_{ex}(r) \{PSF_{em}(r) \otimes PH(r)\} \quad (1)$$

アレイ検出器を用いた ISM の光学系では各画素が微小のピンホールとして作用しているのに加え、各画素の配置によって光軸からシフトした位置にある。したがって各画素の実効 PSF_{eff} を計算する関係式は、アレイ検出器の配置と同じ軸ずれを持つ位置にピンホールを配置した場合の (2) 式で求まる。

$$PSF_{eff}(r) = PSF_{ex}(r) \{PSF_{em}(r) \otimes PH(r-d)\} \quad (2)$$

この場合の PSF_{eff} は光軸からシフトした位置にピーク位置を持つことが分かる (Fig. 6)。画素の位置によってシフト量もシフト方向も変わる為、画素ごとにシフトの補正量を計算し、各画素からの出力画像を移動させ合算する。この画像をシフトして合算する処理をリアサイメント処理といい、0.2 AU の空間分解能を維持したまま、各画素で撮影した画像を合算することが出来る。リアサイメント画像は、標準の 1AU 画像に対して S/N を維持したまま、空間分解能を約 1.3 倍向上させることが出来る。

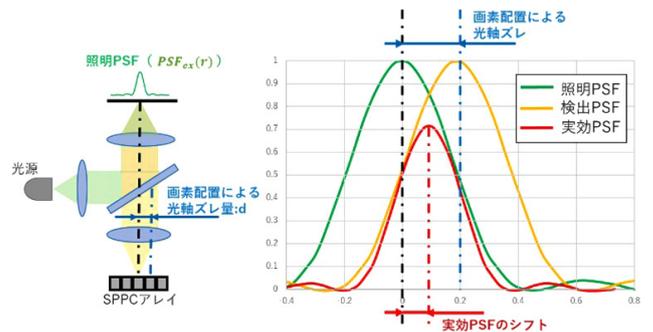


Fig. 6 ISM の PSF

またリアサイメント処理後の実効 PSF を用いて、リアサイメント画像に対してデコンボリューションを行うことができる。この画像処理によって背景光のボケを取り除き、より空間分解能を高めることが出来る。Fig. 7 に (a) 共焦点画像、(b) リアサイメント画像、(c) リアサイメント画像にデコンボリューションをした画像を示す。共焦点画像では分解できなかった 2 本の線状の構造体が、リアサイメント処理で谷間が確認できるようになり、さらにデコンボリューションで明確に 2 本に分解できていることが分かる。

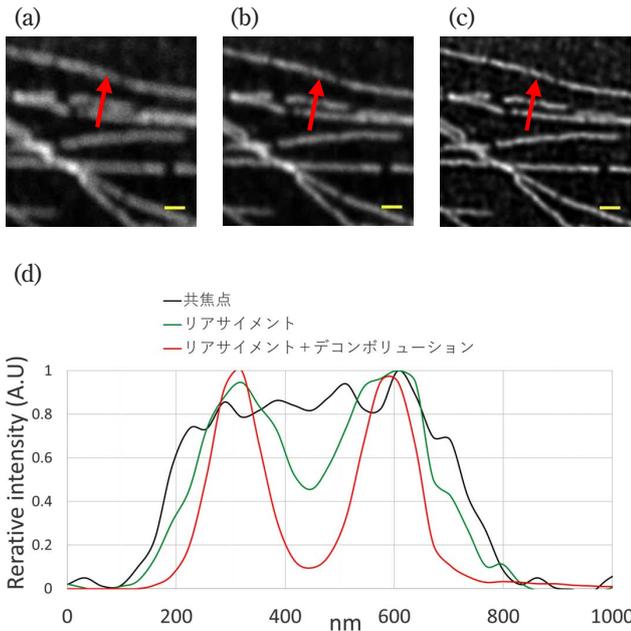


Fig. 7 生物サンプルでの空間分解能

PlanAPO λ D 60x 1.42で撮影した HeLa 細胞の微小管.

- (a) 共焦点画像
- (b) リアサイメント画像
- (c) リアサイメント画像+デコンボリューション処理
スケールバーはそれぞれ 500 nm
- (d) (a)-(c) に図示したラインプロファイル.

3 SPPC アレイ検出器

続いて、NSPARC で新たに採用した、Single Pixel Photon Counter (SPPC) アレイ検出器の説明を行う。NSPARC にて使用している検出器は新開発した SPPC アレイである。SPPC アレイは Avalanche Photo Diode (APD) をアレイ状に並べたフォトンカウンティング素子である。Single Photon Avalanche Diode (SPAD) アレイと呼ばれることもある。ISM のためには 2 次元のアレイ状の検出器が必要であった。従来の光電子増倍管 (PMT) を使用するアイデアも開発初期にはあったが、サイズが大きいくに加え、検出面をアレイ状に並べることが難しい。そこで我々は 25 画素の APD がアレイ状に設置された SPPC アレイを採用した。

NSPARC にて使用している SPPC アレイは $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ の正方形を 1 画素として 25 画素が敷き詰められている (Fig. 8)。検出器の受光面は 25 画素合わせてもわずか $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ しかない。検出器のサイズを大きくすることは可能だったが検出器のサイズを大きくすると集光するための光学系が長くなってしまい装置のサイズが大きくなってしまふ。逆に小さい検出器の場合は、アライメント調整に高い精度が要求される。また検出器の画素サイズは感度やノイズにも影響を及ぼす。様々な検討をした結果、画素サイズ $50 \mu\text{m}$ が最適だと判断した。

PMT と比べるとサイズは小さくなっているが検出効率や感度波長範囲といった画質に直結する性能は PMT と同等

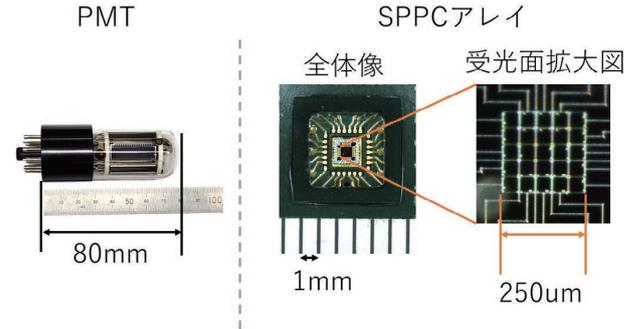


Fig. 8 PMT と SPPC アレイのサイズ比較

PMT が約 $80 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$ に対して SPPC アレイは約 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ である。

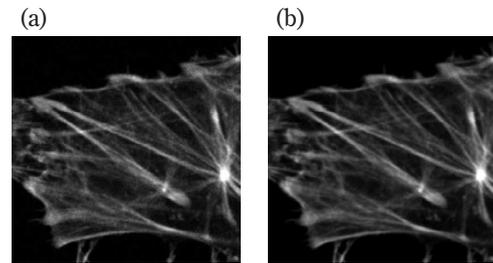


Fig. 9 GaAsP PMT と SPPC アレイの比較

- (a) GaAsP PMT で撮影した共焦点画像
- (b) SPPC アレイ検出器で撮影した共焦点画像

の性能を有する。実際に取得した画像からも SPPC アレイにて PMT と遜色ない画像が取得できていることが分かる (Fig. 9)。

直接画質に影響する部分ではないが、使い勝手の部分でも SPPC アレイは改善がある。PMT は強い入射光を受けると感度が劣化する可能性がある。そのため使用中も強い光が入射されないように気を付ける必要がある。共焦点顕微鏡 AX では強い光が入射した時は撮影を止める安全機能を搭載していた。SPPC アレイは PMT と比べると入射光によるダメージはなく安心して使用ができる。そのため撮影中に安全機構により撮影が中断されるわずらわしさもない。

SPPC アレイの信号出力から画像を構築するプロセスに関して説明をする。SPPC アレイはフォトン 1 個が入射するとそれを増倍し 1 個の電気パルス信号を出力する APD をアレイ状に並べたものである。PMT などの多くの検出器は光を電圧の強弱に変換し AD 変換をすることによりその電圧値を取得する。そして AD 変換された数値が画像の輝度値になる (Fig. 10上)。しかし SPPC アレイはフォトンが受光面にあたると光量の大小に関係なく固有の電圧パルスを出力する。このパルスを経路によりカウントすることによって何フォトン入射したかカウントすることができる。SPPC アレイではこのカウント数が画像の輝度値になる (Fig. 10下)。このように SPPC アレイは、PMT とは信号出力方式も大きく異なり、微弱光の計測においては PMT よりも高い S/N と安定した測定を実現することができる。

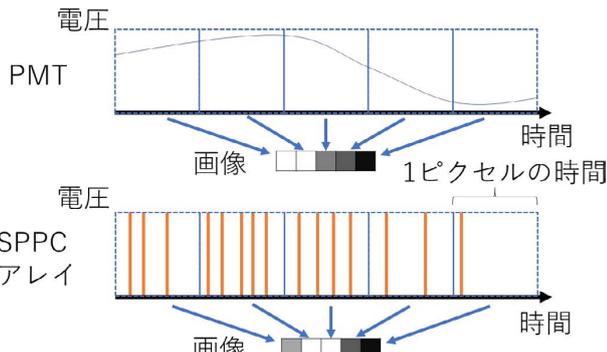


Fig. 10 PMTとSPCCアレイの画像構築方法の違い

PMTはアナログ電圧の強弱が画像の輝度値になるがSPCCアレイは1ピクセルの時間内に何パルスカウントできたかが画像の輝度値になる。

4 生物サンプルのアプリケーション

NSPARCを使った3つのアプリケーションを紹介する。まず初めにマルチカラーイメージングの画像をFig. 11に示す。固定をしたHeLa細胞の核をDAPI、微小管をAlexa Fluor™ 488 (Thermo Fisher Scientific Inc-JP. 東京, 日本)、ミトコンドリア外膜をAlexa Fluor™ 568 (Thermo Fisher Scientific Inc-JP.)という蛍光プローブで染色した (Fig. 11 (a))。励起波長は405, 488, 561 nmの3波長で順次に励起をしてNSPARCでイメージングをした。Fig. 11 (b-d)にリアサイメント+デコンボリューション画像、Fig. 11 (e-g)に共焦点画像を示す。前者の画像でコントラストと

S/Nが著しく改善しており、各オルガネラの微細構造が鮮明に捉えられている。NSPARCは、共焦点画像顕微鏡の従来のアプリケーションである多色撮影で空間分解能を改善させることが可能であり、オルガネラ間の相互作用や、蛋白質分子の局在の研究での活躍が期待される。

次に、ミトコンドリアをターゲットにしたライブセルイメージングの画像をFig. 12を示す。ミトコンドリアは外膜と内膜の二重膜で構成され、内膜は内部に向かって陥入したクリステと呼ばれる縞状の構造を取っている。蛍光プローブはクリステ構造が見えるように、MitoTracker™ Green FM (Thermo Fisher Scientific Inc-JP.)を使用した。Fig. 12 (a)にリアサイメント+デコンボリューション画像、Fig. 12 (b)に共焦点画像を載せた。後者の画像ではぼけていたクリステが、前者の画像では、コントラストが上がり鮮明に可視化された。次にタイムラプス撮影でミトコンドリアの形態変化を観察した。ミトコンドリアの形態は細胞内でダイナミックに変化することで知られ、秒単位で分裂や融合を繰り返している。Fig. 12 (c)では、1.9 fps, 3秒間隔のタイムラプス撮影で500 nm程度の微小なミトコンドリアが激しく動き回り、大きなミトコンドリアに融合する瞬間を捉えた。ミトコンドリアの形態と細胞の活性 (Viability) との間には相関関係があることが知られており、ミトコンドリアの形態と疾患との関連に着目した研究でNSPARCが活躍することが期待される。

最後に、透明化処理をしたマウス脳スライスのzスタック画像をFig. 13に示す。10倍対物レンズで撮影した5x5枚

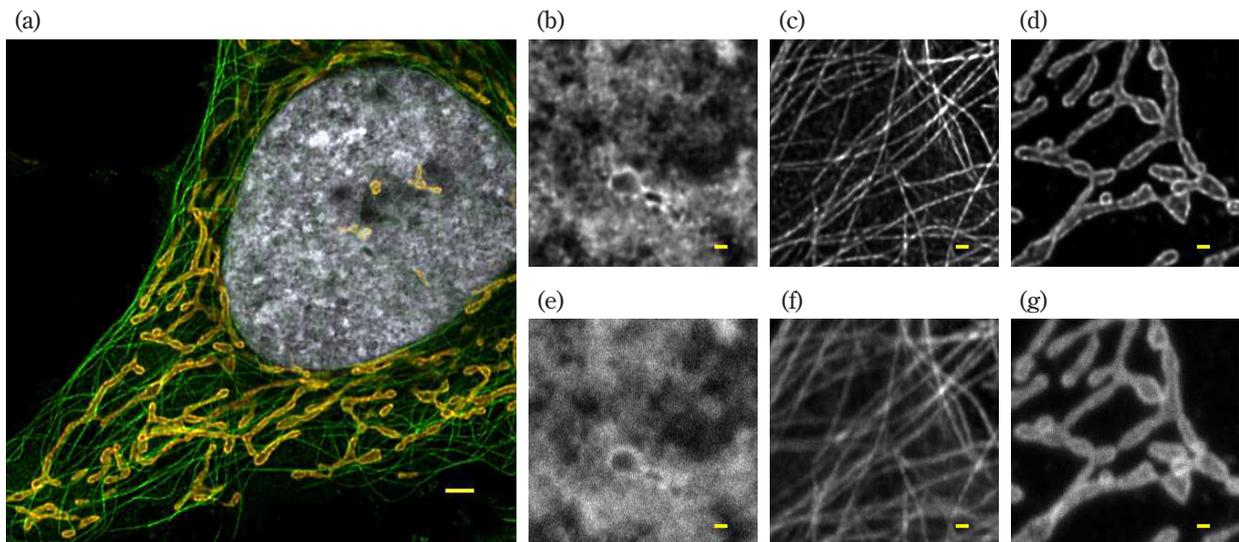


Fig. 11 マルチカラーイメージングの画像

- (a) 固定したHeLa細胞のリアサイメント+デコンボリューション画像。
白：核 (405 nm 励起), 緑：微小管 (488 nm 励起), 橙：ミトコンドリア (561 nm 励起)。
対物レンズは PlanAPO2D 60x 1.42 oil で撮影。
- (b-d) リアサイメント+デコンボリューション画像。b) 核, c) 微小管, d) ミトコンドリア
- (e-g) 共焦点画像 e) 核, f) 微小管, g) ミトコンドリア
スケールバーは (a) 2 μ m, (b-g) は 500 nm

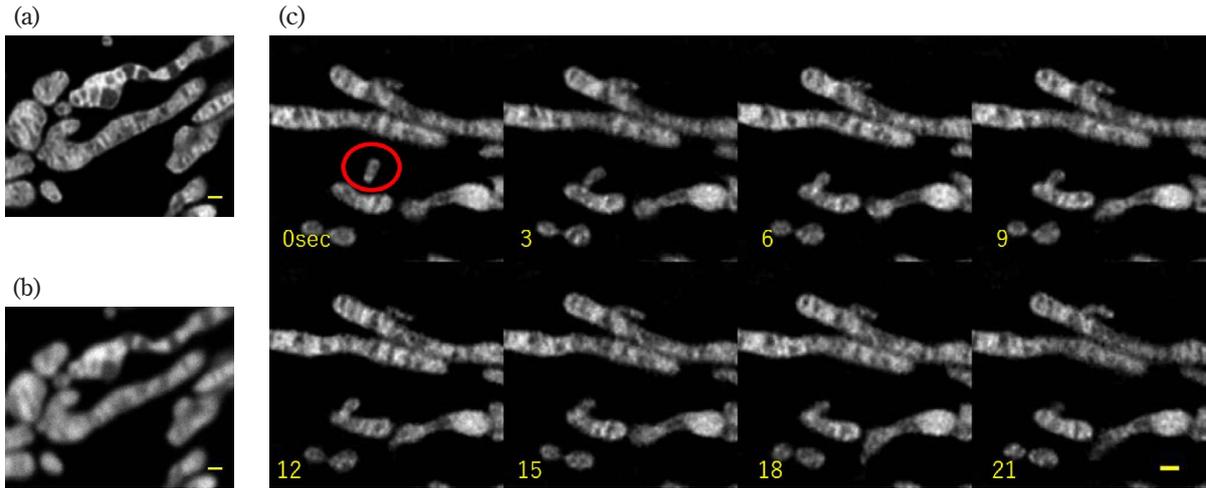


Fig. 12 ミトコンドリアのライブセルイメージング

MitoTracker™ Green FM で染色をしたミトコンドリア画像. 対物レンズは PlanAPO λ D 60x 1.42 oil で撮影.

(a) リアサイメント+デコンボリューション画像と (b) 共焦点画像.

(c) アサイメント+デコンボリューション画像のタイムラプス画像.

撮影速度 1.9 fps, 3 sec 間隔で撮影.

スケールバーはそれぞれ 500 nm

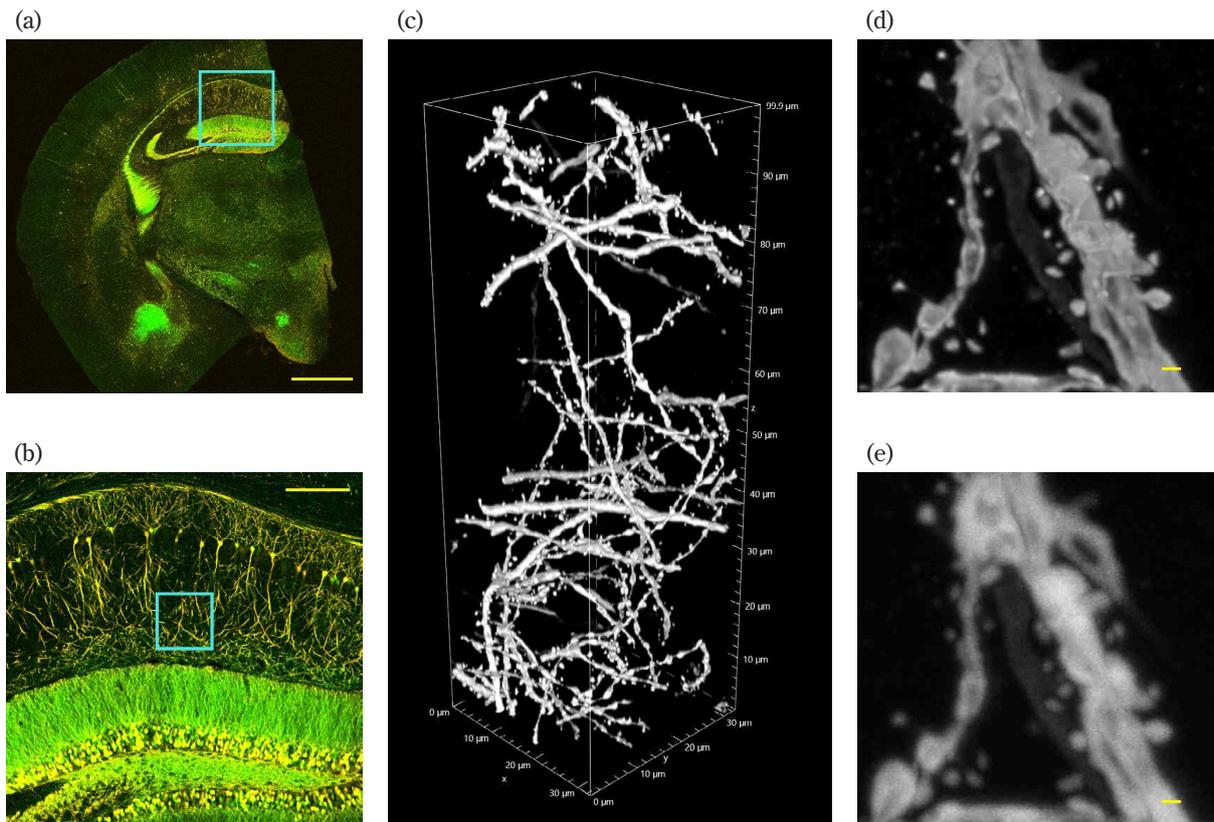


Fig. 13 透明化マウス脳スライスの z スタック画像

(a) 透明化マウス脳スライスの全体像. Plan PlanApo10x/0.45で撮影した 5x5 枚のタイリング共焦点画像.

(b) (a) の一部を拡大した共焦点画像.

(c) (b) の水色枠の部分のリアサイメント+デコンボリューション画像の立体構成図.

PlanApo λ D60x 1.42 oil を使用して撮影.

(d) (c) の 80-100 um 深部の Max Projection の拡大 (リアサイメント+デコンボリューション画像).

(e) (c) の 80-100 um 深部の Max Projection の拡大 (共焦点画像).

スケールバー (a) 1000 um, (b) 200 um, (d, e) 500 nm

サンプルご提供 : Lin Daniel, PhD. SunJin Lab Co.

のタイリング画像 (Fig. 13 (a)) と一部を拡大した画像 (Fig. 13 (b)) を示す。eYFP という蛍光蛋白質を発現させた神経細胞が密集している様子が分かる。さらに、対物レンズを60倍の油浸対物レンズに切り替えて Fig. 13 (b) の水色枠の部分を z スタック撮影して、立体構成した図を Fig. 13 (c) に示す。神経回路を構成する樹状突起が様々な方向に走っている様子を捉えることが出来た。また、樹状突起の表面に直径数百 nm 程度のスパインと呼ばれる棘状の構造も確認できた。Fig. 13 (c) の z スタックの 80~100 um 深部の Max projection 画像を拡大した一部を Fig. 13 (d) に示す。Fig. 13 (e) の共焦点画像と比較すると、スパインが単に球状ではなく、様々な形状をしていることが分かる。このように深部 z スタック撮影においても NSPARC は有用である。

以上の3つの作例で示した様に、NSPARC は、共焦点画像顕微鏡の多色観察、ライブセル観察、深部観察などの一般的なアプリケーションで、トレードオフを伴うことなく、空間分解能を向上することが可能である。

5 まとめ

従来の共焦点イメージングに対してトレードオフの無い ISM 技術を搭載した NSPARC は今後、共焦点顕微鏡のスタンダードになると考えている。4章で示した以外にも、多くの共焦点顕微鏡のアプリケーションで、空間分解能を大きく向上させることが可能であり、アカデミアでのバイオイメージングのみならず、創薬における薬効評価や毒性試験などの産業の分野でも幅広く活躍することが期待できる。例えば、NSPARC の深部観察能を活かした3次元培養細胞での癌の浸潤観察や、低光毒性を活かした光ダメージに敏

感なミトコンドリアや神経細胞の薬剤応答による形態変化の観察が挙げられる。これまで観察できなかった、または見逃されていたオルガネラの形態変化や、蛋白質局在など、新たな評価指標が発見され、薬効評価の効率化、精度向上につながることを期待する。

謝辞

最後に、本製品は Italian Institute of Technology の Nanoscopy Lab, Molecular Microscopy and Spectroscopy Lab との共同研究から生み出されたことを強調しておきたい。Italian Institute of Technology の Professor Alberto Diaspro, Dr.Paolo Bianchini, Dr.Giuseppe Vicidomini および研究室のスタッフ一同の皆様には、多大なるご支援とご協力を頂いた。この場を借りて改めて感謝の意を伝えたい。

引用文献

- [1] A. Diaspro, *Confocal and Two-Photon Microscopy Foundations, Applications, and Advances*, New York: Wiley-Liss, 2001.
- [2] C. B. Müller and J. Enderlein, "Imaging Scanning Microscopy," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 104, no. 19, 198101, 2010.
- [3] C. J. R. Sheppard, "Super-resolution in confocal imaging," *Optik*, Vol. 80, no. 2, pp. 53-54, 1988.
- [4] M. Castello *et al.*, "Image scanning microscopy with a quadrant detector," *Optics Letters*, Vol. 40, no. 22, pp. 5355-5358, 2015.
- [5] M. Castello *et al.*, "A robust and versatile platform for image scanning microscopy enabling super-resolution FILM," *Nature methods*, Vol. 16, pp. 175-178, 2019.

大川潤也 Junya OHKAWA
ヘルスケア事業部 技術統括部 システム開発部
System Development Department
Technology Solutions Sector
Healthcare Business Unit

楠井雄太 Yuta KUSUI
光学本部 第一設計部
1st Designing Department
Optical Engineering Division

小森谷大介 Daisuke KOMORIYA
ヘルスケア事業部 技術統括部設計部
Designing Department
Technology Solutions Sector
Healthcare Business Unit

産業用カメラ「LuFact」シリーズの開発

笹井義史, 大河内潤, 中野雅弘, 吉岡玄史, 金丸謙介, 本 佳弥, 近藤俊介

Development of Industrial Camera “LuFact” Series

Yoshifumi SASAI, Jun OKOCHI, Masahiro NAKANO, Genshi YOSHIOKA,
Kensuke KANAMARU, Yoshiya MOTO and Shunsuke KONDO

「LuFact (ルファクト)」は、ニコンが長年コンシューマー向けカメラ製品で培ってきた信頼性の高い技術を搭載した産業用カメラである。2022年7月にGigE Visionに対応したA1000-G、USB3 Visionに対応したA1000-Uと高感度200万画素のモノクロカメラAH020-MR、800万画素のモノクロカメラAH080-MRの2種類のカメラヘッドを発売した。また、2023年3月にGigE Vision、および、AI処理が可能な処理ユニットA2000-Gと800万画素のカラーカメラAH080-CR、500万画素のグローバルシャッター方式のモノクロカメラAH050-MG、CH050-MGの3種類のカメラヘッドを開発した。ここでは、LuFactシリーズの開発要素について説明する。

“LuFact” is an industrial camera equipped with highly reliable technology that Nikon has cultivated over several years under its consumer camera product category.

