

## 2008 年 光 学 界 の 進 展

「光学界の進展」は、日本における過去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、本文中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 「光学界の進展」引用学会等の省略表記

略 称	学会・講演会名称
秋季応物講演会	秋季応用物理学会学術講演会
春季応物講演会	春季応用物理学関係連合講演会
秋季物理講演会	日本物理学会秋季大会
信学会	電子情報通信学会
ナノオプティクス	ナノオプティクス研究グループ研究討論会
<i>OPJ</i>	Optics and Photonics Japan
<i>ASSC</i>	Association for the Scientific Studies of Consciousness
<i>APDSC</i>	Asia-Pacific Data Storage Conference
<i>APLS</i>	Asia Pacific Laser Symposium
<i>CLEO</i>	Conference on Lasers and Electro-Optics
<i>FOM</i>	Focus on Microscopy
<i>ECOC</i>	European Conference and Exhibition on Optical Communication
<i>ICNS</i>	Conference on Nitride Semiconductors
<i>ICPR</i>	Conference on Pattern Recognition
<i>ISLC</i>	International Semiconductor Laser Conference
<i>ISSS</i>	International Symposium on Surface Science and Nanotechnology
<i>ISOM/ODS</i>	International Symposium on Optical Memory/Optical Data Storage
<i>PS</i>	Photonics in Switching
<i>SID</i>	Society for Information Display
<i>SSDLTR</i>	Solid State and Diode Laser Technology

# 1. 光物理

旭川高専 横井直倫

## 1.1 コヒーレンス・干渉

コヒーレンスに関して、光の渦に関連する研究と、光波動場における偏光特異点に関連する研究において進展がみられた。まず光の渦に関連して、幾何学的位相に基づいた渦スペクトルの発生<sup>1)</sup>が行われ、液晶空間位相変調器を用いてビーム内の幾何学的位相を変化させることにより種々の形態の渦スペクトルを生成する手法が提案された。また、空間分散のない超短光渦パルス発生<sup>2,3)</sup>が行われ、白色コンティニューム光パルスを光源に用いることで、波長に依存した空間分散やトポジカルチャージの分散がない超広帯域超短光渦パルスを生成できることが確認された。さらに、ランダム光渦場の位相特異点を用いた新センシング技術<sup>4)</sup>が報告され、本来は粗面物体の干渉計測において障害とみなされてきた光渦場や位相特異点を、物体上の各点の変位を測定するための指標としてむしろ積極的に利用することで、粗面物体の平行変位、回転変位、ランダム変位の計測に応用する手法が示された。一方、偏光特異点に関して、偏光の特異点の生成と検出<sup>5)</sup>が行われ、異なるビーム径を有するラゲール・ガウスビームとガウスビームの干渉により得られる偏光特異点の検出位置予想図がシミュレーションにより得られた。さらに、偏光特異点のモルフロジーの統計的性質に関する研究<sup>6)</sup>が行われ、これまでは理論予測にとどまっていた偏光特異点近傍の偏光分布の空間構造が実験により解明された。

## 1.2 伝搬・回折

光波伝搬に関連して、放射輸送方程式を用いたランダム媒質中の光伝搬解析<sup>7)</sup>が行われ、高散乱媒質と低散乱媒質をともに含む物体中の光伝搬がモデル化された。また、ビーム伝搬法を用いた反射望遠鏡の光波伝搬に関する検討<sup>8)</sup>が行われ、距離 10 km を伝搬後の光強度分布が望遠鏡の副鏡の位置をパラメーターとして算出され、最適な副鏡位置の設計に関する指針が与えられた。一方、ビーム断面内に偏光分布が存在する軸対称偏光ビームに関連する研究でも進展がみられた。まず、集光した軸対称偏光ビームからの第二高調波放射パターンの計算<sup>9)</sup>が行われ、集光した径偏光ビームから得られる第二高調波放射パターンがシミュレーションにより明らかにされた。また、軸対称偏光ビームによるダークスポット形成<sup>10,11)</sup>が行われ、径偏光、方位偏光など種々の偏光状態を有するビームの集光により焦点に形成されるダークスポットのサイズや形状が、シミュレーションにより比較評価された。このダークスポットは今

後、原子トラップや超高分解能顕微鏡などへの応用が大いに期待される。さらに、軸対称偏光モードを利用した顕微観察<sup>12)</sup>が行われ、ビーム断面内の偏光分布を自在に制御することで、コラーゲン繊維の分子配向の三次元観測が可能となった。そのほかに、螺旋状位相シフトをもつ中空ビーム<sup>13)</sup>、偏光、位相、強度分布を制御した光ビーム発生<sup>14)</sup>、超高速トポジカル光波の発生と非線形光学への展開<sup>15)</sup>、高出力トポジカルレーザーの開発とその応用<sup>16)</sup>、波面制御に適した空間光変調器とそれを用いたラゲール・ガウスビーム生成<sup>17)</sup>などに関する研究が行われた。

## 1.3 散乱

近年、実用化が期待されているランダムレーザーに関連して、各種散乱微粒子を含む色素ドープポリマー媒質の発光特性<sup>18)</sup>に関する研究が行われ、種々のサイズや形状を有する散乱微粒子を用いたランダムレーザー媒質の発光特性が比較評価された。また、動的散乱に関連して、動的散乱板により位相スクランブルされた散乱光からの三次元コヒーレンス像の再構成<sup>19)</sup>が行われ、コヒーレンスホログラフィーの原理に基づき散乱光の波動場の三次元コヒーレンス関数として三次元物体像が再生された。一方、スペckルに関連して、計算機ホログラムを用いたフラクタルスペckルの生成<sup>20)</sup>が行われ、停留位相法で得た初期位相に基づく反復フーリエ変換法で計算機ホログラムを作成し、これを用いてべき則強度分布の雑音を低減することにより、フラクタルスペckル場の相関関数が改良された。さらに、多重散乱現象に関連して、2本の近接する円柱からの散乱光により形成されるヤング干渉縞における多重散乱の効果に関する研究<sup>21)</sup>が行われた。

## 1.4 光放射圧

光ツイスターに関連して、時分割光ポテンシャルに捕捉されたブラウン粒子の動態解析<sup>22)</sup>が行われ、微粒子操作に最適な光圧ポテンシャルの変調周波数が明らかにされた。また、回折光学素子と空間光変調器の組み合わせによる三次元動的な光マニピュレーション<sup>23)</sup>が行われ、直径 6  $\mu\text{m}$  のポリスチレン球を捕捉し、システムの結像面に対して垂直方向に 90  $\mu\text{m}$ 、水平方向に 37.5  $\mu\text{m}$  の距離を移動させることに成功した。これらの移動距離は、従来の空間光変調器のみを利用したシステムに比べて垂直方向で 4 倍、水平方向で 3 倍となっており、大幅な改善が得られたことになる。さらに、光ツイスターと画像処理技術の併用による非球形微小物体の自動マニピュレーション<sup>24)</sup>や、液晶光学デバイスと八分割環状ホールパターン電極を併用した光学的粒子マニピュレーション<sup>25)</sup>に関する研究が行われた。

## 1.5 展 望

コヒーレンス・干渉の分野では、特に光の渦に関連した研究が目立ち、本技術に基づく粗面物体の変位計測など実用化を目指す応用研究もみられた。伝搬・回折の分野では軸対称偏光ビームに関連する研究が活発に行われ、原子レンズや超解像顕微鏡の実現、あるいは原子トラッピングへの応用などといった具体的な目標へ向けて、当分野の研究が着実に進歩している様子がうかがえた。散乱の分野では、高い発振効率を得られる可能性があるランダムレーザーに関連する研究が進展をみせており、今後、本レーザーが早期に実用化されることが望まれる。光放射圧の分野では、三次元動的光マニピュレーション技術において微粒子の移動距離が大幅に向上し、今後の原子・分子レベルの光マニピュレーション技術の確立という目標へ向けて前進がみられた。全体を振り返ると、各種計測、結像、医療などへの応用を意識した研究が目立ったという感があり、これからの傾向はさらに強まるものと思われる。今後、「光物理」の分野の研究が光学界全体の発展の大きな原動力となることを強く期待したい。

## 文 献

- 1) 若山俊隆他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZV-1.
- 2) 時実 悠他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZV-2.
- 3) 時実 悠他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZG-7.
- 4) 武田光夫他：OPJ (2008) 6aAS6.
- 5) 五十嵐早苗他：OPJ (2008) 4aC2.
- 6) 松田充弘他：OPJ (2008) 4aC3.
- 7) 大村勇樹他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZG-8.
- 8) 戸田絵美他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZG-9.
- 9) 大津暁彦他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZG-1.
- 10) 小澤祐市他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZG-2.
- 11) Y. Kozawa *et al.*: Opt. Lett., **33** (2008) 2326.
- 12) 橋本 守：OPJ (2008) 6aAS5.
- 13) 佐藤俊一他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZG-4.
- 14) 佐藤俊一他：OPJ (2008) 6aAS1.
- 15) 森田隆二他：OPJ (2008) 6aAS2.
- 16) 尾松孝茂：OPJ (2008) 6aAS3.
- 17) 井上卓他：OPJ (2008) 6aAS4.
- 18) 安達史郎他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZV-4.
- 19) 韋 冬他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZV-5.
- 20) 船水英希他：OPJ (2008) 4aC4.
- 21) F. Tajima *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 75.
- 22) 山本条太郎他：OPJ (2008) 4aC5.
- 23) M. Zheng *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 105.
- 24) Y. Tanaka *et al.*: Opt. Express, **16** (2008) 15115.
- 25) M. Kawamura *et al.*: Opt. Express, **16** (2008) 10059.

## 2. 結像素子・光学機械

富士フイルム 西畑純弘

### 2.1 概 要

2008年6月9日から11日まで、日本光学会光設計研究グループ、The Optical Engineering Society, Taiwan ならびに National Central University, Taiwan 主催の ODF '08 が台湾で開催された。光設計研究グループ第6回目の国際会議にして初めての海外開催となった(招待講演、一般口頭講演、ポスター発表を合わせて291件)。台湾の光学産業が急発展している中、地元台湾からも164件の発表が集まり大盛況を収め、日台光学産業の友好関係をさらに深めることができた。発表内容は光学器械に関するものがいつもより多かったようだ。

高密度DVDは2008年2月に事実上Blu-rayに絞られ、DVD市場は一気にBlu-rayへと動いた。

### 2.2 光学素子

干渉露光法を用いて加工した金型と新開発高屈折率ガラス(屈折率1.714, 成型温度447°C)を使い、ガラスモールドで表面に周期290nmの反射防止構造を形成することにより、反射率0.2%の対物レンズが実現した。

液晶ディスプレイ(LCD)向け塗布型位相差板材料が開発され、2009年度に実用化の見込みとの発表があった。LCD用位相差板はこれまで液晶セルの外側に置く視野角拡大フィルムが一般的であったが、塗布型とすることでパネルの大型化に伴う厚さむらなどの諸問題が解決しやすくなる。

### 2.3 光学器械

デジタル一眼レフ用交換レンズでは、3枚の異常分散ガラスと3枚の複合非球面レンズを含む13群18枚構成で設計した15倍ズームレンズ18-270mm F3.5-6.3が発売された。このズームレンズは高倍率であるだけでなく、光学手振れ補正機能を内蔵している<sup>1)</sup>。このレンズを含め、2008年には光学手振れ補正機能内蔵の交換レンズが出揃い、カメラボディ内手振れ補正機構を採用するカメラを含め、デジタル一眼レフカメラの手振れ補正機能が普及した。

デジタル一眼レフカメラの高画素化はまた進み、APS-Cサイズセンサーでは15Mピクセルを超えるものが発売され、35mmフルサイズセンサーでは24Mピクセルを超えるものが発売された。これらの影響か、高性能レンズも多く発売された。

コンパクトデジタルカメラでは、20倍ズームレンズ付きの製品が発売され、まだ高倍率化の傾向がうかがえ

る。コンパクト化の観点では、3倍ズームレンズを厚さ19mmの薄型カメラに収めた製品も発売された。

カメラ付携帯電話用撮像光学系では、全長約20mmの画素数3Mピクセル用超小型3倍ズームレンズが発表された。これは、非球面を多用することにより超小型化と誤差感度低減を両立させた新レンズ設計と、SIDM (smooth impact drive mechanism) アクチュエーターとの組み合わせにより実現したものである。一方、高画素化はさらに進んで、2008年秋には8Mピクセルの製品が数社から発売され始めた。

「デジタルカメラ用撮像レンズの進展」および「カメラ付携帯電話用撮像レンズの進展」については、「光学」第37巻第6号に特集記事があるので参照願いたい<sup>2)</sup>。

半導体露光装置では、線幅32nm世代の微細化に対応した液浸露光+ダブルパターニングを採用した製品が発表された<sup>3,4)</sup>。「半導体露光技術の現状と展望」と題した研究会が2008年12月に開催された。

測量機では、3Dレーザースキャナーによる3D測量機が発売された。

## 2.4 光学設計法

光学設計最適化手法としては、2007年に提案された大域的最適化手法Global Explorerにサンプル光線の入射角および屈折角のRMS値を疑似感度として取り込むことで加工組み立て性のよい光学系を得るように改良したGlobal Explorer 2 (GE2) が発表された。2008年はGE2による実験結果から多くの知見を得て、多次元パラメータ空間内におけるメリット関数の特色と、局所解および疑似局所解の分布状況を分析した結果が発表された。

全方位光学系のような広視野光学系など複数の反射光学系を組み合わせる構成するものでは、偏心の影響から、共軸構造では現れない低次の二次収差が発生する。球面収差を除去した後に残存する偏心光学系固有の二次収差を収差関数に基づいて解析し、実際の光学設計において低減する手法が示された<sup>5)</sup>。

「非共軸光学系の撮像系への展開」と題するoff-axial光学系の近軸解析、収差解析についての解説と非共軸光学系の設計例が「光学」第37巻第6号に発表された<sup>6)</sup>。

光学構造の寸法が波長とよりやや大きい程度の回折光学素子の解析を行うにあたり、スカラー回折理論に基づく方法では精度が出ないことから、光学素子を局所的に回折格子と見立て、フーリエモード法を適用することで高精度・高速度な計算を行うことが試みられた。

## 2.5 材料・加工

光ディスクのBlu-ray化に対応し、光学用樹脂材料メー

カーからはBlu-rayでの耐久性を向上させた材料が発売された。

コンパクトデジタルカメラやカメラ付携帯電話向けにガラスモールドレンズの需要は2008年も大きく、モールド適性を向上させた上でさらなる高屈折率化(屈折率1.9以上)を目指した硝材と低分散化(アッベ数90ぐらい)、異常分散化を目指した硝材が発売された。

光硬化性樹脂に光を照射してレンズを作製する工程とディスプレイへの応用についての発表がなされた。

## 2.6 展 望

2008年もデジタルカメラやカメラ付携帯電話の高画素化は進んだ。イメージセンサーの高密度化が進むことで、センサーピッチがさらに波長サイズに近づいた。必然的に1画素あたりの大きさも波長サイズに近づく。それでもなお、光学系小型化への要求はいまだ続いている。小型光学系は加工・組み立ての難しさから、加工・組み立て技術のレベルアップ要求が先に訪れたが、次に設計技術のレベルアップ要求が来ることが予想される。実用的な計算時間で精度の高い計算ができるシミュレーション技術と効率のよい設計法の開発が望まれる。

## 文 献

- 1) 桜庭省吾: Optics Design, No. 39 (2008) 4.
- 2) 飯塚隆之他: 光学, 37 (2008) 326.
- 3) 今井基勝: Optics Design, No. 40 (2008) 3.
- 4) 宮崎順二: Optics Design, No. 40 (2008) 12.
- 5) 中野貴敬: Optics Design, No. 39 (2008) 13.
- 6) 荒木敬介: 光学, 37 (2008) 334.

## 3. X線結像光学

東京大 百生 敦

X線結像光学分野発展には、兎にも角にもX線光学素子の開発が鍵であり、それをもとにX線顕微鏡やX線望遠鏡などへの応用が展開される。2008年も光学素子開発や評価、および顕微鏡構築において、新奇な展開が図られている。7月にチューリッヒで開催された第9回国際X線顕微鏡学会でも、注目に値する多くの成果が報告された。

### 3.1 X線光学素子

X線領域では結像素子としてフレネルゾーンプレート(FZP)が使用されているが、興味深い試みを2つ紹介する。

ひとつは、ツェルニケゾーンプレート(ZZP)と称しているもので、FZPのパターンにツェルニケ位相差顕微鏡で使われる位相板の機能を組み込んだ構造をもつ<sup>1)</sup>。すな

わち、ZZPで顕微鏡を組めばそれだけでX線位相コントラストが生成される。2007年に渦巻きパターンをもつスパイラルゾーンプレートを作成して微分コントラスト生成機能を実現したローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)のグループによるその後の仕事であり、彼らはゾーンプレートパターンをさらに高度に設計することで、焦点深度を増やすとか収差を軽減するなどの可能性を模索している。

もうひとつは、スイスのポール・シェラー研究所(PSI)のグループによるzone-doubling法によるFZPの製作である<sup>2)</sup>。FZPの結像性能は最外輪帯幅に依存するが、それを狭くすることがFZP製作の中心課題である。彼らは、SiにFZPの下地パターンを形成し、atomic layer deposition法(ALD法)を用いてそのパターンの側面にIr層を形成して、実効的に最外輪帯幅を下地パターンの半分にした。1 keVのX線を用いた実験では15 nm L&Sが解像された。

Multilayer laue lens (MLL)は、ここ数年注目されている比較的新しい光学素子である。多層膜の層を(一次元)FZPの輪帯と同じように順次薄くなるように作り、それを縦にスライスして透過型の集光素子とする。ただし、各層におけるブラッグ回折が焦点に向かうように設計したものである。効率が高いことが特徴であり、それゆえにナノメートルサイズの集光が期待されている。兵庫県立大のグループはNTT-ATと共同で、MoSi<sub>2</sub>/Si多層膜によるMLLを開発した<sup>3)</sup>。20 keVのX線を30 nm弱に集光することに成功している。

大阪大学のグループは、微粒子表面と加工物表面間の化学反応を用いた超精密加工法であるelastic emission machining (EEM)によりナノメートル精度の非球面鏡を開発し、それによる硬X線ナノビーム形成を進めている。8月に開催されたSPIE Optics+Photonicsで、多層膜化による高NA化で15 nmの集光を達成したと報告した。また、巨大な負荷が予想されるX線自由電子レーザーとの使用を想定した長さ400 mmのミラー製作にも成功している(15 keVのX線が75 nmに集光)<sup>4)</sup>。加えて、除ききれない形状誤差に対応するために、圧電素子を36個貼り付けた補正用ミラーを開発している<sup>5)</sup>。集光ビームプロファイル計測に基づいて波面誤差を検出し、それを補正するように圧電素子を駆動する。このグループの開発はいよいよX線補償光学の域に達しているといえる。

### 3.2 軟X線結像光学

筑波大学のグループは2段のウォルターミラーによる倍率千倍のコンパクトな軟X線顕微鏡を開発し、トモグラ

フィーによる三次元観察結果を示した。軟X線源にレーザープラズマ線源を用いるが、スキャン時間20分と、実用的な観察が可能となっている<sup>6)</sup>。

東北大のグループは、非球面多層膜鏡を用いるシュワルトシルト光学系の顕微鏡を開発している。彼らの設計指針による非球面多層膜鏡を用いることにより、ミラー基板の形状誤差や設置誤差に対する許容度を大幅に増すことができ、実用的な側面で意義が大きい<sup>7)</sup>。

