

2012 年日本光学会の研究動向

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

表 「2012 年日本光学会の研究動向」における引用学会等の省略表記

略 称	講演会の正式名称
<i>OPJ</i>	日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2012
光学シンポジウム	日本光学会第 37 回光学シンポジウム
春季応物講演会	第 59 回応用物理学関係連合講演会
秋季応物講演会	第 73 回応用物理学学会学術講演会
分子科学討論会	第 6 回分子科学討論会
分光年次講演会	平成 24 年度日本分光学会年次講演会
信学会総合大会	電子情報通信学会 2012 年総合大会
信学会ソサイエティ大会	電子情報通信学会 2012 年ソサイエティ大会
精密春季大会	精密工学会 2012 年度春季大会
精密秋季大会	精密工学会 2012 年度秋季大会
レーザー学会年次大会	レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会
<i>CLEO</i>	Conference on Lasers and Electro Optics 2012
<i>ECOC</i>	European Conference and Exhibition on Optical Communication 2012
<i>ICCE</i>	International Conference on Communications and Electronics 2012
<i>ICORS</i>	22nd International Conference on Raman Spectroscopy
<i>ISLC</i>	23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference
<i>ISOM</i>	International Symposium on Optical Memory 2012
<i>IWH</i>	International Workshop on Holography and Related Technologies 2012
<i>LS13</i>	The 13th International Symposium on the Science and Technology of Lighting
<i>ODF</i>	8th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication
<i>OFC/NFOEC</i>	2012 Optical Fiber Communication Conference and Exposition/ National Fiber Optic Engineers Conference
<i>SciX</i>	The Great Scientific Exchange
<i>TMRC</i>	The 23rd Magnetic Recording Conference
<i>CRM</i>	The 11th International Conference on X-ray Microscopy

1. 光 物 理

リコー 三宮 俊

1.1 概 要

光物理分野は、光の状態または光と物質の相互作用を扱うすべての光技術の基礎を担っており、多岐にわたる研究領域と密接に絡んでいる。継続的な研究が実用化へつながる場合もあれば、新規に登場した光技術に定量的な価値を与える役割を担う場合もあり、高い学術的視点から光学の発展に広く貢献することが期待される。

2012年における国内学術講演会の報告内容を俯瞰すると、光渦やメタマテリアルといった特殊な光の状態制御が理論および応用の両面から注目されている。また、光マニピュレーション技術は応用に向けた継続的な進展がみられる。フォトニック結晶関連は、半導体-光融合デバイスを切り口に精力的な研究が進んでおり、光・量子エレクトロニクスの一分野を形成しているといえる。自然が作るランダムな系と光の相互作用は、近年の低環境負荷技術と親和する可能性がある。回折やコヒーレンスなどの理論研究は、光物理分野の主要な領域であったが、昨今の光制御デバイスの性能向上と相まって光計測技術への応用が急進している。本稿では、研究の活発さがうかがえる上記研究領域について概観していく。

1.2 光の状態制御とその応用

ここ数年、ヘリカルビームやベクトルビームといった軸対称性を有する光波の新たな生成・制御方法が盛んに研究されている。例えば、フレネルロム構造を用いた波長依存性のない軸対称偏光素子の開発¹⁾、電気光学変調器(EOM)を用いた高次ヘリカルビームの干渉パターン制御²⁾、同軸反射鏡によりビーム伝搬方向を変化させることによるヘリカルビームのモード変換³⁾などが挙げられる。また、側面励起による熱レンズ効果を利用したレーザーのヘリシテーター制御⁴⁾に関する報告があった。これらの特徴的なビームは、原子や微粒子の光トラップのほか、光加工技術への応用も検討されている。ヘリカルビームによるレーザーアブレーションにおいてらせん状の微細構造が形状されるといふ実験結果⁵⁾は、光の運動量を物質へ転写する物理過程として大変興味深い。

