

## 2011 年日本光学会の研究動向

「日本光学会の研究動向」は、日本光学会における過去1年間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、日本光学会および応用物理学会を中心として、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ごとく略記法を用いています。

表 「2011 年日本光学会の研究動向」における引用学会等の省略表記

略 称	学会誌・講演会の正式名称
<b>&lt;学会誌&gt;</b>	
映像学技報	映像情報メディア学会技術報告
映像学誌	映像情報メディア学会誌
日レ医誌	日本レーザー医学会誌
<b>&lt;講演会&gt;</b>	
<i>OPJ</i>	日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2011
秋季応物講演会	第 72 回応用物理学会学術講演会
春季応物講演会	第 58 回応用物理学関係連合講演会
感性工学会大会	第 13 回日本感性工学会大会
視覚学会夏季大会	日本視覚学会 2011 年夏季大会
信学会総合大会	2011 年電子情報通信学会総合大会
信学会ソサエティ大会	2011 年電子情報通信学会ソサエティ大会
<i>APCV</i>	Asia-Pacific Conference on Vision 2011
<i>CLEO</i>	Conference on Lasers and Electro-Optics 2011
<i>CLEO/Europe</i>	The European Conference on Lasers and Electro-Optic 2011
<i>DH</i>	Digital Holography and Three-Dimensional Imaging
<i>ECOC</i>	European Conference and Exhibition on Optical Communication 2011
<i>EDIS</i>	The 3rd Global COE International Symposium “Electronic Devices Innovation”
<i>IDW</i>	The 18th International Display Workshops
<i>IOST</i>	International Symposium on Optomechatronic Technologies 2011
<i>IQEC/CLEO Pacific Rim</i>	Joint International Quantum Electronics Conference / Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2011
<i>ISOM/ODS</i>	Joint International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage 2011
<i>IWH</i>	International Workshop on Holography and Related Technology 2011
<i>MOC</i>	Microoptics Conference 2011
<i>NLO</i>	Nonlinear Optics 2011
<i>OFC</i>	The Optical Fiber Communication Conference 2011

# 1. ナノオプティクス

新潟大 大平泰生

## 1.1 概要

ナノオプティクス関連分野は、近接場光学を基盤とする、ナノ領域の光計測、光加工、光信号制御など、非常に幅広い研究領域をカバーしている。近接場光が回折限界を超えた分解能を到達できることだけでなく、ナノ領域における、物質系との融合によって発現する伝播光にはない性質や、局所的な近接場光相互作用とその制御性に注目することで、新たな光科学とこれから派生する多様な光のナノテクノロジーが創出されてきている。

ここでは、おもに応用物理学会の講演から2011年の関係分野の進展について振り返る。ナノ構造体における近接場光やプラズモンの発生、計測センシング技術などへの応用が、理論と実験ともに引き続きさかんに研究されている。さらに、物質の電子状態やフォノンまで考慮し、物質と強く結合する近接場光を使いこなす、新規な物質加工やシグナル輸送などのナノフォトニックデバイスの機能性に関する基礎的な研究が着実に進展している。

## 1.2 ナノ領域の光近接場励起輸送と制御

光近接場における励起輸送の制御は、ナノフォトニックデバイスにおける信号処理などの新たな機能性をもたらす鍵となるものである。量子ドットやスピンなどの量子的な自由度を活用した手法が報告された。

量子ドットでは、ランダムに配置された量子ドットシステムにおける近接場光励起移動について、分散領域と動的特性の相関性について解析結果が示され<sup>1)</sup>、輸送経路の複雑性が関与する興味深い知見が得られている。また、ファイバプローブ先端とZnOドットとの近接相互作用によって生じる、電気双極子禁制遷移に相当する発光が見出されており<sup>2)</sup>、量子ドットシステムにおける近接場特有のエネルギー伝送や信号制御への応用が期待される。さらに、希薄磁性半導体の二重量子井戸構造における光近接場励起輸送について、ゼーマン準位のレベルシフトによって生じる動的特性や磁場依存性が測定された<sup>3)</sup>。信号制御におけるスピン状態の活用など、今後の展開が楽しみである。

ナノメートル領域の局所的な偏光も、注目すべき物理量である。物質と強く結合する近接場の偏光は、自由空間では伝播方向と垂直な面内でのみ扱うことと比較し、物質の形状や物性を活用した多くの制御性をもっている。例えば、金属ナノ構造体を用いた偏光状態の非対称変換について理論的検討がなされており、近接場光相互作用を介した高効率な偏光変換や抽出方法について議論がなされた<sup>4)</sup>。

また、有機媒質を用いた偏光状態の制御として、光で変形が可能な金属ナノ構造の構築と局所的な偏光操作法、およびネマチック液晶を用いたその変調制御性について実験結果が示された<sup>5)</sup>。

## 1.3 光微細加工法の展開

ナノメートル寸法での近接場相互作用のコントロールに必要な物質の微細加工は、さまざまな手法が提案されているが、シンプルで汎用性が高く、光物性的な付加価値を与える手法が、実用上重要になるものと考えられる。なかでも光近接場領域に特有なエネルギー移動や化学反応過程を用いた新現象に基づく、物質のナノ加工や光デバイス機能の開拓がなされるなど、新たな進展が注目された。

フォノン援用タイプの近接場光加工がいくつか報告されている。光照射したシリコンフォトダイオード基板のアニールによる表面改質と赤外線領域における光感度の増強効果が明らかにされた<sup>6)</sup>。さらに、近接場光を介した量子ドット対の自己組織化も可能になっており<sup>7)</sup>、近接場光相互作用によるエネルギー移動が可能なナノフォトニックドロプレットの選択生成への応用が期待される。また、フォノンを援用した近接場光過程によるモルフォロジ形成の確率モデルが理論的に示され<sup>8)</sup>、ナノフォトニックデバイス機能の最適化等への展開が期待される興味深い知見が得られている。また近接場光による基板平坦加工技術についても光破壊初期過程の解明<sup>9)</sup>が進み、産業応用に向け着実に進展している。

有機分子材料も、光場に対するフレキシブルな形状変化や化学反応制御性を有することから、その微細加工は重要な要素技術のひとつとなるであろう。有機媒質をナノ構造化し、これらと金属媒質を複合させることで、局在プラズモン励起を制御する手法が報告された。ポリマーへのナノインプリントとスパッター法を用いたナノギャップを有する金属二重フィンアレイ構造の作製<sup>10)</sup>、微小球リソグラフィ法で作製した銀分割リングの小型化と光学特性評価<sup>11)</sup>、自己組織化膜によるプラズモン共鳴波長連続変化素子の開発<sup>12)</sup>などが示され、今後の進展が期待される。また、ポリマーマイクロゲルの光捕捉とパターン形成<sup>13)</sup>、金ナノダイマーアレイを使った微粒子の光捕捉<sup>14)</sup>などの、局在プラズモンの増強電場を用いた光トラップも示されている。これらは分子システムの光場制御への応用が期待され、今後、物質輸送との組み合わせで近接場光信号輸送の新たな可能性もひらかれるものと考えられる。

## 1.4 光近接場における計測

走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM: scanning near-field optical microscope) を主力とした光計測は、現在でも近接

場現象の解明やデバイス開発の基盤技術として欠かすことができない要素技術となっている。従来のガラスファイバー以外の近接場光プローブの開発や新たな計測手法の開発などの進展がみられた。

耐磨耗性があるカーボンナノチューブに金属ナノ微粒子を内包させた SNOM プローブが提案され、空間分解能の理論的な検証がなされた<sup>15)</sup>。高性能化に向けた今後の開発が期待される。また、常温で熱励起された物質表面の電磁放射が関わる、テラヘルツ領域での近接場計測について実験結果が示された<sup>16)</sup>。いまだ不明な点がある近接場領域における熱的現象と電磁場現象の関連性の解明や、応用面においてもフォノンなどを含む物性評価やバイオ分子計測への応用が期待される。一方、金属表面のプラズモン計測では、プラズモン波束を用いたフェムト秒分解能のプラズモン緩和現象の評価について報告があった<sup>17)</sup>。金属表面に製膜した蛍光性分子薄膜を用いたフェムト秒時間蛍光顕微法による可視化から、従来よりも速い動的評価が報告された。

### 1.5 局在プラズモン

プラズモンに関連する話題は、金属ナノ構造における局在プラズモン励起、ラマン散乱、発光現象など、例年と同様に多くの報告があった。

従来の金属ナノ構造における局所電場の増強効果に加えて、金ナノフィンアレイによるテラヘルツ波領域の電場増強<sup>18)</sup>、酸化物半導体や金属周期構造における赤外線領域のプラズモン励起<sup>19,20)</sup>といった、従来の波長領域以外での研究がなされており、これらはバイオセンシングや通信素子への応用が期待される。また、金ナノロッドの局在プラズモン励起による Er, Yb 共添加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜のアップコンバージョン発光における増強効果のメカニズム検証<sup>21)</sup>、単一金ナノダイマーの電場増強効果を用いた第二高調波発生の観測<sup>22)</sup> など、プラズモンが関与する発光現象の基礎過程について解明が進んでおり、今後これらの実用化に向けた進展が期待される。また、MIM (metal-insulator-metal) 型プラズモン共振器特性の等価回路モデルによる解析法について報告<sup>23)</sup> がなされ、今後より実用的な設計手法への展開が期待される。表面増強ラマン散乱の報告についても、ハイパーラマン散乱信号のばらつき要因の理論的検証<sup>24)</sup>、ラマン散乱増幅のための MIM 導波路構造の検証<sup>25)</sup>、金属ナノ粒子の吸着分子の配向性評価<sup>26)</sup>、フラーレン内包カーボンナノチューブのラマン分光<sup>27)</sup> など、基礎から応用の多岐にわたった。

### 1.6 その他

ナノオプティクスを支える基礎理論や関連する実験研究

も着実な進展をみせている。ナノスリットによる高空間分解能近接場光イオン化分光計測の特性改善<sup>28)</sup>などの原子フォトンクス分野の進展も報告され、原子分解能を有する究極的な微細加工や量子現象に関する近接場光学の更なる展開が期待される。

### 1.7 展 望

ナノオプティクス研究は、物質表面に発生する近接場光を利用した、計測、加工、材料、医療などさまざまな分野へと波及し発展しつづけている。

近接場光の励起と局所相互作用を特徴付けるナノ物質の形状、配列とエネルギー伝達の制御法が開発され、実用的なデバイス応用の研究へと進展している。また、応用面だけでなく、近接場光学に関する基礎研究についても、近接場光をドレストフォトンとする新たな理論や実験が示されてきており、ナノオプティクスが扱う問題は、これまで以上にナノ領域の光の本質をとらえていくことであろう。これらのことは、エネルギー環境問題や、ライフサイエンスといった現在の社会が要求する諸問題の解決に大きな寄与を果たすことはもちろんのこと、未来を切り拓く新たなイノベーションをもたらすものと期待される。

### 文 献

- 1) 野村 航他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-4.
- 2) 辻真 大他：春季応物講演会 (2011) 26a-BH-5.
- 3) 久保田悟他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-16.
- 4) 川添 忠他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-15.
- 5) 福井昭洋他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-20.
- 6) Ma Mueed 他：春季応物講演会 (2011) 26a-BH-3.
- 7) 豎 直也他：春季応物講演会 (2011) 26a-BH-6.
- 8) 成瀬 誠他：春季応物講演会 (2011) 26a-BH-4.
- 9) 野村 航他：春季応物講演会 (2011) 24p-KF-10.
- 10) 久保若奈他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-10.
- 11) 大塚智也他：春季応物講演会 (2011) 25p-BH-6.
- 12) 高木崇光他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-19.
- 13) 坪井泰之他：秋季応物講演会 (2011) 31p-ZJ-1.
- 14) 田中嘉人他：秋季応物講演会 (2011) 31p-ZJ-5.
- 15) 中田俊彦他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-13.
- 16) 梶原優介他：春季応物講演会 (2011) 24a-BG-9.
- 17) 服部竜己他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-27.
- 18) 田中拓男他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-9.
- 19) W. Badalawa 他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-29.
- 20) 梶野雄矢他：春季応物講演会 (2011) 25a-BH-10.
- 21) 中野泰志他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-1.
- 22) 倉田陽平他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-11.
- 23) 宮崎英樹他：春季応物講演会 (2011) 25a-BH-7.
- 24) 伊藤民武他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-21.
- 25) 加藤純一他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-5.
- 26) 長井悠佑他：秋季応物講演会 (2011) 30p-P13-7.
- 27) 森口祥聖他：春季応物講演会 (2011) 25a-BH-14.
- 28) 大木宏晃他：春季応物講演会 (2011) 25a-BG-4.

## 2. コンテンポラリ・オプティクス

シチズン 橋本信幸

### 2.1 概要

コンテンポラリ・オプティクス研究グループは、女性や若手研究者の自主・自立的な活躍の場を広げることと、最先端研究や技術を理解するための基礎知識の習得を目的として、1993年に発足した。特徴的なのは代表者を含む実行委員全員が女性ということであり、特に当時は年長の男性を中心に運営されていた研究開発分野に、新たな風をもたらした。

1990年当時は光学会会員約2000名のうち女性会員は10名あまりであったが、発足後には女性会員が一挙に40名あまりに増えた。一方で、1990年にはすでに日本光学会幹事に若手女性が抜擢されていて、光学会が早くから女性や若手の登用に積極的であったことがうかがい知れる。この取り組みは高く評価され、その後2001年7月に応用物理学会「男女共同参画委員会」が発足する際には、本研究グループが中心的な役割を果たすことになった。

現在では大学のみならず企業においても女性や若手の方々の活躍が普通にみられるようになり、筆者の周りでも若手女性の学会発表が日常的に行われるようになってきた。また、大学によっては女性のみを対象とした奨学生制度や、公的研究機関では研究者の採用にあたり同程度の業績では女性優先とする制度、また若手のみを対象とした年齢制限のある公的ファンドの増加等、特に若手女性研究者にとっては追い風が吹いている。キャリアを目指す女性にとっては最大のチャンス到来といってもよいが、逆にいえば、後に続く後輩のためにも実績を残していけないと、制度そのものが衰退してしまう可能性もある。別の見方をすれば、このような制度がなくても、多くの理系女子学生や女性および若手研究者が活躍していることが望まれる。そのような雰囲気のみでいる現在は、本研究グループも初期の設立目的を超えて、変革していく時期が来ているといえる。

2010年のコンテンポラリ・オプティクスの取り組みとしては、Optics & Photonics Japanにおいて女性や若手研究者を講師とした回折光学に関するシンポジウムを企画した。そして2011年度では、やはりOptics & Photonics Japanにおいて、光研究拠点における若手育成の取り組みに関するシンポジウムを行った。

### 2.2 2010年の取り組み

東京で開催されたOptics & Photonics Japanにおいて「ディフラクティブオプティクス—基礎から応用まで」と

いうテーマでシンポジウムを開催した。回折光学素子は軽量薄型で複製も容易であり、またホログラムやキノフォームに代表される波面再生素子として、原理的に任意の波面を作成可能で、波長依存性や偏光依存性をもたせることもできる。これは複数の光学機能を1枚に集積できることを示している。この特徴を生かし、光ピックアップの対物レンズやカメラレンズの収差補正手段としての回折レンズ、光分岐や色分離としての回折素子が広く普及している。また白色光用途においても、フレネルレンズや、近年では色分散を補償した一眼レフの複合回折レンズも実用化された。

実用化にあたっては、フォトリソグラフィや、近年ではナノインプリントに代表される微細光学構造作成技術と、RCWA (rigorous coupled wave analysis, 厳密結合波解析) やFDTD (finite differential time domain, 有限差分) 法に代表されるベクトル回折シミュレーション技術が重要な役割を果たしている。また、アクティブな光波面制御、すなわち電氣的に光波面を制御できる光学素子も実用化されている。

今回のシンポジウムでは、後述する4名の講師の方々に、回折光学の歴史的な背景も含めた概論からはじまり、新たな応用であるセキュリティー分野やアクティブな回折光学素子、そしてベクトル回折シミュレーションの基礎と応用について講演をいただき、議論が盛り上がった。

最初に、日本女子大学名誉教授の小館香椎子先生より「ディフラクティブオプティクスの展望」<sup>1)</sup>という題目で、回折光学にかかわる幅広い内容でイントロダクトリートークをしていただいた。

その内容は、1960年のレーザーの発明をきっかけにオプトエレクトロニクス技術が急速に発展するとともに大容量の光メモリーや光通信技術が表れ、薄型軽量で多機能性をもつ回折光学モジュールが注目されたこと。さらに半導体技術の急速な進歩でフォトリソグラフィによるサブミクロンの微細構造作成技術が実用化され、これが回折光学素子の作成技術の進歩に大きく貢献し、そして近年のマルチレベルバイナリー型回折光学素子に結びついたこと。その結果として回折光学素子はナノオプティクスの領域にまで進展し、構造的複屈折や偏光ミラーそして狭帯域波長フィルターに至る応用が表れたこと。

さらに、実用化にあたりもうひとつ忘れてならないのは、電磁波理論による数値解析の進歩が挙げられることである。従来、光は光線としての幾何光学と、スカラー波としての波動光学で取り扱われてきたが、コンピューターとシミュレーション理論の進化によりRCWAやFDTD、ビーム伝搬法に代表されるベクトルシミュレーションが可

能となり、それぞれグリズムやフォトニック結晶、そして導波路回折素子の設計が可能となったことが紹介された。そして、結びとして、さらなる発展のために多くの研究者による共同研究や開発が不可欠であり、本シンポジウムがそのきっかけとなることを期待すると締めくくられた。

引き続き、凸版印刷(株)総合研究所の高野雅美氏により「機械読み取りセキュリティデバイスの開発」<sup>2)</sup>という題目で講演をいただいた。ホログラムやその一種である回折光学素子は、クレジットカードや銀行券用のセキュリティデバイスとして広く普及している。これは基本的に目視を前提としているため、極端な場合は銀紙に似たような図柄が描かれていても見過ごしてしまうことがある。そこで、二次元のマトリクス画素から形成されるQRコードのようなパターンで、パターンを形成する各画素は特定の格子ベクトルをもつ回折素子から形成するようにする。このようにすることで、特定の光線で照明すれば、各画素は特定の方向に光を回折する。この結果、特定の方向から観察すれば特定の画素からの回折光のみを取得できるため、特定の情報(例えば文字)が表れる。照明光学系と撮像光学系が一对となった機械読み取り装置を用いれば、情報取得可能となる。高野氏は2009年度日本光学会HODIC鈴木・岡田賞技術奨励賞を受賞している。

続いて、シチズンホールディングス(株)開発部の田辺綾乃氏より「ナノインプリント技術を用いたアクティブ回折光学素子」<sup>3)</sup>という題目で講演をいただいた。液晶素子はアクティブ取差補正素子として実用化されているが、ここでは液晶素子内にナノインプリント技術を用いて4レベルおよび8レベルのバイナリー型回折構造を内在させた。そして、電界により液晶の実効屈折率を変化させることで、アクティブなマルチレベルバイナリー型回折素子を実現した。この素子は、数ボルト程度の電圧を加えることで0次光と1次光の比を変化させることが可能である。またスカラー回折理論から導かれる回折効率が実験値とよく一致し、ナノインプリントで作成された光学構造がよく機能していることが示された。また、フレネルレンズ構造を内在させた、有効直径12mmで焦点距離が500mmから∞まで可変なアクティブレンズを紹介した。田辺氏は日本光学会光設計研究グループの2010年度光設計奨励賞を共同受賞している。

最後に、コニカミノルタテクノロジセンター(株)の関根孝二郎氏により「回折光学素子における電磁場解析の基礎と応用」<sup>4)</sup>という題目で講演をいただいた。光学構造が波長程度となると、その光学的振る舞いはマクスウェルの方程式を厳密に解く必要があるが、ここでは回折光学素子

のような周期構造の取り扱いに適したRCWA法と、非周期構造の取り扱いも可能なFDTD法の解説が行われた。RCWA法の場合はFDTD法に比べて計算時間を短縮できるが、非周期構造や金属のような複素誘電率の大きい材料に対しては精度が低下してしまうことが示された。また、FDTD法は非周期構造も取り扱えるが、空間と時間の離散化を独立に決められないことによる計算の安定化条件の束縛や、計算時間が長時間にわたることが示された。また、実際にRCWA法を用いた構造的複屈折による位相板の設計事例が示された。

本年度はレーザーと原子光学をテーマに研究会を開催する予定である。

## 文 献

- 1) 小館香椎子: *OPJ* (2010) 9pDS1.
- 2) 高野雅美他: *OPJ* (2010) 9pDS2.
- 3) 田辺綾乃他: *OPJ* (2010) 9pDS3.
- 4) 関根孝二郎: *OPJ* (2010) 9pDS4.