日本では軟X線領域でのシンクロトロン放射光資源に乏しく、外国に比べて軟X線顕微鏡のアクティビティが少ないことが心配である。軟X線顕微鏡分野に限らず、この光源問題はしばらく続きそうである。

### 3.3 硬X線結像光学

硬X線は透過力が高いので、空気中で厚い試料の観察が可能であるという特徴があるが、反面十分な吸収コントラストが得られないことが多い。そこで、位相コントラスト利用の意義は軟X線領域より大きい。干渉顕微鏡などいくつかの方法がこれまでデモンストレーションされているが、東大のグループよりタルボット干渉計と通常のX線結像顕微鏡を組み合わせる方式が報告された<sup>8)</sup>。画像検出器前に2枚の透過格子を配置する簡便かつ擾乱に強い構成をもち、微分位相コントラストが得られる。位相シフトの定量計測に基づく三次元観察(位相トモグラフィ)も併せて報告された。

望遠鏡の分野では、スーパーミラーを用いる硬X線望遠鏡の開発が進んでいる。2013年に打ち上げ予定のASTRO-Hに搭載予定であり、その高度な事前評価にシンクロトロン放射光が活用されている<sup>9)</sup>。

### 3.4 その他

10年ほど前より、コヒーレント回折顕微鏡と称される技術がX線顕微鏡の分野で関心を寄せられている。本誌ではあまり取り上げられていないようであるが、X線結像顕微鏡を凌ぐパフォーマンスが期待され、X線自由電子レーザー建設も相まって、究極的には1分子のイメージングが議論されている。X線結像顕微鏡の将来像にも影響を与える動きである。

コヒーレント回折顕微鏡は、空間的に可干渉なX線を試料に照射し、回折パターンをオーバーサンプリング条件で取得する。電子密度ゼロを保障する領域を一定割合設けておき、繰り返し演算により位相回復を行う。複数方位で計測を行えば、三次元観察も可能である。ドイツでは軟X線自由電子レーザー(FLASH)を用いて実験が先行している<sup>10)</sup>。

国内ではSPring-8を用いてコヒーレント回折顕微鏡の

実験が継続的に実施されている。理研のグループはヒトの染色体をこの手法で三次元観察し、内部の電子密度分布を可視化した<sup>11)</sup>。

この手法は試料が視野内で孤立していることが一般的に要請されるが、大きい試料走査することによる大視野化もPSIのグループにより行われている (ptychography)<sup>12)</sup>。試料上の照射部位を重複領域がある程度あるように複数選び、それぞれの回折像から大視野の実空間像を再構成する。位相回復時の拘束条件を重複領域に求める方式である。

コヒーレント回折顕微鏡の実用性に関してはいまだ懐疑的な見方も多いが、堅実に進歩している感があり、X線顕微法の動向は結像光学だけでは議論できない時代になってきているという印象をもつ。

## 文 献

- 1) A. Sakdinawat *et al.*: Opt. Express, **16** (2008) 1559.
- 2) K. Jefimovs *et al.*: Phys. Rev. Lett., **99** (2007) 264801.
- 3) T. Koyama *et al.*: Appl. Phys. Express, **1** (2008) 117003.
- 4) H. Mimura *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **79** (2008) 083104.
- 5) T. Kimura *et al.*: Proc. SPIE, **7077** (2008) 707709.
- 6) M. Hoshino *et al.*: Appl. Phys. Express, **1** (2008) 067005.
- 7) 豊田光紀他: 秋季応物講演会 (2008) 4a-ZT-3.
- 8) Y. Takeda *et al.*: Appl. Phys. Express, **1** (2008) 11702.
- 9) Y. Ogasaka *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **47** (2008) 5743.
- 10) J. Kirz: Nat. Phys., **2** (2006) 799.
- 11) Y. Nishino *et al.*: Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 018101.
- 12) P. Thibault *et al.*: Science, **321** (2008) 379.

## 4. 分 光

東京大 加納英明

### 4.1 概 要

2008年のノーベル化学賞は、「緑色蛍光たんぱく質 (green fluorescent protein; GFP) の発見と開発」という業績で、下村脩・米ボストン名誉教授ら3名に贈られた。ノーベル物理学賞で日本人3人が受賞したこともあり、日本中が大いに沸いたことは、記憶に新しい。GFPに代表される蛍光たんぱく質は、さまざまな生体分子を可視化するプローブとして、生命科学に必須の技術となっている。緑色に加え、シアン、黄色など異なる波長の蛍光を発するたんぱく質を生細胞内に同時に発現させ、生細胞を多色・多彩に表示する「スペクトラル・イメージング」または「分光イメージング」とよばれる技術も、現在盛んに用いられている。分光素子にAOTF (acousto-optic tunable filter) を用いたものは、「ハイパースペクトラルイメージング」と名付けられて商品化もされているようである。こ

のように、イメージングに「分光」という手法を取り込んだ技術が、近年さまざまな形で注目を集めている。このほかにもこの1年で、分光というキーワード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、平成20年度日本分光学会年次講演会、第2回分子科学討論会、レーザー顕微鏡国際会議 Focus on Microscopy (FOM 2008) 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、STED (stimulated emission depletion), PALM (photoactivation localization microscopy), FCS (fluorescence correlation spectroscopy), そしてFLIM (fluorescence lifetime microscopy) である。

### 4.2 超解像顕微鏡

近年、分子の分光学的特性を巧みに利用することで、光学顕微鏡の回折限界を超える超解像の顕微鏡の開発が盛んである。2008年は、それについていくつかの興味深い発表が国内で行われた。そのひとつがSTED顕微鏡である。STEDとは、「誘導放出抑制」と訳されている<sup>1)</sup>。この原理は、分子の分光学的特性をうまく活用したものである。すなわち、蛍光色素を励起するレーザー (レーザー1) と、励起状態に遷移した分子を誘導放出により脱励起するための別の波長のレーザー (レーザー2) を用意し、それらのビームパターンを制御することにより、回折限界を超える、超解像顕微鏡を実現している。このような原理に基づくSTED顕微鏡は、シナプス小胞の可視化など、さまざまな生命科学研究に用いられており、最近商品化も行われた。2008年に淡路島で開催されたFOM 2008では、STED顕微鏡についての招待講演があり、STEDを駆使することで、microscopyからnanoscopyへと進化を遂げつつある、最先端の超解像の世界についての発表が行われた<sup>2)</sup>。FOM 2008は、レーザー顕微鏡を中心とした学際的な国際会議として、年に1度開催されており、今回で第20回を迎えるという記念の年であった。残念ながら筆者は参加できなかったが、伝え聞くところによると、最先端の顕微鏡技術とその応用、およびバイオイメージング法から蛍光プローブ技術まで、非常に幅広い発表が行われ、500人以上の参加者があり、大変盛況にて閉幕したとのことであった。また、蛍光プローブの活性化と褪色をうまく組み合わせることでナノメートルスケールの空間分解能を有する、PALM<sup>3)</sup>とよばれる顕微鏡技術についての招待講演も、同会議において行われた。

### 4.3 蛍光顕微鏡の新たな展開

平成20年度日本分光学会年次講演会では、テラヘルツ

分光部会、顕微分光部会、生細胞分光部会の共同企画による国際シンポジウム「テラヘルツ分光、顕微分光、生細胞分光の分子科学および分子イメージング分野における最近の進歩」が開催された。本会議でも、STED顕微鏡についての発表があった。このうち蛍光顕微鏡について、近接場光ファイバプローブを用いてFCSの観察領域を制限した慶応大のグループの発表<sup>4)</sup>や、FLIMとFRET (fluorescence resonance energy transfer) との組み合わせにより分子間相互作用をプローブするドイツのグループの発表<sup>5)</sup>、そして多焦点でFCSを行う北海道大学のグループの発表<sup>6)</sup>など、蛍光分光イメージングについて新たな展開を予感させる発表が行われた。このほか、第2回分子科学討論会では、FCSとFLIMとを組み合わせた蛍光寿命相関顕微鏡についての発表<sup>7)</sup>など、新手法開拓についての興味深い発表が行われていた。

#### 4.4 ま と め

以上のように、既存の分光技術であっても、顕微イメージングへの応用など、新しい研究領域との組み合わせによって、その手法の新たな面が光り出す、といった報告が数多くみられた。2009年も、さまざまな分光法のユニークな応用が報告されるに違いなく、これから大変楽しみである。

#### 文 献

- 1) D. Evanko: Nat. Methods, **3** (2006) 661.
- 2) S. W. Hell: *FOM* (2008) MO-AF1-PAR-A1.
- 3) H. Shroff: *FOM* (2008) MO-MO-PLN2. 関連論文として, E. Betzig *et al.*: Science, **313** (2006) 1642.
- 4) Ohsnima *et al.*: 日本分光学会年次講演会 (2008) p. 69.
- 5) W. Becker: 日本分光学会年次講演会 (2008) p. 71.
- 6) M. Kinjo: 日本分光学会年次講演会 (2008) p. 74.
- 7) 石井邦彦他: 第2回分子科学討論会 (2008) 3P056.

## 5. レーザー

浜松ホトニクス 菅 博文  
三菱電機 平野嘉仁

### 5.1 半導体レーザー

今年の半導体レーザーでの進展は、レーザーディスプレイ用の高出力赤色半導体レーザーの研究発表が特に注目される。秋の応用物理学会では、ソニーよりこれまで643 nm赤色半導体レーザーアレイ (8 W) から結晶の歪みを増大させ、量子井戸幅を調整することにより635 nmとさらに短波長化を達成し、アレイ化により7.2 Wの高出力化に成功している。波長635 nmは645 nmよりも比視感度が1.5倍高く、高輝度ディスプレイ応用に適している。ま

た、レーザーディスプレイにおけるレーザースペクトルの制御を行うためにピッチを不均一としたアレイ化により、スペクトル幅の広い高出力赤色半導体レーザーの発振に成功している<sup>1)</sup>。春の応用物理学会では、三洋電機より次世代DVD用400 mW級青緑色半導体の報告が注目された<sup>2)</sup>。また、京都大学より青緑色領域でフォトニック面発光レーザーを初めて作った報告も注目された<sup>3)</sup>。窒化物半導体レーザーでは、ロームから非極性m面InGaN青色LDの室温連続発振成功の報告があった<sup>4)</sup>。

通信用半導体レーザーとしては、秋の応用物理学会でNTTフォトニクス研究所より、InGaAs基板上に有機金属気相成長法(MOCVD法)で成長した1.26  $\mu\text{m}$ で発振する半導体レーザーにおいて、85°Cで10 Gbps動作可能であるとの報告があった。このレーザーは、基板成長方法とともに温度特性が良好なため、温度調整器が不要な通信光源として期待される<sup>5)</sup>。また富士通より発表のあった、波長1.3  $\mu\text{m}$ 帯高抵抗埋め込みAlGaInAs系MQW-DFBレーザーにおいて、40 Gb/sの超高速直接調動作の成功は大きな成果である<sup>6)</sup>。春の応用物理学会でユーディナデバイスより報告のあった、高出力(120 mW)単一ストライプ型フルバンド波長可変レーザー(1.55  $\mu\text{m}$ 帯で40 nm以上の波長可変動作):CSG-DR-LDは、大容量DWDM光通信用として重要な成果と考えられる<sup>7)</sup>。

最近の地球温暖化による環境負荷の大きいガス分析等に、半導体レーザーの吸収測定方法を検討しようとする研究が盛んである。それに対するレーザー光源の進展も大である。春の応用物理学会では、NTTフォトニクス研究所よりInAs/InGaAs結晶を用いて2-3  $\mu\text{m}$ まで波長を伸ばし、室温連続発振成功の報告がある。DFBレーザーで最高動作温度85°Cまで成功しており、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、COの吸収帯に対応可能な波長帯である<sup>8)</sup>。環境負荷の大きなガス分析を目的とした中赤外領域における半導体レーザーとして、量子カスケードレーザーが浜松ホトニクスを中心に活発に研究され、秋の応用物理学会では、新しい間接注入励起構造の量子カスケードレーザーで、360 Kまでの連続動作の発振が報告されている<sup>9)</sup>。連続発振波長も $\lambda = 4.5 \sim 10.8 \mu\text{m}$ と広く、各種のガス分析用光源として今後使用されることになると考えられる。

波長範囲355 nm以下の紫外領域のレーザー光源としては、現在大型のガスレーザー装置や、3倍、4倍波の変換をした固体レーザー装置が利用されているが、小型、低コストの半導体レーザーが使われるようになると、半導体レーザーの新しい市場が考えられる。この領域で発振可能な材料はAlN/AlGaIn系結晶である。発光ダイオードで

は、すでに窒化アルミニウム (AlN) の深紫外発光が確認されているが、半導体レーザーで実験データを明記した報告としては、発振波長が 350.9 nm より長い波長に限られていた。これに対し、浜松ホトニクスでは、紫外半導体レーザー (発振波長 342.3 nm) の発振に成功した<sup>10)</sup>。この半導体レーザーは活性層も AlGaIn 層である。これまで報告されている紫外半導体レーザーの AlGaIn 層にはすべて少量の In が含まれており、In を一切含まない AlGaIn 発光層の紫外半導体レーザー発振の成功は、今後さらなる短波長化の可能性を示す大きな成果である。(菅)

## 5.2 半導体レーザー以外のレーザー

### 5.2.1 ファイバーレーザー

近年のファイバーレーザーの高出力化の進展はめざましく、当初目標であったレーザー加工機用の大型 CO<sub>2</sub> レーザーの置き換えだけでなく、より高度で微細な加工技術への応用が期待されている。これまで、ファイバーレーザーの高出力化は希土類添加ファイバーコア径の大口徑化やアレイ化、励起光源の高輝度化と光ファイバーへの高効率結合法の進歩により達成されてきたが、最近の開発動向としては高出力化に加えてシングルモード出力、高ピーク出力、狭線幅出力を目指した研究にシフトしてきている。2008 年のシングルモード出力のトップデータとしては、IPG-Photonics 社より平均パワー 6 kW の横シングルモード出力ファイバーレーザーが報告された<sup>11)</sup>。高出力シングルモード発振を実現するためには、コア径の大口徑化にともなう高次モード発振を抑圧する必要があり、従来よりファイバーをコイル状に巻いて高次モードに曲げ損失を与える方法や、フォトニック結晶ファイバー (PCF) 技術を用いてコア開口数 (NA) を低減する手法が用いられている。PCF 技術で生じる低コア NA 時の曲げ損失の課題に対して、コア径 70  $\mu\text{m}$  の Yb 添加ダブルクラッド型 LMA-PCF のファイバー外側を直径 1.5 mm、長さ 1.2 m の石英ガラスロッドで固定して克服、CW 出力 163 W、 $M^2 \sim 1.2$ 、スロープ効率 75% で定偏波出力が報告された<sup>12)</sup>。また曲げ損失低減に向けての新しいアプローチとして、IMURA America より、大口徑コア内で発生した高次モードをクラッド層で選択的に損失させる leakage channel とよばれる特殊クラッドをガラス構造にしてモード抑圧効果を安定化する手法が提案され、コア径 170  $\mu\text{m}$  までのシングルモード動作を実現した。本手法を用いて 15 cm 程度の巻径化が可能なコア径 53  $\mu\text{m}$  の 2 段アンプを構成し、ピーク出力 1 MW (600  $\mu\text{J}/600 \text{ ps}$ , 25 kHz,  $M^2 \sim 1.14$ ) が、自己位相変調やラマン散乱などの非線形効果なしに得

られている<sup>13)</sup>。これ以外に、高出力シングルモードファイバーレーザーの低コスト化に向けたアプローチとして、テーパー状の Yb 添加ダブルクラッドファイバーに低輝度の励起用半導体レーザー (LD バー) を結合させて平均パワー 212 W、 $M^2 < 1.02$  の出力の報告があった<sup>14)</sup>。

狭線幅出力の高出力化については、LIDAR などのリモートセンシング用の光源としての需要もある。これに関して、マルチコアファイバー型 (37 素子) で大口徑コアを実現した Er/Yb 添加ファイバーが新規開発され、アイセーフ波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯でパルスエネルギー 750  $\mu\text{J}$ 、繰り返し 5 kHz、縦モード線幅 < 1 MHz、ビーム品質  $M^2 \sim 1.3$  の狭線幅光の増幅出力が報告された<sup>15)</sup>。

ファイバーレーザーのさらなる高輝度化に向けて、複数のファイバーレーザー出力を結合するインコヒーレントビーム結合技術 (IBC) やコヒーレントビーム結合技術 (CBC) に関しても進展があった。IBC に関しては、500 W の単一波長のファイバーレーザー出力光 4 本を反射型グレーティングで波長多重の手法で合波して、2 kW の出力が得られた<sup>16)</sup>。CBC に関しては、各ファイバー光路に対する外部制御の有無により能動型と受動型に大別されるが、能動型 CBC では、1 つのマスターレーザーを 9 分岐して各々に位相変調器と光ファイバー増幅器を設置し、各アレイ出力 12 W をレンズ結合させて 100 W の出力が得られた。ここでは、アレイごとに異なる RF 周波数の位相変調を加えてアレイ間の位相差を検出してフィードバックする self-synchronous の方法が用いられており、位相誤差検出に局発光の合波が不要であることが特長である<sup>17)</sup>。局発光合波を用いた能動型 CBC 構成では、Northrop Grumman 社より、回折光学系によりファイバー出力合成を行うことにより、光遠視野で通常生じるサイドローブを抑圧、5 本のファイバー出力の結合効率 91%、 $M^2 \sim 1.04$  の真のコヒーレント結合が実現され、コヒーレント結合による出力 100 kW 化への可能性が示された<sup>18)</sup>。一方、受動型 CBC では、4 台の光ファイバー増幅器アレイを光カップラー合成し、遠視野光の一部を 4 分岐して各増幅器に光帰還するリング共振器で全光システムを構築し、出力光の遠視野スポットが単一となることを実証している<sup>19)</sup>。また、その動作理論についても、マイケルソン型光学系で偏光保持不要であるが、マッハ・ツェンダー型光学系では偏光保持が必要となるという興味深い解析結果が報告されている<sup>20)</sup>。

### 5.2.2 可視光レーザー

2008 年、可視光レーザーは、レーザーテレビ、マイクロプロジェクター、車載のヘッドアップディスプレイ等、民生照明用途への展開に向けて小型・低コストの光源開発



が大幅に進んだ。特に、半導体レーザーでいまだ実現されていない緑色レーザーでは、 $1\ \mu\text{m}$  帯のレーザーの第二高調波発生 (SHG) 技術に進展があった。 $1\ \mu\text{m}$  帯の基本波発生方式としては、固体レーザー、ファイバーレーザー、光励起および電流励起の面発光半導体レーザー、半導体レーザー、半導体レーザーの発振器・増幅器構成と多岐にわたる。この中で、2008年、三菱電機は固体レーザー (Nd:YVO<sub>4</sub>)、波長変換素子 (MgO:PPLN) をプレーナー導波路化する方法で、内部波長変換型の緑色レーザーの小型、高出力、高効率、低コスト化を進め、出力 11.4 W、電気効率 21%、励起光源を含め体積が 5 cc 以下という、半導体レーザー並の超小型・高性能緑色レーザーを開発した<sup>21)</sup>。これにより、世界に先駆けてレーザーテレビの商品化を実現している<sup>22)</sup>。