1.3 光マニピュレーション

微粒子の光トラップに関わる研究は古くから光物理分野において進められてきたが、近年は特定機能の実現を狙った研究開発にシフトしている。具体的には、トラップ力を増大し生体細胞内の微粒子を摘出するPLAT (pulse laser assist optical tweezers) の動作検証⁶⁾や、液相試料にお

けるトラップ力と液体流動の複合現象^{7,8)}に関する報告があった。また、ホログラフィック光ピンセットにランダムマスクを用いる方法により、複数微粒子の高速同時操作を可能にする⁹⁾という報告があった。

従来の光トラップとは異なり、物質の自由度を援用した光マニピュレーション技術が注目される。金属ナノディスクペアの間に誘起されるギャップモードプラズモンの干渉パターンを用いることにより、10 nm以下の光スポットを用いた分子レベルの光マニピュレーション¹⁰⁾の可能性が示された。金微粒子チェーンと熱ゆらぎを利用したたんぱく質などを輸送するシステム¹¹⁾に関する理論研究の報告があった。さらに、新たなマニピュレーション技術として、光導電性基板と電気泳動法を組み合わせ、微粒子集合体を操作(パターニング)する手法が実験検証された¹²⁾。

1.4 フォトニック結晶

フォトニック結晶に関しては、春季および秋季応用物理学会において多数の報告があった。その大半は、半導体加工プロセスによる二次元フォトニック結晶が占める。ここでは概観することは避け、注目したいいくつかの研究を挙げておく。非線形光学効果、MEMSなどを用いたQ値すなわちスローライト・ストップライト状態の動的制御^{13,14)}や、ナノ共振器間または共振器から量子ドットへのエネルギー輸送制御^{15,16)}に関する報告があった。これらは量子情報処理等への応用を狙ったものである。また、微小ヘテロ構造をもつ集積ナノ共振器による4ビットのメモリー動作の実験¹⁷⁾、および多ビット化への可能性検討¹⁸⁾の報告があった。レーザーへの応用については、面発光レーザーとしての優位性が着目され、構造によるビームパターン¹⁹⁾や、偏向制御²⁰⁾にフォトニック結晶が活用されている。アレイ化の容易性から、生体イメージング用光源への利用²¹⁾に関する提案もあった。その他、光集積回路の微小化を狙ったプラズモニック結晶²²⁾や、三次元フォトニック結晶への導波路構造の導入²³⁾など、情報伝達キャリアや次元に着目した研究にも進展がみられた。

1.5 メタマテリアル

メタマテリアルはマイクロ波から可視光までを包括する研究領域であり、異分野間の交流が活発である。2012年の春季応用物理学会講演会まで、定常的にシンポジウムが開催されてきた。本シンポジウムでは、各波長帯での技術進展のほか、フーリエモード法²⁴⁾や周期多重極子法²⁵⁾を用いた数値シミュレーションの効率化などが議論された。可視光領域の研究に重点を置くと、金属共振器を三次元的に配列した構造が研究の中心であったが、メタマテリアル表面と称され、金属と誘電体からなる二次元構造²⁶⁾にお

ける光学現象にも注目が集まっている。そのほかにも、フォトニック結晶構造をもつメタマテリアルにより、クローキングにおける不可視領域と外部との通信を可能にするといった数値計算結果²⁷⁾が示されるなど、メタマテリアル光学素子を具現化するための構造探索と新規機能探求の両側面において研究の進展がみられた。

1.6 ランダム系と光の相互作用

ランダムレーザーは微粒子による光多重散乱の効果により、共振器レスでレーザー発振を実現するものであり、新規な光源として注目されている。ランダムレーザーは光のアンダーソン局在、微粒子による共鳴、利得媒質の自然放出過程といった物理現象が混在する複雑な系であり、その制御手法に関するいくつかの成果が報告された。散乱体に半導体微粒子を用い、蛍光微粒子を欠陥として導入することにより、シングルモードレーザー発振を確認した²⁸⁾。また、泡構造媒質がレーザー発振強度の向上に有効であることが示された²⁹⁾。

