

# 2009 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
<i>OPJ</i>	日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2009
光学シンポジウム	第 34 回光学シンポジウム
春季応物講演会	第 56 回応用物理学関係連合講演会
秋季応物講演会	第 70 回応用物理学会学術講演会
物理学会秋季大会	日本物理学会 2009 年秋季大会
分光学会	日本分光学会年次講演会
光線力学学会	第 19 回日本光線力学学会学術講演会
生体医工学会	第 48 回日本生体医工学会大会
色彩学会	日本色彩学会第 40 回全国大会
照明学会	第 42 回照明学会全国大会
信学会総合大会	2009 年電子情報通信学会総合大会
信学会ソサイエティ大会	2009 年電子情報通信学会ソサイエティ大会
レーザー医学会	第 30 回日本レーザー医学会総会
レーザー歯学会	第 21 回日本レーザー歯学会総会・学術講演会
X線結像光学シンポジウム	第 10 回 X 線結像光学シンポジウム
<i>JSR</i>	第 22 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
<i>FIT</i>	第 8 回情報科学技術フォーラム (Forum on Information Technology)
<i>CLEO</i>	Conference on Lasers and Electro-Optics 2009
<i>ECOC</i>	European Conference and Exhibition on Optical Communication 2009
<i>ISOM</i>	International Symposium on Optical Memory 2009
<i>ODS</i>	Optical Data Storage 2009
<i>OFC</i>	Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2009

# 1. 光 物 理

上智大 江馬一弘

## 1.1 概 要

光学の基礎をなす光物理学は何世紀も前から存在する学問分野であり、一時はすでに完成された分野だと思われていたが、20世紀後半から再び急速に進歩している。その原因のひとつは、ナノ加工技術の進歩によって、光の波長程度またはそれよりも細かい精度をもつ構造体が作成可能になったことにある。光の物理現象は電磁気学で完全に解ける問題だと思われがちであるが、ナノ領域における光物理学には未解明な部分が多く、まさにこの分野が加速的に発展しているのである。すなわち、フォトニック結晶やメタマテリアルとよばれるナノ構造体の光物理学である。2009年もこの分野の進展はめざましく、ここではすべてを紹介しきれないので、一部について以下に紹介する。さらに、規則的な配列でなく、ランダムな配列による光の局在現象に関する進展もみられたので紹介する。また、ナノ構造以外で筆者が注目した進展は、光の渦に関する研究である。それについても基礎光物理として紹介する。

## 1.2 基礎光物理

ここ数年、光の渦やベクトルビームに関する研究が盛んである。2009年も、フォトニックレーザーを用いたベクトルビームの集光<sup>1,2)</sup>や、ラゲールガウスビームを用いてマイクロローターを高速で回転させる報告<sup>3)</sup>などがあった。さらに、非線形光学現象への発展もあり、四光波混合を利用した光の軌道角運動量の変換<sup>4)</sup>、第二高調波発生により軸方向電場の存在を確認<sup>5)</sup>する報告などもあった。また、レーザー共振器から直接ベクトルビームを発生させる技術<sup>6,7)</sup>や、高出力のピコ秒光渦モードの発生<sup>8)</sup>なども実現している。

## 1.3 メタマテリアル

メタマテリアルに関しては、秋の日本物理学会でシンポジウムが開催<sup>9)</sup>され、この分野の盛況ぶりが明確に現れていた。この中では、回路理論に基づくマイクロ波メタマテリアル<sup>10)</sup>、メタマテリアルを用いてすべての角度で無反射を実現する設計<sup>11)</sup>、メタマテリアルでは有名な透明マントの新しいデザイン<sup>12)</sup>などが発表された。また、メタマテリアルの構成要素である材料・構造に関しても、プラズモンナノ共振器の有効性の実証<sup>13)</sup>、金属キラル構造による巨大旋光性<sup>14)</sup>、メタマテリアルをスピントロニクスにつなげる研究<sup>15)</sup>、テラヘルツ領域でのメタマテリアル<sup>16)</sup>などが発表された。

メタマテリアルの光学特性は実効的な誘電率と透磁率を

用いて議論することが一般的であるが、そもそも誘電率と透磁率を独立に定めるべきではないという主張が以前から存在する。この観点に立つて、実効的な透磁率を用いない記述法の具体的な例なども示された<sup>17)</sup>。その他、フラクタルメタマテリアル<sup>18)</sup>、誘電体球からなるテラヘルツメタマテリアル<sup>19)</sup>などに関する進展もみられた。

## 1.4 フォトニック結晶

フォトニック結晶の分野は2009年も大きな進展がみられた。この分野はフォトニックレーザー<sup>20-24)</sup>などの大きな成果が沢山あるため、全体を概観することはせずに、一部を紹介する。Q値の動的な制御に関しては、時間領域での直接測定が行われた<sup>25)</sup>。また、スローライトやストップライトを用いたパルス的高速チューニング<sup>26)</sup>や、パルスの入れ替え<sup>27)</sup>なども実証された。また、フォトニック結晶における光誘起起電力効果<sup>28)</sup>、強束縛フォトニックバンドの発生<sup>29)</sup>、人工キラル格子によるテラヘルツ領域での三次元キラルティーの動的特性<sup>30)</sup>など、物理的な観点から興味深い進展もみられた。

## 1.5 ランダム配列の光学現象

フォトニック構造は規則配列によるブラッグ条件を利用したものであるが、規則配列からずれた場合、すなわち、アモルファス状態やランダム配列に関する研究も、2009年には進展がみられた。フォトニックアモルファスによる光局在<sup>31,32)</sup>、ランダム微小共振器内の局在モード制御<sup>33)</sup>、誘電体円柱のランダム配列による光局在特性<sup>34)</sup>などの、光のアンダーソン局在に関する研究の進展が多くみられた。局在現象と利得媒質を組み合わせたランダムレーザーに関して、発振特性の解析<sup>35)</sup>、利得分布依存性の詳細な解析<sup>36)</sup>、人工的にランダム配置させたGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>ナノコラムでのランダムレーザー<sup>37)</sup>の報告などがあった。

## 1.6 まとめと展望

フォトニック結晶やメタマテリアルなどのナノ構造の光学現象は、物理としての興味を超えて、応用分野への広がりも大きい。メタマテリアルは応用物理6月号<sup>37)</sup>でも特集されたように、この分野の最近の注目度の高さを示している。今回はこれらの分野を中心に進展を述べたが、ここまで大きくなった分野なので、「光学界の進展」の中では別項目として独立にすべきと思われる。そして、この「光物理」の項目では、最初に紹介した光の渦や、コヒーレンス、回折、散乱などの、より基礎光学的な項目の進展をもっと紹介すべきかもしれない。いずれにせよ、ナノ構造の光学を含めた「光物理」の分野は依然著しい進展をみせており、今後も光学界全体の牽引的存在になることを期待したい。

## 文 献

- 1) 高山直樹他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZT-4.
- 2) 高山直樹他：秋季応物講演会 (2009) 9p-A-10.
- 3) 齊藤洋平他：春季応物講演会 (2009) 1p-TE-8.
- 4) 上野雄鋭他：秋季応物講演会 (2009) 9a-A-5.
- 5) 小澤祐市他：秋季応物講演会 (2009) 9a-A-7.
- 6) 伊藤暁彦他：秋季応物講演会 (2009) 10a-V-1.
- 7) 伊藤暁彦他：秋季応物講演会 (2009) 10a-V-2.
- 8) 田中佑一他：秋季応物講演会 (2009) 10a-V-4.
- 9) 石原照也：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-1.
- 10) 真田篤志：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-2.
- 11) 北野正雄：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-3.
- 12) 落合友四郎他：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-4.
- 13) 宮崎英樹：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-5.
- 14) 小西邦昭：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-6.
- 15) 小野田勝：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-7.
- 16) 萩行正憲：物理学会秋季大会 (2009) 27pYF-8.
- 17) 迫田和彰：秋季応物講演会 (2009) 8a-B-5.
- 18) 窪田志朗他：秋季応物講演会 (2009) 8a-B-1.
- 19) 高野恵介他：秋季応物講演会 (2009) 8a-B-3.
- 20) 長瀬和也他：秋季応物講演会 (2009) 8p-B-6.
- 21) 松尾慎治他：秋季応物講演会 (2009) 8p-B-7.
- 22) 黒坂剛孝他：秋季応物講演会 (2009) 8p-B-9.
- 23) 岩橋清太他：秋季応物講演会 (2009) 8p-B-11.
- 24) 岩橋清太他：秋季応物講演会 (2009) 8p-B-15.
- 25) J. Upham 他：秋季応物講演会 (2009) 8a-B-9.
- 26) 濱地洋平他：秋季応物講演会 (2009) 8a-B-8.
- 27) 齋藤悠二他：秋季応物講演会 (2009) 8a-B-11.
- 28) 畑野敬史他：物理学会秋季大会 (2009) 26pXB-1.
- 29) 遠藤晋平他：物理学会秋季大会 (2009) 26pXB-4.
- 30) 神田夏輝他：物理学会秋季大会 (2009) 26pXB-8.
- 31) 枝川圭一他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZN-3.
- 32) 今川成樹他：秋季応物講演会 (2009) 8p-B-3.
- 33) 武田征士他：秋季応物講演会 (2009) 9a-B-5.
- 34) 猪瀬裕太他：物理学会秋季大会 (2009) 26pXB-7.
- 35) 藤原英樹他：春季応物講演会 (2009) 1p-TE-6.
- 36) 藤原英樹他：秋季応物講演会 (2009) 9p-A-8.
- 37) 酒井 優他：秋季応物講演会 (2009) 8p-B-18.
- 38) メタマテリアル特集, 応用物理, 78 (2009).

## 2. 結像素子・光学機械

ニコン 青野康廣

### 2.1 概 要

2008年秋のリーマンショック以降の世界的な景気減退により、光学関連のセミナー・研究会への企業からの参加者が減ったようであるが、結像光学機器に関連する研究会・報告会は活況を呈していたといえよう。これは、結像光学機器が依然として日本の光学産業の中核であること、とりわけデジタル技術の急速な発展に伴い、結像光学にも新たな課題が提起され精力的に研究が行われてきたこと、さまざまな材料技術・加工技術に支えられ、それらが原理確認・実験段階から実用化の段階に入ってきていることなどが理由であろう。

一例を挙げると、デジタルカメラの画質向上はめざま

しいが、一方でゴーストの低減が強く求められており、画像センサーやマイクロレンズアレイによる回折ゴーストの解析<sup>1)</sup>や、一段と進化したゴースト像シミュレーションが報告されている<sup>2)</sup>。光学素子では、反射防止は長いあいだ真空蒸着成膜によっていたが、サブ波長構造 (SWS) や自己組織化によるポーラスな微細粒子膜など、新しい製法による反射防止技術のデジタルカメラレンズへの応用が始まった。結像光学系においては、倍率色収差を画像処理によって補正する新しいアルゴリズムの提案<sup>3)</sup>や、波面コード化技術による被写界深度拡大において位相板の最適化が図られる<sup>4)</sup>など、結像光学だけでは実現できない機能がデジタル画像処理との緊密な融合で進展した。本稿では、デジタル画像技術との連携という視点を中心に、2009年のトピックスをレビューする。

### 2.2 結像素子および加工技術

従来からレーザー干渉露光や電子ビーム露光によるパターンニング技術、エッチング技術でSWSを作り、反射防止機能を実現する研究が行われているが、アルミナ微結晶膜を温水処理することで、簡易に大面積の曲面上にサブ波長サイズの凹凸構造を形成する技術が報告された<sup>5)</sup>。また、ゾル-ゲル法によりきわめて粗なMgF<sub>2</sub>の超低屈折率膜をレンズ表面に形成することで、優れた反射防止機能を実現した<sup>6)</sup>。これらは、いずれも従来の真空蒸着多層膜より広い波長域と入射角範囲で低反射率特性を達成しており、デジタル一眼レフカメラレンズに応用されはじめている。

干渉露光法によるSWSパターンニングでは、2つの球面波干渉縞を利用し幾何学配置を工夫することで、球面上にほぼ等間隔なパターンを形成する方法が提案された<sup>7)</sup>。また、Blu-rayディスク原板作成技術とUVナノインプリント技術によって、大面積平面上にSWS構造を形成する技術が報告された。広い波長帯域で反射率~0.1%の特性が得られており、量産性が高い技術として将来、表示素子への応用が期待される<sup>8)</sup>。

### 2.3 結像光学機械

デジタルカメラは引き続き高画素化、高性能化が進み多くの新製品が上市された。携帯電話カメラモジュールにも1000~1200万画素センサーが使われるようになってきた。これにより、撮像レンズも着実に高性能化が図られていると推測される。また、手軽に3D写真が撮れるデジカメや、超小型プロジェクターを内蔵したデジカメなど、ユーザーに新たな画像の楽しみを提供するユニークな製品も上市された。一方、光学界では、新しいアイデア、コンセプトの結像光学系の新規提案やさらなる改良・発展が報

告された。

### 2.3.1 撮像光学系

プリズムの自由曲面反射面を使った水平画角 60° の結像光学系を 3 個並べ、180 度画角を 3 分割して撮像するユニークな光学系が報告された<sup>9)</sup>。魚眼レンズより歪曲が小さく画像処理による歪曲補正に伴う解像度劣化が少なく、超小型軽量の特徴を生かして車載カメラやセキュリティーカメラなどへの応用が期待される。

マイクロレンズアレイとイメージセンサーを組み合わせた複眼カメラが提唱されている。単一レンズ系に比べレンズの焦点距離が短くなるため、カメラの薄型化が図られるとともに、画像に含まれる視差情報から被写体の距離分布が得られるので、画像処理によって被写界深度のコントロールができるなど、さまざまな利点がある。ただし、レンズが規則正しく配置されていると、特定の撮影距離に対して光束の重なりが増え、有効サンプリング数が減少する。これを解決するために、レンズ配置にランダム性をもたせる最適な空間サンプリングの手法が示され、超解像処理を用いて単一の高解像画像が得られることが報告された<sup>10)</sup>。この複眼カメラの赤外線画像<sup>11)</sup>や、DOE (diffractive optical elements) と組み合わせたシステムで口腔内 3D 画像計測への応用も発表された<sup>12)</sup>。

“軸対称自由曲面”を使い、全方位光学系の上下方向画角を 180° に拡大した改良版が報告された<sup>13)</sup>。これは撮影系としてもプロジェクション光学系としても利用可能である。

### 2.3.2 ディスプレイ光学系

すでに展示会発表されていたレーザー走査式小型プロジェクターの、設計・試作の技術報告が行われた。レーザー走査式は他方式と比べて、レンズ不要のため超小型化が可能、レーザーの直進性によりフォーカスフリー、色再現が良好などの特長がある。実際の設計にあたっては、解像度と投射角度仕様から決まる走査ミラーの走査角度、駆動速度を実現するために新規の二次元走査高速 MEMS (microelectromechanical system) ミラーを開発、高速走査時の動的歪みによって起きるビーム形状の変形による解像度劣化をシミュレーションし、MEMS の形状・厚みを工夫することで解決したこと、さらに斜め投射時の歪みを自由曲面ミラー 2 枚によって補正する補正光学系の設計・試作も併せて報告された<sup>14)</sup>。

レーザープロジェクション TV の薄型化を達成するために、レンズと凸ミラーを組み合わせた超広角投射光学系の設計が報告された<sup>15)</sup>。投射レンズの光軸を含む画角で使用する中心投射系では、像面湾曲補正の必要条件として

ペッツバル和をほぼゼロにしなければならず、それが光学系の小型化の制約となっていたが、本報告では極端な斜め投射光学系とし、軸外の比較的狭い画角範囲のみ使用し、高次の像面湾曲とのバランスをとることで、ペッツバル和の制約をなくし、その結果大幅な小型化が実現できたというところが面白い。

単眼式のオールインワンタイプヘッドマウントディスプレイが報告された。光学系としての特長は、密着複層 DOE を観察光学系に用いたことで小型軽量化と高性能化を実現したことである。広い波長帯域で高い回折効率を実現するために、新規に低屈折率高分散光硬化樹脂を開発したという<sup>16)</sup>。

## 2.4 光学設計法

テレセントリック光学系において、物点距離が変化しても像面湾曲が変化しない条件は、射影方式が第 1 種楕円積分で表される式に従うことが示された<sup>17)</sup>。さらに、瞳位置が有限な一般の結像系においても、像面湾曲が物点距離に依存しない条件は、テレセントリックな場合より複雑ではあるが、射影方式が第 1 種楕円積分を含む式で表されることも示された<sup>18)</sup>。第 1 次近似でわかりやすい式に変形すると、これは正射影と中心射影の間に位置する負の歪曲収差を発生させることに相当する。本研究のきっかけは、立体視光学系において、物点距離によらず像面湾曲が一定であることを追求したことであるが、カメラレンズのように複数の共役関係で収差補正を必要とする光学系の設計にも応用できる。ベテラン設計者はフォーカシングによる像面湾曲変動を抑えると負の歪曲が発生することを経験的に知っているが、それを解析的に理論式で示したことに意義があり、定量的な設計指針となり得る。

従来面の色収差係数の計算式は、基準波長の近軸追跡値と波長差による屈折率の差分を用いていたため、色収差係数から求めた軸上色収差、倍率色収差は、それぞれ 2 つの波長で近軸追跡して求めたバックフォーカスの差、微小画角の主光線追跡で求めた倍率色収差と一致しないという問題があった。基準波長と第 2 波長の近軸追跡値を用いた新しい色収差係数の計算式が提案され、数値計算により色収差係数から求めた色収差と、実際に光線追跡して求めた色収差が完全に一致することが示された<sup>19)</sup>。

## 2.5 展 望

現代の結像光学器械は、ほとんどがデジタル技術と密接に関係しているといっても過言ではない。光学像がデジタル化された電子情報として扱われることにより、情報の加工性が飛躍的に増大し、画像処理、パターン認識技術との融合により、たとえば笑顔がカメラが認識し自動で写

真が撮れるといった、従来は考えられなかったような新しいアイデアが、今後も数多く実現するであろう。一方、高画質化といった基本性能も引き続き進展が見込まれ、光学系のさらなる高性能化が求められ続けるであろう。そのために、高精度非球面レンズ、新しい反射防止膜など光学素子の加工・計測技術や、新しい光学材料技術も重要な役割を果たしていかなければならない。

表示系では、三次元画像が大きな流れとなるであろう。すでに両眼視差方式による立体画像表示機器の商品化が始まっているが、新しい原理に基づく三次元画像技術の研究も期待される。

## 文 献

- 1) 松岡祥平：光学シンポジウム (2009) 講演番号 5.
- 2) 伊澤康哲：OPJ (2009) 26aE9.
- 3) 宇津木暁彦：光設計研究グループ機関誌, No. 42 (2009) 9.
- 4) 工藤史堯：OPJ (2009) 24aF2.
- 5) 奥野丈晴：光学シンポジウム (2009) 講演番号 1.
- 6) 村田 剛：光学シンポジウム (2009) 講演番号 2.
- 7) 高比良春平：秋季応物講演会 (2009) 8p-A-2.
- 8) 林部和弥：光設計研究グループ機関誌, No.43 (2009) 28.
- 9) 高橋浩一：光学シンポジウム (2009) 講演番号 9.
- 10) 香川景一郎：光設計研究グループ機関誌, No.42 (2009) 5.
- 11) 香川景一郎：OPJ (2009) 24aF1.
- 12) 香川景一郎：光学シンポジウム (2009) 講演番号 3.
- 13) 研野孝吉：光学シンポジウム (2009) 講演番号 23.
- 14) 金野賢治：光設計研究グループ機関誌, No.41 (2009) 45.
- 15) 桑田宗晴：光設計研究グループ機関誌, No.41 (2009) 39.
- 16) 大槻正樹：光学シンポジウム (2009) 講演番号 22.
- 17) 岡 幹生：OPJ (2009) 26aE7.
- 18) 長谷隼佑：OPJ (2009) 26aE8.
- 19) 荒木敬介：OPJ (2009) 26aE6.