これ以外に、ソニーより、固体レーザー (Nd:YVO<sub>4</sub>) を用いた内部波長変換型緑色レーザーとして、波長変換素子として PPSLT を用いた内部波長変換型で、最大電気効率 16% および最大出力 20 W が報告されている<sup>23)</sup>。リコーからは、波長 1064 nm のマイクロチップ固体レーザー (Nd:YVO<sub>4</sub>) と長尺 (20 mm) の MgO:PPLN を組み合わせることで、外部波長変換型で出力 10.2 W が報告された<sup>24)</sup>。パナソニックからは、高効率の 915 nm LD 励起 Yb ファイバーレーザーを基本波発生光源、MgO:PPLN を波長変換素子として用い、マルチパス外部波長変換方式を用いることで、緑色出力 7 W、電気効率 20% が報告されている<sup>25)</sup>。

面発光半導体レーザーを光励起して用いる光励起半導体レーザー (OPS) を用いるものとして、コヒーレント社から、波長変換素子として LBO、波長選択に複屈折フィルターを用いた内部波長変換型の緑色・青色共用レーザーが報告された<sup>26)</sup>。OPS は、半導体の広い利得範囲から発振波長が選択できることが特長であり、波長 561 nm の緑色において、出力 11.5 W、光変換効率 29%、波長 486 nm の青色において、光出力 7.3 W、光変換効率 19.2% を実現した。また、RGB ではないが、InGaAs-GaAs 量子井戸構造により 1180 nm 帯の利得をもつ半導体レーザーを OPS として使用し、LBO と複屈折フィルターを用いた内部波長変換により、黄色 (波長 587 nm) レーザーとして光出力 5 W を光変換効率 14% が報告された<sup>27)</sup>。また、2007 年の報告となるが、電気励起の面発光半導体レーザーを用いる方式については、Novalux 社 (現 Arasor 社) が、波長 930 nm、1064 nm、1230 nm 波長帯域の半導体レーザーと、波長変換素子 (PPLN)、波長選択素子 (VBG) の組み合わせによる内部波長変換型で RGB 光を発生させて

おり、波長 532 nm の緑色出力 6.9 W、電気効率 8%、波長 465 nm の青色出力 5.4 W、電気効率 8%、波長 615 nm の赤色出力 2.0 W、電気効率 2% を得ている<sup>28)</sup>。

面発光型の半導体レーザーを外部共振器を用いる方法は、内部波長変換以外にも、共振器内部に AO モードロッカーや半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) を用いたモードロック化<sup>29)</sup> や複屈折フィルタによる波長選択化<sup>30,31)</sup>、エタロンを挿入した単一周波数化<sup>32)</sup> 等の報告もあり、今後のさらなる発展が期待できる。

### 5.2.3 その他固体レーザー

非熱加工用途の超短パルスレーザーとして、Yb 系のレーザーの新規広帯域化手法が提案された。利得ピーク波長の異なる Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (セラミック) を同一共振器内に置くことで共振器内での利得帯域を広げ、スペクトル幅 27.3 nm の帯域でパルス幅 53 fs の超短パルスを得ている<sup>33)</sup>。また、従来の Yb:YAG を用いたものとして、スペクトル幅 12 nm、パルス幅 100 fs と過去最短のパルス幅の報告があった<sup>34)</sup>。一方、非熱加工用途の超短パルスレーザーでは、フェムト秒のパルス幅が必要とされ、LD 励起が可能な広帯域な Yb 系の固体レーザーの開発が盛んであったが、ピコ秒パルスの有効性が認識されたことから、帯域は狭いが四準位で利得の高い Nd 系レーザーの報告が増えている。Yb 系レーザーは利得が低いため、数 10  $\mu\text{J}$  以上の高出力パルス発生には複雑な再生増幅器が必要とされたが、高利得の Nd 系レーザーを媒質として用いることで、簡単な構成の増幅器が使用可能となる。CW 励起の Nd:YVO<sub>4</sub> をダブルパス増幅器として用いる報告がなされており、繰り返し 1 MHz において、パルスエネルギー 75  $\mu\text{J}$ 、パルス幅 8.7 ps が得られている<sup>35)</sup>。また、繰り返しに同期した QCW 励起の Nd:YVO<sub>4</sub> をシングルパス増幅器として用いることで、繰り返し 1 kHz において、パルスエネルギー 210  $\mu\text{J}$ 、パルス幅 10 ps が報告されている<sup>36)</sup>。

## 文 献

- 1) 内田裕行他：秋季応物講演会 (2008) 2a-P1-5.
- 2) 亀山真吾他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZQ-13.
- 3) 吉本 晋他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZX-13.
- 4) 久保田将司他：春季応物講演会 (2008) 30p-B-7.
- 5) 荒井昌和他：秋季応物講演会 (2008) 2p-P3-9.
- 6) 大坪孝二他：秋季応物講演会 (2008) 2p-P3-10.
- 7) 石川 務他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZQ-2.
- 8) 佐藤 誠他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZQ-5.
- 9) 藤田和上他：秋季応物講演会 (2008) 2a-P3-23.
- 10) H. Yoshida: Nat. Photonics, 2 (2008) 551.
- 11) D. Gapontsev: SSDLTR (2008).
- 12) O. Schmidt *et al.*: CLEO (2008) CMB2.

- 13) L. Dong *et al.*: *CLEO* (2008) CPDB6.
- 14) V. Filippov *et al.*: *Opt. Lett.*, **33** (2008) 1416.
- 15) G. Canat *et al.*: *Opt. Lett.*, **33** (2008) 2701.
- 16) C. Wirth *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 1178.
- 17) T. M. Shay: *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 480.
- 18) E. C. Cheung *et al.*: *Opt. Lett.*, **33** (2008) 354.
- 19) J. Lhermite *et al.*: *CLEO* (2008) CWB3.
- 20) J. Cao *et al.*: *Opt. Lett.*, **34** (2009) 133.
- 21) Y. Hirano *et al.*: *CLEO* (2008) CPDA3.
- 22) <http://www.believingisseeing.tv/>
- 23) 岡美智雄他：レーザー学会年次大会 (2009) S110pS03.
- 24) Y. Satoh *et al.*: *CLEO* (2008) CFK2.
- 25) 古谷博之：レーザー学会年次大会 (2009) S110pS02.
- 26) L. E. Humziker *et al.*: *IEEE J. Quantum Electron.*, **13** (2007) 610.
- 27) M. Fallahi *et al.*: *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **20** (2008) 1700.
- 28) S. Hallstein *et al.*: *LEOS* (2007) p.254.
- 29) J. Saarinen *et al.*: *CLEO* (2008) CFP4.
- 30) J.-M. Hopkins *et al.*: *CLEO* (2008) CWD4.
- 31) A. J. Maclean *et al.*: *IEEE J. Quantum Electron.*, **44** (2008) 216.
- 32) B. Rudin *et al.*: *CLEO* (2008) JMC4.
- 33) 戸倉川正樹他：春季応物講演会 (2008) 2p-ZA-1.
- 34) 植村禎夫他：春季応物講演会 (2008) 9a-ZX-1.
- 35) K. Nawata *et al.*: *CLEO* (2008) CFB5.
- 36) A. Agnesi *et al.*: *CLEO* (2008) CFJ2.

## 6. 量子光学・非線形光学

物材機構 栗村 直

### 6.1 概要

量子光学・非線形光学の分野では2008年は大きな転機と記憶されるかもしれない。波長変換による緑色レーザーを用いたレーザーテレビが実用化され北米市場で販売が開始された(国内販売は未定)。非線形光学分野を牽引する市場が登場したことで、当該分野の大きなトピックスのひとつとなった。

量子光学分野では量子鍵配送(QKD)の要素技術の進展が目立った。特に、量子光源(単一光子源、量子もつれ光子対源)や通信波長帯光子検出器の進展が著しかった。

非線形光学では、擬似位相整合非線形光学(QPM NLO)が着実な進展をみせている。波長変換によるWクラス緑色レーザーの試作も広がっており、レーザーテレビとして一部は実用化された。レーザーを用いたマイクロプロジェクターの試作も始まっており、QPM NLOを用いたレーザーの高出力化、高効率化に注目が集まっている。

### 6.2 量子光学

QKD技術は着実な進展をみせており、国内外において実用化研究も精力的に行われている。しかし、通信距離や通信速度が既存の情報通信システムへ適合できるまでには至っていない。そのため、要素技術である高純度な量子光源や、高効率かつ低雑音な高速光子検出器の開発が注目さ

れている。

量子ドットを用いた単一光子源が着実な進展をみせている。電気的動作(LED的)型の量子ドット素子で通信波長帯(C-band)単一光子源が実現された<sup>1)</sup>。C-bandにおいて電気的直動作可能な半導体ベースの単一光子源は、これが世界で初めての例である。

QKDの長距離化の重要な鍵となる量子もつれ光子対源の開発も活発に行われている。これまで、量子もつれ光子対源は二次非線形光学結晶中の自然パラメトリック下方変換過程を利用したものが多くを占めていたが、最近、四光波混合過程を利用した量子もつれ光源が大きく進展している。四光波混合用の素子としてシリコン細線導波路を用いることにより自然放出ラマン散乱起因の雑音光子発生を抑圧に成功し、従来から用いられてきた石英系ファイバーよりも高純度な量子もつれ光子対発生に成功している<sup>2,3)</sup>。

上記のような非線形光学過程の利用だけでなく、半導体ベースの量子もつれ光子対源も検討されている。将来的に量子もつれ光子対源となることが期待される超伝導電極発光ダイオードの基礎実験が行われた<sup>4)</sup>。超伝導体(Nb)電極をもつInGaAs発光ダイオードの発光特性について報告している。電極材料であるNbの超伝導転移温度以下において発光強度の増大を世界で初めて確認している。これは、半導体(InGaAs)内に電子が対(クーパー対)となって注入されていることを示している。電子対注入により光子対が発生し、それが量子もつれ状態にあることが期待される。

通信波長帯単一光子検出器に関しても大きな進展があった。電子冷却InGaAs/InPなだれフォトダイオード(APD)を用いた通信波長帯用高速単一光子検出器の開発に成功している。従来のような方形波パルス電圧ではなく正弦波電圧をゲート電圧に用いることで、高繰り返し動作時の問題点であったアフターパルス雑音の低減に成功し、S/N比を劣化させることなく最大1.2GHzのゲート繰り返し周波数を実現している<sup>5)</sup>。

擬似位相整合LiNbO<sub>3</sub>(LN)導波路による周波数上方変換とシリコン(Si)APDを用いた単一光子検出器の低雑音化が報告された<sup>6)</sup>。周波数変換用高強度励起光の波長を被変換光(信号光:1.55 $\mu$ m)より長波長(1.81 $\mu$ m)とすることにより自然ラマン散乱起因の雑音光子発生を抑圧に成功している。この周波数変換技術と変換光の波長域(0.84mm)に感度を有するSi APDを用いることにより、1.55 $\mu$ m帯光子に対する検出効率はInGaAs/InP APDより低いものの、暗計数確率は1~2桁程度低く迎えられた。周波数上方変換の技術は、超短パルスレーザーによる光子対

発生の際の時間分解技術としても用いられており、周波数変換用励起光に超短パルスレーザーを用いることで150 fs程度の時間分解能が得られている<sup>7,8)</sup>。

また、量子通信や重力波検出における重要な技術として高レベルなスクイズド光の生成が研究されているが、真空場のスクイーミングとして世界で初めて10 dBのノイズ低減が報告された<sup>9)</sup>。波長1.06  $\mu\text{m}$ であるため通信用途は検討しがたいが、現状の重力波検出技術との整合性はよい。ここでは7 mol% Mg添加LNによるタイプI位相整合を用いた光パラメトリック発振器が利用されている。

ほかにもNbNやMgB<sub>2</sub>などの超伝導体を用いた通信波長帯低雑音光子検出器の開発が進められており、さまざまな手法が試みられている。

### 6.3 擬似位相整合非線形光学

分極反転を用いた擬似位相整合非線形光学の進展が著しい。レーザーテレビやプロジェクターを指向した緑色レーザーは、分極反転を用いた擬似位相整合非線形光学が必須技術となっている。シングルパスでも高い効率を実現できるのが特長であり、CWレーザーを基本波とした波長変換でも10 Wを超える高出力が得られている。

単一周波数Nd:YAGレーザーを基本波として分極反転Mg:SLT (Mg添加定比組成タンタル酸リチウム)による第二高調波発生(SHG)で16 W緑色光が光-光変換効率 $\eta_{e-o}$  17.6%で報告された<sup>10)</sup>。Mg:SLTは高い熱伝導率をもつため、高出力動作に適している。10 Wを超えるCW出力は、すでにレーザーシアターを狙えるレベルに達している。

SHGの変換効率は入射光のパワーに比例するため、1 W以下の低入力ではバルクシングルパスでの高い効率が難しい。このため、低入力時は高効率化の手法を検討する必要がある。最近携帯電話に搭載できるサイズのマイクロプロジェクターが試作されているが、これらの用途では出力10~100 mWが求められている。低い消費電力すなわち高い電気-光変換効率 $\eta_{e-o}$ が要求されるため、高効率化技術が鍵となる。

QPM NLOにおける高効率化の手法は、(a)バルク結晶と内部共振器型波長変換、(b)バルク結晶と外部共振器型波長変換、(c)導波路型シングルパス、のおもに3種類がとられてきている。レーザー共振器内部に波長変換デバイスを挿入して効率を向上させる(a)はさまざまな手法が試みられている。

Nd:YVO<sub>4</sub>の共振器内にMg:LNの波長変換デバイスを導入して、LDの励起パワー4.35 Wから緑色光1.7 Wを得て $\eta_{e-o}$  = 18.9%が実現されている<sup>11)</sup>。デバイス長

0.5 mmで共振器を設計して温度許容幅を46°Cと広げ、温度コントローラーの不要な低消費電力緑色レーザーが得られている。ブロードエリアLD励起Nd:YVO<sub>4</sub>の内部共振波長変換で、Mg:SLTによりCW 7.2 Wで $\eta_{e-o}$  = 16%が実現されている。双方向励起にしたCW 20.8 Wでは $\eta_{e-o}$  = 10%弱と推察される<sup>12)</sup>。ここではMg:SLTの低い赤外吸収が共振器内変換の成功の鍵といえる。(a)と(c)スラブ導波路の両方を取り入れて共振器内一次元閉じ込めで高効率化する試みが出てきている。二次元閉じ込めのチャンネル導波路では高効率は得られるものの、出力が0.2 W程度に限られてしまう。そこで15チャンネルのNd:YVO<sub>4</sub>レーザーアレイをMg:LNスラブ導波路デバイスで波長変換して、 $\eta_{e-o}$  = 20%で平均10.9 Wのパルス出力を得る方法が提案されている<sup>13)</sup>。パルス動作であるため比較的発熱しやすいが、励起用レーザーも含めて7×3.2 mmの小型実装した技術は優れている。この光源はレーザーテレビの実用化に大きく貢献した。(c)の導波路を二次元閉じ込めのチャンネル導波路とし、DBRレーザーと組み合わせると出力100 mW、体積0.7 ccの超小型緑色光源が得られている。ピエゾ駆動系で結合部の温度安定性を改善しており<sup>14)</sup>、マイクロプロジェクターの試作機に搭載されている。

また新しい試みとして、Mg:LNを用いた折り返しマルチパスの波長変換でYb: fiberレーザーから $\eta_{e-o}$  = 70%、 $\eta_{e-o}$  = 20%で出力7 Wを得ている<sup>15)</sup>。マルチビームにはなるものの、高いビーム品質を要求しない応用での新たなアプローチとして注目される。スペckルを嫌うディスプレイ応用では、むしろ干渉性の低下が有利に働く可能性もある。

Mg:LNを用いた導波路デバイスでは、ハイブリッドシリコンフォトニクスへ向けてシリコン基板上に非線形デバイスを実現した例が報告された<sup>16)</sup>。Mg:LN導波路デバイスは640 Gb ps信号での超高速クロック再生にも展開されており、高速応答が実証されている<sup>17,18)</sup>。またLT上の直接接合Zn:LNリッジ導波路では規格化効率2400%/Wが報告され、励起光160 mWで差周波発生が+5 dBと報告された。同構造の導波路は中赤外3  $\mu\text{m}$ 帯の発生にも用いられ、65 mWの中赤外光を得ている<sup>19)</sup>。LN導波路デバイスの経路中に薄膜波長板を導入する偏波もつれ光子対発生デバイスも提案されている<sup>20)</sup>。

半導体において擬似位相整合を実現する手法として、エピタキシャル成長時の空間反転制御および拡散接合がある。空間反転制御は、GaAsにおいて周期1  $\mu\text{m}$ の微細反転技術が報告され、作成技術に進展がみられた<sup>21)</sup>。この作

製技術は導波路中赤外発生デバイスにも展開され、差周波による波長  $3\mu\text{m}$  の発生にも貢献している<sup>22)</sup>。拡散接合では、常温で接合できる表面活性化接合法が用いられ、GaAs における As 抜けを抑制した高品質接合法が報告された<sup>23)</sup>。

水晶の周期ツインを用いた紫外波長変換デバイスが研究されており、パルス SHG において波長 266 nm 光 2.2 mW の出力が報告された<sup>24)</sup>。

#### 6.4 その他の非線形光学

光トラッピングやレーザー加工で有利とされる径偏光ビーム（軸対称偏光ビーム）における SHG の研究も始まっており、その特性評価が報告されている<sup>25)</sup>。

非線形光学による全固体短波長光源の開発も着々と進められており、CLBO の SFG を用いて 198.5 nm の発生が試みられている<sup>26)</sup>。

テラヘルツ波発生を目的とした DAST およびその類縁体の研究も進められている。DAST 類縁体として 1-3 テラヘルツ領域に吸収のない BDAS-TP が開発されており、広帯域テラヘルツ発生結晶として興味深い<sup>27)</sup>。また、DAST を用いた共振器内差周波発生などが試みられており、高出力化に進展がみられている<sup>28,29)</sup>。

マイクロ波領域の受信アンテナに光変調器を用いる提案がなされている。アンテナの指向性を制御する目的で分極反転構造を用いる提案がなされており、マイクロ波-光の変換デバイスとして興味深い<sup>30)</sup>。

分極反転を用いた偏向器がこれまで報告されてきているが、これを用いた光ストリークカメラに進展がみられた。シングルチップで二次元の走査を実現するデバイスが提案され<sup>31)</sup>、時間分解能 2 ps での動作が確認された<sup>32)</sup>。

#### 6.5 展 望

量子光学においては、量子光源、光子検出器の開発がさまざまな手法によって試みられ、着実な進歩がみられた。特に光子検出器に関しては、実用的ななだれフォトダイオードを用いた光子検出器がめざましい進歩を遂げている。そして、その S/N 比や繰り返し周波数等の性能は、超伝導光子検出器のそれらに近づきつつある。今後、開発された光源、光子検出器の量子鍵配送システムへの応用が期待される。また、電子デバイスの今後の進展に期待しつつ、新しい光デバイスとの組み合わせが検討されるものと思われる。

非線形光学においては、緑色域の実用化例が登場したことで長期信頼性や安定性に対する評価が一段落し、他の応用分野にもはずみがつくものと思われる。特に擬似位相整合非線形光学には、マイクロプロジェクター、シリコンフ

ォトニクス、ガス分析などの大きな応用分野が控えており、多様な用途展開に踏み込んでいくものと思われる。異分野との提携、異分野からの新規参入が期待される。

本原稿を執筆するにあたり、日本大学行方直人氏、(株)ニコン原田昌樹氏他のご協力を得て深く感謝いたします。  
(平野)

#### 文 献

- 1) T. Miyazawa *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **47** (2008) 2880.
- 2) 武居弘樹他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZE-15.
- 3) 原田健一他：秋季応物講演会 (2008) 5a-ZD-7.
- 4) 林雄二郎他：春季応物講演会 (2008) 28p-E-14.
- 5) 足立俊介他：秋季応物講演会 (2008) 5a-ZD-5.
- 6) 鎌田英彦：秋季応物講演会 (2008) 5a-ZD-6.
- 7) O. Kuzucu *et al.*: Opt. Lett., **33** (2008) 2257.
- 8) O. Kuzucu *et al.*: Phys. Rev. Lett., **101** (2008) 153602.
- 9) H. Vahlbruch *et al.*: Phys. Rev. Lett., **100** (2008) 033602.
- 10) S. Tovstonog *et al.*: Opt. Exp., **16** (2008) 11294.
- 11) T. Yokoyama *et al.*: APLS (2008) 31Ba5.
- 12) 望月崇宏他：春季応物講演会 (2008) 28a-NC-2.
- 13) Y. Hirano *et al.*: CLEO/QELS (2008) CPDA3.
- 14) V. Bhatia *et al.*: SID 08 Digest (2008) 63.2 p.962.
- 15) 水島哲郎他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZN-12.
- 16) 大久保徹他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZG-4.
- 17) C. Ware *et al.*: Electron. Lett., **16** (2008) 5007.
- 18) L. K. Oxenløwe *et al.*: Electron. Lett., **44** (2008) 370.
- 19) 遊部雅生他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZG-7.
- 20) 川島稜太郎他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZN-18.
- 21) 太田順也他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZG-11.
- 22) 太田生馬他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZG-9.
- 23) 川路宗矩他：春季応物講演会 (2008) 27a-ZF-10, 秋季応物講演会 (2008) 4p-ZN-5.
- 24) 中西 淳他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZG-1.
- 25) 佐藤俊一他：春季応物講演会 (2008) 28p-P8-10~12.
- 26) 宮園健志他：春季応物講演会 (2008) 28a-NC-9.
- 27) 松川 健他：春季応物講演会 (2008) 30p-ZH-1.
- 28) 秋葉拓也他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZH-2.
- 29) 濱野哲英他：秋季応物講演会 (2008) 2a-ZB-6.
- 30) 須田規仁他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZG-7.
- 31) 多田啓二他：春季応物講演会 (2008) 28a-ZG-9.
- 32) 久武信太郎他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZN-8.