## 3. 視 覚

ATR 水科晴樹

### 3.1 概 要

視覚の研究には、人間の視覚認知機構を解明する基礎科学的な側面と、工学・医療等の分野への応用を目的とした側面があるが、2011年の視覚関係分野の動向を概観すると、社会の要請に応える形で行われた研究が目立ったように見受けられる。本稿では、筆者の主観で「高臨場感映像技術」「省エネルギー」「高齢化」という3つのトピックに絞って、それらに関連する視覚関係分野の研究動向について解説したいと思う。

### 3.2 高臨場感映像技術

映像の臨場感を高めるための努力はテレビジョンの発明以来常に行われてきたことで、古くはテレビ画像のカラー化などがよい例である。その後、ハイビジョンやスーパーハイビジョンに代表される映像の高精細化、さらには三次元(3D)化へと発展を遂げている。しかし、これらはおもにハードウェアに関する技術の進歩であって、必ずしも人間の視覚特性を考慮したものとはなっていないのが実状である。視覚関係分野の研究の進展は、人間の特性を考慮して映像の臨場感を高める技術開発の観点からも期待されている。ここでは、映像の臨場感の向上に貢献しようものとして、質感認知と立体映像という2つの研究分野を取り上げたい。

質感とは、われわれが物体の物理的属性を識別するうえ

で重要な情報である。例えば、光沢があれば金属である、透明感があればガラスである、といったことが瞬時に識別できる。これは、視覚が質感を認知するメカニズムを有していることの表れである。光沢や透明感などの素材感に関する質感認知の研究がさかんになってきたのはここ数年であるが、その発展はめざましく、視覚関係分野でいま最も注目されている領域のひとつといえるだろう。一方で、より臨場感の高い映像を生成するためにCG合成で物理的に忠実な物体再現を目指しても、なかなかリアルな質感が得られないという課題があり、質感認知の研究は工学的な側面からも期待されている。

2011年に報告された質感認知の研究のいくつかを紹介する。光沢感については、両眼視差によるステレオ呈示や頭部運動に伴う網膜像の変化を与えることにより光沢感が増加することが示され、二眼式、多眼式といった一般的な3Dディスプレイでその表現が可能であることが確認された<sup>1,2)</sup>。光沢感を「物体表面における光の反射率が反射角によって変化する度合いの推定に対応する知覚」と考えると、両眼の網膜像の違いや頭部運動による網膜像の変化が光沢感に関する情報量を増加させるといえるだろう。また、実物体のCG再現技術を意識したものとして、CGによる織物画像をリアルに表現するために、表面反射の拡散やハイライトの度合いを規定する最適な描画パラメータの提案も行われた<sup>3)</sup>。光沢感以外の質感認知研究としては、テクスチャー上のぼけた輝度エッジの解釈についての報告があった<sup>4)</sup>。このような輝度エッジの解釈は多義的であり、照明変化、すなわち影としての解釈と、テクスチャー上の水染みとしての解釈の両方があり得るが、そのどちらの知覚が生じるかを決定する要因がテクスチャーの空間周波数であることが見いだされた。これも質感表現の向上に寄与する発見といえるだろう。生理学的な知見としては、fMRIを用いて素材識別<sup>5)</sup>や光沢感<sup>6)</sup>に関連する脳活動をとらえる試みがなされ、質感認知の神経基盤も徐々に明らかになりつつある。

一方、立体映像は高い臨場感を与える手法として注目され、近年では3Dテレビが一般家庭で購入されるようになり、また映画館で3D映画が頻繁に上映されるようになるなど急速に普及してきている。しかし、立体映像の視聴によって頭痛や眼の疲れなどが生じる可能性のあることは、以前から指摘されている。立体映像が生体に与える影響についてはまだ不明な点が多く、研究の必要性が叫ばれている。

そのような声に後押しされて、いくつかの研究が2011年に報告された。立体像に対する焦点調節と輻輳の間の矛盾

が疲労感を与える原因のひとつであるといわれているが、それに対して調節と輻輳の応答の同時測定を試みがなされ、調節・輻輳応答の矛盾の有無に関して相反する結果が得られている<sup>7,8)</sup>。この相反する結果は、実験に使用した刺激や被験者に依存する可能性もあり、今後のさらなる研究が期待される。また、屋外での3Dデジタルサイネージの普及を見据えて、大型のフルカラーLEDパネルを用いたパララックスバリア式3D表示に対する調節応答も報告されている<sup>9)</sup>。調節・輻輳といった視機能の評価以外にも、立体映像の生体影響を脈波によって客観的に評価する試みもなされている<sup>10)</sup>。さらに、人間工学の観点から3Dディスプレイの国際標準化を目指した動きも高まっており<sup>11)</sup>、立体映像の普及に向けてさらなる研究の進展が期待される。

### 3.3 省エネルギー対策

現代のわれわれが依存している主要なエネルギーは電気であるが、発電に必要な資源は輸入に頼らざるを得ないことなどから、省エネルギーが叫ばれるようになって久しい。また、企業の経費削減や家計の節約にも、節電は有効な手段である。特に2011年3月の東日本大震災以降、節電による省エネルギーの取り組みに注目が集まっている。

視覚関係分野も例外ではなく、照明に関する研究でその動きが顕著である。LEDによる照明は、従来の白熱灯や蛍光灯と比較して消費電力が少なく、省エネルギーに貢献しうる技術として有望視されている。また、そもそも電力が不要な光源として、昼光の積極的な利用も提案されている。

2011年には、これらの照明方法に対する評価技術の提案や明るさ感への影響が調査、報告された。LED光源による光は空間的な均一性が低く、そのまぶしさ(グレア)が不快に感じられることがある。この不快グレアを評価するための予測式が提案され、実際の評価値と対応していることが確認された<sup>12)</sup>。このような評価手法は、LED光源を用いた照明環境の構築に大いに役立つことが期待される。また、昼光を併用して照明した場合の明るさ感については、空間の明るさ感指標として近年提案されている「Feu」では十分に評価できないことが報告されており<sup>13)</sup>、昼光を考慮した明るさ感指標の提案が必要である。

### 3.4 高齢化社会への対応

わが国の高齢化が進むにつれて、それに対応した医療体制の充実が望まれている。中でも加齢による白内障の患者数は増加の一途をたどっており、その診断や治療のために視覚関係分野の研究にも期待がかけられている。その期待に応えるべく、2011年にもいくつかの研究が報告されて

いる。

白内障が進行すると水晶体が白濁し、外光が眼球内で散乱するためにさまざまな視覚能力が低下する。この水晶体の濁り度合い（ヘイズ値）を推定することができれば、白内障の進行度合いを簡易に測定することが可能になる。ヘイズ値の推定手段としては、ランドルト環の可読性を指標とする方法<sup>14)</sup>、色弁別能力の低下を指標とする方法<sup>15)</sup>、コントラスト閾値の上昇を指標とする方法<sup>16)</sup>が提案され、いずれもヘイズ値推定の可能性が示されている。これらの手法をもとに、簡易でより高精度な白内障診断手法の確立が望まれる。

### 3.5 展 望

本稿では、高臨場感映像技術、省エネルギー対策、高齢化対策という3点に絞って、2011年の視覚関係分野の研究の進展がこれらの社会的要請にどのように寄与しているかを述べた。いずれの分野においても、視覚研究が大きく貢献しているといつてよいだろう。ここで取り上げた分野に限らず、人間の特性を踏まえた研究開発が工学、医学等の多彩な分野で今後さらに重要になってくることは間違いない。その要請に応えるべく、視覚研究の重要性は今後ますます大きくなっていくだろう。

なお、本稿の執筆は（独）情報通信研究機構（NICT）の補助を受けて行った。

## 文 献

- 1) 坂野雄一他：映情学技報，**35**, No. 15 (2011) 63.
- 2) 坂野雄一他：感性工学会大会 (2011) F60.
- 3) 卓 炫住他：Vision, **23** (2011) 19.
- 4) 澤山正貴他：視覚学会夏季大会 (2011) 2o3.
- 5) C. Hiramatsu *et al.*: Neuroimage, **57** (2011) 482.
- 6) S. Sakano *et al.*: APCV (2011) 43.6.
- 7) 塩見友樹他：映情学技報，**35**, No. 16 (2011) 17.
- 8) 水科晴樹他：映情学誌，**65** (2011) 1758.
- 9) 瀧花周一郎他：OPJ (2011) P11.
- 10) 山中 篤他：映情学技報，**35**, No. 22 (2011) 25.
- 11) C. Kato *et al.*: IDW (2011) 3D8/VHF8-4.
- 12) 田代知範他：OPJ (2011) 29pH1.
- 13) 丸山隆志他：OPJ (2011) 29aH7.
- 14) 村上了太他：OPJ (2011) 29pH2.
- 15) 岩本政史他：OPJ (2011) 29pH3.
- 16) 大仲希実他：OPJ (2011) 29pH4.

## 4. 生体医用光学

慶應義塾大 岡田英史

### 4.1 概 要

生体医用光学関係の分野は、日本光学会の生体医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、日本生体医用工学会、レーザー学

会、電気学会、機械学会など、国内の多くの学会でさかんに活動が行われている。2011年度はOPJにおいて日韓生体医用光学シンポジウムが開催され、韓国からの招待講演6件を含む11件の講演があった。また、一般セッションにおいても医学・生物応用光学関係の講演が70件近くあり、活発な討論が行われた。ここでは、これらの学会や海外誌における発表論文を中心に、生体医用光学関連の進展について述べる。

### 4.2 光計測・光診断関連

生物応用光学関係では、新しい顕微鏡技術による細胞イメージングを中心に研究の進展がみられた。顕微鏡関連では、回折限界を超える空間分解能を有する超解像光学顕微鏡による蛍光ナノダイヤモンド粒子を用いた蛍光イメージング<sup>1)</sup>、コヒーレントアンチストークスラマン散乱を用いた顕微鏡<sup>2)</sup>、波長を高速で変えることが可能な回折格子型フィルターを利用した誘導ラマンスペクトラルイメージング<sup>3)</sup>、生細胞の表面形状をビデオレートで計測可能な低コヒーレント反射型定量位相差顕微鏡<sup>4)</sup>、生体組織分光断層イメージングから成分を定量化するアルゴリズムの提案<sup>5)</sup>などが報告されている。また、細胞マニピュレーションに関して、パルスレーザーのパルス波形が光ピンセットに及ぼす影響の検討などもなされている<sup>6)</sup>。

光コヒーレンストモグラフィー (OCT: optical coherence tomography) の研究は非常に活発であり、補償光学の利用によって高分解能化した眼底検査用 OCT<sup>7)</sup> や、高速二次元カメラを用いることでスペクトラルドメイン OCT のスペckルノイズを軽減する方法<sup>8)</sup> など、画像の高精細化のための新しい光学系の研究が進展している。また、二光束ドップラー光コヒーレンスアンギオグラフィーによる脈管構造の三次元イメージング<sup>9)</sup>、偏光感受性スペクトラルドメイン OCT による真皮コラーゲン構造のイメージング<sup>10)</sup>、小動物の脳の OCT 計測<sup>11)</sup>、OCT によってレーザー凝固層の光学特性値を定量的に測定する方法<sup>12)</sup> など、適用対象の拡大が積極的に試みられている。

拡散光を用いた生体計測では、近赤外分光法の応用として唾液分泌に伴う頭部血液量の変化を測定する試みなどがなされている<sup>13)</sup>。技術的には、組織の浅い部分における血液量変化と深い部分の血液量変化を分離して測定することを目的として、非接触型で照射光をスキャンすることで、照射点と受光点の間隔を変化させる光学系の提案がされている<sup>14)</sup>。拡散光イメージングでは、時間分解法を用いた計測技術に関する研究が行われており<sup>15)</sup>、新しい逆問題解法による再構成画像の精度向上の提案や、光プローブの接触状態に起因するアーチファクトを軽減する方法などが検討

されている<sup>16)</sup>。拡散光イメージングでは、これまでのヘモグロビンなどの内因性信号を対象とした計測とともに、蛍光物質を用いたイメージングへの展開が積極的に図られている。蛍光プローブを用いたイメージングは内因性信号によるものよりも高いコントラストが得られるが、組織内の励起光の強度分布と蛍光の光伝播が生体組織によって散乱されるため、解析は複雑となる<sup>17)</sup>。拡散による蛍光透視像のコントラスト低下を改善するための点像分布関数の導出<sup>18)</sup>や時間分解計測法による蛍光トモグラフィー<sup>19)</sup>などが行われている。また、光線力学治療(PDT: photo dynamic therapy)に用いる腫瘍親和性のある光感受性物質からの蛍光を利用した、手術中の蛍光診断の可能性に関する検討も行われている<sup>20)</sup>。

拡散領域におけるイメージングでは、組織にパルスレーザーを照射し、組織内で吸収された熱によって生じた音響波を検出することで、組織吸収の分布を測定する光音響イメージングに関する研究が進められている<sup>21)</sup>。

可視領域の分光に関する研究では、デジタルカラー CCD カメラを用いて皮膚の RGB 画像を取得し、皮膚表層の酸素化・脱酸素化血液濃度を求めた研究<sup>22)</sup>など、皮膚を対象とした研究が多く報告されている。皮膚の分光反射率は、光学特性が異なる多層構造の組織によって決定されている。多層構造モデルによるモンテカルロシミュレーションで皮膚の分光反射率を表現する研究<sup>23)</sup>、皮膚構造をボクセル表現して皮膚の構造をより忠実に表現することを試みたモデル<sup>24)</sup>や、OCTで取得した皮膚の構造を表現したモデル<sup>25)</sup>、化粧品を模擬することを目的として、皮膚の上に微粒子の散乱体を塗布したモデルなどが報告されている<sup>26)</sup>。

### 4.3 光治療関連

光治療は、基本的に患部まで光を到達させることが必要であるが、内視鏡やカテーテルを利用することで、その適用範囲は急速に拡大しつつある。

レーザー治療においては、レーザーを選択的に対象物質へ作用させるための波長選択、パルス波形制御や作用機序の解明に関する研究が行われており、血栓<sup>27)</sup>や虫歯<sup>28)</sup>などを選択的に治療する研究が進められている。

PDTについては、肺癌、胃癌、食道癌、子宮頸癌や加齢性黄斑変性症など、直接または内視鏡などを利用して非侵襲的にレーザーが照射できる疾病を中心に臨床応用されているが、摘出困難な脳腫瘍を対象に光ファイバーを腫瘍に直接穿刺して行う方法も試みられている<sup>29)</sup>。

医療の分野においては、内視鏡やカテーテルを用いた低侵襲治療の普及に伴い、レーザー治療の重要性がますます

高まっている。一方で、レーザー治療機器の臨床応用におけるデバイスラゲ解消が重要な課題となっており、特別解説として座談会記事が掲載されている<sup>30)</sup>。

### 4.4 展 望

生体医用光学は、超解像顕微鏡のナノスケールから拡散光イメージングのマクロスケールまで幅の広い対象を取り扱っている。そのため、スケールと対象に応じた光の性質を利用することで、技術革新が達成されてきた。とくに、顕微鏡・OCTのナノ・マイクロスケールのイメージングでは、今後さまざまな光学技術を駆使した開発が進められると考えられる。一方、マクロスケールを対象とした拡散光イメージングでは、磁気共鳴イメージング(MRI: magnetic resonance imaging)で取得した形態情報を利用した画像再構成や、光の空間分解能と超音波の生体深達度を融合した光音響イメージングなど、マルチモーダル化を中心に性能向上が図られていくものと考えられる。

いずれのスケールにおいても、ラマン分光やナノ粒子、蛍光プローブなどを利用することによって、従来の方法では測定できなかった生体情報を取得することが積極的に試みられており、分子イメージング研究として進展していくと考えられる。医療応用の分野においても、内視鏡やカテーテルを用いた低侵襲治療の普及に伴い、生体情報をリアルタイムで取得しながら治療する技術の開発が進んでいる。レーザーを用いた選択的治療技術は、低侵襲治療におけるキーテクノロジーとして、さらに応用が拡大していくものと期待される。

### 文 献

- 1) M. Yamanaka *et al.*: Biomed. Opt. Express, **2** (2011) 1946.
- 2) T. Minamikawa *et al.*: J. Biomed. Opt., **16** (2011) 021111.
- 3) 梅村 航他: *OPJ* (2011) 29aD7.
- 4) 山内豊彦他: *OPJ* (2011) 28aB1.
- 5) 詫間崇史他: *OPJ* (2011) 29aD9.
- 6) 前田紗希他: *OPJ* (2011) 28aB2.
- 7) 須藤健太他: *OPJ* (2011) 28aA1.
- 8) Y. Watanabe *et al.*: J. Biomed. Opt., **16** (2011) 060504.
- 9) 巻田修一他: *OPJ* (2011) 28aA2.
- 10) S. Sakai *et al.*: Biomed. Opt. Express, **2** (2011) 2623.
- 11) 北野哲史他: *OPJ* (2011) 30pF3.
- 12) 大宮孝太他: *OPJ* (2011) P54.
- 13) H. Sato *et al.*: J. Biomed. Opt., **16** (2011) 047002.
- 14) T. Funane *et al.*: Rev. Sci. Instr., **82** (2011) 093101.
- 15) M. Oda: *OPJ* (2011) 20pAS11.
- 16) R. Fukuzawa *et al.*: J. Biomed. Opt., **16** (2011) 116022.
- 17) 西村吾朗: *OPJ* (2011) 28aB5.
- 18) 戸澤英二他: *OPJ* (2011) 28aB6.
- 19) 三井陽平他: *OPJ* (2011) 28aB3.
- 20) 丸山隆志他: 日レ医誌, **32** (2011) 139.
- 21) M. Ishihara *et al.*: Proc. SPIE, **7899** (2011) 78992Z.
- 22) I. Nishidate *et al.*: J. Biomed. Opt., **16** (2011) 086012.
- 23) Y. Aizu *et al.*: Proc. SPIE, **8088** (2011) 24.