In July 2022, A1000-G, A1000-U, and two types of camera heads, AH020-MR and AH080-MR, were released. In March 2023, we developed the A2000-G and three types of camera heads: AH080-CR, AH050-MG, and CH050-MG.

This section describes the development elements of the LuFact series.

Key words 産業用カメラ, GigE ビジョン, EtherNet/IP, 高信頼性, エッジコンピューティング
industrial camera, GigE Vision, EtherNet/IP, high reliability, edge computing

1 はじめに

「LuFact (ルファクト)」は、ニコンが長年コンシューマー向けカメラ製品で培ってきた信頼性の高い技術を搭載した産業用カメラである。2022年7月にA1000-G/A1000-Uと2種類のSマウントカメラヘッドAH020-MR、AH080-MRを発売、2023年3月にAI処理ユニットA2000-Gと2種類のSマウントカメラヘッドAH080-CR、AH050-MG、および、1種類のCマウントカメラヘッドCH050-MGを開発した (Fig. 1)。

ここでは、LuFactシリーズの開発要素について解説する。



Fig. 1 LuFact シリーズ

2 小型・分離設計

イメージセンサーを実装するカメラヘッドと画像処理ICを実装する画像処理ユニットに分離し、カメラヘッドの超小型化を実現した。Sマウントモデルのカメラヘッドでマウント面視 20 mm×20 mmのサイズながら、基板レイアウト、部品配置を最適化することで1/1.8型800万画素のイメージセンサーまで対応している (Fig. 2)。小型化により既設の装置や生産ラインへの設置自由度も向上する。

また、カメラヘッドとユニット間のケーブル長は、長距離伝送に適したエンベデッドクロック方式の差動信号、配



Fig. 2 カメラヘッド (Sマウント)

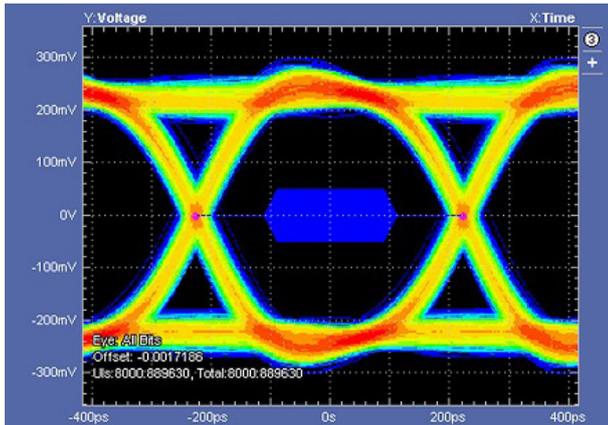


Fig. 3 差動信号アイパターン (ケーブル長: 10 m)

線パターンの最適化, および, 減衰した信号を補償するイコライジング機能を利用し, 10 m まで延ばすことができる (Fig. 3).

熱源となる画像処理ユニットとカメラヘッドを分離することで, カメラヘッドの温度上昇が大幅に低減する. 温度上昇によるカメラの動作停止を抑制するだけでなく, 温度の影響を避けたい装置への取り付けも可能となる.

3 サポートする通信規格

LuFact では複数の通信規格に対応し, 顧客の使用環境, 目的に応じて使い分けることが可能である.

現在, A2000-G がサポートする通信規格は 1. GigE ビジョン規格, 2. RTSP/RTP ストリーミング規格, 3. EtherNet/IP 規格に対応している. ここではそれぞれの規格と A2000-G における用途について説明する.

3.1. GigE ビジョン規格

GigE ビジョン規格は米国の自動化エコシステムの業界団体である, AAA (Association for Advancing Automation) が標準化した画像転送の規格である. 主に産業用デジタルカメラおよびその対向 (PC 上で動作するアプリケーションソフトウェアなど) への適用を目的としている. 通信プロトコルの下位層に Gigabit Ethernet を用い低コストの標準ケーブルやネットワーク機器の使用と, 長距離, 高速の画像転送を可能にした. 標準化に準拠した製品は相互接続が可能, 世界中の企業から数百の規格準拠製品が提供されている.

GigE ビジョン規格は, デバイス検出, 制御プロトコル (GVCP), 画像転送プロトコル (GVSP) およびフォーマットの 3 部で構成されている (Fig. 4). また, ソフトウェアインタフェース規格に GenICam, SFNC を採用している.

A2000-G では GigE 規格対応アプリケーションソフトウェアが工場出荷時に自動起動するように設定されている. また, PC で動作する LuFact Utility アプリケーションソフトウェアの提供も行い, ユーザーは A2000-G 購入後すぐに

アプリケーション層	GVCP GigE Vision Control Protocol	GVSP GigE Vision Streaming Protocol
トランスポート層	UDPポート番号	
ネットワーク層	IPアドレス	
リンク層	MACアドレス	

Fig. 4 GigE Vision

GigE 規格カメラとして動作することができる.

3.2. RTSP/RTP ストリーミング規格

RTSP は Real Time Streaming Protocol の略であり, IETF において RFC2326 として標準化されたストリーミング制御プロトコルである. RTP はリアルタイムトランスポートプロトコルの略であり, IETF において RFC3550 として標準化, 音声や動画などのデータストリームをリアルタイムに配送するデータ通信プロトコルである. ストリーミング下層には UDP を用いる (Fig. 5).

RTP は RTCP とともに使用され, RTP の主な役割はジッタの補償, データ欠落の検出となっている.

A2000-G では LuFact Streaming アプリケーションソフトウェアが RTSP/RTP プロトコルを使用している. RTSP については, 必須メソッド (DESCRIBE, OPTIONS, PLAY, SETUP, TEARDOWN) のみ TCP/IP 上に実装している (画像に関する設定は別方法で実装). RTP に関しては, 音声なし, 画像は MPEG/AVC (H. 264) 符号化フォーマットを適用したのち, 転送する仕様となっている.

アプリケーション層	RTCP	RTP
トランスポート層	TCPポート番号	UDPポート番号
ネットワーク層	IPアドレス	
リンク層	MACアドレス	

Fig. 5 RTSP/RTP

3.3. EtherNet/IP 規格

EtherNet/IP は産業用ネットワーク規格の 1 つで, 標準 Ethernet をベースにすることでインターネットおよびエンタープライズ接続と, 産業用自動化アプリケーションを同時に提供する規格である. アプリケーション層は CIP (Common Industrial Protocol) を使用し, 下層に TCP, UDP を使用する (Fig. 6). CIP は制御レベル, 情報レベル通信に適用する EtherNet/IP の他に, センサーやアクチュエーターレベルの通信に適用する CompoNet, デバイスレベル通信に適用する DeviceNet, および, それら通信のセキュリティや時刻同期, 多軸モーション制御などで構成される. アプリケーションソフトウェアは CIP ネットワークで統合されたシステム全体を管理するように作成することも

可能である。米国に本部を置く非営利団体である ODVA (Open DeviceNet Vendors Association) が EtherNet/IP を含む CIP の規格管理、認証を行う。

定期的な通信であるインプリシット通信と、イベントなど任意のタイミングで通信できるエクスプリシット通信の大きく 2 種類の通信をサポートする。他の産業用ネットワークと比較して TCP/UDP/IP との親和性が高いのが特徴である。

A2000-G では、この EtherNet/IP 通信規格を採用、PLC (Programmable Logic Controller) との通信に EtherNet/IP を使用している。

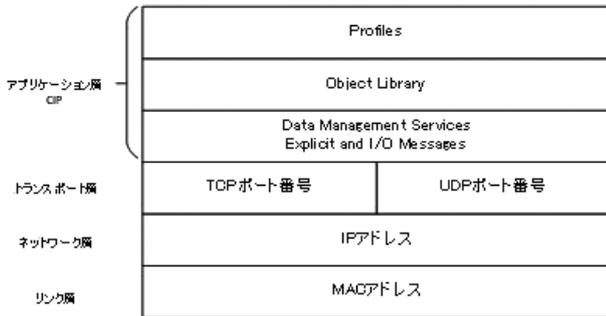


Fig. 6 EtherNet/IP

4 暗所性能

カメラヘッド AH020-MR には、有効画素数 213 万画素、裏面照射型モノクロ高感度イメージセンサーを搭載した。照明装置が設置できない環境においても少ない光を電気信号に変換することができる。ゲインによるノイズ増幅を抑えながら照明装置を設置することなく明瞭な画像の取得が可能である (Fig. 7)。



Fig. 7 AH020-MR 暗所性能

5 高信頼性

産業用カメラは、24 h、365 日の連続動作が求められる。安定動作に必要な要素の 1 つとして、温度がある。ユニットは高負荷な画像処理に耐えられるように熱シミュレーションを繰り返し、ヒートシンク形状、冷却ファンのサイズを決定した (Fig. 8)。最大負荷時でも過熱保護 (サーマルシャットダウン) による動作停止を起こすことなく安定動作を実現した。

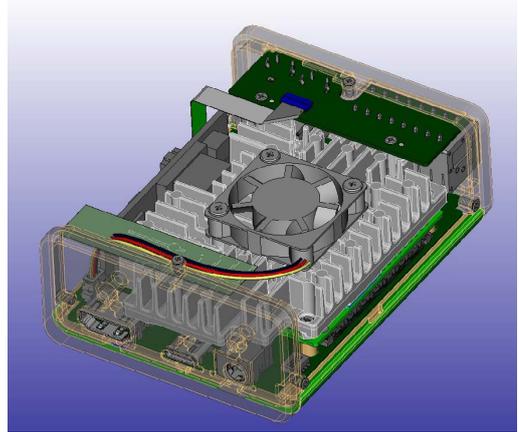


Fig. 8 高信頼性

6 エッジコンピューティング

LuFact A2000-G は、AI が可能な CPU を実装している。画像データを PC、サーバーなどに転送することなく部品欠品などの検査が可能である (Fig. 9)。

バーコードリーダーでシリアルナンバーを読み取り、検



Fig. 9 部品欠品検査

査データとの紐づけ、不良発生時には、PLC、あるいは、積層信号灯を点灯させ、異常を通知させることができる。

7 まとめ

LuFact シリーズは、従来の産業用カメラとしての用途に

とどまらず、エッジコンピューティングによる検査が可能である。ニコンの持つ画像解析技術とAIを組み合わせ、スマートファクトリーの実現に貢献したいと考えている。

最後に、LuFact の開発に尽力いただいた多くの方に深く感謝する。

笹井義史 Yoshifumi SASAI
デジタルソリューションズ事業部 第二開発・技術部
2nd Development Department
Digital Solutions Business Unit

大河内潤 Jun OKOCHI
デジタルソリューションズ事業部 第二開発・技術部
2nd Development Department
Digital Solutions Business Unit

中野雅弘 Masahiro NAKANO
デジタルソリューションズ事業部 第二開発・技術部
2nd Development Department
Digital Solutions Business Unit

吉岡玄史 Genshi YOSHIOKA
デジタルソリューションズ事業部 第二開発・技術部
2nd Development Department
Digital Solutions Business Unit

金丸謙介 Kensuke KANAMARU
デジタルソリューションズ事業部 第二開発・技術部
2nd Development Department
Digital Solutions Business Unit

本 佳弥 Yoshiya MOTO
デジタルソリューションズ事業部 第二開発・技術部
2nd Development Department
Digital Solutions Business Unit

近藤俊介 Shunsuke KONDO
デジタルソリューションズ事業部 第二開発・技術部
2nd Development Department
Digital Solutions Business Unit



研究開発論文

Research and
Development
Reports

ガスタービン用 TBC へのレーザー加工による リブレット形成と熱サイクル耐久性評価[†]

綿引健二，蘆田憲一，土橋晋太郎，土橋広和

Riblet Patterning by Laser Ablation on the Thermal Barrier Coating (TBC) for Gas Turbines and Evaluation of Its Resistance to Cyclic Heating

Kenji WATAHIKI, Kenichi ASHIDA, Shintaro TSUCHIHASHI and Hirokazu TSUCHIHASHI

コンプレッサーブレードやタービンブレードの表面にリブレットを形成すると、ガスタービンの性能を向上させることができる。我々は典型的な遮熱コーティング（TBC）上へのリブレット施工の適用性を調査した。レーザー加工により、所定の形状に沿ったリブレット加工が実現できることが確認できた。リブレット構造の耐久性は、熱サイクル試験を実施して評価した。リブレットがある場合とない場合の結果を比較すると、TBC が剥がれるまでの繰り返し回数にも、熱成長酸化物（TGO）層の成長速度にも有意差は見られなかった。また、試験前後でリブレット形状に変化は見られなかった。以上のことから、高温環境下で使用される TBC にレーザー加工を施すことで、耐剥離性に影響を与えることなくリブレットを形成できることがわかった。

Forming riblets on the surface of a compressor blade or turbine blade can improve a gas turbine's performance. We investigated the applicability of patterning riblets on a typical thermal barrier coating (TBC). It was verified that a riblet structure conforming to a predetermined shape can be realized by laser processing. We evaluated the riblet structure's durability by conducting a thermal cycle test. Comparing the results obtained with- and without-riblet cases, no significant difference was observed in the number of repetitions until TBC peel off, nor in the rate of growth of the thermally grown oxide (TGO) layer. In addition, no significant change was observed in the riblet shape before and after the test. Accordingly, it was determined that laser processing can produce riblets on TBCs used in high temperature environments without adversely affecting peel resistance.

Key words ガスタービン，リブレット，レーザー加工，熱サイクル試験，遮熱コーティング
gas turbine, riblet, laser processing, cyclic heating test, thermal barrier coating

1 はじめに

ガスタービンをはじめとする流体機器の効率の向上は大きな課題の一つである。流体抵抗は圧力抵抗（慣性抵抗）と摩擦抵抗（粘性抵抗）に大別され、特に高レイノルズ数の乱流領域においては、層流に比べて大きな壁面乱流摩擦抵抗が発生する [2]。乱流摩擦抵抗を低減させるために、流体機器表面に微小な縦溝を施工する手法がある。リブレット (riblet) と呼ばれる、サメの鱗 [3]、[4] のような 35~100 μm 程度の微小な縦溝が表面に存在すると、平滑面に対して、8~10% 程度の乱流摩擦抵抗の低減を引き起こすことが実験的にも明らかにされている [5]。

我々は、上記のリブレット形状をレーザーアブレーション加工により形成する技術を開発し、ガスタービンの圧縮

機やタービン翼への適用を検討している。レーザーアブレーション (laser ablation) とは、ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒のパルス幅を持つ極短パルスレーザーによって非熱的に材料表面の物質を除去する技術である [6]、[7]。この技術を用いて、任意の形状を材料表面に形成する事ができる。また、ガスタービンの圧縮機やタービン翼には、各種合金の他、金属・セラミックの様々なコーティングが用いられる [8]、[9] が、レーザーアブレーション技術を用いれば、それら部材表面にもリブレットの直接加工を行う事が可能である。

我々は、これまでにリブレットの優位性の検証のため、流体解析 (CFD) に基づいて設計したリブレットを金属製のタービン翼にレーザー加工で形成し、その効果の実測を行ってきた。タービンテスト設備の出口案内翼（静翼）に

[†] 本稿は、原著の引用文献 [1] に対して、追加の実験結果と考察を加えたものである。

リブレットを形成した評価で、リブレットによる圧損低減効果の実測を行い、その優位性を示す事ができた [10]。さらに、超小型ジェットエンジンの各翼にリブレット加工を行い、推力や燃料効率の向上を実験で確認する事ができた [11]。

ところで、過酷な環境で動作するガスタービン部材に適用する場合、耐久性も重要な要素である。機械特性に関して、これまでに圧縮機部材およびコート材にリブレット加工を施した試験片を準備し、引張・クリープ・疲労試験を実施して、その特性を評価した。その結果、金属部材に直接加工を行うと疲労強度が低下するが適切なコーティングの選択と施工を行う事で、疲労強度を招く事なく低下を防ぎ、リブレット形状を形成できる事が分かった [12]。

1000℃以上の高温になるガスタービン翼では、遮熱コーティング (TBC) が広く用いられるが、長期間使用すると TBC のトップコートとボンドコートの界面で thermally grown oxide (TGO) と呼ばれる酸化層が徐々に成長して、やがて剥離が生じる。そのため、TBC では剥離挙動の確認や TGO を抑制する事が重要視されている [13] - [16]。トップコートにリブレットを形成した場合、その表面積の増大による酸化特性や遮熱特性の変化により、剥離挙動が変化する可能性がある。そこで我々は、TBC へリブレットを形成したサンプルを作成し、その適用可能性を評価した。また、サンプルに熱サイクル負荷を掛けて、剥離に至るまでの熱サイクル回数比較や負荷前後の試験片を観察する事で、リブレット形成による剥離挙動の影響を評価した。

2 リブレット加工

リブレットの加工にはレーザーアブレーション加工の開発機を用いた。Fig. 1 にその模式図を示す。このレーザー加工機は、波長 532 nm (緑色)、パルス幅約 15 ps、最大繰返し周波数 4 MHz、最大出力 50 W の短パルスレーザーを持つ。レーザー光は照射ヘッドに導かれ、ガルバノミラーによって同期してスキャンされる。レーザー光は fθ レ

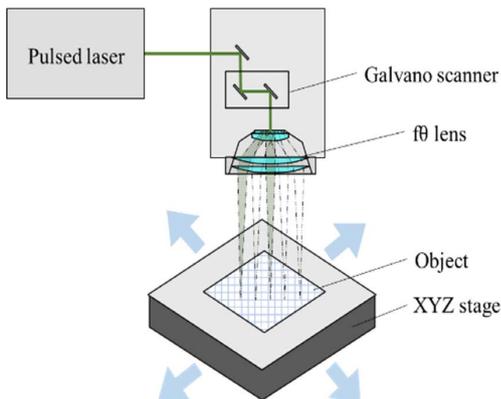


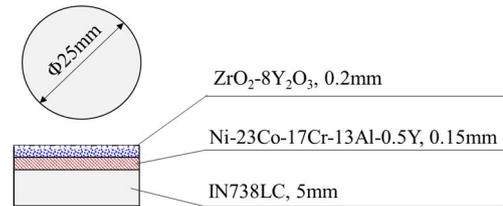
Fig. 1 Schematic diagram of a laser processing machine for forming riblets on the surface of an object

ンズによって所定の位置に集光される。加工対象物は 3 軸ステージによって所定の XYZ 位置に駆動できる。レーザー光が集光した対象物の表面の物質はアブレーションにより除去され、これを連続的にスキャンすることでリブレットの溝が形成される。各条件を制御する事で、ピッチや深さ、リブレット形状を制御する事が可能である。

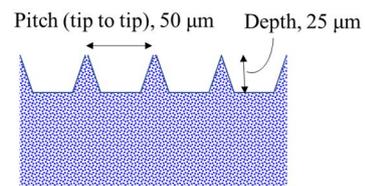
3 実験方法

3.1. 試験片

試験片の模式図を Fig. 2 に示す。基材にボンドコートとトップコートを形成したものを用意し、トップコートの表面にリブレット加工を施した。基材はガスタービン翼で用いられる Ni 基超合金である IN738LC を φ25×5 mm の円柱形状に加工したものをを用いた。試験に用いた IN738LC の組成は Table 1 の通りである。各コートの組成・厚みは Fig. 2 (a) に示す通りである。リブレット加工は、ピッチと深さの目標値をそれぞれ 50 μm、25 μm として加工を行った。この寸法は、流体低減効果を確認しているものの中で、代表的なサイズである。比較のため、リブレット加工を行っていない試料も用意した。



(a) Materials and geometry



(b) Dimension of riblet

Fig. 2 Test sample

Table 1 Chemical composition of IN738LC (wt%)

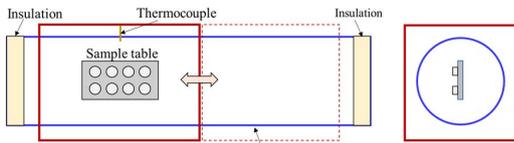
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0.11	<0.01	<0.01	Bal.	15.9	1.69
Co	W	Al	Ti	Fe	Ta
8.31	2.60	3.46	3.45	0.05	1.74

3.2. 熱サイクル試験

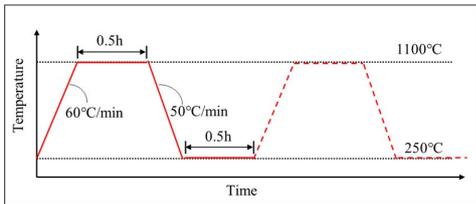
試験は JIS H8451 準拠して実施した。Fig. 3 に試験機および試験条件の模式図を示す。Fig. 3 (a) の通り、円筒状の石英管内に試料台があり、円筒周囲にヒーターと制御用熱電対を備えている。制御温度により、自動でヒーターの

On/Off および位置を動かす事で所定の時間・温度サイクルでの試験が可能である。本試験では、Fig. 3 (b) に示す通り、1100℃と250℃の温度制御で熱サイクルを繰り返し負荷するようにヒーターの動作を調整した。試験機の構成上、円筒軸方向には温度分布が生じるため、リブレット加工有無の試験片を4個ずつ用意し、Fig. 3 (c) のように試料台の上に並べて、同じ温度条件でリブレットの影響を比較できるようにした。Fig. 3 (d) は試験時の様子を示した写真である。

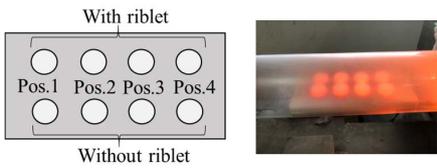
剥離の判定は目視で実施した。夜間を含めて5回/1日の頻度で確認を行い、剥離が観察された場合は、前回の確認時回数と剥離確認時回数の中間の回数を剥離回数として採用し、リブレット加工有無で比較した。また、剥離試験後の試験片をレーザー顕微鏡と電子顕微鏡 (SEM) での観察、エネルギー分散型X線分析 (EDS) による元素分析を行い、試験前後のリブレット形状の変化やボンドコートとトップコートの界面の酸化膜の評価を行った。



(a) Equipment of the heat cycle test equipment



(b) Target temperature profile around the sample table



(c) Sample placement

(d) Photographs of the samples during the test

Fig. 3 Schematic diagram of the test bench for evaluation of the thermal cycle resistance

4 実験結果および考察

4.1. TBC へのリブレット加工の適用可能性

Fig. 4 に加工したリブレット形状をレーザー顕微鏡で評価した結果を示す。目標値の深さ 25 μm、ピッチ 50 μm で周期的な溝構造が形成出来ている事が分かる。SUS304, SUS630に加工した結果 [12] と比較しても、ばらつきや欠陥が少なく、狙い通りの寸法形状に加工が出来ている事が分かる。

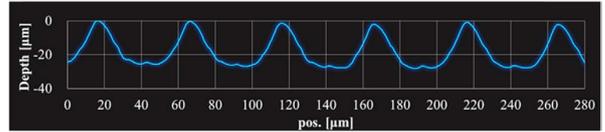
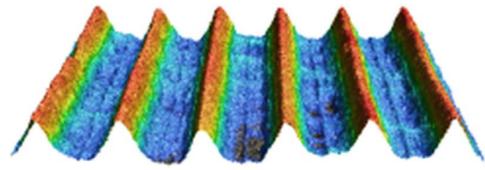


Fig. 4 Microscopic profiles of the lasered riblet TBC sample

4.2. 熱サイクル試験結果

Fig. 5 に熱サイクル試験の結果を示す。1026 サイクルまで試験を実施した所、Pos. 4以外の試験片はボンドコートとトップコートの間で剥離が観察された。剥離に至るサイクル回数は試験片の設置位置により、大きく差異が見られた。一方で、同じ温度条件と考えられる同じ設置位置で比較すると、リブレット加工有無で、剥離回数に差異は見られなかった。

試料位置に温度条件の差異を調べるため、熱サイクル試験後に試料位置付近の温度を計測した結果を Fig. 6 に示す。Pos. 3, 4と比較して、Pos. 1, 2は低温側の到達温度および降温速度が大きく、熱負荷が大きい条件であると推測される。そのため、より少ないサイクル数で剥離が生じたと考えられる。このことから、試料位置による剥離に至るサイクル数の差異は、熱負荷が異なっていたためと考えられる。