ランダム系による光学現象を用いた光起電力素子の光電変換効率の増大³⁰⁾に関する報告もあった。フォトニック結晶に適当なランダム性を導入することにより光吸収が増強するという結果は興味深い。

1.7 光学理論の光計測応用

フーリエ光学やコヒーレンス理論といった伝統的な光物理分野の研究は、光計測応用において大きな進展をみせている。本稿ではその詳細は触れずに、技術的なトレンドを述べておく。偏光・分光情報^{31,32)}、さらには物体形状³³⁾までをも取得する多元情報のイメージングに関する報告が数多くみられた。2012年の日本光学会奨励賞には、五次元のインターフェログラムによる画像を再構成する干渉計測技術³³⁾が選出されている。共通しているのは、イメージセンサー上に画像以外の情報を干渉パターンとして重畳(多重化)させることである。イメージセンサー技術の進展と光学理論の統合が本研究分野の進展を加速したと考えられる。

1.8 まとめと展望

「光物理」を念頭に置いて研究動向をまとめたが、結果、応用技術との明確な境界はなく、近年の光学研究における応用志向の高さが見受けられた。メタマテリアル、フォトニック結晶、ナノ光学といった先駆的な研究が急進したところで、基礎物理光学に立ち返るといった流れがあるのかもしれない。もしくは、異分野間の融合領域を研究対象としたときに、光物理学的な描像が不可欠となっているのかもしれない。応用技術への興味に対して、回折、干渉、散乱現象といった基礎的な光学現象を扱う研究は少な

くなっている。しかしながら、光マニピュレーションやコヒーレンス理論といった、光物理分野から応用技術へ移行しつつある研究領域も少なくない。いずれのベクトルの向きをもつにせよ、光物理という分野は現在においても広範な光技術の基盤を支えるという役割を担っていることに変わりはない。光物理学は、常に新しい概念を取り込み、応用価値を生み出し、継続的にトレンドを進化させていくことが今後も重要であろう。

文 献

- 1) 若山俊隆他：秋季応物講演会(2012) 14p-F3-6.
- 2) 坂本盛嗣他：春季応物講演会(2012) 17p-A2-5.
- 3) 小林弘和他：春季応物講演会(2012) 17p-A2-4.
- 4) 佐藤真武他：OPJ(2012) 23aE7.
- 5) 高橋冬都他：秋季応物講演会(2012) 13p-PA9-9.
- 6) 前田紗希他：春季応物講演会(2012) 17a-B9-2.
- 7) 柚山健一他：春季応物講演会(2012) 17a-B9-1.
- 8) 大島健太郎他：秋季応物講演会(2012) 13p-PA9-1.
- 9) 吉田光平他：春季応物講演会(2012) 17a-B9-4.
- 10) 田中嘉人他：秋季応物講演会(2012) 13a-F-7.
- 11) 飯田琢也他：春季応物講演会(2012) 17a-B9-5.
- 12) 田村 守他：春季応物講演会(2012) 17a-B9-6.
- 13) 近藤圭祐他：春季応物講演会(2012) 15p-E5-10.
- 14) 太田竜一他：秋季応物講演会(2012) 13p-B1-5.
- 15) 佐藤義也他：春季応物講演会(2012) 15p-E5-3.
- 16) 中村達也他：秋季応物講演会(2012) 13a-PA5-13.
- 17) 野崎謙悟他：春季応物講演会(2012) 15a-GP1-5.
- 18) 倉持栄一他：秋季応物講演会(2012) 13p-B1-10.
- 19) 沖野剛士他：春季応物講演会(2012) 16a-E5-1.
- 20) 成松道正他：春季応物講演会(2012) 16a-E5-3.
- 21) 阿部紘士他：春季応物講演会(2012) 16a-E5-7.
- 22) 森 翼他：春季応物講演会(2012) 15a-GP1-14.
- 23) 石崎賢司他：秋季応物講演会(2012) 13p-B1-13.
- 24) 市川裕之：春季応物講演会(2012) 15p-E3-5.
- 25) 西村直志：春季応物講演会(2012) 15p-E3-7.
- 26) 崔峯 碩他：春季応物講演会(2012) 15p-E3-9.
- 27) 岡田直樹他：春季応物講演会(2012) 13a-F3-6.
- 28) 煮雪亮他：秋季応物講演会(2012) 13a-F-1.
- 29) 吉留亮介他：OPJ(2012) 23aE1.
- 30) A. Oskooi 他：春季応物講演会(2012) 15p-E5-17.
- 31) E. L. Dereniak : OPJ (2012) 23pPL2.
- 32) 羽賀悠人他：OPJ(2012) 23aC6.
- 33) 笹本益民：OPJ(2012) 23pC6.

