

2013 年日本光学会の研究動向

「日本光学会の研究動向」は、日本光学会および光学における昨年 1 年間の光学の研究活動状況ならびに進歩発展について解説したものです。本解説における検索範囲は、応用物理学会および日本光学会を中心として、他に関連する学会・研究会・国際会議等における発表（口頭および論文）で、本文および文献での検索学会等の名称は下表の略記法を用いています。

表 「2013 年日本光学会の研究動向」における引用講演会等の省略表記

略 称	講演会の正式名称
<i>OPJ</i>	日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan
春季応物講演会	応用物理学会春季学術講演会
秋季応物講演会	応用物理学会秋季学術講演会
信学会ソサイエティ大会	電子情報通信学会ソサイエティ大会
精密春季（秋季）大会	精密工学会春季（秋季）大会
<i>AM-FPD</i>	International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices
<i>ASSL</i>	Advanced Solid State Lasers
<i>CES</i>	Consumer Electronics Show
<i>CLEO Europe/IQEC</i>	Conference on Lasers and Electro-Optics / International Quantum Electronics Conference
<i>CLEO-PR</i>	Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim
<i>ECOC</i>	European Conference and Exhibition on Optical Communication
<i>EM-NANO</i>	International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies
<i>FiO</i>	Frontiers in Optics
<i>FlexTech</i>	Flexible & Printed Electronics Conference & Exhibition
<i>ICSE</i>	International Conference on Spectroscopic Ellipsometry
<i>IDW</i>	International Display Workshops
<i>IFA</i>	Internationale Funkausstellung Berlin
<i>ISOM</i>	International Symposium on Optical Memory
<i>OECC</i>	OptoElectronics and Communications Conference
<i>OFC</i>	Optical Fiber Communication Conference and Exposition
<i>PS</i>	Photonics in Switching
<i>SID</i>	Society for Information Display
<i>SSDM</i>	International Conference on Solid State Devices and Materials

1. 光 物 理

北海道大 森田隆二

1.1 概 要

本分野が対象とする領域は、物理光学（光の波動性を無視した幾何光学と、完全に波動として記述する厳密な理論である電磁気学との中間的領域）、および光が関連する広範囲の科学である光科学である。光の振る舞い・性質および光と物質との相互作用に関する研究全般を指すと思ってもらってよく、光渦、偏光、フォトニック結晶、メタマテリアル、光局在、ランダム媒質、コヒーレンス、伝搬、回折、干渉、散乱などが研究領域例として挙げられる。本分野は多くの研究領域と密接に関係している。したがって、他の項目で重複して取り上げられる可能性のある研究・技術に関しても、重要と思われるものは適宜本項目で取り上げていきたいと思う。

2013年における国内外の学術講演会での報告内容を見ると、メタマテリアルや特異光学といった特殊に制御された光や、そのような光と物質との相互作用に関する研究報告が、2012年に引き続き注目を集めている。光マニピュレーション技術ではプラズモニクスを応用した技術の進展がみられる。また、フォトニック結晶分野はアクティブな発光素子・装置としての研究もみられるようになってきており、光・量子エレクトロニクス分野中で確固たる存在となりつつある。ランダム系と光との相互作用の研究は、ランダム性を積極的に利用して光を制御しようという方向へ向かっている。

1.2 特異光学とその応用

数年ほど前から、位相特異性や偏光特異性を有する光に関する研究（特異光学；singular optics）が盛んになってきている。光渦と金属との相互作用によるナノ螺旋構造の作製に関する研究は、光の波面構造の物質への初めての転写例であるが、その制御性を高め、螺旋構造の大きさや巻き数なども制御できるようになってきている^{1,2)}。また、対象とする物質も金属だけでなく、半導体³⁾・高分子^{4,5)}にまで及ぶようになってきた。また、量子エレクトロニクス領域における特異光学としては、軸対称偏光素子による低次から高次までのさまざまなリング状光格子⁶⁾や、非整数光渦の光パラメトリック増幅⁷⁾・発振⁸⁾、分極反転結晶を用いた紫外光渦発生⁹⁾、超短光渦パルスのコヒーレント結合による超短軸対称偏光モード光生成¹⁰⁾、トポロジカルチャージ可変な高強度超短光渦パルス発生¹¹⁾、軸対称偏光を扱うことが可能な拡張ストークスパラメータ¹²⁾、一軸結晶中の軸対称偏光パルスの非線形光学効

果¹³⁾、空間的電場回復法による軌道角運動量スペクトル測定法¹⁴⁾、テラヘルツ領域におけるラゲールガウスビーム発生¹⁵⁾、軸対称偏光ビーム発生¹⁶⁾に関する報告がなされ、研究対象となる波長帯域も可視・近赤外にとどまらず、中赤外・テラヘルツ領域への展開をみせている。

1.3 光マニピュレーション・光トラッピング

2013年の春季応物講演会では、「物質共鳴とデザインされた光場で開く次世代マニピュレーション」、OPJでは、「光共鳴とナノトラッピング」と題するシンポジウムが開催された。半導体ナノ粒子の選択的輸送¹⁷⁾、プラズモン場によるマニピュレーション^{18,19)}、プラズモン共鳴トラップ²⁰⁾、局在プラズモンによる分子配向・電子励起状態制御^{21,22)}、光の角運動量によるカイラリティーマニピュレーション²³⁾、光輻射力による化学反応場²⁴⁾、熱ゆらぎによる超高精度ナノ光スクリーニング²⁵⁾、非線形光学効果によるナノトラップ²⁶⁾などの報告がなされた。状態が制御された光場と物質と相互作用によるマニピュレーション技術を、物理・化学をはじめとする広汎な分野において応用しようという研究に進展がみられた。

1.4 フォトニック結晶

フォトニック結晶に関しては、2013年春季・秋季応物物理学講演会において、これまで同様多数の報告があり、この分野の活発さがうかがえる。以下では、光物理分野として注目したいいくつかの研究を挙げておく。量子情報デバイス応用をめざした研究としては、原理的に高速な過程を利用した強度相関測定²⁷⁾、フォトニック結晶ナノ共振器・量子ドット結合系における大きな真空ラビ分裂の観測²⁸⁾、微小電気機械システム（micro electro mechanical systems; MEMS）による広範囲Q値可変フォトニックナノビーム共振器の作製²⁹⁾、高Q値フォトニック結晶ナノ共振器を用いた強結合量子ドット共振器量子電磁力学系の実現³⁰⁾、幾何学的位相の制御による光共振器間の断熱的転送³¹⁾、微小共振器中の断熱的波長変換と相互位相変調との統一的理解³²⁾に関する報告があった。そのほか、光源開発として、高効率赤外光源・太陽熱光起電力用発電光源をめざした単峰かつ狭帯域熱輻射光源³³⁾、変調構造によるフォトニック結晶レーザーのビーム出射方向制御^{34,35)}、室温連続高出力フォトニック面発光レーザー³⁶⁾、低閾値シリコンラマンレーザー³⁷⁾に関する報告があった。また、三次元フォトニック結晶については、フェムト秒レーザー描画と原子層堆積法³⁸⁾、3方向同時エッチングによる作製法³⁹⁾の報告があった。さらに、生体系への応用としては、シンポジウム「ナノバイオデバイスを利用した生命機能解明と医療応用」において、フォトニック結晶ナノレー

ザーアレイによるバイオセンシング⁴⁰⁾の報告がなされた。

1.5 メタマテリアル

メタマテリアルはさまざまな波長領域の伝搬光、近接場光を対象とする研究領域である。構造サイズによるものか、2013年春季・秋季応物講演会においては、テラヘルツ領域での研究に関する報告が多かったように思われる。以下では注目したいいくつかの研究を挙げておく。近接場光学においては、金スプリット共振器配列による可視領域における磁場応答の観測⁴¹⁾、湾曲金ナノロッドと金ナノロッドの相互作用が与えるプラズモン特性への効果⁴²⁾に関する報告がなされた。また、テラヘルツ分野では、閉鎖リング共振器と分割リング共振器を用いたメタマテリアルによる電磁誘起透明化現象⁴³⁾、スプリットチューブ構造のテラヘルツ帯での光学応答⁴⁴⁾、スプリットリング共振器配列におけるメタアトム間の相互干渉効果⁴⁵⁾といった基礎的な光学特性研究のほか、デバイス応用を目的とした、イオン液体を用いた電気二重層ゲートによるアクティブメタマテリアル⁴⁶⁾に関する報告があった。このほか作製法に関しては、位相・振幅制御されたレーザーを用いた加工による多様なメタマテリアル作製⁴⁷⁾に関する報告があった。

1.6 ランダム系における光物理

この分野は、光の多重散乱、微粒子等による共鳴、アンダーソン局在などが関連する分野であるが、ランダム系と光との相互作用に関して、いくつか興味深い報告があった。近接場相互作用のゆらぎと時空間ダイナミクスを利用した情報処理技術をめざす研究として、ランダム分布する量子ドット系における時空間光励起制御輸送⁴⁸⁾に進展がみられた。そのほか、酸化亜鉛ナノ粒子フィルムにおける単一ランダムレーザー発振⁴⁹⁾、周期/ランダム配列におけるプラズモン共鳴⁵⁰⁾、ナノコラム半導体におけるランダムレージング⁵¹⁾に関する報告があった。これらは、ランダム性を利用した光制御を行おうという研究である。また、テラヘルツ波とランダム系との相互作用としては、ランダムさを有する金属チェッカーボードパターンのテラヘルツ透過特性・有効誘電率⁵²⁾に関する報告がなされた。

1.7 展 望

「物理光学」「光科学」を中心として、2013年のおもな報告をまとめてみた。この分野は、特異光学、フォトニック結晶、メタマテリアル、ランダム系における光物理など、基礎研究と応用とがある意味バランスがとれた状況で進展しているといえる。すなわち、応用をめざした素子・技術の開発と、その基盤となる物理が常に相互作用し表裏一体となって、異分野間での融合領域を形成しているともい

えようか。今回、コヒーレンス、回折、干渉、散乱、偏光に関する研究はあらわに取り上げることができなかったが、これらは、取り上げた研究の基礎となっており、「物理光学」「光科学」が光学、応用物理学において重要な意味をもちつつ、この領域の進展のために大きな寄与をなしているといえる。

文 献

- 1) 高橋冬都他：春季応物講演会 (2013) 28p-A2-1.
- 2) K. Toyoda *et al.*: Phys. Rev. Lett., **110** (2013) 143603.
- 3) 高橋冬都他：秋季応物講演会 (2013) 19p-C14-10.
- 4) M. Watabe *et al.*: CLEO Europe/IQEC (2013) CM-5.1.
- 5) 渡部瑞季他：秋季応物講演会 (2013) 18a-C13-7.
- 6) 坂本盛嗣他：OPJ (2013) 12aE7.
- 7) Y. Taximaiti 他：春季応物講演会 (2013) 30a-C1-4.
- 8) 時実 悠他：秋季応物講演会 (2013) 19p-A14-14.
- 9) 佐々木佑太他：秋季応物講演会 (2013) 16p-A8-1.
- 10) 塩田康之他：秋季応物講演会 (2013) 19p-A3-3.
- 11) 本田亜沙美他：OPJ (2013) 12aE3.
- 12) 鈴木雅人他：OPJ (2013) 12aE4.
- 13) M. Suzuki *et al.*: CLEO-PR (2013) WB4-4.
- 14) Z. Yang *et al.*: CLEO (2013) QM3E.
- 15) 平岡友基他：秋季応物講演会 (2013) 17a-A14-8.
- 16) 根本夏紀他：秋季応物講演会 (2013) 17a-A14-7.
- 17) 芦田昌明：春季応物講演会 (2013) 27p-G16-2.
- 18) 笹木敬司他：春季応物講演会 (2013) 27p-G16-3.
- 19) Y. Tanaka *et al.*: Nano Lett., **13** (2013) 2146.
- 20) 坪井泰之：春季応物講演会 (2013) 27p-G16-4.
- 21) 村越 敬：OPJ (2013) 13pBS7.
- 22) M. Takase *et al.*: Nat. Photonics, **7** (2013) 550.
- 23) 尾松孝茂：春季応物講演会 (2013) 27p-G16-6.
- 24) 伊都将司他：春季応物講演会 (2013) 27p-G16-9.
- 25) 田村 守他：春季応物講演会 (2013) 27p-G16-10.
- 26) 岡本裕巳：春季応物講演会 (2013) 27p-G16-11.
- 27) 太田泰友他：春季応物講演会 (2013) 28a-C1-2.
- 28) 高宮大策他：春季応物講演会 (2013) 28a-C1-4.
- 29) 太田竜一他：春季応物講演会 (2013) 29a-C1-5.
- 30) 太田泰友他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P14-15.
- 31) 鴻池遼太郎他：秋季応物講演会 (2013) 18p-A3-2.
- 32) 近藤圭祐他：春季応物講演会 (2013) 29p-PA7-1.
- 33) 井上卓也他：春季応物講演会 (2013) 28a-C1-6.
- 34) 沖野剛士他：春季応物講演会 (2013) 28p-C1-17.
- 35) 沖野剛士他：秋季応物講演会 (2013) 18p-A3-7.
- 36) 廣瀬和義他：春季応物講演会 (2013) 28p-C1-18.
- 37) 高橋 和也：春季応物講演会 (2013) 28a-C1-11.
- 38) 常盤墨也他：春季応物講演会 (2013) 28p-C1-7.
- 39) 北野圭輔他：春季応物講演会 (2013) 28p-C1-9.
- 40) 磯野俊成他：春季応物講演会 (2013) 27p-G17-9.
- 41) 富岡辰弥他：春季応物講演会 (2013) 27p-A1-6.
- 42) 横田幸恵他：春季応物講演会 (2013) 27p-A1-7.
- 43) 森田博紀他：春季応物講演会 (2013) 29p-D1-10.
- 44) 大野誠吾他：秋季応物講演会 (2013) 16p-P1-19.
- 45) 北原英明他：秋季応物講演会 (2013) 16p-P1-20.
- 46) 河野健太他：秋季応物講演会 (2013) 16p-P1-27.
- 47) 中田芳樹他：春季応物講演会 (2013) 29p-D2-8.
- 48) 野村 航他：春季応物講演会 (2013) 28p-A1-9.
- 49) 煮雪 亮他：春季応物講演会 (2013) 28p-A2-2.
- 50) 西島喜明他：春季応物講演会 (2013) 29a-PA3-8.
- 51) 酒井 優他：春季応物講演会 (2013) 27a-A4-4.
- 52) 高野恵介他：春季応物講演会 (2013) 29a-D1-10.

2. 結像素子・光学機械

キヤノン 田中常文

2.1 概要

光学機器に要求される性能の高度化はとどまることがなく、日々研究開発が続けられているが、大きなブレークスルーのシーズとして、自由曲面、回折光学素子などが提案されてきた。これらの有効性は理解されていながら、設計環境の不備や製造の困難さなどが課題となっていた。近年、これらの課題解決の指針となる議論や有効な応用例の提案が行われ、学会や研究会で盛んに議論されるようになってきた。

また、革新的な研究報告、技術報告を聴講すると、結果の報告にとどまらず、その報告の根拠となっている光学の基本をいかに活用しているかが議論されている。このような報告や議論がますます活発な場となることを期待したい。

2.2 結像素子

2.2.1 回折光学素子

回折光学素子 DOE (diffractive optical element) は通常のレンズとは逆の分散特性を有しており、レンズ単体で色収差を補正でき、CD や DVD の光ピックアップレンズに用いられる。また大きな色消し効果によりカメラ用の交換レンズとして商品化されてきた。最近では顕微鏡用の対物レンズに搭載され、その特徴である色収差低減方法、長作動距離化やフレア抑制の手法について報告された¹⁾。回折光学素子の課題として、設計次数以外の不要回折光のフレアや、周期性微細構造に起因するフレアが像の劣化を招くが、層構造を形成する材料の屈折率の最適化、段差構造の工夫による入射光線の角度依存の低減に関する設計手法の報告がなされた²⁾。

2.2.2 収差補正素子

天体観測の際、大気ゆらぎなどを補正する手段としてガイド星の波面を計測し、分割した複数のミラーを微調整して収差を補正する方法はよく知られている。これを生体観察に応用する方法として、励起光スポットをガイド星に見立てて波面を計測し、液晶素子でアクティブに顕微鏡トータルの収差補正を行う手法の報告があった³⁾。生体をはじめ複雑な観察条件化での応用が期待される。

2.2.3 素子評価・計測

非球面レンズや非球面のモールド金型の形状を高精度に測定する方法として、断面形状をレーザー触針で計測する機器が市販されている。しかしながら、ワークに残る測定痕が問題になる場合があり、非接触測定ニーズを満たす

べく、ワークを移動させながら干渉縞を繋いで形状を再構成する測定器なども登場した。さらなるニーズである非球面全体を一括にかつ短時間に測定する方法として、シャック・ハルトマン波面センサーを利用した測定方法が近年開発されている。非球面の概略形状に沿う球面参照波を非球面に照射し、反射波と測定条件の幾何学的なパラメータをシャック・ハルトマンセンサーによる位置情報として解析して非球面形状を再構成する手法⁴⁾や、非球面量が大きい場合の推定技術⁵⁾などが報告された。

高精度を要求される機器のレンズや、特にモールド成形レンズでは、微小な内部ひずみ(屈折率の不均一性)が問題になる場合がある。この内部ひずみを測定する方法として、レンズの透過波面を2つの媒質の環境で測定して波面の形状起因成分を相殺し、ひずみを抽出する手法が報告された⁶⁾。高屈折率レンズの測定で有効と思われる。大面積の平板の内部ひずみを測定する手法として、タルボ干渉計と凹面ミラーを用いる報告⁷⁾がなされた。素子評価の項目として重要な散乱に関し、光学素子内部の微小な散乱を高精度に測定する手法の報告⁸⁾があった。この手法によれば、サブミクロンレベルの格子欠陥に起因する散乱分布まで測定が可能になる。

2.3 光学機械

2.3.1 設計理論

近年、自由曲面に関する基底関数表記による表現形式の提案や、さまざまな設計事例が紹介されている。しかしながら現状はいまだに、設計経験の少なさ、設計ツールの最適化収束性の悪さ、製作の困難さなど、課題が多く残されているといえる。上記の課題を踏まえ、有効な自由曲面の活用例の提示と自由曲面導入の考え方に関する示唆に富んだ報告があった⁹⁾。また、自由曲面や回折光学素子を従来の球面光学系と組み合わせて応用する際、役割分担の思想を明確に設計することで、予想を超える組み合わせ効果を発揮できるという、これもまた示唆に富んだ報告があった¹⁰⁾。

太陽光集光用フレネルレンズの正弦条件満足度に関する報告があった¹¹⁾。高仕様を要求されるレンズ設計に携わる者であれば、正弦条件不満足量という設計指標は当然の前提で仕事をしているが、比較的簡単な光学系の場合には最適化ツールに頼り切るのがおそらく一般的であり、このような考察の価値や重要性について反省させられる。

2.3.2 光学設計

近年、CCD や CMOS センサーの高画素化、高感度化が進んだことで、水平画素数がハイビジョンの2倍にあたる4KシステムがシネマやTV制作、CM制作などの業務用分野で一般化してきている。この4K デジタルシネマに関

して、映像製作の現場で要求される高性能ズームレンズの要点や、それを達成するための技術についての報告があった¹²⁾。ディスプレイの4Kシフトが進むことで、コンシューマー用の撮影機材への展開も進むと思われる。

自動車の自動急停止機能や将来の自動運転機能の話題など、自動車関連の技術革新に停滞はないようである。この分野においても光学技術への期待は大きく、運転者の視界に情報の虚像を空中像として表示する HUD (head-up display) に関する報告があった¹³⁾。この報告は、従来から課題であった小型かつ高視野化、高輝度化、ユニットの汎用化および投射像の低ひずみ化に関するものである。

2.3.3 画像評価・最適化手法

従来、部分コヒーレント照明で照射された光学像の評価は TCC (相互透過係数) により定式化でき、その瞳面での積分計算の高速化手法が議論されてきた。そこへ瞳シフト行列を導入し、原理的には等価でありながら高速な計算と評価が可能であるとの報告があった¹⁴⁾。有効な研究として評価できる。

「デジタル画像の画質評価」と題して、これまでの画質研究の紹介を含む報告があった¹⁵⁾。画像を設計する立場からこのような研究内容の理解が次の課題設定として重要であること、また質感再現や生理的な観点への取り組みが次世代の画像システム設計として不可欠要素と思われる。

半導体露光装置の収差計測は、装置メーカーではさまざまな方法で波面収差の測定が可能であるが、半導体メーカー側では照明とマスクの工夫による実際の露光結果の解析によるしかない。低次のツェルニケ係数成分を分離抽出するマスクパターンの条件を分析し、波面収差を再構成する手法が報告された¹⁶⁾。多くのパターンを露光する手間はあがるが、この分野に限らず光学性能の分析手法として活用が期待される。

レンズ設計の大域的最適化手法に関しては、これまで多くの研究があり、市販ソフトも普及している。大域的最適化の有効性は、設計者のスキルや設計対象によりさまざまな評価であったが、製造誤差感度の低減を主眼にした活用方法に関する紹介¹⁷⁾では、レンズタイプが有する不可避な誤差感度をタイプ選択に遡って考慮する有効性が事例で示され、示唆に富む報告であった。

大域的最適化に関する最新の研究として、多峰性(解として有効な組み合わせが複数ある)かつ非線形な black-box 連続関数最適化のための実数値進化計算と光学設計への応用が報告された¹⁸⁾。レンズの最適化はトレードオフ関係にある多目的最適化であり、設計者のスキルに依存する重み分配の作業が解析的な見通しで行えるようになるよ

う期待したい。

2.4 展 望

ここ十数年間発展を遂げてきたデジタルカメラ市場も、スマートフォンの普及とそのカメラ機能や画質の進化に伴って様相が変わってきた。小型軽量の優位性を誇ってきたコンパクトデジタルカメラでは、1インチ以上の大きなセンサーでぼけ効果を訴求する製品が登場し始め、レンズ交換式デジタルカメラではさらなる作画効果を提供方向へと進んでいくものと思われる。また、デジタルならではの画像処理技術、画像認識技術との融合も、さらに進化するものと思われる。

デジタルカメラの動画機能の一般化により、これまでの動画専用機器がモバイル志向の形態に進化するものが登場するほか、4K ディスプレイの普及を見据えた高画質化への進化も予想される。

昨年、海外メーカーからライトフィールド技術を応用したカメラが発売されたが、今年も、複数のレンズ(この例では16眼)で瞳分割された画像情報を取得し、被写体の奥行き情報を利用して、撮影後にピントを合わせ直す機能を有したカメラの発表があった¹⁹⁾。その技術の詳細²⁰⁾によると、リフォーカス機能だけではなく、センサーの能力以上の解像度や利得を実現する画像処理技術が搭載されている。また、従来の3D光学系と同じ2眼構成のカメラで、3D効果ではなく奥行き情報利用を目的としたカメラの発表²¹⁾があった。信号処理の高速、高機能化の進展が前提となるが、応用範囲が広いポテンシャルをもった技術として注目される。

文 献

- 1) 吉田三環子：光学シンポジウム (2013) 講演番号 26.
- 2) 是永継博他：光学設計グループ機関誌, No. 51 (2013) 63.
- 3) 田辺綾乃他：光学シンポジウム (2013) 講演番号 25.
- 4) 古川裕範他：OPJ (2013) 12aB1.
- 5) 遠藤貴雄他：OPJ (2013) 12aB2.
- 6) 加藤正磨他：OPJ (2013) 12pB1.
- 7) 喜入朋宏他：秋季応物講演会 (2013) 17p-C13-6.
- 8) 喜入朋宏他：秋季応物講演会 (2013) 17p-C13-9.
- 9) U. Wilhelm：光学設計グループ機関誌, No. 51 (2013) 3.
- 10) I. Livshits：光学設計グループ機関誌, No. 51 (2013) 11.
- 11) 藤井純輝他：OPJ (2013) 14pB2.
- 12) 白井文昭他：光学シンポジウム (2013) 講演番号 14.
- 13) 野本貴之他：光学シンポジウム (2013) 講演番号 15.
- 14) 山添賢治：光学設計グループ機関誌, No. 51 (2013) 61.
- 15) 三宅洋一：光学設計グループ機関誌, No. 51 (2013) 51.
- 16) 野村 博：光学シンポジウム (2013) 講演番号 7.
- 17) 岩井広成：光学設計グループ機関誌, No. 51 (2013) 21.
- 18) 小野 功：光学シンポジウム (2013) 講演番号 11.
- 19) <http://www.pelicanimaging.com/technology/camera.html>
- 20) http://www.pelicanimaging.com/technology/PiCam_sa13.pdf
- 21) http://www.toshiba.co.jp/about/press/2013_09/pr_j2601.htm

3. X線光学

大阪大 山内和人

3.1 概要

X線光学の分野では、X線顕微鏡、EUVリソグラフィ、望遠鏡などを対象にさまざまな研究開発が進んでいる。特に硬X線顕微鏡では、X線自由電子レーザー SACLA (SPring-8 angstrom compact free-electron laser) が発振したこと¹⁾から、光学系の開発やビーム診断などにさまざまな進展があった。応用面でもフェムト秒レベルの極短パルス特性を利用したシングルショット回折顕微法 (CDI: coherent X-ray diffraction imaging) や、極度に高いピークエネルギーを利用したX線非線形光学現象の観察などに大きな進展があった。EUV (extreme ultraviolet) リソグラフィ関係では、最も重要な光源開発のための努力が続けられ、X線望遠鏡の分野でも新たな光学素子の提案や開発が進んでいる。ここでは、X線源、光学系、光学系の診断、X線顕微鏡や望遠鏡などにおける応用展開に分けて動向をまとめてみたい。

3.2 X線源

X線源においては、X線自由電子レーザーが幅広く利用に供される段階に入っている。昨年度には $1\mu\text{m}$ ²⁾および 50nm ³⁾集光光学系の整備が完了し、ほぼすべての実験が集光ビームを利用しているといっても過言ではない。極短パルス光であるX線自由電子レーザーでは、シングルショットでの時間分解計測が応用の中心であり、材料が破壊されるまでにデータを取得する必要性から、高いフラックス密度が求められている。 $1\mu\text{m}$ 集光系では $\sim 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 、 50nm 集光系では $\sim 10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ がすでに達成されている。EUV光源はスタンドアロンの必要性からプラズマX線源が中心である。EUVリソグラフィでは、発光効率の向上がその成否を決め、将来の展開を左右することが知られている。高効率化に有効と考えられるダブルパルス励起では、ドロップレットの挙動⁴⁾やプラズマの挙動に関する従来以上に踏み込んだ計測やモデリングが進められている⁵⁻⁷⁾。また、光源サイズの微小化の観点から、ドットターゲットによって高輝度化を狙う研究も進んでいる⁸⁾。より短波長の軟X線や水の窓領域での発生効率を重視したプラズマX線源においては、Bi, Zr, Gdなどが優れるとの結果が報告されている^{9,10)}。焦電単結晶である LiTaO_3 を用いる超小型X線源についても、引き続き精力的な開発が進んでいる¹¹⁾。少し観点が違うが、簡便なコヒーレントX源の実現を目指すX線導波路において、従来の単一導波路の欠点である低いフラックスと大きな発散角の間