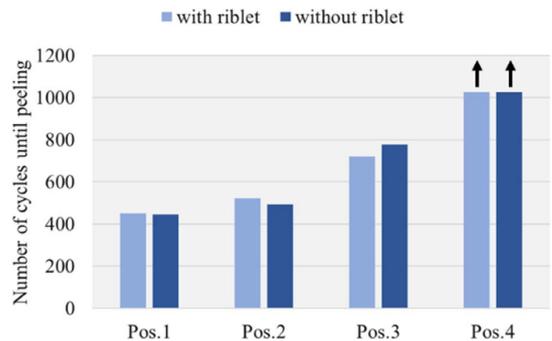


Fig. 5 Comparison of the number of cycles to delamination with riblet and without riblet sample

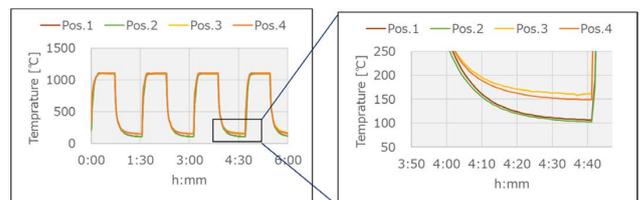


Fig. 6 Differences in temperature profile depending on sample placement position

4.3. リブレットの剥離寿命への影響

剥離した要因を調査するため、剥離が見られなかった Pos. 4の試験片を熱サイクル試験後に SEM/EDXにて、断面観察および元素分析を行った。Fig. 7にSEM観察結果を示す。リブレット加工有無の試験片のどちらもトップコートとボンドコートの界面付近にき裂が見られた。それぞれき裂が開口していない部分(1)と開口した部分(2)の観察結果を示している。このき裂が進展して、全域が開口した時に剥離が生じると考えられる。Pos. 4の試験片は、開口していない部分が残っており、熱サイクル試験で剥離に至らなかったと考えられる。一方で、リブレット加工有無の試料間を比較すると、トップコート全体および表面やリブレット加工周辺のき裂や空孔の大きさや密度に差異は見られなかった。

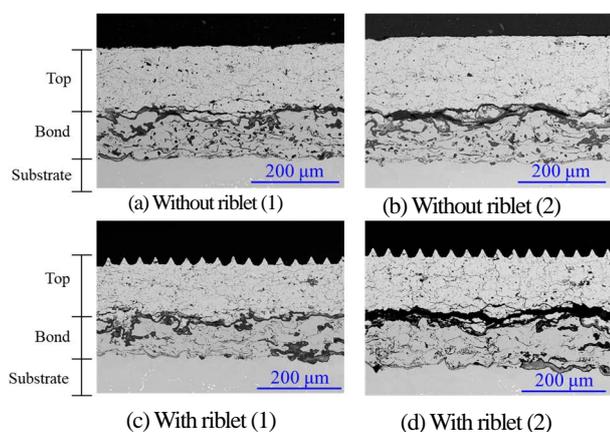


Fig. 7 Cross-sectional microstructure SEM images of lasered riblet TBC sample after heat cycle test (Pos. 4)

Fig. 8にEDS分析結果を示す。Fig. 7のSEM像の(2)の領域でマッピング分析を行った。Zrが検出される領域がトップコート、Ni, Co, Crが検出される領域が、ボンドコートと基材に対応している。ボンドコートとトップの界面にAlとOの成分が観察された。これはTBCを長期間高温で加熱する事で生成した界面酸化物(Al_2O_3)と考えられる。一般に、このような熱的に生成成長した酸化物をTGOといい、このTGOが剥離寿命に大きく影響すると言われている[13]–[16]。リブレット加工有無の試料でこのTGOの厚みや生成箇所に明確な差異は見られなかった。

以上の事から、今回の熱サイクル試験での剥離は、一般的なTBCの剥離挙動と同様に熱サイクルを繰り返す事で熱応力が生じ、横方向のき裂が発生・成長し、全面に進展したのちに生じたものと考えられる。Pos. 3, 4と比較して、Pos. 1, 2では温度勾配が大きく、き裂の発生・進展速度が速いため、少ないサイクル数で剥離が生じたと考えられる。一方で、リブレット加工有無でき裂やTGOの生成・進展に差異は見られず、リブレット加工はこれらに影響を与え

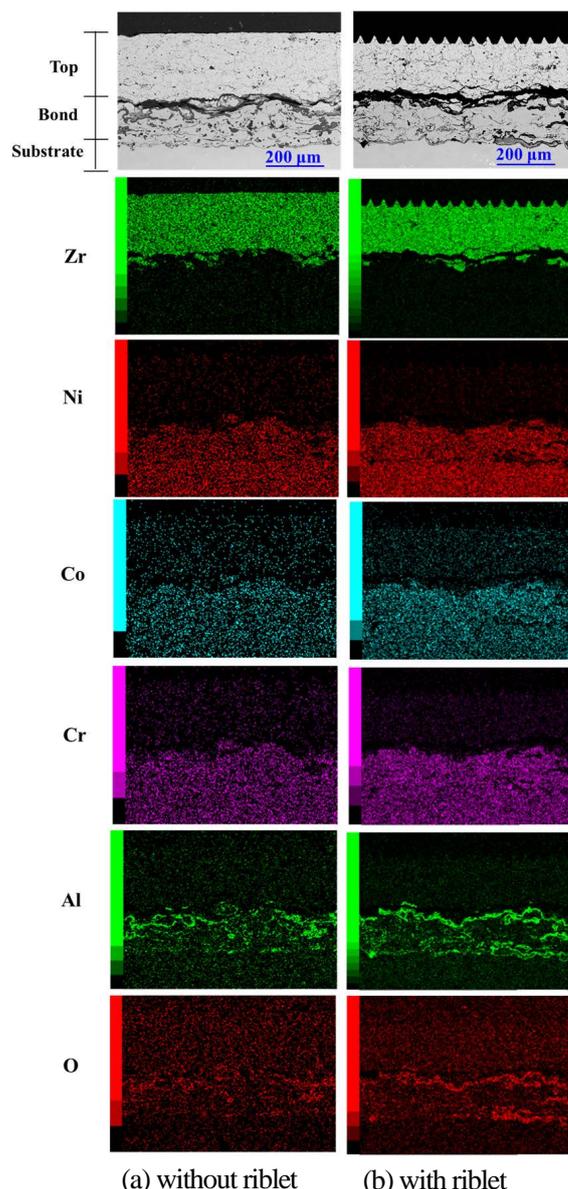


Fig. 8 EDS mapping result of the lasered riblet TBC sample after heat cycle test (Pos. 4)

なかったため、リブレット加工有無で剥離寿命に差異が生じなかったと考えられる。

4.4. リブレットの高温耐久性

高温および熱サイクル負荷によるリブレットの耐久性を評価するため、試験後の試験片をレーザー顕微鏡で評価した。剥離前と剥離後の試験片それぞれ観察を行った。Fig. 9にその結果を示す。どちらの試験片もFig. 4の熱サイクル試験前の形状から変化は見られなかった。1100℃の高温を伴う熱サイクルで剥離が生じるまで負荷を掛けてもリブレット形状に変化が見られなかった事から、熱サイクル環境下に対するリブレット形状の耐久性は十分であると考えられる。

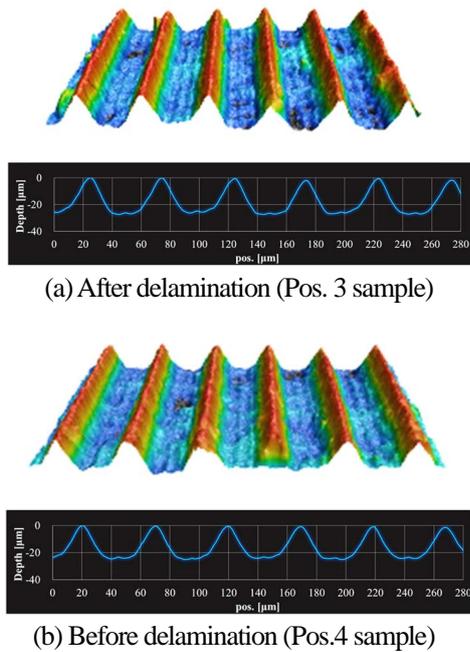


Fig. 9 Microscopic profiles of the lasered riblet TBC sample after heat cycle test

5 まとめ

レーザー加工により、TBCのトップコート上へのリブレット形成を行い、その加工の適用性および熱サイクルによる耐久性を評価した。TBC上にリブレットを形成できる事が分かった。また、リブレット有無で剥離寿命および剥離挙動に差異は見られず、熱サイクル負荷後もリブレット形状は維持できる事が分かった。

以上の事から、性能向上が見込めるリブレットを剥離寿命に影響を与えずにTBC上に形成する事が可能であり、ガスタービンの性能向上策として有用であると考えられる。

引用文献

[1] 綿引健二, 蘆田憲一, 土橋晋太郎, 土橋広和, 内藤兼行, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, “ガスタービン用TBCへのレーザー加工によるリブレット形成と熱サイクル耐久性評価,” 第50回日本ガスタービン学会定期講演会, A-14, 2022.

[2] 三宅裕, “壁乱流の渦,” *ながれ*, vol. 22, no. 1, pp. 29-34, 2003.

[3] 鈴木雄二, 笠木伸英, “壁面乱流の知的能動制御,” *セーブメーション・レビュー マイクロフローセンサ特集号*, pp. 50-57, 2001.

[4] D. W. Bechert, G. Hoppe, and W.-E. Reif, “On the drag reduction of shark skin,” in *Proc. 23rd Aerospace Sciences Meeting*, 1985, doi: 10.2514/6.1985-546.

[5] D. W. Bechert, M. Bartenwerfer, G. Hoppe, and W.-E. Reif, “Drag reduction mechanisms derived from shark skin,” in *Proc. 15th Congr. ICAS*, pp. 1044-1068, September, 1986.

[6] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann, “Femtosecond, Picosecond and Nanosecond Laser Ablation of Solids,” *Appl. Phys. A*, vol. 63, no. 2, pp. 109-115, 1996.

[7] M. C. Richardson, “New Opportunities with Intense Ultra-Short-Pulse Lasers,” in *Proc. of SPIE*, vol. 1410, 1991, pp. 14-25, doi: 10.1117/12.43608.

[8] 吉岡洋明, 土井裕之, 武田淳一郎, 難波浩一, 岡田郁生, 武浩司, 伊藤健之, “発電用ガスタービンの材料技術,” *日本ガスタービン学会誌*, vol. 32, no. 3, pp. 4-47, 2004.

[9] R. Rajendran, “Gas turbine coatings - An overview,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 26, pp. 355-369, 2012, doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.007.

[10] 白石雅之, 土橋晋太郎, 一ノ瀬剛, 柴崎祐一, P. A. Leitl, A. Flanschger, S. Schreck, R. Benauer, S. Pramstrahler, and A. Marn, “タービンをテストリグ出口案内翼への最適リブレット効果予測と、そのレーザー加工によるリブレット性能評価,” 第49回日本ガスタービン学会定期講演会, A-24, 2021.

[11] 稲崎慎也, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, P. A. Leitl, A. Flanschger, S. Schreck, and R. Benauer, “超小型ジェットエンジンの最適リブレット計算とそのレーザー加工、およびエンジン性能での効果検証,” 第49回日本ガスタービン学会定期講演会, A-25, 2021.

[12] 綿引健二, 蘆田憲一, 土橋晋太郎, 土橋広和, 佐藤真路, 一ノ瀬剛, “ガスタービン圧縮機部材へのレーザー加工による、リブレット形成と機械特性評価結果,” 第49回日本ガスタービン学会定期講演会, B-27, 2021.

[13] 岡田満利, “発電用ガスタービン高温部品の寿命評価のための材料技術,” *日本ガスタービン学会誌*, vol. 45, no. 6, pp. 452-457, 2017.

[14] K. M. Doleker, Y. Ozgurluk, and A. C. Karaoglanli, “TGO growth and kinetic study of single and double layered TBC systems,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 415, 127135, pp. 1-11, 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127135.

[15] 児島慶享, “ガスタービン耐熱コーティング開発の最新技術動向,” *日本ガスタービン学会誌*, vol. 38, no. 2, pp. 85-90, 2010.

[16] 有川秀行, 児島慶享, 吉岡隆幸, 岡田満利, 久松暢, “遮熱コーティング (TBC) の高耐久化の検討 (柱状組織トップコート及び界面酸化物の成長抑制について),” *日本機械学会 (No. 04-2) 第9回動力エネルギー技術シンポジウム講演論文集 ('04.6.22,23,東京)*, pp. 119-122, 2004.

綿引健二 Kenji WATAHIKI
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

蘆田憲一 Kenichi ASHIDA
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

土橋晋太郎 Shintaro TSUCHIHASHI
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division

土橋広和 Hirokazu TSUCHIHASHI
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division



綿引健二
Kenji WATAHIKI



蘆田憲一
Kenichi ASHIDA



土橋晋太郎
Shintaro TSUCHIHASHI



土橋広和
Hirokazu TSUCHIHASHI

広角ダブルレットメタレンズに於ける誘電体メタサーフェス素子の種類の違いによる影響

鳥羽英光, 高木英嗣, 大橋道雄, 大滝 桂, 瀧川雄一

Influence on Wide-Angle Doublet Metalenses Due to Different Types of All-Dielectric Metasurfaces[†]

Hidemitsu TOBA, Hidetsugu TAKAGI, Michio OHASHI, Katsura OTAKI and Yuichi TAKIGAWA

ダブルレットメタレンズは、約30度の入射角度まで回折限界の集光が可能であることが先行文献で示されている。この結果は、メタレンズが斜め入射でも有効に機能することを示している。また、様々なメタアトムが提案されているが、どのようなメタアトムが斜め入射に強いかを比較した報告は私たちの知る限りない。そこで我々はまず、3種類のメタアトムの入射角依存性を数値的に計算した。その結果、導波路型構造が斜め入射に対して最もロバストであることがわかった。次に、円筒形ダブルレットメタレンズについて電磁場シミュレーションを行い、マイクロポスト型と導波路型の比較を行った。これらの結果から、導波路型メタサーフェスは、先行文献のダブルレットレンズの性能をさらに向上させる可能性があることが分かった。

It has been shown in previous literature that nearly diffraction limited focusing is possible by a doublet metalens up to almost 30 deg. This result indicates that metalenses can work well, even at oblique incidence. Although various meta-atoms have been proposed, as far as we know, there is no report that compares what kind of meta-atom is robust against oblique incidence. Here, we first numerically calculated the incident angle dependence of the three types of meta-atoms. The results show that the waveguide-type structure is the most robust to oblique incidence. Next, we performed rigorous electromagnetic simulations for the cylindrical doublet metalenses to compare the micropost-type and waveguide-type. These results indicate that a waveguide-type metasurface further improves the off-axis performance of the doublet lens previously introduced.

Key words メタサーフェス, メタレンズ, 入射角度依存性
metasurface, metalens, incident angle dependence

1 Introduction

Metasurfaces are 2D arrays of subwavelength structures known as “meta-atoms.” Metasurfaces have been shown to enable control of the amplitude, phase, polarization, and orbital angular momentum of reflected or transmitted light. One of the important applications of metasurfaces is wavefront control and especially the metasurface that works as a metalens. Many kinds of meta-atoms have been designed for the phase control of metasurfaces using high-index materials. Lalanne and Chavel classified them into three groups [1]: waveguide-type, resonant-type micropost, and resonant-type nanodisk. The waveguide-type has a single mode in the structure. The period is smaller than the structural cutoff [2]

and the aspect ratio is relatively high. Microposts are multi-mode; Kamali *et al.* reported that at least eight resonant modes contribute to the transmittance and the phase in their micropost [3]. The aspect ratio is weakly relaxed compared to the waveguide-type. The doublet metalens that we focus on in this paper is a micropost-type structure. A nanodisk-type can be understood in terms of Mie resonance [4], [5]. A nanodisk-type metalens consists of periodically arranged disk-like structures whose fundamental electric and magnetic resonances coincide at the same wavelength. The aspect ratio is significantly relaxed and good for manufacturing. The three groups classified by Lalanne and Chavel are simple structures such as square pillars or cylindrical pillars that are polarization-independent for normal incident light

[†] This paper is reprinted with permission from © Optica Publishing Group of reference [21].

due to their symmetry. Most metalenses are designed for a normal incident beam. However, oblique incident light is important for many applications such as imaging. Arbabi *et al.* showed that doublet metalenses are capable of nearly diffraction-limited focusing up to an incidence angle of 30 deg [6]. Their results indicate that the subwavelength elements designed by Arbabi *et al.* are robust to the oblique incidence. However, the paper does not mention much about oblique incidence characteristics.

Although there are previous studies on the characteristics of oblique incidence on dielectric metasurfaces [1], [7], [8], there is no report, to the best of our knowledge, that compares the phase responses of oblique incidence and how those three types affect lens performances. In this paper, we first calculate the incident angle dependence of the three types of meta-atoms classified by Lalanne and Chavel. Our results indicate that the waveguide-type can be most suitable for wide-angle incidence. We then confirm the effect of structural differences on the performance of a doublet lens with full electromagnetic simulations. There are studies on the optimization of the metasurface for further efficiency improvement [9]–[11], but optimized structures are not covered in this paper.

2 Oblique Incidence Characteristics of The Meta-Atoms

We calculate the transmission characteristics of three types of meta-atoms by rigorous coupled-wave analysis

(RCWA) [12], [13]. The angle of incidence is calculated from 0 deg to 30 deg. The transmittance and phase are calculated for both TE and TM polarization for oblique incidence because the response of the structure is different depending on the polarization, even when the structure is polarization independent at normal incidence. For each type, the parameters of the metasurface structure, such as height of the pillar and period, are selected from previous papers. The parameters used in the calculation are summarized in Table 1. Fig. 1 illustrates the dependence on the angle of incidence for the three types of subwavelength elements with TM polarization, and Fig. 2 shows the same for TE polarization. Figs. 1 (a) and 1 (d) are the results for the transmittance and the phase of the waveguide-type [2], respectively. Similarly, Figs. 1 (b) and 1 (e) and Figs. 1 (c) and 1 (f) are those of the micropost-type [6] and the nanodisk-type [5]. The

Table 1 Parameters for Oblique Incidence Characteristic Calculations

Meta-atom Type	Waveguide	Micropost	Nanodisk
Lattice type	Square	Hexagonal	Square
Lattice const.	272 nm	450 nm	666 nm
Pillar shape	Square	Cylindrical	Cylindrical
Pillar height	817 nm	600 nm	220 nm
Pillar material	TiO ₂	Amorphous silicon	Silicon
Wavelength	633 nm	850 nm	1340 nm
Material between pillars	Air	SU-8	Embedded in medium with $n = 1.66$
Substrate	SiO ₂	SiO ₂	
References	[2]	[6]	[5]

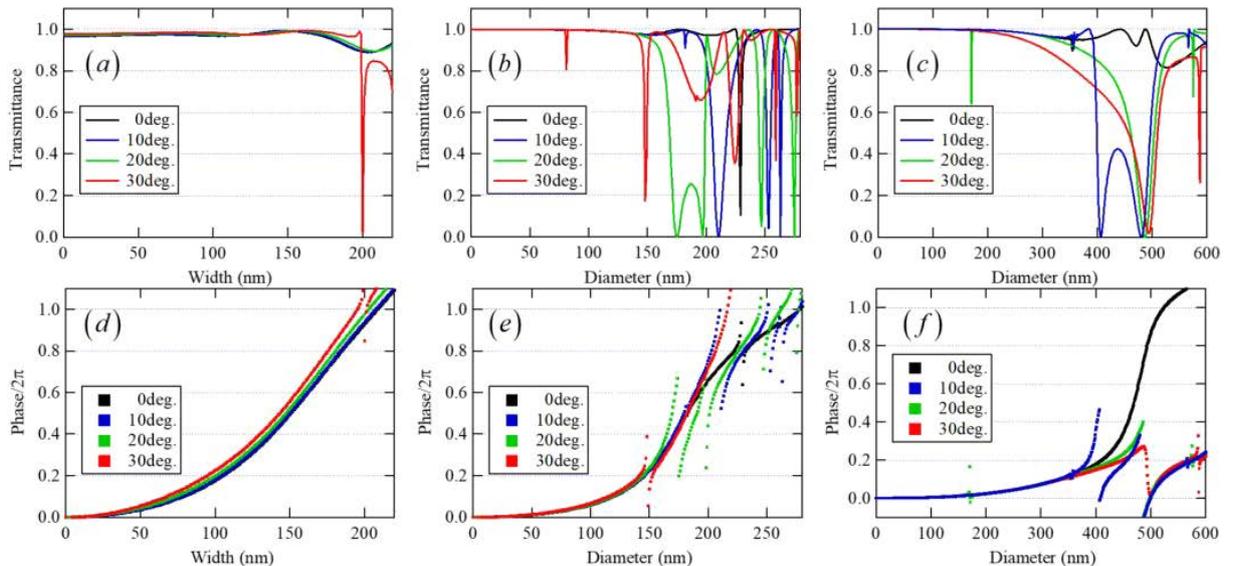


Fig. 1 Incident angle dependence of the transmission coefficient from an infinite 2D array of meta-atoms for TM polarized light: (a)–(c) Transmission coefficients and (d)–(f) phase. (a), (d) Waveguide-type structure [2]. (b), (e) Micropost structure [6]. (c), (f) Nanodisk structure [5].

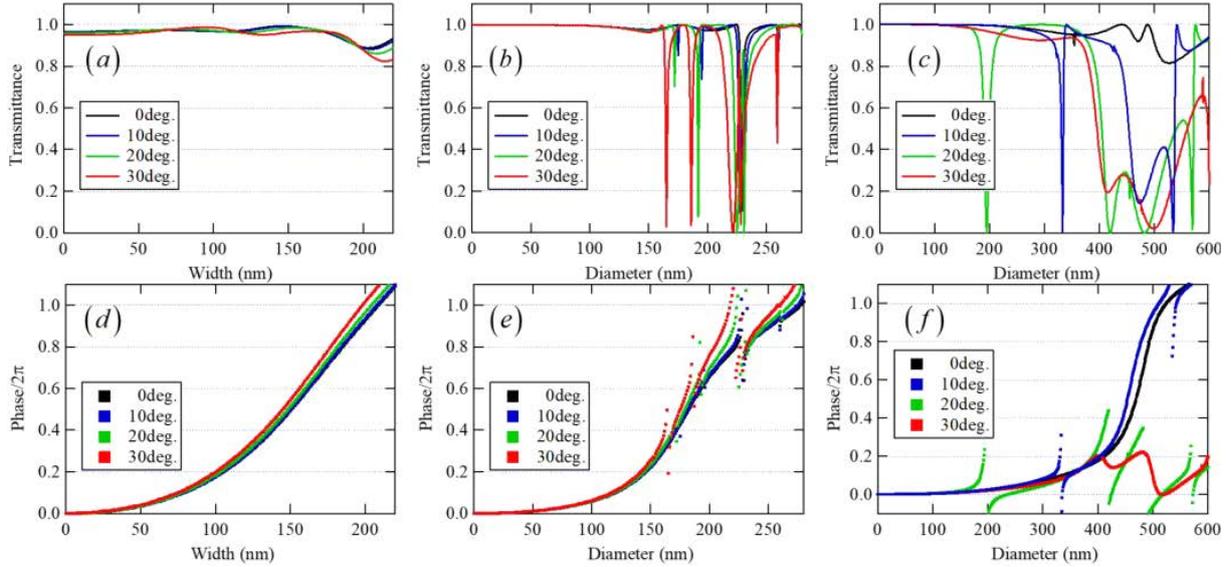


Fig. 2 Incident angle dependence of the transmission coefficient from an infinite 2D array of meta-atoms for TE polarized light: (a)–(c) Transmission coefficients and (d)–(f) phase. (a), (d) Waveguide-type structure [2]. (b), (e) Micropost structure [6]. (c), (f) Nanodisk structure [5].

same applies to Fig. 2 regarding the numbering of subfigures.

The desired features of a meta-atom for lens applications are that the transmittance of the metasurface is close to unity and that the phase covers the range of 2π or more by changing the width of the pillars. Further, it is required that the phase does not change with angle of incidence. In the case of normal incidence, it can be seen in Fig. 1 and Fig. 2 that the phase can be controlled over a range larger than 2π and with high transmittance for all three types. For the micropost-type and the nanodisk-type, however, there are large drops in the transmittance when the incidence angle is 20 deg and 30 deg. These drops are considered to originate from the multiple resonances because multiple resonances can cause destructive interferences. Furthermore, the phases around the drops in transmittance are drastically modulated. Therefore, these will not work well at oblique incidence. In particular, the nanodisk-types cannot cover 2π by changing the diameter at incident angles greater than 10 deg. This is due to the fact that the electrical resonance and magnetic resonance in the nanodisk no longer overlap at oblique incidence, which is clearly seen when the incidence angle is 10 deg in Figs. 1 (c) and 1 (f). Therefore, metalenses made from nanodisks will not have sufficient phase modulation at oblique incidence and good lens performance cannot be expected. On the other hand, the waveguide-type has almost the same transmission phase as normal incidence up to 30 deg. Because the waveguide-type has only a single mode in the structure, the destructive interferences do not

happen, even at oblique incidence [7]. These results indicate that the waveguide-type can be superior to the lens performance compared to the other types. Fig. 3 shows examples of the electromagnetic field distributions for the incident angles 0 deg and 20 deg for each type. The electromagnetic field distribution in the waveguide for incident angle 20 deg is almost the same as that of normal incidence because of the single mode; on the other hand, the electric field distributions at 20 deg in the micropost-type and nanodisk-type evidently differ from those at normal incident lights because of multimode.