2. 結像素子・光学機械

オリンパス 大出 寿

2.1 概 要

日本光学会光設計研究グループが主催している国際会議 ODF '12 (8th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication) が、2012年7月にロシア・サンクトペテルブルクで開催された。従来の ODF ではアジアからの参加者が中心であったが、今回は参加者 220 人のうち、開催国ロシアから 50 名以上、他の欧州各国からも 30 名以上の参加があるなど、EOS (欧州光学会: European

Optical Society)との連携が強化されたことは著しい成果といえる。ODFの国際化が進むことは、日本の光産業の発展においても重要であり、ODFの担う役割が増すことになる。今後のODFのさらなる発展に期待したい。

また、光産業界では、カメラモジュールの性能向上とともにさまざまなアプリケーションへと展開されている。とりわけ、高度な画像認識技術と組み合わせた画像センシング技術が発展し、車載カメラやセキュリティー分野における適用が拡大されつつある。

2.2 結像素子

2.2.1 回折レンズ

回折レンズは、逆分散性を有しているため、色収差や像面湾曲の補正に有効であることが知られており、従来よりCD、DVDやBDといった光ディスクピックアップ用レンズやカメラ交換レンズに用いられてきた。また最近でも、2012年9月に、回折光学素子(位相フレネルレンズ)を搭載し色収差低減と長作動距離化を実現した工業用対物レンズがリリースされている¹⁾。

回折レンズを用いる場合、回折効率の波長依存性に起因する不要次数光の発生が問題になる。そのため、回折格子のブレード表面を適切な材料で覆う二層型の回折レンズが提案されている。今回、二層型回折レンズ用材料として、既存の樹脂材料に高屈折率波長分散の無機粒子を分散させた新規ナノコンポジット樹脂材料を用いた素子が報告されている^{2,3)}。開発されたナノコンポジット樹脂と既存のポリカーボネートを組み合わせることで、可視光全域において理論上95%以上の回折効率となることが示された。本回折レンズは樹脂材料の組み合わせであるため、量産性の向上が見込め、広角・小型撮像系が求められる携帯用カメラ、車載カメラやセキュリティー分野への展開が期待される。

2.2.2 製造技術

製造技術としては、極端紫外光(EUV: extreme ultraviolet)を用いた次世代リソグラフィ用投影光学系に用いるような、高精度光学素子の製造技術に対して注目が集まっており、第50回光設計研究グループ研究会においても「光と新しい加工技術」と題した特集が組まれた。

EUV用光学系では非球面ミラーがキーコンポーネントとなるが、その表面加工技術として用いられている、EEM (elastic emission machining, 固体表面間に生じる化学相互作用を利用した加工)や、IBF (ion beam figuring)について報告された⁴⁾。また、加工した非球面ミラーの面形状を高精度に計測するフィゾー型干渉計についても報告された^{5,6)}。これらの技術を組み合わせることで、形状精