## 3. X 線 光 学

東北大 羽多野忠

### 3.1 概 要

光学を波長・エネルギーで分野分けした「X線光学」について述べる。ここでは、Mo/Si多層膜ミラーを用いた直入射反射光学系でめざましい技術進歩を遂げている波長13.5 nm付近の極端紫外線(EUV)を「X線」に含める。SPring-8の高輝度X線を利用した研究、および高輝度X線を取り扱うミラーに大きな進展がみられた。

### 3.2 光 源

この数年、EUVを利用した次世代半導体製造用の微細露光技術開発が推進されており、最重要課題であったプラズマ光源に見通しが立ってきている。中間集光点で115 Wの高出力と、EUV発生と同時にターゲットから飛散するミラー汚染物質が少ない高品位が条件である。さまざまな議論から集約されてきた量産機用光源としてのスキーム

は、スズ材料を10 μmオーダーのドロップレット化し、YAGレーザー/CO<sub>2</sub>レーザーのダブルパルスで加熱膨張/励起して低汚染物質条件で高変換効率を得るというものである。技術研究組合極端紫外線露光システム技術開発機構は出力60 Wを達成し、CO<sub>2</sub>レーザーの高出力化によって200 Wの見通しを得ている<sup>1)</sup>。強磁場により汚染物質を除去する方法が引き続き研究されている。

X線自由電子レーザー(XFEL)の試験加速器としてのSpring-8 Compact SASE (self-amplified spontaneous emission) Sourceが、EUVレーザー光源として一般利用研究用の稼働を開始している<sup>2)</sup>。

### 3.3 直入射ミラー

東北大学のグループは、EUV顕微鏡において、光学設計、多層膜技術、応用研究の各レベルで、それぞれに直入射ミラー光学系の特長である高解像度、広視野を生かす進展を図った。10 nmの潜在的解像度と10 μmのCCD画素サイズをマッチさせる倍率1000倍の顕微鏡光学系が新たに開発された<sup>3,4)</sup>。基板の超研磨加工精度1 nm ( $\lambda/10$ )を上回る波面精度を実現し得る多層膜加工技術の開発が進んでいる。基板にコーティングされた多層膜を1周期単位でイオンミリングすることにより0.1 nm ( $\lambda/100$ )単位で波面を操作する<sup>5,6)</sup>。光学的な動作原理はX線の湾曲結晶におけるヨハン型とヨハンソン型の違いと同様で、周期構造の形状が支配的に反射波面の形状を決定し、表面形状でわずかな誤差補正をする。この波面補正法が実用化すると、視野100 μmで解像度10 nmという4桁の空間スケールのレンジが得られる。レンジの広さは、バイオイメーキングにおける細胞内小器官、細胞、組織と、階層を超えた観察を可能とする<sup>7)</sup>。現状の200 nm解像度で、ヒトの塵肺組織等の十分に吸収コントラストの高い応用例が示されている<sup>7)</sup>。

### 3.4 斜入射ミラー

大阪大学のグループは、SPring-8の高輝度光源と超精密カークパトリック・バエズ(KB)ミラーの組み合わせで、エネルギー15 keVにおいて30 nm集光を実現している。集光ビームの強度プロファイルから波面誤差を得る位相回復アルゴリズム、および位相補正アダプティブミラーを独自開発して、集光サイズはサブ10 nmのレベルに突入した<sup>8,9)</sup>。また、KB配置で縦、横それぞれを楕円ミラー/双曲面ミラーの2回反射とすることによって、擬似的ウォルターミラーを実現した<sup>10,11)</sup>。このグループでは、任意形状の表面に対して原子レベルの平滑性を得るナノ表面創製プロセスが確立されているので<sup>9)</sup>、4枚の非球面ミラーの作製は容易であり、アライメント技術の開発によりウォル

ターミラー並みの結像性能が期待できる。

### 3.5 フレネルゾーンプレート

従来型フレネルゾーンプレート (FZP) を用いた X 線顕微鏡の三次元 CT 応用研究が着実に進んでいる。一方で、さまざまな FZP のバリエーションが示されている。兵庫県立大学のグループは、不等間隔溝回折格子を反射型 ZP ととらえ、オプティカルフラット基板に金ゾーンを蒸着することにより振幅ゾーンプレートを作製した。プロトタイプの基板上最小線幅は 80  $\mu\text{m}$  であり、斜入射角 4 mrad の配置では見かけのゾーン幅 320 nm に相当する。10 keV において回折限界に近い集光サイズが確認されている<sup>12,13)</sup>。ゾーン数 1000、基板上最小線幅 0.7  $\mu\text{m}$  のものが作製済みとの報告があり<sup>13)</sup>、集光性能の評価結果が待たれる。また、NTT 物性基礎研究所のグループから、平面型導波路と平面型 FZP を組み合わせて二次元集光するというアイデアが提案された。30 nm 厚の炭素を白金で挟んでコア層とし、導波路射出部に設計焦点距離 1 m の一次元ゾーンパターンを作製した。エネルギー 10 keV で設計通りの集光が確認された<sup>14)</sup>。

### 3.6 結像素子を用いないイメージング

東京大学のグループは、タルボット干渉計を用いた位相イメージングを推進している。高い時間/空間コヒーレンスが要求されないことが、この光学系のメリットである。SPring-8 および Photon Factory の偏向部放射光を分光せずに高フラックスで用いて、高速位相イメージングを行った。試料を回転しながら高繰り返しで撮像し、25.5 fps のトモグラムの動画を得た<sup>15,16)</sup>。また、実験室 X 線源を用いて空間コヒーレンスと強度を両立させるタルボット-ロー干渉計も計画されている。線源部のマルチスリットの開発、およびマルチスリットに代わるマルチライン線源の開発が行われた<sup>17)</sup>。低コヒーレンス条件でのデモンストレーションは、将来の応用展開の幅広さを示唆する。

兵庫県立大学のグループは、EUV マスク評価の目的でコヒーレントスキヤトロメトリー顕微鏡を開発した。New SUBARU の偏向部放射光を直径 5  $\mu\text{m}$  のピンホールに通して、空間的にコヒーレントな光源を生成している。2 枚の Mo/Si 多層膜ミラーを用いて波長 13.5 nm に分光するとともに、試料である EUV マスクに集光する。EUV マスクも Mo/Si 多層膜を用いた反射型マスクである。多層膜の上に、吸収膜がパターンニングされている。回折強度パターンを観測して位相回復し、像再生する。その結果は、SEM (走査型電子顕微鏡) 観察像とよい一致を示した<sup>18)</sup>。

大阪大学と理研のグループは、SPring-8 の X 線アンジュレーターを用いたコヒーレント回折顕微鏡を開発してい

る。12 keV の X 線を Ag ナノキューブ試料、および Au ナノゲージ試料に照射し、回折強度パターンを観測して位相回復し、空間分解能 3 nm の像再生に成功した<sup>19)</sup>。

### 3.7 X 線非線形光学

X 線非線形光学において大きな一歩が踏み出された。理研のグループは、SPring-8 の長尺 X 線アンジュレーターの 10 keV の X 線をダイヤモンドに照射して、パラメトリックダウンコンバージョンを観測した。非線形感受率の定量評価に成功し、アイドラー光が炭素の K 吸収に共鳴するエネルギーで非線形感受率の値が 10 倍に増大することを見いだした<sup>20)</sup>。この実験を X 線レーザーの稼働を待たずになし得たことは、注目に値する。

### 3.8 展 望

SPring-8 キャンパスにおいて、来年度中のレーザー発振を目指して X 線自由電子レーザーの建設が進んでいる。二次コヒーレンスなどの基礎研究も興味深く、利用研究でも現時点で想像もつかないような展開が広がるに違いない。X 線光学素子や X 線検出器において、スループットや感度と耐久性、分解能とアクセプタンスなどの反する性能の両立、すなわちダイナミックレンジが強く求められてくるのではないかと予想される。

## 文 献

- 1) A. Endo *et al.*: Proc. SPIE, **7271** (2009) 727108.
- 2) 永園 充: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 33.
- 3) 豊田光紀他: 秋季応物講演会 (2009) 8p-ZF-6.
- 4) 豊田光紀: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 23.
- 5) 津留俊英他: 春季応物講演会 (2009) 30a-ZR-11.
- 6) 津留俊英: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 21.
- 7) 江島丈雄: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 19.
- 8) H. Mimura *et al.*: SRI (2009) #017.
- 9) 山内和人: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 1.
- 10) 藤井正輝他: 秋季応物講演会 (2009) 8p-ZF-5.
- 11) S. Matsuyama *et al.*: SRI (2009) #140.
- 12) 辻 卓也他: JSR (2009) 1D006.
- 13) 高野秀和: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 5.
- 14) 川村朋晃他: 秋季応物講演会 (2009) 8p-ZF-1, 2.
- 15) 百生 敦他: 春季応物講演会 (2009) 30a-ZR-7.
- 16) 百生 敦他: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 17.
- 17) 桑原宏萌他: 春季応物講演会 (2009) 30a-ZR-8.
- 18) 木下博雄他: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 55.
- 19) 高橋幸生: X 線結像光学シンポジウム (2009) p. 35.
- 20) K. Tamasaku *et al.*: Phys. Rev. Lett., **103** (2009) 254801.

## 4. 分 光

香川大 石丸伊知郎

### 4.1 概 要

ポストゲノム時代における細胞を用いた機能解明に蛍光染色の手法が広く用いられ、微小細胞内部の分光分布を高

空間解像度で計測する技術が数多く実用化されている。一方、無標識での細胞観察技術として、CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) microscopy などの分子振動イメージング技術も注目されている。さらに、近年の環境への関心の高まりに応じて、いくつか注目される分光環境イメージング技術も実用化されてきた。また、スーパーコンティニューム光源に代表される広帯域光源や、低ノイズの EMCCD (electron multiplying CCD) カメラの商品化など、光源や受光器などの光学関連デバイスの発展もめざましい。

このように多岐にわたる分光分野を、基礎研究からデバイスの研究開発、またその実利用化事例に関して、浅学な筆者が網羅的に展望を述べることは不可能である。そこで、平成 21 年度日本分光学会年次講演会 (2009 年 11 月 16 日～18 日) での話題などを中心に、「非整備環境下での分光イメージング」と「生体医用計測分野での分光イメージング」の 2 つの適用分野に的を絞って、興味深かった話題について紹介したい。

#### 4.2 非整備環境下での分光イメージング

まず特筆すべきは、環境を地球、宇宙規模でグローバルに分光イメージングすることにチャレンジした人工衛星「いぶき」(GOSAT: ゴーサット, greenhouse gases observing satellite) であろう<sup>1)</sup>。「いぶき」は、2009 年 1 月 23 日、種子島宇宙センターから H-IIA ロケット 15 号機により打ち上げられた、二酸化炭素やメタンガスなどの温室効果ガスの濃度分布を地球規模で観測する衛星である (JAXA 「いぶき」打ち上げ特設サイト [http://www.jaxa.jp/countdown/f15/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/countdown/f15/index_j.html))。温室効果ガス観測センサー、TANSO-FTS (TANSO: thermal and near infrared sensor for carbon observation; FTS: Fourier transform spectrometer, フーリエ変換分光器) により、二酸化炭素、およびメタンガスの吸収スペクトルを計測する。5 月には、未校正値ながら、北半球の二酸化炭素濃度が南半球よりも比較的高いという計測結果も発表された。

また、AOTF (acousto-optic tunable filter, 音響光学チューナブルフィルター) による、ハイパースペクトラルイメージングの製品も充実してきた。本手法による高速分光イメージングの実用例として、指紋解析<sup>2)</sup>などが報告されている。今後さらに、NHK テレビ「アインシュタインの眼—ミレーの名画の謎に挑む」(2009 年 4 月 5 日) で紹介されたミレーの落ち穂拾いの多重分光画像など、多様な分野における効果的な適用事例の報告が増加することが期待される。しかしながら、ハイパースペクトラルイメージングは、可視領域から近赤外領域の分光イメージング技術であ

る。より多様な成分解析を行うためには、汎用的な中赤外領域での分光イメージング技術の登場が待たれる。従来から、中赤外領域での二次元分光用の高感度アレイデバイスとしては、MCT (水銀・カドミウム・テルル: HgCdTe) 検出器が知られている。もともと軍事用に開発されたこともあり、高額で輸出規制の問題もあり、さらに液体窒素での冷却も必要であることから、非整備環境下での汎用的な使用には未だ不向きである。一方、昨年は、新型インフルエンザへの防備として、サーモグラフィーが空港などに設置されて話題になった。サーモグラフィーは、非冷却マイクロボロメータータイプの二次元アレイデバイスを搭載した中赤外光強度分布のイメージング装置である。昨年あたりから、サーモグラフィーとしてではなく、非冷却マイクロボロメーター検出ユニットとしても市販されはじめた。今後、熱計測以外での、汎用的な分光イメージング技術への適用発展が期待される。

#### 4.3 生体医用計測分野での分光イメージング

平成 21 年度日本分光学会年次講演会で「白色レーザー光源を用いたコヒーレントラマン分光イメージング法の開発と生細胞への応用」<sup>2)</sup>と、「時間分解赤外分光法を用いた触媒表面反応ダイナミクス」<sup>3)</sup>が奨励賞を受賞した。また、「ラマン分光法によるタンパク質構造解析のための知識基盤の開発と応用」<sup>4)</sup>が学会賞を受賞した。1 つ目の奨励賞は、白色レーザー光源としてスーパーコンティニューム光源を導入し、広帯域での CARS 効果を同時に励起して分光分布を検出することにより、多様な成分の同時解析を可能にした手法であった。2 つ目は、触媒、特に光触媒の反応物質表面での過渡状態を 200 ps の高い時間分解能で赤外分光を行い、高速な化学反応を可視化している。従来は、触媒の設計は反応結果から試行錯誤により行っていたが、本可視化は理論的な設計手法構築に貢献できることであった。口頭発表とポスター発表の合計約 70 件のうち、受賞講演を含む 15 件の発表にラマンの題目が付いており、今大会からラマン関連の発表が増加した。

また、Optics & Photonics Japan 2009 において、「光コヒーレンストモグラフィの医学応用の新展開」のシンポジウムが開催された。医用光計測分野での、近年の代表的な成功例である OCT (optical coherence tomography, 光干渉断層計) についてのシンポジウムである。OCT は、近赤外光が皮膚の透過性が高いことに着目した、網膜剥離などの形態変化を断層像として画像診断できる画期的な手法である。このシンポジウムの発表やディスカッションの中で、ファンクショナル (機能的) OCT というキーワードが数多く聞かれた。OCT が生体膜内部の形態変化を計測で

きることに加えて、例えば、ドップラー OCT とよばれる血流機能の同時計測などを指している。近年、いくつかの分光断層像計測の研究<sup>5)</sup>が進められている。これは、近赤外領域での吸光特性の生体膜断層方向での分布を計測する手法である。この分光 OCT が実現すれば、形態と成分の同時計測が可能となり、さらに医用画像診断技術へ大きく貢献することであろう。

#### 4.4 まとめ

分子振動に伴う吸光特性を計測する赤外分光や、ラマンなど分子振動イメージングは、対象物体に手を加えることなく成分計測ができる技術である。この特徴を生かして、研究室での計測にとどまらず、非整備環境下での汎用的な分子振動分光イメージング技術への進展が期待される。

## 文 献

- 1) 「ハイパースペクトルへと進む指紋解析」, Laser Focus World Japan, 10月号(2009) p. 17.
- 2) H. Kano *et al.*: 分光学会 (2009) p. 1.
- 3) A. Tamakata: 分光学会 (2009) p. 3.
- 4) H. Takeuchi: 分光学会 (2009) p. 5.
- 5) L. Froehly *et al.*: Int. J. Biomed. Imaging, **2008** (2008) 752340.

## 5. レーザー (半導体レーザーを除く)\*

名古屋大 西澤典彦

### 5.1 ファイバーレーザー

近年、カーボンナノチューブが、モード同期レーザー用の新しい可飽和吸収デバイスとして大きな注目を集めている。これは日本発のデバイスであるが、その利用が世界的に広がりつつあり、CLEO'09 では 12 件もの発表があった。ナノチューブの光デバイス化はさまざまなアプローチで試みられており、従来のポリマー薄膜に添加するタイプとファイバーの側面や端面に付着させるタイプに加え<sup>1)</sup>、ポリマーファイバーへの添加も報告された<sup>2)</sup>。ナノチューブデバイスは特にファイバーレーザーに用いられており、今年度は、全偏波保持型で耐環境性に優れた超短パルスファイバーレーザーや<sup>3)</sup>、すべての受動モード同期パルスレーザーの中で最も繰り返しの低い、キロメートルオーダーの長共振器ファイバーレーザーが報告された<sup>4)</sup>。さらに、国内でカーボンナノチューブを用いた手のひらサイズのファイバーレーザーが実現された<sup>5)</sup>。

また、半導体量子井戸型素子におけるサブバンド間遷移を利用した受動モード同期超短パルスファイバーレーザーが初めて開発された<sup>6)</sup>。サブバンド間遷移による可飽和吸収は応答速度が速く、今後の展開が期待される。

また、増幅用大口径ファイバーやダブルクラッドファイ

バー、高非線形ファイバーの技術も進展している。超高速ファイバー非線形効果を用いて、中心波長や帯域、スペクトル形状を任意に変化させることのできる新しい擬似スーパーコンティニューム光源や<sup>7)</sup>、パルス捕捉を用いた可視域における波長可変超短パルス光の生成が報告された<sup>8)</sup>。

2009 年は、フォトニック結晶ファイバーを用いて 1 オクターブ広がるスーパーコンティニューム光の生成が実現され、キャリアー・エンベロープオフセット周波数 (fceo) が観測されはじめてから 10 周年になり、CLEO'09 ではシンポジウムが企画され、多くの発表があった。超短パルスファイバーレーザーは実用的な光周波数コム光源として期待され、その開発が進んでいる。電気光学変調器を共振器中に用いた超短パルスファイバーレーザーによって、縦モードの線幅を 30 mHz まで狭帯域化した光周波数コム光源が開発された<sup>9)</sup>。また、2009 年度から、超短パルスファイバーレーザーベースの光周波数コム光源が、日本の長さの国家標準として指定された。

ファイバー増幅器を用いた高出力化は世界的に進められている。国内では、Yb 添加フォトニックバンドギャップファイバー増幅器を用いて、これまで増幅が困難であった 1150~1200 nm 帯における 30~67 W の増幅光の生成が報告された<sup>10)</sup>。また、コヒーレントビーム結合による高出力化も盛んに行われている。1 台のファイバーレーザーを種として、ファイバー増幅器で 200 W まで増幅後、Nd:YAG スラブ増幅器に注入し、出力光を波面センサー、位相変調器などを介して位相同期を掛け、最終段でコヒーレント結合し、60 kW のレーザー出力が得られた<sup>11)</sup>。

受動モード同期ファイバーレーザーでは、高出力化が可能な Yb 添加ファイバーを用いた研究が増加している。ダブルクラッド Yb 添加ファイバーを用いた全正常分散ファイバーレーザー発振器において、平均出力 2.2 W、分散補償後 80 fs の高出力超短パルスの生成が報告された<sup>12)</sup>。また、全正常分散のモードで動作する 400 MHz の高繰り返し Yb 添加超短パルスファイバーレーザーの開発が報告された<sup>13)</sup>。

可視域については、Pr を添加した  $ZrF_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$  (ZBLAN) ファイバーを用いて、可視の RGB 域をカバーする波長可変ファイバーレーザーの開発が報告された<sup>14)</sup>。また、分光応用などに重要な長波長域で発振する Tm 添加ファイバーレーザーの開発なども進められている。

### 5.2 固体レーザー

2009 年度は、手のひらサイズの超短パルスチタンサファイアレーザーが国内で開発された<sup>15)</sup>。共振器長は 5 cm と小さく、独自に開発したチャープミラーにより共

振器内の分散を異常分散とし、半導体可飽和吸収ミラーを用いてソリトンモード同期による安定動作を実現した。繰り返し 2.85 GHz で平均出力 740 mW, パルス幅 210 fs の超短パルスを安定に出力する。よく管理された接着固定により、手のひらサイズのパッケージ化に成功した。超短パルス固体レーザーの実用応用に向けて、大きな進歩だといえる。

新しい構成として、リング共振器構成でチャープパルス増幅やカーレンズモード同期を用いた受動モード同期レーザーが報告された<sup>16)</sup>。新しい構成のレーザーとして興味深い。また、固体レーザーベースでも、波長可変チタンサファイアレーザーと和周波発生を用いた、可視域における電子制御型波長可変ピコ秒レーザーが報告された<sup>17)</sup>。