- 24) 山内 緑他: *OPJ* (2011) 29pD6.
- 25) 高野翔史他: *OPJ* (2011) 30aF5.
- 26) 平井由佳理他: *OPJ* (2011) 29pD5.
- 27) 山下大輔他: 日レ医誌, **32** (2011) 103.
- 28) K. Ishii *et al.*: *Proc. SPIE*, **8092** (2011) 5.
- 29) 金子貞男: 日レ医誌, **32** (2011) 131.
- 30) 五十幡玲子他: 日レ医誌, **32** (2011) 170.

## 5. 情報フォトンクス

神戸大 仁田功一

### 5.1 概 要

近年の光デバイス、電子技術の発展により、光の基本的な性質や原理に基づく新規の技術が情報化社会に寄与する可能性が広がっている。このような状況のもと、光と情報の融合分野である情報フォトンクスの分野において、さまざまな研究が展開されている。本稿では、以下の6項目に分類し、進展の報告と展望を示す。

### 5.2 ホログラフィー

ホログラフィーの分野では、デジタルホログラフィー、ホログラムメモリー、ホログラフィー表示の進展が顕著であった。本稿では、デジタルホログラフィー、ホログラムメモリーについて報告する。デジタルホログラフィーでは、高速記録技術として、毎秒20,000フレームの三次元計測を行う顕微鏡が報告されている<sup>1)</sup>。また、単一なホログラムから物体の複素振幅を得るために適する参照信号についての基礎的な検討が報告されている<sup>2)</sup>。低コヒーレンス光源を用いたデジタルホログラフィーでは、100ナノメートル粒子の位置計測が報告されている<sup>3)</sup>。インコヒーレント光を用いたデジタルホログラフィーとして、二光波折り畳み干渉計と合成開口処理を用いることで三次元空間情報と分光情報を再生できる手法<sup>4)</sup>や、蛍光の空間コヒーレンス性を利用した蛍光デジタルホログラフィーの再構成像の評価が行われている<sup>5)</sup>。

ホログラムメモリーでは、偏光ホログラムを簡易に複製させるための表面構造の検討や、大容量化のために振幅と位相の両方を用いるマルチ解像度符号化の多重記録特性<sup>6)</sup>が研究されている。また、ホログラムメモリーの記録材料として有望なフォトポリマーの屈折率変化の時間変化を追跡した実験結果が提示されている<sup>7)</sup>。広帯域光源を用いる手法では、記録媒体の伸縮を考慮した再生マージンに対する実験的な検証が示されている<sup>8)</sup>。

近年、この分野では、関連するデバイスや解析技術の進展を背景に多様な手法が研究されており、数多くの成果が得られている。今後も国内外を問わずこの傾向が続き、活発な分野として進展することが予想される。なお、ホログ

ラフィーに関する国際学会として、5月に Digital Holography and Three Dimensional Imaging (DH) 2011 が<sup>3)</sup>、11月に International Workshop on Holography and Related Technologies (IWH) 2011 が開催されている。

### 5.3 GPUによる光学解析

レンズ設計用途の日本で最初の計算機が開発されて以来、光学解析のための信号処理が、光学システムやデバイスの設計、評価に不可欠な技術であることはいうまでもない。近年、グラフィックプロセッシングユニット (GPU) の計算性能を利用した高速処理を光学技術に導入する研究は、国際的にもさかんである。

レーザー加工用計算機プログラムの最適化を試みた研究<sup>9)</sup>、三次元表示のための計算機プログラムの高速化に関する研究<sup>10)</sup>が報告されている。また、角スペクトル伝搬計算に基づく光学シミュレーションをGPUに実装できる支援ライブラリーの開発が進められている<sup>11)</sup>。

GPUをキーデバイスとした信号処理実装は、近年の計算機プログラムや三次元画像処理等の研究の進歩に大きく寄与している。このことは、大規模計算や高速データ処理の光学における重要性を改めて示唆している。今後は、GPU実装だけでなく、光学のための大規模高速計算技術を広い観点から中長期的な研究課題としてとらえて議論することも有意義であると思われる。

### 5.4 フォトニックコンピューティング

光の物理的特性を利用した情報処理に関する研究は、情報フォトンクスにおける主要な研究領域のひとつである。近年、ナノスケールの現象やそのテクノロジーを取り入れた取り組みがさかんである。OPJ 2011におけるシンポジウム「ナノ光情報システムを切り拓く」において、近接場光と伝播光を用いた階層並列システム<sup>12)</sup>と、DNAのナノ構造を光信号で制御するフォトニックナノ情報処理<sup>13)</sup>が報告されている。関連技術として、撮像素子の設計、評価の観点からのナノフォトンクス<sup>14)</sup>や、細胞を模擬した人工システム<sup>15)</sup>に関する報告があった。また、蛍光共鳴エネルギー移動を用いたスキャフォールドDNA論理演算が提案されている<sup>16)</sup>。

近年、フォトニックコンピューティングの分野では、ナノやバイオ、並列処理等、さまざまな分野の技術と光学の特性を融合させたものが各種提案されている。今後もこの傾向を継続しながら、性能の向上や、新規機能を提示していく必要がある。

### 5.5 三次元情報処理

視差方式の立体テレビが実用化されている現状において、より自然な三次元情報を提示する技術が求められてお

り、さまざまな研究がさまざまな分野で展開されている。情報フォトリニクス分野では、フーリエ変換法に基づく三次元情報取得を高精度化するための色分解を用いたキャリブレーション法<sup>17)</sup>や、全周囲から多人数で観察可能な空中立体像表示法<sup>18)</sup>、立体像の奥行き知覚に関する報告<sup>19)</sup>があった。

三次元情報処理において、高精度な計測法と実像再生型の表示技術は従来から取り組まれているものであり、次世代技術としての成熟化が必須である。また、三次元像観察における視覚的な評価は、現実的なシステムを構成するための重要な知見を与える。そのため、視覚的な評価はこれからの重要な研究課題として位置づけられる必要がある。

## 5.6 画像取得と信号処理

情報フォトリニクスでは、光電子融合型情報処理や、光センサーと画像処理を組み合わせたさまざまな研究が長年行われている。デジタルホログラフィーもこのような研究のひとつとして位置づけられるが、その他の手法においても、2011年もさまざまな報告がなされている。薄型複眼撮像素子では、偏光照明と検光子アレイを用いた立体情報を抽出するための内視鏡<sup>20)</sup>や歯肉形状計測<sup>21)</sup>など、医療への応用が提示されている。時間相関イメージセンサーでは、三相スペクトル整合イメージャーの分光反射率の精度評価において、理論と整合した実験結果が得られている<sup>22)</sup>。

マルチスペクトルフィルターアレイとRGB画像センサーを用いた小スペクトル画像センシングが提案され、小型化や動画撮影への可能性が示されている<sup>23)</sup>。また、スペクトルの二次相関を利用したゴーストイメージングにおいて、高速にスペックルパターンを切り替えるためのシステムが新たに提案されている<sup>24)</sup>。

薄型複眼撮像素子に関連する研究は、応用指向の段階に移行している。また、装置開発を目的とした研究もさかんであり、さまざまな段階の研究が今後も継続的に発展することが予想される。

## 5.7 情報セキュリティ

情報セキュリティ分野では、視覚復号型暗号に関する報告が多数あった。偏光暗号では、複屈折材料を用いたカラー表示に関する理論的な検討<sup>25)</sup>や、位相差フィルムを積層する手法<sup>26)</sup>が示されている。高次複屈折を利用した技術では、異なる波長を利用し、複数の物理鍵を実装する方法<sup>27)</sup>が提案されている。

また、具体的な表示装置に特化した視覚復号型暗号として、DFD (depth-fused 3-D) の立体錯視を利用する技術の提案<sup>28)</sup>や、高速LEDを用いたステガノグラフィーの実験結果<sup>29)</sup>が報告されている。

視覚復号以外の報告として、二重ランダム位相暗号化法の安全性を評価するための定量解析に関する進捗<sup>30)</sup>や、紫外線硬化型液晶を用いたセキュリティフィルムが検討されている<sup>31)</sup>。

情報セキュリティでは、視覚復号型暗号に関する研究が大多数を占めたのがこの1年の特徴であった。光のさまざまな物理特性が取り入れられた興味深い提案が多く、今後の進展と実用化が期待される。

## 文 献

- 1) 田原 樹他：秋季応物学会 (2011) 31p-ZL11.
- 2) 井邊真俊他：OPJ (2011) 29pF7.
- 3) 楠美祐一：OPJ (2011) 30pD1.
- 4) シラウィット ティーラヌタラーノン他：春季応物学会 (2011) 27a-BJ-5.
- 4) 刀祢嘉基他：OPJ (2011) P28.
- 5) 茨田大輔他：秋季応物学会 (2011) 31p-ZL14.
- 6) 平松亮介他：秋季応物学会 (2011) 31p-ZL13.
- 7) 有本英伸他：秋季応物学会 (2011) 31p-ZL-12.
- 8) 藤村隆史他：OPJ (2011) 29pG7.
- 9) 鈴木大地他：春季応物学会 (2011) 27p-BJ-4.
- 10) 山口和弘他：OPJ (2011) 30pD4.
- 11) 寺口功一他：OPJ (2011) 30pD2.
- 12) 豎 直也：OPJ (2011) 29aBS2.
- 13) 小倉裕介他：OPJ (2011) 29aBS3.
- 14) 納谷昌之他：OPJ (2011) 29aBS4.
- 15) 鈴木宏明他：OPJ (2011) 29aBS5.
- 16) 西村隆宏他：OPJ (2011) 29pF11.
- 17) 萩原辰則他：OPJ (2011) 30pD5.
- 18) 宮崎大介他：春季応物学会 (2011) 27a-BJ-10.
- 19) 坂 直紀他：春季応物学会 (2011) 27a-BJ-11.
- 20) 香川景一郎他：秋季応物学会 (2011) 31p-ZL-1.
- 21) 西崎陽平他：春季応物学会 (2011) 25a-KL-3.
- 22) 来海 暁他：春季応物学会 (2011) 25a-KL-3.
- 23) 吉開 悠他：OPJ (2011) 28aH4.
- 24) 矢野佑樹他：OPJ (2011) 28aD5.
- 25) 原田建治：春季応物学会 (2011) 25a-KL-7.
- 26) 山口武伸他：OPJ (2011) 28aD3.
- 27) 高和宏行他：春季応物学会 (2011) 25a-KL-8.
- 28) 山本裕紹他：春季応物学会 (2011) 25a-KL-5.
- 29) ファルハン-シャヒミ他：春季応物学会 (2011) 25a-KL-6.
- 30) 中野和也他：OPJ (2011) 28aD2.
- 31) 中山敬三他：OPJ (2011) 28aD1.

## 6. 光 設 計

コニカミノルタオプト 山口 進

### 6.1 概 要

デジタル光学機器を含むエレクトロニクス市場は、2008年のリーマンショックによる世界的な景気減退から急速な回復をみせているが、2011年の産業界を振り返るにあたっては、やはり3月の東日本大震災が大きな出来事であったことはいうまでもない。未曾有の災害は世界のサプライチェーンに大きな影響を及ぼし、日本がその重要拠点であることをあらためて浮き彫りにした。日本光学会光

設計研究グループの第48回研究会(2011年12月2日)では「防災と光技術」というテーマが取り上げられ、衛星搭載光学センサーの災害監視への活用<sup>1)</sup>、防災を目的としたライダー光学系の開発<sup>2)</sup>といった報告があり、人命や社会を守ることに価値を置く研究開発についての密度の濃いディスカッションがなされた。また、震災の影響のもうひとつの側面であるが、深刻な電力不足を背景にした省エネ意識の高まりに後押しされ、LED照明市場が急速に拡大している。国内でのLED照明光学系の発表件数はそれほど多くはないが、今後注目の分野であることには違いない。

一方、結像光学機器に目を向けると、軽量かつコンパクトなミラーレス一眼カメラの進捗が目立ったデジタルカメラの分野では、多くの新製品が上市されている。画像出力機器としての投影光学系(プロジェクター光学系)やディスプレイ光学系も含めると、デジタル技術の発展に伴い提起され続ける新たな課題に 대응べく、結像光学機器に関連する光学系設計の研究報告はコンスタントに行われている。

## 6.2 結像光学機器

### 6.2.1 撮像光学系

光設計研究グループ第46回研究会「デジタルカメラの最新光学技術」(2011年2月10日)は140名を超える参加者で活況を呈し、依然としてデジタルカメラを中心とする撮像光学系の分野が日本の代表的な光学産業のひとつであることがうかがえた。年々進む高画素化に対応するため、高い屈折率と異常分散性を合わせもつ硝材を正の第1レンズ群に採用し望遠端での軸上色収差を低減した光学35倍ズーム光学系<sup>3)</sup>、デジタル時代の好ましい描写として最良像点の点像とぼけ像の描写特性に留意した光学設計<sup>4)</sup>、正群先行4群構成の第3群をガウスタイプに近いレンズ構成にすることで広角端に加え望遠単まで明るいFナンバーを有する光学4倍ズーム光学系<sup>5)</sup>といった収差補正からのアプローチに加え、3Dテレビでの観賞用画像の撮影に適した2眼の3D交換レンズの開発<sup>6)</sup>というユニークな報告もなされた。

### 6.2.2 複眼光学系

Thin observation module by bound optics (TOMBO)の開発は長く行われてきた研究のひとつであるが、内視鏡用途の研究開発として、被写界深度拡大技術を適用した複眼光学系と画像処理との組み合わせにより、立体情報や分光情報を効率的に取得する光学システムの報告がなされた<sup>7,8)</sup>。光学と画像処理という要素技術を有機的に結合することで多様な機能が実現されており、今後の実用化や幅広い分野への展開が期待される。

### 6.2.3 投影光学系(プロジェクター光学系)

液晶プロジェクターの分野ではスペースを必要としない短焦点型の開発がさかんで、年々出荷数量が増えている。これらの光学系には自由曲面レンズや自由曲面ミラーが採用されているが、大口径化と光学全長の大幅な短縮化(小型軽量化)も併せて実現した光学系開発の報告がなされた<sup>9)</sup>。また、臨場感のある半球スクリーンでの映像鑑賞用として軸対称非球面を用いた低歪みの投影光学系<sup>10)</sup>、ドーム型スクリーンの半径が変化することにより生じる像面湾曲を抑制した投影光学系<sup>11)</sup>についての報告がなされた。

### 6.2.4 ディスプレイ光学系

レーザーディスプレイにおける最大の技術課題であるスペckル低減に関し、ホログラムとスキャンデバイスを用いて光線を角度・時間多重化する新たな手法についての報告がなされた<sup>12)</sup>。既存システムへの適用が可能であり、今後の実用化が期待される。また、200インチの大口径フレネルレンズをコンデンサーとして使用し、アレイ状に配置した複数のプロジェクターの画像を合成することで、複数人での裸眼観察が可能なスケールの大きい大型立体ディスプレイの報告<sup>13)</sup>もなされた。

## 6.3 LED照明光学系

LED照明は、低消費電力・長寿命といった長所から、地球環境保全の観点で市場のニーズが増えている。LEDの発光効率はずでに蛍光灯を上回り、ここ数年で飛躍的な向上を示しており、電力不足が深刻な社会問題となりつつある日本にとっては魅力的な照明といえる。LED照明光学系には照明範囲内における光強度の均一性が要求される場合が多いが、光源の拡散性を低減し、強度分布をトップハット形状に変換できる光拡散板を利用した高効率LEDスポットライトの光学系設計に関する報告がなされた<sup>14)</sup>。

## 6.4 光学設計法

結像光学系の設計手法は、コンピューター的能力をフルに活用したdamped least squares method (DLS)法が一般的であるが、非球面光学系の最適化においては注意を要する。この点に関連して、冪級数の数を制限し「ざぎ波現象」(収差補正上の理想曲面を非球面式で近似した際の誤差曲線のリップル)を抑制することで性能と製造誤差感度低減を図った設計手法の報告がなされた<sup>15)</sup>。収差論関連では、絞り内蔵型非共軸反射光学系に対して、off-axis収差論の改良検討と設計事例を用いた検証により、入射瞳面における瞳収差が低次の物体収差に影響を及ぼすことが示された<sup>16)</sup>。また、物体距離変化による非点収差・像面湾

曲変化を抑制するため射出瞳距離に応じた歪曲収差を与える光学設計手法が報告され<sup>17)</sup>、画像処理での歪曲収差補正と合わせてデジタル時代のより高品質な画像形成の可能性が見いだされた。回折光学系の分野では、2枚玉広角レンズにおいて色収差や像面湾曲特性にすぐれた初期設計解を得るために、これらの収差を評価値としたパラメータマップから回折構造にもたせるパワーの最適化を行う光学設計手法の報告がなされた<sup>18)</sup>。

非結像系である照明光学系の分野では、高精度なシミュレーションのために非常に多くの光線本数が必要であり、初期設計解としていかに筋のよい構成を見いだすかが設計効率を左右する。このような観点から、Edge Ray法を用いた初期設計解の設定手法が紹介された<sup>19)</sup>。

## 6.5 展 望

光設計はエレクトロニクス世界市場の発展を牽引する最も重要な技術のひとつであり、日本が国際的に高い競争力をもつ技術分野のひとつである。デジタルカメラを中心とする撮像光学系の分野は、従来からの光学とメカトロニクスの融合技術に加えて、デジタル画像処理との融合技術が一層重要になってきている。撮像素子の高画素化やデジタル画像処理技術の進展に合わせて、光設計の技術、および設計を取り巻く材料技術・加工技術・測定技術はより高度化されていくであろう。デジタルカメラを取り巻く技術は、宇宙観測や地球環境観測、ロボットビジョン、医療機器への応用など、撮像技術としての応用範囲は広く、今後の科学技術の進展には不可欠である。

また、前述の通りLED照明市場の急速な発展により、非結像光学 (nonimaging optics) の分野における光学設計理論や光学設計法の議論が今後ますますかかくなっていくと思われる。光学メーカー各社にて醸成された非結像光学系の設計技術が、研究会等で広く議論され、わが国の光設計がこの分野においても優位性を保ち続けることを期待したい。

## 文 献

- 1) 成松義人：光設計研究グループ機関誌，No. 48 (2011) 31.
- 2) 椎名達雄：光設計研究グループ機関誌，No. 48 (2011) 40.
- 3) 伊藤大介：光設計研究グループ機関誌，No. 46 (2011) 3.
- 4) 原田壮基：光設計研究グループ機関誌，No. 46 (2011) 10.
- 5) 宮田正人：光設計研究グループ機関誌，No. 46 (2011) 16.
- 6) 山口伸二他：光設計研究グループ機関誌，No. 46 (2011) 22.
- 7) 香川景一郎他：光学シンポジウム (2011) 講演番号 3.
- 8) 香川景一郎他：OPJ (2011) 30aA3
- 9) 谷津雅彦他：光学シンポジウム (2011) 講演番号 13.
- 10) 研野孝吉他：光学シンポジウム (2011) 講演番号 25.
- 11) 山口 城他：OPJ (2011) 29pE7
- 12) 倉重牧夫他：OPJ (2011) 30aA1
- 13) 矢野澄男他：OPJ (2011) 29pCS5
- 14) 落水秀晃他：OPJ (2011) 29pE11

- 15) 一色真幸：光学シンポジウム (2011) 講演番号 14.
- 16) 若園毅他：光学シンポジウム (2011) 講演番号 15.
- 17) 長谷川隼佑他：光学，40 (2011) 499.
- 18) 安藤貴真他：OPJ (2011) 29pE8
- 19) 直井由紀：ODG & JOEM 共催チュートリアル No. 4「やさしくわかる！光設計の最新動向」89.