題を多層導波路によって解決する試みが行われている¹²⁾。

3.3 光学系、光学系診断

放射光X線の集光光学系は、硬X線領域においてKB (Kirkpatrick-Baez) ミラーが主流である。ミラーの作製技術はほぼ確立されつつあるが、ビームラインの長さや開口数、ワーキングディスタンスなどの観点から、より高度な光学系の設計が求められ、SACLAの 50nm 集光では、2段にKBミラーを用いる集光光学系が実現され、回折限界の条件で利用が始まっている³⁾。一方、全反射型ゾーンプレート¹³⁾や回転楕円体ミラー¹⁴⁾など、次世代を見据えた新しい試みが実りつつある状況にある。全反射ゾーンプレートは具体的な開発が進み、ライン集光では 15nm が達成され、二次元集光素子の開発が始まっている。回転楕円体についても、回折限界での性能を目指し、特に軟X線領域を対象に開発が進んでいる。同様に水の窓領域などの軟X線光学素子には、これまでフレネルゾーンプレートや直入射ミラーが使われることが多かったが、新たに高反射率と高分解能を両立する斜入射多層膜ミラーが提案され、試作と評価が始まっている¹⁵⁾。結像光学系では、今でもフレネルゾーンプレート型レンズが主流であるが、色収差の問題が残っていた。この解決手段として、垂直水平方向にそれぞれ2枚の全反射ミラーを配置する光学系がいくつか開発され^{16,17)}、双曲面と楕円面で構成されたものについては 50nm の分解能でテストパターンの拡大結像が行われた。この種の光学系はAbbeの正弦条件がある程度満たされており、開口数で決まる分解能が期待できる視野が $10\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ に到達している。一方、望遠鏡の分野では、MEMS (micro electro mechanical systems) 技術を応用した集積型の結像ミラーが提案され、試作・性能評価の段階にある¹⁸⁾。また、次期太陽観測衛星SOLAR-Cを見据えた高分解能ウォルターミラーの開発が始まっている¹⁹⁾。

ビーム診断技術では、特にSACLAを対象に新たな試みがある。SACLAの集光では、集光ビーム位置のごくわずかな振動から、極小ビームの場合にはショットごとの評価が必要である。ターボ効果を利用した単一グレーティングのシアリング干渉計が実現され、SACLAの 50nm 集光ビームの波面計測が成功裡に行われている²⁰⁾。X線検出器では、高感度、高分解能、広いダイナミックレンジ、低ノイズ、高いフレームレートなどがキーワードとなるが、X線天文学のためのASTRO-HプロジェクトやX線自由電子レーザーSACLAのスペックル検出を動機に、X線イメージセンサーの高度化が進んでいる。ASTRO-Hプロジェクトでは、 80keV までのX線を空間分解能 $250\mu\text{m}$ 、エネルギー分解能 $1\sim 2\text{keV}$ で検出可能なデバイスが実現されて

いる²¹⁾。SACLA では、ピクセルサイズ $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 、エリアサイズ $51.2 \times 25.6 \text{mm}^2$ 、量子効率 20% (@12 keV) から 80% (@6 keV)、システムノイズ $200 \sim 300 \text{e}^{-1}$ のマルチポート CCD (charge coupled device) が開発され、この CCD を 8 枚組み合わせた検出系が稼働している。フレームレートは 1 秒間に 60 回であり、SACLA の繰り返し速度の最大値にすでに対応している。また、現状のピークシグナルの限界 ($2500 \sim 3000$ 光子/ピクセル @6 keV) を回避するために、マルチビア型 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) デバイス開発が、SOI (silicon on insulator) をベースに進められている²²⁾。

3.4 応用

X 線顕微鏡では、生物系のサンプルへの展開が幅広く進んでいる。ここでも SACLA は大きなブレイクスルーをもたらしている。SACLA による生物系サンプル観察の特徴は、CDI の際に放射線損傷が起こる前に回折データを取得できる点にある^{23,24)}。細胞を溶液セル内に封入することにより、SACLA を用いた CDI によって、初めて生きたままの細胞が観測された²⁴⁾。また、像回復アルゴリズムにおいてもいくつかの進展があり、マルチスライス法を用いることによって、背面波動場のみを回復するのではなく、厚みのあるサンプルを厚み方向に空間分解しながら像回復できることなどが示されている²⁵⁾。一方、プラズマ X 線源を用いる軟 X 線領域の結像型顕微鏡では、生物系サンプルにおいて空間分解能 100 nm、時間分解能 1 ns がすでに達成され、単なるデモンストレーションの段階を超えて、生命科学に有意な試料への応用展開が始まっている²⁶⁾。タルボ・ロー干渉計では、マルチライン埋め込み X 線源を直接光源格子とする研究が進んでおり、この特徴を生かした光学系の小型化が進んでいる²⁷⁾。トモグラフィーや蛍光 X 線顕微鏡、小角散乱イメージング、屈折イメージングなどの従来手法においても、定量化や実験室系システムの開発、高分解能化などを目指して、さまざまな検討が進んでいる²⁸⁻³¹⁾。可視光領域では、誘導ラマン散乱やコヒーレントラマン分光、光カー効果、二光子吸収といった非線形光学過程が広く応用されているが、X 線領域でも、SACLA の供用によって、これらの観察や応用が可能になるものと期待されている。昨年、SACLA の 50 nm 集光装置によって、X 線の二光子吸収が初めて観測されている³²⁾。

3.5 展望

X 線光学は SACLA の誕生によって、未踏であった X 線光学の領域が拓かれつつある。特に非線形光学の分野では、従来光源では全く観測できない現象が数多く観測されつつある。現在投稿中のものも多く、次年度には多くの成

果が発表されるものと期待できる。今後は、さらなる X 線の高強度化によって、固体密度で電子温度が 1000 万度を超えるプラズマの生成も可能と考えられており、高密度エネルギー科学の分野から注目を集めている。また、光学素子の進展も急速であり、SACLA のさらなる集光や次世代の高輝度光源を見据えた高機能光学系の開発も加速されるであろう。一方、EUV リソグラフィ光源や実験室系光源など、スタンドアロン型光源も大きな進歩が期待できる状況になっている。長年の地道な研究と開発の成果が大きく花開くフェーズに入りつつあるといえる。

文 献

- 1) T. Ishikawa *et al.*: Nat. Photonics, **6** (2012) 540.
- 2) H. Yumoto *et al.*: Nat. Photonics, **7** (2013) 43.
- 3) H. Mimura *et al.*: Nat. Commun., in press.
- 4) 砂原 淳他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-2.
- 5) 富田健太郎他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-1.
- 6) 佐々木明他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-3.
- 7) 砂原 淳他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-9.
- 8) 東口武史他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-10.
- 9) 東口武史他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-11.
- 10) 鶴籠照之他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-12.
- 11) 花本克己他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-4.
- 12) 岡本康平他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-9.
- 13) H. Takano *et al.*: *X-ray Imaging Optics* (2013) O-27.
- 14) 本山央人他: 日本放射光学会 (2013) 14P013.
- 15) 江島丈雄他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-7.
- 16) 鈴木芳生他: 日本放射光学会 (2013) 3C001.
- 17) 恵美陽治他: 日本放射光学会 (2013) 12P095.
- 18) 生田昌寛他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-11.
- 19) 木目歩美他: 日本放射光学会 (2014) 11P087.
- 20) 福井亮介他: 日本放射光学会 (2013) 3C002.
- 21) G. Sato *et al.*: *X-ray Imaging Optics* (2013) O-4.
- 22) T. Hatsui: *X-ray Imaging Optics* (2013) O-6.
- 23) 中迫雅由他: 日本放射光学会 (2013) 5C002.
- 24) T. Kimura *et al.*: Nat. Commun. (2013) 3052.
- 25) A. Suzuki *et al.*: Phys. Rev. Lett., **112** (2014) 053903.
- 26) 加道雅孝他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-16.
- 27) 森本直樹他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-1.
- 28) 渡辺紀生他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-15.
- 29) 橋爪惇起他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B1-14.
- 30) 金 歌他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-4.
- 31) 岡村賢一他: 秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-3.
- 32) K. Tamasaku *et al.*: Nat. Photonics, **8** (2014) 313.

4. 分 光

筑波大 加納英明

4.1 概 要

2013年9月に、イプシロンロケットから惑星分光観測衛星「ひさき」が打ち上げられた。「ひさき」には極端紫外線分光装置が搭載されており、2013年11月には極端紫外線における木星および金星の分光観測結果がプレスリリースされた¹⁾。今後、極端紫外線を用いた惑星の長期間観測ができるとのことで、大変楽しみである。このほか、「分光」というキーワードで、この一年で注目を集めたさまざまな興味深い研究が報告されたが、浅学な著者がそのすべてを紹介することは不可能であるので、本稿では2013年度春季応物講演会、OPJ 2013などの会議で発表された、分光に関連したトピックスを述べることにする。本稿のキーワードは、撮像素子のCCDにちなんで、C (CLARITY), C (chirality), D (dual comb) とした。

4.2 CLARITY

Chungらにより、画期的な脳イメージングの手法が報告された²⁾。その名もCLARITY。CLARITYとは、clear lipid-exchanged anatomically rigid imaging/immunostaining-compatible tissue hydrogelの略語であり、文字通り脳などの不透明な組織を透明化し、分光学の色づけを可能とする方法である。(Chungらは当初、clear lipid-exchanged acrylamide-hybridized rigid imaging / immunostaining / in situ hybridization-compatible tissue-hydrogelからCLARITYと名付けたが、その後、より包括的な定義がなされた²⁾。)

電気回路の複雑なネットワークシステムともいえる脳には、絶縁体としての脂質が多量に含まれており、これによる光散乱のために、脳深部の観察は困難である。これまで、近赤外の超短パルスレーザーを用いた多光子蛍光イメージングなどの方法が開発されてきたが、脳組織全体の可視化は、依然未開拓であった。

Chungらは、電気化学的方法により、脳の透明化を実現した。まず、脳組織を水溶性のアクリルアミドに浸す。浸潤後に重合反応を起こすことで、アクリルアミドのマトリクスができあがる。このとき、細胞内のたんぱく質や核酸等の重要な分子達が架橋され、それらの位置関係が固定される。その後、電気泳動により脂質のみを除去する。その結果、壊れやすい個々のニューロンの構造やネットワークが、原形を保ったまま保持される。この試料は、細胞膜もすでに失っているため、組織丸ごとの免疫染色が可能であり、その結果さまざまな色づけによる分光イメージングを行うことができるようになった。Chungによると、本

手法はさまざまな臓器に適用でき、腫瘍の成長過程の可視化も可能とのことである。組織丸ごとを分光学の対象とすることが、近い将来可能になるかもしれない。

4.3 キラリティー (Chirality)

分子キラリティーや、分子結晶および金属ナノ構造におけるキラリティーについて、新たな研究成果が報告された。

橋谷田らは、長方形金ナノ構造の近接場分光を行った³⁾。この構造は巨視的には光学活性を示さない(アキララ)形状であるにもかかわらず、近接場分光で見ると、長方形の角周辺において大きいCD活性が表れた。この信号はナノ構造全体を測定すると消失したため、局所的なキラリティーの発現であることが示された。興味深いのは、その信号強度である。一般的なキララ分子のものと比較すると1~3桁ほど大きいため、その機構の解明が今後待たれる。

また、磁性材料の非線形分光について、興味深い研究成果が大越らによって報告された⁴⁾。彼らは、新しく開発したその物質を、「キララ光磁石」と名付けている。この物質は、FeイオンとNbイオンがシアノ基(-CN-)によって三次元的に架橋されており、かつキララな結晶構造をもっている。この物質に473 nmおよび785 nmの光を交互に照射すると、磁石としての特性(磁化やヒステリシスなど)が異なる二状態(光磁石状態I, II)に、可逆的に転移させることができる。興味深いのは、この物質による第二高調波発生である。非線形光学結晶を用いた通常の第二高調波発生では、結晶の異方性により、入射する基本波に対して異なる偏光をもつ第二高調波が発生する。ところがこの物質では、キララ結晶構造に由来する成分(結晶項)と磁性スピンの由来する成分(磁性項)とのバランスにより、光磁石状態IおよびIIで、異なる偏光の第二高調波が発生する。具体的には、光磁石状態IIでは結晶項が主となるため、第二高調波の偏光は入射基本波のそれと垂直になる。一方、光磁石状態Iでは磁性項が主となるため、第二高調波の偏光は入射基本波のそれと同じになる。よく知られた磁気光学効果であるファラデー効果やカー効果などでは、一般に入射した直線偏光は楕円偏光に変換されるが、この研究結果では、楕円偏光になることなく、直線偏光の90度スイッチングが実現している。このような現象は、将来光記録デバイスや光センサー、光コンピューター、光通信技術などへの応用が考えられ、大変興味深い。

4.4 デュアルコム (Dual comb)

光コムは、おもに周波数の精密測定や精密分光などに用いられているが、近年、2台の光コムを用いたデュアルコム(dual comb)分光が、分光学のさまざまな分野に応用

されはじめている。デュアルコム分光法では、繰り返し周波数が $\Delta f_{\text{rep}} (= f_{\text{rep}} - f'_{\text{rep}})$ だけ異なる 2 台の光コム (f_{rep} , f'_{rep}) を同時に用いることで、それらの間のビート周波数を測定する。これにより、試料のもつ共鳴周波数 (光周波数) をビート周波数 Δf_{rep} でスケーリングできるため、光周波数領域のスペクトルをマイクロ波周波数領域のスペクトルへとダウンコンバートすることができる。

デュアルコム分光法では、測定可能な光周波数の帯域に、原理的な制限がつく。具体的には、2 台の光コムのどのモード間でビートを取るかを区別する必要があるため、 $n\Delta f_{\text{rep}} < f_{\text{rep}}/2$ (ただし n は測定可能なモード数) を満たす必要がある。そのため、 Δf_{rep} が小さいほど測定可能なモード数が増え、その結果光周波数の測定帯域が広がることになる。もちろん、 Δf_{rep} を無限に小さくすることはできず、 Δf_{rep} は光コムの櫛一つ一つの線幅よりも大きくとる必要がある。したがって、デュアルコム分光法で広帯域の測定を行うためには、光コムの線幅を十分細くすることが理想的である。大久保らは、2 つの光コムのあるモードを別のレーザー (波長 $1.5 \mu\text{m}$ の CW レーザー) に位相同期するなどして、2 つの光コム同士の相対的な線幅を狭窄化し、広帯域と高分解能を両立した近赤外デュアルコム分光システムの開発を報告した⁵⁾。

デュアルコム分光のさまざまな周波数領域への応用についても、いくつかの報告が行われた。林らは、デュアル・テラヘルツコムを用いることで、周波数が変動している CW-テラヘルツ波の絶対周波数の計測をリアルタイムで行った⁶⁾。

デュアルコム分光のホットなトピックとして、非線形分光に応用した研究が、Hänsch らのグループにより報告された。Ideguchi らは、非線形ラマン過程のひとつであるコヒーレント・アンチストークス・ラマン散乱 (coherent anti-Stokes Raman scattering; CARS) を用いた分光イメージングへと、デュアルコム分光を応用した⁷⁾。マイクロメートルスケールのマルチセルにさまざまな分子液体を満たした試料を用意し、デュアル光コムのレーザー光を照射することで、 $200 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$ における CARS スペクトルを得ながら試料のイメージを取得した。高速なスペクトル取得レート ($12 \mu\text{s}/\text{ピクセル}$) で、“分子の指紋”である CARS スペクトルおよび CARS 分光イメージの取得に成功している。

4.6 展 望

以上のように、新しい研究領域との融合・組み合わせを予感させるさまざまな研究結果が、2013 年も数多く報告された。2014 年も、ミクロおよびマクロなさまざまな系へ

の分光法のユニークな応用・展開が報告されるに違いない、これから大変楽しみである。

文 献

- 1) JAXA プレスリリース: http://www.jaxa.jp/projects/sat/sprint_a/index_j.html
- 2) K. Chung *et al.*: Nature, **497** (2013) 332.
- 3) 橋谷田俊他: *OPJ* (2013) 13aC5.
- 4) S. Ohkoshi *et al.*: Nat. Photonics, **8** (2013) 65.
- 5) 大久保章他: 春季応物講演会 (2013) 19p-A3-2.
- 6) 林 建太他: *OPJ* (2013) 13aB2.
- 7) T. Ideguchi *et al.*: Nature, **502** (2013) 355.

5. レーザー

東京工業大 小山二三夫
千葉大 尾松 孝茂

5.1 半導体レーザー

5.1.1 概要

半導体レーザーは、情報技術 (IT) の社会基盤を支える光通信ネットワーク、ストレージ、各種センサーを構成する中核光デバイスとして研究開発が精力的に展開され、わが国は、その黎明期から常にこの分野を先導してきた。横モード制御、低雑音化、低閾値化、高信頼化、動作波長帯域の拡大、可視光レーザー、動的単一モードレーザー、波長制御、集積化技術、量子井戸レーザー、高速変調動作、面発光レーザー、高出力化、青色半導体レーザーなど、次々と新しい技術課題が創出・開拓され、革新的な発展をもたらしてきた。

半導体レーザーの市場規模としては、レーザー全体で約 8,000 億円強のうち、その 50% を占め、その大半が、光通信システム、光ストレージ応用である (約 4,000 億円)¹⁾。成長分野としては、スマートフォン普及に伴う通信ネットワークや、データセンターに向けた 100 G / 400 G イーサネット、アクティブケーブル用光源である。光ディスク応用はすでにピークを迎えつつあるが、4K 高精細テレビの普及を視野に入れた新しい規格の光ストレージ開発が進められ、ハードディスクの大容量化を可能にする熱アシスト磁気記録方式応用の半導体レーザーの開発が進められている。

2013 年は、長距離光通信システムを可能にした動的単一モード半導体レーザーが誕生してから 40 周年として、International Symposium for the 40th Anniversary of Single-mode Semiconductor Lasers が東京で開催された²⁾。動的単一モード半導体レーザーに関する研究経緯は、文献 3) でその詳細がまとめられている。また、東京工業大学末松安晴博士が、「大容量長距離光ファイバー通信用半導体

レーザーの先導的研究」により、インターネットをはじめとする情報ネットワークを支える大容量長距離光ファイバー通信に道を拓いた功績が認められ、2014年、日本国際賞の受賞に至った⁴⁾。

最近では、データセンター内のトラフィック量はすでに光通信ネットワーク網の全トラフィック量を凌駕しており、急速に増大している。そこで用いられる小型・低消費電力・高速半導体レーザーの開発が、世界的に精力的に進められている。そのほか、高出力半導体レーザーによる小型・高効率レーザー加工機、レーザーマウスを発展させた各種光センサー、緑色半導体レーザーの実用化によって、小型の三原色レーザーによる携帯端末に搭載可能なプロジェクションディスプレイ、Google Glassなどの発展も期待されている。また、将来の照明の高効率化のため、青色・紫外半導体レーザー励起による白色照明なども、低炭素社会実現に向けて重要な技術開拓分野である。

次に、いくつかの技術分野の動向を紹介する。誌面の都合上、一部のトピックスの紹介にとどまることをご容赦願いたい。

5.1.2 面発光レーザー

面発光レーザーは、東京工業大学伊賀健一博士の発明から36年を迎えた。2013年4月には、米国で最も権威のあるフランクリン賞を伊賀博士が受賞するなど、この分野のわが国の貢献が世界的に認められた⁵⁾。面発光半導体レーザーは、特に短距離ネットワークでの主要光源としての地位を確立している⁶⁾。最近では、特にスーパーコンピューターやデータセンターでは膨大な数の光配線導入が必須であり、低消費電力動作を可能とする面発光レーザーが主役となっている。40 Gb/sを超える高速直接変調動作、1 bitあたりの消費電力として100 fJ以下などの低消費電力動作など、将来の低消費電力インターコネクタのための革新的な開発が進められた。850 nm帯の面発光レーザーでは、世界最速の47 Gb/s動作が報告され⁷⁾、さらに、ドライバ回路にプリアンプの波形等価回路を導入することで、64 Gb/s、75 mの多モード光ファイバー伝送が報告されるに至っている⁸⁾。一方、結合共振器を用いて大幅に変調帯域が拡大される手法が提案され、980 nm帯面発光レーザーでは世界最速の>29 GHzの3 dB変調帯域、38 Gb/sの変調動作が報告された^{9,10)}。また、光変調器をモノリシックに集積した面発光レーザーも報告された¹¹⁾。

MEMSによるミラーを可動にすることで、広帯域での連続波長掃が可能になり、OCT (optical coherence tomography) などの生体観測用途で大きな注目を浴びている。1060 nm、1300 nmの波長帯域で100 nmに及ぶ広帯域連続

波長掃引が実現され、高精度でかつ数cmから数mまでの深度の測定を可能にした大きなダイナミックレンジのOCTが報告されている¹²⁾。また、温度変化に対して絶対波長を安定化しつつ、波長可変動作も同時に可能とするアサermal波長可変動作も可能となっている¹³⁾。さらに、面発光レーザーを形成する多層膜反射鏡構造を用いたスローライト伝搬を活用することで、数十 μm の超小型の光スイッチ、ビーム偏向器、ボルテックスビーム生成などの新機能素子の実証も行われている^{14,15)}。

5.1.3 高速イーサネット用光源

イーサネットは、データセンター内にあるサーバー、ストレージを結ぶ規格であるが、データセンター内のトラフィックの急拡大を背景として、100 Gb / 400 Gb トランシーバーの開発が活況を得ている。今後、多くの情報機器に利用されることや、ラック間からボード間、チップ間、チップ内へ順次浸透していくことが予測されている。

4波長 \times 25 Gb/s直接変調DFBレーザーアレイ¹⁶⁾、4波長 \times 25 Gb/s吸収型光変調器集積光源アレイ¹⁷⁾などの開発が進んでいる。また、最近の新たな方向性としては、10 Gb/sなどの低速光源を用いて、電気回路で1000チャンネルに及ぶサブキャリアを発生し、100 Gb/sを実現する手法も報告されている¹⁸⁾。

5.1.4 微小共振器レーザー・シリコン上レーザー

電子回路のオンチップ光配線を実現するためには、発光受光素子の飛躍的な低消費電力化や小型化が求められている。波長サイズの埋め込み型フォトニック結晶レーザーで、4.8 mAの世界最低閾値動作、10 Gb/s変調で4.4 fJ/bitの低消費電力動作が報告されている¹⁹⁾。また、オンチップ光配線に向けたシリコン基板上の半導体レーザーを目指した量子ドット半導体レーザーの高温動作の報告もなされている²⁰⁾。

5.1.5 可視光半導体レーザー

緑色半導体レーザーの実用化によって、小型の三原色レーザーによる携帯端末に搭載可能なプロジェクションディスプレイなどの発展も期待されている。緑色発光を可能にする半導体材料は、窒化ガリウムと窒化インジウムの混晶から成るInGaNであり、In組成の増加に伴い、紫色、青色、緑色のように発光色が長波長側に变化する。緑色については直接発光のレーザー発振が困難であったgreen gapの問題が、GaN基板の開発などを通して克服されつつある。単一横モードの緑色半導体レーザーで200 mWの高出力が報告されるようになった。また、青色の半導体レーザーでは、3 Wもの出力が得られている²¹⁾。

(小山二三夫)

5.2 半導体レーザー以外のレーザー

5.2.1 概要

20世紀の終わり頃からファイバーレーザーの高出力・高性能化が目覚ましく、コヒーレントビーム結合をはじめとする極限的な高出力化技術が進展してきている。

一方、固体レーザー研究は、ファイバーレーザーが得意な可視や中赤外の特殊波長で発振するレーザー、太陽光などの特殊な励起光源で発振するレーザー、光渦をはじめとする特殊波面レーザーなどの高機能化が進み、ファイバーレーザーとの棲み分けをしている。

2013年には、Optics and Photonics International Congress 2013 (横浜)、米国光学学会が主催する3回のCLEO (サンノゼ)、CLEO-Europe (ミュンヘン)、CLEO-PR (京都)、そしてASSL (パリ) など、レーザー研究に関する数多くの国際会議が国内外で開催された。

本稿では、これらの国際会議で紹介された研究報告を中心に、国内外におけるレーザー研究の最近の動向について紹介する。

5.2.2 ファイバーレーザー・導波路レーザー

ファイバーレーザー研究ではCW光の高出力化は一段落つき、フェムト秒・ピコ秒などの超短パルスレーザー光の高出力化が研究の中心になってきている。その中心となる技術が、ファイバーレーザー間のコヒーレント結合を用いた高出力化技術である。4台のチャープパルスファイバー増幅器からの出力光をピエゾミラーで同期、コヒーレント結合して530 W, 1.5 mJ, 670 fsの高強度ファイバーレーザーシステムが提案された²²⁾。ピークパワーはギガワットを超える。このほか、Cr:YAG結晶の飽和吸収を位相同期素子に用いたQスイッチマルチコアファイバーレーザーなどのコヒーレント同期も提案されている²³⁾。このように、ファイバー端面での光損傷によるパルスエネルギーの上限を簡単に凌駕するコヒーレント同期技術は、今後の高出力・高エネルギーファイバーレーザーの潮流となるであろう。

マイクロチップ固体レーザーや半導体レーザーなど、小型全固体短パルスレーザーとファイバー増幅器を組み合わせたハイブリッド型レーザーも開発されている。具体的には、Nd:YVO₄と半導体過飽和吸収ミラー (SESAM) を組み合わせた受動Qスイッチレーザーから発生した90 psの光パルスをマスターレーザー光として、ファイバー増幅器内の自己位相変調でスペクトルを広げた後、パルス圧縮することで170 fsの超短パルス (波長1030 nm) を発生させる方法が提案された²⁴⁾。1064 nm半導体レーザーを100 ps～2 nsのパルス幅でパルス駆動して、マスターレーザー光と

して使用し、ラージモードエリアファイバー増幅器で増幅するシステムも提案されている²⁵⁾。平均出力で50 Wに達するこのレーザーは波長変換用光源としても利用可能で、355 nmの3倍波で20 Wのレーザー出力を達成している。