The doublet metalenses introduced in [6] worked well for oblique incident beams composed of the micropost-type meta-atom. However, from the results of these oblique incident characteristics, it is possible that the performance of the doublet metalenses is further improved by using the waveguide-type instead of the micropost-type.

Since these transmission and phase simulations do not directly indicate what kind of lens performance improvement should be expected, we performed lens-focusing simulations to find out.

3 Electromagnetic Simulations for Cylindrical Doublet Metalens

To understand what kinds of lens performance the waveguide-type improves, we simulate focusing with doublet-metalenses composed of micropost-type and waveguide-type meta-atoms by full electromagnetic simulations. The former

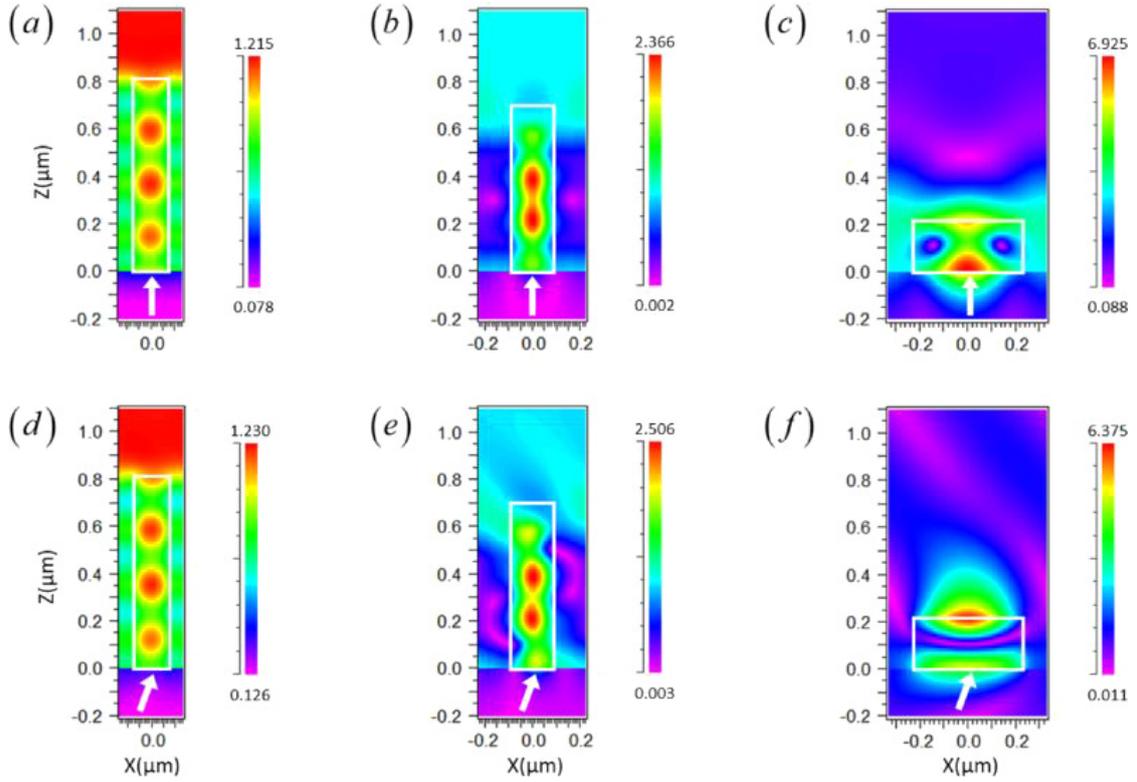


Fig. 3 Examples of the electromagnetic field amplitudes E_y for TE polarized light at $Y = 0$. (a)–(c) Normal incidence and (d)–(f) incident angle 20 deg. (a), (d) Waveguide-type structure [2] of pillar width 150 nm. (b), (e) Micropost structure [6] of diameter 180 nm. (c), (f) Nanodisk structure [5] of diameter 460 nm. The electronic field component of the incident wave is omitted. Arrows indicate the angle of incidence.

Table 2 Parameters for Oblique Incidence Characteristic Calculations

Meta-atom Type	Waveguide	Micropost
Lattice type	Square	Hexagonal
Lattice const.	280 nm	450 nm
Pillar shape	Cylindrical	Cylindrical
Pillar height	800 nm	600 nm
Material	Amorphous silicon	Amorphous silicon
Wavelength	850 nm	850 nm
Material between pillars	Air	SU-8
Substrate	SiO ₂	SiO ₂

is a micropost-type introduced by Arbabi *et al.* [6] and the latter is a waveguide-type that we designed for these cylindrical lens simulations. Table 2 shows the parameters. The diameter used in the cylindrical lens simulations is from 91 nm to 190 nm and the maximum aspect ratio is 8.8. Fig. 4 is the pillar width dependence of the transmittance and the phase for the waveguide-type structure for normal incidence. The inset of the graph in Fig. 4 is a schematic illustration of the unit cell of the meta-atom. The amorphous silicon cylindrical pillars are aligned periodically on a 2D square lattice

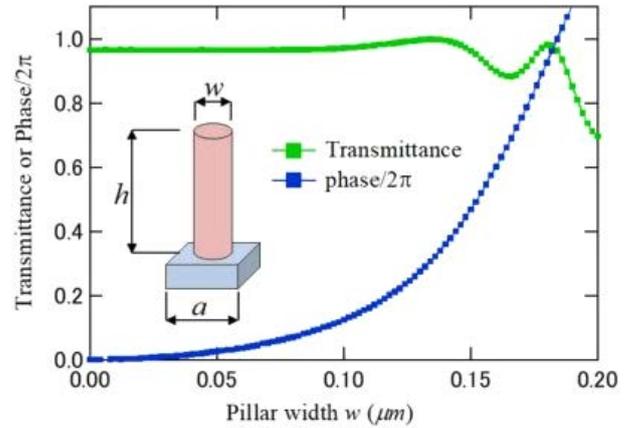


Fig. 4 Transmittance and the phase of the waveguide-type meta-atom we used in the doublet simulations.

on the fused silica substrate with a height of $h = 800 \text{ nm}$ and a lattice constant $a = 280 \text{ nm}$. In our simulations, we use the design of the doublet metalens introduced by Arbabi *et al.*, whose phase profile parameters are shown in Table 1 of the supplementary material in [6]. The cross section is depicted in Fig. 5. The doublet metalens consists of two flat lenses. We refer to the first one as a correcting lens and the second one as a focusing lens. This doublet lens is designed for a single wavelength of 850 nm.

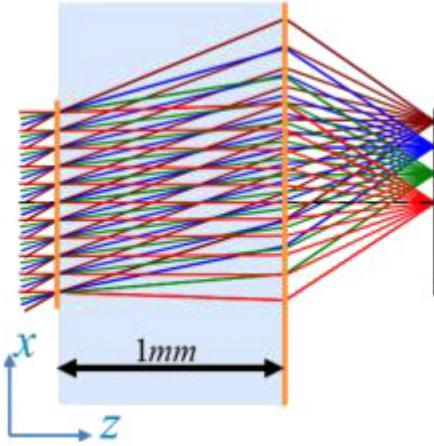


Fig. 5 Doublet metalens introduced by Arbabi *et al.* Phase profile parameters for this doublet metalens are shown in Table 1 in the supplementary material in [6].

There are various electromagnetic simulation methods to study the behavior of electromagnetic fields in structures of the order of wavelength size or below. In particular, the finite-difference time-domain (FDTD) method [14], [15] and the RCWA is widely used. The RCWA is most typically applied to solve scattering from periodic structures. Therefore, we chose RCWA to calculate the transmittance and phase of the periodic element of a metasurface for Figs. 1 and 2. On the other hand, FDTD is more flexible than RCWA, and FDTD can be used for a nonperiodic structure, so we chose FDTD for the doublet metalens simulations below. FDTD grid element sizes are typically from $1/10$ to $1/20$ of the wavelength to avoid numerical dispersion. However, the grid size to simulate a metalens must be much smaller to represent the change of the pillar diameter of the meta-atom in metasurfaces and a much larger scale simulation is required. As a result, a tremendous amount of time and PC memory will be required to simulate a metalens of a size for practical use. In this paper, we simulate the doublet metalens designed by Arbabi *et al.* [6] (see Fig. 5). The diameter of the lens is $\phi = 1.6 \text{ mm}$ and the thickness is $t = 1 \text{ mm}$. If we simulate such a double metalens by simple FDTD with a 5 nm grid element size, the simulation requires $320,000 \times 320,000 \times 200,000$ grid elements. This means that we need much more than petabyte memories to simulate the doublet metalens—and it is unrealistic.

There are several ways to simulate the mm size doublet lens and avoid this difficulty. One approach is to proportionally reduce the simulation size [16]. Lenses under those kinds of simulations are scaled by some scaling factor with parameters such as NA or F/no kept constant. It is reasonable to assume that the focusing features are unchanged

because the spot size for ideal focusing depends only on the wavelength and the NA. However, the wavefront aberrations are proportional to the scaling factor and, in this situation, the wavefront aberrations will be underestimated and the balance between the wavefront aberration and the other effects will change. Hence, the lens should be simulated in the same scale as we use in practice, if we want to know the imaging quality in terms of the aberration. Another approach is that the metalens is treated as a phase mask. The response at each position on the metalens is defined by the transmittance and its phase obtained by numerical calculation of individual elements [17]. This method allows us to efficiently simulate many features of the metalenses. However, interactions between subwavelength elements are neglected in this method. In the dielectric meta-surface, a material with a high refractive index is used for the meta-atom so that the electromagnetic field is localized in the meta-atoms and the interactions between neighboring meta-atoms are suppressed to a small level. Therefore, the assumption that the meta-atom can be treated as an independent element might hold to some extent, but the interaction is not zero. In particular, the interaction is likely to be very different at regions where the phase changes rapidly. Byrnes *et al.* proposed another good method that takes advantage of the fact that the phase profile away from the center of the lens can be approximated as a collection of deflector cells [9]. The propagation components from each cell are obtained by RCWA and then the electric fields immediately after transmission through the lens are constructed by the components. This method can calculate a large lens with a good approximation, but the complicated calculations are then required when the incident light is not a simple plane wave, as is the case at the focusing lens of the doublet metalens.

We adopt yet another approach. We simulate a cylindrical lens instead of a rotationally symmetric aspherical lens [18]. Fig. 5 can be considered as the cross section of the corresponding cylindrical lens as well as that of the rotationally symmetric aspherical lens and the wavefront profile on the meridional plane of the spherical lens is identical to the wavefront profile for the cylindrical lens. In a cylindrical lens simulation, we can only know the behavior of the wave on the meridional plane, but the balance between the wavefront aberration and the other effects are the same as in the original lens and we can get useful information from the results. Because the meta-atoms on the cylindrical metalenses are aligned periodically along the cylindrical axis, we can use a periodic boundary condition. And the periodic lat-

tice constants of meta-atoms are smaller than the wavelength. This means that a cylindrical lens configuration can reduce the simulation size smaller than the wavelength along the cylindrical axis. In the case of a doublet metalens, however, the distance between the two metalenses is as large as 1 mm. Hence, even if there is a cylindrical configuration with a periodic boundary condition, the simulation size is still too large to simulate along the optical axis. We must therefore adopt an additional means to reduce the calculation time. One of the ways to reduce the calculation size is subgridding [15]. The space between the two metalenses of the doublet is a uniform medium and the grid element size can be larger than needed by metasurface elements. Still, the calculation size with subgridding remains huge. So instead of subgridding, we calculate the propagation from the first metalens surface to the second with Rayleigh–Sommerfeld (RS) diffraction that is usually used for scalar diffraction. The medium between the first metalens and the second one is isotropic, homogeneous, and source free. Each six components of the electromagnetic field obey the RS diffraction formula independently in the medium (see Appendix A). Therefore, an exact full electromagnetic solution can be calculated by the RS diffraction between the two metalenses. Then the FDTD calculation is needed only in the vicinity of the two metalenses and the calculation size along optical axes becomes only several micrometers if the wavelength used in the simulations is 850 nm. As described above, by adopting a combination of an RS diffraction calculation and FDTD with a cylindrical lens configuration, it is possible to perform the imaging simulation of the doublet lens in a realistic time. We calculate the fields on the focal plane by following steps:

Step 1: FDTD calculation for the correcting lens.

Input plane wave is excited in the plane just before the correcting lens. The outputs are E_x , E_y , H_x , and H_y in the plane just after the correcting lens.

Step 2: RS diffraction calculation between correcting lens and focusing lens.

Calculate the RS diffraction for each field distribution outputted by FDTD calculation in Step 1. The outputs of these diffraction calculations are the field distributions just before the focusing lens. These calculations can be calculated independently for each field.

Step 3: FDTD calculation for the focusing lens.

Input source is excited in the plane just before the focus-

ing lens using the field distributions calculated by RS diffraction in Step 2. Outputs are E_x , E_y , H_x , and H_y in the plane just after the focusing lens, just like in Step 1.

Step 4: RS diffraction calculation from focusing lens to focal plane.

Calculate the RS diffraction as in Step 2 from the plane just after the focusing lens to the focal plane. The focal spot and the modulation transfer function (MTF) can be calculated from the outputs.

It is important to note that the multiple reflections between the two metalenses do not appear in the results since the back-ward wave is excluded from the calculation of the RS diffraction in Step. 2. However, if there is 10% reflection from a metasurface, noise originated from the multiple reflections will be only about 1% and there will be no significant effect on the simulation results. Multiple reflections will be discussed further at the end of Section 4.

We adopt the FFT–DI method [19] to numerically calculate the RS diffraction formula. The sampling periods and the calculation size on the input plane do not change at the output plane and the output region can be shifted perpendicular to the optical axis by shifting the center of the transfer function kernel $h(x, y)$ in Eq. (A3) of the FFT–DI calculation. In our calculations, since the structures along the cylindrical axis are smaller than the wavelength, propagated wave fields (not evanescent wave fields) are constant along the cylindrical axis. Therefore, we adopt as the transfer function kernel Eq. (A3) instead of Eq. (A2) for the cylindrical doublet metalenses simulations.

4 Results and Discussion

Here, we show the simulation results of the doublet metalenses made of micropost-type and waveguide-type meta-atoms. Simulations are performed with both TM and TE polarization, and the incidence angles are from 0 deg to 30 deg in 10 deg steps. The grid size in the FDTD simulation is $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5 \text{ nm}$. Perfectly matched layers (PML) are used in the Z axis direction and the periodic boundary conditions are used in the X axis and Y axis directions.

Fig. 6 and 7 show focal spots on the focal plane at 0 deg, 10 deg, 20 deg, and 30 deg incident angles, and the corresponding MTF. Fig. 6 is for TM polarization and Fig. 7 is for TE polarization. Figs. 6 (a) and 6 (c) shows the focal spots for the micropost-type and waveguide-type, respectively. Figs. 6 (b) and 6 (d) are the MTFs. The same applies to

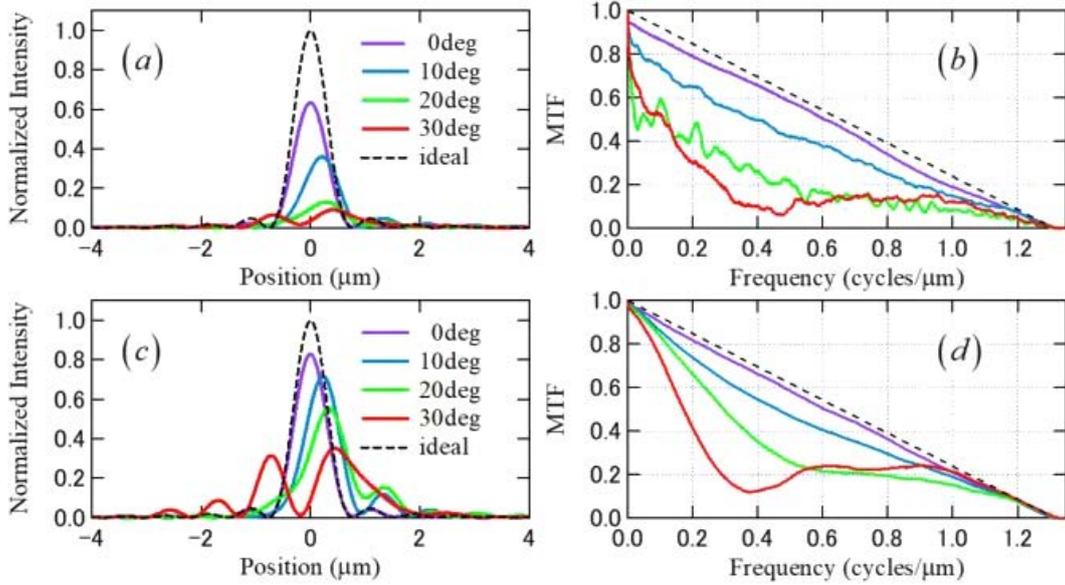


Fig. 6 Focal spots and MTFs for TM polarization: (a) Focal spots of micropost-type, (b) MTF for micropost-type, (c) focal spot of waveguide-type, and (d) MTF for waveguide-type. Dotted line represents ideal focal spot and the corresponding MTF.

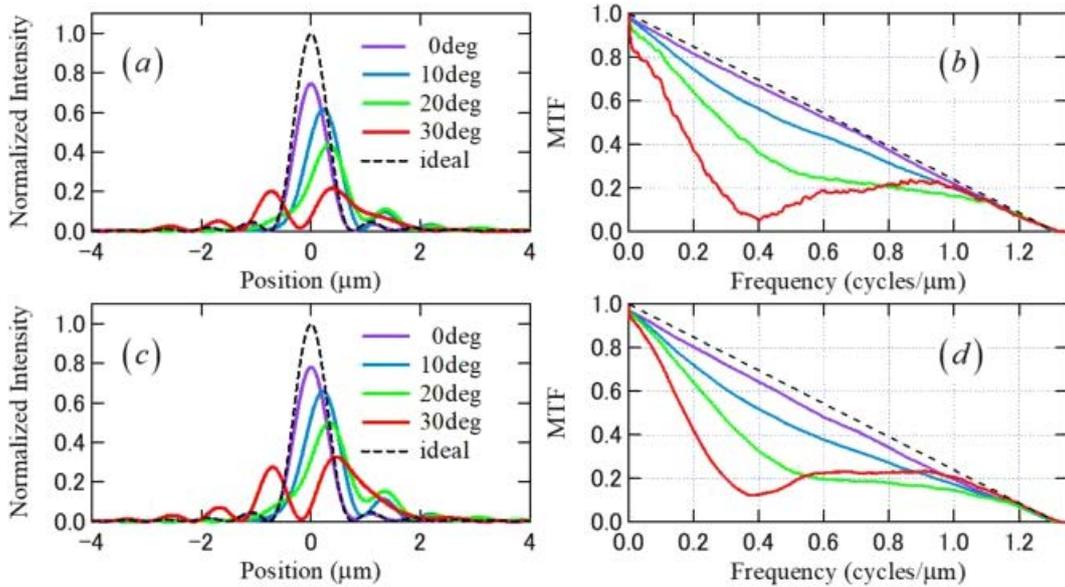


Fig. 7 Focal spots and MTFs for TE polarization: (a) Focal spots of micropost-type, (b) MTF for micropost-type, (c) focal spot of waveguide-type and (d) MTF for waveguide-type. Dotted line represents ideal focal spot and the corresponding MTF.

Fig. 7 regarding the numbering of subfigures. Intensity distributions are calculated by $I = |S_z| = |E_x H_y - E_y H_x|$ and are normalized so that the maximum value of an ideal spot without loss due to scattering or reflection is unity. The chief ray heights calculated by ray tracing are set at the origin of the horizontal axis for oblique incident focal spots.

The difference between the results of the micropost-type and those of the waveguide-type is not large for the TE polarized incident light. Similarly, the difference in results is not large in the case of normal incidence for TM polariza-

tion. However, we can see differences in the MTF between the two types at low frequencies below 0.2 cycles/ μm for the oblique incidence, especially at 20 deg and 30 deg of TM polarization. Obviously, the waveguide-type is superior to the micropost-type. Moreover, the MTF for incident angles of 20 deg and 30 deg of the micropost-type is very noisy. This is because speckle-like noise is distributed around the spot. Note that the intensities of the speckle are too small to be seen in Fig. 6 (a). We can understand it from the viewpoint that the MTF is defined as the magnitude of the Fourier

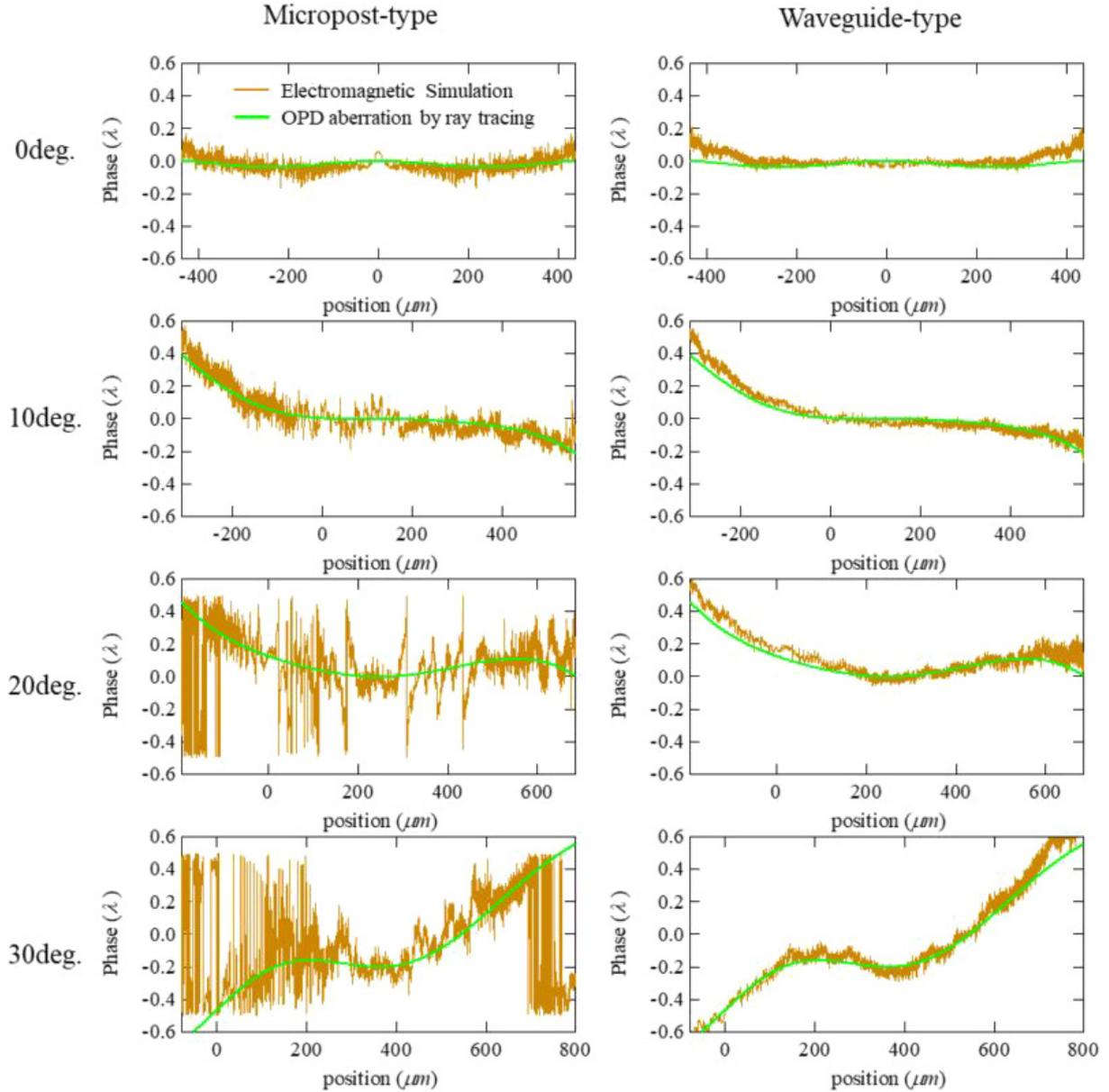


Fig. 8 Wavefront aberrations for each incident angle with TM polarization. Results for the micropost-type are shown in the left column, and those of the waveguide-type are in the right column. Electromagnetic simulations are plotted in light brown, and OPD aberrations are plotted in light green.

transform of the point-spread function. The speckle-like noise appears as flare under incoherent illumination.