## 7. 微小光学

東芝 波多腰玄一

### 7.1 概 要

当該分野は微小光学の基礎研究からシステムや応用までを含んでおり、微小光学に関する理論や設計、材料、作製、測定、受動素子、能動素子、多機能素子、集積化、実装などの技術を対象としている。また、当該技術の応用分野としては、光通信や光接続、光記録、光機器、光センシング、光情報処理、ディスプレイのほか、照明、バイオ、医療、環境などにも広がっている。微小光学研究グループは、これらを対象として科学技術情報の交換や討論を行う場を提供してきており、年4回の研究会のほか、微小光学国際会議 (Microoptics Conference: MOC) や微小光学セミナーを開催している。

### 7.2 LED 照明

「LED照明元年」とよばれた2010年以降、さまざまな場面でLED照明が注目を浴び、各種研究会でも取り上げられている。微小光学研究会でも、LEDの基礎に関するチュートリアル、標準化、照明、バックライト等への応用、蛍光体材料等の話題を取り上げた<sup>1)</sup>。

LED照明関連の標準化に関する話題として、2010年末に直管型LED照明の口金、ソケットに関する日本電球工業規格JEL801 (L形ピン口金GX16t-5付直管形LEDランプシステム)が策定された<sup>2)</sup>。これを受けて、LED照明関連展示会では直管形LEDランプが各社から出展されている。

有機ELは面光源であることや、色調整の自由度を生かした応用が模索されている。テレビ番組制作用照明への応用<sup>3)</sup>はそのひとつであろう。有機ELではリン光材料を用いることで内部量子効率に原理的に100%近い値にできるが、薄膜構造であることやプロセス上の問題等から、外部への光取り出しが素子の効率を制限している。微細構造形成による光取り出し効率向上<sup>4)</sup>等が進められているが、無機LEDに匹敵するさらなる効率向上が望まれる。

白色LED用の蛍光体<sup>5)</sup>は、蛍光ランプ用と異なり、青色LEDで励起できる材料である必要があることから開発が進められている。課題のひとつは、高温でも安定に蛍光を発する、温度消光の小さい蛍光体の開発である。濁色性

の観点から、紫色 LED で励起する RGB 蛍光体の開発も進められている。

### 7.3 微小光学 30 年とこれからの 30 年

微小光学研究グループが発足した 30 年前にはほとんど存在すらしていなかったさまざまな微小光学デバイスが、応用を含めて飛躍的な発展を遂げている。この 30 年の歩みと、これからの 30 年で各分野がどのように発展するのかの夢を含めた講演会を企画した<sup>6)</sup>。

面発光レーザーとマイクロレンズアレイ、DVD メモリー、イメージセンサーとカメラシステム、パワーデバイスと半導体レーザー、レーザーエネルギー応用、宇宙産業と光学、光ファイバー通信技術と光集積回路の夢、光インターコネクト技術、および光エレクトロニクスの過去と将来について、歴史とこれからの 30 年への期待が語られた。

### 7.4 見えないものを見る微小光学

可視光や近赤外域を離れ、テラヘルツ波や X 線の光学を取り上げた<sup>7)</sup>。このような極端な波長域では、可視や近赤外光では見えないものが見えてくる。

室温動作（非冷却）の赤外線センサーアレイが実現されて 20 年、世界の赤外関連市場は 1 兆円に迫る勢いで成長している。この非冷却ボロメーター型赤外線センサーアレイにテラヘルツ吸収膜を形成することにより、テラヘルツ領域での感度が向上する<sup>8)</sup>。テラヘルツ波は X 線のように DNA を損傷しないことから、生体・医療用途への応用がある。

天文観測への応用として、テラヘルツ干渉計の新しいアイデアが紹介された<sup>9)</sup>。強度干渉計では、光学領域では輝度温度の高い光源 ( $>10^5$  K) が必要であり、位相情報が得られないという問題があるが、テラヘルツ帯ではこの 2 つの短所を補うことが可能となる。

ダイヤモンド深紫外線センサー<sup>10)</sup> は、太陽光ブラインド性があることから、太陽光のもとでは見えてしまうものを見えなくして深紫外領域のみの情報を得ることが可能であり、火災監視、有害化学物質蛍光スペクトルセンサー等への応用が期待されている。

X 線位相イメージングの手法として、X 線タルボ干渉計がある。これは、シンクロトロン放射光のような大型施設を用いずに、病院で使える X 線源を用いて位相イメージングが可能となる<sup>11)</sup>。

### 7.5 バイオ / 農業応用

光の利用範囲は、バイオ、農業分野においても大きく広がっている<sup>12)</sup>。創薬のためにはタンパク質の単結晶による構造解析が必要であるが、巨大で複雑な分子の結晶化はきわめて困難であった。フェムト秒レーザーの照射により、

結晶核発生および高品質結晶作製が可能となった<sup>13)</sup>。DNA コンピューティングにおいて、外部光信号を利用して反応条件を局所的に変化させるフォトニック DNA コンピューティングが提案されている<sup>14)</sup>。細胞や生体分子との親和性が高いことから、インタラクティブな高機能バイオ計測、高セキュリティバイオ情報技術等への応用が考えられている。固体光源植物工場<sup>15)</sup>では、LED のほか、レーザーによる植物栽培実験も進められている。カイコのウイルス病である多角体病ウイルスでは、多角体とよばれるタンパク質微結晶の中にウイルスが包埋される。この仕組みを利用して、多角体の中にウイルスではなくタンパク質分子を固定化する手法が開発された<sup>16)</sup>。1 つの多角体に緑色蛍光タンパク質と赤色蛍光タンパク質の 2 種類を固定化することにも成功しており、波長の異なる紫外線を照射することで、緑にも赤にも蛍光を発する多角体ができる。

### 7.6 微小光学国際会議

第 17 回微小光学国際会議 (MOC '11) では、プレナリーセッションのほか、計測・センシング、スローライト、テラヘルツ、ナノカーボンフォトニクス、ディスプレイ・照明、能動デバイス、グリーンフォトニクス、ファイバーデバイス、O/E 応用の各セッションが設けられた。

スローライトデバイスは、フォトニック結晶の応用出口のひとつとしても注目されている。SOI (silicon on insulator) 基板上フォトニック結晶導波路を用いたスローライトデバイスにおける可変遅延幅の拡大と光相関計への応用が報告された<sup>17)</sup>。スローライト導波路中に利得媒質を設けた構造は増幅器として動作する。このスローライト導波路増幅器によるビーム走査の検証が報告された<sup>18)</sup>。また面発光レーザーとスローライト増幅器との集積も試みられている<sup>19)</sup>。

テラヘルツ光源を得る手法として、フェムト秒レーザー光を光伝導素子に照射する方法や、非線形光学結晶を用いた差周波発生の利用がある<sup>20)</sup>。HEMT (high electron mobility transistor) 構造のゲートに回折格子を設け、差周波に対するプラズモン共鳴の注入同期発振により、コヒーレントな単色テラヘルツ光を発生させるデバイスが提案されている<sup>21)</sup>。また差周波の元の光源として、二波長 DBR (分布反射型) レーザーを集積して Y 分岐導波路増幅器で合波するデバイスが報告された<sup>22)</sup>。

カーボンナノチューブ (CNT) やグラフェンの光デバイスへの応用も進展している。CNT は可飽和吸収素子として用いた場合、非線形性が大きく、回復時間が速い ( $\sim 1$  ps) という特長をもつ。単層 CNT を用いたモード同期レーザーで、波長  $1.5 \mu\text{m}$  および  $1.07 \mu\text{m}$  において  $110 \sim$

130 fs の短パルスが得られている<sup>23)</sup>。また、CNT のフォトルミネセンスにおいて、トリオン (2 つの正孔と 1 つの電子の結合状態) が室温で初めて観測されている<sup>24)</sup>。

## 7.7 展 望

生体、農業、天文等、光技術のかかわる分野は広がっており、これらの分野でも、微小光学はまだまだ進展が期待される。

## 文 献

- 1) LED 照明と微小光学, *Microoptics News*, **29**, No. 1 (2011).
- 2) 竹田 守: *Microoptics News*, **29**, No. 1 (2011) 19
- 3) 岩下研一他: *Microoptics News*, **29**, No. 1 (2011) 25.
- 4) 浅川鋼児: *Microoptics News*, **29**, No. 1 (2011) 37.
- 5) 下村康夫: *Microoptics News*, **29**, No. 1 (2011) 41.
- 6) 微小光学 30 年とこれからの 30 年, *Microoptics News*, **29**, No. 2 (2011).
- 7) 見えないものを見る微小光学, *Microoptics News*, **29**, No. 3 (2011).
- 8) 小田直樹: *Microoptics News*, **29**, No. 3 (2011) 1.
- 9) 松尾 宏: *Microoptics News*, **29**, No. 3 (2011) 19.
- 10) 小出康夫: *Microoptics News*, **29**, No. 3 (2011) 29.
- 11) 百生 敦: *Microoptics News*, **29**, No. 3 (2011) 37.
- 12) 微小光学でバイオ / アグリ, *Microoptics News*, **29**, No. 4 (2011).
- 13) 森 雄介他: *Microoptics News*, **29**, No. 4 (2011) 1.
- 14) 谷田 純: *Microoptics News*, **29**, No. 4 (2011) 13.
- 15) 村瀬治比古: *Microoptics News*, **29**, No. 4 (2011) 19.
- 16) 森 肇: *Microoptics News*, **29**, No. 4 (2011) 49.
- 17) N. Ishikura *et al.*: *MOC* (2011) C-2.
- 18) X. Gu *et al.*: *MOC* (2011) C-3.
- 19) M. Nakashima *et al.*: *MOC* (2011) C-5.
- 20) 伊藤弘昌: *Microoptics News*, **29**, No. 3 (2011) 25.
- 21) T. Watanabe *et al.*: *MOC* (2011) D-2.
- 22) M. Uemukai *et al.*: *MOC* (2011) D-4.
- 23) M. Nakazawa: *MOC* (2011) E-2.
- 24) K. Matsuda: *MOC* (2011) E-5.

## 8. ホログラフィックディスプレイ

関西大 松島恭治

### 8.1 概 要

アメリカ光学会 (OSA) が毎年開催する Topical Meeting on Digital Holography and Three Dimensional Imaging が、2011 年は東京大学生産技術研究所で開催された。そのため、国内からの多数の発表・来場があり大変盛況であった。例年日本で開催される International Workshop on Holography and Related Technology (IWH) と合わせて、ホログラフィー関連の国際会議が 2 件国内で開催されたことになる。筆者は、4 月末にアメリカ・オーランドで開催された SPIE Defense, Security, and Sensing 2011 にも参加する機会を得たが、そこであったホログラフィックディスプレイセッションの発表者は全員日本人であった (一部震災でキャンセル)。どうやら、日本人は世界でも最もホロ

グラフィー好きな国民であるようである。それを反映してか、三次元立体画像専門の国内学会である 3 次元画像コンファレンスでも、シンポジウムと一般発表の全 47 件のうち 24 件がホログラフィー関連の発表となっており、過半数を超える勢いである。

このように、ディスプレイに関連したホログラフィーの研究がさかんになっている背景には、関連するデジタル技術の発展があることは間違いないであろう。本稿で取り扱うディスプレイホログラフィーは、基本的にデジタル化したホログラフィーであり、純粋に感光性材料だけで記録再生する古典的な光学ホログラフィーは含まれていない。ホログラムの実態は干渉縞であり、その物理的な解像度は数ミクロンから波長程度になる。ディスプレイ用途の場合にはある程度の画面サイズがどうしても必要になるため、このような高精細な干渉縞画像が含む情報量は莫大なものとなる。そのため、それをデジタル的に取り扱うのに必要なメモリーやディスク容量は大きくならざるをえず、処理するために必要な演算能力も巨大になる。年々増加するコンピューターの容量と性能が、ホログラフィーの隆盛を支えていることは間違いないであろう。

### 8.2 電子ホログラフィー

情報通信研究機構 (NICT) が昨年発表し、本欄でも紹介のあった 8K4K パネル 3 枚を用いたシステムの構成を変更したシステムが報告された<sup>1)</sup>。従来、時間分割でカラー化しパネル 3 枚の空間分割で広視域化していたシステムが、各パネルを RGB に割り当て、時分割で広視域化するシステムに改められた。発表の翌日にこのシステムのデモがあった。フリッカーは多少あるものの再生は滑らかであり、現時点では、世界最高の電子ホログラフィーシステムであろう。

ディスプレイパネルが毎秒表示可能な画素数を年別別にプロットすると、指数関数的に増加しているという指摘があり<sup>2)</sup>、これを利用してパネルの解像度不足を補うための時分割の手法がいくつか提案されている。以前より提案のあったガルバノミラーを用いた時分割走査システムでグレイレベル干渉縞の表示が報告されており、高い完成度を誇っている<sup>3)</sup>。ガルバノミラーを用いた時分割走査型はほかにも報告されているが<sup>4)</sup>、一方、動作の遅いガルバノミラーや液晶シャッター<sup>1)</sup>を用いずに、高速スイッチング可能な LD 光源を用いて時分割を行う光源スイッチング型時分割方式も提案されている<sup>5)</sup>。少し似た物としては、RGB-LED 光源をスイッチングしてカラー表示を行う提案もある<sup>6)</sup>。

### 8.3 撮像・三次元情報取得

この分野には、多視点画像を用いる手法、干渉縞をイメージセンサーで撮影するデジタルホログラフィー(DH)、3D スキャナーを用いる手法等がある。多視点画像としては、解像度 1600×1200 ピクセルのカメラを円周上に 300 台並べてホログラフィックステレオグラムを生成するシステムが NICT より発表されており<sup>7)</sup>、前述の 8K4K×3 システム<sup>1)</sup>で再生されている。また、多視点画像の画像数を増やすため、ボリウムデータを生成する手法が提案されている<sup>8)</sup>。

DH は近年発達が最も著しい分野のひとつになっており、計測等で実用化が進んでいるが、本稿ではディスプレイと関係が深い研究のみを取り上げる。高速度カメラを並列 DH に用いた 15 万 fps もの三次元動画イメージングの研究が進んでおり、印象的な動画が公表されている<sup>9,10)</sup>。DH の色再現性を向上するために四原色を用いる手法や<sup>11)</sup>、分光イメージングのための分光推定 DH も提案されている<sup>12)</sup>。空間キャリア型シングルショット DH でも、顕微鏡用の無歪の手法が提案され美しい再生像を報告している<sup>13)</sup>。少し変わったものとしては、合成開口 DH で取得した光波を仮想シーンに埋め込んで 10 億画素を超える超高解像度の計算機合成ホログラム (CGH) として再生する技術が高度化しており、美しい三次元再生像が得られている<sup>14)</sup>。

Microsoft の安価な 3D スキャナーである Kinect を用いた研究が各所でさかんであるが、CGH においても、Kinect でキャプチャーした 3D 物体を電子ホログラフィーでリアルタイムに再生する研究が報告されている<sup>15)</sup>。また、産業用の高精度 3D スキャナーでキャプチャーした人顔を超高解像度 CGH (静止画) として再生し、美しい再生像が得られている<sup>16)</sup>。

### 8.4 プリント・計算・レンダリング

静止画として CGH をプリントする際には、専用のフリンジプリンターや産業用のレーザーリソグラフィー、電子ビーム等が使用されてきた。しかし、これらでは干渉縞が二次元のいわゆる「薄いホログラム」となり、波長選択性がなく、イメージ型以外では白色光再生が不可能であった。これを克服するために、体積型のホログラムを描画するプリンターが 2 件報告されている<sup>17,18)</sup>。これらはほぼ同じ原理によって動作し、その構造は従来のホログラフィックプリンターとよく似ているが、従来のプリンターがステレオグラムをプリントするのに対して、波面を再生する完全なホログラムをプリントできる点が異なっている。なお、従来のホログラフィックプリンターも改良が進められ

ている<sup>19)</sup>。二次元タイプの干渉縞でも、従来難しかったバイナリー干渉縞によるイメージ型ホログラムの白色光再生が報告されている<sup>20)</sup>。

CGH で物体光波を計算する点光源法は、従来から GPU での実装が進められてきたが、ポリゴン法などの波動光学数値計算でも計算ライブラリーの GPU 実装が報告されている<sup>21,22)</sup>。これらは、CGH のみならず、DH や通常の波動光学シミュレーションにも有用なものとなっている。

昨年と一昨年の本欄でも紹介されたように、ポリゴン法で古典的ホログラムに匹敵する静止画 CGH が作成されるようになってきている。さらなる表現力の向上を目指して、鏡面性ポリゴンの高速レンダリング法とそれによる再生像が報告され<sup>23)</sup>、さらに、滑らかな曲面の生成手法とそれによる美しい再生像も報告されている<sup>24)</sup>。鏡面性ポリゴンの生成手法については、さらに 2 件が提案されているが、具体的にどのような再生像になるかはまだ不明である<sup>25,26)</sup>。点光源法では、ゾーンプレートの変調による新しいレンダリング法が提案され、電子ホログラフィーで再生像が確認されている<sup>27)</sup>。

### 8.5 展 望

ホログラフィックディスプレイの研究がさかんな背景のひとつは、やはり研究ネタとして興味深いからであろう。ホログラフィーは光波面そのものを再生するため、実用化している立体ディスプレイで常に問題になる輻輳・調節矛盾などは原理的に生じず (水平視差のみの一部のタイプを除く)、実態はともかく、潜在的には究極の 3D ディスプレイである。筆者は、IWH の講演においてコンピューターグラフィックスに対抗してコンピューターホログラフィーなる言葉を提案し<sup>28)</sup>、実際にいくつかの静止画像の作例を展示したが、その中には、1 つの画像が 200 億画素を超えるものもある。そこまでして、はじめて古典的な光学ホログラフィーと比肩する深い奥行きのある美しい映像が得られる。しかし、その動画像を電子的に表示するのは、現時点ではまだまだ困難である。とはいえ、ここで述べたようにさまざまな方面からの模索は続いている。前述のとおり、デバイスのピクセルレートが指数関数的に増大していることもあり<sup>2)</sup>、本格的ホログラフィックディスプレイが実現する日が案外早く来るかもしれない。

### 文 献

- 1) Senoh *et al.*: *DH* (2011) DTuA3.
- 2) M. Yamaguchi: *Proc. SPIE*, **8043** (2011) 804306.
- 3) M. Yokouchi: *DH* (2011) DMC4.
- 4) M. Tanaka: *DH* (2011) DWC11.
- 5) 松田篤史他: *OPJ* (2011) 29pF10.