このほか、ZBLANより耐水性の高いフッ化物系ファイバーレーザーによるPr³⁺の可視マルチライン発振²⁶⁾など、機能性豊かなファイバーレーザーも開発されている。

導波路レーザーに目を移すと、Tm³⁺ドープの2 μm KY_{0.4}Gd_{0.29}Lu_{0.23}Tm_{0.08}(WO₄)₂導波路レーザーが開発され、80%を超えるスローブ効率 (励起レーザー [波長794 nm]、最大出力1.6 W) が達成された²⁷⁾。国内では、レーザーディスプレイ用に543 nmレーザーが開発されている²⁸⁾。Nd:YVO₄とPPSLTを一体化したマルチチャネル導波路レーザーで、レーザー出力は5 Wを超える。

5.2.3 固体レーザー

窒化物半導体レーザーの高出力化に伴い、これまで固体レーザーが直接発振しなかった可視域で発振するレーザー開発が活性化している。その代表がPr³⁺系レーザーである。Pr³⁺はグリーン、オレンジ、赤で発振することがすでに知られているが、Pr³⁺:BaY₂F₈結晶を使って三準位系となる491 nm (シアン) 線が連続発振した²⁹⁾。励起光源にInGaN半導体レーザー (レーザー最大出力1 W, 波長445 nm) を用いて、レーザー出力44 mW, スローブ効率11%が達成されている。Pr³⁺系レーザーはフッ化物結晶あるいはガラスを宿主材料とするものが多かったが、宿主材料の熱特性の悪さがレーザー出力向上を阻害する大きな要因であった。そこで、より熱特性のよいPr³⁺, Mg:CaAl₁₂O₁₉ (Pr, Mg:CAIO) 結晶が提案され、パワースケーリングに期待がかかる³⁰⁾。このほか、Pr³⁺:YLFレーザーの受動Qスイッチ動作に関する研究も進んでいる³¹⁾。これまで、可視レーザーのほとんどが第二高調波発生をはじめとする非線形波長変換であったが、部品点数の少ないPr³⁺レーザーはシステムコストの削減や小型化に有利であり、実用に向けた研究が加速するであろう。

また、窒化物半導体レーザーの高出力化・高輝度化は、超短パルスレーザーの代表であるチタンサファイアレーザーの半導体レーザー励起を可能にした。SESAMやカーレンズを用いたモードロック発振が観測されている³²⁾。

中赤外レーザーでは、Tm³⁺:YAG (1.9 μm), Ho³⁺:YAG (2.1 μm), Cr²⁺:ZnSe (もしくはCr²⁺:ZnS) (2.0～2.5 μm) が報告されている。中でも、Cr²⁺系レーザー結晶は大きな誘導放出断面積と広い利得帯域を示すため、超短パルス光発生が活性化している。中赤外域で動作する過飽和吸収素子がなかったが、単層 (あるいは複数層) グラフェンが飽

和吸収素子として機能することがわかり、研究が一気に加速した。Cr:ZnS とグラフェンを組み合わせ、パルス幅 44 fs (5.5 サイクル) の超短パルス光が、平均パワー 112 mW, PRF 250 MHz で発振した³³⁾。中赤外の超短パルスレーザーは高次高調波発生をはじめさまざまな応用が期待されているので、今後の展開が興味深い。2 μm より長波長域で発振するレーザーは ZnGeP₂ をはじめとする非線形光学結晶を用いた光パラメトリック発振器、あるいは、差周波光発生が主流であるが、Dy³⁺:ZBLAN レーザーのように 4.5 μm で発振する固体レーザーも研究されている³⁴⁾。

分子集合体 (分子クラスター) の固有モードが含まれるテラヘルツ波帯に比べ、個々の分子の振動・回転モードが数多く含まれる中赤外域 (2~10 μm) は、テラヘルツ波とは異なる分子分光 (例えば、分子振動のコヒーレント制御) が潜在的に可能である。今回、パリで開催された ASSL では、Mid-Infrared Coherent Sources (MICS) が併設され、この波長域でのレーザー研究の活性化が予想される。

おもに国内に限定されるが、次世代クリーンエネルギーのひとつとして、太陽光励起レーザーの研究開発も着実に進んでいる。すでに 100 W を超えるレーザー発振が観測されているが、レーザー発振効率を向上させるための結晶育成が検討されている。これまで主として Cr, Nd イオンを共添加した YAG 結晶が一般に使用されているが、紫外—可視光に対する吸収率が YAG に比べ 70 倍近く高い Cr, Nd:YVO₄ 結晶の開発が報告された³⁵⁾。同結晶は浮遊帯融解法 (フローティングゾーン法) で育成できるため、良質な結晶が短期間で育成できる。具体的なレーザー発振のデータは公開されていないが、高効率なレーザー発振が期待できる材料として興味深い。

5.2.4 光渦レーザー

レーザーアブレーション加工³⁶⁾、空間多重光通信³⁷⁾ など、具体的な応用研究が加速している光渦 (位相特異点を有する光波) を共振器固有モードとしてレーザー発振させる研究が活性化している。これまで、光渦は空間変調器やホログラム素子などの波面変調素子を用いて発生させるのが主流であったが、レーザー共振器から直接発振できれば、その応用範囲も格段に広がる。

レーザー共振器から光渦を発生させる方法のひとつとして、共振器の出力鏡に微小な欠陥を設けてガウスビームの発振を抑制する方法がある。この手法を自己誘導ラマンレーザーに適用することで、1.06 μm の基本波と 1.17 μm のストークス光の 2 波長が同時に光渦として発振するレーザーが開発された³⁸⁾。第二高調波発生を行えば、STED

(stimulated emission depletion) 顕微鏡をはじめとする超解像顕微鏡などへ応用が可能である。

一般に、共振器の対称性から、時計回りあるいは反時計回りの光渦を選択的に発振させることは難しい。そこで、単に光渦モードを発振させるだけでなく、光渦の螺旋波面の回転方向 (ヘリシティー) を制御する研究が進められている。

励起光をキャピラリーファイバーによって円環ビームに変換して、ドーナツ型強度分布を有する光渦を選択的に共振器モードとして発振させると同時に、共振器内に 2 本のアルミニウム細線を蒸着した窓を挿入することで共振器の対称性を崩し、光渦のヘリシティーを選択的に制御できる³⁹⁾。この方法を用いると、Nd:YAG レーザーから 1.07 W (3.5 W 励起) の光渦を発振できる。また、エタロンとブリュスター窓を用いてヘリシティーを制御することも可能である⁴⁰⁾。

側面励起型バナデートレーザーでは、熱レンズ効果をガウスモード抑制のための空間フィルターとして用いることで、光渦を選択的に発振できる。このレーザーにおける励起光集光光学系を共振器光軸に対してわずかに傾けることによって共振器の対称性を崩し、選択的にヘリシティーが制御できることが報告された⁴¹⁾。レーザー出力は CW 動作で 10 W、Q スイッチ動作でも 8~9 W のレーザー出力が容易に取り出せる。

さらに 1 μm 光渦レーザーを励起光源とし、KTP (KTiOPO₄) を配置した光パラメトリック発振器からなる 2 μm 帯光渦レーザーが提案されている。パルスエネルギーはシグナル光、アイドラー光を 4 mJ を超えている。この発振器では、励起光の 1 μm 光渦のヘリシティーに連動して 2 μm 光のヘリシティーが制御できることがわかった⁴²⁾。通常、レーザー共振器では励起光とは位相の相関のない自然放出光からレーザーモードが成立するため、励起光のヘリシティーと共振器モードのヘリシティーには相関がない。この 2 μm レーザーのヘリシティー制御はレーザー物理として興味深い。

このほか、コンフォーカル系共振器において発振する複数の空間モード間の位相を同期させた光リサージュレーザー⁴³⁾ や、インス・ガウシアンモードを発振するレーザー⁴⁴⁾ などが提案された。

5.2.5 まとめ

半導体レーザーを除く固体レーザーに関する国内の研究動向を中心に、国際会議などで発表された内容も加えて最近の動向を紹介した。今回は、ファイバーレーザーに関しては主として高出力化、固体レーザーに関しては高機能化

を中心に紹介したが、このほか、異方性結晶のセラミック化技術、無秩序系レーザー結晶の開発、さらには異種材料の常温接合技術などのレーザー周辺技術も順調に研究が進展している。今後のレーザー開発は、単純なレーザーパラメーター（出力、パルス幅、波長など）の極限化だけではなく、ユーザーの要求に合わせたレーザー性能のカスタマイズが重要となってくるであろう。今後の研究動向が見逃せない。（尾松孝茂）

文 献

- 1) G. Overton *et al.*: Laser Focus World, Jan. 28 (2013).
- 2) <http://vcsel-www.pi.titech.ac.jp/2012symposium/> (2012).
- 3) Y. Suematsu: J. Lightwave Technol., **32** (2014) 1144.
- 4) 国際科学技術財団 2014 年日本国際賞 http://www.japanprize.jp/press_releases20140129.html
- 5) Franklin Institute Awards, Bower Award and Prize for Achievement Science, <http://www.fi.edu/franklinawards/13/bowersci.html>
- 6) F. Koyama: J. Lightwave Technol., **24** (2006) 4502.
- 7) S. Gustavsson *et al.*: OFC (2013) OTh4H.4.
- 8) D. M. Kuchta *et al.*: OFC (2013) OW1B.5.
- 9) H. Dalir *et al.*: Appl. Phys. Lett., **103** (2013) 091109.
- 10) H. Dalir *et al.*: Appl. Phys. Express, **7** (2014) 022102.
- 11) T. Shimada *et al.*: Appl. Phys. Express, **6** (2013) 122102.
- 12) I. Grulkowski *et al.*: Optics Lett., **38** (2013) 673.
- 13) M. Nakahama *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **53** (2013) 010303.
- 14) T. Shimada *et al.*: EICE Electronics Express, **10**, No. 22 (2013) 1.
- 15) S. Mochizuki *et al.*: Appl. Phys. Express, **7** (2014) 022502.
- 16) W. Kobayashi *et al.*: OECC (2013) MK1-1.
- 17) T. Murao *et al.*: OFC (2013) OTh4H.2.
- 18) M. Nishihara *et al.*: Photonics West (2013) 900804.
- 19) K. Takeda *et al.*: Nat. Photonics, **7** (2013) 569.
- 20) K. Tanabe *et al.*: Appl. Phys. Express, **6** (2013) 082703.
- 21) G. Bruederl: CLEO-PR (2013) SA1-2.
- 22) A. Klenke *et al.*: ASSL (2013) AW2A.6.
- 23) 佐藤慶吾他：秋季応物講演会 (2013) 19a-A14-3.
- 24) R. Lehneis: ASSL (2013) ATu1A.3.
- 25) 上場康弘他：秋季応物講演会 (2013) 19a-A14-4.
- 26) 中西 淳他：秋季応物講演会 (2013) 19a-A14-6.
- 27) K. van Dalen *et al.*: ASSL (2013) ATu1A.8.
- 28) 正田史生他：春季応物講演会 (2013) 29p-C1-5.
- 29) P. W. Metz *et al.*: ASSL (2013) AF2A.7.
- 30) F. Reichert *et al.*: ASSL (2013) AW1A.9.
- 31) 舛田賢輔他：春季応物講演会 (2013) 29p-C1-14.
- 32) 澤井翔太他：春季応物講演会 (2013) 29p-C1-12.
- 33) E. Sorokin *et al.*: ASSL (2013) AF1A.3.
- 34) S. R. Quimby *et al.*: ASSL (2013) AM2A.7.
- 35) 小川貴代他：レーザー学会年次大会 (2014) 21aIV-6.
- 36) K. Toyoda *et al.*: Phys. Rev. Lett., **110** (2013) 143603.
- 37) N. Bozinovic *et al.*: Science, **340** (2013) 1545.
- 38) A. J. Lee *et al.*: Opt. Express, **21** (2013) 12401.
- 39) D. Lin *et al.*: CLEO Europe (2013) CA-10-2.
- 40) D. J. Kim *et al.*: Opt. Express, **21** (2013) 29449-29454.
- 41) M. Sato *et al.*: CLEO Europe (2013) CA-10-1.
- 42) T. Yusufu *et al.*: CLEO-PR (2013) MA2-4.
- 43) Y. F. Chen: CLEO-PR (2013) MA2-1.
- 44) J. Dong *et al.*: CLEO-PR (2013) MA2-2.

6. 量子光学・非線形光学

東京大 近藤高志

6.1 概 要

2010 年のレーザー 50 周年、2011 年の非線形光学 50 周年、2012 年の半導体レーザー 50 周年と続いたイベントが一段落し、2013 年は定常運転モードに戻った。誕生から 50 年を超え、非線形光学は今や、レーザーや半導体レーザーと同様、ほぼ完全に成熟した技術となりつつあり、量子光学を含めたあらゆる光科学・光工学に欠かすことのできない基礎コンポーネントとなったとあってよいのではないだろうか。それでも、材料やデバイスに関する新たな基礎的検討は引き続き進展している。また、量子光学や非線形光学関連の応用に関しては、各分野で多くの革新が続いている。本稿では、2013 年の動向を応用物理学会での発表を中心にまとめる。

6.2 波長変換関連技術

新しい非線形光学材料の開発や新規波長変換デバイスの報告は激減した。これは、LiNbO₃ や KTP, BBO といった既存の材料を用いた波長変換デバイスがそれなりの性能を発揮しており、多くの研究者がこれらの既存デバイスの存在を前提に応用を検討しているからであろう。

その中でも、2 次の非線形光学効果を利用する従来型の波長変換デバイスについてはいくつかの材料系で着実な進展がみられた。PPLN (periodically-poled lithium niobate) 関連では、接合技術などを巧みに用いて高屈折率差導波路を作製して高効率化を目指す研究が進められた^{1,2)}。また、BBO についても、接合法によって作製した周期分極反転バルクデバイスでウォークオフを高効率化・高ビーム品質化するアプローチが報告された³⁾。接合法を用いた作製法を採用した波長変換デバイスとしては、AlGaAs 高次モード位相整合導波路の報告もあった⁴⁾。AlGaAs 疑似位相整合 (QPM) デバイスにも着実に進歩がみられ、結晶成長法の最適化による低損失化の報告がなされた⁵⁾。そのほか、紫外域波長変換をめざした QPM 水晶の研究も続けられている⁶⁾。また、これまでにみられなかった新しいアプローチとしては、フォトリソニック結晶ナノキャビティー量子ドットレーザーでの自己波長変換が報告された^{7,8)}。高 Q 値ナノキャビティーによる高効率化が実現できる点でユニークなアプローチである。(Al)GaAs(100) の 4 回回反対称性を利用した QPM マイクロディスク⁹⁾ や GaP(111) の 3 回対称性を利用したテラヘルツベクトルビーム生成などの新しいアプローチも、少しずつだが出てきている。後者を巧みに利用したテラヘルツ波のベクトル波形を自在に制御

する技術¹⁰⁾が新しく提案されており、注目される。

高次の非線形性を利用した波長変換に関しても、いくつかの重要な成果が報告された。キセノンガスでの高次高調波発生を用いた極端紫外高強度アト秒パルスレーザー（光子エネルギー 30 eV, パルス幅 500 as, 尖頭出力 2.6 GW）がテーブルトップサイズで実現された¹¹⁾。これは各種の分光等の基礎研究に大きなインパクトを与える可能性がある。一方、赤外域でも、窒素ガスでの四光波混合を利用した中赤外サブモノサイクルパルスの発生技術に格段の進歩がみられた¹²⁾。また、シリコンフォトニクス分野からも注目すべき報告がいくつかなされた。代表的なものとして、フォトニック結晶結合共振器光導波路における自発四光波混合による光子対生成¹³⁾とナノキャビティラマンレーザー^{14,15)}を挙げておこう。前者はスローライト効果によって光子対生成効率を格段に増強することに成功しており、後者はナノキャビティへの強い光閉じ込めを利用して素子の超小型化と低閾値化を実現している。いずれもフォトニック結晶の利点を非線形光学現象の増強に活用した好例といえる。

6.3 情報処理、分光等への応用

電気光学効果を用いた新しいタイプのデバイスとして、狭ギャップをもうけたマイクロストリップパッチアンテナと low- k 誘電体基板上の電気光学結晶光導波路を用いた高性能ミリ波-光波変換素子が提案され¹⁶⁾、実験的なデモンストレーションが行われた¹⁷⁾。光スイッチに関する研究では、InGaAsP フォトニック結晶ナノキャビティにおけるキャリア非線形効果を利用したデバイスが目まぐるしく進められている。

量子情報分野では、国内から相次いで重要な成果が発表された。光波テレポーテーション技術を光量子ビットに適用するハイブリッド方式を採用することによって実現された光量子ビットの決定論的量子テレポーテーション¹⁹⁾、時間領域での多重化手法による量子もつれ状態生成の大規模化²⁰⁾、シュレーディンガーの猫（量子変数重ね合わせ）状態を用いる光信号の遠隔増幅・再生技術²¹⁾などが代表的である。半導体微小共振器量子井戸中の励起子ポラリトン凝集状態の非線形性を利用した非ガウシアン光発生法の提案²²⁾や、不確定性関係に関する小澤の不等式についての量子光学実験での明瞭な検証²³⁾も注目すべき成果である。量子もつれ状態のまったく異なる応用として、量子もつれ顕微鏡²⁴⁾も挙げておこう。これは、共焦点微分干渉顕微鏡の光源にもつれ光子を用いることで、SN 比の量子限界を超えることを可能としたもので、大変ユニークな提

案である。

前項で述べた赤外コヒーレント光源も含めて、レーザー光源のパルス波形整形や位相制御技術の進展が著しく、新しい高性能光源や新規光検出法を用いた分光や分子振動制御の研究が活発に行われている。気体を非線形媒質として使用したチャープパルス上方変換による高速赤外分光²⁵⁾や整形中赤外パルスによる分子振動のコヒーレント制御²⁶⁾、アンチストークスラマン散乱を利用した中赤外光による 6H-SiC フォノンの選択的励起²⁷⁾、直交した偏光の 2 つのポンパルスレーザー光を用いたポンプ・プローブ分光によるビスマス単結晶のコヒーレントフォノン制御とその可視化²⁸⁾など、多くの成果が発表された。また、可視光短パルスのキャリア・エンベロープ位相も決定できる新しい周波数分解光ゲート (FROG) 法^{29,30)}は、今後高速分光など広い分野で活用されることになるかもしれない。

6.4 展 望

量子光学、非線形光学のさまざまな技術は進歩を続けており、今後も情報処理、通信、分光、物質制御などの分野で重要な役割を果たしていくことは間違いない。しかしながら、本稿をまとめるにあたり文献調査をしていて、量子情報や分光の重要な研究成果の多くが光学会や応用物理学会の講演会では発表されていないことに気づいた。光学と物理の基礎から応用にわたる広範な分野を包括して議論できることが両学会の存在意義であるはずなのに、気になる点である。

今回の動向調査にあたり、北海道大の森田隆二氏、東京農工大の芦原聡氏、東京大の岩本敏氏にご協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- 1) 田中圭祐他：春季応物講演会 (2013) 29a-B3-1.
- 2) 藤本拓也他：秋季応物講演会 (2013) 19p-A8-6.
- 3) 恩田友美他：OPJ (2013) 13pC2.
- 4) 中村勇貴他：秋季応物講演会 (2013) 19p-A8-4.
- 5) 吉田成輝他：春季応物講演会 (2013) 28p-B3-8.
- 6) 原田昌樹他：春季応物講演会 (2013) 28p-B3-3.
- 7) Y. Ota *et al.*: Opt. Express, **21** (2013) 19778.
- 8) 太田泰友他：春季応物講演会 (2013) 28a-C1-2.
- 9) S. Mariani *et al.*: Opt. Lett., **38** (2013) 3965.
- 10) M. Sato *et al.*: Nat. Photonics, **7** (2013) 724.
- 11) E. J. Takahashi *et al.*: Nat. Commun., **4** (2013) 2691.
- 12) T. Fuji *et al.*: Appl. Sci., **3** (2013) 122.
- 13) 松田信幸他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P13-4.
- 14) Y. Takahashi *et al.*: Nature, **498** (2013) 470.
- 15) 乾 善貴他：秋季応物講演会 (2013) 18a-A3-6.
- 16) Y. N. Wijayanto 他：春季応物講演会 (2013) 29a-B3-6.
- 17) Y. N. Wijayanto 他：秋季応物講演会 (2013) 19p-A8-1.
- 18) 野崎謙悟他：秋季応物講演会 (2013) 18p-A3-5.
- 19) S. Takeda *et al.*: Nature, **500** (2013) 315.
- 20) S. Yokoyama *et al.*: Nat. Photonics, **7** (2013) 982.

- 21) J. S. Neergaard-Nielsen *et al.*: Nature Photonics, **7** (2013) 439.
- 22) T. Byrnes *et al.*: Phys. Rev. B, **87** (2013) 201301 (R).
- 23) S.-Y. Baek *et al.*: Sci. Rep., **3** (2013) 2221.
- 24) T. Ono *et al.*: Nat. Commun., **4** (2013) 2426.
- 25) 藤 貴夫他：秋季応物講演会 (2013) 19a-A3-7.
- 26) 田山純平他：秋季応物講演会 (2013) 20a-A3-8.
- 27) K. Yoshida *et al.*: Appl. Phys. Lett., **103** (2013) 182103.
- 28) H. Katsuki *et al.*: Nat. Commun., **4** (2013) 2801.
- 29) 藤 貴夫他：秋季応物講演会 (2013) 19a-A3-6.
- 30) Y. Nomura *et al.*: Nat. Commun., **4** (2013) 2820.

7. 近接場光学

早稲田大 井村考平

7.1 概要

当該分野は、1990年代初頭の超解像光学顕微鏡の開発に端を発し、市販の近接場光学顕微鏡の利用が可能となったのを契機に、研究対象やその研究領域を急速に拡大させている。当該分野で中心的な役割を果たすのは、波長サイズ以下の開口や物質表面に局在する近接場光である。この近接場光は、伝搬光では実現できない物質特性を誘起できることから、化学反応、デバイス、加工、情報処理など、多様な用途において高い利用価値が見いだされている。このような背景のもと、当該分野は、現在、近接場光が関与するすべての現象を対象とし、幅広い分野において基礎および応用研究が展開されている。

2013年の当該分野の主な研究成果は、ナノフォトニクスシンポジウム、春季および秋季の応物講演会、OPJなどで報告された。ナノフォトニクスシンポジウムは、「ナノフォトニクスにおける複雑性・多様性と機能」を主題として慶応大学において開催された。シンポジウムは4つのセッションから構成され、既存の物質機能をいかにナノ光電子系に取り込み高機能化に繋げることができるかが議論された。OPJ また春季および秋季応物講演会では、合計で140件の発表があった。2013年度も近接場光応用、顕微鏡開発、プラズモンに関する研究成果が多数報告された。本稿では、春季および秋季応物講演会での発表を中心に今年度の研究動向を概観する。

7.2 近接場光学顕微鏡

回折限界を超える超解像が定常的に得られるようになってから20年を経過するが、空間分解能の向上や新方式の顕微鏡の開発は、近接場光学において引き続き重要な課題である。2013年度も顕微分光手法に関する発表がいくつか報告された。空間分解能の向上に関しては、プラズモン励起カーボンナノチューブ (CNT) プローブを利用したシングルナノ空間分解能の実現¹⁾や、シリコン探針に生じる表面起電力の力検出を利用した原子分解能の実現²⁾が

報告された。散乱型近接場光学顕微鏡では、磁性体の磁区観察が可能な偏光顕微鏡の開発³⁾や赤外域での非線形分光計測⁴⁾が報告された。一方、開口型近接場光学顕微鏡では、円二色性 (CD) の測定が可能な顕微鏡が開発され、アキラルな金ナノ構造体における局所光学活性が報告された⁵⁾。これ以外に、相変化マスクを利用した顕微分光装置の高分解能化の取り組みが報告された⁶⁾。以上の通り、近接場光学顕微鏡はその開発から20数年を経ているが、現在でも空間分解能の向上と種々の分光手法との組み合わせが継続的に進められている。このことはナノ分光観察手法として依然多様なニーズがあることを裏付けている。今後のさらなる発展が期待される。

7.3 プラズモン

ここ数年プラズモン関連の発表件数が急速に増加しているが、今年度の応用物理学会でも同様であった。発表内容は、プラズモンの基礎から応用を目指した研究まで広範囲であった。プラズモンの線形光学特性はおおむね理解されていることから、基礎研究のトレンドとしては、従来法では理解が困難な特性、例えば、多重極励起、動的過程、非線形性などで、全体としてプラズモンの高機能化に関する研究にシフトしてきている印象を受けた。例えば、ベクトルビームを用いた多重極モードの励起⁷⁾やアルミナノ構造体を利用した紫外域プラズモン励起⁸⁾、また各種顕微鏡と超短パルスレーザーを組み合わせたプラズモンの動的分光特性の研究⁹⁻¹¹⁾などが報告された。

プラズモンは、光を閉じ込め増強光電場を発生する。この増強光電場は、分子のラマン散乱を増強することから微量分析への応用が期待されている。表面増強ラマン散乱については、プラズモンと分子系を高度に規定した研究が行われ、強結合的なプラズモン挙動が報告された¹²⁾。増強光電場は、非線形光学過程の励起にも有効である。本年度は、複数の研究グループから2次および3次の非線形現象に関する研究が報告された。以上は光励起プラズモンに関する報告であるが、プラズモンは電子でも励起することができる。透過電子顕微鏡を用いてプラズモンを電子励起し、カソードルミネセンスや電子エネルギー損失分光を用いてプラズモンモードや分散特性に関する成果が報告された^{13,14)}。電子顕微鏡は非常に高い空間分解能を実現できることから、これらの手法はプラズモンの空間モードの可視化法として有用である。同様の研究は、海外でもここ数年活発に行われている。国内でのさらなる進展が期待される。

応用研究としては、光回路への導入を見据えた光源開発、導波路構造の評価、集積化などの成果が報告された。例えば、光源としては、量子ドットを用いた長距離伝搬ブ

ラズモン光源が提案され、その伝搬長や結合効率に関する報告があった¹⁵⁾。また、単一光子源によるプラズモン励起も報告された¹⁶⁾。そのほか、生体系への応用や光電変換デバイスへの応用研究もいくつか発表された。光電変換デバイスへの応用では、太陽電池の全固体化に関する研究が発表され、プラズモンによる光電変換効率の向上が報告された¹⁷⁾。実用化に向けて、さらなる効率向上が期待される。以上のとおり、基礎および応用の両面で、プラズモン研究の裾野の広がりを確認する1年であった。

7.4 メタマテリアル

メタマテリアルとは、自然にない光学特性を有する人工物質のことである。2000年以降、国内外で活発に研究が行われている。これまでは、構造体単位がおおむね波長サイズ以下の構造体を用いて、負屈折率(透磁率制御)の実現とその応用に関する研究が進められてきた。この研究分野は、マイクロ波領域から光波領域まで、スペクトル幅が非常に広い。当該分野では、おもに可視から赤外域で動作するメタマテリアルの報告がなされている。2013年度は、二次元メタマテリアルをセラミックヒーターで加熱することで低消費電力の熱輻射制御光源として利用できることが報告された¹⁸⁾。また、メタマテリアルの作製技術についても報告され、可視域において透磁率の実効的な変化が期待されるスプリットリング共振器を大面積かつ高密度に配列可能な方法が発表された¹⁹⁾。今後、さらなる素子の微細化と三次元構造体作製技術への発展が期待される。今後も進展が期待される分野であり、より多くの研究グループからの積極的な研究発表が期待される。