度100 pm RMS以下の高精度非球面ミラーの製造を実現している。

また、光学素子の高精度研磨技術として、近接場光エッチング法に関する報告があった⁷⁾。本技術は、研磨面の微小突起部に発生する近接場の特性を生かし、自律的に研磨を進展させる手法である。これら的高精度研磨技術を適用することで、光学素子のレーザー破損閾値を向上させることが可能となり、高出力レーザーを用いたアプリケーションへの展開が期待できる。

2.3 光学機械

2.3.1 光学設計および設計法

第49回光設計研究グループ研究会において、「最新光学設計」と題する特集が組まれた。本研究会では設計理論に関する講演が複数行われたが、光学設計における非球面の扱いに関するものが中心であり、光学設計者にとって非球面を用いた設計の難しさがいまま課題であることが認識された。講演では、球面光学系の設計法によって非球面光学系を設計することに対する課題⁸⁾、奇数非球面の特性およびそれを生かした設計例⁹⁾、非球面を正しく使うための手法¹⁰⁾について報告された。

また、カメラモジュールやデジタルカメラでは、小型・高性能な光学系の開発が継続的に開発されているが、カメラの多機能化に対応した光学設計や従来にない価値提供を目指した設計思想に関する報告がされている。

多機能化に対応した設計例としては、近年のデジタルカメラでは標準搭載となっている動画撮影機能に対応したレンズ設計についての報告があった¹¹⁾。動画撮影用光学系では、ズーミング・フォーカシングの静粛性が求められるため、モーター駆動音が最小になるように、光学系にはレンズ移動量の少ないインナーズーム・インナーフォーカス方式を採用するとともに、鏡筒構造を工夫していることが説明された。

さらに、デジタル一眼レフカメラ用交換レンズにおける設計思想に関しても報告があった¹²⁾。カメラに求められる描写特性において「ぼけ味」が重要であることが示され、望ましい点像のあり方や設計例について報告された。今後の写真用レンズ性能として、従来の解像力を重視した設計から、人間の視覚特性を考慮した主観的視点を盛り込む必要性を示唆しており、興味深い。また、カメラモジュール用の設計例として、全体繰り出し光学系における物体移動に伴う収差の変化について解析的に分析し、収差変化が最小になる設計指針について示された^{13,14)}。

また、第50回光設計研究グループ研究会において、矢部氏による光学設計講座が開催され、独自開発された設計

法に関して講演された¹⁵⁾。光学設計では、非球面を採用する面の導出は常に課題となるが、矢部氏によって提唱された移動非球面を用いて最適化することで、効率的に最適解が得られることが示された。

2.3.2 評価・調整技術

近年の光学機械の高精度化・小型化に伴い、光学系の測定のみでなく、評価や調整技術への研究が重要となっており、それに関わる新たな技術に関して報告がなされている。

小型カメラモジュールでは、組み上がった状態での品質を保証する必要がある、それに対応する評価手法として、撮影したスポット像から、波面収差を逆解析によって導出する手法が提案された^{16,17)}。

また、天体用望遠鏡に用いる off-axis 反射光学系を構成するミラーのアライメント誤差を補正するアルゴリズムについて報告された¹⁸⁻²⁰⁾。本手法は、調整用ミラーの駆動量とそれによって生じる波面収差量の関係した波面感度行列を用いて、実測した波面収差量から調整量を簡便に導出するものである。本手法の発想は古典的でありながらも、計算能力が飛躍的に向上した今日において、その有用性を再認識させるものであり、今後さまざまな光学系の評価においても適用されることが期待される。

2.4 展 望

日本の光産業では、デジタルカメラを中心としてデジタル光学機器分野が優勢性を保っている状況にある。その背景には、銀塩カメラで培ったレンズ光学をベースに、デジタルシステムとしての特徴を生かして高性能・高機能を実現させたことがある。最近のミラーレス一眼カメラ（ノンレフレックスカメラ）に搭載されている撮像面位相差 AF は、小型化・追従性にすぐれた方式として注目されているが、本機能も光学技術とデジタル技術の融合により実現できたものといえ²¹⁾、今後もさまざまなアプリケーションにおいて融合技術による進化が加速すると予想される。また、撮像システム単独での性能向上だけでなく、3D モニターや高精細モニター（4K モニター）等の表示系の急速な進歩に対応した撮像システムの開発にも注目したい。