- 6) M. Oikawa: *DH* (2011) DTuC11.
- 7) 山本健詞他: 映情学技報, **35**, No. 22 (2011) 13.
- 8) 大澤祐介他: 3次元画像コンファレンス (2011) S-4.
- 9) 粟辻安浩: 3次元画像コンファレンス (2011) S-2.
- 10) 田原 樹他: *OPJ* (2011) 28aC3.
- 11) 伊藤安軌他: *OPJ* (2011) 28aH7.
- 12) 伊藤安軌他: *OPJ* (2011) P27.
- 13) 大谷真由他: *OPJ* (2011) 29pF4.
- 14) K. Matsushima *et al.*: *Appl. Opt.*, **50** (2011) H278.
- 15) 中村淳也他: 3次元画像コンファレンス (2011) P-15.
- 16) H. Nishi *et al.*: *Proc. SPIE*, **7957** (2011) 79571A.
- 17) 春口弘喜他: 新画像システム・情報フォトニクス研究討論会 (2011) 18.
- 18) 宮本 磨他: 3次元画像コンファレンス (2011) P-18.
- 19) 宇津木健他: 3次元画像コンファレンス (2011) P-20.
- 20) 山下裕士他: *HODIC Circular*, **31**, No. 3 (2011) 14.
- 21) 寺口 功他: *OPJ* (2011) 23pD2.
- 22) 下馬場朋禄他: *HODIC Circular*, **31**, No. 4 (2011) 14.
- 23) H. Nishi *et al.*: *Appl. Opt.*, **50** (2011) H245.
- 24) H. Nishi *et al.*: *DH* (2011) DWC29.
- 25) T. Ichikawa *et al.*: *Appl. Opt.*, **50** (2011) H211.
- 26) K. Yamaguchi *et al.*: *Appl. Opt.*, **50** (2011) H195.
- 27) 栗原貴之他: 3次元画像コンファレンス (2011) S-4.
- 28) K. Matsushima *et al.*: *IWH* (2011) A1.

## 9. 光波シンセシス

千葉大 尾松孝茂

### 9.1 概 要

「光波の諸性質を制御し所望の特性をもつ光を合成すること」を光波シンセシスとよぶ。光波の性質を決めるパラメーターには、周波数・振幅・位相・波面・パルス波形・コヒーレンス・スペクトル・偏光などがある。レーザーの性能が格段に向上した今、これらの光パラメーターを多角的に積極的に制御して新しい光波の「シンセシス」(創成あるいは統合)の可能性を探ることが、情報通信、物性研究、材料加工、光化学等のあらゆる分野で求められている。本稿では、位相特異点や偏光特異点を波面に有するトポロジカル光波、高出力化が進みつつあるテラヘルツ波、光波シンセシスが最も浸透しているバイオフォトニクスなどを取り上げ、光波シンセシスに関する最近の動向を紹介する。

### 9.2 トポロジカル光波

位相特異点を有する光渦や偏光特異点を有する軸対称偏光モードなどをトポロジカル光波とよぶ。軌道角運動量、軸上電場などの特異な性質を示すトポロジカル光波は、これまで理論や空間伝播特性を中心に研究が進められてきた。近年、レーザーアブレーション加工をはじめとする具体的な応用例が発表されるに伴い、トポロジカル光波の高出力化や波長変換などの研究が展開しはじめている。加圧された Yb ドープラージモードエリアファイバーをガウス

モードから光渦モードへのモード変換器とレーザー増幅器として活用することで、10 W を超える高出力な光渦モードが発生できることが報告されている<sup>1,2)</sup>。

ファイバーレーザーから発生したドーナツ型モードをさらにバルクの固体レーザー (Er:YAG) の励起光にして、高エネルギーパルスが発生させる研究も報告された<sup>3)</sup>。1645 nm において 18 mJ, 40 ns のレーザーパルスが観測されている。

また、超短パルス領域でもピコ秒光渦やフェムト秒光渦の高出力化の研究が進んでいる。特に、フェムト秒領域では、四分の一波長板、白色光発生、軸対称位相板、広帯域四分の一波長板、光パラメトリック増幅、パルス圧縮光学系を組み合わせ数サイクル光渦パルスが発生されている。非線形屈折率効果を用いて円偏光のスピ角運動量を光渦の軌道角運動量に変換する研究もなされている<sup>4)</sup>。

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、さらに、シリンドリカルレンズペアからなるモードコンバーターを組み合わせ高次光渦に変換するレーザー<sup>5)</sup>が提案されている。このように、トポロジカル光波を取り巻くレーザー技術は大きく進化しはじめている。

これまで光渦の波長変換に関する研究は、もっぱら実証実験が中心で、変換効率はもちろん、波長変換後のレーザー出力さえ記述がなかった。その大きな理由は、非線形光学結晶の複屈折性に起因して起こるウォークオフ効果である。ウォークオフ効果は波長変換後の光渦の純度を低減させる。極端な場合には、波長変換後の光渦波面から位相特異点を消失させる。近年、著しく品質が向上した PPSLT (periodically poled stoichiometric lithium tantalate) や PPLN (periodically poled lithium niobate) などの周期分極反転結晶 (擬位相整合素子) を用いることで、初めて実用的なレベルでの波長変換が可能になった。ナノ秒やピコ秒領域で 1 W を超える第二高調波が観測されている<sup>6)</sup>。

また、中赤外光渦の発生も精力的に研究が進められている<sup>7)</sup>。1  $\mu\text{m}$  光渦レーザーを励起光源とし、KTP (potassium titanyl phosphate) を配置した光パラメトリック発振器によって 2  $\mu\text{m}$  帯で初めて光渦の発生が観測された。パルスエネルギーは mJ を超え、実用的に使えるレベルに達している。この光パラメトリック発振器では、通常的光渦では固有モードとして存在しない半整数光渦も、共振器モードとして安定的に発振することが報告されている<sup>8)</sup>。非整数光渦に関する研究の歴史は浅く、実験に関する研究報告はほとんどない。ましてや、共振器から直接発振した例はない。理論的な発振メカニズムの詳細はいまだ解明さ

れていないが、レーザー発振におけるきわめてユニークな現象である。

トポロジカル光波によるレーザーアブレーション加工では、アブレーション時にできる金属ナノニードルが注目を集めている。ナノニードルの直径も急速に小さくなり、先端曲率半径に換算してすでに 100 nm を切る金属ナノニードルが形成できるようになってきた<sup>9)</sup>。再現性が向上すれば、バイオ MEMS や電界放射型電極やプラズマプローブとしての展開が期待できる。

このほか、時間多重、波長多重に続く大容量多重光通信方式のひとつとして、トポロジカル光波の空間直交性を利用した空間多重光通信<sup>10)</sup>などが報告されている。

### 9.3 テラヘルツ波工学

電波と光波の中間の周波数帯に相当し、電波のもつ良好な透過性と光波のもつ良好な制御性を兼ね備えている 1~100 THz 周波数帯の光波（テラヘルツ波）に関する研究が本格化して久しい。これまでにテラヘルツ波発生法として、非線形光学結晶を用いた波長変換による単色テラヘルツ波発生やフェムト秒レーザーによる広帯域テラヘルツ波発生など、数多くの研究が報告されている。しかしながら、いずれの方法でも発生するテラヘルツ波の波長域が制限されること、発生するテラヘルツ波のパワーが極端に小さいこと、が応用研究の大きな壁となっている。これらの問題を解決すべく、新しい非線形光学結晶の開発や励起用光源の開発が進んでいる。

テラヘルツ波発生用の非線形光学素子として従来から用いられてきた DAST (4'-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate) 結晶に代わる BNA (N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline) 結晶が開発された<sup>11)</sup>。この結晶は、非線形定数が大きいため、溶液法を用いることで品質のよい大きな結晶が育成できること、DAST では発生しにくい < 2 THz のテラヘルツ波が発生できること、などの利点を有する。光損傷閾値も 20 MW/cm<sup>2</sup> を超えるため、テラヘルツ波の高出力化に適している。さらには、0.1~3 THz が発生できる OH1 (2-(3-(4-Hydroxystyryl)-5,5-dimethylcyclohex-2-enylidene)malononitrile) 結晶なども登場した<sup>12)</sup>。このほか、DAST 結晶の誘導体である DSTMS 結晶 (4-N,N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium 2,4,6-trimethylbenzenesulfonate) も開発されている。DSTMS 結晶は高出力レーザーの標準は光源である 1 μm レーザーの差周波光としてテラヘルツ波が発生できるため、潜在的には高出力化に向いている。

また、テラヘルツ波励起用光源の完成度も格段に向上しつつある。例えば、420 ps の Nd:YAG マイクロチップ

レーザーを用いて MgO:LiNbO<sub>3</sub> 結晶を励起し、インジェクションシーディング・光パラメトリック発生によってピークパワーに換算して 100 W を超えるテラヘルツ波の発生が可能になった<sup>13)</sup>。このほか、DAST 結晶による差周波光発生に適している高出力 1.5 μm 帯二波長同時発振レーザーが提案されている<sup>14)</sup>。

テラヘルツ波工学を支える周辺技術として、光検出機器が充実している近赤外に周波数アップコンバージョンして高感度にテラヘルツ波信号を検出する技術や、テラヘルツ・エバネセント波を介して起こる差分吸収を近赤外光で検出する技術、さらには、金属 V 溝構造によるテラヘルツ波の超解像集光技術<sup>15)</sup>などが開発されつつある。

これらの基盤技術のほかに、シリコン界面で発生するテラヘルツ波信号の変化を読み取り界面で起こる化学反応を計測するテラヘルツ波ケミカル顕微鏡<sup>16)</sup>などの新しい分光計測法も、研究が進められている。この方法では、時空間分解能は照射するフェムト秒レーザーで決めるため、テラヘルツ波分光でありながら高い空間分解能が達成できる。

可視域では実用的な素子開発が難しいメタマテリアルも、波長が長いテラヘルツ波領域では、比較的簡単にデバイス化ができる。テラヘルツ波とメタマテリアルによる新しい光学技術も興味深い<sup>17)</sup>。

### 9.4 バイオイメージングにおける光波シンセシス

バイオイメージングはアポダイゼーションや微分干渉やラマン顕微鏡など、最も古くから光波シンセシスが行われてきた分野といえる。特に、ラマン顕微鏡は観測している対象物の分子種を染色することなく特定できることから、バイオイメージングにおいて重要な役割を果たす。しかしながら、ラマン信号は一般に微弱で、観測に要する時間が長い。信号強度を増強する手法として、三次非線形光学効果を介して起こる誘導ラマン散乱を利用した顕微鏡（誘導ラマン顕微鏡）<sup>18)</sup>が提案されている。簡単な原理は以下のようになる。異なる波長の 2 色のレーザーの一方をポンプ光として強度変調して合波した後、試料に集光する。誘導ラマン散乱によって発生した信号光は、ポンプ光によって増幅されるとともに、強度変調を受ける。この増幅された誘導ラマン散乱信号光をロックイン検出することで、分子振動強度を特定する。通常のラマン顕微鏡に比べて、信号光強度が数桁向上するため、検出感度向上と測定時間の短縮になる。

また、トポロジカル光波である軸対称偏光モードを用いたナノイメージングも進展してきている。高次の軸対称偏光モードでは点像分布関数がガウスビームの点像分布関数（回折像）より小さくなることを利用して、面内空間分解

能を向上させることができる。すでに 170 nm の蛍光ビーズが二点分解できている<sup>19)</sup>。マックス・プランク研究所の S. Hell が誘導放出蛍光消去型 (STED) 超解像顕微鏡を提案しているが、こちらでもトポロジカル光波である光渦が応用されており、今後、ナノイメージングにおけるトポロジカル光波の利用は新しい潮流となる可能性がある。また、軸対称偏光モードのユニークな特徴である軸上電場を利用したナノイメージングはいまだ決定的な実験報告例はない。今後の展開に期待したい。

## 9.5 ま と め

光波シンセシス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。今回はトポロジカル光波、テラヘルツ波工学、バイオイメージングなどを中心に紹介したが、パルス整形技術や波長変換技術を駆使する光化学反応制御やアト秒極限非線形光学や量子光学などの分野も、光波シンセシスが潜在的に活躍できる大きな研究領域といえよう。今後の研究動向が見逃せない。

## 文 献

- 1) M. Koyama *et al.*: Opt. Express, **19** (2011) 994.
- 2) M. Koyama *et al.*: Opt. Express, **19** (2011) 14420.
- 3) J. W. Kim *et al.*: CLEO/Europe (2011) CA9\_3.
- 4) 鈴木誠人他: 秋季応物講演会 (2011) 30p-ZH-10.
- 5) T. H. Lu *et al.*: IQEC/CLEO Pacific Rim (2011) 549.
- 6) T. Omatsu *et al.*: IQEC/CLEO Pacific Rim (2011) 552.
- 7) K. Miyamoto *et al.*: IQEC/CLEO Pacific Rim (2011) 554.
- 8) K. Miyamoto *et al.*: Opt. Express, **19** (2011) 12220.
- 9) 尾松孝茂: レーザ協会誌, **31** (2011) 15.
- 10) Y. Awaji *et al.*: ECOC (2011) We.10. P1.55.
- 11) M. Tang *et al.*: CLEO (2011) JThB112.
- 12) 内田裕久他: 秋季応物講演会 (2011) 1a-F-6
- 13) S. Hayashi *et al.*: NLO (2011) NWE23.
- 14) M. Koichi *et al.*: Opt. Express, **19** (2011) 18523.
- 15) 栗原一嘉他: 秋季応物講演会 (2011) 31p-F-6
- 16) 天満 陽他: 秋季応物講演会 (2011) 1p-F-2
- 17) 高野恵介他: 秋季応物講演会 (2011) 31p-F-4
- 18) 梅村 航他: 秋季応物講演会 (2011) 2a-B-4
- 19) Y. Kozawa *et al.*: Opt. Express, **19** (2011) 15947.