## 7. 近接場光学

理研 岡本隆之

### 7.1 概 要

表1に2008年の応用物理学会、ナノオプティクス研究グループ討論会、およびOPJでの発表を分野と使用材料によって分類した結果を示す。

表1 分野と使用材料。

	金 属	半導体・誘電体	小 計
ナノ構造作製	16	1	17
エネルギー移動	10	7	17
センサー	6	4	10
SERS・分光	8	1	9
導波路	7	2	9
理論・計算	6	1	7
非線形	4	2	6
ナノアンテナ	3	0	3
原子光学	0	3	3
顕微鏡	0	3	3
加工	1	1	2
その他の応用	18	0	18
小 計	79	25	104

金属材料を用いたものが4分の3を占める。ほとんどすべてが表面プラズモンと関連する。半導体では量子ドットに、誘電体では導波路に関するものが多い。近接場光学発展のきっかけとなった走査型近接場顕微鏡に関する発表数は著しく低下している。また、近年話題のメタマテリアルに関する発表は、残念ながらほとんどなかった。

### 7.2 光 導 波 路

表面プラズモン共鳴を用いた光導波路は金属/誘電体/金属 (MIM) 構造を用いたものと、金属ナノ粒子列を用いたものに大きく分けられる。前者では、MIM 導波路におけるファブリー・ペロー型フィルターの提案<sup>1)</sup>、スタブ構造の提案<sup>2)</sup>、効率的分岐路の設計<sup>3)</sup>、MIM 構造にさらにチャンネル構造を導入したプラズモン導波路によるマッハ・ツェンダー干渉計の作製<sup>4)</sup>などが報告された。後者では、銀ナノディスクの一次元鎖を用いた導波路<sup>5)</sup>、球形銀ナノ粒子の一次元鎖導波路<sup>6)</sup>、金属ナノ粒子をランダムに分散配置した導波路<sup>7,8)</sup>が報告されている。いずれも数値計算による解析であり、実験結果の発表はなかった。また、プラズモンを用いていない導波路としては、テルルナノ粒子列の作製<sup>9)</sup>や、基板をパターンニングすることでポリスチレン球を規則的に並べた光導波路の作製<sup>10)</sup>についての報告があった。

### 7.3 表面増強ラマン散乱

表面プラズモン共鳴の電場増強効果によるホットスポットでの巨大な表面増強ラマン散乱 (SERS) 増強が報告さ

れてから久しい。しかし、実用化のためには、ホットスポットの再現性や高密度化は課題となったままである。ブルズアイ構造を用いたホットスポットの構築<sup>11)</sup>、三次元配列させた金ナノ構造体による三次元的なホットスポットの構築<sup>12)</sup>、ポーラスアルミナをマスクとして作製した正方形金ナノ粒子アレイによる SERS の観測<sup>13)</sup>などが報告された。銀表面上から適当な間隔を隔てて斜め蒸着法によって作製した銀ナノ粒子アレイでファブリー・ペロー型の共振器を構成することで、光利用率を高め SERS の増強を観測している<sup>14)</sup>。金属表面以外の媒体として、酸化タングステン・ナノロッドでの単一分子の SERS が観測されている<sup>15)</sup>。ユニークな報告でありメカニズムの解明が期待される。

### 7.4 金属ナノ粒子、金属ナノ構造の作製

溶液中への酸素供給量を制御することで、立方体、ピラミッド、ワイヤー、球などのさまざまな形状の銀ナノ結晶を合成する方法<sup>16)</sup>、銀ナノ立方体の二量体の作製法<sup>17)</sup>、ポリマーナノ構造体の側壁への金属堆積を用いた金属ナノ構造の作製法<sup>18)</sup>、誘電体微小球をマスクとした真空蒸着によるスプリットリング共振器構造の作製法などの報告があった。また、金ナノロッドの生成メカニズムについての解析がなされた<sup>19)</sup>。

### 7.5 エネルギー移動

表面プラズモンと蛍光分子や量子ドットとの相互作用に関する研究も増えている。MIM 構造に埋め込まれた蛍光色素からの発光増強<sup>20)</sup>、金ナノ粒子による量子ドットの発光制御<sup>21)</sup>および発光増強<sup>22)</sup>、金表面による量子ドットの発光制御<sup>23)</sup>、金属の表面粗さによる量子井戸の発光増強<sup>24)</sup>、量子ドット間のエネルギー移動の観測<sup>25)</sup>、蛍光分子からプラズモニック結晶へのエネルギー移動の解析<sup>26)</sup>、金ナノ粒子から酸化チタンナノ粒子への電子移動のメカニズム解析<sup>27)</sup>、金ナノ周期構造によるシリコンナノ結晶からの発光増強<sup>28)</sup>などの報告があった。

### 7.6 赤外発光・抑制

金表面上に配置されたナノスリットアレイからの直線偏光した赤外光の輻射の観測<sup>29)</sup>、二次元ナノホールアレイにおける疑似表面プラズモンによる赤外輻射の制御<sup>30)</sup>、リング共振器アレイによる赤外輻射の増強の FDTD (時間領域有限差分) 計算による確認<sup>31)</sup>などが報告されている。

### 7.7 そ の 他

面白い提案としては、アモルファス・ダイヤモンド構造を用いた三次元フォトニック・バンドギャップの形成がある<sup>32)</sup>。周期性などの長距離秩序をもたない構造で、明瞭なバンドギャップが確認されている。近接場光アシスト・エ

エッチングの提案があった<sup>33)</sup>。これは、微細先鋭部分に発生した近接場光による選択的なエッチングにより、光学素子の研磨を行うもので、自律的に平坦化が進行するユニークなアイデアである。また、金属プローブ先端での表面プラズモン増強電場によるソフト脱離イオン化法が提案され、実際にインシュリン等の脱離イオン化に成功している<sup>34)</sup>。

## 7.8 展 望

近接場光学研究の世界的潮流は、過去から順に、開口型顕微鏡、チップ増強顕微鏡、プラズモニクス、ナノアンテナ・メタマテリアルと続いている。チップ増強以降は表面プラズモンが関与している。国内の研究としては、いまだナノアンテナとメタマテリアルの研究発表は少ない。この分野の発表が期待される。プラズモニクスに関しては、バイオセンサー以降実用には繋がっていない。何が実用になるのか、そろそろ新しい答えが欲しいところである。SERSが一番近いところにいると考えられる。また、アクティブ材料との組み合わせも一候補であると考えられる。

## 文 献

- 1) 原口雅宣他：春季応物講演会 (2008) 28a-ZF-5.
- 2) 松崎庸介他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZW-8.
- 3) 西森理人他：春季応物講演会 (2008) 28a-ZW-8.
- 4) 松尾圭祐他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZH-4.
- 5) 蔡 雷他：春季応物講演会 (2008) 28a-ZF-3.
- 6) 柳澤健一他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZW-5.
- 7) 都鳥頭司他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZW-6.
- 8) 山際正和他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZW-7.
- 9) 藤原 巧：ナノオプティクス (2008) p. 28.
- 10) 三井 正他：ナノオプティクス (2008) p. 58.
- 11) 柳沢雅広他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZW-18.
- 12) 近藤俊彰他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZW-19.
- 13) 近藤敏彰他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZH-14.
- 14) 今井義勝：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZH-16.
- 15) 新ヶ谷義隆他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZW-9.
- 16) 藤井信太朗他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZW-12.
- 17) 内田修平他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZH-3.
- 18) 久保若菜他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZH-4.
- 19) 上地一郎他：ナノオプティクス (2008) p. 34.
- 20) 林 真一他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZW-2.
- 21) 山本 巧他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZW-11.
- 22) 石田昭人：ナノオプティクス (2008) p. 1.
- 23) 松田一成他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZW-7.
- 24) 岡本晃一他：ナノオプティクス (2008) p. 6.
- 25) 西林一彦他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZH-8.
- 26) 岡本隆之他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZH-9.
- 27) 古部昭広他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZH-10.
- 28) 望月有吾他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZH-11.
- 29) 池田賢元他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZW-1,2.
- 30) 高原淳一他：ナノオプティクス (2008) p. 54.
- 31) 野村泰史他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZH-5.
- 32) 枝川圭一他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZW-4.
- 33) 平田和也他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZW-5.
- 34) 堀 裕他：ナノオプティクス (2008) p. 95.

## 8. 光応用計測

産総研 沼田孝之

### 8.1 概 要

光応用計測の分野には、そのツールとなる要素技術、すなわち光源、光検出器、光学素子の技術開発の進展によって例年新たな展開がもたらされる。近年では、超短パルスレーザーによって各種高速物理現象の時間分解測定や、非線形現象の誘起による顕微法の高空間分解能化が進み、また CCD などの高密度二次元撮像デバイスの登場は、各種光学量の高速かつ高感度な実時間イメージング技術を実現した。さらに微細加工技術の著しい発達、フォトニック結晶などこれまでにない機能性光学素子を生み出して従来の光計測技術にブレイクスルーをもたらす原動力となりつつある。加えて、テラヘルツ波やスーパーコンティニューウムなど新たな光源技術も充実を続けており、これらを用いたセンシング、イメージング技術の開発が盛んに進められている。

このような光応用計測の分野を、ここでは幾何光学応用、物理光学応用、ファイバー応用の3つに分類し、2008年におけるそれぞれの進展を振り返ることにする。

### 8.2 幾何光学応用

幾何光学は、光の直進、屈折、反射といった基本的性質に基づいて幾何学的に光の振る舞いを考察する研究分野であり、光学機器の設計では成熟した手法として広く普及している。昆虫の複眼を模しマイクロレンズアレイと高密度撮像デバイスを組み合わせた、コンパクトな光学系の形状計測法の報告<sup>1)</sup>があった。レンズ配置の最適化により解像度と測距精度の向上を達成<sup>2)</sup>したほか、口腔内の形状測定に応用<sup>3)</sup>を進めている。また、マイクロサイズの繊維による光拡散を利用した偏光フィルムについて、光線追跡による偏光度の検証<sup>4)</sup>が報告された。さらに、SWS (sub-wavelength structure) の無反射構造を付けたレンズの透過率や波面収差を、光線追跡と厳密結合波解析とを組み合わせる解析する取り組み<sup>5)</sup>や、三次元計測で有用となる液圧式可変焦点レンズの高速化と高解像力化が進展した<sup>6)</sup>。

### 8.3 物理光学応用

物理光学は、波長程度の微小領域における光に対し電磁気学的観点から取り組む研究分野であり、電磁場の時間や空間、強度などが議論の対象となる。超短レーザーパルスを応用した計測に関しては、位相制御したフェムト秒パルス対を用いた伝搬中プラズモンの分極分布の観察<sup>7)</sup>、単一パルスに波長ごとの位相変調を加えることで選択的な蛍光励起を行う手法<sup>8)</sup>、MEMS<sup>9)</sup>や液晶<sup>10)</sup>による空間光変調器

を用いた波面制御法などが報告された。近接場光を用いたセンシングでは、プリズム上のエバネセント場を利用した測距、測長技術<sup>11)</sup>や、表面プラズモンセンサーと導波路型センサーの感度比較<sup>12)</sup>、また、銀ナノ粒子凝集体を用いた酵母菌細胞の表面増強ラマン散乱分光分析<sup>13)</sup>など金属ナノ構造における電場増強効果の応用<sup>14)</sup>で進展がみられた。またビーム断面内偏光制御技術に関して、軸対称偏光の発生法<sup>15)</sup>や、その顕微法<sup>16)</sup>、光トラッピング法<sup>17)</sup>への応用について報告があった。フォトニック結晶を用いた偏光イメージングデバイスが提案され、高速二次元偏光測定の可能性が示された<sup>18)</sup>。

#### 8.4 光ファイバー応用

FBG (fiber Bragg grating) センサーでは、受光素子の高感度化により単一波長で多点計測を行う試み<sup>19)</sup>がなされた。ファイバーセンサーの測定対象は一段と多様化が進み、水中音響波<sup>20)</sup>、臨床医学への応用<sup>21)</sup>や SPR (surface plasmon resonance) 構造によるバイオセンシング<sup>22)</sup>、フェムト秒レーザーで加工したファイバーを用いた気泡サイズ測定<sup>23)</sup>など数多くの報告があった。また、ファイバー出射光を用いたミラー形状計測技術では測定誤差の低減が進んだ<sup>24)</sup>。

#### 8.5 その他

その他特筆すべき点として、テラヘルツ関連技術の進展が挙げられる。応物講演会では3日間にわたってセッションが開かれ、当研究分野の隆盛がうかがえた。光源の波長可変技術<sup>25)</sup>、高出力化<sup>26)</sup>、顕微法<sup>27)</sup>、メタマテリアル開発<sup>28)</sup>など多数の成果が報告された。

#### 8.6 展望

2008年以降も、各種の要素技術の発達により光応用計測の進展は継続すると思われる。特に超短パルスレーザーの応用やテラヘルツ分野における光源技術、フォトニック結晶やメタマテリアルなどの先端材料技術の可能性に注目したい。一方で、日本光学会年次講演会において環境問題をキーワードにした副題が冠せられるなど、これまでにない社会潮流が押し寄せつつある印象を受けた。資源の枯渇や地球環境の悪化から省エネルギー化の声が高まる中で、今まで以上に付加価値が高く生産性の高い「ものづくり」が要求される今日、それらを正しく評価し見極める「計測技術」に求められる役割は非常に大きいといえる。光応用計測分野のさらなる貢献に期待したい。

#### 文献

- 1) 田邊浩之他：OPJ (2008) 5pD4.
- 2) 堀遼一他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZW-10.

- 3) 佐藤祥平他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-2.
- 4) 戸谷健朗他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZV-2.
- 5) 小林 優他：秋季応物講演会 (2008) 2a-ZG-8.
- 6) 奥 寛雅他：秋季応物講演会 (2008) 2a-ZG-9.
- 7) 久保 敦他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZH-11.
- 8) 橋本 守他：春季応物講演会 (2008) 27a-ZG-5.
- 9) 王 戈他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZG-21.
- 10) 江角禎宏他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZX-1.
- 11) 鈴木健太郎他：OPJ (2008) 5pB2.
- 12) 杉本雄亮他：秋季応物講演会 (2008) 4p-ZH-18.
- 13) スジス アチャナチル他：秋季応物講演会 (2008) 2a-ZH-3.
- 14) 藤崎朋子他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZW-1.
- 15) 橋本 守：OPJ (2008) 6aAS5.
- 16) 小澤祐市他：春季応物講演会 (2008) 30a-ZV-7.
- 17) 柳沢雅広他：春季応物講演会 (2008) 29p-ZW-18.
- 18) 佐藤 尚他：OPJ (2008) 5pD2.
- 19) 吉川将成他：春季応物講演会 (2008) 27a-ZQ-3.
- 20) 柚友宏行他：春季応物講演会 (2008) 27a-ZQ-4.
- 21) 盛田伸一他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZW-8.
- 22) 吳 玉英他：春季応物講演会 (2008) 29a-R-11.
- 23) 小澤祐輔他：秋季応物講演会 (2008) 2p-ZF-11.
- 24) 松浦敏晋他：秋季応物講演会 (2008) 2p-ZF-1.
- 25) 林伸一郎他：秋季応物講演会 (2008) 3p-ZE-2.
- 26) S. Ragam 他：秋季応物講演会 (2008) 3a-ZE-9.
- 27) 渡邊 稜他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZH-10.
- 28) 宮丸文章他：秋季応物講演会 (2008) 2p-V-2.