CW 固体レーザーでは、位相共役鏡を用いた高出力側面励起 Nd 添加バナデートピコ秒レーザーの開発が進み、最適化によって 46 W の高出力化が可能であることが示された<sup>18)</sup>。

日本で開発されたセラミックレーザーの技術も着実に進展している。セラミック Yb : YAG だけを利得媒質に用いて、260 fs の超短パルス光の発生が報告された<sup>19)</sup>。また、Yb : Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と Yb : Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> セラミックスを合わせて用いて、時間幅 53 fs, 繰り返し 89 MHz, 平均強度 1 W の受動モード同期レーザーが報告された<sup>20)</sup>。さらに、光学異方性のあるレーザー材料のセラミック化が進んでいる。結晶の磁気異方性を利用し、焼結時に磁場を印加して配向させることで、Nd : Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>F<sub>2</sub> (FAP) のセラミックス化が実現された<sup>21)</sup>。また、高輝度マイクロチップレーザーも高出力化や応用展開が進み、レーザーによるエンジン点火への応用展開が試みられている<sup>22)</sup>。

### 5.3 その他

近年、光渦モードや軸対称偏光モードが新しい偏光状態の光として注目されている。2009 年度は、Yb ドープファイバーによる軸対称偏光ビームの増幅や<sup>23, 24)</sup>、複数の偏光素子を駆使して、帯域 450 nm の超広帯域光の光渦の生成が報告された<sup>25)</sup>。

また、太陽光励起レーザーの研究が盛んになってきた。宇宙におけるレーザー光によるエネルギー伝送を目指し、1 kW 級のレーザー発振を目指して開発が進んでいる。現在までに、40% に迫る太陽光からの光-光変換効率が基礎実験と理論から予測されている<sup>26)</sup>。

### 5.4 今後の展望

ファイバーレーザーは、安定性・実用性など多くの長所

をもち、研究開発や応用が年々増加している。また、固体レーザー技術とファイバーレーザー技術を組み合わせて活用する例も増えてきており、高出力化や実用化が進んでいる。どのレーザーも万能ではなく、今後、それぞれのレーザーの長所を生かしながら、技術が進展していくと期待される。

今回、特集の趣旨から国内の成果を中心に概説したが、CLEO のプログラム委員長を日本人が務めたことに表されるように、この分野において、日本が期待され、よく健闘しているのではないかと、いう印象を受けた。しかし、近年、中国勢の追い上げは勢いがあり、欧州も各国が連携を取り、国策として力を入れている。また、依然、レーザー製品は海外製のものが主流を占めている。また、最近の傾向として、研究から製品化までのスピードが非常に速くなっている印象を受ける。国内でも光分野の拠点形成や連携が進んできたが、やはり官のサポートのもと、産学や国内の研究者が力を合わせた、世界に負けないような体制作り、そして分野の育成が必要であると感ずる。

本稿の執筆に際し、千葉大学の尾松孝茂氏にご協力いただきました。ここに深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) K. Kashiwagi *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 18364.
- 2) S. Uchida *et al.*: *Opt. Lett.*, **34** (2009) 3077.
- 3) Y. Senoo *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 20233.
- 4) 妹尾由美子他：秋季応物講演会 (2009) 10a-B-5.
- 5) <http://www.alnair-labs.com/jp/>
- 6) F. Shioda *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 22499.
- 7) K. Sumimura *et al.*: *CLEO* (2009) CFS6.
- 8) N. Nishizawa: *Appl. Phys. Express*, **2** (2009) 062501.
- 9) 中嶋善晶他：秋季応物講演会 (2009) 10a-B-3.
- 10) A. Shirakawa *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 447.
- 11) S. J. McNaught *et al.*: *CLEO* (2009) CThA1.
- 12) K. Kieu *et al.*: *Opt. Lett.*, **34** (2009) 593.
- 13) D. Yoshitomi *et al.*: *CLEO* (2009) CMA2.
- 14) H. Okamoto *et al.*: *CLEO* (2009) CFB7.
- 15) S. Yamazoe *et al.*: *SPIE*, **7183** (2009) 718334.
- 16) 近藤公伯他：秋季応物講演会 (2009) 10p-B-10.
- 17) 前田康大他：春季応物講演会 (2009) 2a-ZN-7.
- 18) K. Nawata *et al.*: *CLEO/Europe* (2009) CC1-1.
- 19) H. Yoshioka *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 8919.
- 20) N. Tokurakawa *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 3353.
- 21) 秋山順他，秋季応物講演会 (2009) 10p-V-1.
- 22) M. Tsunekane *et al.*: *CLEO/Europe* (2009) CAP.30.
- 23) T. Chubachi *et al.*: *Opt. Lett.*, **34** (2009) 716.
- 24) 田中祐一他：秋季応物講演会 (2009) 10a-V-4.
- 25) Y. Tokizane *et al.*: *Opt. Express*, **17** (2009) 14517.
- 26) 萩野純平他，秋季応物講演会 (2009) 10p-V-18.

\*「半導体レーザー」の項は都合により本年度は掲載できませんでした。ご了承ください。なお、光通信用半導体レーザーについては、12.2 項をご参照ください。(編集委員会)

## 6. 量子光学・非線形光学

NTT 徳永裕己

### 6.1 概要

量子光学・非線形光学の分野では近年、量子情報技術への応用を意識した研究が活発化している。本年は筆者の専門の関係上、このような研究の記載に偏ることをあらかじめお詫びさせていただきたい。

2009年にもデバイス技術の進歩により量子暗号実験は着実に進展があり、通信距離、鍵生成率に向上がみられる。量子計算の実装実験も進んでおり、ゲートのサイズも次第に大きくなっている。一方、同様のデバイスや手法ではスケラビリティに限界があることも指摘されており、この現状の打破を目指し、大きくスケラビリティを上げる方向の研究もさまざまに始まっている。通信面のスケラビリティを上げるためには量子中継がかかせない。これを目指すために、通信波長帯での量子もつれ交換、コヒーレント光を用いた量子中継方式、量子メモリーとなるデバイスの開発、また光子と電子などの物質間のメディア変換、共振器 QED (quantum electrodynamics) による量子状態制御などの研究が進展している。光を用いた量子計算のスケラビリティのためには、さらに単一光子生成、光子数識別検出器などの進歩が望まれており、これらの研究も進展している。

本稿では、以上のような量子情報技術の研究およびボース・アインシュタイン凝縮、フォトニック結晶などその他重要な関連研究について報告する。

### 6.2 量子暗号

量子暗号実験は着実に進展しており、特に検出方法の進歩の貢献が大きい。差動位相シフト方式において、10 km という短距離ではあるが 1.3 Mbits/秒という高い鍵生成率を達成する実験が報告されている。この実験では、検出時にまず周波数上方変換を行い、その後 HPD (hybrid photo-detector, 光電子増倍管のダイノード部分をアバランシェダイオードに置き換えたもの) で検出している<sup>1)</sup>。200 km の距離間に量子もつれを配布し、量子鍵配送を行う実験も行われた。ここでは検出器として、キャパシティブノイズを除去する自己差分回路を組み込み、アフターパルスの低減に成功したアバランシェ・フォトダイオード (APD) を用いている<sup>2)</sup>。理論面では、差動位相シフト型量子鍵配送方式の安全性証明において進展がみられ、単一光子源を用いた際の無条件安全性が証明された<sup>3)</sup>。

### 6.3 量子中継, 量子ネットワーク

量子中継においては、量子もつれ交換が鍵となる技術の

ひとつである。分散シフト光ファイバー中での四光波混合により生成された通信波長帯域の量子もつれ光子対に対して、量子もつれ交換が初めて行われた<sup>4)</sup>。また、量子中継において量子ビットをノードに保存するためには、量子メモリーが必要となる。これを目指したものとして、パラメトリック下方変換光を電磁誘起透明化により冷却原子集団に保存、再生し、またその際非古典性の保持を確認した実験が報告されている<sup>5)</sup>。また、量子中継を実現する方法として、電子スピンや核スピンなどの物質 (離散変数) とコヒーレント光 (連続変数) をハイブリッドに用いた方式が以前より提案されていたが、この種の方式においては、ロスエラーのもとで最適な性能をもっている改良方式が提案された<sup>6)</sup>。さらに、量子計算機と量子通信が一体となった量子ネットワークを築くためには、伝送の役割をもつ光子とメモリーの役割の物質の間において量子情報を交換できるようになることが望まれる。これを目指した研究として、光子と電子スピン間で量子状態転写が行われた<sup>7)</sup>。また共振器 QED は、光子と原子間の量子状態転写、単一光子レベルの光に対する非線形位相シフト、決定論的単一光子生成など、さまざまな量子状態制御のための応用が期待されている。セシウム原子と結合した微小トroid共振器へのテーパー・ファイバーを通した単一光子の入出力が、効率 0.6 で行われたという実験の報告がされている<sup>8)</sup>。

### 6.4 量子計算

量子ゲートに関する試みとしては、入力した状態から量子もつれ状態のみを残す量子もつれフィルターの実験が線形光学素子を用いて巧みに行われた<sup>9)</sup>。スクィーズド光を用いた研究としては、9モードの量子誤り訂正の実験が報告された<sup>10)</sup>。また、光格子中の冷却原子を用いた量子コンピューターの提案が出された。量子コンピューターとして利用するためには、光格子中の原子一つ一つの個別アクセスが課題であったが、この方式では磁場勾配を用いる提案をしている<sup>11)</sup>。また、物理的制限から近接相互作用による演算のみが望ましい量子計算モデルに向けたフォールトトレランス方式として、トポロジカル量子計算が注目されており、実装方法に関する提案も行われている<sup>12)</sup>。

### 6.5 光子生成, 検出

量子状態生成としては、単一光子源や量子もつれ源が望まれている。単一光子は単一原子からの自然放出制御により得ることができるが、レーザー冷却やトラップの必要のない量子ドットなどの固体素子上の人工原子からの簡便な単一光子源が期待されている。新たな方式として、ZnSe/ZnMgSe 結晶中の <sup>19</sup>F ドナー不純物に束縛された励

起子からの発光の実験が行われ、2つの独立の束縛励起子からの発光による光子の識別不可能性が確認された<sup>13)</sup>。結晶の均一性がよければ、独立の束縛励起子からの発光も同じ波長をもつはずなので、不均一広がり大きい自己形成型の量子ドットに比べスケラビリティの面で有望である。

検出器は、従来からの APD などの半導体検出器の性能発展を目指すもの、および、超電導を利用した新しい検出器の開発に大きく分かれる。APD においては、アフターパルス小さくすることで高繰り返し動作が可能になる。正弦波電圧を用いることでこれを達成した APD の性能が上がっており、1.5 GHz の繰り返し周波数に至っている<sup>14)</sup>。光子入射によって生じた温度変化を超伝導体の転移領域を利用して検出する超電導転移端センサー (TES: transition edge sensor) は、エネルギー分解能、量子効率が高く、光子数識別検出器として非常に有望である。これについては、量子効率は 850 nm と 1550 nm の波長域においてそれぞれ 81% と 64%、また計数率は 1 MHz を超えると報告されている<sup>15)</sup>。

## 6.6 その他の量子光学・非線形光学

その他にも重要な研究が多く行われている。光格子中のイッテルビウム (Yb) 原子のボース・アインシュタイン凝縮において、超流動状態からモット絶縁相への相転移が観測された。アルカリ金属以外で確認されたのはこれが初めてであった<sup>16)</sup>。また、第2種超伝導体の薄膜にピン留めされた磁束と、超伝導体外部からの対向する磁場で形成した四重極磁場ポテンシャルにより、中性原子を安定に捕捉できることが実験により確認された<sup>17)</sup>。フォトニック結晶においては、新しい三次元フォトニック結晶の作製法が示された。半導体に斜め2方向からエッチングするというシンプルな作製法であり、三次元フォトニック結晶をより簡略に一括して形成することに成功した<sup>18)</sup>。また、高Q値フォトニック結晶共振器の動的制御による断熱的波長シフトが、時間分解分光測定により直接的に観測された。これは、弦楽器において、音を鳴らしている間に弦の張力を変えると音程が変わる現象に対応している<sup>19)</sup>。非線形光学では、フォトニック結晶ファイバー中で単一光子レベルの微弱コヒーレント光によって誘起される光カー効果の測定が報告された。ここでは、非常に小さい位相シフトを観測するためにサニャック干渉系を組み、環境からくる位相変化の減少に成功している<sup>20)</sup>。また、量子力学の原理実験のひとつとして、ハーディのパラドックスの実験が行われた。この実験では量子もつれ光子を用い、弱い測定 (weak measurement) を行うことによりパラドックスの直接的な

観測に成功している<sup>21)</sup>。

## 6.7 展 望

量子情報に関しては、2地点間の量子暗号実験、小規模な量子ゲート動作の実証といった研究は成熟しつつある。今後はこれを打破するために、長距離化、大規模化を目指した研究が増えてくるであろう。そのためには、まず量子メモリーが必要となってくるが、これに関してはダイヤモンド中の窒素-空孔中心<sup>22)</sup>などさまざまなデバイスにおいて研究が活発化しており、今後の進展が期待される。将来的なネットワーク利用のことを考えると、光と物質の相互作用、情報交換を合わせて検討していかなくてはならない。またスケラブルな量子計算のためには、光の生成、制御、検出において、量子性を確認したというレベル以上の高精度なものが求められてくるであろう。そのためには光デバイスの進歩も期待されており、今後はフォトニック結晶なども量子情報に大いに応用されていく可能性がある。量子情報以外の用途としては、光格子中の冷却原子は、その制御性のよさから量子シミュレーションとしても期待が高い。量子光学は、さまざまな物質との相互作用を含めた研究など、年々広がりを見せている。今後も活発な研究が続くことは間違いないだろう。

## 文 献

- 1) Q. Zhang *et al.*: *New J. Phys.*, **11** (2009) 045010.
- 2) J. F. Dynes *et al.*: *Opt. Exp.*, **17** (2009) 11440.
- 3) K. Wen *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **103** (2009) 170503.
- 4) H. Takesue and B. Miquel: *Opt. Exp.*, **17** (2009) 10748.
- 5) K. Akiba *et al.*: *New J. Phys.*, **11** (2009) 013049.
- 6) K. Azuma *et al.*: *Phys. Rev. A*, **80** (2009) 060303 (R).
- 7) H. Kosaka *et al.*: *Nature*, **457** (2009) 702.
- 8) T. Aoki *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **102** (2009) 083601.
- 9) R. Okamoto *et al.*: *Science*, **323** (2009) 483.
- 10) T. Aoki *et al.*: *Nat. Phys.*, **5** (2009) 541.
- 11) K. Shibata *et al.*: *Appl. Phys. B*, **97** (2009) 753.
- 12) S. J. Devitt *et al.*: *New J. Phys.*, **11** (2009) 083032.
- 13) K. Sanaka *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **103** (2009) 053601.
- 14) N. Namekata *et al.*: *Opt. Exp.*, **17** (2009) 6275.
- 15) D. Fukuda *et al.*: *Metrologia*, **46** (2009) S288.
- 16) T. Fukuhara *et al.*: *Phys. Rev. A*, **79** (2009) 041604 (R).
- 17) F. Shimizu *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **103** (2009) 253002.
- 18) S. Takahashi *et al.*: *Nat. Mater.*, **8** (2009) 721.
- 19) T. Tanabe *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **102** (2009) 043907.
- 20) N. Matsuda *et al.*: *Nat. Photonics*, **3** (2009) 95.
- 21) K. Yokota *et al.*: *New J. Phys.*, **11** (2009) 033011.
- 22) 水落憲和: *日本物理学会誌*, **64** (2009) 910.

## 7. 近接場光学

東京大 川添 忠

### 7.1 概 要

ここでは近接場光学の2009年の進展を述べる。金属材料と表面プラズモンに関連する研究報告は全体の半数以上を占め、その多くはセンサーとしての利用を想定しているが、最近のエネルギー問題を反映して、発光・受光素子への応用を目的としたナノアンテナ・メタマテリアルの発表が増加している。また、半導体量子ドットおよび金属微粒子と量子ドット間の相互作用を用いた研究では、エネルギー移動が議論されている。さらには、近接場顕微鏡の機能・性能向上を目指した報告も行われている。この中において特に目立っていたのは、近接場光による化学反応と加工への応用であった。

以上のような近接場光学分野の進展を、勝手ながら、計測、制御、加工、理論・シミュレーションの4つの観点に分類して振り返る。

### 7.2 計 測

近接場光学顕微鏡の開発をはじめ、近接場光を使った計測に関する研究は、近接場光学の根幹であり、進展は続いている。例えば、表面増強ラマン散乱(SERS)を使った計測では、分子の種別判定にとどまらず、少数分子の配向判定<sup>1)</sup>や単一分子の電極間の架橋状態を電気伝導度とSERSの同時計測により評価するなどの報告が行われている<sup>2)</sup>。もちろん、生体分子検出の高感度化も、プラズモンの導波モードを利用するなどして進んでいる<sup>3)</sup>。表面プラズモンの共鳴を使った圧力センサー<sup>4)</sup>は、既存の方法では測ることの難しい場所への応用が期待される。また、近接場光を用いた計測は探針-試料間の距離依存性が大きい。タッピングモード原子間力顕微鏡(AFM)により探針を制御しタッピング周波数よりも高速なゲートを励起光に加えることで、探針と試料の距離がある一定値である場合のチップ増強ラマン(TERS)信号を得る方法も報告され、近接場光学顕微鏡の機能・性能の向上が期待される<sup>5)</sup>。これと同様に、探針加圧効果を使った計測は、近接場光学顕微鏡の空間分解能向上に寄与すると思われる<sup>6)</sup>。アクティブな半導体素子の評価には光励起発光だけでは不十分であり、電子注入による発光特性がきわめて重要な知見を与える。これら光励起と電子励起のナノスケール計測が可能で、新しい顕微鏡による計測結果が報告されている<sup>7)</sup>。以上のように、単なる高分解能な顕微鏡として近接場光学顕微鏡を使うだけでなく、同時に多数の物性情報を得るための探針としての利用や、より高度な制御を行う

ことで高分解能化・高機能化させる研究が続いている。

### 7.3 制 御

この節の「制御」は光制御の意味である。2009年の「近接場光の」あるいは「近接場光による」制御の研究報告は多い。例えば、近接場光を用いた光の周波数変換技術に関しては、DCM色素微結晶を用いた近接場光による非断熱遷移による赤外光-可視光変換<sup>8)</sup>や、 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{SrTiO}_3$  ナノ微粒子の周波数上方変換による発光強度の表面プラズモンによる増強<sup>9)</sup>、金属ダイマーの電場増強を利用した二次高調波発生<sup>10)</sup>、量子ドット間のエネルギー移動を利用した周波数下方変換による光電変換素子の効率向上<sup>11)</sup>、金微粒子による二次高調波発生<sup>12)</sup>などが報告されている。このうち、非断熱遷移を利用した波長変換技術は、さらに赤外光の時間分解計測への応用に進展している<sup>13)</sup>。光スイッチ等への応用を想定している研究では、 $\text{ZnS-AgInS}_2$ の三次非線型感受率の応用<sup>14)</sup>や、 $\text{InAs}$ 量子ドット間の室温でのエネルギー移動の利用<sup>15)</sup>、金属ナノ微粒子自身の三次非線形感受率の応用<sup>16)</sup>などが報告された。近接場光のエネルギーを輸送するための研究は、2つに分類される。1つは導波路とみなせるプラズモンなどの波動性を利用したエネルギー輸送であり、もう一方は励起移動を利用したエネルギー輸送である。前者では例えば、金属・有機物複合コアシェル構造ナノ微粒子の提案と作製<sup>17)</sup>、 $\text{Sn seed}$ 法による $\text{Ag}$ ナノ微粒子分散膜の作製<sup>18)</sup>、高周波伝送路のプラズモン導波路への応用<sup>19)</sup>が報告され、後者では $\text{CdSe/ZnS}$ コアシェル量子ドット間のエネルギー移動を用いた伝送<sup>20)</sup>や、サイズの異なる量子ドット間の励起伝送のための最適混在比の報告<sup>21)</sup>が行われている。この励起伝送路を、DNAに $\text{ZnO}$ 量子ドットを結合させて配列することによって実現する方法の報告も行われた<sup>22)</sup>。近接場光は発光素子の受光効率向上にも寄与する。例えば、蛍光灯に代わる照明光源実現を目指した $\text{Ag}$ 微粒子による $\text{InGaN/GaN}$ 量子井戸の発光増強<sup>23)</sup>や、単なる増強だけではなく単一量子ドットの光アンチバンチング挙動から増強された発光の単一光子性が低下するという報告がなされている<sup>24)</sup>。さらに、発光増強の偏光制御の報告<sup>25)</sup>も行われた。もちろん、発光の逆過程である吸収の増強に起因する受光素子の感度増強の報告<sup>26)</sup>も行われており、そこで用いられる近接場光発生素子はプラズモンの励起を容易にするための光アンテナであるので、プラズモンアンテナとよばれている。金属ナノアレイ構造<sup>27)</sup>やT字配列プラズモン導波路の偏光特性<sup>28)</sup>に関しても、興味深い報告が行われている。