Figs. 8 and 9 show the wavefront aberrations of the micropost-type and the waveguide-type. These are our main results. Fig. 8 is for TM polarization and Fig. 9 is for TE polarization. The left column is the micropost-type and the right column is the waveguide-type.

The light brown lines are the wavefront aberrations by electromagnetic field simulations that are the difference from the ideal spherical wavefront on the plane immediately after the focusing metalens. The green lines are the designed wavefront aberration calculated by ray tracing (CODE V, Synopsys, Inc.) as the optical path difference

(OPD) aberrations. Metalenses can be defined as phase profiles with even-order polynomials of the radial coordinate in ray tracing calculations. For the waveguide-type, it can be seen that the wavefronts of ray tracing and those of electromagnetic simulations are in good agreement in all cases. For the micropost-type, good agreement is shown when all the cases are of TE polarized light and also in the cases of TM polarized light at small angles of incidence. However, when the incident angle is as large as 20 deg and 30 deg, we can see very large fluctuations in the wavefront and large deviations from the wavefront by ray tracing. In this way, the waveguide-type can suppress the jaggedness of the wavefront aberrations for oblique incident TM polarized light.

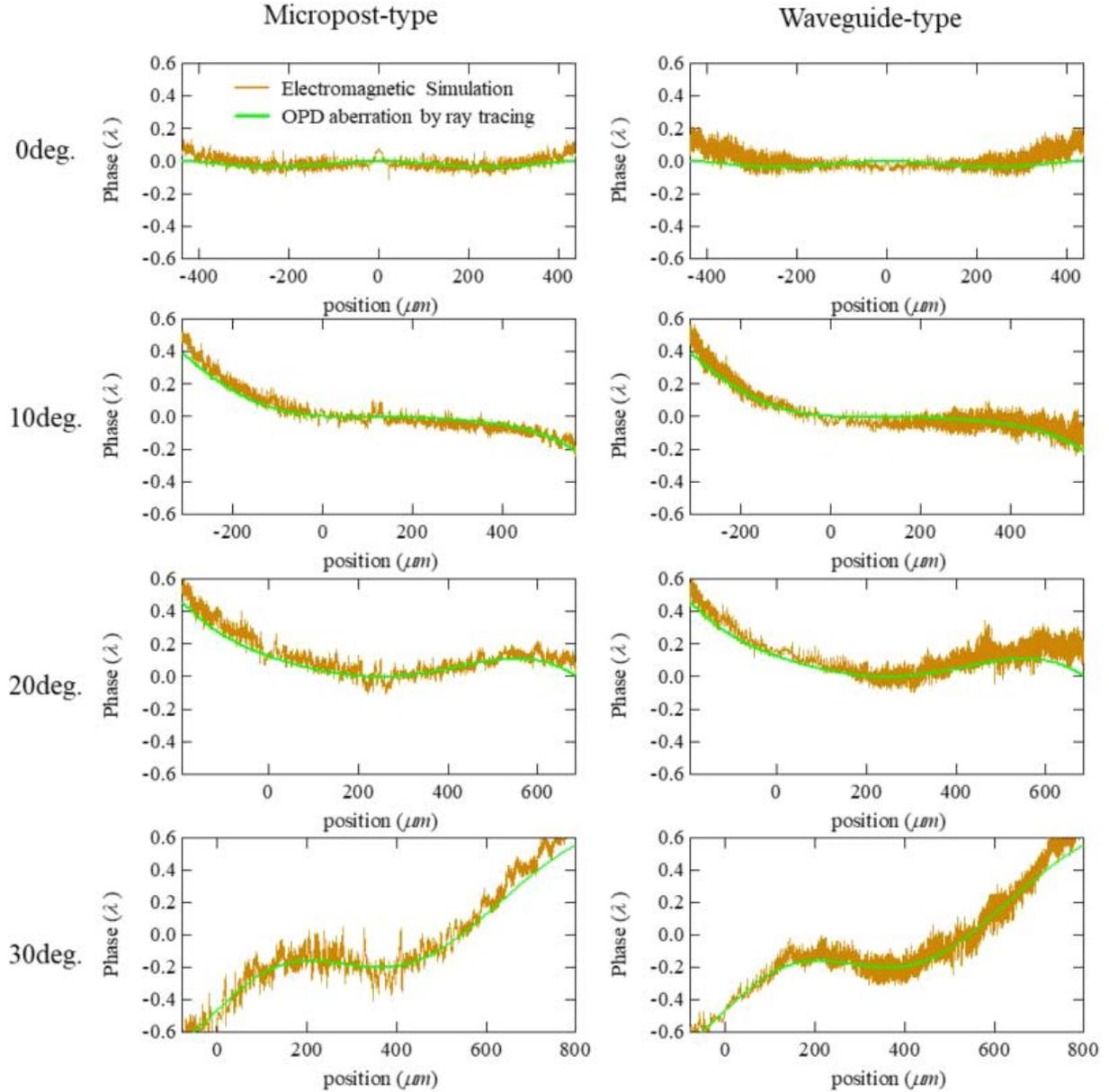


Fig. 9 Wavefront aberrations for each incident angle with TE polarization. Results for the micropost-type are shown in the left column, and those of the waveguide-type are in right column. Electromagnetic simulations are plotted in light brown, and OPD aberrations are plotted in light green.

The main difference between the micropost-type and the waveguide-type is whether it has multimode or single mode, as we can see in Fig. 3. Note that multimode can cause destructive interferences at oblique incidence. They can be seen in the results of the transmittance and transmission phase of the meta-atom itself at oblique incidence, as shown in Figs. 1 and 2, and can result in the jaggedness of the wavefront for the micropost-type metalens.

The difference between the two types can be clearly seen by looking at the wavefront aberration rather than the focal spots or MTF. In addition, the speckle-like noise that appeared at 20 deg and 30 deg of TM polarized light when discussing the MTF can be understood from the disturbance

of these wavefronts.

Fig. 10 shows the total power immediately after the correcting lens, the total power immediately after the focusing lens, and the focusing efficiency at the focus position when the power of the incident light on the correcting lens is unity. We define the focusing efficiency as the fraction of the incident light that focused within six times the FWHM spot size.

It can be seen that the focusing efficiencies of the waveguide-type are clearly better than those of the micropost-type. There is not a big difference between the waveguide-type and the micropost-type in terms of wavefront aberration for TE polarization (Fig. 9), but the focusing efficiencies are better than those of the micropost-type. From this result, it

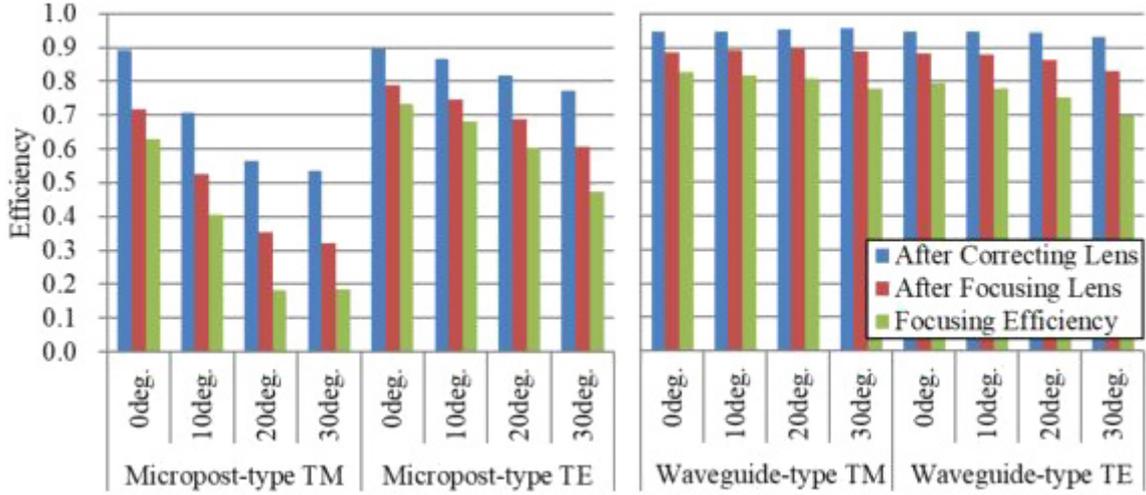


Fig. 10 Efficiency just after the two metasurfaces and focusing efficiencies for: (left) micropost-type doublet metalens and (right) waveguide-type doublet metalens.

is clear that the efficiencies are greatly improved using the waveguide-type metalens compared to the micropost-type metalens when the angle of incidence is large. As we mentioned above, in our simulations the multiple reflections will not have a significant effect if there is 10% reflection from a metasurface. All reflectance from each waveguide metalens are below 10%, except the condition when the incident angle is at 30 deg of TM polarized light whose reflectance for the focusing metalens is 11%; therefore, we can neglect the multiple reflections. As for the micropost-type, however, some reflectance for each metalens are more than 30% and multiple instances of reflected light may appear on the image plane as noise or flare. Therefore, the image quality for a micropost-type metalens can be worse in terms of multiple reflections.

5 Conclusion

It is shown that the wavefront aberrations estimated by full electromagnetic simulations for a waveguide-type metasurface are in good agreement with those found by ray tracing. On the other hand, when the incident angle is large, the wavefront of the micropost-type metalens has large fluctuations. Then, the difference from ray tracing becomes large and those fluctuations cause flare. These results show that the waveguide-type can improve the lens performance of Arbabi's doublet in terms of efficiency, wavefront aberration, and flare.

Because our simulations do not take fabrication errors into account, we cannot mention how tight the tolerance is. The waveguide-type structure is not easy to manufacture, and tight tolerance might be required, which will increase

the manufacturing costs. Therefore, a lens with nanodisk-type or micropost-type might be more desirable when using only normal incidence or when the incident angle is not so large. However, from our results, it is better to select the waveguide-type to make a metalens with a large angle of view for a single wavelength, which will have a small aberration and high efficiency. In addition, it is important to check whether the oblique incident characteristics meet the desired lens specifications when designing a sub-wavelength element.

APPENDIX A: Rayleigh–Sommerfeld Diffraction

Let's review the Rayleigh–Sommerfeld (RS) diffraction. When the medium is isotropic, homogeneous, and source free, the time-independent 3D Helmholtz equation for a single frequency is derived from Maxwell's equations:

$$\begin{aligned} (\nabla^2 + k^2)\mathbf{E}(\mathbf{x}) &= 0 \\ (\nabla^2 + k^2)\mathbf{H}(\mathbf{x}) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

where \mathbf{E} and \mathbf{H} are the electric and magnetic field, and k is wave number. From this formula, we know that each component of the electric or magnetic fields can be expressed independently from the other components. The Rayleigh–Sommerfeld formula of the first kind is

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \int U(x', y') h(x - x', y - y') dx' dy' \\ h(x, y) &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\exp(ik\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

where $U(x, y)$ is a complex amplitude of a field. It is an exact solution to the Helmholtz equation from an initial (x', y') plane

to a parallel (x, y) plane with distance z [20]. Therefore, if we know the six components of the electromagnetic field in an initial plane, we can independently calculate each field in the planes parallel to the initial plane using Eq. (A2). If the field distribution does not change along that y axis, as in our simulations, the Rayleigh–Sommerfeld formula in Eq. (A2) is reduced to

$$\begin{aligned} U(x) &= \int U(x')h(x-x')dx' \\ h(x) &= \frac{kz}{2i\sqrt{x^2+z^2}} H_1^{(2)}\left(k\sqrt{x^2+z^2}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

where $H_1^{(2)}$ is a Hankel function of the second kind.

Acknowledgment. The authors wish to thank Dr. Daniel G. Smith of Nikon Research Corporation of America, and Hironobu Makitsubo, Satoshi Yashiki, Hiroyuki Tsukamoto, Daisuke Mori, Hiroshi Konishi, and Seiki Yoshikawa of Nikon Corporation for their great help. Portions of this work were presented in 2021 at META 2021 as “Influence on wide-angle metasurface doublet due to different types of all-dielectric metasurface.”

References

- [1] P. Lalanne and P. Chavel, “Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives,” *Laser Photon. Rev.* vol. 11, pp. 1600295, 2017.
- [2] P. Lalanne, S. Astilean, P. Chavel, E. Cambriil, and H. Launois, “Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff,” *J. Opt. Soc. Am. A* vol. 16, pp. 1143–1156, 1999.
- [3] S. M. Kamali, A. Arbabi, E. Arbabi, Y. Horie, and A. Faraon, “Decoupling optical function and geometrical form using conformal flexible dielectric metasurfaces,” *Nat. Commun.* vol. 7, pp. 11618, 2016.
- [4] J. Cheng, D. Ansari-Oghol-Beig, and H. Mosallaei, “Wave manipulation with designer dielectric metasurfaces,” *Opt. Lett.* vol. 39, pp. 6285–6288, 2014.
- [5] M. Decker, I. Staude, M. Falkner, J. Dominguez, D. N. Neshev, I. Brener, T. Pertsch, and Y. S. Kivshar, “High-efficiency dielectric Huygens’ surfaces,” *Adv. Opt. Mater.* vol. 3, pp. 813–820, 2015.
- [6] A. Arbabi, E. Arbabi, S. M. Kamali, Y. Horie, S. Han, and A. Faraon, “Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations,” *Nat. Commun.* vol. 7, pp. 13682, 2016.
- [7] C. Gigli, Q. Li, P. Chavel, G. Leo, M. L. Brongersma, and P. Lalanne, “Fundamental limitations of Huygens’ metasurfaces for optical beam shaping,” *Laser Photon. Rev.* vol. 15, pp. 2000448, 2021.
- [8] D. Arslan, K. E. Chong, D. N. Neshev, T. Pertsch, Y. S. Kivshar, and I. Staude, “Silicon Huygens’ metasurfaces at oblique incidence,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe European Quantum Electronics Conference*, 2017, paper EH_6_2
- [9] S. J. Byrnes, A. Lenef, F. Aieta, and F. Capasso, “Designing large, high-efficiency, high-numerical-aperture, transmissive meta-lenses for visible light,” *Opt. Express* vol. 24, pp. 5110–5124, 2016.
- [10] J. Yang and J. A. Fan, “Topology-optimized metasurfaces: impact of initial geometric layout,” *Opt. Lett.* vol. 42, pp. 3161–3164, 2017.
- [11] D. Sell, J. Yang, S. Doshay, R. Yang, and J. A. Fan, “Large-angle, multifunctional metagratings based on freeform multimode geometries,” *Nano Lett.* vol. 17, pp. 3752–3757, 2017.
- [12] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, “Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings,” *J. Opt. Soc. Am. A* vol. 3, pp. 1780–1787, 1986.
- [13] L. Li, “New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings,” *J. Opt. Soc. Am. A* vol. 14, pp. 2758–2767, 1997.
- [14] K. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 14, pp. 302–307, 1966.
- [15] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-domain Method*, 3rd ed. Norwood: Artech House, 2005.
- [16] A. Arbabi, Y. Horie, A. J. Ball, M. Bagheri, and A. Faraon, “Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmittarrays,” *Nat. Commun.* vol. 6, pp. 7069, 2015.
- [17] C. Xu, M. Novak, D. Herrmann, L.-C. Hu, E. Heller, and M. Bahl, “Effective approach for design and simulation of metalens structures,” in *META 2019 Lisbon—Portugal The 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, 2019, pp. 1828.
- [18] F. Aieta, M. A. Kats, P. Genevet, and F. Capasso, “Multi-wavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation,” *Science* vol. 347, pp. 1342–1345, 2015.
- [19] F. Shen and A. Wang, “Fast-Fourier-transform based numerical integration method for the Rayleigh–Sommerfeld diffraction formula,” *Appl. Opt.* vol. 45, pp. 1102–1110, 2006.
- [20] L. Mandel and E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics*, Cambridge: Cambridge University, 1995.
- [21] H. Toba, H. Takagi, M. Ohashi, K. Otaki, and Y. Takigawa, “Influence on wide-angle doublet metalenses due to different types of all-dielectric metasurfaces,” *Appl. Opt.* vol. 61, pp. 597–606, 2022.

鳥羽英光 Hidemitsu TOBA
光学本部 要素開発部
Fundamental Technology Development Department
Optical Engineering Division

高木英嗣 Hidetsugu TAKAGI
光学本部 第一設計部
1st Designing Department
Optical Engineering Division

大橋道雄 Michio OHASHI
光学本部 第二設計部
2nd Designing Department
Optical Engineering Division

大滝 桂 Katsura OTAKI
光学本部 要素開発部
Fundamental Technology Development Department
Optical Engineering Division

瀧川雄一 Yuichi TAKIGAWA
光学本部 要素開発部
Fundamental Technology Development Department
Optical Engineering Division

スポーツフィールドにおける自己校正を使った観客の注視領域推定[†]

阿部和広, 高山侑也, 大坪洋介, 小池哲也

Estimating Attention Area of Spectator using Self-calibration in Sports Fields

Kazuhiro ABE, Yuuya TAKAYAMA, Yosuke OTSUBO and Tetsuya KOIKE

スポーツ映像ソリューションにおいて、観戦者の注視領域を推定することは重要なシーンを抽出する上で有用である。注視領域は観客の視線の先のコート上の領域として特定される。スポーツフィールドの周囲に配置された観客を撮影するカメラを使って注視領域推定をするためには、視線ベクトルをカメラ座標系からコート座標系に変換するためにカメラ校正が必要である。一方で、観客をズームアップで写す観客カメラは校正ターゲットとなるコートなどのマーカが映っていないため校正が難しい。そこで、本研究では、観客を撮影するカメラと俯瞰撮影するカメラの組み合わせから自己校正して注視領域を推定する手法を提案する。さらに、観客カメラ画像是低解像度であり一人ひとりの正確な視線推定は難しいため、複数の頭部方向を合計することにより最終的な注視領域を算出した。実際に行われた3×3バスケットボールでの撮影映像での検証により、リーズナブルな注視領域推定結果が得られることを示す。

In sports video solutions, estimating the attention area of spectators is useful for extracting important scenes. The attention area is identified as the area on the court corresponding to the gaze direction based on the spectator's gaze. To do this from cameras installed around the sports field that capture the spectators, camera calibration is required to convert the coordinate system of the camera that shoots the spectators and the coordinate system of the court. However, it is difficult to apply the general camera calibration to the camera capturing spectators because the court is not reflected in the camera. Therefore, in this study, we propose a method to estimate the attention area by self-calibrating the combination of the camera capturing the spectators and the camera capturing the overhead view. Since it is difficult to estimate the gaze accurately from low-resolution images of spectators, we approximate the gaze direction as the head direction and reduce the error by aggregating multiple head directions. Verification using the shooting data of an actual 3 x 3 basketball game shows that a reasonable attention area map can be obtained based on three camera inputs.

Key words コンピュータービジョン, スポーツ映像分析, 視線推定
computer vision, sports video analysis, gaze estimation

1 はじめに

近年、スポーツ映像ソリューションにおいて、機械学習や画像認識の応用が進んでいる。特に、スポーツ映像撮影の自動化において有用であり、製品化も進んでいる [10]。バスケットボールやサッカーなどの球技スポーツの映像撮影を自動化する試みにおいて、「スポーツフィールド（コート）上のどの領域を撮影するか？」は大きな課題である。このために、まずボールの位置や選手の位置に基づいて撮影領域を決定することが考えられる。しかし、ボールは動きも速く、大きさやオクルージョンの点で検知が非常に難しく、また、選手の位置検知・動作認識もそれ自体が難し

いため、そこから撮影領域を決定するには課題が多い。そこで、観客の注視領域に基づいて撮影領域を決定するアプローチを考える。これは、映像を見る人が「どこが見たいか？」を直接認識するアプローチであり、フィールド上の選手やボールに依存しない解析であることから、特定のスポーツに特化しない汎用的な方法になり得る。また、観客の注視領域推定は、観客の嗜好性を反映していると考えられ、ハイライトシーン生成 [11]、カメラコントロール [12]、仮想カメラシステム [13] などへの応用や、エンターテインメント（音楽ライブ、舞台演劇）などのスポーツ以外の幅広い適用シーンがある。さらに、注視領域は対象に関する注意や関心の度合いと密接に関係していることか

[†] 本稿は、著者の引用文献 [19] の人工知能学会より許諾を得ている。

ら、注視領域推定それ自体が広告の効果測定 [14]、教育の集中度合い計測や視線操作 [15] などにも応用できる。このような背景から、本研究では観客の注視領域推定の方法を提案する。

注視領域の推定は、観客の視線方向を推定し、観客の視点から視線方向に投影したコート上の領域を推定することで達成できる。そのために、まずは、観客の視線推定について考える。スポーツを観戦している観客は複数人が集合しており、多くの観客が1画角に捉えられているため、一人ひとりの顔が低解像度で撮影されている状況で視線推定できることが望ましい。従来の視線推定は、ターゲットに装着する専用のデバイスを必要とし、スポーツを観戦する観客に装着させるのは大きな負担となり現実的ではない。他方、近年、画像から視線推定を行う手法も研究されている [16] が、高解像度の顔画像で瞳領域を必要とするため、本研究で対象とする観客画像には適していない。そこで本研究では、低解像度顔画像からでも推定が可能な頭部方向推定を用いることで、視線方向を頭部方向と近似することとした。一方で、観客一人ひとりの頭部方向は、観客の集中度合いなどによってばらつくため、複数人の観客の合計をとることで頑健な注視領域推定を実現した。

次に、視線方向のフィールド上への投影について考える。観客を撮影するカメラ (= 観客カメラ) から推定した視線方向は観客カメラの座標系で推定されたものであるため、コート上に投影して注視領域を得るためには、視線ベクトルをコート座標系に変換する必要がある。この変換は、観客カメラのカメラ校正で実現できる。カメラ校正なしで注視領域を直接学習する手法も提案されている [17] が、全員が同じ対象を注視しているという限定的な仮定に基づいており、カメラ校正による手法の重要性は依然として高い。コートを俯瞰する画角を持つカメラ (= 俯瞰撮影カメラ) を用いる場合は、コートを参照物体とし、画像内のコートと参照コートとの対応からホモグラフィーを推定し、カメラ校正を行うことができる。一方、観客カメラではコートが映っていないため、この手法を使うことができない。そこで、コート外の物体の対応を用いて、観客カメラと俯瞰撮影カメラとの自己校正を行った。

以上から、本研究では、スポーツフィールドにおいて、1台の観客カメラと2台の俯瞰撮影カメラの組み合わせから自己校正を行い、複数観客の注視領域の合計をとることによって、スポーツフィールド上の注視領域を推定する手法を提案する。そして、実際の3×3バスケットボール試合の撮影データを用いた検証によって、3台のカメラ入力をもとに合理的な時空間の注視領域マップを得ることができることを示した。

2 手法

本研究で提案する注視領域推定は、カメラ校正、視線推定、視線投影からなる。本手法では、観客をズームで撮影する「観客カメラ」1台と、コート全体を撮影する「俯瞰カメラ」2台を用いる。この構成を、Fig. 1 に示す。また、全体のアルゴリズムフローを Fig. 2 に示す。

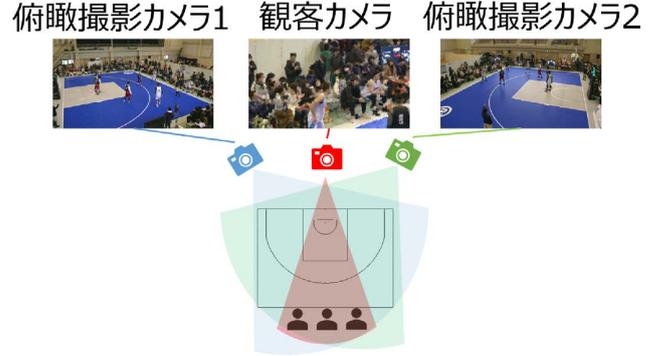


Fig. 1 カメラの構成

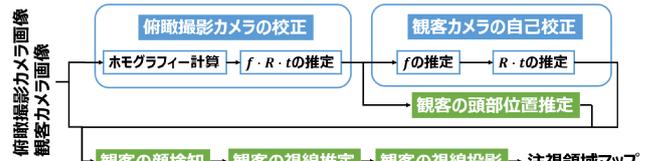


Fig. 2 注視領域推定のアルゴリズムフロー

2.1. カメラ校正

カメラ校正では、コート座標系における、内部パラメーターである校正行列 K と外部パラメーターである回転 R 、位置 t を推定する。ここで、アスペクト比を1、スキュー歪を0、レンズ歪みが無く、principal point を画像中心 (x_0, y_0) と仮定すると、内部パラメーターのうち推定すべきパラメーターは焦点距離 f のみとなり、校正行列 K は

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & x_0 \\ 0 & f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。

2.1.1. 俯瞰カメラの校正

俯瞰カメラは、コートが映っているため、4点の対応から参照コートとのホモグラフィー H が計算できる。このとき、ホモグラフィー $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$ 、校正行列 K 、回転 $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ と位置 t の関係は、