## 9. 干渉計測

産総研 竹野耕平

### 9.1 概要

干渉計測に関する研究は、測長・変位計測、表面形状計測や生体組織の画像化、透明物質の屈折率分布計測から、重力波検出のための大型干渉計など、多岐にわたる分野での成果が報告された。近年では、従来の He-Ne レーザー等による干渉計測に加え、スーパーリミネセントダイオード (SLD) や超広帯域光などを利用した低コヒーレンス干渉の研究が多数報告されている。また、CCD カメラなどの撮像素子の高解像度化に伴い、より実用的なレベルに近づいてきたデジタルホログラフィーに関する報告が増えつつある。2008年の干渉計測に関連した研究の進展を手法ごとに分類して概観する。

### 9.2 白色干渉計・低コヒーレンス干渉計

広帯域のスペクトルを有する光源を用いた低コヒーレンス干渉は、生体組織の断層像の取得や、透明物体の位相分布測定など盛んに研究が行われている分野である<sup>1)</sup>。なかでも、光コヒーレンストモグラフィー (OCT) は生体計測に幅広く応用され、測定の高速度や奥行き方向の分解能の向上など活発に研究が行われている。OCT を眼球等の計測に適用した研究に関する解説は 17 節「医学・生物応用光学」を参照されたい。

生体組織以外を対象に OCT を用いた研究として、高分

子光導波路の屈折率分布の精密測定<sup>2)</sup>や、ハロゲンランプと音響光学波長可変フィルターを組み合わせた波長走査幅65 nmをもつ光源による薄膜形状計測<sup>3)</sup>が報告された。また、弱い信号光でも高精度にOCT画像を得る手法として、背景光の影響を取り除く擬似シングルショット非走査タイムドメインOCTの提案がなされた<sup>4)</sup>。

低コヒーレンス干渉に関する研究として、振幅の包絡線および位相値それぞれの情報を用いた場合のゼロ光路差の推定値に対するノイズの影響を評価し、位相ゼロクロス法がより雑音に強いことが理論的に示された<sup>5)</sup>。低コヒーレンスタンデム干渉計によるリニアスケールの遠隔校正において、光スペクトラムアナライザーを利用したチャネルドスペクトルの計測による光路差の精密測定が報告された<sup>6)</sup>。

実用的な低コヒーレンス干渉の研究として、OCTを応用した非接触の音響再生システムの構築と実証<sup>7)</sup>や、セキュリティ文書の改ざん検出技術に関し、ノイズの影響を除去して検出精度を高める手法の提案<sup>8)</sup>がなされた。

### 9.3 波長走査干渉計

半導体レーザーの波長走査を利用した干渉計測として、重畳された干渉縞から周波数選択する位相シフト法を用い、複数の反射面をもつマスクガラスの光学的厚さを測定した報告<sup>9)</sup>や、配置誤差に不感な多点位相シフト・フィゾー干渉法の報告<sup>10)</sup>があった。また、波長走査干渉計用の光源として、レンズを駆動するタイプの外部共振型半導体レーザーの報告がなされた<sup>11)</sup>。

### 9.4 従来型干渉計・干渉応用計測

上記以外の干渉計においても多くの研究報告があった。スペックル干渉計測に関連したものとして、バーチャルスペックルパターンを用いた動的面内変形計測<sup>12)</sup>が報告された。形状計測に関しては、斜め入射二波長レーザー干渉計による円筒の内面形状の計測<sup>13)</sup>や、大口徑凹面ミラーの計測を目的とした、シングルモード光ファイバーによる位相シフト点回折干渉計の誤差評価<sup>14)</sup>が行われた。

位相シフト法に関しては、ウォラストンプリズムを用いた共通光路位相シフト干渉顕微鏡による微小な位相物体の測定<sup>15)</sup>や、フォトニック結晶で作られた偏光子アレイを使用し、90度位相シフトした2枚の干渉縞画像による位相分布測定が行われた<sup>16)</sup>。

光コムを利用した研究として、モード間のビートをを用いた距離計測<sup>17)</sup>や、光コムに安定化した2台の半導体レーザーを光源とするズーミング干渉計の開発<sup>18)</sup>に関して報告が行われた。デバイスに関する研究として、フォトニック結晶偏光子を参照ミラーおよび位相シフターに用いた共通光路位相シフト干渉計の提案が行われた<sup>19)</sup>。

上記以外の手法に関する研究として、直角位相検出法によるプリズムペア干渉法の固体屈折率測定不確かさの低減の検討<sup>20)</sup>や、非対称ナル干渉計と補償光学によるスペックルノイズの低減<sup>21)</sup>などが報告された。

重力波検出用の干渉計に関しては、次世代の大型干渉計計画<sup>22)</sup>に向けた準備が進められ、300メートル干渉計(TAMA300)では防振システムの改良による変位感度の改善が達成された<sup>23)</sup>。

### 9.5 デジタルホログラフィー

デジタルホログラフィーは、近年の撮像素子の飛躍的な高解像度化に伴い、実用的な応用を目指した研究が多く報告されるようになってきた。CCDカメラによるホログラムの解像度は乾板など従来の記録材料にはまだ及ばないものの、インライン配置による位相シフトデジタルホログラフィーは新しい計測手法として注目を集めている<sup>24)</sup>。

位相シフト法に関しては、波面を空間的に分割し一度に複数のホログラムの情報を得る手法に関する報告がなされた<sup>25)</sup>。また、時間領域ヒルベルト変換位相解析デジタルホログラフィー法により、振動する物体の観測が行われた<sup>26)</sup>。デジタルホログラフィーでは再生処理を計算機上で行うため、任意の面での合焦などさまざまな信号処理が可能である。この特長を利用した回転変換による像の再生<sup>27)</sup>や物体面の角度と位置の同時計測<sup>28)</sup>が行われた。また、共通の参照波で記録された2つのデジタルホログラムから干渉成分を間接的に合成する手法が提案された<sup>29)</sup>。

### 9.6 展 望

2008年の干渉計測分野における進展を概観した。数年にわたり継続して行われ、基礎的な研究フェーズを終了して実用の方向へ進んでいる研究が多いように思われる。特に、ここ数年で、位相シフトデジタルホログラフィーを中心としたデジタルホログラフィーの分野が実用的な応用を目指して新しい展開をみせている。ホログラフィーは計測光学のみならず情報フォトニクスとも共通のテーマであり、今後は分野横断的な研究者の交流を推進することでよりいっそう研究が進展することが期待される。

### 文 献

- 1) 佐藤 学他：光学, **37** (2008) 570.
- 2) 近江雅人他：秋季応物講演会 (2008) 2p-ZF-8.
- 3) 上野 浩他：OPJ (2008) 6aC2.
- 4) Y. Watanabe *et al.*: Opt. Express, **16** (2008) 524.
- 5) 太田智章他：OPJ (2008) 5pP23.
- 6) 平井亜紀子他：秋季応物講演会 (2008) 2p-ZF-6.
- 7) 長谷川継史他：OPJ (2008) 5aC5.
- 8) 菅原 滋他：OPJ (2008) 5pC3.
- 9) K. Hibino *et al.*: SPIE, **7063** (2008) 0S1.



- 10) 藤田勇人他：第42回光波センシング技術研究会 (2008) LST42-2.
- 11) 丸山司峰他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZB-25.
- 12) 新井泰彦他：光学, **37** (2008) 600.
- 13) 山村良太他：OPJ (2008) 6aC3.
- 14) 松浦敏晋他：秋季応物講演会 (2008) 2p-ZF-1.
- 15) 永田光次郎他：OPJ (2008) 5pP22.
- 16) 喜入朋宏他：OPJ (2008) 5pP25.
- 17) 萩原由紀他：春季応物講演会 (2008) 29a-ZB-17.
- 18) M. Kajima *et al.*: Opt. Express, **16** (2008) 1497.
- 19) 中田俊彦他：OPJ (2008) 6aC4.
- 20) 堀 泰明他：OPJ (2008) 6aC7.
- 21) 横地界斗他：OPJ (2008) 5aC1.
- 22) 黒田和明他：秋季物理講演会 (2008) 23aSF-5.
- 23) 新井宏二他：秋季物理講演会 (2008) 23aSF-7.
- 24) 野村孝徳：OPJ (2008) 6pBS1.
- 25) Y. Awatsuji *et al.*: Appl. Opt., **47** (2008) D183.
- 26) 片岡基史他：OPJ (2008) 5aC6.
- 27) K. Matsushima: Appl. Opt., **47** (2008) D110.
- 28) 岩村俊哉他：OPJ (2008) 5pP28.
- 29) 尾上真哉他：OPJ (2008) 5aE6.

## 10. 光情報処理

神戸大 仁田功一

### 10.1 概要

2008年、光情報処理分野において幅広い研究が報告された。本稿では、情報セキュリティー、デジタルホログラフィー、ビジュアルインターフェース、大容量記録・並列処理における研究の進展について述べる。また、2008年11月に淡路島夢舞台国際会議場にて、International Meeting on Information Photonics 2008 (IP 2008) が開催された。IP 2008では、光情報処理分野における国内外の最新の研究成果が多数報告され、活発な議論がなされた。

### 10.2 情報セキュリティー

情報セキュリティーに関連する研究は、視覚暗号、個人認証・識別応用に大別される。偏光式視覚複号型暗号では、複合に順序依存性を有する方法<sup>1)</sup>が提案されその有用性が実証されている。周期パターン視覚複合型暗号では、実用的な画像の潜在化法として、暗号画像の秘匿用画像への埋め込みの効果が検証され、その効果が示されている<sup>2)</sup>。

光相関に基づく画像識別では、動画像識別への応用が検討され、ホログラフィックメモリーを利用するシステムが開発されている<sup>3)</sup>。三次元散乱物体中の吸収情報を用いた情報秘匿システムでは、逆問題解析による再構成アルゴリズムの改良<sup>4)</sup>が報告されている。

### 10.3 デジタルホログラフィー

デジタルホログラフィーは、ホログラムをCCD等の固体撮像素子に記録する技術である。近年の撮像素子の高精細化やデジタル信号処理の進展により、計測光学や情

報フォトニクス分野で精力的に研究されている<sup>5)</sup>。OPJ 2008では、シンポジウム「デジタルホログラフィーの新展開」が開催された。このシンポジウムにおいて、光情報処理分野では、顕微鏡応用に関する報告<sup>6)</sup>および、光子レベルの微弱光照明下におけるデジタルホログラフィー<sup>7)</sup>が示された。

シングルショットで位相シフトデジタルホログラフィーを実現するための方法として、偏光イメージングカメラを用いる方式の実験的な検証<sup>8)</sup>や、参照光の位相を空間分割多重する方法の評価<sup>9)</sup>がなされている。また、計算機再生における対象物体の角度と位置の同時計測法<sup>10)</sup>や、位相シフトカラーデジタルホログラフィーの位相誤差解析<sup>11)</sup>などの実験結果が報告されている。

### 10.4 ビジュアルインターフェース

三次元情報の取得および表示のためのさまざまな手法や、評価方法が発表された。情報取得としては、複眼撮像装置のCMOSイメージセンサーの読み出しタイミングを考慮した高速な計測法<sup>12)</sup>や、light-in-flightホログラフィーによる動画像記録に適する記録材料の検討<sup>13,14)</sup>が報告されている。

三次元表示に関する研究では、観察不可視域が少なく、かつ大型化に適合する体積表示方式として、希土類鎖体を用いた平面投影方式<sup>15)</sup>が提案された。また、視差方式の立体ディスプレイにおける再現可能な奥行きと観察条件の最適化<sup>16)</sup>や、電子ホログラフィーにおける再生像の非点収差補正<sup>17)</sup>など、立体表示のための設計方法が提案されている。

画像の色再現では、多点計測スペクトル法を用いた分光反射率推定における計算量の低減<sup>18)</sup>、ディスプレイとインクジェット間の色再現補正<sup>19)</sup>等、多数の研究報告があった。

### 10.5 大容量ストレージ・並列演算

光ストレージでは、ホログラフィーに関連する報告が多数あった。ホログラムメモリーでは、クロストークを考慮した反射型ホログラフィックディスクメモリーの解析により、テラバイトメモリーとしての可能性が定量的に示された<sup>20)</sup>。広帯域光源を用いた体積型ホログラムにおいて、再生画像のクロストークノイズの影響とその改善策が検討されている<sup>21)</sup>。光暗号化法に基づく認証機能を有するホログラフィックメモリーの多重記録特性が実験的に評価されている<sup>22)</sup>。また、近接場相互作用とホログラフィーとの融合技術であるナノフォトニックホログラムでは、表面の電界強度分布を解析することにより多様な階層的性質が示された<sup>23)</sup>。

並列処理では、DNAのナノ構造を光信号で制御するこ

とによる光入出力ナノスケールオートマトンにおいて、同一の光信号に対して異なる状態遷移を導く反応スキームが考案され実証されている<sup>24)</sup>。また、光学干渉を用いた並列乗算剰余演算では、素因数分解に適用するためのシステムを試作し、並列処理の拡張が試みられている<sup>25)</sup>。

## 10.6 その他

薄型の複眼画像入力モジュールが口腔内三次元形状計測<sup>26)</sup>に応用されている。ホログラフィック光ツイスターのための空間光変調器の設計方法<sup>27)</sup>が報告されている。これらの事例は、光・電子融合システムや、計算機ホログラムなど、光情報処理の分野において蓄積された成果を新たな視点により発展させた研究である。今後、これらの研究が進展することと、多くの事例が提案されることが望まれる。

## 10.7 展望

情報セキュリティやデジタルホログラフィーでは、有望な実験結果や、簡便なデモンストレーションを含む成果の報告が多数あった。近年の光デバイスや画像機器の進展に立脚した研究が多いことが、これらの分野の特徴であるといえる。

ビジュアルインターフェースでは、三次元画像処理や色再現に関する手法が着実に進展しており、その評価方法も整備されつつある。実用化にむけて、多くの研究が成熟することが望まれる。

大容量ストレージ・並列演算では、各種アイデアや解析の有効性を実験レベルで検証する流れが定着している。しかしながら、大規模情報処理としての有用性を定量的かつ客観的に明示するという観点では、十分な状況とはいえない。この課題を解決することは、この分野を発展させるために不可欠であると考えられる。

光情報処理における研究発表を概観する。応用研究に関しては、有望な研究対象が提示され、さまざまな手法が提案され、また進展している。この状況は、数年前に比べ大きく変化しており、光情報処理研究の重要性が示すうえで非常に好転しているといえる。一方で、基礎研究や新規の概念等の提案が不足しているのではないかと感じている。長期的に考えると、基礎研究の成果を蓄積することも重要であり、今後で活発に研究されることが望まれる。

## 文献

- 1) 今川貴紀他：OPJ (2008) 4aE4.
- 2) 生源寺類他：OPJ (2008) 5pP14.
- 3) 市川友紀他：春季応物講演会 (2008) 28a-ZW-6.
- 4) 藤本公道他：秋季応物講演会 (2008) 3a-ZD-8.
- 5) 野村孝徳：OPJ (2008) 6pBS1.

- 6) B. Lee: OPJ (2008) 6pBS5.
- 7) 早崎芳夫：OPJ (2008) 6pBS6.
- 8) 鈴木裕之他：OPJ (2008) 5pP26.
- 9) 田原 樹他：OPJ (2008) 5aE7.
- 10) 岩村俊哉他：OPJ (2008) 5pP28.
- 11) 滝澤康裕他：OPJ (2008) 5pP29.
- 12) 清水浩貴他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-3.
- 13) 土佐和也他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-4.
- 14) 中島真一他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-5.
- 15) 貝野 彰他：秋季応物講演会 (2008) 27a-ZB-1.
- 16) 山口一樹他：レーザー学会年次大会 (2008) H1-31aI3.
- 17) 妹尾孝憲他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZW-7.
- 18) 村上百合他：春季応物講演会 (2008) 27a-ZB-6.
- 19) 植山智貴他：春季応物講演会 (2008) 27a-ZB-9.
- 20) 三浦雅人他：春季応物講演会 (2008) 28a-ZW-8.
- 21) 藤村隆史他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-16.
- 22) 鈴木靖人他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-15.
- 23) 堅 直也他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZW-1.
- 24) 酒井寛人他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-8.
- 25) 勝田信人他：秋季応物講演会 (2008) 4a-ZF-9.
- 26) 田邊浩之他：春季応物講演会 (2008) 28p-ZW-11.
- 27) 土井雄貴他：OPJ (2008) 5aE1.

## 11. 画像処理

日立中研 酒匂 裕

### 11.1 概要

ここでは、画像処理に関して概観する。画像処理の機能を大別すると、1) 画像情報を他の空間 (画像自体も含む) に変換する“射影”、2) その変換後の情報を用いてパターン認識などで対象物を抽出、計測、同定/分類する“認識”である<sup>1)</sup>。この分野の研究発表は、日本光学会より電子情報通信学会の論文誌などに多い。例えば、電子情報通信学会の和文論文誌 D (情報・システム) に 2008 年 (Vol. J91-D, No. 1~12) に掲載された画像処理に深く関連する論文数は 82 論文であり、やや強引に分類すると、1) に分類される論文は 20 件、2) に分類される論文は 62 件である。また、是非は別として、最近の傾向として、画像処理の具体的な“応用”を目的とした結果や成果が明確に説明できる研究が、基礎研究より多いことがうかがえる。以下、この“射影”“認識”そして“応用”に関して概説する。今回、調査した文献は、おもに、日本光学会の Optical Review (Vol. 15, No. 1~6) と前記の電子情報通信学会の和文論文誌 D (Vol. J91-D, No. 1~12) である。

### 11.2 射影

“射影”とは、光電変換などによるイメージング、劣化画像の画像復元や画像の超解像度化、情報圧縮のための符号化、セキュリティを目的とした暗号化、画像の特徴点の検出や特徴量の抽出などの総称である。光学的処理は、後段の“認識”機能よりも、この“射影”機能への貢献が

大きい。イメージングでは、例えば、液晶位相変調器による AO (adaptive optics) 技術を用いた眼底カメラ<sup>2)</sup>は、収差補正効果で高解像度の画像を提供する。超解像度化では、局所エリアの高周波と低周波特徴の関連を学習しておく方法<sup>3)</sup>が提案され、従来方式より原画に近い画像に復元できるようなる。暗号化では、On-axis のデジタルホログラフィーを用いた濃淡画像の暗号化方式<sup>4)</sup>が提案され、光学的に画像演算処理を並列に実行できる点で優位である。また、人間の視覚におけるカラー混合特性をうまく利用して、モニターから放出される電磁波による画像情報漏洩を抑制する方式<sup>5)</sup>も開発されている。特徴量の抽出では、人間の網膜構造と機能を模倣した CMOS のビジョンチップ<sup>6)</sup>は実時間で各種の画像微分演算を実現できる。このほか、画像のスケール変化や回転に不変な特徴量を記述することができる SIFT (scale-invariant feature transform) を利用した方式<sup>7)</sup>や、繰り返し計算で確からしい(尤度が高い)特徴点を選び出すことのできる粒子フィルターを利用した方式<sup>8)</sup>が活発に提案されている。以上、概観したように、光学的処理は、その並列性の優位性や分光特性などの高度利用で、この“射影”機能の発展に大いに貢献していると考えられる。

### 11.3 認識

“認識”は画像内の対象物の特徴量を評価して対象物を記述することであり、具体的には、対象物の分類・同定によるカテゴリーの決定、対象物の位置、大きさ、動き、距離などの計測を目的としている。分類・同定では、対象として、見え方や形状などに変動がある対象物、例えば、顔、人物像、動物像<sup>9)</sup>、挙動<sup>10)</sup>などの認識の研究が盛んである。また、識別器自体の研究では AdaBoost やサポートベクターマシン (SVM) が注目され、それを利用した認識方式の研究<sup>11,12)</sup>が活発である。AdaBoost は、識別精度の低い識別器を組み合わせることで精度のより高い複合識別器を作り出すブースティング方法のひとつである。計測では、多視点からステレオ視やレンジファインダーなどによって距離画像を取得して周囲の三次元環境を計測する研究<sup>13)</sup>、監視を目的とした人間の挙動を判別する研究<sup>10,12)</sup>が多い。光学的処理では、各画素のスペクトル特性を解析して微細組織の位置と同定を高精度に認識できる方式<sup>14)</sup>が報告されている。

### 11.4 応用

大別すると、半導体超微細パターンの外観検査装置<sup>15)</sup>に代表されるファクトリー自動化、文書解析<sup>16)</sup>、郵便区分機、銀行端末に代表されるオフィス・ホーム自動化、画像検索<sup>17)</sup>、監視システム<sup>18)</sup>、医用システム<sup>19)</sup>に代表されるソ

ーシャル・セキュリティー自動化への応用がある。近年の“安全、安心”や“環境保全”志向から、特に、外部からの脅威防止：監視、文化財保護<sup>20)</sup>、内部からの脅威防止：医用向け検査への応用がもっとも盛んである。

### 11.5 展望

時代の経過に伴い、画像処理の対象も平面から立体になり、画像も二次元 2 値から多値に、取得情報も対象物表面の濃淡情報、カラー情報、そして、距離情報などのマルチチャンネル情報が得られるようになった。X 線 CT, MRI, PET などの CT イメージング装置を使えば、立体対象物内部の特定物理量の三次元濃淡画像も得られる。また、近年の記憶装置の大容量化、データ転送や演算器の高速化、情報圧縮技術の高度化により、映像情報(時間軸を加えた三次元、四次元情報)の取得も容易になった。

基礎研究の分野では、このような背景化、画像処理の高度化の必要性がますます高まっている。高度化に向けては、1980 年代に AI 手法で画像そのものを理解しようとするアプローチがとられたがうまくいかず、それ以降、マルチチャンネル情報の取得とその情報を利用したアプローチに向かった。しかし、結局は、多くはなつたが限りある情報と限られた知識から画像を理解しないといけないという、基本的な問題が残されている。今後、この種の基礎研究が再度活発化されることを期待したい。

米国タンパで開催されたパターン認識国際学会 ICPR 2008 において、組み合わせ識別器に関する招待講演<sup>21)</sup>があり、講演後の質疑で、2 つの重要な質問があった。1) よりよい特徴量の決定と識別器の精度向上とではどちらが重要なのか、2) データベースの重要性はどうか。答えは対象とする問題に依存するが、実用化を目指した応用研究では、常に念頭においておくべき検討項目である。一般に、認識率とコストを重視する専用自動装置では、適切なイメージング装置とより早い段階での有効な特徴抽出が重要である。光学的処理は、問題解決に適切なイメージングとよい特徴量への高速“射影”の同時取得を追及できるので、実用に向けた画像処理の開発では非常に楽しみなアプローチとなってきた。

### 文 献

- 1) 高木幹雄他(監): 新編 画像解析ハンドブック (2004) ix.
- 2) T. Yamaguchi *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 173.
- 3) N. Suetake *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 26.
- 4) S. H. Jeon *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 181.
- 5) T. Watanabe *et al.*: Proc. Inform. Hiding (2008) 1.
- 6) J. S. Kong *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 269.
- 7) 中村友昭他: 信学会論文誌, **J91-D** (2008) 2507.
- 8) 西岡潔郁他: 信学会論文誌レター, **J91-D** (2008) 2029.