## 7.4 加工

近接場光の加工への応用は、近接場光学の中で2009年に最も進捗のあった研究領域ではなかろうか。加工の基礎となる近接場光による光化学反応に関する報告が行われ、近接場光によって光化学反応が加速されるという結果が得られている<sup>29)</sup>。スパッタリング時に光を照射するだけで基板表面の凹凸に近接場光が発生し、この近接場光によって堆積される材料の平滑度の向上や基板の凹凸の平坦化が実現する方法<sup>30)</sup>や、逆に塩素雰囲気中に光を照射し、基板の凹凸で発生する近接場光によって基板をエッチングし平坦化する方法<sup>31)</sup>は、実用が非常に近いと思われる。近接場光による光リソグラフィでは、フォトレジストが反応しない長波長の光でのナノ構造作製が報告され<sup>32)</sup>、特に非断熱過程を利用した光リソグラフィでは、非干渉性や偏光依存性が小さいことを活用し作製されたX線用フレネルゾーンプレートの素子性能が実用レベルに達しており、今後の発展が期待される<sup>33)</sup>。同じく近接場光による非断熱過程を利用した光化学気相堆積では、作製されるInGaAsの組成が励起光源の波長によって制御されるという報告もある<sup>34)</sup>。アゾベンゼン分子は近接場光の偏光を感じ取り配列する。これを利用した自己形成的ナノ構造作製の報告では、近接場光強度と分子の配向度の関係が議論された<sup>35)</sup>。

## 7.5 理論・シミュレーション

近接場光を有効に利用するための構造は、現在もなお容易に作製できないサイズである。一方、伝搬光を照射した際に得られる近接場光の分布を計算するシミュレーターは数多く市販され、新機能素子の機能を発現させるための最適化等にはシミュレーションが欠かせない。近接場光の分布を計算する手法としては、FDTD (finite-difference time-domain) シミュレーションが一般的であるが、その問題点の指摘が行われている<sup>36)</sup>。それでもなお、現時点ではFDTDシミュレーションは近接場光の分布を計算する最も強力な方法であり、金属テーパー構造を利用したプラズモンの集束素子<sup>37)</sup>、金の3つの層とSiO<sub>2</sub>の2つの層を交互に並べたプラズモン共振器<sup>38)</sup>、2つの開口をもつ近接場光探針<sup>39)</sup>などの提案が行われている。また、現在FDTDでは取り入れることの難しい光学非線形性が取り込める手法によって、エッジ構造やカプス(尖点)構造の高次高調近接場光の理論による導出<sup>40)</sup>が新しく取り組まれており、今後の発展が期待される。

## 7.6 その他

近接場光による微細化の究極と思われる原子操作の研究も着実に進捗している<sup>41)</sup>。また、増強機構に不明な点が残っているSERSのアニオンによる電子移動相互作用による説

明<sup>42)</sup>や、増強電磁場の定量的検証も報告されている<sup>43)</sup>。

## 7.7 展望

光学特性の異なる材料の界面や表面で発生する近接場光は、近年の観測、加工、素子等の高空間分解能化や微細化の進捗に伴い、それら微小領域での光学的物理現象の理解や利用には必要不可欠な存在となっている。これは同時に、近接場光学の応用範囲の広がりをもたらす。したがって今後は、道具としてさまざまな分野に近接場光学を利用する研究と、近接場光を主体としたさまざまな素子や手法の研究が、異なる2つの方向、すなわち前者は他研究領域への応用、後者は近接場光学の進展に寄与する形で進むと思われる。近接場光学によって実現する光学素子や光学的手法は機能・性能において画期的であるが、現状では、その量的規模に比較して経済的コストに優れているとはいえない。しかし、これは最近の省エネルギー・省資源の社会的要求に対し、経済の縮小といった負の影響を伴わない最良の答えが用意できる研究分野であり、今後の進展が楽しみである。

## 文 献

- 1) 高瀬 舞他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZE-1.
- 2) 小西達也他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZE-2.
- 3) 加藤貴史他：秋季応物講演会 (2009) 8a-C-2.
- 4) 松村和幸他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-1.
- 5) 市村垂生他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZE-5.
- 6) 矢野隆章他：秋季応物講演会 (2009) 8a-C-7.
- 7) 尾身博雄他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZE-7.
- 8) 藤原弘康：春季応物講演会 (2009) 30p-ZE-6.
- 9) 小林明弘他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-4.
- 10) 岡本敏弘他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZE-10.
- 11) 太田竜一他：春季応物講演会 (2009) 31a-H-6.
- 12) 田中大輔他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-18.
- 13) 藤原弘康他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-7.
- 14) 大寺和徳他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZE-9.
- 15) 川添 忠他：春季応物講演会 (2009) 31a-H-10.
- 16) 武田良彦他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-17.
- 17) 山田 紘他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-1.
- 18) 丸山美保他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-1.
- 19) 原口雅宣他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-10.
- 20) 野村 航他：春季応物講演会 (2009) 31a-H-9.
- 21) 成瀬 誠他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-3.
- 22) 森島 哲他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-5.
- 23) 岡本晃一他：秋季応物講演会 (2009) 8a-C-10.
- 24) 内記博之他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-2.
- 25) 桐原明宏他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-3.
- 26) 佐藤弘明他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-8.
- 27) 福田浩章他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-8.
- 28) 大矢好裕他：OPJ (2009) 26aE2.
- 29) 落合隆夫他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-5.
- 30) 梁瀬佳旗他：春季応物講演会 (2009) 31a-H-3.
- 31) 平田和也他：春季応物講演会 (2009) 31a-H-5.
- 32) 上野貢生他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-15.
- 33) 高橋永久他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-16.
- 34) 八井 崇他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-8.
- 35) 横川泰人他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-9.

- 36) 大石進一：春季応物講演会 (2009) 30p-ZE-3.
- 37) 山本和弘他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-7.
- 38) 江部裕貴他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-11.
- 39) 中野元博他：春季応物講演会 (2009) 1p-H-5.
- 40) 坂野 斎他：秋季応物講演会 (2009) 8p-C-10.
- 41) 山田俊吾他：春季応物講演会 (2009) 31a-H-11.
- 42) 丸山芳弘他：春季応物講演会 (2009) 30a-ZE-3.
- 43) 伊藤民武他：春季応物講演会 (2009) 1a-H-5.

## 8. 光応用計測

室蘭工大 加野 裕

### 8.1 概 要

光応用計測の分野では、計測システムを構成する光源、光学素子、検出器の性能向上や、新しい計測原理の開発に基づく新展開が数多く報告されている。特に、超短パルスレーザー、高強度レーザー、特異な強度分布をもつビームを出力するレーザー、広帯域光源、光周波数コムなどの光源技術や、フォトニック結晶、液晶素子、光集積化回路などによる光波制御技術の進展はめざましく、これらを利用した新しいセンシング技術、イメージング技術が精力的に開発されている。また、光応用計測技術の応用研究も盛んで、たとえば、生体分子や生体細胞をイメージングする光応用生体計測や、大気汚染、空中浮遊物質を検出する光応用環境計測において新しい展開がみられる。さらに、従来から進められてきた研究においても、精度、ダイナミックレンジ、感度、応答速度、空間分解能、波長分解能などを向上させる取り組みが多数報告されている。

### 8.2 生体計測・環境計測

ライフサイエンス分野の基礎研究において、光応用生体計測技術の存在感は増すばかりである。次世代の細胞観察技術として期待される測定原理についても、実用性の検証が進められ、多くの進展がみられる。まず、蛍光分子の光吸収が飽和することによって生じる高次の非線形蛍光応答を利用する飽和励起顕微鏡について、細胞内小器官の超解像イメージング<sup>1)</sup>が報告されている。多焦点コヒーレントアンチストークスラマン散乱顕微鏡については、生きたHeLa細胞の無染色リアルタイムイメージング<sup>2)</sup>が報告されている。このほか、蛍光分子の光スイッチング機能を利用して超解像を得る擬似多光子蛍光顕微鏡<sup>3)</sup>など、新しい測定原理の提案も行われている。

環境計測に関する研究も、地球環境に対する関心の高まりからますます盛んになり、分光測定や散乱光測定などに基づいた環境物質検出の実績が報告されている。たとえば、散乱太陽光の紫外・可視・近赤外スペクトルからオゾンなどの吸収バンドやエアロゾルの光学特性を導出する手

法<sup>4)</sup>や、遠隔地点の航空障害灯を光源に用いた吸収スペクトル測定により、大気中微量気体測定を行う手法<sup>5)</sup>などの実際が報告されている。また、空気中を浮遊するアスベスト粒子を散乱光測定によってリアルタイムでモニターする際に、粒子の種別を判定する手法<sup>6)</sup>や、測定対象ではない有機物繊維状粒子を除去する手法<sup>7)</sup>が報告されている。ほかに、廃液中のベンゼンを検出するためのポータブルセンサー<sup>8)</sup>などが報告されている。

### 8.3 軸対称ビームを利用する計測

金属表面や、屈折率差の大きい誘電体境界面に屈折率の高い媒質側から光を絞り込む場合などでは、放射状に偏光した軸対称偏光ビームを用いると、スポットサイズを小さくすることができる。この特性は、Pt基板表面に成膜された単分子膜から発生する第二高調波を測定して膜観察を行う際に、空間分解能を高めるのに有用である<sup>9)</sup>と報告されている。また、0次ベッセルビームを金属薄膜に照射して表面プラズモンを局所励起し、金属表面に成膜された生体膜観察がもたらす微弱な屈折率を測定して膜観察を行う手法において、この偏光が高空間分解能化に有用である<sup>10)</sup>と報告されている。さらに、この偏光ビームを絞り込むと、光軸方向に強い電場が生成されるため、基板に対して垂直に配向する液晶分子も高感度にとらえられること<sup>11)</sup>などが報告されている。

また、軸対称な光渦ビームの計測応用としては、たとえば、物体までの距離の変化を遠隔計測する手法<sup>12)</sup>が提案されている。この手法では、軸対称な光渦ビームが、非対称な反射率分布を有する物体によって反射されると、渦の中心の零点が光波の伝搬にともなって周辺部へ移動していくことを利用している。

### 8.4 そ の 他

フォトニック結晶の計測応用としては、自己クローニング型フォトニック結晶を用いた波長板アレイ、偏光子およびCCD (charge-coupled device) で構成した簡便な偏光イメージングセンサーによって数波長程度のリターダンスを二次元観察した結果<sup>13)</sup>や、フォトニック結晶結合導波路の熱遅延チューニングによってキロヘルツオーダーの応答速度を実現する高速な相関器<sup>14)</sup>が報告されている。

また、光周波数コムを利用する計測システムの開発も、光周波数コムが光周波数の基準として有用であることから盛んに進められている。たとえば、周波数可変CW (continuous wave) レーザーを光周波数コムに同期させて広い帯域にわたり絶対周波数を高速に制御する光源に関し、波長走査領域の拡大と高精度分光への応用<sup>15)</sup>が報告されている。また、テラヘルツ帯光ビート位相検出による距離計

測の高分解能化<sup>16)</sup>や、光周波数コムとヘテロダイン検波方式を用いた分光システムにおいて、コムスペクトルの強度が低い領域での吸収スペクトル測定を可能にするために、コムを部分的に切り出してピーク強度を増大させ、測定帯域を拡大する手法<sup>17)</sup>などが報告されている。

さらに、高精度なレーザージャイロに関する技術開発も活発に進められており、Er 添加光導波路を利得媒質に用いたファイバリングレーザージャイロ<sup>18)</sup>や、半導体素子上に要素部品を集積したモノリシックリングレーザージャイロ<sup>19)</sup>などが報告されている。

このほか、ソリトン効果を取り入れたファイバー型干渉計で構成された高速・広走査領域・高分解能三次元形状計測システム<sup>20)</sup>や、半導体レーザーの注入電流の変調により高速に測定波長を走査可能な吸収分光システム<sup>21)</sup>、音波を受けると変位する物体を表面プラズモンが形成する減衰電場の中に置いて、反射光強度の変化から音響振動を測定するシステム<sup>22)</sup>などが報告されている。

## 8.5 展 望

先に挙げた光源技術、光波制御技術、光検出技術の開発はますます盛んになっており、その恩恵を受ける光応用計測技術はさらにめざましい発展を遂げると期待できる。さらに、測定対象物質を標識する分子の特異な応答を積極的に利用したり、より複雑な生化学反応系を計測システムに組み入れたり、超音波などとの複合計測を行うなどの工夫により、近年は測定対象のパラエティーが著しく増大している。今後もこの流れは引き継がれ、光応用計測技術はさらに進化していくであろう。

## 文 献

- 1) 山中真仁他：秋季応物講演会 (2009) 8a-ZM-10.
- 2) 南川丈夫他：秋季応物講演会 (2009) 8p-ZM-1.
- 3) 磯部圭佑他：秋季応物講演会 (2009) 8a-ZM-11.
- 4) 栗山健二他：秋季応物講演会 (2009) 10a-G-11.
- 5) 蒲 靖人他：秋季応物講演会 (2009) 10a-G-9.
- 6) 橋口孝聖他：春季応物講演会 (2009) 1p-K-14.
- 7) 樋口友己他：秋季応物講演会 (2009) 10a-G-10.
- 8) S. Camou 他：春季応物講演会 (2009) 31a-K-4.
- 9) 新岡宏彦他：秋季応物講演会 (2009) 11a-G-6.
- 10) 渡辺向陽他：春季応物講演会 (2009) 30a-C-7.
- 11) 大久保隆行他：春季応物講演会 (2009) 1p-K-10.
- 12) 佐藤世智他：OPJ (2009) 25aD1.
- 13) 佐藤 尚他：秋季応物講演会 (2009) 11a-G-2.
- 14) 石倉徳洋他：秋季応物講演会 (2009) 10a-G-5.
- 15) 高橋永斉他：OPJ (2009) 25aD5.
- 16) 横山修子他：春季応物講演会 (2009) 1p-K-5.
- 17) 藤井健一郎他：春季応物講演会 (2009) 1p-K-7.
- 18) 田中 潤他：秋季応物講演会 (2009) 10a-G-1.
- 19) 田中智子他：秋季応物講演会 (2009) 10a-G-3.
- 20) 太田健史他：OPJ (2009) 24aD2.
- 21) 片山光一他：秋季応物講演会 (2009) 10a-G-12.
- 22) 野本和利他：秋季応物講演会 (2009) 11a-G-5.

## 9. 干 渉 計 測

東京工芸大 陳 軍

### 9.1 概 要

干渉計測に関する研究発表は 2009 年も活発に行われ、11 月下旬に開催された日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2009 では約 30 件の発表があった。春季応物講演会で約 20 件、秋季応物講演会で 10 件の発表がなされた。ここで、2009 年の干渉計測に関連した研究の進展を手法ごとに概観する。

### 9.2 白色干渉計・低コヒーレンス干渉計

発光スペクトル幅の広い光源を用いた白色干渉計や低コヒーレンス干渉計は、生体組織の断層像の取得や、物体の微細な構造や形状の測定、透明膜の膜厚や屈折率分布の計測などの目的に活発に研究されている。生体計測の分野で実用化されつつある光コヒーレンストモグラフィー (OCT) は盛んに研究され、多くの報告があったが、「医学・生物応用光学」などの項で解説されるので、ここではそれ以外の研究を取りあげたい。

白色干渉計による膜厚計測の研究が多く報告されている。安価で高分解能な膜厚の計測法として、変調 ZnSe 系白色 LED の青色光と蛍光の変調応答速度の違いを利用して広帯域発光の蛍光成分のみを抽出して用いる低コヒーレンス干渉計が提案された<sup>1)</sup>。

また、低コヒーレンス干渉による多層基板の温度と膜厚の計測研究においては、スーパーコンティニューム光による計測分解能の向上が図られ、波長依存性が検討された<sup>2)</sup>。また、物体表面膜の表面反射や分散効果を考慮に入れ、膜厚が小さい場合では、干渉縞の包絡線の最大位置検出に比べ、位相ゼロクロス法はより誤差が小さいことが示された<sup>3)</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は、共通光路干渉計による耐環境性の向上が図られ、100 m 先のリニアスケールの遠隔その場校正が行われた<sup>4)</sup>。また、スーパーミネセントダイオードを用いた低コヒーレンス干渉計により、プラスチック板の二次元複屈折分布が測定された<sup>5)</sup>。さらに、白色干渉計における結像レンズの収差の影響が検討された<sup>6)</sup>。

### 9.3 波長走査干渉計

波長走査干渉法は、繰り返して反射や多数の反射面が存在する場合の表面形状や光学的厚さ分布の計測に有効である。リットマン型外部共振器半導体レーザーを用いた波長走査フィゾー干渉計を用いて、重畳された干渉縞から周波数選択する位相シフト干渉法を用い、半導体マスクガラス

の光学的厚さ分布の測定が行われた<sup>7)</sup>。また、光源のパワー変動や被検物体の設置誤差に影響されない多点位相シフト・フィゾー干渉計の報告があり<sup>8)</sup>、外部共振器型半導体レーザーを用いた正弦波長走査干渉計による粗面の形状測定が行われた<sup>9)</sup>。さらに、広帯域周波数変調垂直共振器面発光レーザーを用いた波長走査干渉計が報告された<sup>10)</sup>。

#### 9.4 従来型干渉計・干渉応用計測

従来型干渉計と干渉応用計測においても、測定対象や測定環境に合わせた研究が多く報告された。位相変調型微分干渉顕微鏡の研究において、弱位相領域を超えた場合の計測誤差の補正法や位相反転の解消法が報告され<sup>11)</sup>、また、画像接続技術による計測範囲の拡大が報告された<sup>12)</sup>。ウォラストンプリズムの横移動を用いた共通光路位相シフト干渉顕微鏡<sup>13)</sup>や、位相ロック技術を用いた微小位相計測システムの高分解能化が報告された<sup>14)</sup>。統計的干渉法の研究においては、計測レンジの拡大の報告がなされ<sup>15)</sup>、90度位相シフトした2つの干渉パターンを用いた動的な変形計測法が報告された<sup>16)</sup>。物体の変位計測において、直交偏光の2モード発振レーザーを光源に用いたマイケルソン干渉計の報告があった<sup>17)</sup>。

そのほかに、直交2パルス同時発生波長可変型パルス光源を用いた三次元光計測システムが報告された<sup>18)</sup>。波長計とプリズムペア干渉計の一部を共通化することにより、屈折率と光源波長の同時校正が行われた<sup>19,20)</sup>。振動などの外乱の影響を取り除くため、被検物体と参照鏡間の相対運動を用いたドップラー位相シフト干渉計が報告された<sup>21)</sup>。ファイバー型位相シフト点回折干渉計による大口径ミラーの計測精度に関する検討<sup>22)</sup>や、空間キャリアを用いた90度位相シフト干渉計の提案がなされた<sup>23)</sup>。

#### 9.5 デジタルホログラフィー

撮像素子の高分解能化や計算機の性能の向上に伴い、デジタルホログラフィーの研究が盛んに行われている。位相シフトデジタルホログラフィーを用いた粗面物体の三次元移動計測が報告された<sup>24)</sup>。フェムト秒レーザーによりガラス中に励起される屈折率変化やマイクロキャビティがデジタルホログラフィーで観測され<sup>25)</sup>、フレネル回折計算を用いた焦点前後の位相分布の再生が行われた<sup>26)</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る物体変形の動的計測が報告された<sup>27)</sup>。