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda K [r_1 \ r_2 \ t] \quad (2)$$

である [1]。また、 r_1, r_2 が正規直交であることから、

$$h_1^\top K^{-\top} K^{-1} h_2 = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{h}_1^\top \mathbf{K}^{-\top} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1 = \lambda^2 \quad (4)$$

$$\mathbf{h}_2^\top \mathbf{K}^{-\top} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 = \lambda^2 \quad (5)$$

が導かれる。式 (2) より、焦点距離 f は、

$$f = \sqrt{\frac{(\mathbf{h}_{11} - x_0 \mathbf{h}_{13})(\mathbf{h}_{21} - x_0 \mathbf{h}_{23}) + (\mathbf{h}_{12} - y_0 \mathbf{h}_{13})(\mathbf{h}_{22} - y_0 \mathbf{h}_{23})}{\mathbf{h}_{23} \mathbf{h}_{13}}} \quad (6)$$

と求めることができる。ここで、 $[\mathbf{h}_{11} \ \mathbf{h}_{12} \ \mathbf{h}_{13}]^\top = \mathbf{h}_1$ 、 $[\mathbf{h}_{21} \ \mathbf{h}_{22} \ \mathbf{h}_{23}]^\top = \mathbf{h}_2$ 、である。回転 $R = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3]$ と位置 \mathbf{t} は、式 (2) - (5) より、

$$\mathbf{r}_1 = \lambda^{-1} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_2 = \lambda^{-1} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \quad (9)$$

$$\mathbf{t} = \lambda^{-1} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_3 \quad (10)$$

$$\lambda = \|\mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1\| = \|\mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2\| \quad (11)$$

と求めることができる。

2.1.2. 観客カメラの自己校正

観客カメラは、コートが映っていないため、参照コートとの対応点を特定できず、直接校正することができない。そこで、観客カメラと一部画角がオーバーラップしている校正済み俯瞰撮影カメラを使い、俯瞰撮影カメラ画像と観客カメラ画像との対応点から、自己校正する。まず、5点以上の対応点から、5点法 [2] により、Essential matrix を求める。次に、特異値分解により R と \mathbf{t} を復元する。このとき、可能な解が4通りあるが、chirality constraint によって1通りに決定する [2]。ここで、 \mathbf{t} はスケール倍の不定性がある。

焦点距離 f は、撮影時の機材情報から得ることもできるが、映像編集過程でのメタデータの消失、撮影中の調整による変更、などの理由から必ずしも利用できない。そこで、本研究では、画像情報から校正する手法を4通り試した。画像対応点のみから自己校正する手法として、2カメラ（俯瞰撮影カメラ1、2のどちらかと観客カメラ）を用いる① Fundamental matrix から求める手法と、3カメラ（俯瞰撮影カメラ1、2と観客カメラ）を用い②角度を用いる手法を試した。一方で、これらの方法は実用的なシナリオでは適用が難しいことが知られているため、③シーンの知識を利用する方法と④頭部の大きさを使ったヒューリスティックによる手法を試した。

① Fundamental matrix から求める方法

8点以上の対応点から8点法により Fundamental matrix を求め、それを使って f を求める方法である。本研究では、Bougnoux の手法 [9] と Hartley の手法 [3] を試した。

Bougnoux の手法によれば、俯瞰撮影カメラの焦点距離を f' とし、観客カメラの焦点距離 f は

$$f = \sqrt{\frac{\mathbf{p}'^\top [\mathbf{e}']_x \tilde{\mathbf{I}} \mathbf{F} \mathbf{p} \mathbf{p}^\top \mathbf{F}^\top \mathbf{p}'}{\mathbf{p}'^\top [\mathbf{e}']_x \tilde{\mathbf{I}} \mathbf{F} \mathbf{I} \mathbf{F}^\top \mathbf{p}'}} \quad (12)$$

と求められる。ここで、 \mathbf{p}, \mathbf{p}' はそれぞれ観客カメラ、俯瞰撮影カメラの principal point、 \mathbf{e}' は俯瞰撮影カメラのエピポール、 $\tilde{\mathbf{I}} = \text{diag}(1, 1, 0)$ である。Hartley の手法は、Kruppa 方程式を解くことにより f を決定する。ただし、これらの方法は実用的なシナリオでは適用が難しいことは注意が必要である [4]。

②角度を利用する方法

コート座標における2点 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ が観客カメラに投影される点が $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ とすると、 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ を逆投影したときに作る線がなす角度 α は、カメラ幾何から、

$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{x}_1^\top \boldsymbol{\omega}^* \mathbf{x}_2}{\sqrt{\mathbf{x}_1^\top \boldsymbol{\omega}^* \mathbf{x}_1} \sqrt{\mathbf{x}_2^\top \boldsymbol{\omega}^* \mathbf{x}_2}} \quad (13)$$

と導ける [4]。これを f について解くことにより f を求めることができ、 α は、観客カメラのカメラ中心 \mathbf{C} と、 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ から求めることができる。コート座標における \mathbf{C} は、エピポールがカメラ中心の像であることを利用して、俯瞰撮影カメラ1に対する観客カメラのエピポール \mathbf{e}_1 と俯瞰撮影カメラ2に対する観客カメラのエピポール \mathbf{e}_2 の三角測量により求めた。2点 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ は、俯瞰撮影カメラ1、2から三角測量によって求めた任意の点のコート座標を利用することができるが、本研究では、俯瞰撮影カメラ1画像の最も右側と左側の2人の観客の頭部位置を利用した。

③シーンの知識を利用する方法

シーンについての事前知識がある場合、その知識を制約として校正に利用できる。本研究では、観客席がコートと同一平面上にあることを利用して、観客カメラ-俯瞰カメラのホモグラフィ $H_{\text{spec-over}}$ を求め、2.1.1. で得られた俯瞰カメラ-コートのホモグラフィ $H_{\text{over-court}}$ より、観客カメラ-コートのホモグラフィ $H_{\text{spec-court}} = H_{\text{spec-over}} \cdot H_{\text{over-court}}$ を求め、2.1.1. と同様にホモグラフィから焦点距離を得る。

④頭部の大きさを使ったヒューリスティックによる方法

カメラからの距離が s である大きさ y_0 の被写体をカメラで撮影したとき、撮影した像の大きさ y_i は、 $s \gg f$ とすると、

$$y_i = y_0 \cdot f / (s - f) \approx y_0 \cdot f / s \quad (14)$$

と表せる。被写体を観客の頭部として y_0 を頭部の大きさとし、同じ観客頭部を観客カメラと俯瞰撮影カメラから撮影したときの観客頭部の大きさをそれぞれ y_i, y_i' 、距離を s, s' 、俯瞰撮影カメラの焦点距離を f' とすれば、

$$y_i / y_i' = f s' / f' s \quad (15)$$

となる。ヒューリスティックに、 $s = s'$ とすれば、 $f = y_i f' / y_i'$ と求めることができる。

2.2. 視線推定

観客カメラの画像では視線推定が困難であるため、頭部方向を視線方向と近似することとした。頭部方向推定は、顔検知によって得られた顔画像に対して行った。顔検知データセット [5] で訓練済みの顔検知モデル [6] を用い、画像内の観客の顔領域を検知した。検知した顔画像に対し、facial landmark データセット [7] で訓練済みの頭部方向推定モデル [8] を用いて3次元頭部方向 \mathbf{h} を出力した。

2.3. 視線投影

コート座標系における観客の視線方向 \mathbf{g} は、コート座標系での観客カメラの回転 R 、観客カメラから推定した観客の視線方向を \mathbf{h} 、 z 軸方向の単位ベクトルを \mathbf{u} とすると、幾何的な関係から、

$$\mathbf{g} = R^{-1} \cdot \text{Rot}(\mathbf{h}) \cdot \mathbf{u} \quad (16)$$

と書ける。ただし、 $\text{Rot}(\mathbf{h})$ は、 \mathbf{h} と \mathbf{u} とのなす角の yaw, pitch, roll 角をそれぞれ $\theta_y, \theta_p, \theta_r$ としたときの回転行列

$$\text{Rot}(\mathbf{h}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p & -\sin \theta_p \\ 0 & \sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

である。

注視領域は、観客の視点 (= 頭部位置) から視線方向へコート上に投影した領域である。視線投影は、コート座標系の z 方向は考慮せず、視線方向 \mathbf{g} を x - y 平面上に投影した2次元視線方向 $\bar{\mathbf{g}}$ を用いた。人間の視野は点ではなく一定の大きさを持つため、注視領域を視線上にピークを持ち角度方向に広がりがある分布を持っていると仮定するのが自然であろう。具体的には、角度方向の分布を Gauss 分布と仮定し、コート上の点 \mathbf{q} での注視領域スコア $a(\mathbf{q})$ を、

$$a(\mathbf{q}) = \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (18)$$

とした。ここで、 θ は、観客の頭部位置を \mathbf{p} としたときの、ベクトル $\bar{\mathbf{g}}$ とベクトル $\mathbf{q} - \mathbf{p}$ とのなす角である。 σ は広がり具合を表すパラメーターであり、実験的に $\sigma = 0.2 \text{ rad}$ (11.46°) と設定した。観客の頭部位置 \mathbf{p} は、観客を撮影する異なる2台の俯瞰カメラから検知した顔位置から、三角測量によって推定した。

最後に、複数の観客の注視領域スコアを算出し、それらを合計し、最終的な注視領域スコアとした。

3 実験

3.1. データセットと精度評価

本実験では、茨城県つくば市に本拠地を置く 3×3 バスケットボールチーム「アルボラーダ」主催の 3×3 バスケットボールのリーグにおいて、自然に観客を入れた状態で、コート周辺に設置した俯瞰撮影カメラ2台、観客カメラ1台から撮影した1試合分の映像 [18] を用いて検証を行った。対象とする観客は、対象とする試合時間内に離席せず始終観戦している観客を7人抽出した。対象とする観客のみを抽出するために、対象の観客の顔検知の結果に対してトラッキングを行い、トラッキングがロストした場合は手動で補正を行った。

定量的な精度評価は、ボールを保持しているプレイヤーに注目が集まりやすいことから、注視領域にボールを保持しているプレイヤーが含まれるかどうかを基準として評価した。具体的には、試合全体からランダムにフレームを100フレームサンプリングし、ボールを保持しているプレイヤーの足のコート座標における位置を目視でアノテーションを行った。そして、コート内の領域のうち、注視領域スコア上位50%の領域を抽出し、その領域にアノテーション済みのボール保持プレイヤー座標が含まれるフレームを正解と評価した。なお、試合の展開が停止したフレームおよびパスやシュート動作後にボールが空中に存在しているフレームは評価する100フレームに含めないこととした。

3.2. 結果

焦点距離の推定について、各方法で算出した結果を Table 1 に示す。手法①については、実数解を得ることができなかった。

各焦点距離推定手法による注視領域スコアのマップの例を Fig. 3 に示す。また、各焦点距離推定手法における、ボール保持プレイヤーが含まれるかどうかの精度評価結果を Table 2 に示す。なお、比較のため、ランダムに領域を抽出した場合の期待値も Table 2 に示す。

Table 1 各手法で算出した焦点距離 (①-1: FundMat (Bougnoux), ①-2: FundMat (Hartley): Fundamental matrix から求める方法 (それぞれ Bougnoux, Hartley の方法), ②Angle: 角度を利用する方法, ③Scene: シーンの知識を利用する方法, ④Heuristic: 頭部の大きさを使ったヒューリスティックによる方法)

手法	焦点距離 (pixel)
①-1 FundMat (Bougnoux)	NaN
①-2 FundMat (Hartley)	NaN
② Angle	8668.86
③ Scene	15494.6
④ Heuristic	18761.4

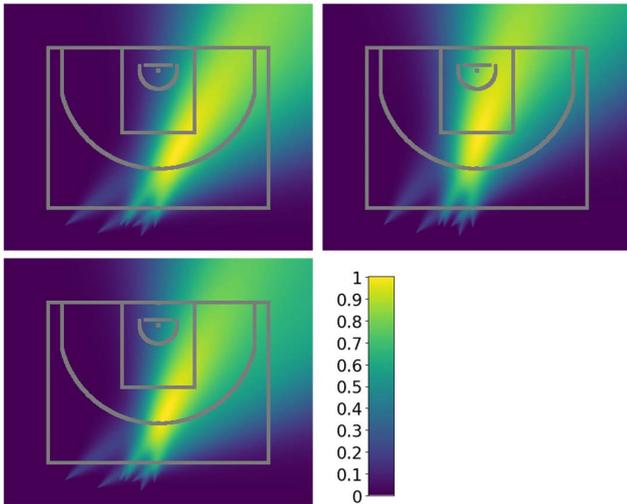


Fig. 3 各手法における注視領域スコアのマップ（左上が② Angle, 右上が③ Scene, 左下が④ Heuristic）. コートラインをオーバーレイ表示している。

Table 2 各焦点距離推定手法による精度評価結果

手法	精度
② Angle	73%
③ Scene	90%
④ Heuristic	78%
ランダム	50%

どの手法においても、ランダムな領域抽出による精度を上回っていることから、ボール保持プレイヤーを含む領域を有意に抽出できていることが分かる。ゲームフィールドにおいて、注目が集まるのはボールを保持しているプレイヤーの周辺領域であることから、この結果は、本研究で提案する手法によって、注目が集まるフィールド領域を抽出できていることを示す。また、③ Scene の手法の精度が高いことは、焦点距離の推定精度も高いことを示唆している。

4 まとめ

スポーツフィールドにおける観客の注視領域を、1台の観客カメラと2台の俯瞰撮影カメラの組み合わせから自己校正を行い、観客全体の注視領域を推定する手法を提案した。そして、実際の3×3バスケットボール試合の撮影データを用いた検証によって、3台のカメラ入力をもとに合理的なコート上の注視領域マップを得ることができることを示した。ボール保持プレイヤーを含む領域を有意に抽出できていることから、推定された注視領域を撮影領域の決定に用いることが期待できる。

今後の展開としては、コート上のz軸方向も考慮した注視領域の推定、自己校正に利用する対応点の自動検出、撮影領域への応用、スポーツ以外の領域への展開が考えられる。

謝辞

注視領域に関して、技術的な助言を頂いた株式会社コンピュータマインドの青木溪氏、菅野柊紀氏、山崎貴史氏に感謝を申し上げます。

引用文献

- [1] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [2] D. Nistér, "An efficient solution to the five-point relative pose problem," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 6, pp. 756-770, 2004.
- [3] R. Hartley, "Kruppa's equations derived from the fundamental matrix," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 19, no. 2, pp. 133-135, 1997.
- [4] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.
- [5] S. Yang, P. Luo, C. C. Loy, and X. Tang, "Wider face: A face detection benchmark," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 5525-5533, 2016.
- [6] S. Zhang, X. Zhu, Z. Lei, H. Shi, X. Wang, and S. Z. Li, "S3fd: Single shot scale-invariant face detector," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 192-201, 2017.
- [7] X. Zhu, Z. Lei, X. Liu, H. Shi, and S. Z. Li, "Face alignment across large poses: A 3d solution," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 146-155, 2016.
- [8] N. Ruiz, E. Chong, and J. M. Rehg, "Fine-grained head pose estimation without keypoints," in *Proceedings of the The IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 2155-215509, 2018.
- [9] S. Bougnoux, "From Projective to Euclidean Space under any practical situation, a criticism of self-calibration," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 790-796, 1998.
- [10] "AI-Automated Sports Camera, Streaming & Analytics | Pixellot." Pixellot: AI-Automated Sports Camera, Streaming & Analytics, <https://www.pixellot.tv>.
- [11] M. Merler, D. Joshi, Q. B. Nguyen, S. Hammer, J. Kent, J. R. Smith, and R. S. Feris, "Automatic Curation of Golf Highlights using Multimodal Excitement Features," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 21, no. 5, pp. 1147-1160, 2018.
- [12] J. Chen and J. J. Little, "Where should cameras look at soccer games, Improving smoothness using the overlapped hidden Markov model," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 159, pp. 59-73, 2017.

- [13] K. K. Rachavarapu, M. Kumar, V. Gandhi, and R. Subramanian, "Watch to edit: Video retargeting using gaze," In *Computer Graphics Forum*, vol. 37, no. 2, pp. 205-215, 2018.
- [14] Y. Sugano, X. Zhang, and A. Bulling, "AggreGaze: Collective Estimation of Audience Attention on Public Displays," in *Proc. 29th ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 821-831, 2016.
- [15] R. J. K. Jacob, "What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 11-18, 1990.
- [16] X. Zhang, Y. Sugano, M. Fritz, and B. Andreas, "Appearance-Based Gaze Estimation in the Wild," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4511-4520, 2015.
- [17] Y. Kodama, Y. Kawanishi, T. Hirayama, D. Deguchi, I. Ide, H. Murase, H. Nagano, and K. Kashino, "Localizing the Gaze Target of a Crowd of People," *Asian Conference on Computer Vision workshop*, pp. 15-30, 2018.
- [18] K. Abe, C. Nakamura, Y. Otsubo, T. Koike, and N. Yokoya, "Spectator Excitement Detection in Small-scale Sports Events," in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Multimedia Content Analysis in Sports*, pp. 100-107, 2019.
- [19] 阿部和広, 高山侑也, 大坪洋介, 小池哲也, "スポーツフィールドにおける自己校正を使った観客の注視領域推定," *人工知能学会全国大会論文集*, 第36回, 4Yin2-15, 2022.

阿部和広 Kazuhiro ABE
 先進技術開発本部 数理技術研究所
 Mathematical Sciences Research Laboratory
 Advanced Technology Research & Development Division

大坪洋介 Yosuke OTSUBO
 先進技術開発本部 数理技術研究所
 Mathematical Sciences Research Laboratory
 Advanced Technology Research & Development Division

高山侑也 Yuuya TAKAYAMA
 先進技術開発本部 数理技術研究所
 Mathematical Sciences Research Laboratory
 Advanced Technology Research & Development Division

小池哲也 Tetsuya KOIKE
 先進技術開発本部 数理技術研究所
 Mathematical Sciences Research Laboratory
 Advanced Technology Research & Development Division



阿部和広
Kazuhiro ABE



高山侑也
Yuuya TAKAYAMA



大坪洋介
Yosuke OTSUBO



小池哲也
Tetsuya KOIKE

リアルタイムシステム同定法に基づく モデル構築（制御系の異常検知に適した モデル構築手法の提案）[†]

箱田文彦

Model Construction Based on Real-Time System Identification Method (Proposal of a Model Construction Method for Anomaly Detection of Control Systems)

Fumihiko HAKODA

測定データに基づき制御系設計モデルを構築する手法としてシステム同定法がある。リアルタイムシステム同定法は、システム同定法をハードウェア演算に基づく高速処理で拡張することにより、制御対象の瞬時特性を反映した数値モデルの構築や、実稼働中の制御系のモニタリング、及び異常検知を可能とする手法である。本研究では、システム同定法におけるパラメトリックモデルのうち、最も簡易な ARX モデルを対象にハードウェア設計/実装を行い、パラメーター推定に要する時間を大幅に短縮した。一方、実稼働中システムの特性を推定する場合、必然的に閉ループ条件下でのシステム同定となり、場合によっては装置の駆動指令が一定値となることなどから、推定精度の悪化が問題となる。この問題に対して、入力信号条件を考慮した上で、モデルパラメーターの一部を固定するパラメーター推定手法を考案し、その有効性を実験で検証した。実験結果より、提案手法が推定精度と計算安定性の両立を実現することを確認した。

Real-time system identification is a technique for the monitoring or anomaly detection of control systems, and it enables us to construct numerical models reflecting on the instantaneous properties of control objects by hardware acceleration. In our research, ARX model is selected for the abovementioned purpose and its implementation on field programmable logic devices considerably shortens parameter estimation time. However, in the application of real-time system identification, there arise difficulties derived from closed-loop system identification and the consequent ill-conditions. Real-time system identification is supposed to be used for actual machine operations, therefore, the reference signals for control are sometimes set to constant which are understandably insufficient for system identification. This problem can be addressed by a modified estimation procedure considering input signal conditions and a model with partially fixed parameter values. The effectiveness of the proposed method is investigated by experiments. They show us that both of accuracy and stability in parameter estimation are obtained.

Key words システム同定, 信号処理, 入力信号条件, ハードウェア設計, 異常検知
system identification, signal processing, input signal conditions, hardware design, anomaly detection

1 はじめに

近年、制御系設計においてモデルベースの開発方法が取り入れられており、産業用精密機械における制御系設計プロセスも変わりつつある [2]。モデルベース開発を実現する上で必要となるのが、制御対象の特性を高い精度で表現した数値モデルであり、このモデルを構築する方法の一つに、制御対象の入出力データに基づくシステム同定法がある [3], [4]。システム同定法は、予め用意した入力データ

と、その入力によって駆動された装置の出力データをセットにした演算により、制御系設計用の数値モデルを得る手法である。また、上述の産業用機械が多数稼働する工業プラントにおいては、生産性の向上などを目的に装置データが大量に取得されるようになり、得られたデータに基づいて、故障検知、故障予測、生産状況のモニタリングといった解析が行われている [5], [6]。この異常検知機能は、故障回避による事故対応コストの削減、生産性・安全性の向上などの効果をもたらす可能性がある一方で、検知目的に

[†] 本稿は、著者の引用文献 [1] の式展開の記述を簡略化し、実験を中心に結果を再編したものである。

合ったデータをモニタリングできなければ、誤報 (誤った故障通知) によって、現場における混乱, サポートリソースの浪費といった生産性悪化の事態にもつながりかねない. Fig. 1 は産業用機械のモニタリングシステムの例で, 位置決め偏差やモーター推力をモニターすることで, モーター故障時にはこれらの値の変化から異常検知が可能である. ただし, モーター推力は装置の稼働条件に応じて大きく変化することから, 入力条件をログデータとして出力しないデータ解析系では, 装置の稼働条件の変化と異常とを区別できない問題がある.

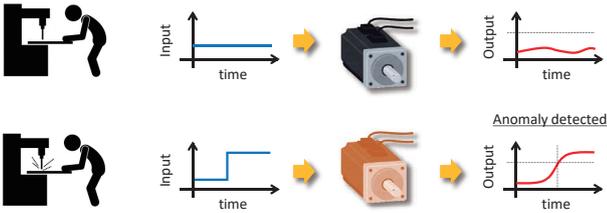


Fig. 1 Data monitoring and analysis in industrial plants.

前述したシステム同定法の適用と工業プラントにおける異常検知の課題に対して, 装置の稼働に同期してシステム同定演算を実行可能なリアルタイムシステム同定法の開発を進めている. Fig. 2 はリアルタイムシステム同定法の概略を示したもので, モデル推定を各時刻で行うことにより, 装置の稼働状態に応じたモデル更新が可能となる. このリアルタイムシステム同定法によるモデル構築機能を制御系の再設計に用いれば, モデルベース開発を補うことができ, 制御系の異常検知に用いれば, 入力データと出力データの両方を用いて装置パラメータを推定していることから, 目標値や補正值といった装置の稼働条件に依らない異常検知機能が実現する.

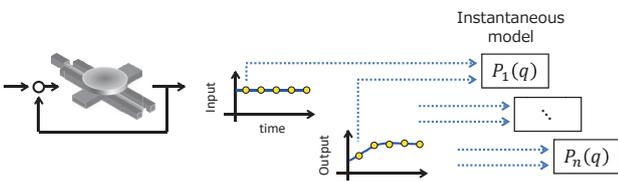


Fig. 2 Real-time system identification.

リアルタイムシステム同定法は上述の利点を有するものの, システム同定法は複雑な演算処理を含み, 制御装置上のマイクロプロセッサにそのまま組み込むことは演算負荷上困難である. このため, リアルタイムシステム同定の実現には, システム同定法の演算を高速に実行可能な専用ハードウェアが不可欠と考えられる. 本研究では, システム同定法で多用されるパラメトリックモデルの一つである ARX モデルをハードウェア化するとともに, リアルタイム

システム同定の実適用で課題となる閉ループ条件下でのシステム同定, 及び入力条件の悪化への対処方法を提案し, その有効性を実験で検証した.

2 リアルタイムシステム同定法

2.1. ARX モデルについて

ARX モデル (Auto-Regressive eXogenous) は, システム同定法で用いられるパラメトリックモデルの中で最も基本的なモデルであり, 計算の容易さから幅広く用いられている [7], [8].

離散化されたシステムの入出力関係を式 (1) によって定義する. ここで, k はサンプル時刻, $y(k)$ は出力, $u(k)$ は入力, $v(k)$ は外乱またはノイズである.

$$\begin{aligned} y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) \\ = b_1 u(k) + b_2 u(k-1) + \dots + b_m u(k-m) + v(k) \end{aligned} \quad (1)$$

q はデジタル信号のシフトオペレーターで, 式 (2) で定義する.

$$q^{-1}u(k) = u(k-1) \quad (2)$$

多項式の係数パラメータを式 (3) のようにまとめる.