7.5 光と物質の相互作用と近接場光応用

近接場光学顕微鏡の開発とともに近接場光と物質の相互作用に関する研究が発展している。これは、伝搬光では実現できない物質との相互作用が、近接場光では期待されるためである。例えば、近接場光では従来の光学選択則を超えた光学遷移が可能である。この物理的メカニズムを本質的に理解し利用することで、物質機能の高機能化に繋げることが可能となる。2013年度も光と物質の相互作用の理解と応用に関する研究成果が多数発表された。例えば、GaAs量子リングの電気双極子禁制遷移からの発光²⁰⁾や、原子系における近接場-多重極子モーメントの相互作用²¹⁾などが発表された。また、ドレスト光子(ナノ物質表面に局在する光)を利用した研究成果も多数報告された。

ドレスト光子の利用に関して、近年特に活発になっているのは、発光ダイオードの効率化、高度化など発光素子への応用である。2013年度もこの方向の研究成果が多数報告された。例えば、シリコン発光ダイオードを用いた研究

では、バンドギャップより高エネルギー側で発光が観測され、それがドレスト光子の介在により結合する電子正孔対とフォノンに起因することが報告された²²⁾。シリコン発光ダイオードでは、発光スペクトルに表れるサイドバンドが光学フォノンに起因しパルス光によりサイドバンドのコヒーレントフォノンの制御が実現できることが報告された²³⁾。シリコン以外の間接半導体についても、ドレスト光子援用アニール法が発光効率の向上と発光領域の広帯域化に有用であることが報告された^{24,25)}。さらなる効率向上により、今後、実用技術として発展することが期待される。そのほか、近接場光の有効性に関する研究として、波長変換²⁶⁾、液晶ナノドロプレットの成長促進と配列制御²⁷⁾、基板の平坦化²⁸⁾、さらにはCO₂の削減²⁹⁾など、実に多様な成果が報告された。

動的過程の理論として、励起子-近接場光相互作用を利用した励起移動過程に関する研究³⁰⁾や電子・電磁場カップリングダイナミクスの第一原理計算³¹⁾などが報告された。これらのダイナミクスには励起のコヒーレンスが重要な役割を果たす。新しい理論の導入により、近接場光に関わるさまざまなダイナミクスがより精密に評価できるようになると期待される。実験および理論の両面で、今後さらなる研究の進展が期待される。

7.6 展 望

今年の研究動向を概観すると、基礎と応用の両面で継続的な進展があり、当該分野は成長期にあることがわかる。欧米、アジア地域でも研究活動の高まりをみせており、今後、日本の役割がさらに高まることが期待される。このような背景のもと、2015年に第10回アジアパシフィック近接場光学国際会議(APNFO)が日本で開催されることが決定した。今後の研究動向を見極める重要な会議になるものと考えられる。日本発のオリジナリティーの高い研究成果が多数発表されることを期待する。

近接場光学に関する研究は、基礎から実用的応用まで、実に裾野が広い。また、その研究分野も光学、物理、化学、生命科学と多岐にわたる。近接場光を利用することで、従来手法の困難を克服できる事象が複数見いだされている。今後、さらにそれらを発展させ実用的応用に繋げることができれば、エネルギー利用の高効率化や医療技術の革新など、社会の持続的な成長と発展に貢献できる基盤技術となると期待される。これを早期に実現するためにも、当該分野の発展を加速させる研究成果が本年度も多数発表されることを期待する。

文 献

- 1) 中田俊彦他：秋季応物講演会 (2013) 18a-C14-10.
- 2) 徳山貴土他：秋季応物講演会 (2013) 19a-C14-2.
- 3) 孟 倩文：春季応物講演会 (2013) 28a-A1-4.
- 4) 白井信悟他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P12-1.
- 5) 橋谷田俊他：OPJ (2013) 13aC5.
- 6) 佐藤 悠他：秋季応物講演会 (2013) 18a-C14-8.
- 7) 山本岳明他：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-3.
- 8) 杉田篤史他：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-9.
- 9) 諸徳寺匠他：春季応物講演会 (2013) 28a-A1-9.
- 10) Q. Sun 他：春季応物講演会 (2013) 27p-A1-3.
- 11) 西山嘉男他：春季応物講演会 (2013) 29a-PA3-3.
- 12) 伊藤民武他：春季応物講演会 (2013) 28a-A1-8.
- 13) 西尾夏希他：秋季応物講演会 (2013) 19a-C14-6.
- 14) 斉藤 光他：秋季応物講演会 (2013) 19a-C14-7.
- 15) 宮田将司他：春季応物講演会 (2013) 28a-A1-11.
- 16) 堺谷貴秀他：春季応物講演会 (2013) 27p-A1-12.
- 17) 上野貢生他：春季応物講演会 (2013) 27p-A1-2.
- 18) 上羽陽介他：秋季応物講演会 (2013) 18a-C14-7.
- 19) 富岡辰弥他：春季応物講演会 (2013) 27p-A1-6.
- 20) 八井 崇他：春季応物講演会 (2013) 28p-A1-10.
- 21) 東條 賢他：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-1.
- 22) 山口真生：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-13.
- 23) 和田直樹：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-12.
- 24) 川添 忠他：春季応物講演会 (2013) 28p-A1-1.
- 25) 金 俊亨他：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-15.
- 26) 川添 忠他：春季応物講演会 (2013) 28p-A1-11.
- 27) 仲澤拓弥：秋季応物講演会 (2013) 18a-C14-11.
- 28) 野村 航他：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-17.
- 29) ナビラタンジム他：春季応物講演会 (2013) 28p-A1-7.
- 30) 諏訪貴之他：秋季応物講演会 (2013) 18p-C14-10.
- 31) 信定克幸他：春季応物講演会 (2013) 28p-A1-17.

8. 光応用計測

徳島大 水谷康弘

8.1 概 要

光応用計測とは、光が有する物理量の種類を、光のもつ性質を利用して、高精度、高速、高感度および非接触で他の物理量の種類に帰着させることである。光の有する物理量の種類および性質と、帰着点である他の物理量の種類の組み合わせを考えると無数にあり、研究は多岐にわたっている。本章では、帰着点として多くの報告があった幾何形状計測と、応用された光の性質で多かった光散乱応用計測、偏光応用計測およびテラヘルツ応用技術を中心に一年を概観する。

8.2 幾何量計測

長さに関する次元を測定する研究は、従来から盛んな分野であり、2013年度も例に漏れず多数の報告があった。ここでは、形状測定と距離測定に大別できる。

形状計測では、光の位相および直進性を利用した手法に大別できる。光の位相を利用した手法としては、干渉計測およびホログラフィーに関する報告があった。低コヒーレ

ンス光源を用いることでシングルショットで三次元形状計測を可能にした手法が報告された¹⁾。また、光の直進性を利用した手法として代表的な手法が、光切断法および格子投影法である。光切断法に関する動向は応用計測が主流であり、なかでも、管状被測定物の内面を検査する計測方法が複数報告されている。リングビームを発生させるデバイスを用いることで筒状物体にレーザーを投影し生体モデルを測定する手法²⁾や、加速器の溶接部を中心とした内面検査に関する報告³⁾があった。また、直管内壁面の検査法として、2波長を用いた干渉計測を用いた手法も報告されており⁴⁾、従来はセンサーヘッドの形状制約から敬遠されていた管状物体の形状計測法の開発が盛んである。

距離計測では、光の周波数の絶対的な信頼性を利用した手法である光周波数コムを利用した計測方法を中心に報告があった。絶対距離の計測方法⁵⁾、高精度化に関する報告⁶⁾があった。また、測定に用いる光周波数コムの発生や制御に関する報告があった。空気の位相屈折率がパルスレーザーの隣接するパルス繰り返し間隔長に与える影響に関する報告があった⁷⁾。2台の周波数コムを利用することでRF発振器を必要としない粗面までの絶対距離計測が可能手法も興味深い⁸⁾。また、天体応用に向けた長距離伝送可能な光周波数コムの開発も行われている⁹⁾。アレイ導波路格子を用いることで周波数の利用効率を高める手法や¹⁰⁾、一部のみに限られていた光周波数コムが身近な測定手段になりつつあるといえる。

そのほかには、白色干渉法の基準参照局面が不要となり計測精度向上とダイナミックレンジ拡大を両立させた形状計測法が報告された¹¹⁾。また、時間領域差分 (FDTD) 法により計算されたマイクロオーダーの位相物体がホログラフィック顕微鏡の結像性能に及ぼす効果も検討されている¹²⁾。また、高精度座標測定器 (CMM) に必要となるマイクロ球の直径を whispering gallery mode (WGM) で高精度に測定する手法も報告されており、大変興味深い¹³⁾。さらには、準共通光路干渉計と光熱変換効果を組み合わせた粒子の位置の計測法の報告もあった¹⁴⁾。このように幾何形状を計測する手法は光応用計測の代表的分野といっても過言ではなく、特に産業応用と密接に関わっている必要不可欠な研究分野である。また、近年の3Dプリンターブームから三次元形状計測は異なる視点の要求から再注目されると考えられ、本年度も引き続き報告が多数あると思われる。

8.3 光散乱応用計測

光散乱応用計測は、光強度をモニタリングするだけのシンプルな計測手法ではあるが、ナノ粒子や表面の微細な凹

凸に敏感であることから盛んに研究が行われており、奥が深い。単純な構成であるがゆえに喫緊の社会的課題に迅速に対応しやすく、花粉センシングやPM 2.5物質の検出法の研究報告があった^{15,16)}。また、表面プラズモンに起因する光散乱における飽和現象を利用した飽和励起顕微鏡法により、集光点よりも小さな高分解のイメージングが可能であることが報告されている¹⁷⁾。さらに、固液界面近傍で特徴的なブラウン運動である wall-drag 効果など、基礎物理的な観測手法の報告もみられた¹⁸⁾。そもそも、光散乱は、基礎的な理論はすでに構築されているが、複雑化された系を一般化モデルに落としこむ点がキーポイントであり、基礎物理学を開拓していくチャレンジングな課題でもある。一方で、ナノインプリンティングなどの微細加工技術が一般化されてきて、シンプルな計測法として次節で述べる偏光計測とも関連しながら、さらなる発展が期待される分野である

8.4 偏光計測

偏光応用計測も、光散乱計測と同様に伝統的に進められてきた研究でありながら、今もなお成熟することなく進化している分野である。特に、近年の微細加工技術と組み合わせた新たな光学デバイスの出現や加工評価の要請から、飛躍的に研究報告が増えている。高速偏光カメラを用いた手法の報告があった。これは、二次元検出素子上に素子と同程度の大きさのフォトニック結晶でできた偏光子を貼り付けた構成のカメラで、偏光軸を90°ずつ変えながら貼り付けることによりワンショット計測を可能としたものである。フルストークスパラメータの測定¹⁹⁾や実時間で複数屈折をマッピングできること²⁰⁾、さらには、偏光パターン格子を用いた投影形状計測への応用²¹⁾が報告された。アクロマティックな軸対象波長板を用いた偏光計測も報告されている²²⁾。そのほかにも、ナノ構造の評価法としてのスキャトロメトリーでは、従来のエリプソパラメータではなく分光ミューラー行列を適用し、二重回転分光ミューラー行列偏光計により取得した実験値と境界要素法による計算値とを比較しナノ構造の推定が可能であることを示している²³⁾。また、光散乱場が偏光に与える影響の報告も印象的であった。例えば、複数種類の粒子径の金ナノ粒子をサンプルとしたときの偏光解消度が明らかにされた²⁴⁾。さらには、金属表面に施されたミクロンからナノオーダーの表面粗さを偏光散乱で計測できる低コストな計測法も報告された²⁵⁾。さらには、位相が螺旋状に変化するベクトルビームを用いた新たな計測方法の提案も心待ちにされることである。

2013年は、3年に一度開催されている分光エリプソメト

リーの国際会議 ICSE VIが京都で開催された。アジアで初の開催であったが、盛況であった。これまで、測定パラメータはエリプソパラメータが主体であったが、偏光解消などを扱うことができるミューラー行列を測定している報告が数多く見受けられた。これらは、微細加工技術の進展や表面に幾何的な構造を化学的に作製することで機能性表面を付与する研究が盛んになってきたことに対する要請である。例えば、二重回転位相子型偏光計を用いてミューラー行列を測定することで、シリコンウェハー上に形成された微細構造や異方性材料による偏光解消度を算出している^{26,27)}。

8.5 テラヘルツ応用

気体分子の回転運動に起因する吸収帯をカバーしているテラヘルツ波は、分光分析的な応用研究が主流であり、これまでも顕著な実績をあげている。2つの偏光感度から毛髪のスpekトルを測定した報告例があった²⁸⁾。電気光学結晶を回転させるだけで従来のワイヤグリッド偏光子を必要としない偏光計測が報告された²⁹⁾。エシェロンミラーを用いて偏光の変化をEO検出することによりシングルショットで計測できるようになった報告例も、単一現象の計測を可能にすることから応用の窓口が広がったといえる³⁰⁾。また、生体計測への応用は精力的に開拓されている分野であり、非侵襲血糖値診断方法も報告されている³¹⁾。近年では、二次元イメージング装置が開発され、テラヘルツ応用にイメージングという分野が出てきそうだ。2013年度は、CCDカメラでイメージングする手法が報告されている³²⁾。また、周期253 μm のブレイズ型回折格子を用いたリアルタイムマルチチャンネル分光装置も報告された³³⁾。そもそも、テラヘルツ計測は電場を直接観察できる点で、可視光を用いた光応用計測の常識から考えられない、いわゆる計測法概念を覆すことのできる分野であるといえる。この、電場を直接観察できるからこそ可能な計測法が提案されれば、テラヘルツ応用が今以上に注目を浴びるであろう。

8.6 展 望

2013年度の光応用計測分野の報告を概観した。上記分野以外にも、分光を環境関連の応用計測に用いた報告や、ホログラフィーと音を組み合わせた例なども報告されている。光応用計測は、光学デバイスの発展と二人三脚で進められている。新たな光学デバイスの出現により従来の研究が飛躍的に進むことは、今に始まったことではない。本年度も、光応用計測分野だけでなくデバイスや光物理の分野の動向を見逃すことはできない。

文 献

- 1) 田中裕二他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P11-2.
- 2) 高橋光太他：精密春季大会 (2013) A14.
- 3) 江波和宏他：精密春季大会 (2013) A15.
- 4) 横田正幸他：秋季応物講演会 (2013) 17p-C13-2.
- 5) 王 肖南他：精密春季大会 (2013) N20.
- 6) C. Narin 他：精密春季大会 (2013) N47.
- 7) 山崎俊明他：春季応物講演会 (2013) 27a-A2-7.
- 8) 尾上太郎他：精密春季大会 (2013) N32.
- 9) 奥山康志他：春季応物講演会 (2013) 29p-B3-3.
- 10) 中村允一他：OPJ (2013) 13aB4.
- 11) 松井 繁他：秋季応物講演会 (2013) 17p-C13-13.
- 12) 波田地洋隆他：春季応物講演会 (2013) 28a-A2-8.
- 13) 峨家諒介他：精密春季大会 (2013) N07.
- 14) 長田悠希他：精密春季大会 (2013) A25.
- 15) 早乙女総他：OPJ (2013) 13aB7.
- 16) 鶴見健太郎他：OPJ (2013) 13aB8.
- 17) 桶谷亮介他：春季応物講演会 (2013) 27p-A2-9.
- 18) 渡会俊晴他：秋季応物講演会 (2013) 17p-C13-7.
- 19) 柴田秀平他：OPJ (2013) 12pB3.
- 20) 大沼隼志他：精密秋季大会 (2013) H37.
- 21) 柴田秀平他：OPJ (2013) 14pC6.
- 22) 若山俊隆他：精密秋季大会 (2013) H33.
- 23) 鎌田 葉他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P11-10.
- 24) 石田章伍他：秋季応物講演会 (2013) 17p-C13-8.
- 25) 李 雪峰他：春季応物講演会 (2013) 29a-PA2-1.
- 26) N. Guth *et al.*: ICSE-IV (2013) 24.
- 27) J. Maria *et al.*: ICSE-IV (2013) 35.
- 28) 柴 直孝他：春季応物講演会 (2013) 30a-PA3-13.
- 29) 小口研一他：春季応物講演会 (2013) 29a-D1-3.
- 30) 南 康夫他：春季応物講演会 (2013) 29a-D1-5.
- 31) 千葉裕典他：秋季応物講演会 (2013) 17p-C1-10.
- 32) 竹田雅俊他：春季応物講演会 (2013) 29a-D1-4.
- 33) 神田夏輝他：秋季応物講演会 (2013) 18a-A14-9.

9. 干 渉 計 測

埼玉大 塩田達俊

9.1 概 要

光の波長がナノメートルからマイクロメートル領域であることから、同程度の分解能を必要とする長さ計測や形状計測などに光干渉計が応用されている。特に時間走査干渉計の出力波形、つまりインターフェログラムが含む情報を最大限利用しようと試みられている。例えば、低コヒーレンス干渉で得られるインターフェログラムの包絡線形状が断層像として利用され、光コヒーレンストモグラフィー (OCT) として確立された。さらに、レーザー干渉計も含めて干渉波形の位相は多くの情報を有するので、ナノメートル精度の位置検出やスペクトル計測を可能にする。特に、位相シフト干渉計やシアリング干渉計の計測原理は多方面に応用されている。

近年、偏光計測手法が確立されてきたうえに空間的な位相制御が可能な SLM (spatial light modulator) が普及して、光ビームの多彩な偏光状態を制御可能となった。これ

を干渉計測に応用する研究報告の件数も増加している。

また、イメージセンサーは、三次元空間の圧倒的な情報量を有限時間内にセンシングするために強力なデバイスである。改良が続くイメージセンサーの画素密度や感度の向上は、空間位相変調技術と融合して、デジタルホログラフィー、形状計測、偏光計測等の研究に進歩をもたらしている。

応用分野の傾向では、産業や医療へ向けた形状計測、振動解析、ひずみ解析、超音波や高速光波形の計測、光弾性やスペクトルなどの材料解析を目指した報告が多い。

9.2 レーザー干渉、位相シフト干渉

おもにレーザー光の位相検出技術を利用した研究報告が活発に報告されている。フォトリソグラフィ偏光素子 (PCP) と四分の一波長板を組み合わせ、偏光感度をもたせた共通光路で組める干渉計を作製し、高精度な位相量を計測できる位相シフト干渉計が報告された¹⁾。環境の影響を抑制できるので、原子間力顕微鏡に適用することで探針走査に使用される圧電素子の不確かさを補償できることが示された。また、3つのレーザー光の干渉により生成する光渦アレイのひずみ解析による面内の位相計測の分解能を特異点に着目して、参照光の位相操作によって調査した結果が示された²⁾。また、高密度な記録を目指したホログラフィックメモリーとして、信号光と参照光に空間的な位相変調を付加した手法に生じる再生像のひずみを取り除くため、ページデータのセル構造に基づいた入力マスクを設計した研究が報告された³⁾。螺旋状干渉縞の面内位相計測において、位相勾配の変化による干渉強度の変化、つまり誤差の低減も検討された⁴⁾。

一方、偏光計測への応用研究も複数報告されている。旋光計をサニャック干渉光学系で実現する方法⁵⁾や、位相シフト法による面内偏光分布の検出を光ヘテロダイン干渉法を用いた極薄ガラスの光弾性係数計測への応用が示された⁶⁾。また、高精度な位相測定が可能な正弦波変調干渉法と CCD を用いて、円偏光制御により比較的簡便に材料の二次元複屈折分布を測定する技術が報告された⁷⁾。

ひずみや振動計測への応用研究も数多く発表されている。大振幅振動ひずみの計測を目指した光ファイバーセンサーとして、チャープファイバーブラッググレーティング (FBG) で構築したファブリー・ペロー干渉計を利用する手法⁸⁾や、長周期光ファイバーグレーティング (LPG) を用いて温度計測に適用した研究も報告された⁹⁾。チャープ FBG を利用した手法では、単調に周波数走査した波長可変レーザーの透過強度のパターン変化から、光ファイバーに印加した 10 Hz で 160 μe のひずみが確認された。

固体表面の超音波振動をレーザー干渉計によって検出する技術が報告された¹⁰⁾。レーザー光を音響光学素子(AOM)に通して0次光と周波数シフトされた1次光を発生させ、それぞれを振動表面と参照鏡に照射して得られる反射光のビート信号の振幅・位相を超音波源と比較して導出できる。

また、超音波の音圧の振幅と位相分布を実時間ホログラフィー干渉法により測定するシステムが報告された¹¹⁾。さらに、高速度カメラにより200 Hzで振動する位相変動する信号をミリ秒程度で90°位相シフトした干渉縞として計測した結果が報告された¹²⁾。

超高速光波形計測では、多波長同時ヘテロダイン検波法を用いた光周波数コム合成・解析法による16 Tbit/s信号制御法¹³⁾や、分散スペクトル計測法¹⁴⁾が報告された。一方、TEA-SPIDER (time encoded arrangement-spectral phase interferometry for direct electric field reconstruction)法を中赤外に適用したパルス波形評価システムも報告された¹⁵⁾。

天文応用を目指した研究では、太陽系外惑星の直接観測を目指し、補償光学を利用したステラコロナグラフィシステムの開発が進められている。非対称ナル干渉計(UNI)と可変形鏡(DM)を用いた補償光学を組み合わせることで波面補償を可能にするもので、残留スペックルノイズの除去が可能であることが報告された^{16,17)}。

9.3 デジタルホログラフィー

遠隔6軸変位計測、特に既存の手法では弱い横変位と縦軸方向の回転の検出を振幅位相分布のデジタルホログラフィックに計測する手法が報告された¹⁸⁾。多重零点ビーム(MZB)のヘテロダイン参照光の時間領域制御で高速な変動を検出可能とした時間相関イメージセンサーを用いたヘテロダイン復調撮像により、振幅位相分布が求められることが示された。

デジタルホログラフィー応用計測としては、フェムト秒レーザーによるガラス内部のレーザー誘起現象を2波長のプローブ光で可能とした二波長同時観測システムの開発が行われた¹⁹⁾。振幅・位相の空間分布をCCDイメージセンサーで取得した画像からフーリエ変換法により求められた。ポンプ・プローブによる誘起現象の時間変化が観測された。

共通光路型の光学系をもった点回折干渉計を顕微鏡に組み込んだ干渉計に液晶空間フィルターと微小径の偏光ピンホール構造をもったワイヤグリッド偏光子を導入して、0次光の集光サイズと同程度の領域で位相シフトできる干渉顕微鏡が提案された²⁰⁾。この偏光素子はピンホールの

内外で偏光が直交するようにワイヤグリッドが配置されており、それぞれ参照光と信号光が透過するシステムで共通光路を実現している。これにより微小物体の位相分布を計測でき、 0.05π の位相段差が二次元顕微鏡像として観測された。

9.4 低コヒーレンス干渉

低コヒーレンス干渉を用いて物体内部の断層計測を行う場合には、自己相関関数(インターフェログラム)の包絡線から位置情報を見積もり、場合によっては分解能として利用する。一方、上記の自己相関関数をもつ周期的な微細構造を利用して、より高分解な位置情報を検出する研究も進められている。

低コヒーレンス干渉の応用技術として、断層画像の分解能を超えた薄膜の厚さ計測を目指した研究が報告された²¹⁾。膜表裏面それぞれからのインターフェログラムが重なりにより干渉した画像から、フィルタリングとフーリエ解析により位相情報を取得し膜厚を導出する方法である。ITO電極の厚さ10 nm台の計測が確認された。

一軸方向へ縞間隔が変わる空間スペクトラルフィルターの二次元位置制御により、白色光からコム間隔と中心周波数を独立に制御してコム干渉信号の振幅と位相の制御が試みられた²²⁾。一方、スペクトラルフィルターをSLMと偏光子の組み合わせとして、間隔可変な多波長光源を得て干渉計に適用する方法も報告された²³⁾。また、多波長光源をフィゾー干渉計に適用し、さらに正弦波位相変調法を適用することで、干渉の位相分布を正確に求めてナノメートルオーダーの形状計測が可能であることが示された²⁴⁾。

低コヒーレンス干渉を利用した分光イメージングの研究としては、無限焦点型の結像光学系を構成した干渉計による結像型二次元フーリエ分光法を鑑識技術へ適用した研究が報告された²⁵⁾。また、環境計測を狙ってCCDを用いてかつ可搬型にした広視野ワンショットフーリエ分光光学系を設計した分光イメージングも報告された²⁶⁾。

産業への応用を意識して、低コヒーレンス干渉を応用する研究報告も進んでいる。精密部品の製品検査を目指して、参照光のイメージセンサーへの入射角を制御したデジタルライトインフライトホログラフィーによるシングルショット三次元形状計測手法が報告された²⁷⁾。

また、製品形状検査に適用するため広範囲の計測を目指して、空間位相変調器(回折格子)とCCDを低コヒーレンス干渉計に組み込んでシングルショット二次元断層計測を行えるシステムが報告された。光共振器によりコム干渉を行い、高次干渉の利用により広い計測範囲を実現した結果が報告された²⁸⁾。

皮膚上の化粧剤の評価を行うために、人工皮膚レプリカに施した化粧剤塗膜の深さ方向二次元断層画像を取得し、空間的自己相関関数により評価する手法が報告された²⁹⁾。

9.5 X線の利用

干渉を用いた研究は光に限らない。X線位相イメージングは高感度であり、弱い吸収物質でも計測できる。高い分解能も得られるため分析技術として注目され、システムや素子の開発、データ処理が検討されている。特にタルボ干渉に関する研究が複数報告された。

X線タルボ・ロー装置の小型化³⁰⁾や吸収格子を用いないシステムの開発³¹⁾が報告された。また、X線タルボ干渉計のためのデバイス開発として、金属ガラスのインプリント技術による高精度な回折格子を作製できる可能性が報告された³²⁾。また、データ処理法として、二次元タルボ・ロー装置で撮像されるイメージにフーリエ変換法または縞解析法とのハイブリッド法を適用して、回復した微分位相像の高空間分解能化を実現できることが報告された³³⁾。

9.6 展 望

干渉計測は応用分野が広く、技術的アレンジも多彩であることから、今後も活発な研究が続くと思われる。特に、光コム、偏光ビーム、インターフェログラムの位相解析などは、新しい計測原理の発案や、高機能化による新しい応用展開が期待される。

応用分野は、産業、医療以外にも、環境、天文など地球または宇宙規模へのアプローチも発展が期待される。

本稿が対象とする干渉計測では、おもにシステム研究の報告を取り上げたが、デバイスの開発状況にも影響を受ける。例えば、デジタルホログラフィーなどのイメージングで使用されるCCDの性能として高密度化が進めば、同時に画像の処理速度問題が生じることになる。また、光源の雑音低減などの性能向上も必要である。今後のデバイスの開発状況にも注視したい。

文 献

- 1) 渡辺正浩：光学，42 (2013) 83.
- 2) 亀谷昌宏他：OPJ (2013) 14pP16.
- 3) 最田裕介他：OPJ (2013) 14pE4.
- 4) A. Syakir Bin Azi 他：OPJ (2013) 14pP17.
- 5) 熊谷達也他：光学，42 (2013) 314.
- 6) 守本 雄他：OPJ (2013) 14aC9.
- 7) 佐々木修己他：OPJ (2013) 12pB4.
- 8) 手倉森新伍他：OPJ (2013) 12pB8.
- 9) 竹内 誠他：OPJ (2013) 14pC7.
- 10) 米本隆士他：OPJ (2013) 14pP20.
- 11) 仲村慎太郎他：OPJ (2013) 14pP13.
- 12) 吉井将人他：OPJ (2013) 14pP19.
- 13) 山崎俊明他：OPJ (2013) 13aB3.