また、海外メーカーよりライトフィールド技術を用いて撮影後に合焦位置を変えられる機能（リフォーカス）を有するカメラが市販された²²⁾。本技術は、撮影時に光学系によって適切にエンコードさせた画像を取得し、後処理でそれらの撮影データをデコードすることにより、目的に合わせた画像を再構成する computational photography²³⁾ の一種である。Computational photography は、リフォーカス機能のような娯楽的側面が強調されがちではあるが、瞬

時現象に関する計測・解析技術のためのツールとして今後注目されることが予想される。今後はこれらに関連するさまざまな技術が発展し、早期に実用化されることを期待したい。

また、光設計分野に関しては、新規非球面式として提唱されている Forbes 直交関数²⁴⁾ に関して、その有効性に関する研究が進展することが予想される。

文 献

- 1) http://www.nikon.co.jp/news/2012/0920_cfi60-2_01.htm
- 2) 安藤貴真他：光学シンポジウム (2012) 講演番号 1.
- 3) 是永継博他：OPJ (2012) 25aBS2.
- 4) 金岡政彦他：光学シンポジウム (2012) 講演番号 11.
- 5) 村上勝彦：光学, **41** (2012) 132.
- 6) 村上勝彦：光設計研究グループ機関誌, No. 50 (2012) 19.
- 7) 平田和也：光設計研究グループ機関誌, No. 50 (2012) 25.
- 8) 一色真幸：光設計研究グループ機関誌, No. 49 (2012) 3.
- 9) 渋谷真人：光設計研究グループ機関誌, No. 49 (2012) 8.
- 10) 成相恭二：光設計研究グループ機関誌, No. 49 (2012) 19.
- 11) 芝山敦史他：光設計研究グループ機関誌, No. 49 (2012) 43.
- 12) H. Harada: ODF (2012) 2S1-01.
- 13) 長谷隼佑他：OPJ (2012) 23pB1.
- 14) 任 莉他：OPJ (2012) 23pB2.
- 15) 矢部 輝：光設計研究グループ機関誌, No. 50 (2012) 3.
- 16) K. Okada et al.: ODF (2012) 3S1-09.
- 17) 岡田和佳他：光学, **41** (2012) 627.
- 18) 今泉 智他：光学シンポジウム (2012) 講演番号 5.
- 19) T. Nakano et al.: ODF (2012) 3PS-26.
- 20) 中野貴敬他：OPJ (2012) 23pP9.
- 21) 内山重之他：O plus E, **34** (2012) 29.
- 22) <https://www.lytro.com/camera>
- 23) 谷田 純：応用物理, **81** (2012) 1021.
- 24) G. W. Forbes: ODF (2012) 3S1-08.

3. X 線 光 学

筑波大 青木貞雄

3.1 概 要

X 線光学は光源、光学素子、検出器の 3 つの要素に加え、高速・大容量コンピューターの発展に依るところが大きい。ごく最近では、2011 年 6 月の X 線自由電子レーザー (XFEL) 発振の成功によって、新たな可能性が見え始めた。X 線の短波長性を生かした精密計測もハードウェア開発に偏っていた面もあるが、装置の利便性が増し、X 線画像計測を中心に利用者の裾野が広がってきている。

3.2 X 線 源

2011 年 6 月に発振に成功した X 線自由電子レーザーは、SACLA (Spring-8 angstrom compact free electron laser) の愛称で呼ばれ、2012 年に入って 0.06 nm 近くまで短波長化が進んでいる¹⁾。出力は 10 GW、パルス幅は 10^{-14} s、光源から 110 m でのビーム径は 100 μ m 程度である。空間コヒーレント領域もこのビーム径に近い。ビームラインは 4