- 9) 影山勝彦他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 1305.
- 10) 鈴木直彦他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 1550.
- 11) 坂田幸辰他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 89.
- 12) K. Sudo *et al.*: IEICE TRANS., **E91-D** (2008) 1929.
- 13) 瀬古保次他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 2121.
- 14) K. Miyazawa *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 285.
- 15) 宮本 敦他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 1604.
- 16) 平野 敬他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 1406.
- 17) 大町真一郎他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 1561.
- 18) 川端 聡他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 110.
- 19) 仁木 登：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 1715.
- 20) 阪野貴彦他：信学会論文誌, **J91-D** (2008) 2089.
- 21) L. I. Kuncheva: ICPR (2008) ThPL2.

## 12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

NTT フォトニクス 井上靖之

ここではおもに光ファイバー通信用デバイスに関する2008年の技術動向について述べる。テレコム業界は、2000年以降のITバブル崩壊後の低迷から着実に立ち直り、アクセス系では日本のFTTH契約数が1,000万を超えて普及が進み、北米をはじめその動きは世界的に広がつつある。メトロ系ではROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexing) 等のフレキシブルなシステム採用が進み、コア系では無線技術を応用した40 Gb/s D(Q) PSK (差動(四値)位相変調)等の高速・大容量光通信技術の採用が進んだ。また、OIF (The Optical Networking Forum) にて100 Gb/sを目指したDP-QPSK (偏波多重四値位相変調)方式の検討が始まった。一方、データコム業界ではIEEEにて40 GbE/100 GbEの標準化が進んだ。これまで高速通信技術はテレコム用途が牽引してきたが、ついにデータコム用イーサネットの通信速度がテレコム用コア系システムと同程度になり、今後、高速通信技術を誰がどのように開発していくのか注目される。最近の学会の傾向は、光デバイスそのものを研究対象とした報告から光デバイスを利用したシステム実験の報告へとシフトしており、光通信用デバイスとよばれる研究分野が成熟しつつあることをうかがわせる。以下に、分野別のトピックスを概説する。

### 12.1 導波路デバイス

導波路分野では過去数年にわたりシリコンフォトニクスに注目が集まっている。これまでは要素回路の発表が多かったが、2008年は応用を目指した研究発表が目立った。例えば、CMOS上に送信用MZI (Mach-Zehnder interferometer) 変調器、光MUX/DEMUX回路 (multiplexer/demultiplexer)、制御回路、アンプを集積し、10 Gb/s×4 ch.のWDMトランシーバーが報告された<sup>1)</sup>。この報告にあるような光アクティブケーブルとよばれるデータコム用

の低コストトランシーバーが、シリコンフォトニクスのひとつの応用先になると予想される。一方で、シリコン導波路で作製した差動位相変調 (DPSK) 遅延干渉計に導波路型InP差動受信器をハイブリッド集積したDPSK受信器<sup>2)</sup>が報告されている。一般的に使用されているDPSK受信器に比べて大幅な小型化が図られており、将来の可能性を感じさせる報告である。毛色の違う発表としては、石英系プレーナー光波回路 (PLC) の一部にシリコン導波路を埋め込み、従来10 mWのスイッチ電力が0.6 mWにまで低減された<sup>3)</sup>。最近のグリーン化要求に合致した発表である。

新しいコンセプトとして、EDF (erbium doped fiber) アンプを構成するアイソレータ、波長多重 (WDM) フィルター、モニターフォトダイオード、スプリッター等の光部品を1つのPLC上に集積したPLCアンプが提案された<sup>4)</sup>。すべての機能を導波路で実現するのではなく、アイソレータは導波路端面にハイブリッド実装することで実現し、EDFはPLC外に接続するなど現実的なハイブリッド集積を行っており、今後の光部品の集積化のあり方を示したものとして注目される。

### 12.2 光源・光変調器

最近の傾向として、InPモノリシック集積回路を用いた送受信機の研究が活発化している。2008年も10 ch.の差動四値位相変調 (DQPSK) 変調器とDFB-LDおよびAWG-MUXが1チップ上に集積された送信機の報告がなされた<sup>5)</sup>。シリコン基板上にInPエピタキシャル膜を貼り合わせて構成したDFBシリコンエバネセントレーザ<sup>6)</sup>や、PLCリング共振器とDFB-LDをハイブリッド集積したCML (chirp-managed laser)<sup>7)</sup>は、異種材料のハイブリッド集積技術として興味深い報告である。これらの集積化デバイスは一部商用化されているものもあり、今後の適用領域の拡大が期待される。一方、無温調Al系EA/DFBレーザで25 Gb/s×4 ch.で100 km伝送<sup>8)</sup>、43 Gb/s動作<sup>9)</sup>などが報告されており、無温調レーザの着実な進展が高性能光源の基盤技術になっていることをうかがわせる。

近年、長距離大容量通信分野では、40 Gb/s用としてDQPSK変調方式が検討され、100 Gb/s用としてDPQPSK変調方式が精力的に検討されている。これは、光ファイバーの偏波分散が原因で伝送速度の高速化が困難になり、多値化や偏波多重により基本ビットレートを上げずに大容量伝送を実現しようとするアプローチである。これらの変調方式は偏波分散耐力に優れているが、代わりに光変調器が複雑になるという課題がある。この問題を解消するアプローチとして、LiNbO<sub>3</sub>位相変調器アレイと石英系PLCと

を端面接続して、高性能光変調器を実現する試みが報告されている<sup>10)</sup>。報告では、PLC上にカップラー、偏波変換器、偏波ビームカップラーを集積して、DPQPSK光変調器を実現している。今後も多値化や高度な変調方式の検討が進むことが予想されており、その実現手段として有効な技術である。

### 12.3 高速電子デバイス

40 Gb/s以上の高速化の研究に伴い、高速電子デバイスの重要性が一段と高まっている。特に、ビットレートが高まるにつれて、線路の分散が伝送のボトルネックになっている。その補償デバイスとして、電気的な分散補償デバイスであるEDC (electronic dispersion compensator) やコヒーレント受信用IC、OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 用ICの研究が進展している。また、10 G-PONや40 GbE/100 GbEを実現するのは、比較的低コストの電子デバイスによるところが大きい。今後の進展を期待したい。

### 12.4 展 望

FTTH等のアクセスのブロードバンド化により、通信トラフィックは、幹線だけでなくメトロ系においても増大している。そのため大容量でかつ経済的な光通信デバイスが求められていく。光デバイスとしては、「小型化」「経済化」「集積化」が大きな技術の流れである。その中で、既存技術の延長線だけでなく、飛躍したアイデアや研究成果が出てくることを期待したい。

### 文 献

- 1) P. De Dobbelaere *et al.*: *ECOC* (2008) Tu.3.C.1.
- 2) G. Unterborsch *et al.*: *ECOC* (2008) P.2.04.
- 3) R. Kasahara *et al.*: *ECOC* (2008) P.2.02.
- 4) M. Bolshtyansky *et al.*: *OFC* (2008) PDP17.
- 5) S. Corzin *et al.*: *OFC* (2008) PDP18.
- 6) A. W. Fang *et al.*: *OFC* (2008) PDP15.
- 7) Y. Yokoyama *et al.*: *ECOC* (2008) We.1.C.4.
- 8) S. Makino *et al.*: *OFC* (2008) PDP21.
- 9) H. Hayashi *et al.*: *ECOC* (2008) We.3.C.3.
- 10) H. Yamazaki *et al.*: *ECOC* (2008) Mo.3.C.1.

## 13. 光 通 信

古河電工 石川卓哉

### 13.1 概 要

光通信にかかわるシステム、デバイスに関して2008年の進展をまとめる。光通信システムに関しては、大容量化の次の手として、光の位相情報を用いた伝送システム、いわゆるコヒーレント光通信の復権が色濃くなってきたとい

えるであろう。波長多重 (wavelength division multiplexing: WDM) による大容量化が限界に近づきつつあるため、四値位相変調 (quadrature phase shift keying: QPSK) に代表されるような多値通信システムへと研究開発の興味が移ってきた。QPSKの一種である差動四値位相変調 (differential QPSK: DQPSK) はすでに実線路への導入がなされている。2008年はさらなる多値通信を目指した直交振幅変調 (quadrature amplitude modulation: QAM) 変調の報告が目立った。光通信のデバイスとしてはシステム動向を反映して多値変調/復調用のデバイス開発が盛んに報告され、従来の個別部品の組み合わせを用いたものから、ハイブリッド/モノリシック集積化へと進むトレンドが見受けられる。また、世の中全体の動きと呼応して、光通信システム/デバイスの分野でも省電力化の動きがみられるようになってきている。以下の節で、各々の動向を若干詳しく述べる。

### 13.2 光通信システム

光通信が実用化された当初は、光のオン/オフによるデジタル情報伝送が用いられていた。光という100 THz以上の非常に高い周波数の搬送波を用いていながら、その能力を十分に生かしきれていなかったわけである。光の位相情報を利用してデータを伝送するコヒーレント光通信は、1980年代後半には光通信のさらなる大容量化に 대응する本命技術と考えられていた。しかし、1990年代に光ファイバーアンプが実用化されたことにより、単なるオン/オフ信号を波長多重することによる大容量化、いわゆるWDMシステムが低コストで実現され、コヒーレント光通信は表舞台から消え去ってしまった。しかしながら、最近になってまたコヒーレント光通信が復権する兆しがみえてきている<sup>1)</sup>。これには2つの側面がある。1つは、基幹通信網のWDM化に限界が来たことである。光ファイバーアンプの帯域内に多重化できる波長数には限りがあり、これ以上の多重化は不可能な状況になってきた。伝送量をさらに増大させるためには、周波数利用効率を高めるしか方法がない。そこでQPSKをはじめとする多値伝送システムが再度検討されるようになってきている。これはコヒーレント光通信の技術にほかならない。2つ目の理由としては、メトロ/アクセスシステムやデータコムシステムと基幹通信網との伝送速度の垣根がほぼなくなり、どのシステムにおいても10 Gbps以上の高速伝送が用いられるようになってきていることである。データコムの代表的な規格であるイーサネットにおいても、100 G-Etherの規格の策定が進行中である<sup>2,3)</sup>。低コストが要求される領域においては、WDMシステムを新たに導入するよりは、1波

長において多値伝送を用いることにより等価的に伝送速度を上げたい要求が出てきている。このような2つの要求により、コヒーレント光システムが研究段階から徐々に導入検討へと進行している。多値伝送方式としては、QPSKのみならず、より周波数利用効率の高いQAMの検討が進んでいる<sup>4)</sup>。また、伝送路の分散などの特性を考慮して、信号を複数の副搬送波に分割して伝送する直交周波数分割多重 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) と組み合わせるアイデアも提案されている<sup>5)</sup>。最近のコヒーレント光通信のシステムは受信機側の構成に特徴がある。局部発振器を用いるホモダイン検波において、信号光との同期をデジタル信号処理 (digital signal processing: DSP) で行っていることが従来とは異なる。DSPにより、時間領域における波形歪み (分散、偏波モード分散によるもの)、および周波数領域における波形歪み (非線形光学効果による位相歪みによるもの) をすべて補正できるため、簡便なレシーバーが実現できるという特徴がある<sup>6,7)</sup>。このDSP技術は最近のコヒーレント光通信の復権をもたらした要因のひとつである。これらのシステムを実現するためには、以下に述べるデバイス開発が重要である。

### 13.3 光通信用デバイス

光通信用デバイスとしては、上述のシステムトレンドと合致してコヒーレント通信のデバイス開発が非常に盛んになってきている。最近のコヒーレント光通信はWDMとの組み合わせが多いため、波長可変光源は必要不可欠なコンポーネントである。高出力<sup>8)</sup>、広波長可変帯域<sup>9)</sup>、高速波長切り替え<sup>10)</sup>、狭スペクトル線幅<sup>11)</sup>、高波長安定性<sup>12)</sup>、ハイブリッド変調器集積<sup>13)</sup>、モノリシック変調器集積<sup>14)</sup>など、さまざまな機能を付与した波長可変光源の報告が盛んである。

コヒーレント通信の変調/復調に不可欠なデバイスとしては、マッハ・ツェンダー型の変調器があるが、多値変調のためには変調器を複数用いる必要があるため、単体の組み合わせでは広いスペースを必要とする。そこで、ハイブリッド集積を行うことにより小型化を目指した取り組みが目立ち始めている。組み合わせる要素としては、LiNbO<sub>3</sub>変調器<sup>15)</sup>、平面光波回路 (planer lightwave circuit: PLC) 導波路、Si 導波路、半導体位相変調器、半導体光増幅器 (semiconductor optical amplifier: SOA) などである。SOAは活性層として量子ドットを用いることが句である<sup>16,17)</sup>。ハイブリッド集積の例としては、LiNbO<sub>3</sub>変調器とPLC<sup>18)</sup>、PLCとSOA<sup>19)</sup>、Si導波路と半導体位相変調器<sup>20)</sup>、Si導波路とSOA<sup>21)</sup>などの報告例がある。

コヒーレント光通信に研究の目は向いているとはいっても、イーサネットなどのデータコムに対しては従来からのアプローチによるデバイス開発も絶え間なく継続されている。AlGaInAs系材料を用いた1300nmレーザーにおいて10-40G直接変調の高温アンクル動作<sup>22,23)</sup>、高速動作変調器集積型のレーザー<sup>24)</sup>、GaInAs基板を用いた高温特性レーザー<sup>25)</sup>などの報告がある。

狭義の光通信システムでは、信号の送り出しと受けのみを考えておけばよいが、実際のシステムでは複数の線路の繋ぎ目が存在し、そのノードでの効率的なスイッチングを行う必要がある。このためのデバイス開発も盛んである。SOAを用いたスイッチ<sup>26)</sup>やシリコンフォトリソグラフィ<sup>27)</sup>の報告が盛んである。

### 13.4 省電力化

近年のIT技術の進展には目を見張るものがあるが、それに伴って消費電力も飛躍的に増加している。このトレンドが続くと、IT分野の消費電力は2025年には現在の5倍となり全消費電力の20%を占めるまでになると予想されている。この消費電力を低減させるという切り口の報告も目立つようになってきている<sup>28,29)</sup>。そのひとつは、短距離のデータ伝送領域への光インターコネクションの導入である。データセンター内部では主として電気伝送が用いられているが、10Gbpsを超える高速な伝送では高い消費電力を必要としており、光インターコネクションを導入することでトータルとして消費電力を抑える可能性の議論が出てきた。その光源として面発光レーザー (vertical cavity surface emitting laser: VCSEL) アレイを用いる試みが報告されている<sup>30)</sup>。

### 13.5 将来への展望

以上、2008年の光通信システムとそのデバイスの動向を簡単に振り返った。通信容量の増大に対応して導入されてきたWDM技術が限界に近づき、WDM技術と組み合わせたコヒーレント光通信の復権が強く印象付けられた年であったといえる。このシステムを実現するためには高性能の光デバイス開発が不可欠であるが、単体のデバイスの組み合わせではなくさまざまな高機能デバイスを省スペースで組み合わせたハイブリッド集積や、半導体によるモノリシック集積などの報告が盛んであった。また、「地球にやさしく」という世の中の動きと呼応して、省電力に着目したグリーンITの方向性も明確になったといえる。

## 文 献

- 1) K. Kikuchi: *ECOC* (2008) Th.2.A.2.
- 2) S. Kobayashi: *PS* (2008) WS1-1.

- 3) 村上泰典：信学会ソサイエティ大会 (2008) BCS2-6.
- 4) M. Yoshida *et al.*: *ECOC* (2008) Mo.4.D.5.
- 5) M. Nakazawa: *ECOC* (2008) Tu.1.E.1.
- 6) S. Savor: *ECOC* (2008) Mo.3.D.1.
- 7) J. Sitch: *ECOC* (2008) Th.1.A.1.
- 8) A. Ward: *ISLC* (2008) WB3.
- 9) T. Okamoto: *ISLC* (2008) WB6.
- 10) H. Arimoto: *ISLC* (2008) WB4.
- 11) H. Ishii: *ISLC* (2008) WB5.
- 12) N. Nunoya: *ISLC* (2008) WB1.
- 13) 保井孝子他：信学会ソサイエティ大会 (2008) C-4-7.
- 14) R. Nagarajan *et al.*: *ISLC* (2008) MA3.
- 15) 川西哲也他：信学会ソサイエティ大会 (2008) BCS2-2.
- 16) R. Brenot *et al.*: *OFC* (2008) OTuC1.
- 17) S. Grubb *et al.*: *OFC* (2008) OTuN1.
- 18) T. Yamada *et al.*: *OFC* (2008) OThC3.
- 19) G. Maxwell: *OFC* (2008) OWI3.
- 20) Y.H. Kuo *et al.*: *OFC* (2008) OThC1.
- 21) R. Jones *et al.*: *OFC* (2008) OWM1.
- 22) 大坪孝二他：秋季応物講演会 (2008) 2p-P3-10.
- 23) 小林隆二他：信学会ソサイエティ大会 (2008) C-4-1.
- 24) 高橋博之他：秋季応物講演会 (2008) 2p-P3-13.
- 25) 荒井昌和他：秋季応物講演会 (2008) 2p-P3-9.
- 26) Y. Kai *et al.*: *ECOC* (2008) Tu.2.D.4.
- 27) M. Lipson: *PS* (2008) D-02-1.
- 28) 瀧口 透他：信学会ソサイエティ大会 (2008) CS-6-3.
- 29) 原井洋明：信学会ソサイエティ大会 (2008) BS-13-6.
- 30) K. Takaki *et al.*: *ISLC* (2008) PD1.