- 14) 中村允一他：OPJ (2013) 13aB4.
- 15) 新垣寿弥他：春季応物講演会 (2013) 28p-D2-2.
- 16) 大矢正人他：OPJ (2013) 14aC4.
- 17) 佐藤克磨他：春季応物講演会 (2013) 27-G6-5.
- 18) 安藤 繁他：光学，42 (2013) 609.
- 19) 福田真一他：OPJ (2013) 13aB1.
- 20) 野上 敦他：OPJ (2013) 14pP11.
- 21) 陳 凱他：OPJ (2013) 14pP10.
- 22) 佐藤瞭子他：OPJ (2013) 14pC4.
- 23) 高塚駿亮他：OPJ (2013) 14pC5.
- 24) 渡辺智哉他：OPJ (2013) 14pC6.
- 25) 藤原 大他：OPJ (2013) 14pC1.
- 26) 平松裕行他：OPJ (2013) 14pC2.
- 27) 田中裕二他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P11-2.
- 28) T. Banh Quoc 他：秋季応物講演会 (2013) 19-D5-5.
- 29) 宮本汐里他：春季応物講演会 (2013) 28a-A2-7.
- 30) 藤野 翔他：秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-2.
- 31) 森本直樹他：秋季応物講演会 (2013) 18p-A13-1.
- 32) 矢代 航他：秋季応物講演会 (2013) 19p-A13-7.
- 33) 長井健太郎他：OPJ (2013) 14pP14.

10. 光情報処理

産総研 有本英伸

10.1 概 要

本稿では、春季および秋季応物講演会とOPJの講演内容から、おもに情報光学分野にて発表された代表的な研究成果を取り上げた。概観するとデジタルホログラフィー関連の研究報告が群を抜いて多く、続いて各種イメージング技術、信号処理・光演算・セキュリティー技術がそれに続く。また、単体技術の研究ではなく、生体計測と三次元情報処理技術、あるいは分光技術と信号処理技術の融合など複数の技術を融合した研究が増加しており、より高度で実用化を意識した研究が行われていることが読み取れる。

10.2 ホログラフィー

ホログラフィー自体は古くから存在する光学技術であるが、近年はデジタルホログラフィーに関連した研究が著しく活発である。画素配置が高密度なイメージセンサーや高速なPCを手軽に利用できるようになり、さまざまな計測への応用が可能となったことも一因と思われるが、ホログラム生成のためのより合理的な新規技術も次々と提案されている。ここではデジタルホログラフィー技術を含め各種ホログラフィー技術の進展を概観する。

デジタルホログラフィー技術としては、マルチモード光ファイバーによるスペckル照明を利用した画質改善法¹⁾が提案された。また、デジタルホログラフィーと光学的暗号化技術を用いて諮問画像を秘匿化する技術²⁾、フォトンカウンティング法による並列位相シフトデジタルホログラフィーの微弱光下における画像再構成評価³⁾、反射型レンズレスホログラフィック顕微鏡による生体細胞

の断層撮像⁴⁾、低コヒーレンス光源を用いたデジタルホログラフィーによる試料の厚さと屈折率分布を同時に取得する原理の提案⁵⁾、合成開口による再生像の高分解化技術に関して、サブピクセル単位での合成方法を工夫することで画質を向上させる原理⁶⁾などが報告された。さらに、入射角を微小にしたオフ軸型を用いることで一般化位相シフト法の位相ランダム条件を成立させる技術⁷⁾、位相シフト型レンズレスデジタルホログラフィック顕微鏡による高NA化や低ノイズ化の原理提案⁸⁾、線形空間キャリアを用いて共通光路・単一露光でインコヒーレント光の三次元画像を記録・再生する技術⁹⁾なども提案されている。

デジタルホログラフィーのほかには、再生像の大きさと視野角を拡大するためにミラー走査で計算機プログラムを複数枚作成するための効率的な計算方法の提案¹⁰⁾、コヒーレント加算によるデュアルチャネル偏光ホログラフィーに関する報告¹¹⁾、そのほか誌面の都合で網羅しきれない多くの報告が活発に行われた。

さらに、12月には多数の受講者の参加の下でセミナー「デジタルホログラフィ装置の作り方・使い方」がパシフィコ横浜で行われ、ホログラフィー技術への関心の高さと将来性がうかがわれた。

10.3 イメージング

空間分解能や被写界深度を改善する技術のほか、物体の質感や生体を対象とした可視化技術など、イメージング技術に関する研究も引き続き活発に行われている。

明るく深い被写界深度を得るために三次関数型位相板を挿入した際の画質と絞り形状の関係評価について報告された¹²⁾。さらに、WFC (wavefront coding) 技術を用いて分解能と明るさを低下させることなく深い被写界深度を実現する顕微鏡光学系が提案された¹³⁾。また、分光画像を取得するために複雑で大がかりな装置構成を避けるために、分光センサーと高解像度 RGB カメラのデータを融合することで高解像分光画像を取得する技術が提案された¹⁴⁾。分光画像関連ではさらに、RGB カラーカメラを用いてヒト皮膚の正確な分光反射率や色彩情報を取得するための補正技術を導入し、簡易的なヘルスマニタリングシステムを目指す報告があった¹⁵⁾。生体および色を対象としたイメージング技術関連では、顔全体にわたる色素むらと形状の特徴量を取得して加齢変化による顔の見えるを再現する研究が報告されている¹⁶⁾。また、コンピューターグラフィックスの現実感などに関わる物体表面の質感認知について、拡散反射率が及ぼす影響について研究を行った結果が報告された¹⁷⁾。複眼撮像デバイスを用いた研究も興味深い。複

眼撮像デバイス TOMBO を用いてパターン投影や偏光イメージングを行い、歯周病診断を目的とした口腔診断システムを構築した研究¹⁸⁾、TOMBO に使われている CMOS カメラのローリングシャッターの動作を利用した高フレームレート撮像および超解像処理¹⁹⁾、クレジットカードなどに用いられる偽造防止用ホログラムのグレーティング刻線数推定の報告²⁰⁾などがあった。また、近年提唱された新しいイメージング方法であるゴーストイメージングに関して、レーザーアレイを用いて高速にスパックルパターンを更新する技術が提案され、その実験検証結果が報告された²¹⁾。

10.4 信号処理・光演算・セキュリティ

光のもつ特性を利用した演算技術や各種光計測における信号処理技術は光情報処理分野で長年活発に行われている研究課題であり、2013年にも多岐にわたる有用な研究報告が多く寄せられた。動画抽出やエッジ強調機能をもつセンサーへの応用が可能な、高度好塩菌がもつ光受容たんぱく質であるバクテリオロドプシンを用いて光の空間変位を検出する研究に関して、SN比を向上させるために改良報告²²⁾があった。三次元形状計測のために用いられる計算方法に関して、フーリエ変換法に代わる高速なコンボリューション法が提案された²³⁾。従来は計算時間が長く実用的ではなかったが、二次元非等方カーネルを用いることで高速で安定した三次元形状計測が可能であることが示された。また、携帯電話に内蔵されたカメラのような簡易な撮像デバイスをヘルスケア計測に利用するという将来ビジョンのもとで行われている研究の中で、照明や撮像デバイスなどの撮影条件による影響を抑えて正確な色彩情報を得るための分光反射率補正アルゴリズム構築の研究結果が示された²⁴⁾。ナノメータスケールの局所的なシグナル伝送を可能にする蛍光共鳴エネルギー移動に基づいた信号処理技術に関して、光信号を入力としてシグナルの伝送状態を切り替える実装技術が提案された²⁵⁾。また、オンチップの生体分子解析技術のための DNA コンピューティング技術に関して、リボソーム内での DNA 論理回路の動作検証と性能評価について報告された²⁶⁾。量子相関演算による画像のパターンマッチング技術である量子画像認識アルゴリズムの研究において、多数個の参照物体を対象とした物体認識の能力評価が行われ、その結果が報告された²⁷⁾。光の性質を利用したセキュリティ技術も、光情報処理分野で活発に研究が続けられている。3枚の液晶パネルを積層した偏光演算型ディスプレイによって二視点暗号表示の原理が構築され、プロトタイプによる実験結果が示された²⁸⁾。また、周期パターンを重ねることで画像を

浮かび上がらせる潜像技術であるキャリアスクリーン画像の研究については、モアレ縞の解析によって定量的な復号判定の手法が提案された²⁹⁾。

10.5 三次元情報処理

三次元立体表示技術は古くはアナグリフ方式などから始まり、映画館などで採用されている偏光眼鏡方式、シャッター同期やホログラフィックディスプレイ、インテグラルイメージング方式などさまざまな技術方式が提案され、一部は実用化されている。光情報処理分野でも三次元表示技術の研究は引き続き精力的に行われ、現実感の向上やデバイスの簡易化を目的として多くの研究報告が行われた。輝度の異なる複数の画像を重ねるよう配置することで奥行きが知覚できる DFD (depth-fused 3D) 表示方式を採用した四面 DFD ビューアを設計製作して、比較評価した研究結果が報告された³⁰⁾。さらに、一次元空間光変調器を使ったレンズレス三次元ホログラフィックディスプレイにおいて、一次元表示素子の画素構造をコントラストを指標とした設計にすることで再生像の解像度を改善することに成功した研究成果が示された³¹⁾。また、光波の空間コヒーレンス情報とスペクトルを同時計測することで三次元分光画像を再生する技術において、縦横方向の空間分解能を評価する研究の結果が報告された³²⁾。デジタルホログラフィーの三次元イメージング応用として、インライン型の位相シフトデジタルホログラフィーに基づいた複数波長情報の選択的抽出が可能な光学系が提案された³³⁾。

10.6 展 望

近年の撮像デバイスや計算用 PC の性能の著しい向上に伴い、以前では考えられなかったような複雑な計算を短時間で行うことが可能になり、光の得意な部分と電子が得意とする部分を効率よく融合させた技術が興味深い成果を挙げている。デジタルホログラフィーはその典型的な一例であり、基本原理そのものは古くに提案されているものの、現在でもディスプレイ技術や計測技術など多岐にわたる分野で新しい技術開拓が行われている。今後は光学のみならず他の分野の先進的な技術との融合が加速し、さらに高度で実用的な研究成果が生み出されると思われる。

文 献

- 1) 下間翔平他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-1.
- 2) 竹田賢史他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-2.
- 3) 苗 林他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-3.
- 4) 河内賢太他：OPJ (2013) 14aE1.
- 5) 渡辺果歩他：OPJ (2013) 14aE3.
- 6) 若杉卓実他：OPJ (2013) 14aE7.
- 7) 吉川宣一他：秋季応物講演会 (2013) 19p-C13-10.
- 8) 星野和博他：秋季応物講演会 (2013) 19p-C13-11.

- 9) 田原 樹他：秋季応物講演会 (2013) 19p-C13-13.
- 10) 山東悠介他：春季応物講演会 (2013) 30a-PA1-4.
- 11) 山下健太他：秋季応物講演会 (2013) 19p-C13-4.
- 12) 崎田康一他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-7.
- 13) 提箸直紀他：OPJ (2013) 13aE1.
- 14) 中崎溪一郎他：OPJ (2013) 12aD1.
- 15) 本間亮佑他：OPJ (2013) 12aD4.
- 16) 豊田彩織他：OPJ (2013) 12aD6.
- 17) 土門亮太他：OPJ (2013) 12aD5.
- 18) 美馬大樹他：OPJ (2013) 13aE5.
- 19) 森口幸志郎他：OPJ (2013) 13pP13.
- 20) 赤尾佳則他：OPJ (2013) 13pP11.
- 21) 矢野佑樹他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-8.
- 22) 川本大樹他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-9.
- 23) 李 昂陽他：春季応物講演会 (2013) 30a-PA1-9.
- 24) 本間亮佑他：春季応物講演会 (2013) 30a-PA1-10.
- 25) 西村隆宏他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-10.
- 26) 風山祐輝他：春季応物講演会 (2013) 29p-A1-11.
- 27) 橋本拓也他：OPJ (2013) 12pD2.
- 28) 内田景太朗他：OPJ (2013) 13pP15.
- 29) 生源寺類他：OPJ (2013) 12aD2.
- 30) 高橋 優他：秋季応物講演会 (2013) 18p-P2-1.
- 31) 上野文華他：秋季応物講演会 (2013) 19p-C13-6.
- 32) 小原正樹他：OPJ (2013) 13aE7.
- 33) 田原 樹他：OPJ (2013) 13aE9.

11. 画像処理

大阪大 堀崎遼一

11.1 はじめに

本章では、2013 年の春季応物講演会、同秋季講演会、OPJ における画像処理に関連する研究を総観する。「画像処理」は本来、ソフトウェアによる画像復元や画像解析を指すが、当該学会では各々が利用するハードウェア (光学系) に特化された画像処理が利用されている例がほとんどであり、画像処理単体に関する研究はあまりみられなかった。別の言い方をすると、当該学会では、ハードウェアとソフトウェアはシステム内に包括されて研究開発が進められており、画像処理単体としての開発は重視されていない。そのため、光学分野における「画像処理」の線引きはあまり意味をもたないが、当該学会で活発に研究が進められている三次元イメージング、分光イメージング、その他の画像処理に関連する研究をいくつか取り上げたい。

11.2 三次元イメージング

対象の三次元形状を取得することは工業や医療分野では重要な課題であり、これまでさまざまなアプローチが提案されている。デジタルホログラフィー等の干渉計を用いた三次元形状計測取得は長年研究が進められており、今年も多数の発表がみられた。シングルショットデジタルホログラフィーに関連する研究としては、低コヒーレンス光源のライトインフライトホログラフィーへの組み込み¹⁾、画素ごとでの位相変調等²⁾ のアプローチがデモンストレー

ションされている。複数枚の強度画像からの位相回復に画素ごとの位相変調を導入するアプローチも上記の研究に近く、興味深い³⁾。これらのアプローチではイメージセンサーを空間的に分割し、各画素で異なる位相変調を与える。撮影後の画像処理で、サブプログラムやサブ強度画像を生成し、対象の三次元形状を回復する。球面波を参照光として用いるシングルショットインラインデジタルホログラフイーも発表されている⁴⁾。この手法では、画像処理によりハイパスフィルタリングを行い、物体光成分を抽出する。

また、デジタルホログラフイーの応用として、位相生体細胞⁵⁾やナノ粒子⁶⁾に対する三次元イメージングも報告されている。

上記の干渉計によるアプローチ以外にも、複眼カメラ⁷⁾やステレオカメラ⁸⁾、構造化照明⁸⁻¹⁰⁾を用いた三次元形状取得もデモンストレーションされた。文献7)ではレンズアレイにより得られた三次元情報からのデジタルホログラフイーへの変換を、GPUを使ってリアルタイムにデモンストレーションしている。文献8)では波線パターンを用いて、文献9)では縞パターン投影を行うフーリエ変換形状計測法の画像処理に畳み込み積分を用いて、測距の安定性の向上を図る試みがなされている。また、OPJでは「非干渉3次元センシング技術の展開」と題したシンポジウムが催されている。

11.3 分光イメージング

分光イメージングはおもに、対象の二次元空間座標 (x, y) に対応する波長情報 (λ) を取得する。モノクロームあるいはRGBカメラでは得られない生体情報を得られることから、医療分野での応用が特に進められている。空間分解能の高いRGBカメラと空間分解能の低い分光カメラを組み合わせたシングルショット分光イメージングシステムが提案されている¹¹⁾。撮影後のウィーナー推定を用いた画像処理により、分解能の高い空間波長情報が得られる。また、結像型二次元フーリエ分光法を用いた分光イメージングシステムも提案されている。各画素で得られた干渉信号をフーリエ変換することで高波長分解能の分光画像をパッシブに得られる^{12,13)}。各画素にマイクログレーティングを配置したフィルタレスのカラーイメージセンサーも興味深い¹⁴⁾。撮影後の画像処理により、RGB情報を復元できる。

また、分光イメージングの応用として、皮下内出血¹⁵⁾や顔¹⁶⁾画像の解析、真贋判定^{12,17)}、植物の環境ストレス解析¹⁸⁾等がデモンストレーションされている。

11.4 その他

上の2節で紹介した研究以外にも、画像処理を積極的に利用したイメージングシステムが発表されている。結像光

路中に位相板を配置し、奥行き方向に不変かつ回復可能なぼけを生成し、撮影後のデコンボリューション処理を行うwavefront codingとよばれる被写界深度拡張法に関するも、絞り形状¹⁹⁾やデコンボリューション処理に用いるフィルターの最適化²⁰⁾、顕微鏡応用²¹⁾についての発表があった。

コンピュータグラフィックスの分野では、レンダリング対象の反射・拡散の特性を含めた質感の再現は重要である。この課題に対し、線光源走査による光沢特性取得システム²²⁾、主成分分析を用いた顔の色素分布と形状解析²³⁾が発表された。

デジタルホログラフイーでは11.2節に述べた三次元イメージング以外にも、撮像後の画像処理による合成開口²⁴⁾や複素振幅パターンマッチング²⁵⁾による超解像イメージングが報告された。

また、画像処理を利用するイメージングシステムでは処理の高速化も重要な課題であり、GPUを用いた高速画像処理に関する発表も行われた。一般に、イメージングにおける光学プロセスは空間並列に行われるためGPUとの相性がよい。コンプトンカメラの再構成²⁶⁾、計算機合成ホログラムの生成^{6,27,28)}、時間領域差分(FDTD)法²⁹⁾のGPUによる高速化がデモンストレーションされている。

11.5 まとめ

近年の光学技術と信号処理技術の革新は凄まじい。本稿で紹介したような、光学系(ハードウェア)と画像処理(ソフトウェア)を協調設計する光学システムの研究開発は今後ますます活発になっていくと考えられる。

文 献

- 1) 田中裕二他: *OPJ* (2013) 12aB5.
- 2) 田原 樹他: *OPJ* (2013) 14pE1.
- 3) 夏 鵬他: *OPJ* (2013) 12pP10.
- 4) 小関隼也: *OPJ* (2013) 14pE3.
- 5) 星野和博他: 秋季応物講演会 (2013) 19p-C13-11.
- 6) 佐藤 聡他: *OPJ* (2013) 12aB6.
- 7) 市橋保之他: *OPJ* (2013) 13pDS6.
- 8) 八木康史他: *OPJ* (2013) 13pDS3.
- 9) 李 昂陽他: 春季応物講演会 (2013) 30a-PA1-9.
- 10) 廣瀬知弘他: 春季応物講演会 (2013) 29a-PA2-10.
- 11) 中崎溪一郎他: *OPJ* (2013) 12aD1.
- 12) 藤原大他: *OPJ* (2013) 14pC1.
- 13) 平松裕行他: *OPJ* (2013) 14pC2.
- 14) 西脇青児他: *OPJ* (2013) 14aBS2.
- 15) 柴田一馬他: *OPJ* (2013) 12aA7.
- 16) 和野暢之他: *OPJ* (2013) 12aA8.
- 17) 鈴木基嗣他: *OPJ* (2013) 14pP9.
- 18) 大江真太郎他: *OPJ* (2013) 14aD4.
- 19) 崎田康一他: 春季応物講演会 (2013) 29p-A1-7.
- 20) 石田 功他: *OPJ* (2013) 12aD3.
- 21) 提箸直紀他: *OPJ* (2013) 13aE1.
- 22) 馬場佳織他: *OPJ* (2013) 13aE3.

- 23) 豊田彩織他：OPJ (2013) 12aD6.
- 24) 若杉卓実他：OPJ (2013) 14aE7.
- 25) 石川慎二他：OPJ (2013) 13pE7.
- 26) 中村泰明他：秋季応物講演会 (2013) 18a-A12-8.
- 27) K. Murano 他：秋季応物講演会 (2013) 17p-D5-8.
- 28) 宮田裕章他：OPJ (2013) 13pPD5.
- 29) 岩田強志他：秋季応物講演会 (2013) 16p-P1-17.

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

NTT フォトニクス 松尾慎治
富山大 岡田裕之

12.1 光通信に関わるデバイス

12.1.1 概要

光通信に関わる光デバイスの研究においては、シリコンフォトニクス技術を用いたデジタルコヒーレント用の変調器や受信器が大きな進展をみせた。この分野最大の国際会議である OFC では、シリコンフォトニクス技術で作製した変調器においてファイバー伝送後の信号品質の評価が行われ、その結果が、現在市場で多く使われている LiNbO₃ 変調器と比較して遜色ないものであることが示された^{1,2)}。国内で開催された会議では、後述するように個別デバイスの高性能化に関する報告が多くなされた。これらはシリコンフォトニクス技術の実用化に向けて大きく前進する成果であった。一方、InP 系化合物半導体を用いた光デバイスにおいては通信用半導体レーザーの高性能化（高速・高温特性）が一層の進展をみせた。また、変調器、受信器においてはモノリシック集積技術の進展がうかがえた。

12.1.2 通信用半導体レーザー

100 ギガビットイーサ用半導体レーザー光源は、低消費電力化に向けてレーザーの小型化とセミクルあるいはアンクル動作に向けた活性層の Al 化の研究が進められてきた。低周波領域のロールオフを低減する非対称 CPM (corrugation-pitch-modulated) 回折格子を適用した DFB (distributed feedback) レーザーが提案され、空間的ホールバーニング抑制により 55°C の 28 Gb/s 動作において 20% 以上の良好なマスクマージンが報告された³⁾。半導体レーザーに関してはほかにも注目される論文は数多く報告されているが、すでにほかで解説されているため、そちらを参照されたい。

12.1.3 光変調器・光スイッチ

InP 系材料を用いたマッハ・ツェンダー (MZ) 変調器では、3 インチウェハープロセスにより作製された InP 系多値変調素子の特性の詳細が報告された⁴⁾。3 インチウェハープロセス内で導波路幅分布 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ の高均一性と C バンド帯で 0.24 dB/mm 以下の低伝搬損失特性を示した。また、低

電圧駆動かつ 32 Gb/s 動作において、全 4 チャンネルの MZ 変調部の明瞭なアイ開口を確認し、本素子が 128 Gb/s 小型 DP-QPSK 変調器モジュール実現に有望であることが示された。

シリコン (Si) は InP と比較すると変調効率が悪いので、リング共振器やフォトニック結晶などを用いてサイズを削減する研究が進められている。フォトニック結晶のスローライト効果を用いてアーム長 200 μm の MZ 変調器において 10 Gb/s の NRZ 信号のエラーフリー動作が報告された⁵⁾。一方、注入効率の高い PIN ダイオードの電流注入型変調器においては、側面格子導波路型位相シフター MZ 型 Si 変調器で高速 50 Gb/s 動作が実現されているが、2013 年度は変調器のさらなる小型化・低電圧化に向けて、リング共振器に装荷した変調器の開発が行われた⁶⁾。位相シフターの全長は 30 μm で、電圧振幅 1.96 V_{pp} のプリ・エンファシス信号により変調器を駆動し、その結果、消光比が 4.58 dB の 50 Gb/s のアイの開口が報告された。

光スイッチでは、シリコンフォトニクス技術を用いた大規模光スイッチの研究が複数の機関で行われている。CMOS プロセスを適用し、電気配線を Al-Si 合金、ヒーターを TiN とすることによりリフトオフプロセスで作製した従来デバイスと比較して特性均一性の向上を確認し、8×8 の大規模スイッチを実現した⁷⁾。一方、InP を用いた大規模スイッチの検討も進んでおり、ノンブロッキング 8×8 InAlGaAs/InAlAs 光スイッチの報告がなされた⁸⁾。InP 系半導体で光スイッチを作製した場合は広い波長範囲でナノ秒程度の高速な経路切り替えが期待される。全体の素子長は約 12 mm である。13 mA 程度の電流注入でポートのスイッチングが報告された。

12.1.4 光検出器

近年、光通信システムの大容量化に伴い、光受信器の高速・高感度化への要求が高まってきている。アバランシフォトダイオード (APD) はその内部利得のため高い受光感度を得ることが可能であり、高感度な光受信器を実現するためのキーデバイスである。増倍層として InAlAs を用いた 25 Gb/s 級高速 APD においてダイナミックレンジの拡大のために、障壁緩和層を有する APD が提案された⁹⁾。作製した APD は低利得状態 ($M=2.8$) から 25 Gbit/s 動作が可能で高速性を有しており、提案構造の適用により、より高入力側へとダイナミックレンジを拡大可能であることが報告された。

InP 系半導体を用いたデジタルコヒーレント用レーザーが報告された¹⁰⁾。光ファイバーとの結合損削減のためのスポットサイズ変換器の作製が必要であり、そのため

に導波路を InP で埋め込むことが必要である。また信頼性の確保のための光検出器を InP により埋め込むことが重要である。これらを可能とするための一括形成プロセスが実現され、高結合効率特性と低暗電流化が報告された。

光吸収層にゲルマニウム (Ge) を用いた受光素子 (PD) を Si 導波路に集積した素子に関して、薄膜 Ge 層を用いた高速化が報告された¹¹⁾。Ge 層厚が $0.6 \mu\text{m}$ の場合において、50 GHz の周波数帯域と 1 V の低電圧で 40 Gb/s 動作が確認された。試料は、SOI (silicon-on-insulator) 基板上に Si 導波路を加工後、下部電極として B ドープ層を形成している。その後、 SiO_2 開口パターンを形成し、RP-CVD (reduced-pressure chemical vapor deposition) 法により Ge/Si 膜を選択エピタキシャル成長している。さらに、P ドープ層を形成後、Ti/TiN/Al 電極を形成する。キャリアドリフト帯域が周波数帯域を律速していることから Ge 層を $0.6 \mu\text{m}$ と薄膜化することにより、50 GHz の周波数帯域を得たとしている。