## 10. 次世代フォトニックネットワークのための光技術

大阪大 久武信太郎

### 10.1 概 要

クラウドコンピューティングや高精細三次元画像伝送などの潜在的ニーズを背景に、2011 年も伝送容量の拡大が世界的に進んだ。周波数利用効率の点で有利な光 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 方式は、送受信において高速フーリエ変換・逆変換 (FFT・IFFT) が

必要となる。信号処理速度がボトルネックとなりうるが、全光処理を用いることで 26 Tbps の伝送容量が実証された<sup>1)</sup>。リアルタイム FPGA (field-programmable gate array) を用いた光 OFDM のラインレートが 101.5 Gbps<sup>2)</sup> であったことを考えると、大きな進展である。

次世代のフォトニックネットワークを支える光技術の国内の進展に目を向けると、高速化のみならず、省電力化のための技術も着実に進展したようである。以下、応用物理学会と電子情報通信学会での口頭発表をベースに、2011 年のこの分野の進展についてまとめる。

### 10.2 光信号処理技術

高速、低消費電力、高効率なフォトニックネットワーク構築のために、全光信号処理技術に関する研究がさかに行われている。その中でも、ネットワークの低消費電力化のための光スイッチの研究が最も多く発表されていた。光パケット信号の経路を光のまま切り替える高速光スイッチとしては、InAlGaAs/InAlAs マツハ・ツェンダー干渉計型スイッチ (2×2) のカスケード接続による 4×4 スイッチが試作され、化合物半導体による 2×2 スイッチのカスケード接続が多チャネル・低偏光依存・低消費電力な光スイッチの有効な手段であることが示された<sup>3)</sup>。シリコン導波路と III-IV 属半導体導波路のハイブリッド構造による全光スイッチで 10 Gbps の全光ゲート動作も確認されている<sup>4)</sup>。光パケットスイッチにおいて、多くの電力を消費するラベル処理負荷の低減技術では、DPSK (differential phase shift keying) 符号への対応が検討された<sup>5)</sup>。

波長選択スイッチとしては、マイクロワット程度の低消費電力とナノ秒程度の高速動作が期待できる 5 層非対称結合量子井戸を用いたマイクロリング共振器によるヒットレス波長選択スイッチが報告された<sup>6)</sup>。低消費電力スイッチの別のアプローチとしては、Si 細線と相変化材料を組み合わせた相変化スイッチの安定なスイッチング動作が 11.5 dB の消光比のもと報告されている<sup>7)</sup>。相変化スイッチは自己保持機能により、スイッチング時のみ電力を必要とすることが特長である。光スイッチの高密度化のアプローチとしては、シリコンフォトニクス、スローライトの活用<sup>8)</sup>、三次元光配線<sup>9)</sup> が検討された。

従来からの OOK (on off keying) 信号に加えて多値変調信号が混在する将来のネットワークに備えた全光変調フォーマット変換 (全光 NRZ-OOK/RZ-16QAM@10.7 Gbps)<sup>10)</sup>、高速信号の長距離大容量伝送のための光有限インパルス応答 (FIR) フィルターを用いた可変光等価器 (OOK@40 Gbps)<sup>11)</sup> や、5 ビット全光量子化<sup>12)</sup> とその安定動作に必要な高精度全光リミッター<sup>13)</sup> に関する研究も着実に進

展している。

### 10.3 光変復調技術

高速化のためのコヒーレント多値光変復調技術の進展が著しいが、復調システムのコストを低減しない限り、アクセス系への適用は困難と考えられる。復調システムの低コスト化と省スペース化に有利なシリコンリング共振器を用いた BPSK (binary phase shift keying) 信号の復調動作<sup>14)</sup>が報告され、ハーフシンボル光遅延干渉計と1つの光検出器のみを用いて自己ホモダイン検出を可能とした簡素な多値光復調方式が提案された<sup>15)</sup>。

10 Gbps 程度で動作する Si 変調器<sup>16-19)</sup>が報告される一方で、Si 系光変調器として、おもに変調効率の向上に関して (1) 材料面では Ge/SiGe 五層非対称結合量子井戸<sup>20)</sup>、 $\pi$  電子系有機非線形光学ポリマーの導入<sup>21)</sup>、SiGe-on-Insulator<sup>22)</sup> と、(2) 構造面では PN 接合型<sup>23,24)</sup> からの研究が報告された。

伝送距離などの伝送路条件に応じて変調フォーマットを動的に切り替え可能とする適応型マルチフォーマット光変調器が、石英系平面光回路 (PLC) と LiNbO<sub>3</sub> (LN) のハイブリッド集積技術のもと実現された。1 キャリヤー 16QAM (quadrature amplitude modulation), 2 キャリヤー QPSK (quadrature phase shift keying), 4 キャリヤー BPSK (binary phase shift keying) の三種の信号フォーマットの動的切り替えを実証している<sup>25)</sup>。

多値変調信号など、より複雑な光信号発生のための高精度・高速光変調技術については、電界制御 Y 分岐を設けた LN 変調器で、24 時間連続でキャリヤー抑圧比 35 dB 以上という値が得られている<sup>26)</sup>。

高効率かつ低チャープな LN 変調器として、共振電極を用いた単一駆動 push-pull 光変調器<sup>27)</sup> や、強誘電体の分極反転構造を進行波型電極電気光学変調器に適用したファイバー分散補償のためのプリイコライジング変調器が提案<sup>28)</sup>された。同じく分極反転構造に基づくデバイスである理論効率 100% で 10 GHz 以上でも動作可能なブラッグ回折型電気光学周波数シフターの連続動作が実証<sup>29)</sup>された。LN 変調器のさらなる低駆動電圧化を可能とする基板厚 10  $\mu\text{m}$  以下の薄片デバイスは、光ファイバーとの結合損失の低減 (従来比 -3 dB)<sup>30)</sup> が進んだ。一方で、マイクロリング共振器における位相変化増大効果による動作電圧の低減 (変調効率は従来比 5 倍) も進んだ<sup>31)</sup>。LN 基板の薄片化とリッジ型光導波路構造の適用による EO 帯域の広帯域化と駆動電圧の低減により、全 ETDM 法による 90 Gbaud (360 Gbps) DP-DQPSK 信号の生成にも成功している<sup>32)</sup>。

### 10.4 その他の光技術

光通信ネットワークと無線通信ネットワークをシームレスに接続する技術に関する研究が精力的に進められている。スプリットリング共振器アレイアンテナによるミリ波・サブミリ波帯光変調器<sup>33)</sup> やアンテナ電極電気光学変調器による空間多重ミリ波無線信号の分離<sup>34)</sup> が報告される一方で、光技術に基づく 350 GHz 帯無線伝送実験<sup>35)</sup> や、W 帯 (75~110 GHz) での 10 Gbaud QPSK 光ファイバー無線 (RoF) の実証<sup>36)</sup> もなされている。これら有線-無線通信のシームレス接続技術は、甚大災害時のバックアップ回線としても今後重要度を増すと考えられる。

観測衛星などからの大容量画像データを短時間で効率よく伝送するために、Gbps レベルの高速光空間通信システム技術の開発が望まれているが、この分野ではいわゆる光ファイバー系のネットワークとは異なる光技術の開発が必要となる。空間伝送用リアルタイム 6 Gbps デジタルコヒーレント光受信器も開発され、大気ゆらぎによる波形歪みをデジタル信号処理により補償する技術も検討されている<sup>37)</sup>。レーザービームの指向角度変動を高精度制御する精捕捉追尾機構の試作<sup>38)</sup> も報告された。衛星間の軌道条件によるドップラーシフト補償機能をもつ光ホモダイン受信機も試作されている<sup>39)</sup>。

### 10.5 展 望

将来のフォトリックネットワークでは、高速・大容量であることに加えて、いかに効率的なネットワークを構築し、省電力に運用するかが問われる。スマートフォンの普及など昨今の社会的トレンドをみれば、有線-無線シームレスネットワークを前提とした光技術の開発も今後は重要となりそうである。

### 文 献

- 1) D. Hillerkuss *et al.*: Nat. Photonics, **5** (2011) 364.
- 2) R. Schmogrow *et al.*: OFC (2011) OWE5.
- 3) 上田悠太他: 春季応物講演会 (2011) 24p-KA-11.
- 4) 庄司雄哉他: 春季応物講演会 (2011) 24p-KA-10.
- 5) 根岸孝太郎他: 秋季応物講演会 (2011) 31a-ZN-9.
- 6) 後藤 剛他: 信学会総合大会 (2011) C-3-37.
- 7) 田中大輝他: 信学会ソサエティ大会 (2011) C-3-41.
- 8) 淵田 歩: 信学会ソサエティ大会 (2011) C-3-43.
- 9) 保科貴之他: 春季応物講演会 (2011) 27a-KB-3.
- 10) 徳永明泰他: 信学会ソサエティ大会 (2011) B-10-48.
- 11) 五十嵐浩司: 春季応物講演会 (2011) 26p-KB-1.
- 12) 高橋考二他: 信学会総合大会 (2011) B-10-88.
- 13) 川西健太郎他: 信学会総合大会 (2011) B-12-22.
- 14) 高 磊他: 信学会総合大会 (2011) C-3-25.
- 15) 塙 雅典他: 信学会総合大会 (2011) B-10-32.
- 16) 藤方潤一他: 信学会総合大会 (2011) C-3-59.
- 17) H. C. Nguyen *et al.*: 信学会ソサエティ大会 (2011) C-3-51.
- 18) 五井一宏他: 信学会ソサエティ大会 (2011) C-3-48.
- 19) 秋山 潔他: 春季応物講演会 (2011) 24p-KB-2.

- 20) 郷田洋一郎他：秋季応物講演会 (2011) 31p-ZN-13.
- 21) 井上振一郎他：秋季応物講演会 (2011) 1a-ZN-2.
- 22) 金 栄現他：秋季応物講演会 (2011) 1a-ZN-3.
- 23) 古谷竜一他：秋季応物講演会 (2011) 1a-ZN-5.
- 24) 高 磊他：秋季応物講演会 (2011) 1a-zn-6.
- 25) 郷 隆司：信学会ソサエティ大会 (2011) C-3-8.
- 26) 中島啓幾他：信学会ソサエティ大会 (2011) C-3-6.
- 27) 本谷将之他：春季応物講演会 (2011) 26a-KB-7.
- 28) 村田博司他：秋季応物講演会 (2011) 1a-zn-12.
- 29) 久武信太郎他：秋季応物講演会 (2011) 1a-zn-9.
- 30) 近藤順悟他：信学会総合大会 (2011) C-14-11.
- 31) 上山雄太他：春季応物講演会 (2011) 24p-KA-6.
- 32) 菅野敦史他：信学会総合大会 (2011) C-3-27.
- 33) 西岡隼也他：信学会ソサエティ大会 (2011) C-14-3.
- 34) 宮中亮太他：信学会ソサエティ大会 (2011) C-14-5.
- 35) 高田卓馬他：信学会ソサエティ大会 (2011) C-14-9.
- 36) 菅野敦史他：信学会ソサエティ大会 (2011) C-14-12.
- 37) 佐々木崇他：信学会総合大会 (2011) B-3-11.
- 38) 江藤大輔他：信学会総合大会 (2011) B-2-32.
- 39) 原口英介他：春季応物講演会 (2011) 27p-KB-7.

## 11. ボリュームホログラフィックメモリ技術

東京大 志村 努

### 11.1 概 要

光メモリに関しては、ますます逆風が強くなってきている。パソコン用の外部メモリとして、光ドライブを搭載しない機種が徐々に増えているのは周知のとおりである。デジタルカメラ、動画、ダウンロードファイルの記録媒体としては、ハードディスク (HDD) が主になっており、さらには不揮発性半導体メモリ (SSD) の進出も激しい。このような中で、光メモリは動画ソフト等の大容量ファイルの配布媒体としての用途を除いて、将来展望は厳しいというのが一般的な見方である。

ホログラフィックメモリもこのような中で、単純に Blu-ray disc (BD) の次の世代の光メモリといううたい文句だけでは、存在価値、研究・開発の価値が見いだされにくくなっている。

しかし、光メモリは将来的に本当に不要なのであろうか。現在の計算機、情報・通信の流れとして、データは手元に置かず、大規模データセンターに保存し、必要に応じて通信によって取り出して使用する、という形態が急速に普及しつつある。その代表例が、いわゆるクラウド・コンピューティングである。この場合は、きわめて大規模なデータセンターが必要となり、そこで要求される記録容量を HDD と SSD 等だけで賄いきれるか、という点は定かでない。また消費電力と、媒体の寿命による装置の入れ替えとデータのコピーの頻度のための費用と労力、この2点が今後問題になると考えられる。その点で、ホログラフィックメモリを含む光メモリは、読み書き時以外は通電の

必要がなく、また物理的なデータの保存寿命も HDD、SSD と比べて長いと見込まれており、いずれ大きな需要が出てくる可能性をもっている。問題は、記録再生およびデータ転送の速度、信頼性等を、システムの要求に見合ったものにできるか、というところであり、現在のホログラフィックメモリはこの点を念頭に置きつつ、研究開発が行われている。

昨年のホログラフィックメモリの研究動向としては、日本光学会のボリュームホログラフィックメモリ技術研究グループ (以下 VHM と略す) とその傘下のワーキンググループ (以下 VHM-WG と略す) の活動は、着実に進められている。

メーカーでの研究開発は、昨今の経済状況を反映して漸減傾向にあるが、システム関係では日立の活動が際立っている。記録材料としては、新日鐵化学、三菱化学等がおもなところである。メーカー以外では NHK 技研、大学・国立研究所では、北海道大学、宇都宮大学、東京理科大学、東京大学、長岡技術科学大学、山梨大学、豊橋技術科学大学、和歌山大学、神戸大学、福岡大学、産総研等で、システムおよび記録材料関連の研究が行われている。

### 11.2 国際・国内会議の概要

ボリュームホログラフィックメモリ関連の会議としては、国内会議は、春と秋の応用物理学学会の講演会 (3月、神奈川；9月、山形)、Optics and Photonics Japan (OPJ) (11月、大阪)、第14回 VHM 技術研究会 (6月：東京)、同15回研究会 (11月、大阪；OPJ 内のシンポジウムとして開催) がおもなものであった。春の応物講演会は震災の影響で会自体は中止となったが、投稿された論文は学会で発表されたという扱いになっている。

国際会議としては、2011年は Optics Data Storage Topical Meeting と International Symposium on Optical Memory の Joint Meeting の3年に一度の開催年にあたっており、ISOM/ODS 2011 が7月にハワイで開かれた。また、International Workshop on Holography and Related Technologies (IWH) が11月に宇都宮大学で開催された。

### 11.3 システム関連研究

現在、ホログラフィックメモリのシステムを総合的に研究している代表的メーカーは日立である。システム全体に関する総合的な発表が IWH と OPJ であった<sup>1,2)</sup>。モノキュラー・アーキテクチャーとよばれる、参照光と信号光を同一の対物レンズから媒質中に導入するタイプのコンパクトなシステムである。現在 785 Gbits/inch<sup>2</sup> の記録密度が実現されている。

その他システム関連としては、転送レートの高速度とい

う観点からのコリニア (コアキシャル) システムのシステムパラメーターの最適化<sup>3)</sup>, 再生時の参照光の波面補償による再生信号品質の改善<sup>4)</sup> に関する報告があった。また新しい試みとして, 広帯域波長再生光を用いた読み出しトランスの改善<sup>5)</sup> についての報告があった。

高密度化に関しては, 以前から堀米らによって報告されている位相多値記録をさらに発展させて, 最近光通信で実用化されている, 振幅と位相の組み合わせによる多値化技術をホログラフィックメモリーに応用する例が, いくつか報告されている<sup>6-8)</sup>。また通常時系列信号で行われている RLL (run length limited) coding を空間的な信号に展開した例が, 実験<sup>9)</sup> と理論<sup>10)</sup> の両面から提案された。

新しい方式としては, コリニアシステムのシフト選択性を利用して, ホログラフィックメモリーでありながら, 時系列信号を記録再生する方式が提案された<sup>11)</sup>。この方式は上記の RLL coding が使えるため, さらなる高密度化が可能で, また通常のページデータの 1 画素ごとに 1 チャネルの時系列信号が並列的に記録再生されるため, データ転送速度の高速化の可能性ももっている。また, コリニア方式と同一の光学系を用いながら, 独立した参照光をもたないタイプの新しい方式が提案され, 注目を集めた<sup>12)</sup>。

偏光を用いた方式もいくつか検討されている<sup>13,14)</sup>。ねらいは偏光多重による高密度化である。また, これらの報告と並行して, 偏光ホログラフィーのより一般化された理論とその実験的検証が報告された<sup>15-17)</sup>。これにより, ビーム交叉角が大きい場合に正しい回折効率が与えられるようになった。

#### 11.4 信号処理関連

信号処理関連の技術は国内よりも国外, 特に韓国での研究がさかんである<sup>18-24)</sup>。エラー訂正, 二次元コーディング法などの報告が多い。また等化に関しては, 非線形な処理を用いるもの<sup>25)</sup>, 画面を分割して, それぞれに最適化された等化を行うもの<sup>26)</sup> などが提案されている。

#### 11.5 材料研究

記録材料関係の報告はあまり多くないが, 波長 532 nm 用の材料で収縮率が約 0.1% でありながら, M/# (エムナンバー) が 100 を超えるものが現れ, 注目を集めた<sup>27)</sup>。また, メモリーに特化された材料ではないが, 高屈折率のナノ微粒子を分散させ, 回折格子の振幅を増大させるタイプの材料に関して, 長年研究を積み重ねている電通大のグループから発表があった<sup>28)</sup>。また, 重合反応をモデル化したシミュレーションにより, ページ間の記録時間間隔と多重記録特性との関係を考察した報告があった<sup>29,30)</sup>。

## 11.6 展 望

冒頭に述べたように光メモリーを取り巻く環境は厳しいが, データセンターでのアーカイブ, あるいは比較的アクセス頻度の低いデータ用のメモリーとして, ホログラフィックメモリーは十分な潜在能力を秘めていると考えている。まずはページ単位でデータを扱うことに由来するデータ転送レートの高さが最大の特徴で, これは現在最速のテープメディアを超える可能性をもつ。また, 光メモリー一般に共通な, 低消費電力も大きな特徴である。保存寿命に関してはまだ十分なデータはないが, 少なくとも従来のメディアに比べて同等以上と考えられている。

今後のホログラフィックメモリーの研究は, 応用のターゲットを大規模ストレージシステムを中心として進めていくべきであり, そこから道が開けると考えている。また実用化はまだ先だが, 原理的に面白い新方式が継続的に提案されてきており, 基礎研究としても展開が望めそうである。

## 文 献

- 1) T. Hoshizawa *et al.*: *IWH* (2011) C1.
- 2) 石井利樹他: *OPJ* (2011) 29pCS6.
- 3) 藤村隆史他: *OPJ* (2011) 28aE5.
- 4) N. Ishii *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMB1.
- 5) R. Fujimura *et al.*: *IWH* (2011) C4.
- 6) K. Zukeran *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OTuD12.
- 7) K. Kunori *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMB3.
- 8) 岡本 淳他: *OPJ* (2011) 29pCS6.
- 9) Y. Nakamura *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMB5.
- 10) T. Tanabe *et al.*: *IWH* (2011) P07.
- 11) 河崎正人他: *OPJ* (2011) 28aE6.
- 12) M. Takabayashi *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMB4.
- 13) 落合孝典他: 秋季応物講演会 (2011) 1p-ZJ-2.
- 14) 落合孝典他: *OPJ* (2011) 28aE3.
- 15) K. Kuroda *et al.*: *Opt. Rev.*, **18** (2011) 374.
- 16) 松橋佑介他: *OPJ* (2011) 28aE2.
- 17) Y. Matsuhashi *et al.*: *IWH* (2011) P23.
- 18) Y. O. Kim *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMD3.
- 19) J. H. Kim *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMD4.
- 20) T. Kim *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMD9.
- 21) J. Kim *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMD13.
- 22) G. Kong *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OTuD4.
- 23) Y. O. Kim *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OTuD1.
- 24) D. Park *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OTuD11.
- 25) Y. Yamagishi *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OTuD2.
- 26) M. Hosaka *et al.*: *ISOM/ODS* (2011) OMB6.
- 27) T. Ando *et al.*: *IWH* (2011) P16.
- 28) 百瀬啓祐他: 春季応物講演会 (2011) 24a-KA-5.
- 29) C. Kusunoki *et al.*: *IWH* (2011) P14.
- 30) 楠木千尋他: *OPJ* (2011) 28aE1.