## 14. 光 記 録

NHK 徳丸春樹

### 14.1 概 要

2008年は、HD-DVDとBlu-ray disc (BD)の次世代DVD規格争いが終わり、BD市場が本格化してきた。デジタル放送によるハイビジョンの普及、大画面薄型テレビの普及、北京オリンピックの開催もあり、11月には初めてBDレコーダーの販売台数がDVDレコーダーを上回った。50GB (記録層2層タイプ、BD1層25GB×2=50GB)の記録容量をもち、転送レートが追記型で8倍速度 (BD1倍速度36Mbps×8=288Mbps)のBDが製品化された。

一方、2008年の光メモリーの研究開発に関する報告は、光メモリーに関する最大の国際会議であるISOM (International Symposium on Optical Memory)とODS (Optical Data Storage)が7月に共催したISOM/ODS '08に集約されている。その中では、BD技術の進展とポストBDの次世代技術であるホログラム記録、SIL (solid immersion lens) 記録、三次元記録などの研究が報告された。以下、ISOM/ODS '08での発表を中心に、光記録の2008年の研究開発の進展について報告する。

### 14.2 BD技術の進展

記録層の多層化による大容量化の研究が進んだ。多層構

造ディスクの光吸収ロスおよび層間クロストーク光を減らすことにより、記録層を16層に増やし、400GB (25GB×16)のROMディスクを実現した<sup>1)</sup>。この報告はISOM/ODS '08のベストペーパーに選ばれ、9月末のシーテックジャパンで実演展示された。記録層の上に超解像効果を有するZnO膜を形成し、80GBの容量 (2層ROM)で実用的なバイト誤り率を得た<sup>2)</sup>。記録できるタイプでは、信号処理の工夫により1層あたり40GBに高密度化し5層化することにより、200GBの記録容量を可能にした<sup>3)</sup>。

多層記録方式では、再生時に反射光が激減し再生信号のS/N比が低下する。ホモダイン検出方式を導入することにより、BD-Rディスクの信号振幅を従来法に比べて3.6倍増強した<sup>4)</sup>。レーザーの戻り光ノイズをなくするための高周波重畳波をホールドしてS/N比の改善を図る方式をモデル化、光検出器に必要な帯域幅などを明らかにした<sup>5)</sup>。デバイスでは、BD4層ディスクに12倍速度で記録可能な450mWの高出力青紫色半導体レーザーが開発された<sup>6)</sup>。また、微細構造を施し1個のアクチュエーターで多層光ディスクの各記録層へのレーザー光の球面収差を補正できるミラーが提案された<sup>7)</sup>。これもISOM/ODS '08の賞に輝いた。

高転送レート化のために、安定化機構を利用しディスク回転時の振動を抑え、高速回転を図る技術が進んだ。ディスクを狭いカートリッジ中に納め、カートリッジを安定化機構として利用し20000rpmの高速回転を実現した<sup>8)</sup>。厚さ0.1mm (現状の1/12)と薄くしたディスクを安定化板に近接させ、15000rpmで回転させ高速の記録再生を実現した<sup>9)</sup>。薄型光ディスクはカートリッジ中に複数枚スタックすることにより、テラバイト級の大容量光ディスクが構成できる。

### 14.3 次世代光記録技術

2015年ごろまでに記録容量1TB、転送速度1Gbpsを達成する次世代光メモリー技術のロードマップ<sup>10)</sup>がISOM '06で発表されている。その目標に向けて、ホログラム記録ではおもにコリニア (collinear, 別名コアキシャル: co-axial)方式とポリトピック (polytopic)方式の2方式が研究開発されている。コリニア方式に関してはISOM '07で270Gbit/inch<sup>2</sup> (バイト誤り率10%)の報告<sup>11)</sup>がなされたが、今回は記録密度に関する進展の報告はなかった。しかし、コヒーレント加算を用いたホログラム記録チャンネルの線形化<sup>12)</sup>などの要素技術が着実に進んだ。ポリトピック方式によりすでに商品化のアナウンスをしている企業からは、ホログラム記録で課題といわれている温度、振動、記録媒体などの各種変動に対するの対策を紹介

し、実用的なマージンを確保しているとの報告<sup>13)</sup>があった。また、前節で述べたホモダイン検出方式をホログラム記録への適用するための新しいアルゴリズムが提案された<sup>14)</sup>。デバイスでは、記録媒体の温度変動による特性劣化を補償するため、6 nm にわたり発振波長を変化させることが可能な 45 mW 出力の青紫色可変波長外部共振レーザー<sup>15)</sup>が報告された。

SIL を用いた記録技術では、記録媒体と光ヘッドの間隔を 50 nm 以下に接近させる必要がある。そのため、記録媒体のトップコートの検討が進んだ。NA=1.84 の SIL には、その屈折率は 1.95 以上必要なこと、1 μm 厚のコートがヘッドとの衝突で十分な実用性を有することを示した<sup>16)</sup>。LDPC (low-density parity-check code) 等の信号処理の適用により 109 Gbit/inch<sup>2</sup> (151 GB 相当) の記録密度を達成した<sup>17)</sup>。また、書き換え型の相変化記録材料を用いて 2 層記録媒体への記録再生を実現した<sup>18)</sup>。SIL 記録はこれまでの光ディスクの高密度化技術の延長線上にあるため、BD との互換性を考慮した光ヘッド光学系の設計に関する報告<sup>19)</sup>があった。

前述した BD 多層を除いた三次元多層記録には、マイクロホログラム記録方式と二光子吸収方式が研究開発されている。マイクロホログラム記録方式に関しては、ディスク中の記録マークから直接トラッキング信号を検出し信号再生する方式<sup>20)</sup>や、可動部分を少なくし信頼性を上げるために液晶素子を用いて電氣的にビーム制御して三次元記録する方式<sup>21)</sup>が提案された。二光子吸収方式では、フォトクロミック化合物を用いた記録材料を開発し、深さ方向に 5 μm 間隔で 200 層にわたり記録しディスク 1 枚に 1 TB を記録したとの報告<sup>22)</sup>があった。再生 S/N 比が低い、記録速度が遅い、装置が大掛かりなど、まだ実用化には課題が多い。

#### 14.4 展 望

これまで光メモリーは、音楽用の CD、テレビ・映画用の DVD、そしてハイビジョン・映画用の BD とオーディオ・ビデオ (AV) の進化のもと、その配布媒体、記録媒体として発展してきた。今後も、4K、8K (スーパーハイビジョン)、3D 映像といった AV の進化に沿った発展が考えられる。もうひとつの発展方向として、家庭でのデジタルカメラやビデオカメラの普及、オフィスでのデジタルデータの急増による家庭、オフィスでの情報量の爆発的増加に呼応したアーカイブ用のメモリーがある。しかし、インターネット、インターネット・ストレージ、フラッシュメモリー、データテープなど競合技術は多い。グリーン IT、省エネルギー、省資源、安全・安心といった時

代の要請、求められるメモリーとしての性能要求にいかに応えていけるかが光メモリーの今後の発展を決める。光メモリーの特徴である長寿命、省エネルギー、高信頼性、低コストは時代の要請にふさわしいものである。本稿で紹介した技術が新たな魅力も加え、次のアプリケーションへと結実することを期待したい。

## 文 献

- 1) A. Mitsumori *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) MB2.
- 2) H. Yamada *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TD05-153.
- 3) K. Lee *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TuA2.
- 4) T. Kurokawa *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) ThA1.
- 5) A. Kikukawa *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) ThA6.
- 6) 日経エレクトロニクス, 2008 年 11 月 3 日号, 14.
- 7) S. Aoki *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TuB2.
- 8) T. Mukasa *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TuA3.
- 9) D. Koide *et al.*: *APDSC* (2008) C-05.
- 10) <http://www.isom.jp/>
- 11) K. Tanaka *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008) 5891.
- 12) M. Hara *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) ThB1.
- 13) K. E. Anderson *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) ThB5.
- 14) M. R. Ayres *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) ThB2.
- 15) M. Omori *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TD05-154.
- 16) A. Nakaoki *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TuA4.
- 17) A. Nakaoki *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TD05-151.
- 18) M. Birukawa *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TD05-152.
- 19) H. Choi *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) TuP32.
- 20) H. Miyamoto *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) MB4.
- 21) R. Katayama *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) MB6.
- 22) E. P. Walker *et al.*: *ISOM/ODS* (2008) MB1.

## 15. 視 覚 光 学

東北大 松宮一道

### 15.1 概 要

外界からの光情報が眼球の網膜を通して脳に伝達され、その光情報は脳内で処理され視知覚を生起させる。これまでの視覚研究は、視覚系が多く情報を含む外界からどのような情報を抽出して、ある特定の知覚を生起させるのかを明らかにしてきた。近年では、視覚の研究対象が視知覚だけでなく、視覚に基づいた行動制御、他感覚情報との統合、意識 (視覚的気づき) といった研究が盛んに行われるようになってきた。これらの研究分野は 2008 年にアジア・オセアニア圏で開催された国際学会においても盛り上がりを見せていた。ブリスベンで開催された Asia-Pacific Conference on Vision では、視覚と行動に関するシンポジウムなどが行われた。また、台北で開催された The 12th Annual Meeting of the Association for the Scientific Studies of Consciousness では、視覚的気づきなどのシンポジウムが行われ、視覚研究で著名な日本人研究者の招待



講演も行われた。

また、国内では、視覚研究が感性工学との融合をめざす方向性が打ち出され、新たな局面を迎えつつある。臨場感などの高度感性情報を研究の対象とすることは、視覚光学の応用分野のひとつとして今後大きく発展していくことが期待される。また、第1回色覚基礎研究会が東京で開催され、応用的な展開だけでなく、視覚光学の基礎分野においても充実した年であった。

## 15.2 眼球運動時の視覚、視覚と行動

跳躍眼球運動（サッカード）時に網膜像の動きが知覚されないことが知られており、これはサッカード抑制とよばれている。サッカード抑制により、脳内の外側膝状体の大細胞経路によって伝達される情報が選択的に抑制されると考えられている。このサッカード抑制とは別に、サッカード眼球運動時に2つのフラッシュ刺激をある時間間隔において呈示すると、観察者は実際の時間間隔よりも過小評価することが近年報告されたが、この現象がサッカード抑制と関連性があるのか否かはよくわかっていなかった。寺尾らは、サッカード眼球運動時の時間間隔知覚が刺激の見えに依存していることを報告し、サッカード抑制による視覚応答の減少が時間間隔知覚に寄与していることを示唆した<sup>1)</sup>。

時間周波数が臨界ちらつき頻度を越えた正弦波縞模様にもかかわらず、追跡眼球運動を行うとその縞模様が見えることが報告された。この現象を利用すると、自覚されない眼球運動を縞模様の可視化という尺度で自覚的にモニターできるため、さまざまな応用可能性が示された<sup>2)</sup>。

われわれは三次元空間内で運動物体がどこに向かって動き、どのくらいの時間である位置に到達するのかを見積もることができる。このような視覚機能はわれわれの行動の判断において重要である。自動車運転時の右折判断において、視覚系は対向車が自車を通過するまでの時間と自車が道路を横断するのに要する時間を比較する機構をもつことが報告され、視対象の接近時間の推定には自己身体の移動時間の推定も考慮されている可能性が指摘された<sup>3)</sup>。

## 15.3 異種感覚統合

重力方向知覚における視覚情報と前庭系情報の統合過程において、条件に依存して視覚刺激の寄与率が変化することが見出され、重力方向知覚の異種感覚情報統合モデルが提案された<sup>4)</sup>。視覚における奥行き知覚において、奥行き手がかりを重み付け線形加算する統合モデルが提案されているが、重力方向知覚においては、このモデルとは異なり、非線形なモデルが提案された。

観察者の頭部運動が物体の光沢感を強めることが報告さ

れた<sup>5)</sup>。観察者が環境内で移動することによる静止物体の知覚への影響は、近年、国外の研究グループからも報告されている。

触覚二点弁別課題において、視覚的に自己身体を拡大することで触覚の弁別感度が向上し、この現象は単に自己身体が拡大されることが感度の向上を誘発するのではなく、拡大されても自己の身体であるという認識が感度向上に寄与することが報告された<sup>6)</sup>。

手の運動による触運動感覚が運動視に影響を与えることが報告された<sup>7)</sup>。視覚刺激と触運動感覚刺激の運動速度、運動方向、空間位置が一致するときに運動残効の持続時間が増大することが示され、視覚情報と触覚情報の統合により脳内の動きの信号が増強することが示唆された。

聴覚刺激の呈示時間の長さが視覚情報による呈示時間の長さの知覚に影響を与えることが報告され、視聴覚間の時間的捕捉における刺激強度の時間微分値対応仮説が提示された<sup>8)</sup>。

上記で述べた研究は感性情報である臨場感の創出と関連があり、今後の発展が期待される研究テーマのひとつである。

## 15.4 意識・無意識

視覚探索課題において、空間配置が繰り返し呈示されると、たとえ被験者が意識的に再認できなくても、繰り返し呈示された空間配置に対してターゲット検出が早くなることが知られている。このような無意識的な学習が意識的な学習とどのように異なるのかが、視覚探索時の眼球運動の分析により検討された<sup>9)</sup>。

色縞刺激による両眼視野闘争時の見えが先行刺激を呈示することによって変調されることが報告され、この現象には色や方位などの複数の抑制過程が関与していることが示唆された<sup>10)</sup>。

図地解釈の知覚的な反転タイミングが、眼球運動によって予測できることが報告され、視野闘争などの被験者の主観的判断に依存する実験において客観的な指標を提供できる新しい実験手法が提案された<sup>11)</sup>。

中心領域に曖昧運動刺激を、周辺領域に一定方向に動く運動刺激を呈示すると、中心領域の刺激が周辺領域と逆方向に動いて見える（運動対比効果）。周辺領域の動きが意識に上らないときでも運動対比効果が生じることが報告された<sup>12)</sup>。

水平線分を並べて斜め方位の主観的輪郭を作り、その水平線分を水平方向に動かすと、主観的輪郭の動きと水平線分の動きが知覚的に交替することが報告された<sup>13)</sup>。

視覚意識と低次視覚野の活動の関係が調査された。一方

の目にフラッシュ刺激を、もう一方の目に回転刺激を呈示し、回転刺激の意識状態と脳活動が測定された。その結果、低次視覚野が視対象の意識表象の形成と意識状態の切り替わりの両方に関与することが示唆された<sup>14)</sup>。

### 15.5 その他

運動物体によって視空間が不均一に歪められ、そのダイナミクスが報告された<sup>15)</sup>。図と背景を切り分ける際の境界帰属の問題において、視覚的注意が境界帰属に影響を与えることが報告され、図と背景が反転してしまう曖昧図形における注意の寄与が示唆された<sup>16)</sup>。両眼視差検出機構に関して、両眼間においてコントラストを反転させた anticorrelated random-dot ステレオグラムを呈示しても、周辺に相関のある random-dot ステレオグラムが呈示されると奥行き弁別が可能であることが報告され、この心理現象は視差検出モデルで説明できることが示された<sup>17)</sup>。fMRI を用いた脳活動計測による研究において、運動刺激による三次元構造復元の知覚に関与する脳内部位が明らかにされた<sup>18)</sup>。両眼立体視による奥行き検出感度が、両眼視差だけでなく、動き、色、傾きといった特徴が同じである面が左右眼に呈示されたときに感度が高くなることが報告された<sup>19)</sup>。画像処理によってぼけ分布を付加した写真は、撮影対象がミニチュアのように見えるという現象があり、この現象と絶対距離知覚の関係が調べられた<sup>20)</sup>。刺激サイズ、輝度の変化によって、知覚される奥行き運動の運動振幅が変化することが報告された<sup>21)</sup>。

### 15.6 展望

視覚研究は、バーチャルリアリティ技術やイメージング技術を利用することで、高次機能の解明へと向かいつつある。それと同時に、高度感性情報の呈示技術に関連した視覚研究が、今後は増していくと思われる。これらの研究課題には実環境に近い条件下での実験が必要とされるものが多くあり、これまでの視覚光学の基礎的な知見との橋渡しが必要になると思われる。

## 文献

- 1) M. Terao *et al.*: Nat. Neurosci., **11** (2008) 541.
- 2) 村上郁也他: Vision, **20** (2008) 121.
- 3) K. Matsumiya *et al.*: Opt. Rev., **15** (2008) 133.
- 4) 根岸一平他: 視覚学会夏季大会 (2008) O18.
- 5) 坂野雄一他: 視覚学会夏季大会 (2008) O19.
- 6) 渡邊淳司他: 視覚学会冬季大会 (2008) 3o3.
- 7) 松宮一道他: 感性工学会大会 (2008) 22E-04.
- 8) 山口泰優他: Vision, **20** (2008) 109.
- 9) T. Mano *et al.*: ASSC (2008) S20.
- 10) 阿部 悟他: Vision, **20** (2008) 97.
- 11) 林 隆介他: 視覚学会夏季大会 (2008) O 21.
- 12) 河邊隆寛他: 視覚学会夏季大会 (2008) O 7.

- 13) 花田光彦: 視覚学会夏季大会 (2008) O 5.
- 14) 山城博幸他: 視覚学会夏季大会 (2008) O 15.
- 15) K. Watanabe *et al.*: J. Vision, **8**, No. 3 (2008) 13:1.
- 16) N. Wagatsuma *et al.*: J. Vision, **8**, No. 7 (2008) 22:1.
- 17) S. Tanabe *et al.*: J. Vision, **8**, No. 3 (2008) 22:1.
- 18) T. Yamamoto *et al.*: J. Vision, **8**, No. 10 (2008) 14:1.
- 19) 塩入 諭: 視覚学会夏季大会 (2008) O11.
- 20) 南 明宏他: 視覚学会夏季大会 (2008) O12.
- 21) 棚橋重仁他: 視覚学会夏季大会 (2008) O8.