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n} \\ B(q) &= b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m} \end{aligned} \quad (3)$$

外乱 $v(k)$ として白色外乱 $w(k)$ を仮定すると, 式 (1) は式 (4) に書き改められる.

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + w(k) \quad (4)$$

Fig. 3 は式 (4) をブロック線図で表現したもので, 出力側の多項式 $A(q)y(k)$ は自己回帰部分, 入力側の多項式 $B(q)u(k)$ は外生入力部分である. このモデルでは, 外乱及びノイズが外生入力に直接に加算されず, パラメータはデータに対して線形であり, 一括最小二乗法により計算できる.

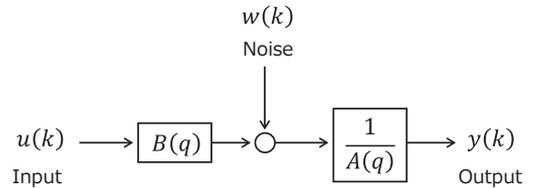


Fig. 3 Block diagram of ARX model.

2.2. ARX モデルのハードウェア化

ARX モデルにおいて, パラメータ推定演算の核となる部分は前述の最小二乗法における逆行列演算である. 逆行列演算の解法としては, ガウスの消去法及びその一般形である LU 分解が広く利用されているが, ハードウェア化を考えた場合に必ずしも効率的でない. ここでは, ハード

ウェア化に適した QR 分解を用いる。

QR 分解では、式 (5) のように行列 A を直交行列 Q と上三角行列 R の積に分解する。

$$A = QR \quad (5)$$

ここで、直交行列 Q と上三角行列 R は式 (6) 及び式 (7) に示すような行列である。

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & q_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & & r_{1n} \\ 0 & \ddots & \\ 0 & 0 & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

直交行列とは列ベクトルの長さが全部 1 で、しかもお互いに直交している行列である。直交行列の条件数は 1 で数値的に常に安定である。直交行列は転置すると逆行列になることから、

$$Q^T Q = I \quad (8)$$

ここで、 I は単位行列である。正規方程式として以下の式 (9) を考える。

$$A\theta = b \quad (9)$$

式 (7) で定義した R を用いると、 R は上三角行列なので以下の後退代入により解が求まる。

$$QR\theta = b \quad (10)$$

$$Q^T QR\theta = Q^T b \quad (11)$$

$$R\theta = Q^T b \quad (12)$$

QR 分解を計算する方法として、ギブンス回転、ハウスホルダー変換、グラム・シュミット分解があるが、この内でハードウェア化により演算の高速化が可能となるのはギブンス回転を CORDIC アルゴリズムで実行した場合となる。

2.3. 入力条件に依存した推定精度の悪化

リアルタイムシステム同定は稼働中の装置を対象とした手法であり、必然的に閉ループ条件下のシステム同定となる。閉ループシステム同定は入力信号の加振条件及び観測ノイズ条件により、モデル推定精度に制約を受けることが知られている [9]。Fig. 4 は外部信号と観測ノイズのある閉ループシステムのブロック線図である。ここで、 $r(k)$ は外部信号、 $F(q)$ は制御器、 $G(q)$ は制御対象の伝達関数、 $e(k)$ は観測ノイズ、 $y(k)$ は観測出力、 $u(k)$ は制御入力である。閉ループシステム同定は $F(q)$ による制御の下で、入出力データ $u(k)$ と $y(k)$ から制御対象 $G(q)$ を推定することである。

伝達関数の推定値 $\hat{G}(e^{j\omega})$ は、式 (13) に示すように入力のスペクトル密度 $\Phi_{uu}(e^{j\omega})$ と入出力のクロススペクトル密

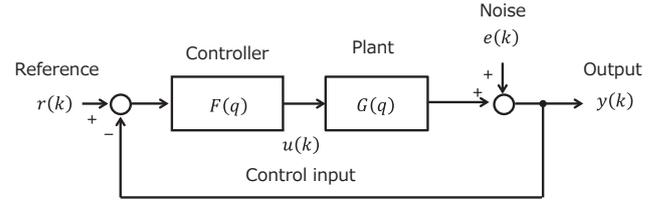


Fig. 4 Close-loop system with external input and noise.

度 $\Phi_{yy}(e^{j\omega})$ の比から計算される。また、 $\Phi_r(e^{j\omega})$ 、 $\Phi_e(e^{j\omega})$ はそれぞれ外部信号、観測ノイズのスペクトル密度である。

$$\hat{G}(e^{j\omega}) = \frac{\Phi_{yy}(e^{j\omega})}{\Phi_{uu}(e^{j\omega})} = \frac{G(e^{j\omega})\Phi_r(e^{j\omega}) + \frac{\Phi_e(e^{j\omega})}{F(e^{j\omega})}}{\Phi_r(e^{j\omega}) - \Phi_e(e^{j\omega})} \quad (13)$$

ここで、観測ノイズの影響が無視できる場合 ($\Phi_e(e^{j\omega}) = 0$) でも、外部信号が帯域制限を受ける場合、すなわち $\Phi_r(e^{j\omega})$ がある周波数領域で値を持たない場合には、次式でゼロ除算が生じ、プラントの推定精度は悪化する。

$$\hat{G}(e^{j\omega}) = \frac{G(e^{j\omega})\Phi_r(e^{j\omega})}{\Phi_r(e^{j\omega})} \neq G(e^{j\omega}) \quad (14)$$

外部信号の帯域幅がパラメータ推定精度に影響するのは、開ループのシステム同定でも同様であるが、開ループのシステム同定では必要に応じて外部信号の信号レベルまたは帯域幅を増加させられるのに対し、閉ループ条件下では入力信号を自由に変更することはできない。このことは、リアルタイムシステム同定法の課題であり、以下に示す入力条件に応じた推定演算の修正が必要となる。

2.4. 入力条件を考慮したパラメータ推定

リアルタイムシステム同定法によるモデル推定では、入力条件 (外部信号) がモデル推定精度に大きく影響する。ここでは、位置決め制御の場合を例に取り、入力が悪条件となる場合にもモデル推定精度への影響を低減可能な方法を検討する。Fig. 5 は位置決め制御系の外部信号 (目標値)、推力、位置偏差を示したもので、外部信号は赤太枠の立ち上がり時では大きく変化するものの、赤点線枠の一定速区間で入力は平滑となる。推定モデルの周波数応答は右

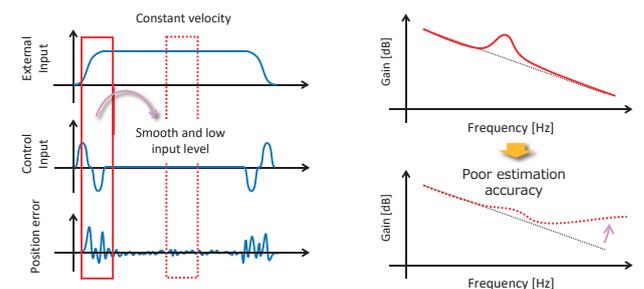


Fig. 5 Input signal condition and parameter estimation accuracy.

図のように立ち上がり時には正常な推定結果が得られるものの、一定区間では不安定な推定結果となる。同じ制御対象のモデルを推定しているにもかかわらず、推定結果には大きな差異が生じる。

Fig. 6 に入力条件 (外部信号) によるモデル推定精度の低下を回避する方法を示す。閉ループ条件において、一定区間のデータに対して入力信号条件を計算することで、パラメータ推定方法を変更する。

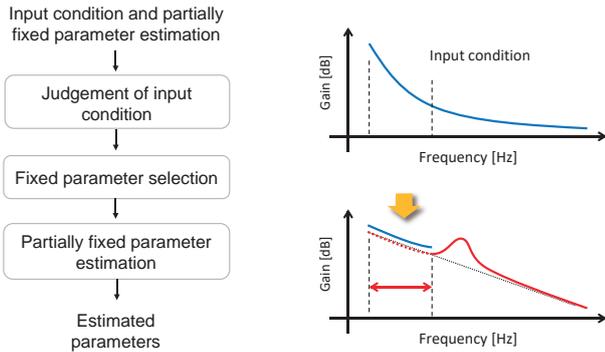


Fig. 6 Partially fixed parameter estimation based on input signal condition.

以下、位置決めステージを例に具体的な手順を説明する。推定対象モデルとして次式を考える。

$$y(k) = G(q)u(k) \quad (15)$$

位置決めステージでは、式 (15) の $G(q)$ は剛体特性 (剛体モード) を表す $G_{rigid}(q)$ と共振特性 (共振モード) を表す $G_{reso}(q)$ の和 (剛体モードと共振モードの重ね合わせ) として記述できる。

$$G(q) = G_{rigid}(q) + G_{reso}(q) \quad (16)$$

もし、共振特性を表す $G_{reso}(q)$ が推定済みで既知であれば、その出力 $y(k)$ への寄与分は計算できる。そこで、推定済みモデル $\hat{G}_{reso}(q)$ を用いて、共振特性の出力への寄与分 $y_{reso}(k)$ を計算する。これにより、共振特性を表すモデルは推定対象から外すことができ、そのパラメータは固定されたことになる。

$$y_{reso}(k) = \hat{G}_{reso}(q)u(k) \quad (17)$$

出力 $y(k)$ の剛体特性分は、出力 $y(k)$ から共振特性分 $y_{reso}(k)$ を差分することで得られる。

$$y_{rigid}(k) = y(k) - y_{reso}(k) \quad (18)$$

剛体特性を表す $G_{rigid}(q)$ は、入力 $u(k)$ と剛体特性分の出力 $y_{rigid}(k)$ から推定できる。

$$y_{rigid}(k) = \hat{G}_{rigid}(q)u(k) \quad (19)$$

以上、パラメータの一部を固定した手法により、対象

モデルは以下の様に推定される。

$$\hat{G}(q) = \hat{G}_{rigid}(q) + \hat{G}_{reso}(q) \quad (20)$$

また、システム同定法における入力条件の判断方法として、入力信号のスペクトル密度を全周波数領域で積分した累積スペクトル密度を指標として用いる。

$$\Psi_u = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{uu}(e^{j\omega}) d\omega \quad (21)$$

上式に基づき良条件となるパラメータに推定を限定することで、推定精度の悪化を回避する。

3 実験検証

3.1. 実験装置

Fig. 7 に示すボールねじ駆動方式の位置決めステージを対象にリアルタイムシステム同定法の有効性を評価する。

まず、リアルタイムシステム同定法の比較対象として、通常のシステム同定法 (オフラインシステム同定法) によるモデル推定を行う。システム同定に使用した入力信号は疑似ランダム信号 (M 系列信号) である。モデル次数を 4 次とした推定結果を Fig. 8 に示す。

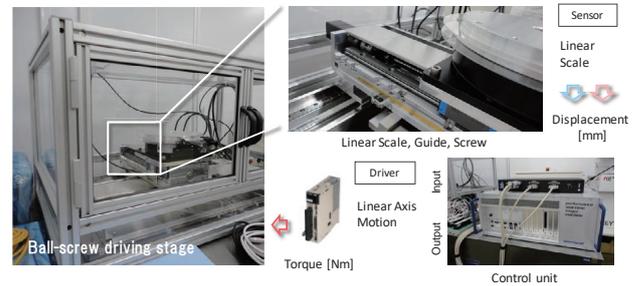


Fig. 7 Ball-screw driving stage for the evaluation of real-time system identification.

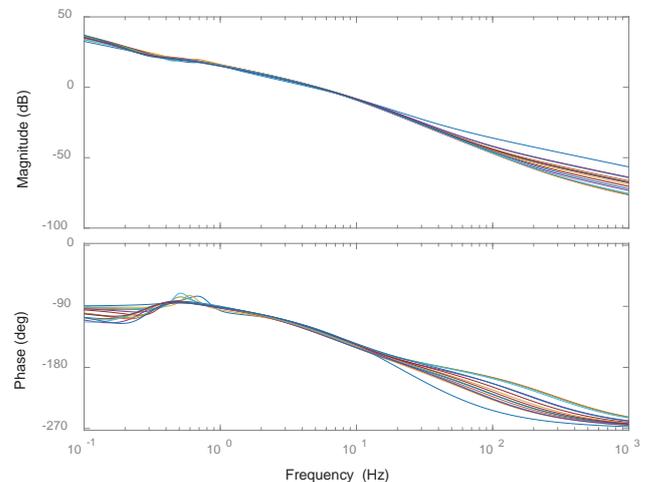


Fig. 8 Frequency responses at multiple stage positions by off-line system identification.

3.2. リアルタイムシステム同定の適用

Table 1 にハードウェア実装対象の FPGA ボードを示す。FPGA として用いる Intel 社製 Cyclone V は普及用途向けであり、同社の製品ラインナップでは最も安価に入手可能なデバイスのひとつである。ハードウェア設計には同社の統合開発ツールである Quartus II を用いるとともに、アルゴリズムの高位合成ツールである DSP Builder を使用する。Table 2 に演算負荷の比較対象である CPU ボードの仕様を示す。

Table 1 Specifications of FPGA board.

Items	Description
FPGA device	Intel Cyclone V FPGA
Development software tool	Quartus II DSP Builder (MATLAB/Simulink)

Table 2 Specifications of CPU board.

Items	Description
CPU device	Renesas Electronics SH-4A (R8A77850 600 MHz)
Development software tool	GNU C++ Compiler

Table 3 にリアルタイムシステム同定法による演算処理時間を示す。表中の Step1-5は、Fig. 9 に示した ARX モデルにおけるパラメータ推定の演算フローに対応しており、各処理の内訳を表している。この演算時間は0.1秒間分の入出力データを処理したもので、FPGA を用いた場合には全体で 10.2 μ 秒、CPU を用いた場合には 852 μ 秒を要す。この結果より、FPGA の処理時間は CPU の場合の100分の1程度となり、大幅な演算の高速化を実現できることが分かる。たとえば、位置決め制御サーボサイクルを1kHzとした場合、演算処理を CPU で実行すると演算負荷が計算能力を超過するのに対し、FPGA を用いた場合には他の演算処理または信号処理を組み込む余裕を有している。

Table 3 Comparison of calculation time by FPGA and CPU.

Step	Calculation load [usec]		
	FPGA	CPU	ratio [%]
1	0.73	15.24	4.77
2	0.03	1.35	2.05
3	0.80	12.01	6.63
4	0.13	5.89	2.24
5	8.52	817.93	1.04
Total	10.20	852.41	1.20

続いて、パラメータ推定結果について述べる。Fig. 10 は入力条件を考慮せずにパラメータ推定を行った場合で

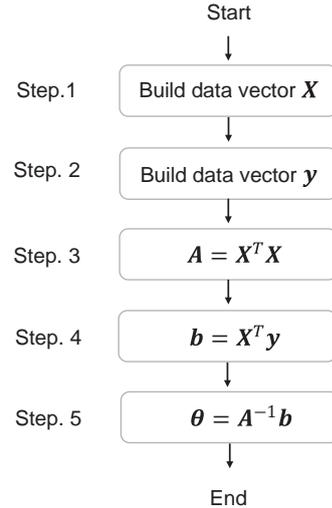


Fig. 9 Flow chart of parameter estimation.

Step.1 and 2: Data vectors X and y are assembled. Step.3 and 4: $X^T X$ and $X^T y$ are calculated. Step.5: Parameters are calculated by solving Linear equation.

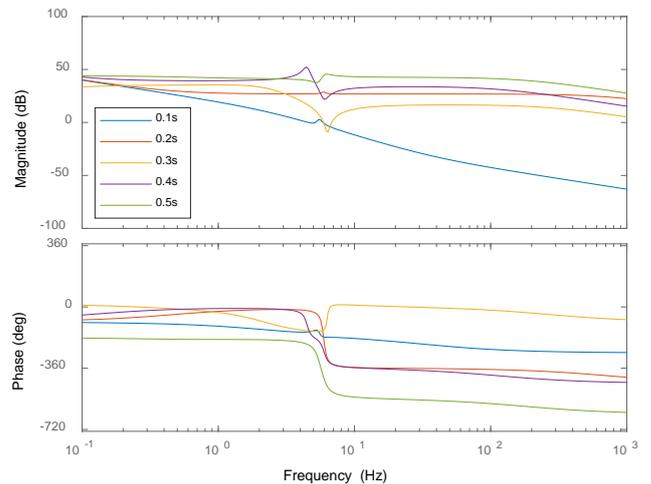


Fig. 10 Frequency responses at multiple stage positions without the consideration of input signal conditions.

ある。外部信号の立ち上がり時である0.1秒までのデータで推定したモデルは Fig. 8 のオフライン推定の結果と同様にステージの質量特性を反映した周波数応答を示しており、妥当な推定結果と判断できる。一方、0.2秒以降のデータを用いて推定したモデルはオフライン推定の結果から大きく乖離しており、入力条件を考慮せずにモデル推定を行う場合に妥当な推定結果は期待できない。

最後に、入力条件を考慮してパラメータの一部を固定した場合の推定結果を Fig. 11 に示す。0.1秒以降で入力平滑となった場合でもパラメータ推定は安定しており、閉ループ条件下において入力条件が悪化する問題への有効な対処法になっていると判断できる。また、周波数応答の変動は主に低周波領域で生じており、実システムの特性を反映した結果といえる。本実験結果より、ステージ位置に応じた制御対象特性の推定が可能となり、リアルタイムシ

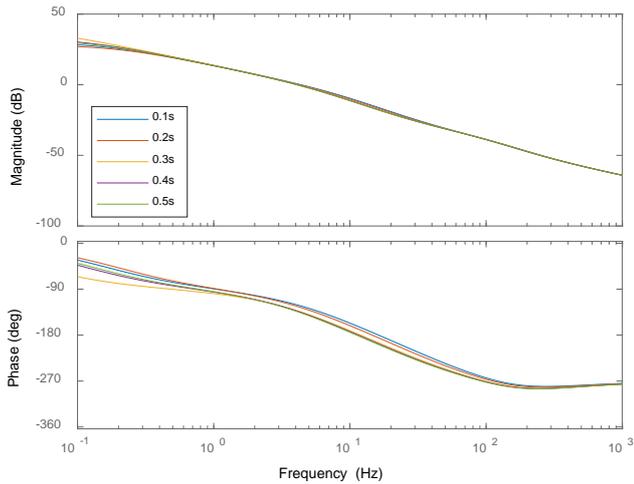


Fig. 11 Frequency responses at multiple stage positions with the consideration of input signal conditions.

ステム同定法の妥当性が検証できた。

4 まとめ

本研究では、ハードウェアを用いてシステム同定演算処理を高速化するリアルタイムシステム同定法を構築し、その有効性を検証した。得られた成果を活用すれば、制御系の異常検知や制御系再設計の端緒として利用するばかりでなく、冒頭に述べたモデルベース開発や工業プラントにおけるデータ解析の進展にも貢献できると考えられる。

引用文献

- [1] 箱田文彦, “リアルタイムシステム同定法に基づくモデル構築（制御系の異常検知に適したモデル構築手法の提案）,” *日本機械学会論文集*, vol. 88, no. 914, 2022.
- [2] 大畠明, “プラントモデリングの地平線,” *計測と制御*, vol. 53, no. 4, pp. 272-277, 2014.
- [3] 堀惇史, 古井達也, 岩倉大輔, 野波健蔵, “産業用マルチロータヘリコプタのオンラインシステム同定機構を有する自動チューニング適応 I-PD 制御,” *日本機械学会論文集 C 編*, vol. 82, no. 834, 2016.
- [4] 高梨宏之, 涌井伸二, “多自由度除振装置のシステム同定手順に関する一考察,” *日本機械学会論文集 C 編*, vol. 76, no. 764, pp. 851-860, 2010.
- [5] 藤巻遼平, 中田貴之, 塚原英徳, 佐藤彰典, 山西健司, “障害診断のための異常パターンマイニング,” *情報処理学会第70回全国大会講演論文集*, pp. 45-46, 2008.
- [6] 蛭田智昭, 鈴木英明, 藤原淳輔, “機械学習を使った異常検知技術のための定常状態の抽出条件の自動生成手法,” *日本機械学会論文集*, vol. 81, no. 826, 2015.
- [7] L., Ljung, *System Identification: Theory for the User 2nd Edition*, PTR Prentice Hall, 1999.
- [8] 足立修一, *ユーザのためのシステム同定理論*, 社団法人計測自動制御学会, 1993.
- [9] 佐野昭, “ノンパラメトリックモデルの同定,” *計測と制御*, vol. 28, no. 4, pp. 316-322, 1989.

箱田文彦 Fumihiko HAKODA
 先進技術開発本部 数理技術研究所
 Advanced Technology Development Division
 Mathematical Science Research Laboratory



箱田文彦
Fumihiko HAKODA

プロセス機能展開表を活用した光学ガラスの溶解技術開発[†]

佐藤幸太，嘉指伸一

Development of Optical Glass Melting Technology using a Process Task Visualization Chart

Kota SATO and Shinichi KAZASHI

光学ガラスの新硝種および改良品の開発にあたり、熔解工程における垂直立ち上げを目指し、実験室での小規模評価に品質工学を活用した。従来は、小規模の実験で工程ごとに部分最適を行い、製造条件を定め、次に大規模な実験で量産できるか確認してきた。しかし、小規模の実験結果が大規模の実験で再現せず、量産立ち上げに時間を要するという問題が生じることがあった。この問題を解決するため、はじめに、工程全体を俯瞰し検討すべき因子を抽出するとともに、工程全体での最適化を検討した。次に、評価尺度と誤差因子を工夫し、大規模な実験で再現する小規模評価方法を確立した。この方法を多くの硝種に展開し、製造技術情報として蓄積すると、その情報は同系統の他の硝種に対しても適用できることが分かった。その結果、新たに開発した硝種であっても、直交表実験を行わずに短期間に量産立ち上げを実現した。

In the development of new and improved types of optical glass, we have applied quality engineering to small-scale evaluation in the laboratory, with the goal of vertical ramp-up in the melting process. Previously, we had optimized each process individually in small-scale experiments, determined the optimal production conditions, and then carried out a large-scale experiment to confirm that these conditions were actually suitable for volume production. A problem that had sometimes delayed the start of volume production in the past was that the small-scale experimental results could not be replicated in the large-scale experiment. To solve this problem, we started by surveying the entire process, selecting the factors to be studied, and studying the optimization of the process as a whole. Next we adjusted the evaluation metrics and noise factors to obtain small-scale evaluation methods that would give results that could be replicated in large-scale experiments. By applying this methodology to many types of glass, we obtained a body of production technology information that turned out to be applicable to many types of optical glass in the same family. The result was that we were able to ramp up volume production of even newly developed types of glass quickly, without performing orthogonal array experiments.