偏光方向が直交で入射角の異なる2光束を用いて物体を照射して、複数のホログラムを一度に記録する、奥行き方向に広範囲高精度の三次元計測が可能な単一波長単一

ショットデジタルホログラフィーが提案された<sup>28)</sup>。複数波長に拡張することで、分光画像と三次元形状の同時計測法が提案された<sup>29)</sup>。波長が広帯域に変化可能な外部共振器型半導体レーザーを用い、粗面物体の段差が計測された<sup>30)</sup>。

空間キャリアを用いるシングルショット位相シフトデジタルホログラフィーの参照光入射角の許容度解析が行われた<sup>31)</sup>。

#### 9.6 展 望

2009年の干渉計測分野における進展を、手法ごとに分類し概観した。光干渉計測は波動性という光の基本性質を利用し、干渉信号(画像)から被検の位相情報を高精度に抽出する技術として、数年前までは、多彩な光源や光デバイス、高分解能・低歪みの撮像素子や高性能のコンピューターなどの要素技術のめざましい発展と相まって、ヘテロダイン干渉法や、位相シフト干渉法、フーリエ変換法、ヒルベルト変換法などスマートな干渉計測法が一斉に花を開いた。これらの方法は光の領域にとどまらず、X線干渉計や電子線ホログラフィーなどにも応用され、大きな広がりを見せてきた。ここ数年、デジタルホログラフィーの応用など新しい展開をみせている分野もあるが、新しい干渉計測法に関する研究のペースが遅くなったように感じられる。しかし、厳しい現場でも機能する実用化に向けてはまだまだ多くの課題が残っており、また、今は次の大きな飛躍をはぐくむ大事な時期でもある。新しい原理や新規デバイスによるシーズ志向の研究と、計測対象や使用環境に即したニーズ志向の研究において、光干渉計測のさらなる発展を期待したい。

#### 文 献

- 1) 太田貴之他：光学，**38** (2009) 576.
- 2) 景山哲教他：秋季応物講演会 (2009) 11a-G-10.
- 3) 太田智章他：OPJ (2009) 26pP9.
- 4) 平井亜紀子他：OPJ (2009) 26pP6.
- 5) 印南高明他：OPJ (2009) 26aF4.
- 6) 菅原 滋他：OPJ (2009) 26pP23.
- 7) 日比野謙一他：OPJ (2009) 26pP4.
- 8) 船水英希他：秋季応物講演会 (2009) 11p-G-4.
- 9) 吉田知也他：OPJ (2009) 25pF11.
- 10) 川又悠希他：OPJ (2009) 26pP17.
- 11) 石渡 裕他：光学，**38** (2009) 145.
- 12) 長井宏樹他：OPJ (2009) 26pP11.
- 13) 陳 軍他：秋季応物講演会 (2009) 11p-G-2.
- 14) 渡邊恵理子他：春季応物講演会 (2009) 1a-K-5.
- 15) 小林幸一他：春季応物講演会 (2009) 1a-K-11.
- 16) 栗田直亮他：秋季応物講演会 (2009) 11p-G-1.
- 17) 荻窪 徳他：秋季応物講演会 (2009) 11p-G-5.
- 18) 太田健史他：秋季応物講演会 (2009) 11a-G-11.
- 19) Y. Hori *et al.*: Appl. Opt., **48** (2009) 2045.
- 20) 堀 泰明他：OPJ (2009) 25pF7.

- 21) 菊池裕一他：OPJ (2009) 26aF6.
- 22) 松浦敏晋他：春季応物講演会 (2009) 1a-K-3.
- 23) 喜入朋宏他：OPJ (2009) 26aF9.
- 24) 中橋末三他：春季応物講演会 (2009) 1a-K-6.
- 25) 伊坂充弘他：春季応物講演会 (2009) 1a-K-12.
- 26) 田北啓洋他：OPJ (2009) 25pF12.
- 27) 片岡基史他：秋季応物講演会 (2009) 11p-G-6.
- 28) 田原 樹他：OPJ (2009) 26aF7.
- 29) 田原 樹他：OPJ (2009) 26pP19.
- 30) 原田康浩他：OPJ (2009) 26aF5.
- 31) 吉田和希他：OPJ (2009) 26pP13.

## 10. 光情報処理

大阪大 香川景一郎

### 10.1 概要

筆者は2001年3月まで光コンピューティングの研究に従事した後、6年半 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) イメージセンサーの開発に携わり、2007年10月に情報光学分野に復帰した。そのため、本稿は正味2年間に得た情報に基づいている。それにしても2009年は大きな変化の年であった。情報光学は、画像情報を含む多様な光学情報を処理する、または光情報として取り出す、提示する分野である。そのため、情報光学システムはもちろん光のみで完結するシステムではなく、電子コンピューターの果たす役割が大きい。マイクロプロセッサのクロック競争が終わり、マルチコアに代表される並列化に舵が切られたことは、PC (personal computer) クラスターによる粗粒度並列コンピューティングよりもはるかに大きなインパクトを、情報光学分野に与えた。特に、GPU (graphics processing unit) の汎用コンピューティングへの応用を狙った NVIDIA 社の戦略<sup>1)</sup>は、1 TFLOPS (floating point operations per second) に迫るとてもない性能をもつに至るとともに、光の並列性を連想させる細粒度並列プロセッサを生み出し、光情報研究者の好奇心を強く刺激している。このような流れに乗ってか、コンピューターを活用した光学分野の研究を総合的に扱うデジタルオプティクス研究会が生まれたことは、2009年において特筆すべきことである。デジタルオプティクスに関するシンポジウムは、第70回応用物理学会<sup>2)</sup>、Optics & Photonics Japan 2009<sup>3)</sup>にて開催され、計算機写真、デジタルホログラフィー、計算機ホログラフィー、補償光学、干渉計測等々、最新の研究動向が紹介された。本稿では、特にデジタルオプティクス関連の研究動向を示す。

### 10.2 Computational Optical Sensing and Imaging

計算機処理を前提とした計算機写真・光センシングの研

究が活況を呈している。例えば、結像システムにおいて、スペクトルの変調・符号化・多重化を施し、一見劣化したように見える画像を撮影する。これに対し計算機処理を行うことで、従来の撮像システムと比べて、被写体に関するより多くの情報を復元できる。アメリカ光学会では、2年に1回 Computational Optical Sensing and Imaging (COSI) に関するトピカルミーティングが開かれている。

計算機写真の代表例として、被写界深度をきわめて深くしてフォーカス機構を不要とする波面符号化がある。この技術は、レンズの瞳面に位相板を挿入することで、像高とデフォーカスに対して点像分布関数をほぼ一定とし、全体的にぼやけた画像を得る。MTF (modulation transfer function) がゼロ点を含まない場合、これに対して逆フィルタを適用することで、被写界深度の深い高精細な画像が復元される。従来用いられていた三次位相板に代えて自由曲面位相板を用いることで、被写界深度を1.4倍に向上できることが実験的に示された<sup>4)</sup>。また、深い被写界深度を生かした光彩認証システムへの応用についても原理実証されている<sup>5)</sup>。

複眼カメラも COSI システムの一例である。単一のイメージセンサーにレンズアレイを組み合わせて撮像した複眼画像から、距離分布や高解像度画像を得る研究がなされている。第56回応用物理学関連講演会では、複眼光学システムと応用に関するシンポジウムが企画され、ディスプレイを含めた多様な講演があった。赤外線カメラを複眼化することで、温度と距離分布を同時に得るカメラシステムが提案された<sup>6)</sup>。また、従来提案されていた、レンズに不均一性を与えることで距離に依存せず高解像度画像を復元する方法について、周波数解析による原理説明がなされた<sup>7)</sup>。

### 10.3 デジタルホログラフィー

非定常現象を観察できるシングルショットでのホログラム取得に注目が集まっている。デジタルホログラフィーは、銀塩写真乾板の代わりに撮像素子を用いてホログラムを取得し、計算機上で再生・解析される。オフアクシスホログラムに対して空間ヘテロダイン法を適用し、複素振幅インラインホログラムを求める方法が提案され、実験により確認されている<sup>8)</sup>。また、位相シフト法を一般化し、取得したホログラム中の連続する3画素の間にある位相差を利用することで、単一のホログラムから良好な計算機再生像を得ている<sup>9)</sup>。多数回の撮像が必要になるものの、参照光の入射角を走査し、計算機上で複数のホログラムを合成することで、レンズレスデジタルホログラフィーの解像度を向上する方法が示された<sup>10)</sup>。異色なデジタルホロ

グラフィーの撮影方法として、振動などの外乱による光のドップラー効果を利用して、位相シフトを行う方法が提案・実証された<sup>11,12)</sup>。この方法では、高速カメラを用いて撮影した一連のホログラムに対してフーリエ解析を実行し、一次光のみの情報を抽出する。

#### 10.4 計算機ホログラム

計算機ホログラムの再生像の品質が銀塩式ホログラムに迫りつつある。シフト角スペクトル法が提案され、従来のシフトフレネル法で課題となっていた伝播距離に関する制限が取り払われた<sup>13)</sup>。ポリゴン法とシルエット法をシフト角スペクトル法に組み合わせることで、40億ピクセルから成る計算機ホログラムを設計し、試作した。ポスター会場で見た実際のホログラムは、奥行きと立体感のある素晴らしいものであった<sup>14)</sup>。多視点画像群から得られる光線情報を用いて計算機ホログラムを計算する方法において、物体表面の反射特性を付与する方法が提案され、シミュレーションによる確認が行われている<sup>15)</sup>。三次元モデルの近傍に光線サンプリング面を置き、光源と面方位の関係で発生するシェーディングを考慮した多視点画像をレイトレーシングで作成する。これらの画像群をホログラフィックステレオグラムに基づいてフレネル伝播し、ホログラムを得ている。

#### 10.5 その他

ナノフォトニクスシステムからの空間並列情報読み出し方法が提案、原理実証されている<sup>16)</sup>。この方法では、近接場光分布を他の媒体に転写し、遠隔場にスケール変換して読み出す。転写パターンはナノ構造の分布を反映しているため、回折限界以上の情報を取り扱える可能性が指摘されている。フォトニック DNA コンピューティングに向けて、DNA の位置・局所反応を光学的に制御可能な方法が示された<sup>17)</sup>。DNA 微小液滴を光ピンセットにより制御し、直径約 6  $\mu\text{m}$  の 2 つの微小液滴の融合、微小空間でのハイブリダイゼーション反応を実証している。

セキュリティー応用では、強散乱体内部に吸収体を埋め込み、散乱係数分布を鍵として、位置・大きさ・個数・スペクトルを情報として記録する方式が提案されている。三次元再構成シミュレーションにより、400  $\mu\text{m}$  間隔で配置した 160  $\mu\text{m}$  立方の 2 個の吸収体が識別可能であることが示されている<sup>18)</sup>。また、複屈折性材料の着色現象を用いた偏光式視覚復号型暗号<sup>19)</sup>、ランダム偏光変調フィルターを復号用マスクとして用いたセキュアディスプレイ<sup>20)</sup> など、人の目に見える形でセキュリティー機能を提供する方式も研究が進んでいる。

並列光演算では、光学干渉を利用した素因数分解システ

ムで扱える情報量が 12 ビット程度から 30 ビットに向上している<sup>21)</sup>。ホログラフィック光ディスク型超高速光相関器を用いた顔認証システムにおいて、実写顔画像をホログラフィック光メモリーに記録し、高精度な認証が可能であることが示されている<sup>22)</sup>。また、空間光接続を用いた光再構成型ゲートアレイ VLSI の開発も進められている<sup>23)</sup>。

#### 10.6 展 望

今後、光と電子処理の融合が一層進み、お互いの長所を生かし、弱点を補った画期的なシステムの登場が予測される。古典的なオールオプティカル思想もシステムの美しさの点では捨てがたいが、光・電子融合システムの多様な可能性にも心躍るものを感じる。光現象と電子処理が調和した、「瓢箪から駒」的システムの登場に期待したい。

#### 文 献

- 1) [http://www.nvidia.co.jp/object/cuda\\_home\\_jp.html](http://www.nvidia.co.jp/object/cuda_home_jp.html)
- 2) 野村孝徳：秋季応物講演会 (2009) 10p-K-1.
- 3) 野村孝徳：OPJ (2009) 25p-CS1.
- 4) 工藤史堯他：OPJ (2009) 24a-F2.
- 5) 杓子尾雄大他：OPJ (2009) 24a-F3.
- 6) 香川景一郎他：OPJ (2009) 24a-F1.
- 7) 香川景一郎他：春季応物講演会 (2009) 30p-TD-6.
- 8) 前島康平他：OPJ (2009) 25a-F5.
- 9) 高濱裕史他：OPJ (2009) 25a-F6.
- 10) 村田 修他：OPJ (2009) 25a-F4.
- 11) 茨田大輔他：秋季応物講演会 (2009) 11p-D-7.
- 12) 菊地裕一他：秋季応物講演会 (2009) 11p-D-8.
- 13) 松島恭治：OPJ (2009) 25a-F9.
- 14) 松島恭治他：OPJ (2009) 26p-P20.
- 15) 涌波光喜他：OPJ (2009) 26p-P18.
- 16) 豎 直也他：OPJ (2009) 24a-F6.
- 17) 西村隆宏他：秋季応物講演会 (2009) 11a-D-1.
- 18) 藤本公道他：OPJ (2009) 24a-F8.
- 19) 原田建治他：秋季応物講演会 (2009) 11a-D-5.
- 20) 山本裕紹他：秋季応物講演会 (2009) 11a-D-7.
- 21) 仁田功一他：OPJ (2009) 24a-F7.
- 22) 新覚 碧他：OPJ (200) 25a-F1.
- 23) 瀬戸大作他：春季応物講演会 (2009) 31a-ZX-1.

### 11. 画像処理

静岡大 生源寺類

#### 11.1 概 要

ここでは、画像処理に関して概観する。光学的な観点からみると、春季応物講演会、秋季応物講演会、および Optics & Photonics Japan 2009 では、基礎的な画像処理に関する研究発表よりも、画像処理応用、すなわち画像処理を目的達成のための道具として用いた研究発表が多数ある。本稿では画像処理応用の中でも、画像回復、画像解析、その他 (複眼光学システム・セキュリティー関連) について解説する。

## 11.2 画像回復

劣化した情報から元の情報を回復する超解像度化や鮮鋭化処理は、写真やテレビ放送、映画などさまざまなメディアを対象としており、高画質化や高速化などの要求の高い技術である。低解像度画像から高解像度画像を作成する超解像度化手法では、絶対値回路を用いた非線形処理に加え、三乗特性を組み合わせた超解像化手法<sup>1)</sup>が報告された。また、個々の画像に最適な鮮鋭化処理を行うための、エッジから抽出されるライン長を参考にした鮮鋭化手法<sup>2)</sup>やデジタルカメラの $\gamma$ 補正を考慮したブラインド・デコンボリューションによる画像回復手法<sup>3)</sup>が提案された。意図的に劣化させた情報から通常の光学系では得られない情報を得るための意欲的な画像回復手法として、射出瞳面上に配置した位相マスクにより劣化された画像を取得し画像回復処理を行うことで被写界深度を拡張することができる WFC (wave front coding) システムに関する研究報告<sup>4)</sup>がなされている。最適化自由曲面位相マスクの軸外特性についての検証<sup>5)</sup>や、自由曲面位相板と三次位相板との特性比較<sup>6)</sup>が行われた。WFC による被写界深度拡張を応用として、ピント合わせが不要な虹彩認証システム<sup>7)</sup>の報告があった。

## 11.3 画像解析

画像解析においても、多岐にわたる応用研究に関する報告があった。近赤外カメラを用いたアスファルト上の水と氷の状態判別のための氷・水判別フィルター設計法<sup>8)</sup>や、マルチスペクトル画像の色強調手法において任意の色を用いて可視化するためのマトリクス設計方法<sup>9)</sup>が報告された。

画像処理において画像の対応点探索は、三角測量に基づく三次元計測や複数の画像をつなぎ合わせるスティッチング処理など、さまざまな場面で利用される。電子顕微鏡画像を対象にした、位相限定相関法を用いた対応点探索による倍率推定手法<sup>10)</sup>や、反復最適化によるマルチバンド HDR (high dynamic range) 全方位画像のスティッチング手法<sup>11)</sup>の報告がなされた。通常の内視鏡画像では対応点探索に誤りが生じやすいため、対応点探索に適した色変換行列の推定手法<sup>12)</sup>の報告があった。

三次元計測に関する報告も多数あり、相補的な関係をもつ2つの格子パターンを用いて三次元計測と同時に分光反射率特性を求め、変形格子像から物体表面色の影響を除去する三次元計測法<sup>13)</sup>や、三次元計測法における高度な画像処理を高速に実現するため、GPU (graphics processing unit) と複数の CPU (central processing unit) での処理によるリアルタイム三次元形状計測手法<sup>14)</sup>が報告された。

このような GPU による高速化は三次元計測のほかにも、スペクトラルドメイン OCT (optical coherence tomography)<sup>15)</sup> やコンプレッシブセンシングによる光伝播特性の計測<sup>16)</sup> などでも実装されており、さらなる進展が期待できる。

## 11.4 その他

光学系と画像処理とを融合した情報取得システムとして、複眼光学システムがある。春季応物講演会では、「複眼光学システムとその工学的応用」と題してシンポジウムが開催された<sup>17)</sup>。シンポジウムでは、超広角パノラマ画像の取得と動き検出を可能にする小型複眼カメラシステム<sup>18)</sup>、文書鑑定分野で重要指標として用いられる偏角画像を同時計測するシステム<sup>19)</sup>、高速三次元計測を実現する複眼カメラシステム<sup>20)</sup>などの報告があった。また、OPJ においては、薄型複眼カメラのサーモグラフィーへの応用と測距の検討<sup>21)</sup>が行われており、さまざまな応用への研究開発が進められている。

セキュリティ関連では、指紋認証システムにおいて、他人照合時に復号されるビットパターン画像の空間分布を一様にするための平文のコーディング手法<sup>22)</sup>や、非整数次フーリエ変換を利用した指紋暗号化画像の照合判定の際の閾値に関する報告<sup>23)</sup>があった。また、1枚の暗号画像から複数の秘密画像が復号できる視覚復号型暗号<sup>24)</sup>が報告された。視覚復号型暗号は物理的な復号を特長とする画像の暗号化手法であるため、単純に画像処理分野として分類できない研究テーマであるが、秋季応物講演会において同一セッションで3件の視覚復号型暗号に関する報告<sup>24-26)</sup>があるなど、今後の進展が期待されるテーマである。

## 11.5 展望

以上、2009年の研究開発の動向を、画像回復、画像解析を中心に示させていただいた。以上に示した研究成果は、一部の分野における研究開発ではあるが、広い範囲の画像処理技術が利用されており、今後も多様な画像処理技術の進展が期待される。また、映像処理のためのライブラリーの普及やマルチコア CPU や GPU など並列処理技術の進展により、高速かつ高度な画像処理がより手軽に利用可能になることが期待される。これにより、従来の画像処理の枠にとらわれない新しいアイデア、応用技術の創出を期待したい。

## 文 献

- 1) 合志清一他：FIT (2009) RI-002.
- 2) 小林達矢他：FIT (2009) RI-003.
- 3) 真島清人：秋季応物講演会 (2009) 10a-D-1.
- 4) 小松進一：OPJ (2009) 25pCS8.