12.1.5 集積デバイス

InP 系光集積デバイスでは局発光用 (LO) として SG (sampled grating)-DBR-LD、 90° ハイブリッド、UTC (uni-travelling-carrier)-PD を集積化することで、高速な光 PLL (phase-locked loop: ループ帯域 1 GHz) が報告された¹²⁾。小型化・低消費電力化の流れからこのようなデジタルコヒーレント用レーザーの集積デバイスの研究開発が今後加速されてくると思われる。

レーザー、変調器、受光素子等のすべての光コンポーネントを単一シリコン基板上に集積して試作したチップ間光配線用シリコン光インターポージャーが報告された¹³⁾。レーザーは InGaAsP 活性層を用いた 13 チャンネルアレイチップ、Si 光変調器は MZ 型で電流注入により高効率に屈折率を変化させることで、位相シフターの作用長は $200 \mu\text{m}$ を実現した。受光素子は Ge を用いている。光コンポーネントの合計面積は、1 チャンネルあたり 0.0677 mm^2 であり、伝送密度として 30 Tb/s/cm^2 の高密度伝送を実現した。

シリコンフォトニクスオンチップ DQPSK (differential quadrature phase-shift-keying) 伝送デバイスの試作も報告された¹⁴⁾。DQPSK 変調器は MZI 変調器を 2 個用いており、小型化を目指してフォトニック結晶スローライト導波路を導入している。DQPSK レシーバーは MZ 型の変調減衰器、長尺細線導波路による固定遅延線とマイクロリングオールパスフィルター型可変遅延線、導波回路と位相チューナーで構成される 90° ハイブリッド、Ge バランス型フォトダイオードが集積されている。このような大規模ス

イッチは Si フォトニクス技術の優位性を示すうえで重要であり、今後さらなる大規模化と小型化が期待される。

12.1.6 非線形光学デバイス

現在光通信で用いられているエルビウム添加光ファイバー増幅器やラマン増幅器では信号光の直交する 2 つの光位相成分に等しい利得を与えるため、理想的な場合でも入力光の SN 比を半分に劣化させることが知られている。非線形光学効果におけるパラメトリック増幅過程を用いると光位相に応じた増幅特性を有する位相感応光増幅器が構成可能で、理想的な状態では入出力間で SN 比を劣化させない無雑音増幅が可能となる。周期分極反転構造をもつ LiNbO_3 導波路デバイスを用いて構成した中継増幅が可能ないんライン型の位相感応光増幅器により多中継伝送の実験的検証が報告された¹⁵⁾。将来の光通信システム適用に向けて今後の進展が期待される。また、分極反転アンテナ電極変調器を用いたミリ波帯無線-光信号変換の指向性制御についての報告がなされた¹⁶⁾。高速な無線通信システムや高分解能なレーダーシステムへの応用が期待される。また、表面活性化接合とイオンスライシングによる LiNbO_3 の薄膜導波路や $1 \mu\text{m}$ 級の微細周期反転構造作製技術^{17,18)}、周期分極反転 LiNbO_3 による非線形光学デバイスと電気光学変調器のモノリシック集積技術¹⁹⁾ が報告されるなどデバイス技術の高度化への取り組みも続けられており、今後の動向に注目したい。

12.1.7 展望

シリコンフォトニクス技術を用いた光変調器において伝送実験等に耐えるレベルの特性がいくつか報告されてきた。受信側においては 90° ハイブリッド等のパッシブ回路と Ge 受光素子の組み合わせを用いて国内外の多くの研究機関から報告がされるなど、大きな進展があった。

一方、InP 系半導体レーザーにおいても高温・高速な直接変調の報告が報告されるなど、大きな進展があった。また、モジュールの小型に向けたモノリシック集積も進んでおり、長距離伝送からデータセンター内の光インターコネクションまで、さまざまな伝送距離において光素子の集積化に向けた検討が進むことが予想される。(松尾慎治)

12.2 光通信以外のデバイス

2013 年は、ディスプレイ関連を中心に興味深い進展を遂げた年であった。そのなか、まずは製品化されている技術について述べ、続いて研究でのトピックスを順次紹介していきたい。

2012 年 10 月 1 日、東京出張の夜、東京駅のプロジェクトマッピングを見る機会があった。出張の乗り換えで丸の内出口から道路の対面側に渡り、東京駅が彩られるさ

まを見たこととなる。また、TV コマーシャルでお馴染みとなったが、2013年1月29日、東京増上寺で開催された参加型イベント「FULL CONTROL TOKYO」で、きゃりーぱみゅぱみゅさんの演じるライブでもスマートフォンと連動したプロジェクションマッピングが見られ、「表示」というくりで見られるディスプレイも大きくなったと感心した次第である。現在、20,000 lm 級のキセノンランプのプロジェクターを用い、将来的にはレーザープロジェクターへ移行し、色再現性、寿命、輝度、効率向上されるという。レーザープロジェクター関連では、パイオニアの技術 AR ナビゲーションが2011年度経済産業省の Innovative Technologies 採用テーマにもなり、車載用ヘッドアップディスプレイとしても注目されているところである。脇にそれるが、ゴーグル装着用ディスプレイ MOD LIVE 等ではスキー時の速度、ジャンプの高さやナビ連携等も表示可能で、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 事業も活発化している。

LED については、素人感覚で申し訳ないが、最近近所の量販店でも40 W 蛍光灯型が5,000円台で購入でき、ネットでも4,000円を切るくらいまで値段が下がってきた。電球タイプ (E26 口金) では500円を切る品もある。わが家の台所でも数年前、3,000円台のころ電球タイプを購入したが、演色性が課題であった。量子ドットに期待したい。LED 信号も、積雪対策で20°ほど下向きになったフラット型が出始めた。今後も利用が進むであろう。

ディスプレイ関連では、有機 EL に大きな進展がみられた。2012年末より、韓国勢が酸化半導体 TFT により大面積55型有機 EL テレビを量産開始してきた。それに対して、CES 2013 では、パナソニックとソニーがインクジェットプリント (IJP) 印刷方式を用いた酸化半導体 TFT による56型4K有機 EL テレビ (UHD) を公開している。SID 2013 では、AUO が65型のFHDの有機ELパネルを、東芝が223 ppi フレキシブルパネルを発表している。IFA 2013 では、LG が77型の湾曲タイプの4K有機ELテレビを初披露している。高精細化パネルでは、ジャパンディスプレイが白色OLEDとカラーフィルターの組み合わせとなる5.2型423 ppi FHD パネルを開発・発表している。

液晶関連技術も大きく進歩した年といえる。2012年12月のIDW '12でパナソニックからの世界初の光配向によるIPS液晶テレビ (1,920×1,080, 47, 55インチパネル) が報告され、新たな製品についても各メーカーから4Kパネルや60型以上の大面積パネルの発売が加速化している。FPD International では、フィリップスとシャープが85型8K裸眼3Dディスプレイを紹介した。高精細化について

は、ジャパンディスプレイによる発表が相次いだ。AM-FPD 2013 等で651 ppi 超高精細パネルを発表していたが、FPD International では、5型タッチセンサー内蔵版445 ppi FHD パネル等を、IDW 13では光配向のIPS-NEO, RGBW の WhiteMagic, インセル型タッチパネルの pixel eye の次世代技術が紹介された。昨年末には、CES 2014 の情報も飛び込んできた。LG とサムスン電子が別々に105型のCurved UHD LCD を発表するという。臨場感が楽しめそうに期待できる。

太陽電池では、2012年度国内の太陽電池発電システム市場が1兆3,198億円と初めて1兆円を突破した。メガソーラーの建設も活発化し、70 MW の「鹿児島七ツ島メガソーラー発電所」をはじめ、多くの発電所建設が続いている。環境エネルギーの観点からの建物建設のトピックス例として、東工大ではグリーンヒルズという太陽電池と燃料電池で自給自足を実現するビルが登場している。

イメージセンサー関連では、ミラーレスカメラの普及率が半数近くとなり、フルサイズ規格のイメージセンサーも出て数年が経ち、2013年は待ちかねたフルサイズイメージセンサー搭載ミラーレスカメラも登場した年となる。さまざまな商品が大きく普及した今日のごとくといえよう。

続いて、2013年に注目された研究のトピックスを挙げる。有機EL素子では、まず、2012年末の発表となるが、九州大学最先端有機光エレクトロニクス研究センター (OPERA) 安達千波矢氏のグループからの、蛍光材料でありながら内部量子効率がほぼ100%という有機ELの新発光材料開発が発表され、注目されている²⁰⁾。これまで内部量子効率が高い材料系は、Ir等のレアメタルを利用する三重項発光材料に限られていたが、新材料は熱活性型遅延蛍光 (TADF) を用い、内部量子効率が90%以上を示す材料系の開発に成功している。「初期のTADFのOLEDは効率が低く、全く注目されなかったが、現在は違う」、「三重項材料と異なり、重金属材料の利用という制約がない。皆さんも一緒に(材料合成の)研究を行ってほしい」等の安達氏からのメッセージもあり、今後の研究が大いに期待される。山形大学の城戸淳二氏のグループからは、2013春季応物講演会およびEM-NANO 2013で、低電圧緑色リン光OLEDの報告があった^{21,22)}。発光ピーク波長523 nmから予測される駆動電圧の理論限界より大幅に低電圧で発光する。2.07 V で1 cd/m²の発光が始まり、2.25 V, 100 cd/m²で、電力効率116 lm/Wとなる。

液晶で最近の話題としては、フレキシブル基板上へのUV光照射スリットコートによる液晶配向が長岡技科大の木村宗弘氏から報告されている^{23,24)}。スリットによる液晶

の流れを UV 光で固める。IDW 2012, 2013 の展示およびブルーフェーズ (BP) 相応用については AM-FPD 2013 の招待講演等で報告されており, 数 cm 角程度の均一配向セルがデモンストレーションされた。フレキシブル化へはカラーフィルター, 偏光板, 位相差板などの部材も必要となるが, さまざまな技術的課題を解決することで, curved LCD を超える面白い応用に繋がることを期待したい。

ディスプレイ関連技術として, 薄膜トランジスタ (TFT: thin film transistor) でのトピックスについて触れる。TFT 作製では, 最近, 印刷・塗布型の有機成膜が盛んである。単結晶成長には, 良質な種結晶とゆっくりとした結晶成長速度が必要となるが, その概念を有機単結晶成長に適用した内容が報告された。まず, 産業技術総合研究所フレキシブルエレクトロニクス研究センター (FLEC) からのダブルショット IJP による単結晶薄膜成長²⁵⁾ や, プッシュ成膜プロセスによる低分子有機半導体による TFT^{26, 27)} が報告されている。阪大・東大の竹谷氏のグループからは, 改良されたエッジキャスト法による高移動度有機薄膜成長が報告された^{28, 29)}。また, 物材機構の坂本氏からフロー・コーティング法によるボトムコンタクト TFT による高配向 TIPS ペンタセンが報告されている³⁰⁻³²⁾。以上の報告をまとめた有機成膜法の招待講演の競演が, EM-NANO 2013 で報告された³³⁻³⁵⁾。また, 材料系の工夫では, 非対称分子構造をもつ液晶性有機半導体薄膜成長で, 移動度 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度の値が報告されている³⁶⁾。無機酸化物半導体系でも, 溶液プロセスによる TFT が研究されている。高知工科大の古田氏のグループでは, ミスト状態の原料を用いた新しい CVD 法で AlO_x と IGZO 成長を行っている^{37, 38)}。また, 韓国のグループでは, 各種の酸化物半導体と絶縁膜形成, 低温 TFT プロセスと IJP, グラビア印刷法, そしてセンサー, メモリー応用の研究が進められている^{39, 40)}。今後, スパッター等の物理気相成長に頼らない大面積化法として大いに期待される。

太陽電池のトピックスは, 何といても有機/無機ハイブリッドペロブスカイト系太陽電池となる。効率 15.0% がスイス連邦工科大学ローザンヌ校の Grätzel 氏らの研究チームから報告された。ペロブスカイト系色素を多孔性金属酸化膜内へ 2 段階に分けて蒸着させるプロセスを用いる⁴¹⁾。構造は, Glass/FTO/ TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /spiro-MeOTAD/Au である。聞くとところによると, Grätzel 氏のグループのお弟子さんが, 桐蔭横浜大の宮坂力氏のところで溶液系有機/無機ハイブリッドペロブスカイト系太陽電池作製法を学び, 技術を持ち帰られた後の試作結果とのことである。SSDM 2013 でも, 同太陽電池に関連した招待

講演が成された⁴²⁾。デバイスとしてみた太陽電池特性は, 効率向上が最重要課題である。アモルファスシリコンを超える性能に加えて, 簡単塗布型での大面積デバイス作製可能な系として, 一層の特性向上が望まれる。

イメージセンサー・スキャナー関連では, OLED 光源をもつ TFT 駆動イメージスキャナー動作が名古屋市工業研究所グループから報告されている^{43, 44)}。フレキシブル化を考えると光源一体化は必須であり, その点では興味深いスキャナーデバイスができています。

以上, 筆者の情報収集能力不足ですべてのトピックスを網羅できていないが, 2013 年のオプトエレクトロニクス・光デバイスのトピックスを記載した。今後も, 高解像度, 大面積, フレキシブルなど, 表示・画像デバイスなど関連技術を中心に興味深い展開が続いてゆくものと期待したい。
(岡田裕之)

文 献

- 1) B. Miliivojevich *et al.*: *OFC* (2013) OTh1D.1
- 2) K. Goi *et al.*: *OFC* (2013) OW4J.4.
- 3) 中原宏治他: 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会 (2013) C-4-1.
- 4) 北村崇光他: 秋季応物講演会 (2013) 19p-A8-14.
- 5) H. C. Nguyen 他: 春季応物講演会 (2013) 30a-B3-5.
- 6) 馬場 威他: 秋季応物講演会 (2013) 20p-A8-7.
- 7) 鈴木恵治郎他: 春季応物講演会 (2013) 27p-PA2-17.
- 8) 額綱博岐他: 秋季応物講演会 (2013) 19a-P2-12.
- 9) 名田允洋: 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会 (2013) C-4-24.
- 10) 井上尚子他: 秋季応物講演会 (2013) 16a-A8-6.
- 11) 野口将高他: 秋季応物講演会 (2013) 20p-A8-4.
- 12) L. A. Coldren *et al.*: *OFC* (2013) OTh3H.5.
- 13) 賣野 豊他: 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会 (2013) C-3-18.
- 14) 矢澤直哉他: 秋季応物講演会 (2013) 19a-P2-25.
- 15) 梅本毅何他: 春季応物講演会 (2013) 28p-B3-9.
- 16) 高武直弘他: 秋季応物講演会 (2013) 19p-A8-2.
- 17) 田中圭裕他: 春季応物講演会 (2013) 29a-B3-1.
- 18) 藤本拓也他: 秋季応物講演会 (2013) 19p-A8-6.
- 19) 圓佛晃次他: 春季応物講演会 (2013) 29a-B3-7.
- 20) H. Uoyama *et al.*: *Nature*, **492** (2012) 234.
- 21) 笹部久宏他: 春季応物講演会 (2013) 29a-G13-5.
- 22) J. Kido: *EM-NANO* (2013) A4-1.
- 23) M. Kimura *et al.*: *J. Soc. Inf. Display*, **20** (2012) 633.
- 24) M. Kimura *et al.*: *AM-FPD* (2013) 33.
- 25) H. Minemawari *et al.*: *Nature*, **475** (2011) 364.
- 26) M. Ikawa *et al.*: *Nat. Commun.*, **3** (2012) 1176.
- 27) 井川光弘他: 春季応物講演会 (2013) 28a-G15-4.
- 28) K. Nakayama *et al.*: *Adv. Mater.*, **23** (2011) 1626.
- 29) J. Soeda *et al.*: *Appl. Phys. Exp.*, **6** (2013) 076503.
- 30) 坂本謙二他: 春季応物講演会 (2012) 16a-F9-2.
- 31) 坂本謙二他: 秋季応物講演会 (2013) 19p-C5-20.
- 32) K. Sakamoto *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53** (2014) 02BE01.
- 33) T. Hasegawa: *EM-NANO* (2013) A1-1.
- 34) J. Takeya: *EM-NANO* (2013) SS2-1.
- 35) K. Sakamoto: *EM-NANO* (2013) SS2-4.
- 36) 飯野裕明他: 春季応物講演会 (2013) 28p-G15-4.

- 37) T. Kawaharamura *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **47** (2008) 4669.
 38) M. Furuta *et al.*: IEEE Electron Dev. Lett., **33** (2012) 851.
 39) S. Yoon *et al.*: EM-NANO (2013) B1-1.
 40) S. J. Kim *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **53** (2014) 02BA02.
 41) J. Burschka *et al.*: Nature, **499** (2013) 316.
 42) H. J. Snaith: SSDM (2013) 1138.
 43) M. Murase *et al.*: FlexTech (2012) S9-I2.
 44) M. Murase *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **52** (2013) 05DC21.

13. 光 通 信

東京工業大 植之原裕行

13.1 概 要

長距離基幹系を担う大容量光通信システムには、1本のファイバーあたり 100 Tb/s を超える伝送容量が研究開発の中心となっており、2012年に初めて 1 Pb/s を超える報告がなされた^{1,2)}。その段階で顕在化してきた課題は、光パワー密度増大に伴う非線形ひずみ以外にファイバーフューズの問題³⁾であり、その解決を目的とした新規の光ファイバーの研究開発が盛んとなっているのが大きな特徴である。その方向性は大きく2つあり、①1本のファイバー内に複数のコアを有するマルチコアファイバー (multi-core fiber; MCF)、②1つのコア内に複数の横モードを許すマルチモードファイバー (multimode fiber; MMF) により光パワー密度の低減を狙ったものであり、いずれも空間分割多重 (spatial division multiplexing; SDM) 伝送の技術に位置づけられる。

一方、都市内リングネットワークでは、チャンネルに割り当てられた波長によらず信号の分離・挿入を可能とし、かつリング間を光信号のまま通過させる再構築可能な ROADM (reconfigurable optical add-drop multiplexer) の開発およびその構成部品である波長選択スイッチ (wavelength selective switch; WSS) が中心となっている。チャンネル数の増加を目的として、高密度集積化によるシステムの小型化が求められている。

さらに、データセンター内の大容量・低消費電力化を目的とした光送受信デバイスの開発も急務となっている。

本誌面を借りて、以上の動向と今後の展望について述べたい。

13.2 長距離大容量伝送システム関連

SDM 関連の研究開発が長距離大容量光通信システムの中心となっており、応用物理学会・OPJ などの講演会で議論がなされた。OPJ 2013 では、「光空間多重通信における光学技術の活用を考える」と銘打ったシンポジウムが開催され、これまでの研究開発の動向を振り返るとともに、今後の研究の方向性を議論する場が持たれた。その他の学会

においても、関連する技術の報告がなされた。

伝送路では、MCF とともに、MMF では受信側でのモード分離処理にデジタル信号処理回路での multiple-input multiple-output (MIMO) を導入することで実現可能としているが、モード数を少数に絞って受信側での処理を軽減する少数モードファイバー (few mode fiber; FMF) の状況が報告された⁴⁾。また MCF, MMF に複数の単一モードファイバー (single mode fiber; SMF) の信号を接続する入出力 (ファンイン・ファンアウト) デバイス, SDM チャンネルを一括で増幅するマルチコア増幅器の開発状況とその重要性にも言及があった。

これらのデバイスを実現するには低損失や広波長帯域性が要求されること、モード多重伝送ではさらにモード間のクロストークの問題についても言及された⁵⁾。ファンイン・ファンアウトデバイスの実現手段としては導波路型が既存光波回路との整合性や量産性の上で優位と考えられ、19 コアファイバー用の PMMA コアと UV 硬化エポキシ樹脂クラッドの積層構造⁶⁾、2 段コアファイバーを用いた溶融遠心型の報告があり⁷⁾、少しずつ実用に近い構造が増えてきている。しかしながら、前述の要求度を考えると空間光学系の可能性も広がると考えられ、MCF のコア間の結合効率のばらつき抑制を例に、その設計論についての議論もなされた⁸⁾。

モード多重については、軌道角運動量 (Laguerre-Gaussian; LG) モードを用いる方式についても取り上げられた^{4,9)}。LG モードでは光軸に垂直な平面内の回転方向の位相分布の直交性で多重化を行う方式¹⁰⁾であり、空間光学系との整合性もよいと考えられる。LCOS (liquid crystal on silicon) を用いた LG モード生成においては、位相だけでなく振幅も制御する複素振幅変調によって、ビームの純度 99% (位相変調よりも 10% 以上の改善) が実現できることも示された⁹⁾。別のアプローチとして、半導体ブラッグ反射鏡導波路のスローライトモードの伝搬角依存性を活用した円形導波路構造の検討内容が報告された¹¹⁾。

SDM 伝送では、複数のコアあるいはモードを一括して増幅する光増幅器 (multicore erbium-doped fiber amplifier; MC-EDFA あるいは multimode EDFA; MM-EDFA) が中継伝送の実現に必須である。MC-EDFA については、コアごとに励起すると励起レーザーの数がコア数に比例して増加するため、その課題解決のため複数のコアを一括励起する手法が報告された¹²⁻¹⁵⁾。マルチコア用の光アイソレーターを組み込むとともに、コア間のクロストークを低減するための工夫として屈折率分布にトレンチを付加する構造に加えて、コア間の配置を工夫する手法も導入されている¹³⁾。

また Er と Yb を共添加する構造により、励起光の吸収効率を向上させる工夫も報告された¹⁴⁾。MM-EDFA としては、高次モードの双方向励起¹⁶⁾や、フォトニック結晶ファイバーによるエルビウム分布制御¹⁷⁾を用いたモード間利得の平坦化などの進展があった。

その他、光ファイバーとしては MCF と MMF を組み合わせた 2 モード 7 コアファイバーが作製され¹⁸⁾、断面積あたりの総周波数利用効率を最大化するための MCF 設計指針についての解析的検討が行われた。耐非線形性を多少犠牲にしても有効コア断面積を小さめの領域でコア間を縮小し、コア間クロストークを低減する設計により既存 SMF の 20 倍程度の改善が見込めるとの報告がなされた¹⁹⁾。モード多重・分離に不可欠なモード変換器のマッハ・ツェンダー干渉計構造のスイッチ提案²⁰⁾や方向性結合器型の平面光波回路での作製・評価の報告もなされた²¹⁾。

13.3 メトロネットワーク関連

ROADM の研究対象は、信号波長によらず (colorless)、任意の出力に転送ができ (directionless)、異なるチャネル信号の衝突を回避する (contentionless) CDC 機能に加えて、ユーザーの求める帯域幅に応じて帯域を可変にする (gridless) 機能にまで至るようになってきた。応用に関して、トポロジーや品質などのネットワーク資源を仮想化し、要求される帯域や機能に応じて OpenFlow コントローラーとよばれる制御部で再構築を可能とするネットワーク (software defined network; SDN) への適用を目的とした報告がなされた²²⁾。帯域可変型 WSS の発展として、1 入力 30 出力の試作・評価の結果、挿入損失 9 dB 以下を実現している²³⁾。

13.4 光インターコネクション・光信号処理関連

光インターコネクションとしては、シリコンフォトニクス導入による低消費電力化を目指して、おもに光変調器の高速化・低駆動電圧化や高集積化の研究が盛んとなっている。その一例として、チップ間インターコネクションの取り組みが進展し、1 チップ内にハイブリッド搭載の化合物半導体レーザー・SOI (silicon on insulator) 基板上集積導波路配線・変調器・導波路型受光器による 13 チャネル・20 Gb/s 伝送 (30 Tb/s/cm²) が達成された²⁴⁾。また波長 850 nm 帯の面発光レーザー (vertical-cavity surface emitting laser; VCSEL) を用いた高速光リンクとしては、送信側駆動電気信号の予等化と受信側の等化器を導入することで 56 Gb/s のファイバー伝送が確認されている²⁵⁾。

光信号処理としては、周期分極反転ニオブ酸リチウム (periodically-poled lithium niobate; PPLN) 位相感応型増幅器 (phase sensitive amplifier; PSA) のインライン型モ

ジュールの損失低減を行うことで、外部利得 12 dB に改善し、ファイバー分散増加時の波形ひずみに対する受信感度改善 1 dB の結果を得ている²⁶⁾。

13.5 展 望

現在の 1 チャネル 100 Gb/s 級デジタル・コヒーレント光通信システムは実用化フェーズに入っており、すでに次世代として 400 G / 1 Tbps システムの研究開発に移行している。既存の光ファイバーを当面使用する前提では、波長分散・偏波モード分散による波形ひずみの影響を軽減するために高周波数利用効率の多値・複数搬送波変調方式のレベルを上げることがしばらくは続くであろう。ドライバーを含む送信器および受信器の構成が複雑化するため、高密度集積化の進展が必須であり、そのための開発が続くと予想される。その際に MCF・MMF が実用化されるためには既存の接続と同じ感覚で扱えるファンイン・ファンアウトデバイスは必須であり、空間光学系の重要性が再認識されるかもしれない。同時に、受信器のデジタル信号処理の負荷を軽減することも求められ、伝送路でのひずみを補償する全光処理による光強度・位相雑音の抑圧や、モード分離、等化機能の役割も必要になると期待する。

光インターコネクションとしては、装置間は低消費電力送受信器としてシリコンフォトニクスあるいは VCSEL の高速化・高密度実装が進展するであろう。

文 献

- 1) H. Takara *et al.*: *ECOC* (2012) Th.3.C.1.
- 2) D. Qian *et al.*: *FiO* (2012) FW6C.3.
- 3) S. Todoroki: *OFC* (2013) JW2A.11.
- 4) 淡路祥成: *OPJ* (2013) 13aDS2.
- 5) 久保田寛和: *OPJ* (2013) 13aDS4.
- 6) 渡邊達彦他: 信学会ソサイエティ大会 (2013) B-10-38.
- 7) 植村 仁: 信学会ソサイエティ大会 (2013) B-10-37.
- 8) 高橋浩一: *OPJ* (2013) 13aDS3.
- 9) 井上 卓: *OPJ* (2013) 13aDS5.
- 10) A. E. Willner: *ECOC* (2013) Mo.4.A.
- 11) 田辺賢司他: 秋季応物講演会 (2013) 19p-A8-15.
- 12) 増田浩次: レーザー研究, **41** (2013) 416.
- 13) J. Sakaguchi *et al.*: *ECOC* (2013) Th.1.C.6.
- 14) H. Ono *et al.*: *ECOC* (2013) We.4.A.4.
- 15) S. Takasaka *et al.*: *ECOC* (2013) We.4.A.5.
- 16) J. Yongmin *et al.*: *ECOC* (2013) We.4.A.2.
- 17) Le Cocq *et al.*: *ECOC* (2013) We.4.A.3.
- 18) 佐々木雄祐他: 信学会ソサイエティ大会 (2013) B-10-12.
- 19) 林 哲也: 信学会ソサイエティ大会 (2013) B-10-11.
- 20) 浜本貴一: 信学会ソサイエティ大会 (2013) C-3-76.
- 21) 植松卓威: 信学会ソサイエティ大会 (2013) C-3-78.
- 22) L. Liu *et al.*: *OECC/PS* (2013) TuQ3.
- 23) 小栗淳司: 信学会ソサイエティ大会 (2013) C-3-46.
- 24) Y. Urino *et al.*: *ECOC* (2013) Mo.4.B.2.
- 25) D. M. Kuchta *et al.*: *OFC* (2013) OW1B.5.
- 26) 遊部雅生他: 春季応物講演会 (2013) 29a-B3-8.