Key words 光学ガラス、内部透過率、SN比、タグチメソッド、品質工学
optical glass, internal transmittance, S/N ratio, Taguchi methods, quality engineering

1 はじめに

1.1. 光学ガラスについて

光学ガラスは、カメラや望遠鏡、顕微鏡など光学機器において像の伝達に用いられるガラスであり、レンズやプリズムとして使用される。光学ガラスの光学的性質を表す光学定数は、Fig. 1 に示すように、d 線（波長 587.6 nm）に対する屈折率 n_d と、色分散を表すアッベ数 vd の二つの組合せで分類される。F 線（波長 486.1 nm）、C 線（波長 656.3 nm）に対する屈折率をそれぞれ n_F 、 n_C で表すと、アッベ数は次式で定義される。

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1)$$

Fig. 1 中の領域分けは、大別するとクラウン（ vd が 55 以上）、フリント（ vd が 50 以下）に分けられる。さらに、特徴的な化学成分によって細かく領域が分けられており [1]、例えば、最も左下の領域は、ふっ化物（F）を加えたクラウン（K）であることから、FK 領域と呼んでいる。

像の精度を高めるためには、収差を取り除く必要がある。例えば、光の屈折率が波長によって違うことに起因する色収差は、光学定数の異なるレンズを組み合わせで除去する。

[†] 本稿は、著者の引用文献 [8] の一般社団法人品質工学会より許諾を得ている。

他にも様々な取差を取り除くため、多くの硝種（ガラス材料の品種）が必要となる。近年の光学機器の高性能化、小型化に伴い、新硝種の開発や既存硝種の改良に対する要求はますます高まっており、それらの硝種を短期間に量産立ち上げすることが極めて重要である。

1.2. 課題に対するアプローチ

従来は、新硝種や既存硝種の改良品を量産立ち上げする場合、小規模実験で工程ごとに制御因子の水準を振って製造条件を定め、大規模な実験で量産性を確認してきた。しかし、小規模と大規模な実験では規模に差があるだけでなく、溶解プロセスも異なるため、小規模実験で得られた結

果が大規模実験で再現しないという課題が生じていた。

この課題を解決するため、本研究では、①プロセス機能展開表 [2] を活用し、広範囲の工程で同時最適化を検討した。次に、②評価尺度と誤差因子を工夫し、大規模な量産で小規模実験の結果が再現する評価方法を確立した。この評価方法を他の硝種における直交表実験に展開した結果、評価方法の有効性と汎用性を確認できたので、③その実験結果をロバストエンジニアリング (RE) 情報 [3] として蓄積した。その情報は、同系統の他の硝種に対しても適用できることが分かり、新たに開発した硝種であっても、直交表実験レスで、短期間に量産立ち上げを行うことができたので、以下に報告する。

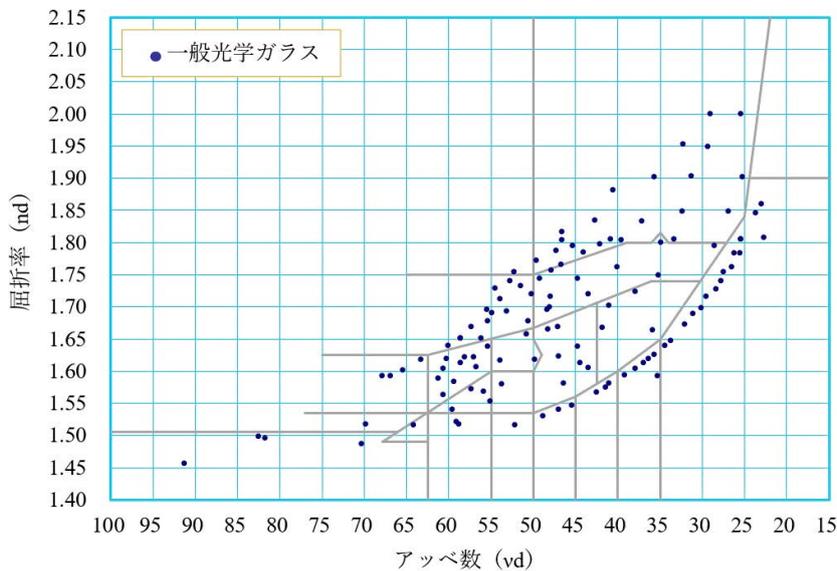


Fig. 1 nd -vd ダイアグラム (光ガラス株式会社)

Table 1 光学ガラスの開発・設計からガラス製造までの横型プロセス機能展開表

工程	開発・設計		製造							
	組成設計	調合組成	原料選定	調合		前溶解	混合・配合	連続溶解	成形	ラフアニール
工程の目的	顧客要望に沿った光学ガラスの性能になるよう組成を設計する。	設計された組成の元素比率になるよう、使用する原材料の種類や割合を決める。	調合組成で決めた原材料のメーカーや純度を決定する。	ガラス種や調合する量によって決められた複数の原料を精度高く計量する。	ひょう量した複数の原料を均等に混ぜ合わせる。	調合した原料を溶解炉に投入し熱を加え均一なガラスフリットを作る。	ガラスフリットを均等に混ぜ合わせる。目標の光学定数になる複数のフリットを均等に配合する。	配合されたガラスフリットを再度溶解し泡、脈の無い均質で透過率の高いガラス融液にする。	ガラス融液を均等に冷却し目的の形状に成形する。ゆっくり冷まして均一にひずみを下げる。	成形したガラスが割れないように、ゆっくり冷まして均一にひずみを下げる。
工程の機能 (働き)										
制御因子	・元素種類 ・元素比率	・塩の種類 炭酸塩など ・添加材種類 脱泡材など ・添加材量	・原料メーカー ・不純物規格 ・結晶系	・ひょう量順序 ・器具種類	・混合機種 ・混合条件	・溶解条件	・混合機種 ・混合条件	・溶解条件 ・攪拌条件	・冷媒種類 ・冷却量 ・温度バランス	・降温速度 ・温度 ・ヒータ距離
工程内の誤差因子		・製法 ・純度	・製法 ・規格内変動	・環境 ・劣化 ・疲労	・場所 ・環境 ・劣化	・場所 ・環境 ・劣化 ・炉体差	・場所 ・環境 ・劣化	・場所 ・環境 ・劣化 ・機差	・場所 ・環境 ・劣化 ・機差	・場所 ・劣化
標示因子		・硝種	・硝種	・原料種類	・硝種	・硝種	・硝種	・硝種	・硝種 ・成形サイズ	・硝種
システム分割	従来の範囲 ←-----→		←-----→							

2 プロセス機能展開表

Table 1 に、光学ガラスの開発設計からガラス製造までの横型プロセス機能展開表を示す。本表は、開発・設計から製造までのプロセスについて、工程順に、工程の目的とその工程の機能、制御因子、工程内の誤差因子、標示因子、システム分割の範囲を表にしたものである。

工程の目的には、各工程の目的について、理想の状態を表現した。工程の機能には、その工程の目的を達成するための機能を働きとして記述した。制御因子には、その工程で決めなければならない条件をリストアップするとともに、従来は検討していなかった因子も抽出した。工程内の誤差因子には、その工程のばらつき要因をリストアップした。本研究の場合、硝種はある範囲では誤差因子であるが、広い範囲では標示因子とした。また、劣化は、各工程で用いる設備の経年劣化を表し、製造条件のばらつきを生む。ある範囲ではフィードバックを行っているが、そのような環境や装置性能の変化に対してロバストにする必要があると考えた。最後の行には、システム分割の範囲を示した。

この表を用いて全体を俯瞰すると、組成設計で求めた元素の比率は、光学定数や化学的性質、熱的性質、機械的性質などが変化するため、硝種ごとの実験では固定条件となる。その他に硝材に要求される性質 (Table 2) については、

Table 2 光学ガラスの硝材に要求される性質 [4]

性質	内容
光学定数	屈折率, 分散など
化学的性質	耐酸性, 耐水性など
熱的性質	ガラス転移点など
機械的性質	摩耗度など
その他	透過率, 泡・異物, 脈理など

従来範囲の実験において、範囲外の固定条件が変化すると崩れてしまった。よって、調合組成からラファニールまでの工程全体を一つのシステムとして、同時に最適化することを検討した。

3 実験

3.1. 基本機能の検討

溶解の目的は、調合した原材料に熱を加え、均質なガラス融液を得ることである。この融液は、ガラス化反応によって得られることから、Fig. 2 に示す基本機能を考えた。溶解規模差によって生じる熱量の違いを Fig. 3 に、大規模量産における場所 P によるガラス化反応の違いを Fig. 4 に示す。小規模と大規模な量産では、原材料やガラス融液に

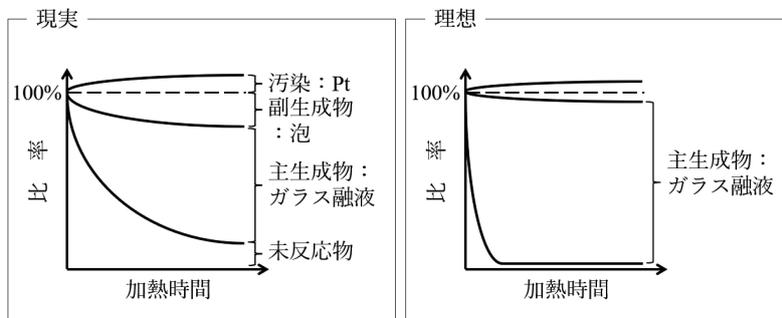


Fig. 2 ガラス溶解の基本機能

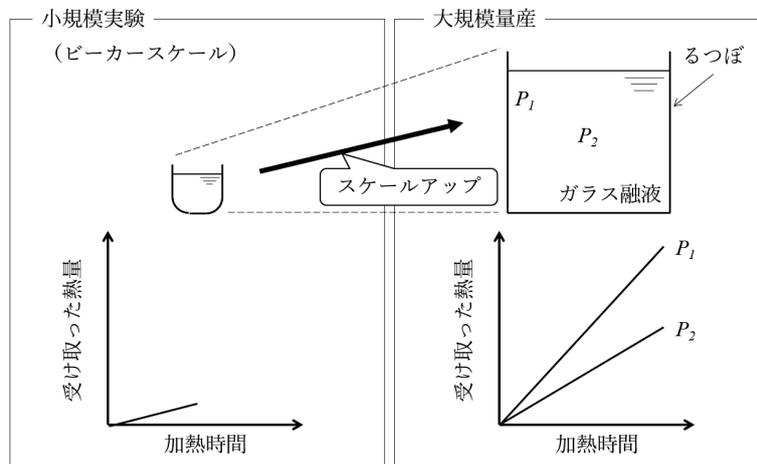


Fig. 3 熱量の溶解規模差

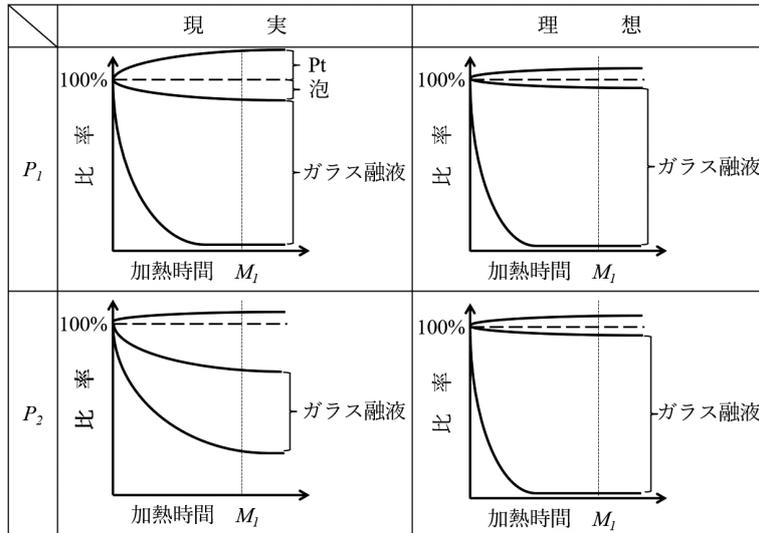


Fig. 4 大規模量産における場所による反応の違い

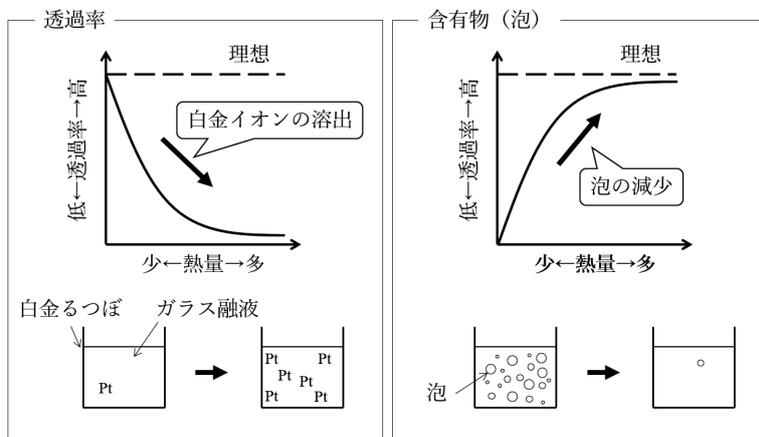


Fig. 5 熱量に対する透過率と含有物の関係

与える熱量に差が生じる。さらに、量産では規模が大きいため、場所によって受け取る熱量の違いが生じやすい。その結果、成分の不均一が生じることで、光を透して屈折させるという機能が低下すると考えた。したがって、熱量によらずガラス化反応が安定し、反応速度が速いことを理想と考えた。

3.2. 評価尺度と直交表の割付け

原材料が受け取った熱量や、反応率の測定は難しいので、その代用として、光を透すという機能に着目した。Table 2 で示した性質の中で、熱が加わる溶解工程では、透過率と泡品質がトレードオフの関係となる (Fig. 5)。熱量を大きくすると、るつぼの材質である白金がイオン化してガラス融液に混入し、近紫外域の透過率が低下するが、泡は澄清により除去できる [4]。この現象は、ほぼ全ての硝種に共通する。そこで、熱量によらずガラスの透過率が常に高いことを理想とした。

実際の評価では、光学ガラスの内部透過率を計測した。内部透過率とは、ガラス表面の反射損失を含まない分光透

過率のことで、規格 [5] にしたがって測定した。Fig. 6 (a) に、硝種01の内部透過率曲線を示す。ここで、 N_1 は熱量の少ない条件であり、 N_2 は熱量の多い条件である。 N_1 では、白金イオンの混入が少ないため、400 nm 以下の波長域の内部透過率が高くなるが、400 nm 以上の波長域では、多く残存した泡が光の透過を阻害し、内部透過率が下がっている。内部透過率を用いることで、一つのテストピースで透過率と泡を同時に評価できると考えた。

信号因子は加熱時間と考えて実験した。信号水準を増やすと実験数が増えてしまうため、1水準とした。誤差因子は、大規模な量産での場所の違いとして、加熱時間以外で熱量を変化させる因子を Table 1 から抽出し、調合して直交表 L_{18} の外側に割り付けた (2水準)。誤差因子の水準値 N_i は、予備実験を行い、ガラス化するのに最低限必要な値とした。

内部透過率は、算術的加法性を持たせるため、式 (2) でオメガ変換値 Ω を求めた [6]。ここで p は、内部透過率を表す。

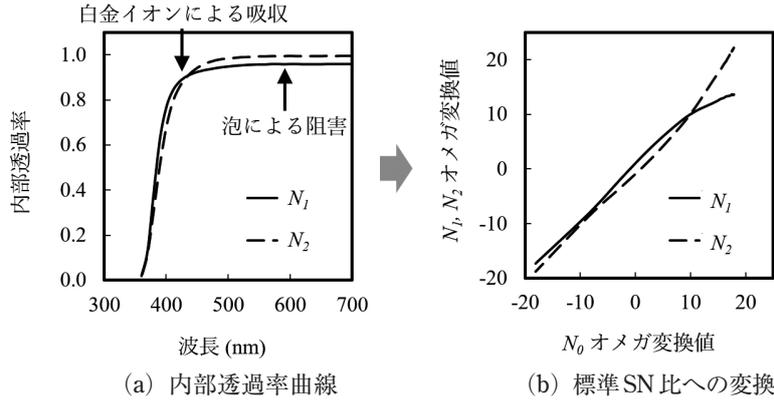


Fig. 6 内部透過率曲線と標準 SN 比への変換

$$\Omega = 10 \log \left(\frac{p}{1-p} \right) \quad (2)$$

オメガ変換値について、 N_1 , N_2 の平均値 N_0 に対して、 N_1 , N_2 をプロットしたグラフを Fig. 6 (b) に示す。誤差因子に対する内部透過率の安定性は、 N_1 , N_2 の平均値を標準条件の出力 N_0 とした標準 SN 比で評価した。

制御因子は、Table 1 から各工程の因子をバランスよく選択し、直交表 L_{18} の内側に割り付けた。

Table 3 測定結果の例

	波長 (nm)	内部透過率のオメガ変換値		
		N_0	N_1	N_2
1	360	-18.086	-17.37	-18.80
2	370	-8.416	-8.18	-8.65
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	690	17.887	13.58	22.19
35	700	17.887	13.58	22.19

4 硝種01の結果

4.1. 標準 SN 比の計算

直交表 L_{18} に従って、小規模実験で硝種01のテストピースを作製し、内部透過率を測定した。測定結果の例を Table 3 に、標準 SN 比の計算方法を下記に示す。

$$S_T = (-17.37)^2 + (-8.18)^2 + \dots + 22.19^2 = 16262.2130 \quad (f = 2 \times 35 = 70)$$

$$r = (-18.086)^2 + (-8.416)^2 + \dots + 17.887^2 = 7804.0274$$

$$L_1 = (-18.086) \times (-17.37) + \dots + 17.887 \times 13.58 = 6315.4123$$

$$L_2 = (-18.086) \times (-18.80) + \dots + 17.887 \times 22.19 = 9292.6425$$

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2)^2}{2r} = \frac{(6315.4123 + 9292.6425)^2}{2 \times 7804.0274} = 15608.0548 \quad (f = 1)$$

$$S_{N \times \beta} = \frac{(L_1 - L_2)^2}{2r} = \frac{(6315.4123 - 9292.6425)^2}{2 \times 7804.0274} = 567.9055 \quad (f = 1)$$

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} = 16262.2130 - 15608.0548 - 567.9055 = 86.2527 \quad (f = 70 - 1 - 1 = 68)$$

$$V_e = \frac{S_e}{f} = \frac{86.2527}{68} = 1.26842$$

$$S_N = S_{N \times \beta} + S_e = 567.9055 + 86.2527 = 654.1582 \quad (f = 1 + 68 = 69)$$

$$V_N = \frac{S_N}{f} = \frac{654.1582}{69} = 9.4805$$

標準 SN 比

$$\eta = 10 \log \left(\frac{2r}{V_N} \right) = 10 \log \left(\frac{2 \times 7804.0274}{9.4805} \right) = 32.17 (db)$$

4.2. 要因効果図と最適条件の決定

硝種01の要因効果図を Fig. 7 に示す。この図より SN 比の大きい水準は、 $A_2 B_2 C_3 D_2 E_1 F_1 G_1 H_2$ となる。

内部透過率は、高いことが理想であるため、目的の波長範囲における N_0 のオメガ変換値を感度とした。感度の要因効果図を Fig. 8 に示す。最適条件として、 C_3 を C_1 , F_1 を F_3 とし、最終的に、 $A_2 B_2 C_1 D_2 E_1 F_3 G_1 H_2$ とした。

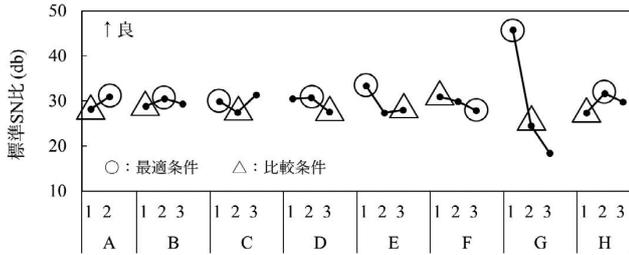


Fig. 7 硝種01における SN 比の要因効果図



Fig. 8 硝種01における感度の要因効果図

Table 4 推定結果と確認実験の比較

	標準 SN 比 (db)		感度 (db)	
	推定	確認	推定	確認
最適条件	50.67	48.96	16.05	15.41
比較条件	19.01	17.89	10.13	8.46
利得	31.66	31.07	5.92	6.94

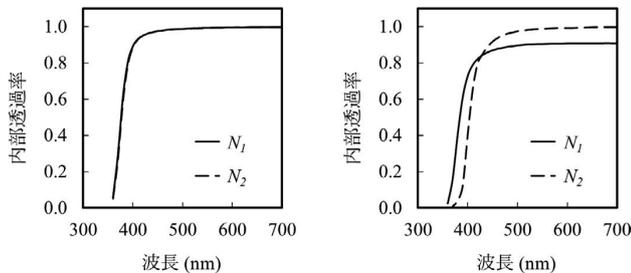


Fig. 9 確認実験の内部透過率曲線の比較
(a) 最適条件 (b) 比較条件

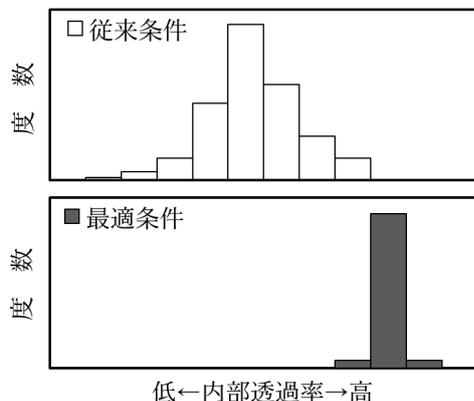


Fig. 10 硝種01における量産再現性の確認
(目的波長の内部透過率のヒストグラム)

4.3. 確認実験

最適条件と比較条件を用いて、確認実験を行った。その結果、再現性が得られた (Table 4, Fig. 9)。最適条件を量産の製造条件に反映すると、大規模な量産でも再現し、従来条件に対して内部透過率の高い硝材を安定して製造することができた (Fig. 10)。

5 直交表実験の多硝種展開とロバストエンジニアリング情報の蓄積

硝種01と同様の直交表実験を、新たに開発した硝種も含め、同系統 (γ) の硝種02, 03についても実施した。Table 5に、各直交表実験の利得再現性を示す。硝種によらず利得再現性が得られたと同時に、量産で高品質の硝材が安定して得られた。硝種01と比較して硝種02以降の利得が小さいのは、制御因子の水準幅を狭めたこと、異なる制御因子も取り上げていることが影響していると考えた。これらより、評価方法の有効性と汎用性を確認できたので、異なる系統 (δ) の硝種05~08に対しても直交表実験を実施した。

Table 5 各直交表実験の利得再現性 (標準 SN 比)

硝種	直交表	推定利得 (db)	確認利得 (db)
01	L_{18}	31.66	31.07
02	L_{12}	12.75	13.60
	L_{18}	6.50	6.10
03	L_{18}	12.80	9.95

多くの硝種で実施した直交表実験の結果を技術情報として蓄積するため、一つの表にまとめた (Table 6)。本表は、横型プロセス機能展開表の行列を入れ替え、縦型プロセス機能展開表にし、直交表実験の結果を列に追記した表である。この時、表には、SN比の情報だけでなく、各制御因子の水準を変えたときの感度やコストの変化も記した。我々は、この表をロバストエンジニアリング (RE) 情報と呼んでいる [2]。

RE情報を俯瞰すると、硝種によらずSN比に効果のある制御因子や水準の方向を把握できるようになった。これにより、安定性として水準を固定したほうが良い制御因子や、そうでない制御因子が明確になり、次製品に展開可能な汎用性のある製造技術情報が蓄積された。

6 成果

6.1. 直交表実験レスによる量産立ち上げ

硝種ごとの実験の目的と進め方を Table 7 に示す。RE情報の要因効果を横展開することで、系統γ, δ内の硝種については、直交表実験を行わずに、RE情報から量産の製造条

Table 6 系統δの縦型プロセス機能展開表とRE情報

工程	制御因子	硝種05 L _{IT} -1			硝種05 L _{IT} -2			硝種06 L _{IT} -1			硝種06 L _{IT} -2			硝種07 L _{IT}			硝種08 L _{IT}		
		利得再現性	推定確認	32.0 db 41.0 db	利得再現性	推定確認	26.1 db 20.9 db	利得再現性	推定確認	49.5 db 51.3 db	利得再現性	推定確認	5.3 db 4.6 db	利得再現性	推定確認	14.3 db 12.5 db	利得再現性	推定確認	55.4 db 46.8 db
		誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園	誤差因子: ●●		SN比 効果園
		N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3			N ₁ *** N ₂ *** 水準1 水準2 水準3		
調査組成 原料選定 調査 前焙解 混合・配合 連続焙解 成形 ラフア ニール	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	20.90 23.31 24.03		***			***			***			***			***			***
	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	15.80 18.81 17.19		***			***			***			***			***			***
	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***
	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***
	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***
	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***
	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***
	***	***		***			***			***			***			***			***
	1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***			***			***			***			***			***	
1 2 3	17.40 19.90 18.70		***			***			***			***			***			***	
***	***		***																

7 まとめ

本研究により、様々な硝種に展開可能な、量産再現性のある小規模実験方法を確立できた。その中で、我々が実施したプロセス機能展開表の活用方法を下記に示す。

- (1) 広範囲の工程全体を顕在化し、検討すべき範囲を明確にする（システム分割）。
- (2) 評価尺度と誤差因子を検討し、大規模な量産で再現性のある小規模実験を行う。
- (3) 多硝種に展開した直交表実験の結果を、縦型プロセス機能展開表に整理し、固定すべき制御因子を明確にする（RE情報の蓄積）。

この活用方法により、次製品に展開できる汎用性のある製造技術を確立できた。その結果、直交表実験レスで新硝種の垂直立ち上げを実現した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた元ニコンの関道子氏に感謝申し上げます。

引用文献

- [1] 泉谷徹郎, 光学ガラス, 共立出版, 1984.
- [2] 嘉指伸一, “プロセス機能展開表の活用とロバストエンジニアリング情報の活用による初期型不良の撲滅と立上げリードタイムの短縮,” 全国能率大会, 63, pp. B73-76, 2012.
- [3] 嘉指伸一, “品質工学を実務で活用する「品質工学ステップ展開」,” 標準化と品質管理, vol. 69, no. 9, pp. 57-69, 2016.
- [4] 山根正之 他, ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店, 2010.
- [5] 光学ガラスの内部透過率の測定方法, JOGIS 17: 2012.
- [6] 田口玄一, 品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学, 日本規格協会, 1988.
- [7] 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル, Ver 4.0, 環境省, 経済産業省, 2015, pp. II-32-II-33.
- [8] 佐藤幸太, 嘉指伸一, “プロセス機能展開表を活用した光学ガラスの溶解技術開発,” 品質工学, vol. 29, no. 1, pp. 30-38, 2021.

佐藤幸太 Kota SATO
光ガラス株式会社
HIKARI GLASS CO., LTD.



佐藤幸太
Kota SATO

嘉指伸一 Shinichi KAZASHI
嘉指技術品質研究所
KAZASHI Technological Quality Research



嘉指伸一
Shinichi KAZASHI

Nikon Research Report Vol. 5

発行年月 2023年9月

禁無断転載

NIKON CORPORATION