の実験ステーションが整備されている。

プラズマ X 線源に関する開発研究は、EUV リソグラフィ用の波長 13 nm から軟 X 線 (波長 2~5 nm) に移り始めている。発生効率を高めるために重元素 Bi をプラズマターゲットにした実験が進められている²⁾。また、高出力ではないが、焦電単結晶 (LiTaO₃) を利用した超小型 X 線発生装置の気圧依存特性について調べられた^{3,4)}。携帯 X 線源として実用化されているが、性能の向上が期待されている。

3.3 光学素子・検出器

最近の X 線結像素子の開発は、波長の短い 0.1 nm 領域に移っている。軟 X 線に比べ、加工精度の厳しさが要求されるが、リソグラフィや精密研磨加工技術の進歩によって、ナノメートル以下の加工制御が可能になっている。

短波長 (波長 ~0.1 nm 以下) になると、通常の軟 X 線用ゾーンプレートでは透過率が大きくなり、集光効率が著しく低下するので、プレートの厚さを厚くする必要がある。しかしながら、輪帯幅が小さくなるとアスペクト比 (厚さ対線幅) が大きくなり過ぎ、微細加工が困難になる。この問題を解決するために、リソグラフィとは異なる方法でゾーンプレートを作製する。極細線 (数 10 μm) の外周にスパッター法でゾーンパターンをコーティングし、ゾーンプレートの厚みを位相 π 変化させる厚さにスライスする方法が採用される。この方法で 20 keV (波長 0.06 nm) X 線で 45 nm 径の集光スポットが得られている⁵⁾。このようにゾーンプレートは通常透過型で利用するが、反射面に結像特性を示す不当間隔回折格子を形成すれば、反射型でも結像が可能になる。これまでに一次的な全反射型ゾーンプレートが開発され、10 nm 近い集光点を得てきたが、さらにこの考え方を応用し、半円筒基板に二次元の全反射ゾーンプレートを描いた場合、10 nm 以下の集光点を得られることが示された⁶⁾。

一方で、放射光の集光光学系として一般的になっている K-B (Kirkpatrick-Baez) ミラーを改良した準ウォルター型ミラーの開発も始まった。ウォルター型ミラーは、軸対称の双曲面と楕円面をタンデムに連ねたパイプ状の斜入射ミラーであり、その製作の難しさから、それを補う光学系の探究が進められている。1つめの方法は、2枚の楕円面ミラーと2枚の双曲面ミラーを直交方向に順番に配置したもので、結像型光学系で 1 μm 近い結像性能を得た⁷⁾。2つめの方法は、垂直・水平方向それぞれ2枚の凹面ミラーを配置したもので、200 nm 角以下の集光点を得た⁸⁾。これらのミラー光学系は、軸対称のウォルター型ミラーに比べ、製作も容易であり、今後の発展が期待できる。

また、最新の微細加工技術の MEMS (micro electro mechanical systems) を利用した X 線光学素子の開発も活発化し始めている。幅 20 μm、高さ 300 μm の高アスペクト比をもつ微細パターンを 4 インチシリコン単結晶に描画し、その側壁を反射面として X 線望遠鏡用として使う⁹⁻¹¹⁾、AlK α 線 (波長 0.83 nm) の予備的な結像に成功した。

多層膜は従来の回折格子との組み合わせで、効率のよい軟 X 線分光器開発にも利用されている。回折格子表面に多層膜を施し、従来の金コート反射型回折格子では困難であった 2 keV から 4 keV (波長 0.3~0.6 nm) の軟 X 線分光を可能にした¹²⁾。

自由電子レーザーの進展により、コヒーレンスのよい X 線を振り分けるデバイスとして、シリコン単結晶のビームスプリッターの開発が進められている。10 keV (波長 0.12 nm) 以下の短波長を対象に、シリコン単結晶の一部を 20 μm 以下の厚さにした薄い窓にし、ブラッグ反射と透過強度を 1:1 に分割した¹³⁾。理論との一致もよく、実用化への一歩を示した。