## 16. 光源・測光・照明

愛媛大 神野雅文

### 16.1 光源と照明業界の概況<sup>1)</sup>

1878年のスワンによる白熱電球の発明が燃焼系から電気系という光源の第一の変革、1926年のゲルマーらによる水銀蛍光ランプの発明による放電光源の実用化という第二の変革をもたらし、近年の白色LEDの輝度・効率の向上は、固体発光光源の一般照明用途への利用を現実のものとしつつある。他方、人類の経済活動の急激な拡大はCO<sub>2</sub>の排出規制という形でエネルギー消費の抑制を強いることとなった。照明も例外ではなく、洞爺湖サミット初日に環境省主催で「あかりから考える地球温暖化」国際シンポジウムが開催されるなど、省エネルギーの観点からの照明への関心は高まっており、先進諸国と同様日本においても大手の光源メーカーが2010年から白熱電球の製造を停止することを発表する<sup>2)</sup>など、2008年には一般照明用途での白熱電球の使用を制限する動きが本格化した。

これまで前年比+5~8%と順調に拡大してきた照明市場であるが、2007年にはすでに転機を迎えていたように思われる。照明製品の国内販売額は光源4400億円、照明器具8900億円の合計1兆3300億円の見込みであるが、市場の牽引役はこれまでの液晶バックライトから自動車用の光源に移っており、光源の販売額は前年比-6.7%と市場は縮小をみせはじめている。しかし、その中で電球形蛍光ランプは前年比+12%の伸びをみせており、ここにも、エネルギー消費の抑制に対する社会的な意識の高まりをみることができる。

以下、光源、測光、照明の技術動向について述べる。

### 16.2 光源

電球からの置き換えの主力と期待されている電球形蛍光ランプについては、その最大の弱点である低温点灯時の高速立ち上がり特性を内部に電球を併設することで改善し、5°Cでの光束立ち上がりが25°Cと同等になるという解決法が報告された<sup>3)</sup>。また、発光管の形状をフラット化してGX53口金を採用することで、多様な器具展開を可能にし

たコンパクト型蛍光ランプ<sup>4)</sup>や、青色蛍光体の光束維持率を改善することでランプ点灯初期の投入電力を削減し、ランプ寿命を通しての省エネルギーを実現したランプ<sup>5)</sup>、平面スパイラルランプの高出力化<sup>6)</sup>などが報告されている。

無水銀蛍光ランプの研究では、キセノン蛍光ランプの発光特性の依存性<sup>7)</sup>、キセノン-ネオン蛍光ランプの電気特性と輝度特性<sup>8)</sup>などが報告されている。また、キセノン蛍光ランプにおいて価格の高い原料であるキセノンを、製造工程において回収するシステムについての報告がなされた<sup>9)</sup>。

高輝度放電灯 (HID ランプ) については、アルミナセラミック発光管に適した Dy-Ho-Tl-Na-I 系封入物を使用することで、150 W クラスで 5500 K の「昼白色」のセラミックメタルハイドランプが実現できたこと<sup>10)</sup>や、ランプ、回路、器具を最適化することで、130 lm/W の高効率と  $Ra=80$  の高演色を達成した 145 W のメタルハイドランプ<sup>11)</sup>の報告がなされた。また、アンテナ励起型のマイクロ波放電ランプについても報告がなされた<sup>12)</sup>。

無電極ランプについては、Ar の ICP ランプの温度特性<sup>13)</sup>、50% 調光の無電極蛍光ランプ<sup>14)</sup>についての報告があった。

LED のチップについては、高出力型で 134 lm/W、小出力型で 169 lm/W の発光効率が報告されている<sup>15)</sup>。また、電球相当で 40 W、60 W、100 W の各クラス相当の LED ダウンライトが大手光源メーカーから発売され、有機 LED (OLED) についても照明ユニットが見本市で展示されるなど、固体光源については実用化が着実に進んでいる。

### 16.3 測 光

照度応答標準の確立のために、照度応答度校正の不確かさの評価についての報告<sup>16)</sup>や、極低温放射の分光応答度について校正装置が開発されその評価結果についての報告がなされた<sup>17)</sup>。また、波長 1600 nm までの分光拡散反射率標準が確立され (0.48% から 0.54% の相対拡張不確かさ [ $k=2$ ])<sup>18)</sup>、脳や皮下診断などの無侵襲計測や食品・農産物などの非破壊検査、植生評価リモートセンシングなどの分野への応用が期待される。

近年の LED の性能改善に伴い、その光学的特性の評価手法の確立の必要性が高まっており、LED の色度測定の不確かさの評価がなされ、色度測定の不確かさの最も大きな要因は分光器のスリット幅であることが明らかにされた<sup>19)</sup>。また、半球光束計を使用した LED の全光束測定方法が提案され、全球光束計を用いた場合と遜色のない結果が得られることが報告される<sup>20)</sup>など、今後の LED の規格

化、標準化が進むと期待される。

### 16.4 照 明

近年の LED の高性能化により、大手照明メーカーから LED ダウンライトが発売されるなど、着実に照明用途での普及が進んでいる。2007 年 11 月に白色 LED の国際会議 (WLEDs 07) が日本で開催され、2008 年 5 月には照明学会が Journal of Light and Visual Environment で WLEDs 07 特集号<sup>21)</sup>を発行するなど、学術面でも固体照明分野は活況である。

LED の特徴のひとつは寿命が長いことであるが、実用にあたってはその寿命を正しく知る必要があるにもかかわらず、長寿命ゆえにその定量化は容易ではない。そのため、LED の湿度による色度変化寿命の推定方法<sup>22)</sup>や、寿命に大きな影響を与えるモールド樹脂の開発<sup>23)</sup>、調光制御による LED 照明灯の長寿命化技術<sup>24)</sup>などが報告されている。また LED の高速応答性と人間の視覚特性を利用して実効的な輝度を向上させる手法<sup>25)</sup>について報告がなされている。

近年、青色光に防犯効果があるとして、自治体が青色防犯灯を導入する動きがあり、テレビや新聞等のマスメディアで肯定的に取り上げられることが多いが、これに対する学術的な検証も進み、2007 年 7 月には照明学会関西支部主催でシンポジウム「青色防犯照明を含む防犯照明の現状と課題」が開催され<sup>26,27)</sup>、現在の青色照明に防犯効果があるという考えはメディアが無検証で流した情報によるところが大きく、現時点では防犯効果を肯定する科学的材料はないという認識になっている。

### 文 献

- 1) 日本電球工業会：電球類年間生産・販売統計〔平成 15 年～19 年 (2003 年～2007 年)〕(2008) <http://www.jelma.or.jp/03tokei/pdf/statistics01-07.pdf>
- 2) 東芝ライテック：プレスリリース (4 月 14 日) (2008) <http://www.tlt.co.jp/tlt/topix/press/p080414/p080414.htm>
- 3) 高橋暁良他：照明学会全国大会 (2008) p. 49.
- 4) 大野鉄也他：照明学会全国大会 (2008) p. 50.
- 5) 森 利雄他：照明学会全国大会 (2008) p. 48.
- 6) 関 勝志他：照明学会全国大会 (2008) p. 51.
- 7) 竹田征史：照明学会全国大会 (2008) p. 42.
- 8) K.-C. Lee 他：照明学会全国大会 (2008) p. 40.
- 9) 矢野英寿他：照明学会全国大会 (2008) p. 43.
- 10) 原口昇他：照明学会全国大会 (2008) p. 59.
- 11) 宇佐美朋和他：照明学会全国大会 (2008) p. 60.
- 12) 神藤正士：応用物理, **77** (2008) 367.
- 13) 武田拓也他：照明学会全国大会 (2008) p. 56.
- 14) 都築佳典他：照明学会全国大会 (2008) p. 57.
- 15) Y. Natsukawa *et al.*: ICNS-7 (2007) V1.
- 16) 木下健一他：照明学会全国大会 (2008) p. 209.
- 17) 市野善朗他：照明学会全国大会 (2008) p. 211.
- 18) 部 洋司他：照明学会全国大会 (2008) p. 212.

- 19) 神門賢二他：照明学会全国大会 (2008) p. 213.
- 20) 三島俊介他：照明学会全国大会 (2008) p. 214.
- 21) 照明学会：J. Light Vis. Environ., **32**, No. 2 (2008).
- 22) 藤野崇史他：照明学会全国大会 (2008) p. 195.
- 23) 小谷勇人他：照明学会全国大会 (2008) p. 196.
- 24) 斎 尚樹他：照明学会全国大会 (2008) p. 197.
- 25) 森田圭司他：照明学会全国大会 (2008) p. 132.
- 26) 照明学会関西支部：「青色防犯照明を含む防犯照明の現状と課題」シンポジウム報告 (2008) <http://www.ieij.or.jp/shibu/kansai/info2008/080714symposium.html>
- 27) 照明学会誌：特集「防犯照明と青色光照明」, **92** (2008) 620.

## 17. 医学・生物応用光学

東北大 木村康男・平野愛弓

### 17.1 概 要

2008 年は、下村教授 (米ボストン大学医学校名誉教授) が「緑色蛍光たんぱく質 (GFP; green fluorescent protein) の発見と開発」という受賞理由でノーベル化学賞受賞を受賞され、蛍光イメージングをはじめとするバイオイメーキング技術が生命科学の分野において大きな役割を果たしていることが改めて確認された年であった。そして、その技術は 1 分子蛍光イメージング技術へと発展しており、さまざまな生体分子の細胞内での挙動が解析されている。春季および秋季応物講演会においては、生体・医用光学関係の発表が合わせて 56 件なされ、拡散光計測技術の機能化や蛍光像の高感度化、高空間分解能化などに関心が集まっている。また、色覚・色彩関係の発表も 5 件なされ、人間の高次の視覚情報処理にかかわる照明器具等の感性的な効果等についての基礎的、応用的な発表が行われた。

### 17.2 各 論

FRET (fluorescence resonance energy transfer) 等の蛍光イメージング関係では、高分解能化のための研究が進展しており、局所プラズモン共鳴による蛍光増感測定<sup>1)</sup> や飽和励起を用いた蛍光像の高空間分解能化<sup>2)</sup> が試みられている。蛍光イメージング技術による生化学分野での進展としては、GFP の誘導体を用いた FRET プローブたんぱく質を設計することにより、神経シナプスのような局所空間に放出される神経伝達物質グルタミン酸をシナプスのその場で可視化しようとした報告例<sup>3)</sup> などが挙げられる。また、リボソームによるたんぱく質の翻訳過程を、GFP を用いた 1 分子イメージング法を用いて解析しようとする試み<sup>4)</sup> も報告されている。

OCT (optical coherence tomography) 関連では、生体アブレーションの実時間 OCT イメージング<sup>5)</sup> や高精度スーパーコンティニューム光源の開発を用いた超高分解能 OCT<sup>6)</sup> など高精度、高分解能、高速 OCT の研究が盛んで

ある。また、機能化や複合化の研究も進展しており、OCT とラマン分光計測を同時に行う複合装置が報告された<sup>7)</sup>。

分光イメージングでは、ラマン分光計測の臨床医学への応用を目指したファイバースコープラマン分光装置<sup>8)</sup> や白色照明中でラマン計測が可能な内視鏡システムの開発<sup>9)</sup> が報告された。

その他、レーザー光による培養細胞への遺伝子導入<sup>10)</sup> や光ピンセットによる細胞応答計測法の応答<sup>11)</sup>、赤外分光法を用いた細胞死の観察<sup>12,13)</sup> など多岐にわたる光技術の応用が検討されている。また、伝統的な和紙を用いた新しい照明器具の光、色彩特性に関する発表があり<sup>14)</sup>、人間の感性に与える光の効果についての発表が行われた。

### 17.3 展 望

バイオイメーキング技術、OCT 技術は重要な医療、生化学の分野で欠くことのできない技術であり、今後、さらなる分光的手法やナノプローブ技術などの複合化や高機能化が期待される。また、近赤外線だけでなく中赤外線を用いた細胞観察手法も提案されており、プローブ光の波長領域を広げていくことも、今後の医学生物応用光学の発展のためには重要である。特に中赤外線の領域における高出力可変長レーザーや、その高感度検出器の開発が切望される。また、人間の感性に与える光の効果についての基礎的な研究の進展による新しい光学応用に期待したい。

## 文 献

- 1) 藤崎朋子他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZW-1.
- 2) 磯部佳佑他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZW-4.
- 3) S. A. Hires *et al.*: Ploc. Natl. Acad. Sci. USA, **105** (2008) 4411.
- 4) S. Uemura *et al.*: Nucl. Acids Res., **36** (2008) e70.
- 5) 大西 誠他：秋季応物講演会 (2008) 2p-ZH-4.
- 6) 西浦匡則他：秋季応物講演会 (2008) 2p-ZH-8.
- 7) C. A. Patil *et al.*: Opt. Lett., **10** (2008) 1135.
- 8) 盛田伸一他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZW-8.
- 9) 小町祐一他：秋季応物講演会 (2008) 2a-ZH-2.
- 10) 大塚里沙他：春季応物講演会 (2008) 27p-ZW-11.
- 11) 三好秀明他：春季応物講演会 (2008) 27Xp-ZW-14.
- 12) 山口僚太郎他：春季応物講演会 (2008) 29p-R-2.
- 13) Y. Kondoh *et al.*: ISSS-5 (2008) 12p-p-109.
- 14) 中島裕介：春季応物講演会 (2008) 27p-ZV-9.

## 18. 光学教育

日本女子大 小川賀代

### 18.1 概 要

若者の「理科離れ」の深刻化が問題視されて久しいが、2008 年 3 月には 30 年ぶりに授業時間増加となる小中学校の新学習指導要領が告示された。理科についても学ぶ内

容が増え、小学校では2011(平成23)年度、中学校では2012(平成24)年度から完全実施される。「理科離れ」の問題は、「科学技術創造立国」としての生き残りの問題であり、将来の担い手の育成に関し、文部科学省をはじめ、小・中学校、高等学校、大学、企業、学会などが地道な努力を続けている。光学分野においても例外ではなく、ここ数年、子供対象および教員対象の理科教室の実施、産学官連携による光技術分野の人材育成が積極的に行われており、2008年も同様の傾向であった。特に目立った取り組みとしては、混乱する社会情勢が続いていることもあり、子供たちに対しては研究者・技術者の将来像を描けるように、若手研究者に対しては適材適所で能力が発揮できるように、キャリアデザインを支援する動きが顕著だったように感じられる。

## 18.2 教材研究

光は視覚的に捉えることができ、理科の面白さを伝える教材としては最適なテーマである。2008年もこれまでに引き続き、理科離れを意識した教材研究が報告された。小・中学校でも導入しやすく、光学の面白さを伝える安価で簡易な実験装置・教材として、PCサウンドの入出力装置をA/D、D/A変換に用いた光学顕微鏡の画像化装置<sup>1)</sup>や、光電管に代わって発光ダイオードを用いた光電効果の実験<sup>2)</sup>などが報告されている。また、理科実験授業や出前実験などで活用できる小型で可搬型の実験装置・教材として、発光ダイオードを用いた光通信実験教材<sup>3)</sup>や可搬型ホログラム装置<sup>4)</sup>などの報告もあった。

## 18.3 人材育成

### 18.3.1 理科教室・シンポジウム

応用物理学会においては、毎年、児童生徒および教員を対象としたリフレッシュ理科教室が開催されており、2008年も全国24か所で開催された<sup>5)</sup>。また、大学と企業が連携して、児童生徒や教員だけでなく、父母に対する出張講座の実施の報告もあった<sup>6)</sup>。

また、応用物理学会では11月に第6回教育シンポジウム「理科好きな子供を育てよう」が開催され、小学校、中学校、高等学校、大学から教育委員会に至る教育関係者、マスコミ各方面から講師が迎えられて、理科教育のありかたについて積極的な討論の場となった。応用物理教育分科会では8月に「サイエンス教育サミット」が開催され、教育現場、企業、科学館、教育委員会の連携・支援協力により、新しい教育のあり方を探求し、いかにして「考える人」をつくるかに視点がおいだ取り組みが行われた<sup>7)</sup>。研究発表会も同時開催され、いずれも熱烈な意見交換の場となった。これらの取り組みから、教育機関だけが教育を行

うのではなく、社会が一丸となって育成し、活用する時代が始まっていることがうかがえる。

### 18.3.2 産学官連携

日本光学会では、産学官連携委員会が人材育成、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光応用新産業創出フォーラムを開催し、期待される若手研究者に講演の機会を与えたり、光みらい奨励金の募集を行ったりしている。2008年度は2月に開催される予定である<sup>8)</sup>。

2008年9月に開催されたイノベーション・ジャパン2008では、産学連携による人材育成についての先進事例のひとつとして、昨年度の本稿でも紹介のあった、キヤノン(株)が資金面、教育面でもサポートして設立した宇都宮大学オプティクス教育研究センターが大々的に取り上げられた<sup>9)</sup>。文部科学省、経済産業省からの産学連携による人材育成の支援プログラムも多岐にわたって行われており、大学が社会ニーズにマッチした人材育成を行えるよう、光学分野を含む企業への長期インターンシップを活用した取り組みなども多数始まっている。

### 18.3.3 キャリアデザイン支援

応用物理学会では、2008年秋季講演会開催期間中に「博士(プレ、ポストを含む)のためのキャリア相談会」の場がトライアル設定された<sup>10)</sup>。これは、単なる求人側と求職側のマッチング目的ではなく、「キャリアデザインのための相談ブース設置と相談員の配置」という企画であった。博士課程修了者の採用に深い理解を示す企業や研究所など16機関の出展があり、200名を超える来場者があった。出展者・来場者アンケートの中には、「研究開発以外の舞台で活躍する例を提示していただき、キャリアパスに対する新しい視点が得られた」などの感想も寄せられており、今まで接点の少なかった両者にとって、収穫の大きい企画だったといえる。今後、学会は、専門性をもった実践的な人材発掘・交流の重要な拠点となりうる可能性があると感じられた。

コンテンツラリーオプティクス研究会でも、2008年3月に「ライフイベント(結婚、出産、育児など)を考慮したキャリアパスプランを考える」をテーマに、サイエンスカフェが実施された。20代~60代までの幅広い年齢層が集まった会となったため、各年代で生じるライフイベントに対して、いかにキャリアと向き合うか・向き合ってきたかをディスカッションし、参加者全員が満足する大変有意義な時間となった。

また、キャリアデザインを行うにあたっては、ロールモデルの提示が重要な鍵となるといわれている。特に女性研

究者のようにマイノリティの集団では、キャリアパスの提示が人材育成に大きな役割を果たす。2006年から文部科学省が振興調整費の委託事業として「女性研究者支援モデル育成」を行っており、現在33機関で取り組みが行われている。いずれの機関でも、ロールモデルが冊子、DVDなどさまざまな形で紹介され、コミュニティの構築が行われている。ロールモデルをデータベース化しWeb上で能力値やキャリアを客観的に示したり、SNS (social network services) によるコミュニティを形成しているeポートフォリオシステム<sup>11)</sup>の報告もある。また、ロールモデルの提示およびコミュニティの形成は国内にとどまらず、SPIEでは2008年に3回の「Women in Optics Lunch」、3回の「Women in Optics Presentation and Reception」が開催され、女性研究者の交流の場となっている。また、毎月1人ずつ女性研究者を紹介するSPIE Women in Optics Monthly Plannerの発行も行われており、2009年のMonthly Plannerには初めて日本人の女性研究者が紹介された<sup>12)</sup>。

#### 18.4 展 望

将来の科学技術の担い手を短期および長期的な視野で育成することが必須であり、社会ニーズに応えるために、多様な分野で多様に活躍できる人材育成が切望されている。応用物理学会や応用物理教育分科会などでは、光学分野を含めた教育の取り組み方法や人材育成について議論する場が設けられているが、日本光学会の中ではOptics Japan

2003の「続・大学における光情報教育を考える—教育現場から—」、会誌「光学」第32巻第6号(2003)の特集「光学をどう教えるか」、2005年の第1回光応用新産業創出フォーラム内に設けられた「光応用新産業創出に向けた人材育成について」セッション以降、積極的な議論の場は設けられていない。教育は、各組織が有機的につながることで、はじめて実現される。大学においても、2008年度よりFD(ファカルティー・ディベロップメント)が義務づけられ、教育も評価の対象となっている。今後、日本光学会においても、教育・人材育成に関する議論の場が設けられ、光学分野の将来を担う優秀な人材が多数輩出されて、よりいっそう活性化されていくことを期待したい。

#### 文 献

- 1) 高津朋章他：OPJ (2008) 5pD1.
- 2) 小野寺力他：応用物理教育, **32**, No. 2 (2008) 9.
- 3) 長谷川誠：応用物理教育, **32**, No. 2 (2008) 27.
- 4) 原田建治他：応用物理教育, **32**, No. 1 (2008) 35.
- 5) リフレッシュ理科教室開催報告：応用物理教育, **32**, No. 2 (2008) 89.
- 6) 葛生 伸他：春季応物講演会 (2008) 28a-P6-7.
- 7) 田中 武他：応用物理教育, **32**, No. 2 (2008) 39.
- 8) <http://www.osj-sangakukan.jp/forum.html>
- 9) <http://expo.nikkeibp.co.jp/innovation/forum/program.html#V11>
- 10) 中村 淳他：応用物理, **77** (2008) 1366.
- 11) 小川賀代他：秋季応物講演会 (2008) 3a-P9-7.
- 12) <http://spie.org/x17814.xml>