- 5) 尾花 亮他：春季応物講演会 (2009) 31p-ZX-13.
- 6) 工藤史堯他：OPJ (2009) 24aF2.
- 7) 杓子尾雄大他：OPJ (2009) 24aF3.
- 8) 山下卓也他：OPJ (2009) 25pE2.
- 9) 橋本典明：秋季応物講演会 (2009) 10a-D-2.
- 10) 鈴木絢子他：FIT (2009) I-049.
- 11) 阿部 駿他：OPJ (2009) 25pE4.
- 12) 佐々木麻衣他：OPJ (2009) 25pE3.
- 13) 松川竜也他：OPJ (2009) 25pE1.
- 14) 宮本洋子他：OPJ (2009) 26aD2.
- 15) 渡部裕輝他：秋季応物講演会 (2009) 8a-ZM-1.
- 16) 板倉康将他：OPJ (2009) 26aD3.
- 17) 谷田 純：春季応物講演会 (2009) 30p-TD-1.
- 18) 豊田 孝：春季応物講演会 (2009) 30p-TD-2.
- 19) 赤尾佳則：春季応物講演会 (2009) 30p-TD-4.
- 20) 宮崎大介：春季応物講演会 (2009) 30p-TD-5.
- 21) 香川景一郎他：OPJ (2009) 24aF1.
- 22) 竹田賢史他：秋季応物講演会 (2009) 11a-D-8.
- 23) 岩井玲子他：OPJ (2009) 26aD9.
- 24) 生源寺類他：秋季応物講演会 (2009) 11a-D-6.
- 25) 原田健治他：秋季応物講演会 (2009) 11a-D-5.
- 26) 山本裕紹他：秋季応物講演会 (2009) 11a-D-7.

## 12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

横浜国大 荒川太郎

### 12.1 概 要

近年の増加し続ける光通信トラフィックに対応するためには、光通信システムを支える個々の光デバイスの高性能化が必須である。また、環境への負荷低減のため、省電力化など環境性能もますます重要になってきている。

本節では、おもに半導体光通信光源および光変調器、光スイッチ分野、受光素子・レシーバー分野の2009年の進展について述べる。

### 12.2 光通信光源 (半導体レーザー)

光通信用半導体レーザーでは、高速変調化、高温動作化、低消費電力化が進められている。単体の半導体レーザーとしては、1.3  $\mu\text{m}$  および 1.55  $\mu\text{m}$  帯高効率 40 Gbps 直接変調<sup>1,2)</sup>、1.3  $\mu\text{m}$  帯 95°C 25 Gbps 無温調動作<sup>3)</sup> が報告された。電界吸収型変調器 (EAM) 集積レーザー (EML) としては、1.55  $\mu\text{m}$  帯分布帰還型 (DFB) レーザーの 100°C 動作<sup>4)</sup>、1.3  $\mu\text{m}$  帯用 43 Gbps 歪み非対称量子井戸を EAM に用いた DFB レーザー<sup>5)</sup>、1.55  $\mu\text{m}$  帯低消費電力 (0.18 W 以下) 10 Gbps DFB レーザー<sup>6)</sup> が報告された。面発光レーザー (VCSEL) では、MEMS (micro electro mechanical systems) との組み合わせによる広温度範囲動作化<sup>7)</sup> や偏波制御<sup>8)</sup>、アサーマル化<sup>9)</sup> などが提案された。温度安定性や低消費電力動作が期待される量子ドット (QD) レーザーに関しては、1.3  $\mu\text{m}$  帯 InAs QD レーザーの 20 Gbps と高温動作<sup>10)</sup>、1  $\mu\text{m}$  帯 QD 周波数コムレーザーの実現<sup>11)</sup> な

どの進展がみられた。また、光インターコネクション用光源として、Si とのハイブリッド化を目指した半絶縁性基板上の横方向注入型レーザーの室温連続動作の実現<sup>12)</sup>、Si 導波路に集積したオンチップ光配線デバイス GaInNAs レーザーの Si 導波路への高効率光結合の実現<sup>13)</sup> が報告された。Si フォトニクスとの融合関連では、Si マイクロリング共振器を用いた小型・低消費電力波長可変レーザーが初めて実現された<sup>14)</sup>。さらに、半導体レーザーを活用した光メモリーでは、マッハ・ツェンダー干渉計型 (MZI) 双安定レーザーによる全光フリップフロップ動作の実証<sup>15)</sup>、偏光双安定 VCSEL や多モード干渉計 (MMI) 双安定レーザーを用いた 4 ビット光バッファメモリーの実現<sup>16,17)</sup> など、低消費電力化、高ビット化が進んでいる。

### 12.3 光変調器・光スイッチ

光変調器分野は、LiNbO<sub>3</sub> マッハ・ツェンダー (MZ) 変調器を用いた多値変調の発展が著しいが<sup>18)</sup>、半導体変調器でも、同様に高速化、多値変調化が進められており、液晶ポリマーを用いた InP MZ 変調器モジュールによる 80 Gbps エラーフリー動作の実現<sup>19)</sup>、InP n-p-i-n 構造 MZ 変調器と半導体光増幅器 (SOA) を集積化した C バンド 40 Gbps 差動四値位相変調 (DPSK)<sup>20)</sup> が報告された。

光スイッチ分野は、さまざまなデバイスや方式が提案され、進展が著しい。経路スイッチでは、InGaAsP/InP ビーム曲折型  $1 \times N$  光スイッチの提案<sup>21)</sup> のほか、液晶クラッド Si 導波路 MZI を用いた  $1 \times 8$  光スイッチ<sup>22)</sup>、光位相シフターアレイによる InP 集積  $1 \times 16$  光スイッチの実証<sup>23)</sup> など、多分岐化が進んでいる。  $2 \times 2$  スイッチも、MZI 型高速光スイッチの低偏光依存化・低クロストーク化の実現<sup>24)</sup>、フォトリック結晶/QD 融合型全光スイッチの 40 GHz 繰り返し動作の実現<sup>25)</sup> が報告された。波長ルーティング関係では、リング共振器型波長可変レーザーを集積した波長ルーティング型高速光スイッチの実証<sup>26)</sup>、屈折率分布導波路アレイを用いた熱光学効果型波長選択スイッチの実現<sup>27)</sup>、量子井戸マイクロリング共振器波長可変フィルターの実現<sup>28)</sup> などの進展がみられた。波長変換関係では、InGaAs/AlAsSb 結合量子井戸の相互位相変調 (XPM) 効果を用いた MZI 型サブバンド間遷移スイッチによる 160 Gbps 全光波長変換の実現<sup>29)</sup>、QD SOA を用いた 160 Gb/s 波長変換の実現<sup>30)</sup>、3 アーム SOA-MZI 波長変換器を用いた全光 NRZ-OOK (non return to zero-on/off keying)  $\rightarrow$  RZ-QPSK 変調フォーマット変換<sup>31)</sup> など高機能化が図られた。さらに、光パケットスイッチでは、40 Gbps 光デジタルアナログ変換器 (ODAC) ラベルプロセッサを用いたパケットスイッチ<sup>32)</sup>、InP フェーズアレイを用いた高速  $1 \times 5$

光パケットルーティング<sup>33)</sup>など、高性能化が報告されている。

## 12.4 受光素子

受光素子分野では、100 Gbps イーサネット用途の小型レーザー、超高速通信用の Ge/Si あるいは InGaAs フォトダイオード (PD)、多値変調フォーマットへの対応などの研究開発が進んでいる。高反射ミラーを用いた高感度 30 GHz InGaAs PD<sup>34)</sup>、65 nm プロセス CMOS および PIN-PD を用いた 25 Gbps 低消費電力レーザー<sup>35)</sup>、単一走行キャリアー (UTC) InGaAs PD を用いた 43 Gbps DQPSK レーザー<sup>36)</sup>などが報告された。

## 12.5 展望

光通信用の半導体レーザーでは、今後さらなる高速変調化、高温動作化、低消費電力化が進むとともに、Si フォトニクスとの融合による光インターコネクション光源としての発展が期待される。光変調器・スイッチ分野では、さらなる多値変調化などの高機能化や、ルーターの低消費電力化を目指した全光スイッチやプロセッサの開発が進むと思われる。さらに、本稿では取り上げられなかったが、光アイソレーターなどのパッシブ光導波路素子の高性能化・低損失化や集積化が進展するであろう。

## 文 献

- 1) K. Ohtsubo *et al.* : *OFC* (2009) OThT6.
- 2) 植竹理人他 : 秋季応物講演会 (2009) 10p-S-14.
- 3) T. Fukamachi *et al.* : *ECOC* (2009) 8.1.3.
- 4) W. Kobayashi *et al.* : *OFC* (2009) OThT4.
- 5) T. Saito *et al.* : *ECOC* (2009) 8.1.3.
- 6) H. Yamamoto *et al.* : *OFC* (2009) OThT5.
- 7) 佐野勇人他 : 春季応物講演会 (2009) 1p-G-12.
- 8) 大山将也他 : 春季応物講演会 (2009) 1p-G-14.
- 9) 佐野勇人他 : 秋季応物講演会 (2009) 11p-S-2.
- 10) Y. Tanaka *et al.* : *OFC* (2009) OWJ1.
- 11) N. Yamamoto *et al.* : *OFC* (2009) OWJ4.
- 12) 奥村忠嗣他 : 春季応物講演会 (2009) 1a-G-3.
- 13) 大平和哉他 : 秋季応物講演会 (2009) 10p-ZN-12.
- 14) T. Chu *et al.* : *ECOC* (2009) 7.2.1.
- 15) K. Takeda *et al.* : *ECOC* (2009) 1.2.5.
- 16) 大井智裕他 : 春季応物講演会 (2009) 2a-A-11.
- 17) H. A. Bastawrous *et al.* : *ECOC* (2009) P2.15.
- 18) H. Yamazaki *et al.* : *ECOC* (2009) P2.2.1.
- 19) K. Tsuzuki *et al.* : *ECOC* (2009) 5.2.2.
- 20) N. Kikuchi *et al.* : *OFC* (2009) OWQ3.
- 21) 藤村拓也他 : 春季応物講演会 (2009) 2a-A-6.
- 22) T. Sawa *et al.* : *ECOC* (2009) P2.18.
- 23) I. M. Soganci *et al.* : *ECOC* (2009) 1.2.1.
- 24) Y. Ueda *et al.* : *ECOC* (2009) 4.2.5.
- 25) 尾崎信彦他 : 春季応物講演会 (2009) 1p-B-17.
- 26) 瀬川徹他他 : 秋季応物講演会 (2009) 9a-ZN-8.
- 27) 杉尾崇行他 : 春季応物講演会 (2009) 2a-A-9.
- 28) 槇野太郎他 : 秋季応物講演会 (2009) 11a-P8-7.
- 29) R. Akimoto *et al.* : *ECOC* (2009) 1.2.2.
- 30) G. Contestabile *et al.* : *ECOC* (2009) PD1.4.

- 31) S. M. Nissanka *et al.* : *OFC* (2009) OThM5.
- 32) K. Sawada *et al.* : *OFC* (2009) OMU6.
- 33) T. Tanemura *et al.* : *OFC* (2009) OMU3.
- 34) Y. Lee *et al.* : *OFC* (2009) JThA28.
- 35) T. Takemoto *et al.* : *ECOC* (2009) P9.2.1.
- 36) A. Wakatsuki *et al.* : *OFC* (2009) OMK1.

## 13. 光 通 信

NEC 福知 清

### 13.1 概 要

2009 年の光通信にかかわる技術動向について述べる。2009 年においては、100 Gbps に代表される高速大容量技術の実用化に向けた進展が挙げられる。クラウドコンピューティングなどの新ネットワークアプリケーションの登場で、大容量・低コスト伝送を担う光通信への期待はますます高まっている。これに対して 100 Gbps イーサネット技術や、100 Gbps 広域伝送・デバイス技術において、具体的な成果が数多く輩出された。光アクセス領域においても、次世代 10 Gbps 光アクセス技術のデバイス報告が相次ぎ、日本において同技術領域の開発が進んでいることが強く印象づけられた。以下の項で、これらの動向について、具体的に述べる。

### 13.2 基幹系光伝送技術およびデバイス技術

2009 年においては、光伝送における性能指標の記録が多数更新された。1 つは 32 Tbps の世界最大容量の光伝送<sup>1)</sup>であり、もう 1 つは 13.5 Tbps-6300 km 伝送<sup>2)</sup>による容量距離積記録の更新である。いずれの報告も、波長あたり 100 Gbps 級の信号を用いており、基幹系光伝送技術が 100 Gbps 中心へと完全シフトしたことを示している。

100 Gbps 光伝送では、2005 年ごろから注目されはじめたデジタルコヒーレント技術が主流となったことが特徴である。この技術は、コヒーレント検波技術とデジタル信号処理技術を組み合わせたものであり、多値変調の適用や伝送路に対する適応等化がすでに実証されている。2009 年は、周波数領域等化による線形歪み補償<sup>3)</sup>など無線技術を積極的に取り入れた報告に加えて、光ファイバー特有の非線形歪みを補償するための技術が多数報告された。文献<sup>4)</sup>では、非線形歪みに対して精緻な逆補償を行うことにより、補償なしの場合に比べて 20% 距離を延伸し、100 Gbps の 16,000 km 伝送に成功している。陸上系における同種の非線形補償技術の効果実証実験<sup>5)</sup>に加え、波長間の非線形効果を考慮した最適復調技術<sup>6)</sup>なども提案されるなど、実用を意識した開発が進んでいる。

100 Gbps 伝送で不可欠な高性能誤り訂正符号に関して

は、高符号化利得を実現する LDPC 符号方式提案<sup>7)</sup>と、それを実現する軟判定 LSI デバイス<sup>8)</sup>が報告された。また、光伝送規格である OTN (optical transport network) 光伝送方式での 100 Gbps 化<sup>9)</sup>や、OIF (Optical Internetworking Forum) における光伝送標準の策定が進展したことも特徴である。

また、デジタルコヒーレント技術をリアルタイム信号処理する FPGA (field programmable gate array) システムを用いて評価する報告が複数された<sup>10,11)</sup>ことも注目すべき点である。現状、デバイス制限によりその動作速度は最大 20 Gbps 程度にとどまるが、高度変調方式の評価が実環境に近い状態で行えるようになってきたことは意義深い。

一方、別の大きな性能指標である周波数利用効率について、OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 技術を用いることで、これまでの最高効率である 7 bit/s/Hz での伝送が報告された<sup>12)</sup>。これにより、OFDM が超高密度 WDM (波長分割多重) を実現するキー技術に位置づけられている。OFDM 信号の長距離伝送でも、周波数利用効率 5.6 bit/s/Hz において 640 km の距離を実現した<sup>13)</sup>。このような高度変調では、それを生成するための超高速 DA 変換デバイスも不可欠であり、技術開発が始まった<sup>14)</sup>。

100 Gbps 基幹伝送に用いられるデジタルコヒーレントに向けた光デバイスについても多数報告された。偏光多重光発生に必要な 2 台の変調器を集積した LiNbO<sub>3</sub> RZ-QPSK (return-to-zero quadrature phase shift keying) 光変調器<sup>15)</sup>や、より複雑な変調を可能とする QAM (quadrature amplitude modulation) 変調用 LiNbO<sub>3</sub> 複合変調器<sup>16)</sup>の進展は、高精度多値信号発生を実現した。偏波多重された信号をコヒーレント受信するために不可欠な偏波ダイバーシティー型 90 度ハイブリッドは、PLC (planar light-wave circuit) デバイス集積技術<sup>17)</sup>が開発され、小型安定な 100 G 受信器の実現に向けた活動が着実に進んでいる。

さらに、超大容量のネットワーク実現に向けた新たな流れとして、複数の波長を一括してスイッチングする技術を用い、100 Tbps 級に拡張可能な光ルーターが実現可能であることが示された<sup>18)</sup>。このルーターを構成する SOA (semiconductor optical amplifier) デバイス技術<sup>19)</sup>も報告されるなど、100 Gbps の伝送容量を生かした超大容量ネットワークが今後進展すると考えられる。

### 13.3 光アクセス技術および 100 Gbps イーサネット用光通信技術

光アクセス技術においては、10 G-EPON (Ethernet passive optical network) 技術を中心とした報告が多数なされ

た。たとえば、既存 1G システムとの共用をよりシームレスに行うためには、1 G/10 G の双方で動作する光送受信機が不可欠である。このような信号受信を行う LSI の開発成果の報告<sup>20)</sup>や、IEEE 802.3av 標準に準拠する受信性能をもつ光受信器が報告された<sup>21)</sup>。さらには、加入者モジュールに組み込む XFP (10 gigabit small form factor pluggable; X は 10 のローマ数字に由来する) サイズの 10 G 光アクセス受信機の報告<sup>22)</sup>など、より実用化を志向した技術開発が進んでいる。一方、この領域の新技術として OFDM 技術を適用した光アクセス技術が進められており、2009 年には 108 Gbps での伝送実験が報告された<sup>23)</sup>。

また、2010 年の IEEE 802.3ba 100 GbE 標準策定完了を控え<sup>24)</sup>、100 Gbps イーサネット光インターフェースデバイス技術も大きく進展した。同標準では、シングルモードファイバーインターフェースに 25 Gbps の四波長多重方式が採用されており、25 Gbps クラスの光送受信デバイス・モジュールがキー技術となる。これを実現する 25 Gbps 用の光変調デバイス<sup>25,26)</sup>や、低消費電力 CMOS 受信 LSI<sup>27)</sup>などの開発報告がなされたことに加え、四波長多重受信モジュール<sup>28)</sup>、100 Gbps イーサネットトランシーバーのモジュール開発<sup>29)</sup>も報告された。

### 13.4 展 望

基幹系、光アクセスとも、次世代大容量技術となる 100 Gbps イーサネットおよび 10 G-EPON の IEEE 標準の策定を 2010 年度に控え、今年には実用化技術が進展したことを特徴としてあげた。特に基幹系では、デジタルコヒーレント技術へのパラダイムシフトが一段落し、主流技術の座を確保したことが大きい。この流れを受け、今後は大きく 2 つの流れが生じると思われる。1 つは 100 Gbps 領域実用化開発のさらなる加速であり、もう 1 つはポスト 100 G への流れである。後者では、たとえば QAM 光変調技術を用いた 240 Gbps 光伝送実験<sup>30)</sup>などに示されるように、次なるターゲットに向けた活動がすでに開始されている。今後、これらの方向での技術開発が進展し、伝送容量が以前増加の一途をたどる光ネットワークの要求にこたえるための技術開発のさらなる進展が求められる。

### 文 献

- 1) X. Zhou *et al.*: *OFC* (2009) PDPB4.
- 2) H. Masuda *et al.*: *OFC* (2009) PDPB7.
- 3) 石原浩一他: 信学会総合大会 (2009) B-10-40.
- 4) 山崎悦史他: 信学会ソサイエティ大会 (2009) B-10-43.
- 5) S. Oda *et al.*: *OFC* (2009) OThR6.
- 6) L. Li *et al.*: *ECOC* (2009) P3.16.
- 7) 水落隆司他: 信学会光通信システム研究会 (2009) OCS2008-118.

- 8) 小林達也他：信学会総合大会 (2009) B-10-44.
- 9) M. Tomizawa: *OFC* (2009) NThB1.
- 10) F. Buchali *et al.*: *ECOC* (2009) PD2.1.
- 11) Q. Yang *et al.*: *OFC* (2009) PDP5.
- 12) H. Takahashi *et al.*: *OFC* (2009) PDPB7.
- 13) 高橋英憲他：信学会総合大会 (2009) B-10-48.
- 14) 小林竜也他：信学会ソサイエティ大会 (2009) B-10-46.
- 15) T. Shiraishi *et al.*: *ECOC* (2009) 2.2.2.
- 16) H. Yamazaki *et al.*: *ECOC* (2009) 2.2.1.
- 17) Y. Sakamaki *et al.*: *ECOC* (2009) 2.2.4.
- 18) K. Yonenaga *et al.*: *ECOC* (2009) 2.5.5.
- 19) G. Nakagawa *et al.*: *ECOC* (2009) 4.2.6.
- 20) 原 一貫他：信学会総合大会 (2009) B-10-101.
- 21) 山本浩史他：信学会ソサイエティ大会 (2009) B-10-60.
- 22) 野田雅樹他：信学会ソサイエティ大会 (2009) B-10-58.
- 23) D. Qian *et al.*: *OFC* (2009) PDP5.
- 24) O. Ishida: *OFC* (2009) OWR5.
- 25) T. Tadokoro *et al.*: *OFC* (2009) OThT3.
- 26) T. Fukamachi *et al.*: *ECOC* (2009) 8.1.5.
- 27) T. Takemoto *et al.*: *ECOC* (2009) 9.2.1.
- 28) K. Hosomi *et al.*: *ECOC* (2009) P2.05.
- 29) 有馬宏幸他：信学会ソサイエティ大会 (2009) B-10-22.
- 30) A. Sano *et al.*: *ECOC* (2009) PD2.2.