14. 光 記 録

京都工芸繊維大 武田 実

14.1 概 要

光ディスクは、CD (compact disc), DVD (digital versatile disc) に続く第3世代のBD (blu-ray disc) が2003年に市場投入されたが、2013年でその後10年経過したことになる。ハイビジョン対応TVが急速に普及するのに伴い、大容量デジタル記録可能(単層25GB)なBDによるDVDの置き換えが進み、BDの市場規模は着実に拡大しているが、かつてCD、DVDが市場投入されたときのような爆発的な普及拡大からはほど遠く、すでに頭打ちの様相を呈している。記録装置として競合するハードディスク、半導体メモリーが依然として高い記録密度、容量の増加ペースを維持しているのに対し、光ディスクは光ピックアップの短波長化、高開口数化の限界等から面記録密度向上はBD以降停滞していることがおもな要因と考えられる。現状はおもに多層化の方向で容量増加の検討が進行しているが、ディスク構造の複雑化や製造コストの問題の解決にはいまだ目途が立っていない。一方で、光ディスクに替わる技術として待望されるホログラム記録は、記録密度で1Tbit/inch²を超える方式が最近提案されたが、実用化にはまだ相当な道程がある。このような状況の中、光ディスクの新たな市場としてデジタルアーカイブのデータストレージ・システムが期待されており、2013年10月には長期保存用光ディスクのアーカイブガイドラインも策定され、アーカイブ記録用途に向けた研究開発が盛んになってきた。本稿では、おもに日本応用物理学会主催のISOMの発表から2013年の光記録技術関連の研究動向を振り返る。

14.2 ホログラム記録

ホログラム記録は学会においては次世代光記録技術として相変わらず最も発表件数の多いカテゴリであり、ISOM'13でも全体の30%以上を占めた。発表内容は、光学系、記録方式・システム、記録材料、信号処理など幅広いが、大容量化を目指した記録多重度向上に関する研究内容が特に多かった。

コリニア光学系方式においてマイクロレンズアレイを用いた位相変調により多重度を向上させ、ディスク1枚で700GB相当の容量を波長405nm、開口数0.85の記録光学系で達成した報告¹⁾や、透過型ホログラムと反射型ホログラムを同時に記録する光学系によりシフト多重度を向上させる方式の報告があった²⁾。またディスクの奥行き方向へも分割多重を行う三次元的シフト多重記録方式により、従来単層での記録多重度が175だったものを3層記録で

275まで向上させた報告もあった³⁾。

新たな記録方式として、デジタル信号処理を有効利用し、ランダム位相変調を加えた複素振幅信号を記録再生する方式が提案された⁴⁾。原信号をコンピュータ上でランダム位相変調し複素振幅をもつ信号に変換した後に、記録再生用光学系でホログラム媒体に記録し、信号再生でもコンピュータ上で位相共役計算を行い、シフト多重記録におけるSN比を大幅に向上させている。また記録用SLM (spatial light modulator)の各ピクセルデータを時系列信号として従来の光ディスクと同様のRLL (run length limited) 符号を用いて記録再生する方式において、シフト多重のトラック間クロストークを抑制するためにコリニア光学系のレファレンスパターンの最適化を検討した報告があった⁵⁾。

記録材料として従来の有機系フォトリソマーは、重合収縮率、機械的安定性、耐環境性などに問題があり、これらの難点を克服する無機系ナノ粒子とフォトリソマーのコンポジット材料の研究が進められている。シリカ粒子を用いたコンポジット材料により、屈折率変化量0.01程度で、収縮率0.5%以下、高耐熱性を有した記録材料を開発し、シフト多重記録数256を十分低いエラーレートで達成した⁶⁾。

14.3 多層方式メディア

従来型の光ディスク形態で1TB/枚以上の大容量化を目指す多層記録方式に関しては、記録再生方式・システム、記録メディア(材料)などの報告があった。

1層あたり容量で50GBが限界とすると層数は20以上必要になるが、光ピックアップの対物レンズの球面収差の制約から隣接層間の間隔は10 μ m以下になり、各層からの反射率は0.5%以下に低下するため、フォーカス、トラッキング等のサーボ信号の検出が非常に困難になる。各層からの反射光信号に、同じレーザー光源からの参照光を干渉させてサーボ用信号を増幅するホモダイン検出方式を適用し、実験ではフォーカス検出信号で約25dBの増幅率が得られ、シミュレーションでは層間隔5 μ mで40層まで可能とする報告があった⁷⁾。また、実用的な多層構造ディスクである、トラッキング用溝を形成しない多層記録層部とトラッキング用ガイド専用層(単層)を別途に設ける方式においては、ディスクの傾き(ティルト)により、記録済データエリアに誤って新たなデータを上書きする可能性があるが、それを防止するためのデータリンク用のバッファエリアを最適化する報告もあった⁸⁾。リンクエリアを必要最小限にし、そこでスムーズなトラッキングサーボ切り換えを行うことにより、高効率な多層ディスク

記録方式を提案しており、大容量化とともに高信頼性が要求されるアーカイブ記録への応用を目指すうえで有望な方式である。記録材料に関しては二光子吸収材料を用い30層記録を実現した報告があった⁹⁾。本材料をPMMA薄膜に分散させ評価した結果、二光子吸収断面積で734 GMを得た。記録再生光学系は波長405 nm、開口数0.65で、特殊な超解像膜構造を設けることにより最少記録マーク長で60 nmを達成した。

14.4 高密度化技術

面内記録密度向上に関しては、薄型ディスク(0.1 mm厚)とSIL(solid immersion lens)の組み合わせによる波長405 nm、開口数1.84の記録再生光学系を用いた100 GB容量ディスクシステムのプロトタイプ開発において、着実な進歩がみられた¹⁰⁾。ディスク表面の保護カバー層に高屈折率のSiNを適用し、記録補償、信号処理の改良等により、再生信号ジッターを改善した。高速回転可能な薄型ディスクを用い、1枚あたりデータ転送レートで500 Mb/sを目指している。同様にSILを用いるが、その先端部にAu薄膜のボウタイ型微細光アンテナを形成し、入射偏光方向を適合させギャップ部分に高強度光スポットを生成する報告があった。理論計算ではアンテナから2 nmの距離で9.5×8.4 nmサイズの集光スポットが得られている¹¹⁾。近接場記録なので、記録メディアの影響を大きく受けることが課題となる。これらの近接場的な記録方式は、レンズと記録メディア間の作動距離が数10 nm以下のため、ファーフールド領域での光記録を用いた従来の光ディスクのように民生用途での展開はあまり期待できず、将来実用化されても業務用途にとどまるものと予想されるが、ファーフールドでの高密度光記録において基礎研究段階ではあるが注目すべき報告があった¹²⁾。フェムト秒レーザー光(波長800 nm)を開口数1.4の顕微鏡対物レンズで集光し、二光子吸収によるフォトポリマー樹脂の光重合により三次元記録(造形)を行うが、記録用ビーム(writing beam)と同軸で、光重合反応を阻止するレーザー光(波長375 nm)のドーナツ型のビーム(inhabitation beam)を光学的に配置し、この2つのビームの強度を適切に調整して、光重合で形成されるポリマー樹脂のサイズ(線幅)を制御する。実際に形成された最少線幅は孤立ラインで9 nm、2本ラインで52 nmの解像が得られ、回折限界をはるかに超えた記録サイズを達成している。

14.5 アーカイブ記録

BDベースで大容量かつ長期保存可能で、HDD、テープ等に比較してきわめて低いTCO(total cost ownership)を実現するオプティカルライブラリーの開発に関する報告が

あった。3層BD(100 GB/枚)で500枚から成る50 TB容量分を4Uラックに収納し、トータル400 TB容量のライブラリーを構築する^{13,14)}。また記録データの保存安定性、信頼性を確保する技術として、新たな高効率ECC方式が開発された。またBD-Rディスクの信頼性評価基準に関する報告もあった¹⁵⁾。

歴史文化遺産、重要公式文書等の超長期データ保存用光記録システムの開発も進行している。MB程度容量の文書保存を、できるだけシンプル、低コストの記録再生装置で実現する目的で、増幅ユニットなしのフェムト秒レーザーを用い、専用開発された透明セラミックス材料にドット記録し、スマートフォンのカメラで再生する方式が提案された。ドットピッチ20 μmの画像を十分なコントラストで再生し、3億年以上の超長期保存が可能としている¹⁶⁾。

14.6 その他

ISOM '13では今回新たなスコープとしてバイオメディカル用光学分野を加え、関連する2つのスペシャルセッションを設けた。光ディスクの精密オプトメカトロニクス技術のバイオイメージング、センシング等への応用展開が期待されるが、BD再生システムをウィルス等の検出に適用する免疫反応分析に応用した報告があった。保護カバー層のないBD記録型ディスクの表面および磁気ビーズ(直径200 nm)を抗原または抗体で修飾し、対応するバイオマーカーを介したディスク表面への磁気ビーズの結合数を光ピックアップでカウントすることで、高感度で定量的な免疫反応検出が可能としている¹⁷⁾。

14.7 展 望

民生用途では頭打ちになっている光ディスクのビジネス分野で当面最も有望視されるのは、業務用途のアーカイブ記録システムであり、既述した多層ディスクもこの用途を目指した実用的検討が進行している。競合技術に比較して長期保存性、信頼性とともTCOで大きなメリットを有する光ディスクベースのアーカイブシステムが、データセンター、図書館、博物館等に将来導入されることを期待する。またホログラム記録も次世代光メモリーとして研究開発が着実に進行しており、実用化へ繋がるブレークスルー的技術の提案を期待したい。

文 献

- 1) C. Sun *et al.*: ISOM (2013) Tu-H-01.
- 2) H. Kurata *et al.*: ISOM (2013) Tu-H-03.
- 3) T. Nishizaki *et al.*: ISOM (2013) Tu-I-24.
- 4) A. Okamoto *et al.*: ISOM (2013) Mo-E-01.
- 5) M. Kawasaki *et al.*: ISOM (2013) Mo-C-03.
- 6) Y. Tomita *et al.*: ISOM (2013) Mo-C-01.
- 7) T. Kurokawa *et al.*: ISOM (2013) Mo-B-02.

- 8) T. Ustui *et al.*: *ISOM* (2013) Mo-B-03.
- 9) Y. Wu *et al.*: *ISOM* (2013) Mo-B-01.
- 10) D. Koide *et al.*: *ISOM* (2013) Th-M-03.
- 11) H. Wang *et al.*: *ISOM* (2013) Th-M-02.
- 12) Z. Gan *et al.*: *Nat. Commun.*, 4 (2013) 2061.
- 13) Y. Choi *et al.*: *ISOM* (2013) Mo-A-02.
- 14) T. Yasukawa *et al.*: *ISOM* (2013) Th-PD-01.
- 15) Y. Jo *et al.*: *ISOM* (2013) Mo-D-03.
- 16) R. Imai *et al.*: *ISOM* (2013) Mo-D-01.
- 17) Y. Hasegawa *et al.*: *ISOM* (2013) Tu-F-02.

15. 視覚光学

横浜国立大 瀬川かおり

15.1 概要

近年、照明光源の技術の発展に伴い、さまざまな照明や呈示デバイスが開発されている。視覚光学の分野では、これらの新しい製品に対する視認特性や規格の制定に向けた研究が数多くみられた。また、純粋な視覚特性の解明を目指した研究のみならず、現実世界の建築物を想定したときの視覚特性の解明にも力を注ぎ、複数の学術分野にわたる研究も目立った。そして、近年注目されている質感認知特性に関する研究も新たな展開をみせつつある。本稿ではこれらの内容を中心に、2013年の視覚光学に関する研究内容を概説する。

15.2 照明、呈示デバイスの視認特性

近年、われわれを取り巻く照明環境や呈示デバイス環境は様変わりしている。白熱電球や蛍光灯から新光源発光ダイオード(LED)や有機ELへの移行が急速に進んでいる。これらの発光体は、省電力やコンパクトさなどの特徴から、さまざまな場面で呈示デバイスや照明として製品化可能な利点がある。しかし、従来の光源とは発光形態等が異なるため、視対象の見え方に違いが生じてくる可能性がある。そこで、これらの照明下での視対象や呈示デバイスの視認特性などの研究が数多く報告された。たとえば、店舗の照明を想定したLED照明と蛍光灯下では背景と対象の色の組み合わせにより視対象の可読性に違いが生じること¹⁾や、道路灯において、ナトリウム灯やレンズ制御のLED照明より反射板制御のLED照明が視機能的に優位性を示すこと²⁾、濃霧中では青色相のLED色光の視認性が劣化すること³⁾などの報告がみられた。また、有機ELに関しては、輝度勾配値が大きい刺激ほど輝度の知覚的不均一性が高くなること⁴⁾、快適性の評価への光源面積の影響についてLED照明より有機EL照明の優位性を示したもの⁵⁾などがある。

15.3 明るさ知覚、色知覚特性

照明技術の発展に伴い、公共環境、家庭環境でさまざま

な照明光が用いられている。照明計画においては、光環境の中でも特に人間が感じる明るさが快適な環境にとって重要視されている。明るさを表す単位としては一般的に照度が用いられている。しかし、空間全体の明るさは照度では十分に表現できず、実際に感じる明るさ感は、照度が同じであっても照明環境によって異なる。近年、さまざまな観点から明るさ感の指標化について提案されている。2013年もこれらの報告がいくつかみられた。輝度のばらつきを考慮し、明るさ感は平均輝度と対数輝度値の標準偏差の予測式で表現できること⁶⁾や、さまざまな視野位置における明るさ感度を測定したもの⁷⁾、知覚明度と明るさ感を比較したもの⁸⁾などがある。また、現実環境を模擬した研究では、部屋の家具の色と数が明るさ感に及ぼす影響について⁹⁾や、明るさ感に窓から昼光が差す影響について¹⁰⁾、照度変化に対するモバイル端末画面の明るさ知覚について¹¹⁾などがある。

また、照明光には色みがあり、光環境では明るさ感だけでなく照明光による色み知覚も重要である。人間には、照明光が変化しても知覚される色はそれほど変わらないという色恒常性の特性が備わっている。色恒常性は錐体細胞やそれ以降の順応効果、照明推定や物体分光反射率の推定など多くの要因が考えられ、長年にわたり研究が行われているが、いまだ未解明の部分が多い。昨年いくつかの色恒常性の研究報告があった。鏡面反射強度と色恒常性について調べたもの¹²⁾や、カラーネーミング法を用いて色恒常性の成立度合を定量化したもの¹³⁾、色恒常性の成立要因に関して照明の推定が及ぼす影響について調べたもの¹⁴⁾などがある。

また、近年、色覚異常者や高齢者の色の見え方のシミュレーションが可能なアプリケーションなどの開発が行われるなど、一般市場での色のバリエーションが重要視されている。2012年に引き続きいくつかの報告がみられた。色恒常性に対する色弱模擬フィルターおよび高齢者模擬フィルターの及ぼす影響について¹⁵⁾や、二色覚者の模擬モデルを視覚探索課題の側面から検討し、反応時間のずれを改善させたもの¹⁶⁾などがある。

15.4 立体映像の視認特性

立体ディスプレイが一般市場に出回るようになり、一般家庭で立体映像に触れる機会が増えている。それに伴い、デバイスの設計において、ユーザーが知覚する奥行き感や疲労感の特性解明など、複数の問題が生じている。奥行き知覚に関して、基礎研究を含めいくつかの研究報告があった。運動視差(頭部運動をしたときに生じる網膜像の時間的な変化)による奥行き知覚に関して観察者の頭部の前後

方向の影響を調べたところ、奥行き検出閾値では水平方向の頭部運動と違いがみられなかったが、刺激形状が変化する条件では前後方向の運動の劣化が生じることを示したものの¹⁷⁾や、交差、非交差の両眼網膜像差による奥行き知覚を上視野と下視野で調べたもの¹⁸⁾などがある。また、立体映像観察時に能動的頭部姿勢が視覚疲労に与える影響について調べたもの¹⁹⁾など、映像観察時の自己運動の影響についての報告もいくつかみられた。そのほか、臨場感研究の新たなパラダイムという特集が生まれ、3D映像の生体影響と臨場感に関する記事も紹介されている²⁰⁾。

15.5 質感認知特性

2010年から新学術領域研究として質感認知特性の解明のための本格的なプロジェクトが始まった。われわれは物体を見ただけでその質感を認知することができる。近年コンピューターグラフィックス(CG)技術が発達し、映像でリアルな世界を表現できるようになったが、生成された画像のどのような情報が質感認知に関わるのかは明確でない。人間がどのように質感認知を行っているのかを解き明かし、工業技術の発展へと結びつけることがこのプロジェクトの大きな目的となっている。昨年も引き続き多数の研究報告がみられた。

プロジェクトの立ち上げ当初からテーマの中心である光沢感については、その認知特性が徐々に明らかになってきた。たとえば、輝度やひずみ度といった低次の画像統計量だけでなく、鏡面反射成分と拡散反射成分が関わる高次処理が関与していることが示唆されている。この内容をさらに深く追求し、輝度成分が視覚系で別々に処理されていること²¹⁾、高次処理の光沢感は周辺視野より中心視野への影響が大きいことが示された²²⁾。そのほか、網膜像運動が光沢感を上昇させることを示したもの²³⁾や、局所的反射特性が光沢感を決定する場合があること²⁴⁾などが示された。また、光沢感に順応する手法を用いて光沢感の手がかりについて明らかにした報告²⁵⁾などがみられた。光沢感以外の質感認知の報告もみられた。たとえば、液体の知覚について画像情報のひずみ²⁶⁾や運動情報²⁷⁾が与える影響について調べたものや、木の質感知覚について視覚、聴覚、触覚についての質感評価実験を行ったもの^{28,29)}などがあった。

15.6 展 望

次世代照明としてLEDや有機ELは生活に浸透しつつある中、今後もその視認特性の解明や評価の基準化を早急に行う必要があると思われる。そして、実空間を考慮した明るさ、色知覚特性も着目され、実用面での視覚特性のさらなる解明が行われることが期待される。質感認知特性に関

する研究は、液体の知覚特性などの新たな展開がみられた。今後の質感研究の進展が、アプリケーションなどの応用面だけでなく視覚の基本特性の解明につながり、両者の側面から視覚特性が注目されることが期待される。

文 献

- 1) 久保千穂他：照明学会誌，**97** (2013) 77.
- 2) 佐藤宏幸他：照明学会全国大会 (2013) 8-11.
- 3) 畢 佳奇他：照明学会全国大会 (2013) 8-3.
- 4) 川島祐貴他：照明学会全国大会 (2013) 8-1.
- 5) 横山亮一他：照明学会全国大会 (2013) 8-25.
- 6) 高 秉佑他：照明学会誌，**97** (2013) 429.
- 7) 綿貫 將他：照明学会全国大会 (2013) 8-22.
- 8) 山口秀樹他：照明学会全国大会 (2013) 8-33.
- 9) 荒川 溪他：OPJ (2013) 12aC4.
- 10) 田中亮介他：OPJ (2013) 12aC5.
- 11) 瀬川かおり他：OPJ (2013) 12aC3.
- 12) 赤堀明日香他：OPJ (2013) 12aC1.
- 13) 中川 亮他：OPJ (2013) 12aC2.
- 14) 田中いづみ他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 1p19.
- 15) 橋田美緒他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 1p18.
- 16) S. Sunaga *et al.*: Opt. Rev., **20** (2013) 83.
- 17) 藤井 稔他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p08.
- 18) 松田修平他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p12.
- 19) 松下恭昌他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p18.
- 20) 安藤広志：映像情報メディア学会誌，**67** (2013) 296.
- 21) 永井岳大他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2o07.
- 22) 王 勤：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p23.
- 23) 上原太陽他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p24.
- 24) 吉川 諒他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p22.
- 25) 西島 遼他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 1p08.
- 26) 河邊隆寛他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2o05.
- 27) 丸谷和史他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2o06.
- 28) 藤崎和香他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p25.
- 29) 時田みどり他：日本視覚学会冬季大会 (2013) 2p26.

16. 光源・測光・照明

パナソニック(株) 向 健二

16.1 概 要

発光ダイオード(LED)を用いた照明製品が一般に普及してきており、それに伴い、光源・測光・照明分野の研究開発のテーマもLED関連のものが大半を占めるようになってきた。照明学会の全国大会では、固体光源デバイスとそのさまざまな用途に合わせたアプリケーション開発の最新動向を解説するシンポジウムや、屋外環境でも積極的に使用されるようになったLED照明器具のグレアに関して、研究調査委員会で検討した内容に関するシンポジウムが開催された。また、照明学会誌3月号では、「LED照明を支える光測定技術」と題した特集が生まれ、LEDの新製品開発やその普及の下支えとなる測光技術の最新動向が紹介された。一方、LED照明器具は光束の減退のしかたが蛍光灯などの従来光源を用いた照明器具とは異なるた

め、LED に対応した照明設計の保守率と保守計画に関する照明学会技術指針の増補版¹⁾が発行された。

16.2 光源

光源の分野でも、LED 関連の研究開発の成果が多く報告された。一例として、n-ZMO ナノワイヤと p-GaN 薄膜による紫外 LED²⁾、ヘテロ LED³⁾ の開発について報告されたほか、LED を用いた道路交通信号電球の開発⁴⁾、広配光 LED 電球の光学的検討⁵⁾、ミニクリプトン型 LED 電球の開発⁶⁾ など、従来の白熱電球代替の LED 電球の研究開発に関する報告があった。また、照明学会のシンポジウムにおいては、LED 開発の現状と将来に関する総論⁷⁾ が報告された。

一方、放電ランプの電極材料の電子放出特性とプラズマ発光特性に関するシンポジウムも開催され、固体からの電子放出の基礎⁸⁾、電子放出能力に優れた新酸化物セラミックス電極⁹⁾、蛍光ランプの長寿命化のための電極設計¹⁰⁾、ランプ特性の電極材料への依存性¹¹⁾ などが報告された。

16.3 測光

配光や分光分布が従来光源とは異なる LED 光源の普及に伴い、新たな測光技術の開発が必要となってきた。そのため、照明学会誌「LED 照明を支える光測定技術」に関する特集号の中で、LED 測光技術開発の国内動向と国際標準化¹²⁾、配光測定を用いた全光束測定の不確かさ評価¹³⁾、ミラー型配光測定装置¹⁴⁾、配光測定装置と球形光束計の測定値の比較¹⁵⁾ に関して報告された。また、最新の測光技術として、デジタル画像による路面輝度の測光方法¹⁶⁾ や動画像による実空間輝度分布の光束連続測定¹⁷⁾ などのカメラで撮影した画像を用いた測光方法が報告された。

16.4 照明

LED 照明が一般的に広く使われるようになってきたが、LED は従来光源とは分光分布や配光が異なるため、グレアの感じ方も従来光源とは異なる可能性がある。照明学会全国大会では、LED 防犯照明の不快グレアに関するシンポジウムが開催され、照明学会の研究調査委員会で実施した各種防犯照明の屋外評価実験の概要などが報告された¹⁸⁻²²⁾。また、防犯照明は、従来光源と比較して分光分布設計の自由度が高い LED 照明の特長を活用できる分野でもあることから、照明学会誌「薄明りにおける目の特性に基づく高効率で安全な照明」に関する特集号では、薄明視レベルでの色の見え・明るさ知覚、CIE (国際照明委員会) によって構築された薄明視測光システムの概要、薄明視の目の分光感度に適した防犯灯などに関して報告された²³⁻²⁹⁾。

これらのほかにも、光色や分光分布に関する設計の自由度を活用して演色性を向上させた LED 照明³⁰⁾、その評価方法^{31,32)}、肌の色を好ましく見せる LED 照明³³⁾、植栽の色を好ましく見せる LED 照明³⁴⁾、文字の読みやすさを向上させた LED 照明³⁵⁾ などに関して報告された。

また、日中の照明環境が夜間の睡眠に影響を及ぼすことが明らかにされてきており、これに関連する研究報告があった^{36,37)}。

16.5 展望

LED を含む照明光の演色性の評価方法に関して、CIE で議論が進められている。TC (技術委員会) 1-90 では、平均演色評価数 (Ra) の計算式の改定が議論されており、TC1-91 では、鮮やかさや好ましさなどの色再現の忠実性以外の演色性評価方法に関して議論されている。平均演色評価数の改定は LED 照明だけでなく、蛍光ランプや HID などの従来光源の Ra 値の改定にも繋がることから、JCIE (日本照明委員会) でも対応する委員会を設置し、国内の意見を取りまとめて具申するなど、TC1-90 に対して積極的に貢献している。今後、色の見えの実態により合致した新しい平均演色評価数の計算式の成立に向けた活動が活発化すると予想される。

文献

- 1) 一般社団法人照明学会：照明設計の保守率と保守計画第 3 版—LED 対応増補版—, JIEG-001 (2013)。
- 2) 鉄山紀弘他：照明学会全国大会 (2013) 10-3。
- 3) 中村大輔他：照明学会誌, **97** (2013) 715。
- 4) 宮内真人他：照明学会全国大会 (2013) 9-4。
- 5) 飯塚亜紀子他：照明学会全国大会 (2013) 9-5。
- 6) 武長拓志他：照明学会全国大会 (2013) 9-6。
- 7) 天野 浩：照明学会全国大会 (2013) II-1。
- 8) 植月唯夫：照明学会全国大会 (2013) I-1。
- 9) 宮川直通：照明学会全国大会 (2013) I-5。
- 10) 鈴木 篤：照明学会全国大会 (2013) I-9。
- 11) 請川 信：照明学会全国大会 (2013) I-10。
- 12) 蔀 洋司：照明学会誌, **97** (2013) 147。
- 13) 神門賢二：照明学会誌, **97** (2013) 152。
- 14) 長谷川和雄：照明学会誌, **97** (2013) 157。
- 15) 大久保和明：照明学会誌, **97** (2013) 161。
- 16) 高橋陽平他：照明学会全国大会 (2013) 5-6。
- 17) 鈴木広隆他：照明学会全国大会 (2013) 11-6。
- 18) 阿山みよし：照明学会全国大会 (2013) III-1。
- 19) 齋 尚樹：照明学会全国大会 (2013) III-2。
- 20) 岩田三千子：照明学会全国大会 (2013) III-3。
- 21) 江湖俊介：照明学会全国大会 (2013) III-4。
- 22) 森 星豪：照明学会全国大会 (2013) III-5。
- 23) 阿山みよし：照明学会誌, **97** (2013) 202。
- 24) 矢口博久：照明学会誌, **97** (2013) 205。
- 25) 明石行生：照明学会誌, **97** (2013) 209。
- 26) 内田達清：照明学会誌, **97** (2013) 213。
- 27) 唐澤宜典：照明学会誌, **97** (2013) 218。
- 28) 齋藤 孝：照明学会誌, **97** (2013) 222。
- 29) 京藤伸弘他：照明学会誌, **97** (2013) 206。

- 30) 岩永敏秀他：照明学会全国大会 (2013) 9-27.
- 31) 小林信二他：照明学会全国大会 (2013) 9-28.
- 32) 今井良枝他：照明学会全国大会 (2013) 9-29.
- 33) 山口サヤカ：照明学会全国大会 (2013) II-4.
- 34) 槻谷綾子他：照明学会全国大会 (2013) 8-39.
- 35) 松林容子他：照明学会全国大会 (2013) 8-4.
- 36) 波多江圭輔他：照明学会全国大会 (2013) 8-16.
- 37) 石井千恵子他：照明学会全国大会 (2013) 8-17.