## 12. レーザーディスプレイ技術

大阪大 山本和久

### 12.1 概 要

レーザーは広い色再現領域を有するだけでなく, 発光面

積が小さいため投写効率を高めやすく、また高効率・高輝度でもることから、装置の小型化だけでなく低消費電力化が可能となるため、映像表示可能なレーザーディスプレイへの適用が注目されている<sup>1,2)</sup>。2010年は国内安全法規が一部改訂される等、商品化開発への弾みがついた。また、コストも低下しレーザー照明への広がりをみせようとしている。以下、この分野の状況を述べる。

## 12.2 要素技術

画像表示に対して大きな障害となるのがレーザー特有のスペckルノイズであり、課題となっている<sup>3)</sup>。コヒーレントなレーザー光がスクリーンの微小な凹凸の干渉によって斑点状の画像雑音を生じ、その大きさはスペckルコントラストで表される。これを低減するために光学系を用いた対策が試みられている<sup>4)</sup>。また、新たに分極反転構造電気光学変調器を用いてレーザー光のスペckルを広げること、スペckルコントラストを低減する方法が提案された<sup>5)</sup>。一方で、スペckルノイズの定量的評価方法について議論があった<sup>6)</sup>。

レーザー照明やレーザーディスプレイで重要となるのが可視光レーザー光源である。赤および青色の半導体レーザーはすでに製品化されているが、これまで緑色半導体レーザーは製品化されておらず、波長変換による緑色SHG (second harmonic generation) レーザーに頼っていた。緑色半導体レーザーのサンプル出荷が始まり、日本だけでなく海外でも研究開発が加速している<sup>7)</sup>。また、レーザー照明用に、青色半導体レーザーの蛍光体励起による白色光源が開発された<sup>8)</sup>。缶パッケージから高輝度光 270 cd/mm<sup>2</sup> が得られている。

レーザー光を走査する方式で超小型のプロジェクターが実現可能である。圧電を用いたメタルベース光走査が提案され、広角 (>100度) を周波数 25 KHz 以上で走査している<sup>9)</sup>。

レーザーを用いることで、自然界に存在する色をほぼ再現することができるだけでなく、従来のディスプレイでは再現できない色を表示することで映像にインパクトを与えることが可能となる。このような広い色域表現に関する効果、および課題が検討されている<sup>10)</sup>。

## 12.3 応用

液晶TVの背面照明としては、TVの消費電力低減だけでなく超薄型化も見据え、RGB三原色レーザーを導光板に導入することで液晶パネルを直接照明するという研究が行われている<sup>11,12)</sup>。また、光の有効利用を目的として、偏光維持が可能なフォトポリマーによる導光板が提案されている<sup>13)</sup>。

レーザーを用いたリアプロジェクションTV<sup>14)</sup>が国内で市場投入されており(75インチ)、消費電力は同サイズの液晶TVの半分以下である。一方、青色半導体レーザーの蛍光変換を用いてRGB光を得る試みとして、メタルベース光走査により三色の蛍光体を発光させ60インチカラー画像を40W以下の電力で実現している<sup>15)</sup>。

レーザー特有の高輝度性および小型化を生かして、短焦点高輝度プロジェクター(7000ルーメン)が開発された。レーザーにより光学系も小さくでき、プロジェクターからスクリーンまでの投射距離63cmを実現している<sup>16)</sup>。

携帯型のプロジェクター(約100cc)が海外で製品化されている。走査方式は、ほぼ平行光でビームが投射されるため、フォーカスフリーという特徴を有する。国内では、ノートパソコン、ゲーム機搭載だけでなく、バーチャルタッチパネルという応用が検討されている<sup>17)</sup>。また、走査型の応用として、車載用を目的にしたヘッドアップディスプレイがある<sup>17)</sup>。小型軽量に加え、広い色再現性を利用できるので視認性も高くなる。フロントガラスに映像を投射することで、運転者の視線移動もなく安全となる。

ディスプレイの分野において、立体像表示は古くからの強い要望である。液晶による偏光切り替えてピコプロジェクターの3D映像化を行うという提案があった<sup>18)</sup>。一方、レーザーを用いたホログラフィックビデオディスプレイは物体によって反射散乱された光の波面をそのまま再現できるため、特殊なメガネを必要とせず、見る位置を変えても自然な立体感が得られ、その期待は大きい<sup>19)</sup>。レーザー光源の実用化とともに画像デバイスの画素数向上が進んでおり、実用化が近付いている。

レーザーのディスプレイ装置への搭載により、レーザー光源の価格低下が進んでおり、レーザー照明に関しても家庭用まで広がりをみせている。家庭用のレーザープラネタリウム装置、アクアリウム照明やイルミネーション装置が販売されている。面発光半導体レーザーとSHGを組み合わせた光源をファイバーバンドルで束ねた三原色レーザーベースの白色光源で21000ルーメンが報告された<sup>20)</sup>。シネマ用だけでなく大型イルミネーションや、車載用のレーザーヘッドライト等への展開が期待されている。

レーザー照明を用いた農業分野への応用として、走査型光学系を用いた省エネ植物工場の提案があった<sup>21)</sup>。画像検出で生育に合わせて必要な部分のみにレーザー光を照射する方式である。

## 12.4 その他

2011年に注目されたのは、日本のみ存在していた携帯用レーザー応用装置に関する法改訂により、上述した携帯

レーザーディスプレイ装置の商品化が国内でも可能になったことである。これまでは電池の形状制限に加えて、発光するには人間がスイッチを押し続ける必要があった。またヘッドマウントディスプレイとしては覗き込み禁止という文言が入っており障害になっていた<sup>20)</sup>。2010年12月27日に消費生活用製品安全法が改正され、携帯用レーザー応用装置におけるこのような制約が削除されたため、国内においても製品化が可能となり、商品化が加速した。

## 12.5 展 望

ディスプレイや照明分野でレーザー応用製品の市場が伸びるための重要要素として、低消費電力化がある。レーザー、特に半導体レーザーは近赤外領域では80%を超す電気-光変換効率をもつものが発表されており、現在は30%程度であるディスプレイ用としても、今後効率はさらに向上することが予想されている<sup>23)</sup>。可視光半導体レーザーの効率は、2025年で60%に達する見込みである。

映像表示可能なレーザーディスプレイが次々と市場に投入されつつある。これはレーザー光源の著しい進展と光制御技術の確立によるものである。レーザーディスプレイは従来にない広い色再現範囲と小型・低消費電力という特長を備えるため、現存する機器を凌駕するだけでなく、新たな応用展開が図られるであろう。

日本光学会レーザーディスプレイ技術研究グループは、公開研究会、セミナー、国際会議等を通じて、この分野の要素技術および応用の進展に寄与している。2012年4月には、世界初のレーザーディスプレイ国際会議 LDC が予定(パシフィコ横浜にて)されている。

## 文 献

- 1) K. Yamamoto: *IDW* (2011) PRJ3-1.
- 2) 山本和久: 日本画像学会誌, **50** (2011) 254.
- 3) 黒田和男: レーザー研究, **39** (2011) 390.
- 4) 近藤潤他: *OPJ* (2011) 28aG6.
- 5) 古庄恵太他: 春季応物講演会 (2011) 26a-KB-9.
- 6) 遠藤貴雄他: *OPJ* (2011) P44.
- 7) J. W. Raring *et al.*: *IDW* (2011) PRJ2-3.
- 8) S. Nagahama: *EDIS* (2011) p.76.
- 9) 朴 載赫他: レーザー研究, **39** (2011) 402.
- 10) 山口雅浩: レーザー研究, **39** (2011) 395.
- 11) 藤枝一郎: レーザー研究, **39** (2011) 416.
- 12) Y. Okuda *et al.*: *IDW* (2011) LITp-11.
- 13) A. Tagaya *et al.*: *IDW* (2011) LIT2-1.
- 14) 長瀬章裕他: レーザー研究, **39** (2011) 427.
- 15) J. Park *et al.*: *IDW* (2011) PRJ3-5.
- 16) 池田貴司他: レーザー研究, **39** (2011) 411.
- 17) 西岡謙他: レーザー学会年次大会 (2011) p. S29.
- 18) 加藤聖子他: *OPJ* (2011) P34.
- 19) 吉川 浩: レーザー研究, **39** (2011) 421.
- 20) H. Hatanaka *et al.*: *IDW* (2011) PRJ2-1.
- 21) 前田重雄他: レーザー学会年次大会 (2011) p.242.
- 22) 栗村 直: レーザー研究, **39** (2011) 386.

23) 八木哲哉: レーザー研究, **39** (2011) 382.

## 13. デジタルオプティクス

島根大 横田正幸

### 13.1 概 要

現在では、光学に関連する多くの研究分野でコンピューターを活用することが不可欠となっており、デジタルオプティクスの守備範囲は広大なものになる。そのため、ここではデジタルホログラフィーに関連する研究分野を中心として、その1年間の進展について述べることにする。

### 13.2 1ショット位相シフトデジタルホログラフィー

参照光の位相をシフトさせて記録した最低3枚の位相シフトホログラムから0次光と共役像を除去する技術は従来から知られているが、記録時間の制約から運動物体への適応は制限されてきた。この欠点を克服するため1度のホログラム記録に必要な位相シフトホログラムを得る1ショット位相シフト法がいくつか提案されており、運動物体への適用や超高速物理現象の記録などに展開されている。

各画素に異なる方位の偏光子を配置した高速撮像素子により位相シフトホログラムを空間多重記録する並列位相シフト法により、フェムト秒光パルスを空気中で集光した場合に生じる空気密度変化を26万フレーム/秒で超高速撮影した結果<sup>1)</sup>や、フェムト秒の単一パルス光を用いた三次元情報の取得<sup>2)</sup>に成功した例が報告された。並列位相シフト法の場合、ホログラムを空間分割するため像再生時にホログラムの高空間周波数成分に対して補間誤差が大きくなる。これを解決するため、斜め方向の画素値も併用する補間方法が考案され、視野拡大への有効性が示された<sup>3)</sup>。

特殊な撮像素子を用いない1ショット位相シフト法として、参照光にランダムな位相光を用いる方式が提案されている。拡散板を通した参照光の個々のスペクルサイズが撮像素子の画素の大きさに近い場合に再生像の画質が向上することが報告された<sup>4)</sup>。参照光を撮像素子に斜入射させて生じる空間的な位相分布を用いる空間キャリア位相シフト法において、空間周波数面で位相シフト誤差補正を行う手法が提案された<sup>5)</sup>。複数の撮像素子を空間的に分散配置させてホログラムをダイバーシティ検出する方式も提案され、2台のCCDを用いた実験結果が報告された<sup>6)</sup>。これらの方式は、通常の撮像素子で1ショット位相シフト法が実現できるため、今後の普及と発展が期待される。

### 13.3 計測応用

高速度カメラを使用してホログラムを高速撮影し、フー

リエ解析によりホログラム位相を求める計測方法がいくつか考案されている。光源の波長走査によるヘテロダイン干渉法を応用してホログラム時間キャリア干渉縞を生成し、ホログラム位相を測定する手法が提案され、面発光半導体レーザーを用いて選択的な三次元像再生が実現された<sup>7)</sup>。また、物体光と参照光の間にドップラー効果によるビートを生じさせ、ホログラムの時間変化を記録するドップラー位相シフト法に、二波長法を導入した五円硬貨の表面形状計測が実行された<sup>8)</sup>。通常、二波長法における光源波長は、既知であるか、または測定時にモニターすることが必要になる。フレネル変換に基づくデジタルホログラフィー再生において、再生面の画素サイズが波長に依存することを利用して波長差を推定し、実効波長を求める手法が考案された<sup>9)</sup>。二波長法を応用した計測に有効なポストプロセスであり、今後の発展が期待される。

偏光イメージングカメラを用いて1ショットで4枚の位相シフトホログラムを記録し、粗面物体の移動前後において得られる位相ホログラムから物体の三次元移動量が計測されている<sup>10)</sup>。粗面物体に単一周波数の干渉縞を投影し、軸外し法により記録・再生した像の振幅から合焦位置を求めて絶対距離計測を行う表面形状計測法が提案され、立方体を使った実験結果が報告された<sup>11)</sup>。

実時間パルスホログラフィー干渉法を用いて、位相を180°ずらして得た2つの音圧分布の差から背景レベルを除去し、ヒルベルト変換により音圧の振幅・位相分布が得られた<sup>12)</sup>。また、透明な塗料の乾燥過程をデジタルホログラフィーにより解析する手法が報告された<sup>13)</sup>。透明物体に対して、デジタルホログラフィーによる再生像から抽出したサイノグラムの逆ラドン変換により三次元振幅透過率分布を再構成するトモグラフィーが提案された<sup>14)</sup>。

二光波折り畳み干渉計と合成開口処理により2つのインコヒーレント面光源のスペクトル情報と三次元空間情報が得られた<sup>15)</sup>。同手法において、異なる合成開口処理によって生成される三次元画像の平均処理により信号対雑音比が向上した<sup>16)</sup>。動的現象への応用を目指して、有限数の波長を使用し、得られた再生像の反射率や透過率をもとに分光推定を行う手法が考案され<sup>17)</sup>、計算機シミュレーションによりその有効性が示された<sup>18)</sup>。

### 13.4 ホログラフィック顕微鏡

生体観察や微小物体を対象とした顕微鏡への応用も精力的に行われている。LEDを使い同軸配置でホログラム記録を行い、液体中にある粒径100 nmのポリスチレン球の三次元位置計測が実現された<sup>19)</sup>。波長オーダーの透明な微小物体の構造や屈折率を推定する手法が考案され、シ

ミュレーションやポリスチレン球を用いた実験結果が報告された<sup>20)</sup>。

軸外し記録によるデジタルホログラフィック顕微鏡によりフォトポリマーに誘起される屈折率変化を測定し、露光レーザー強度や露光時間との関係について報告された<sup>21)</sup>。軸外し記録によるホログラムを空間ヘテロダイン変調して同軸ホログラムを得る顕微鏡も考案されている<sup>22)</sup>。また、並列位相シフト法と高速カメラを用いた顕微鏡により、15万フレーム/秒での超高速撮影も達成されている<sup>23)</sup>。

### 13.5 その他

低コヒーレンス光源を用いると、干渉ノイズを低減できる。しかし、位相シフト法と組み合わせた場合、波長幅があるため、位相シフト誤差が発生する。この誤差を、回転偏光子型アクロマチック位相シフト法により、劇的に低減できることが示された<sup>24)</sup>。超広帯域光源を使用し、参照光路の移動で生じるビート信号を周波数選別することで波長選択が可能で、多波長低コヒーレンスデジタルホログラフィーが提案された<sup>25)</sup>。

グラフィックスプロセッシングユニット (GPU) を汎用計算に使用する試みがさまざまな分野で行われており、デジタルホログラムの再生計算等にも適用される例が増えている。最適回転角法を用いた計算機合成ホログラム (CGH) の最適化にGPUを導入して、計算時間を短縮した例が報告された<sup>26)</sup>。ポリゴンモデルを用いて反射特性を考慮したCGH計算において、GPUによる並列計算を導入することで高速化されている<sup>27)</sup>。また、CGHを用いた光ピンセット遠隔操作システムにおいて、ホログラムの合成にGPUを導入し高速化することで、制御帯域の拡大を実現している<sup>28)</sup>。

### 13.6 展 望

近年、撮像素子の高画素・高速化、受光波長域の拡大、コンピューターの計算処理能力の向上やGPUの性能向上など、デジタルホログラフィーを含むデジタルオプティクスを取り巻く環境は大きく進歩している。これらの新規デバイスの導入や、従来からある干渉計測技術との融合が、デジタルオプティクスの応用分野の広がりや光学定盤外で使用可能な光学技術の開発につながるものと考えている。海外では、テラヘルツ光を光源としたデジタルホログラフィーの報告<sup>29)</sup>も散見されている。今後、これらの分野も含めたさらなる発展が期待される。

## 文 献

- 1) T. Kakue *et al.*: *DH* (2011) DWC25.
- 2) 角江 崇他: *OPJ* (2011) 29pF6.

- 3) 夏 鵬他: *OPJ* (2011) 30aH4.
- 4) 井邊真俊他: *OPJ* (2011) 29pF7.
- 5) 田原 樹他: *OPJ* (2011) 28aC4.
- 6) 九里佳祐他: *OPJ* (2011) PD2.
- 7) 石井行弘他: *OPJ* (2011) 29pF3.
- 8) D. Barada *et al.*: *DH* (2011) DWC12.
- 9) 船水英希他: 春季応物講演会 (2011) 25p-KT-4.
- 10) 喜入朋宏他: *OPJ* (2011) P29.
- 11) 岩山義秀他: *OPJ* (2011) 29aC2.
- 12) 久田重善: *OPJ* (2011) P30.
- 13) 木本嘉毅他: *OPJ* (2011) 28aC5.
- 14) 北澤貴宏他: *OPJ* (2011) P13.
- 15) S. Teeranutrannont 他: 春季応物講演会 (2011) 27a-BJ-5.
- 16) 丹野 渉他: *OPJ* (2011) 28aC6.
- 17) 夏 鵬他: *OPJ* (2011) P19.
- 18) 伊藤安軌他: *OPJ* (2011) P18.
- 19) 楠美祐一他: *OPJ* (2011) 30pD1.
- 20) 田北啓洋他: 春季応物講演会 (2011) 25p-KT-5.
- 21) 有本英伸他: 春季応物講演会 (2011) 27a-BJ-2.
- 22) 大谷真由他: *OPJ* (2011) 29pF4.
- 23) 田原 樹他: *OPJ* (2011) 28aC3.
- 24) 早崎芳夫: 春季応物講演会 (2011) 27a-BJ-3.
- 25) Q. D. Pham *et al.*: *OPJ* (2011) PD1.
- 26) 鈴木大地他: 春季応物講演会 (2011) 27p-BJ-4.
- 27) 山口一弘他: *OPJ* (2011) 30pD4.
- 28) 恩田一寿他: 春季応物講演会 (2011) 26p-KT-12.
- 29) S. Ding *et al.*: *Opt. Lett.*, **36** (2011) 1993.