## 14. 光 記 録

東京大 志村 努

光メモリーに対する逆風は2009年もますます強くなっている。ハードディスク (HDD) あるいは半導体メモリー (SSD) の攻勢に押されていることに加えて、この分野の研究が企業を中心に行われているという事情もあり、経済状況も悪影響を与えている。また、HDD, SSDが消費エネルギー、記録の寿命といった点で問題を抱えているのに対して、光メモリーがもつ優位性が十分に理解されていない、という状況もある。将来技術の研究の必要性は変化していないにもかかわらず、研究者人口が減少しているのは問題あり、といえるだろう。

そのような厳しい環境の中でも、Blu-ray Disc (BD) の次の世代のメモリーに関する研究は地道に行われている、というのが2009年の印象である。特に、実用化を視野に入れた堅実な報告が多いのが目に付いた。

最も実用化に近いと思われるのが、1層あたり33 GB (Gbyte)、3層で計100 GBの容量をもつBDに関するパナソニックからの発表である<sup>1)</sup>。同じくBDの多層化だが、もう少し先の技術としての報告には、パイオニアによる20層500 GBのROMシステムの実証<sup>2,3)</sup>、TDKによる10層の書き換え可能型ディスクメディアの実証と20層の実現可能性に関するものがあつた<sup>4)</sup>。

BD以外の多層化されたビット記録としては、二光子吸収を使ったものがいくつか報告されている。材料の吸収率が光強度の2乗に比例するため、記録スポットを小さくす

ることができ、その分記録密度を上げられる。記録時には大きな光強度が必要なため、パルスレーザーが必要だが、近年の小型のフェムト秒ファイバーレーザーの進歩はめざましく、これを用いることにより、光記録システム全体の小型化の可能性に関する報告が静岡大学からあつた<sup>5)</sup>。

三次元ビット記録のもうひとつの方式に、マイクロリフレクターがある。これまで報告されてきたマイクロリフレクター方式は、ディスクの両面からコヒーレントなレーザービームを対向で絞り込み微小回折格子を書き込み、その回折光を読み出す、別名マイクロホログラムとよばれる方式だけだったが、ソニーから微小空孔による方式が報告されたのが目を引いた<sup>6)</sup>。この方式は、書き込み時に尖塔値の高いパルスレーザー光を用いる必要があるものの、位置調整の難しい対向型配置を用いる必要がないという利点をもっている。マーク長185 nmで9層の記録を行っている。従来型のマイクロホログラムに関しては、この方式を長年リードしているベルリン工科大学から、マークエッジ記録により、記録面密度15 bits/ $\mu\text{m}^2$ で、75層、4  $\mu\text{m}$ の間隔の記録を300  $\mu\text{m}$ の厚さの媒体に行ったという報告があつた<sup>7)</sup>。また、NECからは、ビーム制御に電気光学効果を用いる方法が提案されている<sup>8)</sup>。

媒体の深さ方向も利用するという意味では上記の方式と同じだが、ページ単位でデータの読み書きを行うのがホログラフィックメモリーである。ここ数年は他の方式に比べてやや活況を呈しており、国際会議での発表件数も最多だった。しかしながら、2009年に入ってその勢いに陰りがみえている。現在主流であるポリティック方式とコアキシャル方式の2つのうち、前者に関しては、米国インフェイズと日立の共同研究で、参照光と物体光の2つの光束を単一の対物レンズを通して記録媒体上で交差・干渉させるモノキュラー構成という方式が報告された<sup>9)</sup>。記録密度663 Gbits/inch<sup>2</sup>、SNR (信号対雑音比) 3.9 dB、効率0.5のLow Density Parity Check (LDPC) コードを用いて、ビットエラーレート  $1.0 \times 10^{-10}$  が得られている。また、この構成での製造誤差に対する解析も報告されている<sup>10)</sup>。

もう一方のコアキシャル方式では、ソニーから、LDPCコードを用いたシステムによりSNR 4.7 dB、記録密度415 Gbit/inch<sup>2</sup>が達成されたという報告があつた<sup>11)</sup>。また同じくソニーから、コヒーレント加算によるSNR増大<sup>12,13)</sup>、また温度変化に対する補償法と補償範囲などについての報告がなされた<sup>14)</sup>。

その他のシステムとしては、反射型ホログラフィックメモリーの記録密度限界のシミュレーションによる見積もりが神戸大学からなされている<sup>15)</sup>。またNHK放送技術研究

所からは空間周波数の高周波成分の強調によるビットエラーレートの向上の提案がなされている<sup>16)</sup>。

記録材料に関しては、ダイキン工業から新しいフッ素系材料が提案され、記録特性等が検証されている<sup>17)</sup>。

以上は記録媒体を三次元的に使用して記録容量を増やすものだが、平面記録のまま回折限界を超える微小パターンを形成する記録法としては、Super-RENS (super-resolution near-field structure) や SIL (solid immersion lens) などによる方式がある。前者に関しては、容量 50 GB の Super-RENS ROM ディスクによる HD-TV フォーマットのビデオの再生の実証、およびエラーレートに関して報告があった<sup>18,19)</sup>。PR (1, 2, 2, 2, 1) ML システムを用い、 $1.4 \times 10^{-4}$  のビットエラーレートが得られている。また、ディスク 1 枚あたり 1 TB に相当する記録密度が実現できたという報告もある<sup>20)</sup>。

ソニーからは NA 1.83 の SIL を用いたシステムに関して、表面保護層を設けた記録媒体により、直径 12 cm のディスク換算で 90 GB に相当する容量で記録再生を実証したという報告がなされている<sup>21)</sup>。

以上が長期保存型の光メモリーに関する報告であるが、そのほかに、光通信におけるバッファメモリーに関する報告がいくつかある。奈良先端科学技術大学からは、面発光レーザーを用いた多値バッファメモリーの報告がなされている<sup>22,23)</sup>。

以上、2009 年度の光メモリー関係のおもだった報告をまとめたが、HDD や SSD に押されながらも、実用化を見据えた地道な研究は着実に継続されているという感がある。昨今は光メモリーの実力が過小評価されているような傾向もある。流行に流されない地に足の着いた研究姿勢が求められていると思う。

## 文 献

- 1) 梶野晶夫他：秋季応物講演会 (2009) 9p-T-8.
- 2) A. Mitsumori *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 03a055.
- 3) A. Mitsumori *et al.*: ISOM (2009) Th-I-02.
- 4) T. Kikukawa *et al.*: ISOM (2009) Th-PO-01.
- 5) M. Tsuji *et al.*: IEEE T. Magn., **45** (2009) 2232.
- 6) S. Kobayashi *et al.*: ODS (2009) Th-I-01.
- 7) S. Orlic *et al.*: ODS (2009) MA1.
- 8) 藁田昌尚他：春季応物講演会 (2009) 30p-ZW-4.
- 9) K. Shimada *et al.*: ODS (2009) TuC2.
- 10) T. Ishii *et al.*: ODS (2009) PD1.
- 11) K. Tanaka *et al.*: ODS (2009) TuC3.
- 12) M. Hara *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 03a025.
- 13) K. Tanaka *et al.*: ODS (2009) MP6.
- 14) T. Tanaka: Opt. Express, **17** (2009) 14132.
- 15) M. Miura *et al.*: J. Opt. Soc. Am. A, **26** (2009) 2269.
- 16) N. Kinoshita *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 09la03.
- 17) K. Satoh *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 03a030.

- 18) K. Nakai *et al.*: ISOM (2009) Mo-C-01.
- 19) K. Nakai *et al.*: ISOM (2009) Th-PO-02.
- 20) H. Hayashi *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 03a052.
- 21) T. Ishimoto *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 03a015.
- 22) T. Katayama *et al.*: IEEE J. Quantum. Elect., **45** (2009) 1495.
- 23) H. Kawaguchi: Opto-Electron. Rev., **17** (2009) 265.

## 15. 視覚光学

立命館大 山口秀樹

### 15.1 概 要

近年の視覚光学に関する研究は、純粋に視覚メカニズムを探究するものだけでなく、視覚と建築空間、視覚とユニバーサルデザインといったように複数の学術分野にわたる研究が盛んである。また、建築空間における照明器具としての LED (light-emitting diode) が普及しつつあることから、LED 照明光が視覚に与える影響を検討する研究が多くみられた。これらの観点を中心に 2009 年の視覚光学の進展を概観する。

### 15.2 明るさ知覚

明るさ知覚における最も基礎的な特性として、分光視感度がある。一般的な観測者の分光視感度は定義されているが、実際には個人差があることが知られている。通常、分光視感度を測定するためには単色光を発生させる装置が必要であるが、これに代わり LED 光を用いて分光視感度を推定する手法が提案された<sup>1)</sup>。

視対象の明るさ知覚には、大きく分けて、観測者の視環境への順応状態の要素と、視対象の輝度の要素との 2 つが影響を与える。視野が均一な場合の順応状態の記述は容易であるが、実際の視環境のように複雑な視野における順応状態を記述するために、実効輝度を用いた検討がなされている<sup>2)</sup>。視対象が LED 光源である場合、従来の光源に比べて特に点灯周波数に自由度があることから、周波数の違いによる明るさ知覚が調べられた<sup>3)</sup>。また照明に用いられている LED 光源は発光面が微小なものが多く、グレア (眩しさ) を感じやすい。LED 光源に対するグレア評価は既存の評価式では不十分であることが示唆された<sup>4)</sup>。

建築空間の明るさ感評価に関する研究では、従来の指標であった水平面照度に代わり、視野の輝度分布から評価する研究<sup>5,6)</sup>が多くみられ、実際の照明設計への応用事例<sup>7)</sup>も紹介された。また、建築空間における色彩が明るさ感に与える影響の検討<sup>8-10)</sup>や、夜間街路のように薄明視環境における明るさ感の研究<sup>11)</sup>も報告されており、多様な視環境に対する明るさ感評価法の発展が期待される。

### 15.3 色知覚

色知覚の研究においては、同一物体の色の見えは視環境

が変化しても同じように色を知覚する色恒常性の成立に関するものや、色覚異常者の色弁別に関するものが多く報告された。色恒常性については、視対象の空間認識がよりリアルなほど成立度合が高いことが示された<sup>12)</sup>。また逆に、恒常的に色を知覚できる人間の特性を利用して、異なる視環境およびデバイス間で等しい色知覚を提示するためのカラーマネジメントシステムが提案<sup>13)</sup>された。

色覚異常者は、特定の色の組み合わせに見分けにくさを感じる。これを改善するための方法として、見分けの困難な配色において輝度差を与えるフィルターを用いる方法が提案<sup>14)</sup>され、効果が検証された。また別の手法として、視対象を照らす照明の分光成分を変えることにより視対象の色差を大きくし、弁別を容易にさせる手法も提案<sup>15)</sup>されている。一方、色彩のデザインを行うのは色覚異常でない方がほとんどであり、デザイナーに色覚異常者の見えにくさを模擬体験できるフィルターが開発された<sup>16)</sup>。

#### 15.4 高齢者の視覚特性

視覚システムは加齢に伴い眼球光学系が劣化することが知られている。たとえば白内障による水晶体の分光透過率の変化や、水晶体の弾力が低下することによる焦点調節機能の低下などがある。しかし水晶体の加齢変化は個人差が大きく、また分光透過率を直接計測することが困難であるため、高齢者の色の見えなどを一意に特定することは容易ではない。これに対し、水晶体の白濁度を視対象のコントラストと眼前照度との関係から推定する方法が提案<sup>17)</sup>された。また焦点調節能力に関しては、調節時間の変化と視対象の視認性の関係が調査されている<sup>18)</sup>。

また白内障の治療には、白濁した水晶体を手術により除去し眼内レンズを新たに挿入する方法がとられるが、手術前後における色の見え方の変化については不明な点が多く、術後の継時変化を明らかにする研究<sup>19)</sup>が進められている。

#### 15.5 奥行き知覚

立体視ディスプレイ技術が実用化されつつある今日において、知覚される奥行きを正しく評価・推定することは、デバイスを設計するうえで欠かせない。通常、二眼式立体表示においては両眼視差により奥行き知覚を生じさせるが、片眼画像をぼかすことによっても奥行き知覚が変化すると報告された<sup>20)</sup>。また奥行き知覚を生じさせる別の画像提示方法として、奥行き方向の距離がわずかに異なる2面のディスプレイ上に表示させた画像を融合させて見せるdepth-fused 3-D表示がある。この方式では、両眼視差方式に比べて観測者の視力が低い場合でも、奥行き知覚が可能であると報告された<sup>21)</sup>。

## 15.6 展 望

以上のように、実際の建築空間の視環境や表示デバイスとの関係において視覚系の特性を明らかにする研究が多くみられ、特に個人の特性に応じた光・視環境を提案するものが多い。視覚系の多様性を考慮すると、工業製品をデザインする際に既存の画一的な規格による設計だけでは不十分であると考えられる。今後も視覚系の多様性を評価・推定できる手法の開発とともに、個人の視覚特性に応じた工業製品の開発や視環境が提供されることを期待する。

## 文 献

- 1) 高山圭介他：OPJ (2009) 26a-G-1.
- 2) 池上陽子他：照明学会 (2009) p.138.
- 3) 百瀬 賢他：照明学会 (2009) p.146.
- 4) 田代和範他：照明学会 (2009) p.180.
- 5) 岩井 彌他：照明学会 (2009) p.98.
- 6) 渡邊健一他：照明学会 (2009) p.100.
- 7) 上野大輔他：照明学会 (2009) p.99.
- 8) 田茂井稔明他：照明学会 (2009) p.148.
- 9) 山口秀樹他：照明学会 (2009) p.170.
- 10) 加藤未佳他：照明学会 (2009) p.172.
- 11) 白倉公隆他：照明学会 (2009) p.144.
- 12) 田島彩衣他：照明学会 (2009) p.149.
- 13) 石橋諒一他：色彩学会 (2009) p.38.
- 14) 齊藤慎吾他：OPJ (2009) 26a-G-4.
- 15) 永井達哉他：照明学会 (2009) p.142.
- 16) 中内茂樹：OPJ (2009) 25a-ES-3.
- 17) 篠田博之他：照明学会誌, 93 (2009) 290.
- 18) 小林雄太他：OPJ (2009) 26a-G-3.
- 19) 豊田敏裕他：OPJ (2009) 26a-G-5.
- 20) 井上卓也他：OPJ (2009) 26p-P-32.
- 21) 小林義征他：OPJ (2009) 26p-P-33.

## 16. 光源・測光・照明

産総研 部 洋司

### 16.1 概 要

地球温暖化防止に代表される全地球的問題への関心から、省エネルギーがより一層強く望まれるようになった現在、発光ダイオード (LED) や有機 EL (OLED) に代表される固体照明 (solid state lighting) に基づく高効率・長寿命を実現する次世代照明の開発に大きな期待が集められている。これに伴い、固体照明が光源・照明関連の市場全体に与えるインパクトは日増しに大きくなっている。こうした中、固体照明用の高性能素子・光源の開発やさまざまな照明製品の開発、さらには関連分野への応用・普及が各方面で進められている。高精度かつ信頼性の高い光学計測は、こうした開発の流れの中でその重要性を一層増しており、国際照明委員会 (CIE) を中心に、固体照明に関連する測定法の国際標準化の動きが加速している<sup>1)</sup> ほか、測定技術に関しても多くの研究報告が出されている。また、日

本の照明分野における省エネルギーへの将来的な展望が述べられた<sup>2)</sup>ほか、2009年末に閣議決定された新成長戦略(基本方針)でも「LEDや有機ELなどの次世代照明の100%化の実現」が述べられるなど、固体照明を中心に光源・照明関連分野の動きがきわめて活発化している。

## 16.2 光源

固体照明への応用を念頭に置いたさまざまな光源の開発、および特性評価・性能向上などが多く報告された。一例として、従来の白熱電球と同等の構造を有した高効率LED電球<sup>3)</sup>が開発されたほか、ハイパワーLEDランプ用の高効率駆動回路の設計と評価<sup>4)</sup>、紫外・近紫外LEDの取り出し効率<sup>5)</sup>や熱特性<sup>6)</sup>に関する検討などが報告された。

蛍光ランプ関連では、電球形蛍光ランプに関する報告が多くみられ、螺旋蛍光管を用いたタイプ<sup>7)</sup>や点灯部と点灯回路部が分離可能なタイプ<sup>8)</sup>の電球形蛍光ランプの開発、および高出力(25W)タイプの省電力化<sup>9)</sup>などが報告された。このほか、約12,000Kの相関色温度をもつ高色温度蛍光ランプ<sup>10)</sup>や、省電力型の環形蛍光ランプ<sup>11)</sup>の開発などが報告された。

また、冷陰極ランプや誘導形無電極ランプのさらなる性能向上を目指した各種検討が行われており、前者では電極特性における封入ガスや電極材料の依存性評価<sup>12)</sup>が、後者では電子密度解析<sup>13)</sup>や点灯用回路の動作解析<sup>14)</sup>および240W無電極蛍光ランプの開発<sup>15)</sup>などが行われた。さらに、ハロゲン電球について、タングステン輸送現象評価のための熱流体-化学平衡複合モデルの解析<sup>16,17)</sup>が報告された。このほか、高圧ナトリウムランプの寿命特性評価<sup>18)</sup>や、高い演色評価数を実現したキセノンランプ<sup>19)</sup>、および赤領域の演色性を改善したセラミックメタルハライドランプの開発<sup>20)</sup>などが報告された。

## 16.3 測光

固体照明関連の開発が進むにつれて、正確な測光データに対する要望が高まっており、固体照明のための新しい測光技術の開発や、測光データの信頼性の基盤となる計量標準や基礎的な光学計測技術の開発が進められている。

日本電気計器検定所(JEMIC)においてLED光度・全光束校正装置が開発され、国家標準にトレーサブルな校正サービスが近く実施可能となることが報告された<sup>21)</sup>。また、熱特性を中心としたハイパワーLEDの全光束測定における諸問題<sup>22)</sup>や、球形光束計の感度ムラに起因する測光誤差<sup>23)</sup>に関する考察が報告されたほか、分光測定に広く用いられているポリクロメーターの迷光低減方法について検討が行われた<sup>24)</sup>。

計量標準や光学計測技術にかかわる内容としては、日本における照度応答度標準の確立<sup>25)</sup>、分光測定に基づく新しい光度単位の具現方法に関する検討<sup>26)</sup>、メッシュ形減光フィルターを用いた低放射照度領域に適用できる標準光源に関する検討<sup>27)</sup>、多点同時照度測定システムの構築<sup>28)</sup>などが報告された。

## 16.4 照明

2009年3月に行われたライティング・フェア2009にて発光効率80lm/Wの白色LEDを用いたダウンライトが発表<sup>29)</sup>されるなど、固体照明製品の開発および性能向上が急速に進んでいる。また、導光板を利用したライン状LED照明器具<sup>30)</sup>や光源劣化診断が可能なLED照明灯<sup>31)</sup>の開発が行われるなど、さまざまなLED照明製品の商品化への動きが加速している。これに伴い、それらの製品に対する性能評価や信頼性評価に対する関心・要求事項も高まってきている。また、安全性に関する側面での検討も進められており、JIS C 8154:2009「一般照明用LEDモジュール—安全仕様」が制定<sup>32)</sup>された。

このほか、固体照明に関連する内容として、LEDを用いた防犯灯の開発<sup>33)</sup>、LEDを利用したカラーホログラム再生用光源の開発<sup>34)</sup>、有機EL照明と蛍光灯に基づく照明での照度分布の比較検討<sup>35)</sup>などが報告された。

## 16.5 展望

固体照明の測定にかかわる標準化の動きが加速している。一例として、2009年6月にブダペストで行われたCIE第2部会では、中国・台湾・欧州などから、LED照明や有機EL照明の測定法の標準化にかかわるニーズを調査するためのReportership(レポーター)の設立が提案され、具体的な規格または技術報告書を作成するTC(技術委員会)設立の準備が着々と進められている。このような流れに乗り遅れることなく、日本の技術・検討内容を適切に反映させていくための国際標準化活動の推進が必要不可欠である。

一方、米国では固体照明製品に対する性能評価に非常に力を入れており、CALiPER(Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting)プログラムによるLED照明製品の性能評価や、Energy Starプログラムの導入など、さまざまな政策レベルでの展開を進めている。日本においても、関連製品の一層の性能向上および国際的な信頼性向上を確保するための方策として、米国の運用をひとつの重要な参考例として、今後の展開を図っていく必要があると思われる。

## 文 献

- 1) 藤 洋司：日本照明委員会誌，**26** (2009) 146.
- 2) T. Hanada: *J. Light & Vis. Env.*, **33** (2009) 53.
- 3) 久安武志他：照明学会 (2009) p.182.
- 4) 川西大介他：照明学会誌，**93** (2009) 284.
- 5) H. Hayashi *et al.*: *J. Light & Visual Env.*, **33** (2009) 137.
- 6) K. Kamon *et al.*: *J. Light & Visual Env.*, **33** (2009) 142.
- 7) 筏 邦彦他：照明学会 (2009) p.50.
- 8) 野村和男他：照明学会 (2009) p.51.
- 9) 伊藤和彦他：照明学会 (2009) p.52.
- 10) 八木裕司他：照明学会 (2009) p.48.
- 11) 岡崎祐輔他：照明学会 (2009) p.49.
- 12) 武田雄士他：照明学会誌，**93** (2009) 514.
- 13) 掛橋英典他：照明学会誌，**93** (2009) 807.
- 14) 掛橋英典他：照明学会誌，**93** (2009) 84.
- 15) 平松宏司他：照明学会 (2009) p.66.
- 16) 別所 誠他：照明学会誌，**93** (2009) 814.
- 17) 別所 誠他：照明学会誌，**93** (2009) 827.
- 18) N. Saito *et al.*: *J. Light & Visual Env.*, **33** (2009) 131.
- 19) A. Nazri *et al.*: *J. Light & Visual Env.*, **33** (2009) 7.
- 20) 笹井 泰他：照明学会 (2009) p.63.
- 21) 永井伸明他：照明学会 (2009) p.200.
- 22) 錢 衛東他：照明学会 (2009) p.205.
- 23) 岩永敏秀他：照明学会 (2009) p.204.
- 24) 佐野弘幸他：照明学会 (2009) p.206.
- 25) 木下健一他：照明学会 (2009) p.209.
- 26) 神門賢二他：照明学会 (2009) p.210.
- 27) 森 俊征他：照明学会誌，**93** (2009) 91.
- 28) 荒木慶和他：照明学会誌，**93** (2009) 838.
- 29) 樋口一斎他：照明学会 (2009) p.186.
- 30) 中澤育男他：照明学会 (2009) p.185.
- 31) 斎 尚樹他：照明学会 (2009) p.187.
- 32) JIS C 8154:2009「一般照明用 LED モジュール—安全仕様」.
- 33) 戸田雅宏他：照明学会 (2009) p.188.
- 34) 馬場洵子他：照明学会 (2009) p.190.
- 35) 佐藤 走他：照明学会 (2009) p.75.