17. 医学・生物応用光学

東京農工大 西館 泉

17.1 概要

医学・生物応用光学関係の分野は、日本光学会の生体用光学研究グループ (Biomedical Optics Group: BOG) をはじめ、日本レーザー医学会、レーザー学会、日本生体医用工学会、電気学会、機械学会など、国内の多くの学会で盛んに活動が行われている。2013年度はOPJにおいて医学・生物学応用関連への発表が54件あり、ポスターセッションを含め活発な討論が行われた。また、OPJにおいて2010年から毎年開催されている日韓生体医用光学シンポジウムでは、韓国からの招待講演4件を含む8件の講演があった。

また、海外に目を向けると、1月に開催されたこの分野の世界最大級の国際会議である Photonics West BiOS 2013 における生体医用光学関連の演題はおおよそ1,900件 (前年比11%増) であり、5月に開催された European Conferences on Biomedical Optics 2013 では453件 (前年比6%増) の講演があり、世界的にみても当分野の発展と注目度が非常に高いことがうかがえる。ここでは、2013年の国内学会発表等を中心に、医学・生物応用光学関連の進展について述べる。

17.2 光計測・光診断関連

光コヒーレンストモグラフィ (OCT: optical coherence tomography) では、波長 $1.7 \mu\text{m}$ 帯高出力スーパーコンティニウム光を用いた超高分解能 OCT の高感度化・高侵達化¹⁾、GPU を用いた高速演算処理によるリアルタイムアンギオグラフィ²⁾、電気光学結晶である $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) の光偏向効果を利用した波長掃引光源による swept-source OCT (SS-OCT)³⁾、OCT の相関係数・ドップラーシフトを用いた微小変位計測⁴⁾ など、高速化、高感度化、高分解能化のための研究が進んでいる。また、分光 OCT による血管内脂質分布イメージング⁵⁾、OCT によるアレルギー性皮膚炎の観察⁶⁾、ラット肺組織の超高分解能 OCT イメージング⁷⁾、SS-OCT と励起用レーザーを組み合わせたフォトサーマル OCT による生体

組織の *in vivo* イメージング⁸⁾、可視域三色 LED 光源を用いた full-field OCT (FF-OCT) による化粧品の特異性評価⁹⁾ など、応用の拡大がみられる。

顕微鏡関連では、蛍光分子を飽和励起 (saturated excitation: SAX) した際にみられる非線形な蛍光発光を利用した超解像蛍光イメージング¹⁰⁾、コヒーレントラマン散乱顕微鏡と SHG (第二高調波発生) 顕微鏡を組み合わせたイメージング法¹¹⁾、電子線と近赤外光による発光を利用した生細胞観察¹²⁾、生細胞を非染色で観察可能な高速誘導ラマン散乱顕微鏡¹³⁾、stochastic optical reconstruction microscopy (STORM) 等の超解像蛍光顕微鏡を用いたナノイメージング¹⁴⁾ が報告されている。また、二光子励起蛍光顕微鏡用の新しい蛍光プローブ¹⁵⁾ やバイオプローブ¹⁶⁾ の開発も行われている。

拡散光を用いた計測では、三次元時間分解型拡散トモグラフィに関する報告があり、検出限界やバックグラウンドノイズが画像再構成に与える影響¹⁷⁾ についての報告があった。また、近赤外光を利用した脳機能計測に関しては、光機能トモグラフィにおける頭部構造のモデル化が再構成画像の空間分解能に及ぼす影響¹⁸⁾ や、モンテカルロシミュレーションと有限要素法を組み合わせた高速な生体内光伝搬解析法の提案¹⁹⁾ についての報告があった。また、二光子励起蛍光顕微鏡を用いて取得したマウス脳表の微細血管構造を用いた光伝搬モンテカルロシミュレーションモデルが検討されており、均一な光学特性値をもつモデルとの比較がなされている²⁰⁾。

拡散反射分光法を用いた計測では、散乱体内部に局在する吸収体のイメージング²¹⁾、分光イメージングやカラー画像を用いた皮膚の血行動態解析に関する報告^{22,23)} があった。また従来から広く行われている、ヘモグロビン等の吸収を対象とした研究に加え、組織や細胞の形態変化に起因する光散乱特性の変化を捉える試みもなされており、脳機能障害や脳組織バイアビリティの評価^{24,25)} に関する検討が報告されている。拡散光を用いた生体組織の顕微鏡観察法として、ショートマルチモードファイバー顕微鏡の報告があり、脳表面から数 mm 内部の組織微細構造のイメージングに成功している²⁶⁾。

光学特性値測定に関しては、双積分球による光学特性値算出における誤差要因に関する検討²⁷⁾ や *in vitro* 脳組織スライスの吸収・散乱特性のイメージング²⁸⁾ が報告された。また、拡散光計測において多用される光伝搬モンテカルロシミュレーションに関しても、新しいアルゴリズムが検討されている^{29,30)}。

赤外フーリエ分光断層イメージングでは、非侵襲的血糖

値計測へ向けたグルコース濃度の定量化³¹⁾に関する報告があった。また光音響計測では、皮膚熱傷深度のリアルタイムイメージング³²⁾に関する報告や、レーザー照射光学系の検討³³⁾および画像再構成アルゴリズムの新しい提案³⁴⁾がなされている。

17.3 光治療・光刺激・PDT 関連

レーザー治療は、眼科、皮膚科、形成外科等を中心に臨床応用されているが、レーザーを用いた血管形成術による動脈硬化症治療³⁵⁾やう蝕除去³⁶⁾、内視鏡的粘膜層の剥離術への適用³⁷⁾も試みられており、レーザー光の照射条件や作用機序に関する基礎的な検討に関する報告があった。また、パルスレーザーを光吸収媒質に照射した際に発生するフォトメカニカル波を用いた分子デリバリーの研究も行われており、深さ選択的かつ効率的なフォトメカニカル波集束法^{38,39)}や内視鏡的アプローチが検討されている。

光刺激については、オプトジェネティクス(光遺伝学)技術に基づき、光受容に伴い細胞内に陽イオンを透過させる膜たんぱく質として機能するチャンネルロドプシン-2(ChR2)を遺伝盲ラットの網膜神経節細胞に導入することで視覚再生を行う研究が報告されている⁴⁰⁾。

PDTについては、初期の肺がん、胃がん、食道がんや加齢黄斑性症などを中心に臨床応用されているが、複合型光ファイバースコープを利用したPDT適用範囲の拡大⁴¹⁾や、婦人科領域における応用に向けた取り組み⁴²⁾などが報告された。また、脳神経外科領域における適用として、悪性腫瘍に対するタラポルフィリンナトリウムを用いたPDTの医師主導治験に関する報告^{43,44)}があった。PDTにおけるレーザー照射条件や使用波長の最適化のための組織光学的アプローチ^{45,46)}も検討されている。

17.4 展 望

本稿では、医学・生物応用光学における2つの柱である、光計測・診断の領域と光治療の領域について、国内の研究動向を中心に述べた。生体医用光学では、吸収、散乱、蛍光など、光と生体組織の相互作用を利用した技術が多く、マルチモダル化による性能向上や適用範囲拡大の可能性も大きい。また、最近では、将来的な医療診断技術のひとつとして、診断と治療を組み合わせた統合型診断・治療技術セラノスティクス(theranostics; therapeutics [治療]+diagnostics [診断])が注目されており、診断と治療の連携により、個別の疾患の特性に合わせた治療を行う個別化医療や予測治療等への貢献が期待されている。今後、医学・生物応用光学分野において、開発が進む個々の要素技術を組み合わせた多種多様なセラノスティクス技術の開発も進んでいくものと思われる。

文 献

- 1) 川越寛之他: *OPJ* (2013) 13pA4.
- 2) Y. Watanabe *et al.*: *J. Biomed. Opt.*, **19** (2013) 021105-1.
- 3) 福田明弘他: レーザー学会第446回研究会報告(2013) p. 33.
- 4) K. Kurokawa *et al.*: *OPJ* (2013) 12pA3.
- 5) 田中正人他: *OPJ* (2013) 13aA4.
- 6) 吉田有希他: *OPJ* (2013) 13pP24.
- 7) 服部雄治他: *OPJ* (2013) 13pA5.
- 8) S. Makita *et al.*: *OPJ* (2013) 13pPD1.
- 9) 木村亮他: 第52回光波センシング技術研究会講演論文集(2013) p. 15.
- 10) 米丸泰央他: *OPJ* (2013) 14aD5.
- 11) H. Cahyadi *et al.*: *OPJ* (2013) 13aA3.
- 12) 福島昌一郎他: *OPJ* (2013) 14aD6.
- 13) Y. Otsuka *et al.*: *JSAP-OSA Joint Symposia* (2013) 19p-D4-2.
- 14) 堀田純一他: バイオオプティクス研究会(2013) p. 3.
- 15) 川俣 純他: バイオオプティクス研究会(2013) p. 1.
- 16) 鈴木美穂他: バイオオプティクス研究会(2013) p. 27.
- 17) 古川大介他: *OPJ* (2013) 14aD7.
- 18) 村 駿介他: *OPJ* (2013) 14pD8.
- 19) 栗原一樹他: *OPJ* (2013) 14pD9.
- 20) 菊池貴広他: *OPJ* (2013) 14pD5.
- 21) 小濱正太郎他: *OPJ* (2013) 12aA1.
- 22) 和野暢之他: *OPJ* (2013) 12aA8.
- 23) 松田諒平他: *OPJ* (2013) 12aA4.
- 24) S. Kawachi *et al.*: *JSAP-OSA Joint Symposia* (2013) 17a-D4-5.
- 25) 水嶋千遥他: *OPJ* (2013) 14pD3.
- 26) 石原将太郎他: *OPJ* (2013) 14pD6.
- 27) 堀部拓郎他: *OPJ* (2013) 12pP22.
- 28) 奥野智之他: *OPJ* (2013) 14pD7.
- 29) 河合 優他: *OPJ* (2013) 12aA5.
- 30) 石井勝弘他: *OPJ* (2013) 13pA7.
- 31) 石田 茜他: *OPJ* (2013) 14aD3.
- 32) T. Ida *et al.*: *Proc. SPIE*, **8581** (2013) 858109-1.
- 33) Y. Tsunoi *et al.*: *Proc. SPIE*, **8581** (2013) 85812U-1.
- 34) S. Okawa *et al.*: *Proc. SPIE*, **8581** (2013) 858135-1.
- 35) 橋村圭亮他: レーザー学会第446回研究会報告(2013) p. 1.
- 36) 北 哲也他: 第26回日本レーザー医学会関西地方会抄録集(2013) p. 14.
- 37) 草刈大輔他: 第26回日本レーザー医学会関西地方会抄録集(2013) p. 12.
- 38) 島田卓一郎他: *OPJ* (2013) 14aD1.
- 39) 中野洗輝他: *OPJ* (2013) 14aD2.
- 40) 冨田浩史他: レーザー学会第452回研究会報告(2013) p. 31.
- 41) 岡 潔他: 第34回レーザー医学会総会(2013) S5-1.
- 42) 坂本 優他: 第34回レーザー医学会総会(2013) S5-2.
- 43) 村垣善浩他: 第34回レーザー医学会総会(2013) S6-1.
- 44) 秋元治朗他: 第34回レーザー医学会総会(2013) S6-3.
- 45) 狩山陽一郎他: 第34回レーザー医学会総会(2013) S1-2.
- 46) 本多典広他: 第34回レーザー医学会総会(2013) S1-3.

18. 光学教育

電気通信大 渡邊恵理子

18.1 概要

グローバル化により世界全体が急速に変化する中、日本では少子化・高齢化も伴い、産業構造、就業構造が大きく変化し、諸課題を抱えている。これらの課題を打破するために、よりいっそう、科学技術、ものづくりの基盤技術の高さを強みとした科学技術立国に向けた推進が強化されている。一方、その基盤の根幹となる理数能力は、小・中学生を対象とした国際数学・理科教育調査 (TIMSS¹⁾) や学習到達度調査 PISA²⁾ においても徐々に順位は低下しており (TIMSS: 1995年3位, 2011年5位; PISA: 数学において2000年1位, 2012年7位), 理科離れの問題は改善するどころか深刻化している。このような状況の中、2013年は第2期の「教育振興基本計画」(計画期間: 平成25~29年度) が策定され、目指すべき教育の姿とそれを実現する具体的な目標が設定された³⁾。特に①アクティブラーニング (課題解決型の能動的学修) の充実, ②学びなおし機会の充実 (教育機関と産業界等との共同による実践的なプログラム開発, 奨学金制度の弾性的運用), ③リサーチユニバーシティの倍増, 国際評価の向上, ④大学等のセンター・オブ・コミュニティ構想などの推進は光学教育に密接な関わりがあり、強化による成果が見える状況にある。アクティブラーニングを意識した教材開発は2012年度の動向報告⁴⁾と同様に活発化してきており、さらに学生主体のさまざまな活動が増加している。産学官連携による実践的なプログラム開発は、双方によるインタラクティブな講義や実験等が組み合わされた講座やセミナーなどが多数開催された。また異機関横断の連携や若手育成を目的としたシンポジウムが種々開催されている。また国内主体であった OPJ や応用物理学会においてはアメリカ光学会 (OSA), 国際光工学会 (SPIE) などとの国際連携セッションが増加し、国際的に活躍できるグローバル人材の育成を後押ししている。地域に連携したりサーチオブコミュニティは各地域において引き続き行われた。本稿では、2013年度の光学分野における、理科・光学教育の取り組み、産学連携や国際連携などによる人材育成について報告する。

18.2 教材開発とアクティブラーニング

新たな教材開発の発表の場となっている応物講演会の教育セッションでは、2013年の春季講演会に光学教材研究を中心に39件、秋季講演会における教育セッションでは27件の発表が行われた。2012年秋の学会と比べ12件多

く、増加傾向にあり、実験教育と組み合わせたアクティブラーニングを重視した教材などの発表が見受けられた。光学をテーマにした興味深い教材研究としては、2012年に引き続き、偏光による着色現象を用いた光学教材^{5,6)}、LEGOブロックを用いた簡易分光器の改良⁷⁾が提案されたほか、新規に超音波霧化を用いた光学演示装置の開発⁸⁾や、初心者用ホログラム撮影装置の提案⁹⁾、スマートフォンを利用した単レンズ顕微鏡による写真観測の提案¹⁰⁾等が行われている。初心者用ホログラム撮影装置は、光学実験の経験のない者でも高い歩留まりでホログラムが撮影できること、身近な部品を用いて1,000円以下で組み立てられること、光学定盤や暗室がない場所でも撮影ができることを目指して開発されている。また、装置がブラックボックス化して仕組みや原理がわかりにくくならない実験教材を目指した教材開発も行われている¹¹⁾。また、秋季応物講演会における教育セッションでは、27件の発表が行われた。アクティブラーニングが実践されている光分野の教育カリキュラムは多数存在する。たとえば、電気通信大学レーザーセンターでは1996年より博士前期課程の学生が中心となって、自ら実験を考案して「教える実験プログラム ETL (Elementary Teaching Laboratory)」¹²⁾や、「危機・限界体験実験プログラム」が実施されている。また、東京大学を中心とした先端レーザー科学教育研究コンソーシアム (CORAL)¹³⁾では、2007年から企業や大学の専門家による講義と実習が組み合わされた教育プログラムが継続されている。大阪大学フォトニクスセンターにおける「フォトニクス講座」や宇都宮大学オプティクス教育研究センターにおける「先端光学実習」、光産業創生大学院大学における「レーザーによるものづくり中核人材育成講座」¹⁴⁾など、双方向の講義、演習、実験、実習や実技等が組み合わされた実践的なアクティブラーニングが行われている。

18.3 人材育成

18.3.1 コミュニティー形成を通じた人材育成

学生主体の学会活動など、イベントの立案・運営を通して人材育成を図る取り組みが顕著になっている。応用物理学会、SPIE、OSA等において、イベント立案、運営、ネットワークを広げる学生活動に対し、学会によるサポートが行われている。応用物理学会においてもスチューデントチャプターが2012年より設立され、東北大学、早稲田大学、日本女子大学、電気通信大学、名古屋大学、大阪大学、広島大学、奈良先端大学の計8大学において学生による活発な活動が行われた¹⁵⁾。秋季応物講演会期間には第1回学生研究者講演会が開催され、スキルアップセミナー等

で国や分野を超えた学生のネットワークを広げている。日本光学会における情報フォトニクス研究グループでは学生が中心となった講演会が開催され、イベント立案、運営を通じた人材育成が図られており、すでに8回目を迎えている¹⁶⁾。2013年には福井大学と宇都宮大学でSPIE スチューデントチャプターが新たに立ち上がり、日本女子大学、大阪大学と合わせて計4つのチャプターが活動中である¹⁷⁾。またOSAのスチューデントチャプターは日本国内7大学(沖縄科学技術大学院大学、東京工業大学、大阪大学、東京医科歯科大学、東京農工大学、福井大学、東京大学)で活動中である¹⁸⁾。2013年には、OSAとSPIEのスチューデントチャプターのメンバーが中心となって開催しているJP-NetSが福井大学で開催されたほか、大阪大学OSA/SPIEスチューデントチャプターと大阪大学フォトニクスセンターの共催でAsia Student Photonics Conference 2013¹⁹⁾が開催されるなど、国際連携を意識した学生間の活動が活発化した。これらの活動において、学生たちはセミナー、グループディスカッション、発表等を通して専門知識を深めるとともに、所属を超えた交流の中でも人材育成がされている。

18.3.2 連携事業と人材育成

光科学は基礎科学から産業技術まで広がる横断的な分野であるため、分野の発展や教育活動には分野を超えた連携が必須である。上述した通り、教育プログラムにおいても産学連携による横断的なプログラムが種々提案され実践されているが、委員会やシンポジウムなどにおいても連携推進が顕著になっている。

日本学術会議主催のシンポジウムとして学会間交流、世代間交流、次代の若手育成、新しい産業やコミュニティーの創成の推進を目的とした「第3回先端フォトニクスシンポジウム」²⁰⁾が行われている。また、日本学術振興会産学協力研究委員会におけるフォトニクス情報システム第179委員会²¹⁾では、学界、産学界が連携し、フォトニクスを駆使して融合した新しいシステム化技術の開発を目指している。教育機関と産業界等との共同によるプログラムとしては、東京大学内に設立されたニコニイメージングサイエンス寄付研究部門が定期的に開催している「駒場ひかりラウンジ」²²⁾や、宇都宮大学オプティクスセンターではキヤノン株式会社が資金面の支援と光学技術教育の講師を務め、大学と企業が協力して教育に取り組んでいる。光産業創生大学院大学では、光産業創成プロデューサー人材育成プログラムの「VIPS 2013」²³⁾において、目標達成に向け、情報・人・技術・金等を調達し活用を図る人材の輩出のための新しいプログラムが組まれている。このように、

企業における現役の実務経験者による講義や実験などにより、教育機関と産業界等との共同による実践的なプログラム開発が推進されている。

また応用物理学会では、2013年の春季・秋季両方の講演会開催期間中に「博士のキャリア相談会」²⁴⁾を開催し、博士修了者の採用に深い理解を示す企業や研究所のキャリアアドバイザーと若手研究者が直接コンタクトできる機会を設けている。さらに、学びのセーフティネットの構築のひとつの例となる日本光学会における光みらい奨励金は学生も対象に継続されており、光学を学ぶ学生や若手研究者の支援が行われている。

18.3.3 小中高生を対象とした光学を目指す人材の育成

応用物理学会では、2011年9月に行った被災地での理科教室に引き続き、2013年にも東日本大震災で被災した小学校の児童を対象として、被災地支援支部連携リフレッシュ理科教室²⁵⁾を開催している。また、企業による科学教室も積極的に開催されており、オリンパスでは2003年より地域の子どもたちに、科学の面白さ、特に「光」のはたらきや不思議などを紹介するイベント“わくわく科学教室”²⁶⁾を開催しており、また、2012年より行われているコニカミノルタによる中高生向けの出前授業「コピー機の仕組み」²⁷⁾など、子どもたちの科学離れ対策に貢献する企業も多くある。春季応物講演会では、特別シンポジウムとして、中学・高校の理科・技術教育の改善への取り組みと課題(科学技術立国を支える人材養成)が開催され、近年行われている理科・技術教育に関係した多くの改善に向けた取り組みの事例が報告された。光学実験は視覚的にもわかりやすく、幅広い世代における教育ツールとして有効であることは明らかである。

18.3.3 女性研究者ネットワーク形成

冒頭で述べたとおり、少子・高齢化やグローバル化の進展に加え、雇用環境の変容などの危機的状況を打破するためには、社会の担い手の増加として、若者・女性・高齢者などを含めて個人の能力を最大限に引き出すことが求められている。自然科学系研究者や技術者の女性比率を上げるために、女性研究者への対応、女子中・高校生への理系進路選択の支援が行われている。女性研究者のネットワーク形成を目的として、女性研究者・技術者ネットワーク女子会(オブジョ)が開始された。人材育成委員会男女共同参画部門では、2013年度の春季応物講演会における女性研究者・技術者を中心とした特別シンポジウム「応用物理分野で活躍する女性達～第1回太陽電池編～」を皮切りに、2014年春季応物講演会では第2回フォトニクス編が開催されるなど、活躍する女性たちのシンポジウムが企画されて

いる。

科学技術振興機構の「女子中高生の理系進路選択支援プログラム」の委託によって、国立女性教育会館において女子中高生が科学技術の世界の楽しさを「体験する」、科学技術の世界で生き生きと活躍する女性たちと「交流する」、科学技術に関心のある仲間や先輩と「知り合う」ための機会として、「女子中高生夏の学校 2013 ～科学・技術者のたまごたちへ～」が開催され、参加した女子中高生はもちろんのこと、企画側の女子大学生にも、異分野の同世代女子学生のネットワーク形成等に役立っている²⁸⁾。

日本光学会における活動としては、女性研究者の啓発と育成を図ることを目的として 1993 年に設立されたコンテンツポラリーオプティクス研究会がある。ここでは若手研究者・技術者および学生の参加しやすい会員相互の実質的なネットワークづくりを進めることを目的として、サイエンスカフェの実施などの活動が行われている²⁹⁾。2013 年はサイエンスカフェが 3 回実施され、学部学生、大学院生、大学・企業の研究者等幅広い年代の参加者による自由な意見交換を通して、研究者・技術者としての生き方をテーマとしたキャリア相談や世代を超えた交流が行われた。

18.4 展 望

個々の能力を最大限に引き出し、かつグローバル化に対応した人材を養成し、イノベーションにつなげていくことが要求されている。そのためにはこれまでの地道な教育・研究活動に加え、新しい連携や国際展開に果敢に挑戦していく必要がある。本稿で紹介したさまざまな取り組みは光学会における活動のごく一部にすぎないが、すでに光学界ではアクティブラーニングや産学官連携の教育プログラム、OSA や SPIE との連携活動や地域連携など、特長ある教育・人材育成実績をもっている。しかしながら、日本光学会独自の人材育成や教育関係のシンポジウムやセッションは、ここ数年見受けられない。日本光学会においても次

世代を育てる人材育成のセッションなどを積極的に設け、学会を挙げて技術立国の基盤となる人材育成の推進を期待したい。

文 献

- 1) <http://timss.bc.edu/> (2013).
- 2) <http://www.oecd.org/pisa/keyfindings/pisa-2012-results-overview.pdf> (2012).
- 3) http://www.mext.go.jp/a_menu/keikaku/detail/1336379.htm (2013).
- 4) 小川賀代：光学，**42** (2013) 204.
- 5) 原田建治他：春季応物講演会 (2013) 28a-PA1-12.
- 6) 土田智大他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P2-21.
- 7) 黒田 航他：秋季応物講演会 (2013) 17a-P2-5.
- 8) 佐藤杉弥：春季応物講演会 (2013) 28a-PA1-29.
- 9) 平谷雄二他：応用物理教育，**37** (2013) 85.
- 10) 羽淵仁恵：秋季応物講演会 (2013) 17a-P2-22.
- 11) 大向隆三他：春季応物講演会 (2013) 28a-PA1-16.
- 12) <http://www.ils.uec.ac.jp/AttractiveGI/> (2013).
- 13) 五神 真：光学，**39** (2010) 199.
- 14) <http://www.gpi.ac.jp/chukaku/> (2013).
- 15) <https://www.jsap.or.jp/profile/studentchapter/index.html> (2013).
- 16) <http://www.i-photonics.jp/> (2013).
- 17) <http://spie.org/x1727.xml> (2013).
- 18) http://www.osa.org/en-us/membership_education/student_services/ (2013).
- 19) Asia Student Photonics Conference 2013: http://parc.osaka-u.ac.jp/student_chapter/aspc/index.html (2013).
- 20) <http://www.nanoquine.iis.u-tokyo.ac.jp/scj/> (2013).
- 21) <http://www.jsps.go.jp/j-soc/list/179.html> (2013).
- 22) <http://www.optics.iis.u-tokyo.ac.jp/> (2013).
- 23) <http://vips.gpi.ac.jp/program/index.html> (2013).
- 24) http://www.jsap.or.jp/activities/talent/2013/2013autumn_career.html (2013).
- 25) <http://www.jsap.or.jp/activities/education/refresh/refresh20130628.html> (2013).
- 26) <http://www.olympus.co.jp/jp/event/wakuwaku/archive.cfm> (2013).
- 27) <http://www.konicaminolta.jp/about/csr/contribution/index.html> (2013).
- 28) <http://www.nwec.jp/jp/program/invite/2013/page02s.html> (2013).
- 29) 小館香椎子：光学，**41** (2012) 240.