## 14. 偏光計測・制御技術

徳島大	水谷康弘
東京工芸大	川畑州一
東北大	津留俊英
埼玉医科大	若山俊隆
山梨大	金 蓮花
宇都宮大 CORE	喜入朋宏
宇都宮大 CORE	大谷幸利

### 14.1 概 要

偏光計測研究会から発展的に誕生した偏光計測・制御技術研究グループは今年で2年目を迎えた。おもな活動として年2回のペースで偏光計測研究会を開催しており、2011年も例年通り開催し通算で7回目を数えた。また、研究グループの構成メンバーが集まり、1年間の偏光に関する研究動向や注目される論文を調査・議論する場も設けられている。今年には徳島で開催されたが、開催地が東京以外に広がったことは特筆すべき点である。今後とも日本各地で開催し、地域との交流にも寄与できればと願っている。

ここでは、この1年間の偏光関連の行事やそれに関するトピックス、最後に将来の展望を述べる。

### 14.2 偏光関連のトピックス

日本における偏光関連の研究発表の場は、春と秋の応用物理学学会講演会および OPJ であるが、2011年の話題は、

偏光分野で世界的に著名なアリゾナ大学の Russell A. Chipman 教授の講演が、宇都宮大学において開催された第6回の偏光計測研究会において実現したことである。同研究会では日本国内の偏光計測分野における応用事例の紹介のほかに、Chipman 教授から米国における最先端の研究の紹介があった。そして、多くの聴講者が参加し、活発な議論が繰り広げられた。

海外では、毎年秋ごろに開催されている光機械分野の国際会議 International Symposium on Optomechatronic Technologies が11月1日～3日に香港にて開催され、偏光計測や偏光応用に関する招待セッションがプログラムに組み込まれた。

以上の講演発表と関連する学術雑誌から、注目すべき研究について述べる。

### 14.3 国内の状況

春秋の応用物理学学会講演会と OPJ のすべての発表 (8300件弱) において、偏光に関するキーワードを検索してみたところ、10%強の報告がヒットした。偏光に関する直接的な研究から、偏光を利用している間接的な研究まで多岐にわたっており、偏光の理解や利用の重要性がうかがえる。さて、偏光が直接研究に関わっている講演について統計をとると、多い順から、光渦・トポロジー・ベクトルビームが20件、偏光計9件、ホログラム8件、液晶関連6件、暗号5件、散乱関連4件、デバイス関連4件、OCT 関連3件、その他2件であった。

光渦・トポロジー・ベクトルビームに関する研究分野では、偏光状態が同一平面内に分布している光を取り扱っているが、近年、急速に講演件数が伸びている。例えば、二重リングをもつ偏光ビームを利用することでダークスポットとよばれる特異な集光点を実験的に作り出し測定した例や<sup>1)</sup>、応用では、共焦点顕微鏡の光源として用いたときの空間分解能の検討や、光トラップでの利用の検討が行われている<sup>2,3)</sup>。さらには、ベクトルビームを生成するための光源としてフォトリソニック結晶を用いる研究の報告や、白色光渦の分散を低減させ高品質化を検討した報告があった<sup>4,5)</sup>。これは、新たな素子の開発が進められた結果、比較的簡単に偏光分布を得ることができるようになったためと考えられる。しかしながら、理論や応用に関しては未開拓な領域が多く、これからの進展が期待される分野である。

偏光計では、チャンネルドスペクトルを利用したミューラー行列偏光計の精度化<sup>6)</sup>や、干渉計測と組み合わせた複屈折の二次元分布計測の報告があった<sup>7)</sup>。また、エリプソメーターに関しては、これまでの実績同様、薄膜評価等の応用ベースでの利用が中心であるが、強誘電体結晶を偏光

変調器として光学系に組み込むことで二次元計測が可能になる報告もあった<sup>8)</sup>。

液晶関連では、低分子液晶にフラーレンを導入し、さらに、高分子液晶との複合材料とすることで、高効率なフォトリフラクティブ材料を開発したという報告があった<sup>9)</sup>。また、液晶レンズを高速に駆動させる試み<sup>10)</sup>や、液晶フィルム素子の開発<sup>11)</sup>、プロジェクターへの応用<sup>12)</sup>など液晶応用に関する研究もさかんに行われている。

材料の開発関連では、単層のカーボンナノチューブを用いた低分散偏光板の開発と特性評価に関する報告があり、紫外から近赤外領域で良好な偏光特性があるだけでなく、さらに性能が向上する可能性が示唆されている<sup>13)</sup>。

ホログラム関連では、偏光ホログラフィックメモリーへの応用を目指した理論、数値計算および記録法と一連の報告があった。理論に関する報告では、従来提唱されていた偏光ホログラム理論を補う理論が新たに提唱され、実験的に実証したという報告があった<sup>14)</sup>。数値計算に関する内容では、ホログラフィックメモリーを作製するときに必要な構造的偏光ホログラムの回折計算をFDTD (finite difference time domain method) 法により実現している<sup>15)</sup>。記録に関しては、多重記録が多数報告されていた<sup>16-18)</sup>。さらに、偏光イメージングカメラを導入したリアルタイム計測が話題となっていた<sup>19,20)</sup>。

生体・医用応用では、PS-OCT (polarization sensitive optical coherence tomography) を用いて眼の網膜や強膜を分離検出する手法が報告されていた<sup>21,22)</sup>。

暗号関連では、複屈折材料を用いた手法が提案されている。安価であり、かつ、画像劣化が少ないという利点がある。さらに、多重表示も可能であることから、今後の進展が期待できる<sup>23,24)</sup>。

散乱関連では、植物の葉による散乱を計測する応用研究の報告があった。また、偏光ラマンスペクトルを測定することで、ナノ粒子の状態を評価する手法の報告もあった<sup>25-27)</sup>。

#### 14.4 海外の状況

2010年開催された分光エリプソメトリー国際会議のような、偏光計測分野の研究者が一同に会する偏光に関する大きな国際会議は、2011年は開催されなかった。したがって、日本の状況と同じく、いろいろな分野でばらばらに報告がなされていた。しかしながら、冒頭に示した International Symposium on Optomechatronic Technologies では特別に偏光に関するセッションが生まれ、さらに、招待講演が偏光の報告であったことから、偏光以外の他分野の研究者も偏光技術に注目しているようである<sup>28)</sup>。

#### 14.6 展 望

偏光の利用は多岐にわたっており、新しい分野での利用も期待できる。例えば、フェムト秒レーザー加工で生じた微細周期構造は、波長以下のオーダーであるため偏光に感受性があると思われる<sup>29)</sup>。また、エリプソメーターの動向としては、多層膜の膜厚と複素屈折率分布の同時測定や、偏光計と組み合わせた手法、さらには、白色光を利用したワンショット計測手法も提案されている<sup>30-32)</sup>。その他にも、極端紫外領域の円偏光光源に関する報告も見逃せない<sup>33)</sup>。偏光カメラを応用した研究は論文としての報告もあり、高速な現象をとらえることができ、今後ますますの発展が期待できる<sup>34,35)</sup>。また、エリプソメーターを自由に制御できる素子を組み込んだ偏光顕微鏡により、詳細な生体応用計測が可能となっている<sup>36)</sup>。また、理論的な解釈も発展をみせている幾何学的位相に関する報告も注目される<sup>37)</sup>。

偏光に関するキーワードである「異方性」および「分極」を春秋季応用物理学会講演会やOPJの予稿に用いている発表件数は100件以上あるが、その多くは偏光には触れていない。これらの研究では今後偏光を何らかの形で取り入れることができると考えられ、偏光分野の今後の進展が期待できる。

#### 文 献

- 1) 丹羽正人他：春季応物講演会 (2011) 25a-KS-6.
- 2) 小澤祐市他：春季応物講演会 (2011) 25a-KS-7.
- 3) 大津知子他：OPJ (2011) 30aE4.
- 4) 北村恭子他：春季応物講演会 (2011) 26a-KA-5.
- 5) 福本良平他：OPJ (2011) 30aE5.
- 6) 伊勢明敏他：OPJ (2011) 28aF2.
- 7) 森川亮祐他：OPJ (2011) 29aF8.
- 8) 金 蓮花他：春季応物講演会 (2011) 26a-BJ-8.
- 9) 長谷部涼也他：OPJ (2011) 29pG5.
- 10) 梁瀬 智他：春季応物講演会 (2011) 25a-KU-8.
- 11) 中山敬三他：春季応物講演会 (2011) 28aD1.
- 12) 加藤聖子他：OPJ (2011) P34.
- 13) 庄司 暁他：OPJ (2011) P33.
- 14) 松橋佑介他：OPJ (2011) 28aE2.
- 15) 茨田大輔他：秋季応物講演会 (2011) 31p-ZL-14.
- 16) 落合孝典他：秋季応物講演会 (2011) 1p-ZJ-2.
- 17) 関口寛基他：秋季応物講演会 (2011) 1p-ZJ-3.
- 18) 落合孝典他：OPJ (2011) 28aE3.
- 19) 田原 樹他：OPJ (2011) 29F2.
- 20) 喜入朋宏他：OPJ (2011) P29.
- 21) 段 煉他：OPJ (2011) 28aA3.
- 22) Barry Cense 他：OPJ (2011) 28aA5.
- 23) 山口武伸他：秋季応物講演会 (2011) 31p-ZL-6.
- 24) 高和宏行他：春季応物講演会 (2011) 25a-KL-9.
- 25) 金 蓮花他：春季応物講演会 (2011) 27a-BH-7.
- 26) 長井悠佑他：春季応物講演会 (2011) 25p-BH-12.
- 27) 長井悠佑他：春季応物講演会 (2011) 30p-P13-7.
- 28) K. Oka: ISOT (2011) 10.
- 29) G. Obara *et al.*: Appl. Phys. Lett., **99** (2011) 061106.

- 30) M. B. Pereira *et al.*: Appl. Opt., **50** (2011) C420.  
 31) D. Rademache *et al.*: Appl. Opt., **50** (2011) C222.  
 32) D. Kim *et al.*: Opt. Express, **12** (2011) 5117.  
 33) B. Vodungbo *et al.*: Opt. Express, **19** (2011) 4346.  
 34) T. Tahara *et al.*: Opt. Lett., **16** (2011) 3254.  
 35) T. Kakue *et al.*: Opt. Lett., **36** (2011) 4131.  
 36) M. Shribak *et al.*: J. Opt. Soc. Am. A, **28** (2011) 410.  
 37) P. Kurzynowski *et al.*: J. Opt. Soc. Am. A, **28** (2011) 475.

## 15. 日本光学会の事業 —人材育成・男女共同参画—

日本女子大学名誉教授 小舘香椎子

### 15.1 概要

21世紀を迎えて、少子・高齢化や知識基盤社会の進展、グローバル化、近隣諸国他の新興国の勃興に伴って、急激な環境の変化が生じている。同時に、国際競争の激化も重なり、わが国の経済・産業競争力の低下が顕著となっている。また、日本をこれまで牽引してきた科学技術にも陰りがみえており、このことは、自然科学分野における論文数の国際シェア、特許出願件数、国際共同研究数といった世界比較データからも窺える。そこで、政府も今後5年間の科学技術の方向を示す第4期科学技術基本計画の中で、二大イノベーションなどの重要課題対応とともに、その「車の両輪」として、基礎研究および人材育成に向けた取り組みの推進強化をあげている。科学・技術における人材育成の問題は、これまでも日本学術会議において多くの議論がなされ、いくつか提言が出されてきた。中でも、大学および大学院教育の再構築の必要性が指摘されるとともに、若手研究者の育成と男女共同参画推進に関する提言が含まれていた。特に男女共同参画に関しては、2008年7月と2010年6月の2回にわたり、全国の国公私立・大学を対象とするアンケート調査が実施され、この結果を踏まえた具体的なフィードバックが、研究・教育機関や学協会と科学者コミュニティーといった各団体に提示された。どちらに対しても、男女共同参画推進の意義を認識し、状況改善の取り組みのより一層の推進を促している<sup>1)</sup>。一方、日本学術会議における「未来社会と応用物理分科会」では、学術と産業を結ぶ基盤研究および人材育成の強化についての提言が取りまとめられた<sup>2)</sup>。そこでは、産学官連携によりグローバル化に適応した人材育成の必要性が強調されている。こうした動きを受けて、日本光学会では、すでに「光科学分野における人材育成」<sup>3)</sup>で述べたように、人材育成と男女共同参画に関する取り組みを継続してきている。

本稿では、産学官連携人材育成の試みである「光応用新産業創出フォーラム」の実施と「光みらい奨学金」の設

立、および、日本光学会も協賛して設立された、光関連分野の横断的若手人材育成を目的とする光量子科学連携委員会の活動を紹介する。さらに、光学分野の女性研究者ネットワーク形成と育成を目的とした「コンテンポラリーオプティクス研究グループ」の活動が男女共同参画に果たした役割について述べ、最後に将来展望として、日本光学会への今後への期待をまとめることとする。

### 15.2 人材育成—光応用新産業創出フォーラムと光みらい奨学金—

「ポテンシャルの高い光科学技術を発展させることによって、新産業の創出を促し、社会に貢献する」という基本理念に基づき、「光関連技術を産学官連携の中で創出・活用し、革新的価値を創造しながら豊かな社会の建設に役立つ事業を実現する」というビジョンを掲げた産学官連携委員会が、2005年から産学官連携推進事業として設立され、光応用新産業創出フォーラムを開催した。第6回にあたる2011年度は「技術戦略と人材育成」をテーマとして、生駒俊明氏(キヤノン)による特別講演「技術経営における産学連携の位置づけ」、「アカデミックロードマップに見る技術戦略」の招待講演、最後に「光学技術戦略と人材育成」のテーマでのパネルディスカッションが行われた。当該フォーラムでは、日本が真の科学技術創造立国であり続けるための産学官の連携による人材育成、ブレインネットワークの構築、産業種の創出・育成に向けた議論の場を目指して実績を積み重ねている。また、2008年からは、技術を新産業に結びつけていくことができる独創的な研究を支援することを目的として、「新産業創出に向けた独創的な研究への奨励金—光みらい奨励金—」を設け、自らのアイデアを実現しようとする若手研究者による提案を募集し、フォーラムで表彰している。2012年2月には、第7回フォーラム「光技術の継承と人材育成」が開催される。

### 15.3 光量子科学連携委員会による横断的人材育成

ここでは、すでに活動が開始されている光科学分野の若手研究者育成の試みを紹介する。日本学術会議では、学術的な国際交流活動を主要な柱のひとつと位置づけ、分科会を設置し、国際学術団体と連携し、支援を行っている。そのひとつであるICO分科会(委員長:荒川泰彦)は、ICO(International Commission for Optics)に対応する分科会として、日本学術会議の第3部の総合工学委員会に設置され、ICOに関係する国内外の光科学関連の活動をリードする役目を担っている。このICO委員会は、第21期から日本の光関係学会活動の横断的連携や人材育成のためのコア組織として、応用物理学会の学術・社会連携委員会の下、光量子科学技術連携委員会を設置した。これにより、光量

子科学技術分野のグローバルなネットワーク構築を進め、本分野における横断的な研究活動の連携促進と人材育成を図っていく。この委員会は、応用物理学会に位置づけられているが、メンバーは学会の枠を超えて、日本光学会を含む主要研究機関の代表的な研究者で構成されている。すでに産学官の研究機関の研究者ネットワークおよび研究グループを紹介するホームページが公開されている (<http://www.jsap.or.jp/activities/photonicweb/aboutus.html>)。また、日本学術会議主催のシンポジウム「先端フォトンクス」の展望」が2010年4月と2011年11月に開催され、従来はシニアが中心となる日本学術会議の会議場が、若手研究者を中心とする300名を超える参加者であふれ、立ち見も出る満員となった。2回のシンポジウムのプログラムは、いずれも前半は「光」に関する最先端研究者による講演、後半は70~90名の若手研究者(女性研究者16名程度)によるショート(40秒間)プレゼンテーションとポスター発表であった<sup>4)</sup>。光科学分野のイノベティブな人材育成に向けて、すでに活動の萌芽がみられており、2012年以降も継続される予定であるので、日本光学会若手会員の積極的な参加を期待したい。

#### 15.4 男女共同参画の推進—コンテンツポラリティーオプティクス研究グループの活動—

最先端研究の基盤に重点をおいた研究会を開催し、その基礎となる知識の確認や議論によって女性研究者の啓発と育成を図ることを目的として、1993年にコンテンツポラリティーオプティクス研究グループが設立された。初代の幹事6名は全員が女性、アドバイザーを一岡芳樹氏はじめ10名の男性研究者にお願いし、「レーザ分光の基礎と最新の話題」というテーマの第1回研究会(参加者42名)からスタートした。現在は、会員数は数十名、年1-2回の研究会を開催し、2011年までに22回を数えている。第1回以降、若手女性研究者に講演を通じて学ぶ場を提供し、育成するという当初の目標は継続されてきているといつてよい。また、「おもしろい光学実験」など、教育分野のテーマを取り上げていることも、他の研究会にはみられない特徴である。応用物理学会より早い時点でこのように女性研究者の育成を主眼とする研究グループを認知し、実践する基盤を作られた当時の日本光学会の執行部の先見性に敬服し、改めて感謝するものである。その後、2001年7月には、他の学会に先駆けて応用物理学会の会員の意識の向上と学会活動における男女共同参画の実現をめざした「男女共同参画委員会」(委員長:小館香椎子、副委員長:遠山

嘉一氏)が発足したが、その人的な基盤はコンテンツポラリティー委員会に負うところが大きい<sup>5)</sup>。動きは地味ではあるかもしれないが、このように確実に、光学分野にとどまらず応用物理学会における女性研究者育成に大きな役割を果たしてきた。例えば、日本光学会の女性会員比率は、2006年度(3.5%)と比べて2010年度(4.1%)と微増している。また日本光学会の幹事、常任幹事の数では、それぞれ3~4名と2~3名からほとんど変化はないものの、会員比率に対する比率では、いずれも7%および14%相当となっており、女性会員には活躍の場が与えられている。さらに、近年は、応用物理学会の各種委員会、代議員として、また各種奨励賞、JSTの「さきがけ」など競争的資金の採択、日本学術会議の連携会員としての活躍も見えてきている。このように、多様な女性研究者・技術者が、少しずつではあるが育ってきているといえるであろう。しかし、今後もモチベーションを維持しながら、若手女性研究者の育成へとつなげていけるか否か、幹事の若返り、光学会の活動支援強化などの課題も多い。

#### 15.5 今後の展望

冒頭に述べたように、世界規模で進行する急激な環境変化の中で、グローバル社会で活躍できる研究者や技術者、とりわけ強いリーダーシップを発揮できる人材の育成が特に急務となっている。光科学技術分野において、日本は、いうまでもなくこれまで世界のトップを走ってきており、分野としても、安心・安全な環境調和型社会を支えるキーテクノロジーとしても、今後の発展が期待されている。こうした要求に対応すべく、日本光学会は、若手研究者が幅広い研究能力を磨いていくための国際的な研究環境として、分野横断的な国際交流や短期留学の支援制度のための具体的な人材育成プログラムを検討していくことが望まれる。特に、日本では依然として数少ない女性研究者(平均13.8%、光学会4.1%)をいかに国際レベルでリーダーとして育成するかは、大きな課題であろう。すでに3人の女性会長を輩出しているSPIE他からも、学べることが多くあるだろう。

#### 文 献

- 1) 小館香椎子他: 学術の動向, **8** (2011) 8.
- 2) 日本学術会議提言(未来社会と応用物理分科会, 2011).
- 3) 小館香椎子: 光学, **39** (2010) 260.
- 4) 後藤俊夫他: 学術の動向, **9** (2010) 63.
- 5) 小館香椎子: 応用物理, **76** (2007) 919.