## 17. 医学・生物応用光学

大阪大 石井克典

### 17.1 概 要

2009 年は近年の傾向と同様，診断分野の台頭がめざましかった．生体光学分野の世界最大級の国際会議である SPIE Photonics West BiOS においては，例年参加者の多い OCT (optical coherence tomography)，光音響法 (光と超音波のハイブリッド診断手法) をはじめ，脳科学分野での光トモグラフィ，多光子顕微鏡，CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) など，細胞・組織のイメージングに関する報告が多かった．診断の対象としては「動脈硬化プラーク」「がん」「生細胞」が多かった印象である．治療分野に関しては，新しい技術開発に関する報告は国内外ともに多くはなかったが，新規光治療法開発に向けた基礎研究で興味深い報告があった．

### 17.2 診断・バイオ分析

循環器科・心臓血管外科における心筋梗塞の発症要因である動脈硬化症の診断に関して，経カテーテル的血管内視鏡 OCT による冠状動脈の動脈硬化診断の臨床試験<sup>1)</sup>，レーザースペックルイメージングによる動脈硬化病変の診断<sup>2)</sup>，fluorescence lifetime imaging (FLIM) を用いた動脈硬化病変の不安定プラークの診断<sup>3)</sup> について報告があった．

内視鏡技術では，新規イメージング手法として，spectrally encoded confocal microscopy (SECM) と optical frequency domain imaging (OFDI) を組み合わせたシステムの開発およびバレット食道がん等の診断例<sup>4)</sup> について報告があった．分光学的手法としては，分子振動の指紋領域にあたる 1800~950  $\text{cm}^{-1}$  を分析可能な ATR-FTIR (attenuation total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy) ファイバーカテーテルの開発および大腸がんの *in-vivo* 診断 (生体内診断)<sup>5)</sup> について報告があった．

ラマン分光技術では，高非線形フォトニック結晶ファイバーによる SC (super continuum) 光源を用いた CARS 顕微鏡によって，非標識で動脈硬化発症ウサギの動脈硬化部位をイメージングする試み<sup>6)</sup> が報告された．神経膠腫，転位病変，脱髄，脳梗塞のマウスモデルを用いて，CARS イメージと HE (hematoxyline-eosin) 染色像を比較し，ある程度傾向が一致するという報告<sup>7)</sup> もあり，CARS が臨床で利用できる可能性も示された．また，CARS と第二高調波発生顕微鏡，CARS と多光子顕微鏡といったように，他の非線形過程を利用した顕微イメージング技術との組み合わせについて，報告が多数された．

### 17.3 治 療

PDT (photodynamic therapy) は表在型がんに対して非常に良好な治療法であり，数多くの臨床例が報告されてきているが，ドーズが不確かなことによる治療効果の曖昧さと，単独治療での限界が近年問題視されている．これらの解決策のひとつとして，混合療法 (PDT ともうひとつの処置法の併用) が注目されており，PDT と抗血管新生治療を組み合わせた混合治療法について，すなわち PDT 後の抗 VEGF (vascular endothelial growth factor) 剤投与の有効性について報告<sup>8)</sup> があった．また，PDT と内視鏡的がん切除術 EMR (endoscopic mucosal resection) を組み合わせた手法により，従来では PDT の適応外であったサイズのバレット食道腺がんが治療できることも報告され<sup>9)</sup>，PDT の適応拡大が試みられている．また，化膿性関節炎に対する PDT<sup>10)</sup>，骨肉腫に対する PDT<sup>11)</sup>，光線力学効果を利用した心房細動治療<sup>12)</sup> など，PDT の新たな利用研究

に関して報告があった。

その他のレーザー治療に関しては、中赤外波長  $5.75 \mu\text{m}$  のパルスレーザーによる血管形成術<sup>13)</sup>、中赤外波長  $6.02 \mu\text{m}$  のパルスレーザーによるう蝕（虫歯）の選択的除去治療<sup>14)</sup>、新規歯科用レーザー（日本では未認可）である中赤外波長  $2.79 \mu\text{m}$  の Er, Cr : YSGG レーザーによるう蝕処置および歯周外科処置の臨床例<sup>15)</sup>が報告された。

#### 17.4 展 望

OCT, FLIM, 内視鏡特殊光診断, CARS など、近年注目されている生体光イメージング技術の研究動向は、他の手法とのコンビネーションによる高機能化へと向かっている。診断・分析技術は測定対象をフォーカスすること（キラアプ리케이션の探索）が重要であるため、現在鋭意開発されている診断モダリティーがどのような対象疾患や対象分野で実用化できるか、応用研究を推進することが重要である。

治療に関しては、臨床での症例報告は散見されるが、国内外ともに新規手法開発に向けた研究報告は少なく、近年の減少傾向は加速している。PDT はがんの低侵襲治療として非常に有用な治療法であるため、さらなる適応拡大と普及を目指し、基礎研究が盛んに行われるべきである。今後、治療研究に関しては生体光学分野として盛り上げていく必要があると考える。

#### 文 献

- 1) E. Regar *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7161D-403.
- 2) S. K. Nadkarni *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7161D-415.
- 3) J. E. Phipps *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7161D-406.
- 4) D. Kang *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7172-06.
- 5) M. J. V. Nortwick *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7172-20.
- 6) A. F. Pegoraro *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7183-35.
- 7) C. W. Freudiger *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7183-42.
- 8) S. K. Chang *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2009) 7164-06.
- 9) 生沼健司他：レーザー医学会（日本レーザー医学会誌，**30**）（2009）p. 354.
- 10) 田中優砂光他：光線力学学会（日本レーザー医学会誌，**30**）（2009）p. 195.
- 11) 永井 悠他：光線力学学会（日本レーザー医学会誌，**30**）（2009）p. 221.
- 12) 伊藤亜莉沙他：光線力学学会（日本レーザー医学会誌，**30**）（2009）p. 214.
- 13) 月元秀樹他：生体医工学会（2009）25amO-28-2.
- 14) 石井克典他：レーザー歯学会（2009）p. 124.
- 15) 金成雅彦：レーザー歯学会（2009）p. 107.

## 18. 光学教育

東京大 五神 真

### 18.1 概 要

20 世紀において科学技術は人類の活動の規模を飛躍的に拡大し、人類に富と繁栄をもたらした。21 世紀に入り、人類の活動が、化石エネルギーの枯渇や地球環境の破壊といった地球全体の環境持続にかかわる大きな影響をもつに至ったことが顕在化しつつある。これらは既存の技術では解決不可能な課題であり、新たな科学技術の開拓によって克服することが求められている。このような状況のもとで、高度な人材の育成が喫緊の課題となっている。しかし、わが国では少子化と理科離れが進んでおり、「知識基盤社会」への移行に向けてその道筋は必ずしも明らかではない。特に、高度科学技術人材の育成の場としての大学院の改革が急務となっている。このような背景の中で、光科学分野でいくつか特徴のある大学院の教育改革事業が進められている。ここでは、筆者が関係している事業を中心に、改革の取り組みについて紹介する。

光科学は、基礎科学から産業技術あるいは医療まで幅広い分野にひろがる横断的な分野である。物理学あるいは化学の分野では、光そのものの研究や光と物質のかかわりについて、先端的なレーザーを用いた研究が多数の大学院学生や若手研究者によって活発に進められている。光科学分野の一層の成長には、分野を超えて新たな領域を開拓することが必要であり、分野を横断した領域で活躍する人材を育成する場を整えることが急務となっている。このような状況のもと、東京大学は理工の連携事業として、電気通信大学、慶應義塾大学とも共同で「先端レーザー科学教育研究コンソーシアム」(CORAL)を実施している。この事業については後述する。このほか、光関連企業からの寄付による寄附講座や教育センターも設置されている。例としては、東京大学生産技術研究所のニコン光工学寄附研究部門や、宇都宮大学オプティクス教育研究センター(キャンオン)などを挙げることができる。これらの一連の流れは、産業基盤を支える技術としての光をキーワードに、人材育成を産学の協力によって進めることの重要性が産学双方で認識されてきていることを示している。

文部科学省は、光科学に関する国内基盤強化を目的として、平成 20 年度から 10 年間の事業として「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」(<http://www.photonfrontier.net/>)を開始した<sup>1)</sup>。このプログラムは、光科学分野で活発な活動を行っている研究グループを機関の枠を超えてネットワーク化し、連携研究体

制を強化することを狙うものである。東京大学を幹事機関とする「先端光子科学アライアンス」<sup>2)</sup> (Advanced Photon Science Alliance; APSA, 理化学研究所, 電気通信大学, 慶應義塾大学, 東京工業大学との連携, <http://www.psc.t.u-tokyo.ac.jp/APSA/>) と, 日本原子力研究開発機構(原研)を幹事機関とする「融合光新創生ネットワーク」<sup>3)</sup> (Consortium for Photon Science and Technology; C-PhoST, 大阪大学, 京都大学, 分子科学研究所との連携, <http://www.c-phost.jp/>) の2つの拠点が発足している。ここでは, 東京大学における人材育成事業を紹介する。

## 18.2 先端レーザー科学教育研究コンソーシアム (CORAL)

上述した先端レーザー科学教育研究コンソーシアム (Consortium on Education and Research on Advanced La-

ser Science; CORAL, <http://www.coral-ut.org/>) は, 東京大学を中心とした文部科学省特別教育研究経費(教育改革)事業として, 2007年4月に開始された大学院修士課程向けの教育プログラムである。この事業の特徴は, 先端光企業との密接な連携により進めていることである。産業技術あるいは民生品の中には, 最新の光科学技術の成果がふんだんに取り入れられている。このふたを開けて学生に見せ, 直接さわって体験させることで, 基礎研究と応用技術の距離がないことを実感させることがひとつの狙いとなっている。産業側が教える立場で大学院教育にかかわり, 産学の垣根を超えて人材育成・教育を協働するものである。特徴ある光科学教育を行っている電気通信大学レーザー新世代研究センターと慶應義塾大学理工学研究科が本プログラムに参加している。東京大学と電気通信大学, 慶應義塾

表1 平成21年度CORALの講義と実習の内容。

夏学期	講義	実習	担当
第1回	光学産業における光学技術	レンズ設計・基礎から実戦まで	(株)ニコン
第2回	光の量子性と光子計数法	光子相関計数法とその応用	東大工 物理工学
第3回	量子カスケードレーザとその応用	量子カスケードレーザとその応用	浜松ホトニクス(株)
第4回	レーザによる微細加工技術	レーザによる微細加工技術	オムロン(株)・オムロンレーザーフロント(株)
第5回	ランプによるUV光及びVUV光の発生方法と産業界での光の応用	UV光の分光法と光化学反応の体験実習	ウシオ電機(株)
第6回	光MEMSデバイスとその応用について	DMDによる映像表示および画像解析に関する実習	(株)ブイ・テクノロジー
第7回	光ディスクの原理と将来動向	光ディスクの中身を覗く	(株)リコー
第8回	ガラスの材料特性と光学デバイスへの応用	パッシブ, アクティブ光学材料としてのガラスの合成と評価	日本電気硝子(株)
第9回	照明用LEDの製品技術とその応用	LEDの測定技術・デバイス技術に関する体験実習	日亜化学工業(株)
第10回	重力波天文学が生み出した新しいレーザー技術	非線形光学実験	電通大 レーザ新世代研究センター
第11回	表面プラズモン増強のエレクトロニクスへの応用	メタマテリアルを作る	日本電気(株)
冬学期	講義	実習	担当
第1回	ハイテクを支えるものづくり	光学デバイスの取り扱い, 光学応用システムによる加工・評価	シグマ光機(株)
第2回	回折光学からナノ光学まで	ナノ光計測制御	キャノン(株)
第3回	バイオセンサのフォトニクス	SPRバイオセンサを作ってみよう	富士フイルム(株)
第4回	偏光板に見る分子配向技術	偏光板を作る	三菱化学(株)・(株)三菱化学科学技術研究センター
第5回	生体分子を観る!測る!	生体分子を観る!測る!	オリンパス(株)
第6回	フェムト秒ファイバーレーザー	フェムト秒ファイバーレーザーを用いたモードロックと非線形効果の観測	アイシン精機(株)
第7回	先端光子科学におけるフーリエ光学応用	フェムト秒レーザ波形整形と周波数域干渉波形計測	慶應大 理工
第8回	先端分光計測のための光学の基礎	先端分光計測のための光学の基礎	東大理 化学
第9回	光ファイバおよび光ファイバ通信の測定技術の原理と光ファイバセンシングへの応用	光ファイバ線路測定・評価および光ファイバセンシングの原理に関する演習	横河電機(株)

大学との連携体制のもと、実習、講義の両方について、単位互換制度を実現している。本プログラムを通じ、機関を超えて学生教員の交流が行われている。

本プログラムに参加していただいている国内の先端光関連企業は、平成21年度現在で19社となっている。企業の最先端で活躍する研究者・技術者の指導により、大学院講義、大学院学生の実験・実習が進められており、産業界で活躍する技術者と学生の相互交流の場としても意義のあるものとなっている。CORALではこの講義・実習に加え、先端レーザー科学分野の国際スクールやシンポジウムも行っており、国内外の大学院学生や若手研究者の交流も進めている。

平成21年度に実施した講義・実習の内容を表1に示す。この講義・実習の受講対象者は修士課程の学生であり、平成21年度前期には60名、後期は53名が受講した。

### 18.3 光量子科学研究センター

東京大学では、光科学および光量子科学分野において世界が目にする研究が多数行われている。これらの研究は、さまざまな部局・専攻で活発に進められてきたが、教育プログラムとして連携する仕組みが存在していなかった。そこで、個々に進められている博士課程教育および若手研究者育成の機能を全学規模で結集させる仕組みをつくるために、工学系研究科内に光量子科学研究センター (Photon Science Center of the University of Tokyo; UT-PSC, <http://www.psc.t.u-tokyo.ac.jp/>) を設置した。このセンターをハブ拠点として整備し、学内で世界を先導している研究グループや学外の先端企業、主要研究者との連携を進めている。また、現代光科学の先端研究から生み出された新しい知見を学理として体系的に整理し、それを若手研究者育成に即時活用できるように、現代光科学のカリキュラムを整備し、新しい博士人材育成の基盤を構築する事業に着手している。

### 18.4 先端光量子科学アライアンスにおける人材育成

先端光量子科学アライアンスは、前述のように東京大学を幹事機関として、理化学研究所、電気通信大学、慶應義塾大学、東京工業大学の光科学技術の研究グループが連携して、新しい光源技術とその応用分野の開拓、および、次世代の光科学技術を担う人材を育成することを目的とするプログラムである。東京大学では、前項で述べた光量子科学研究センターをこの事業の推進母体と位置づけ、先端研究推進と人材育成事業を進めている。人材育成に関しては、前述のCORAL事業との連携を重視し、実習設備の充実を図るとともに、平成21年度より、CORALの実習に博士課程の学生がTA (teaching assistant) として参加する制

度を開始した。この事業により、博士課程の学生は、学生指導を行うことで自ら学ぶ機会を得ると同時に、企業の研究について知ることが可能となる。博士人材のキャリアパスの選択肢を広げるという効果もある。

また、気鋭の若手研究者がその発想を生かして研究を実施できる環境を整備することで、次世代のリーダーを育てる「光科学若手研究者育成プログラム」も開始した。国際公募を経て、特任准教授を採用し、専任の特任助教も着任予定となっており、独立研究ユニットとしての活動が始まっている。このほか、参画機関が共同で学生向けに光科学技術の基礎と最先端を解説する「先端光量子科学アライアンスセミナー」を実施している。レーザーの作成技術、パルスレーザーやCW (continuous wave) レーザーの制御技術、強光場中の非線形現象など、ホットな話題を取り上げたセミナーが行われ、毎回多くの参加者がある。また、2009年3月には2005年度のノーベル物理学賞受賞者J. L. Hall先生をお迎えして、若手の研究者との集いを実施した。大学院生を中心にした若手の参加者は、Hall先生と直接議論をする機会を得て大きな刺激を受けた。

### 18.5 展 望

ここで紹介した事業は、光学界に関連する教育活動の動きのごく一部に過ぎないが、光科学の分野では、理工や分野の区別を超えた連携による人材育成の活動が活発化していることを紹介した。特に、産業界の方々が積極的に協力してくださっており、人材育成を軸とした新たな産学連携の姿としても重要な動きであると感じている。光量子科学研究センターでは、「先端光量子科学国際教育研究プログラム」を提案している。このプログラムは、旧来の専攻という概念にとらわれず、光科学を横串のキーワードとして、関連研究科専攻での専門の高度化に加え、光科学を横軸とする分野展開能力、学術俯瞰力、応用展開力を着実に身につけることが可能なカリキュラムと、それを進めるための教育制度の構築を目的としている。光科学を軸として、俯瞰力と開拓力を同時に身につけた、国際リーダーとなる最高度の博士人材の育成の新たな仕組みを提示し、高度人材育成のための大学院改革のモデルとして他分野への波及も期待したいと考えている。

### 文 献

- 1) 加藤義章：“最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点の形成”，光アライアンス，**20** (2009) 1.
- 2) 五神 真，三尾典克：“先端光量子科学アライアンス”，光アライアンス，**20** (2009) 4.
- 3) 兒玉了祐：“融合光新創成ネットワーク—超高帯域高品位高輝度光源開発と若手リーダーの育成—”，光アライアンス，**20** (2009) 8.