X 線収束素子として石英ガラスキャピラリーが実用化されているが、15 keV (波長 0.08 nm) を超えるとわずかな曲がりでも反射率が急速に落ちてくる。その解決策のひとつとして、内面に金属をコーティングする方法がある。ニッケルと金の無電解メッキによって、25 keV (波長 0.05 nm) までの反射率の向上を示した¹⁴⁾。

CMOS (complementary metal oxide semiconductor) イメージセンサーは、画素ごとに読み出しをしているため、CCD (charge coupled device) に比べ、読み出し時間が早い。市販の裏面照射型 CMOS イメージセンサーを使い、フォトンカウンティング法で鉄 55 の X 線スペクトルを測定した結果、常温で 5.9 keV のエネルギー分解能 305 eV (半値全幅) を得た¹⁵⁾。一方、X 線を可視光に変換し、CMOS イメージセンサー (浜松ホトニクス ORCA Flash2.8) で読み出す方法の実験報告があった。8 keV (波長 0.15 nm) X 線、0.5 μm 画素、1 mm 視野で露光時間 120 ミリ秒 / フレーム、3 フレーム / 秒で連続撮像が可能になり、従来法の 3 倍の高速化が図られた¹⁶⁾。また、高速 CT 撮影を目的とし、フォトン製 SA2 高速度カメラを用いて 4D-CT を試みた¹⁷⁾。20 keV (波長 0.062 nm) X 線、画素 10 μm、露光時間 1.997 m 秒 / 枚、投影数 1000 で、CT 1 回分 2 秒、CT 撮影間隔約 10 秒、CT 撮影回数 12 回で水が溶解する様子の撮影に成功した。

3.4 X 線光学系システム

従来の X 線像は主として吸収コントラストを画像化して

きたが、軽元素中のわずかな密度差を吸収変化でとらえることが困難な局面が増えてきた。特に空間分解能の向上と短波長に伴い、吸収差がきわめて小さくなり、位相コントラストの重要性が増してきた。位相差の定量化のため、フーコーナイフエッジをゾーンプレートの後焦平面上で左右に走査し、その2枚の画像から微分位相像を得た^{18,19)}。5.36 keV (波長 0.43 nm) X線像とシミュレーションを比較した結果、ほぼ同一の位相変化を示した。さらに、CT (computed tomography) を利用した三次元位相コントラストの再構成像も得た²⁰⁾。一方、一次元走査型と一次元結像型を同時に満足させ、露光時間の短縮と位相変化の定量化の試みのため、一次元ゾーンプレート2個を照明系と対物系に互いに直交させて配置した走査-結像混合型X線顕微鏡の開発も進められた^{21,22)}。実験室系の位相コントラストイメージング技術として注目されているTalbot-Lau干渉計にも進展がみられた。これまで距離的に分離されていたX線源と光源格子をマルチライン状埋め込みX線源にして、装置のコンパクト化を図った。その結果、Cuターゲットで露光時間1秒にまで短縮した^{23,24)}。中規模のX線源として、100 MeV電子線をシリコン単結晶に照射し、パラメトリックX線を放射させる加速器がある。結晶干渉計を利用して、17.5 keV (波長 0.071 nm) X線で大面積 (約 60 mm 幅) 位相コントラスト像を得ている²⁵⁾。

3.5 その他

いわゆる水の窓波長域 (2.3~4.3 nm) を用いたX線顕微鏡は、光学系としてはほぼ完成しているが、光学系が真空中に配置されるため、試料環境に課題が残されている。密着型X線顕微鏡では、試料とシンチレーターを密着させ、SiN薄膜で試料のカバーと真空窓の役割をもたせた。軟X線像は、シンチレーターによって可視光に変換され、CCDカメラで撮像された。分解能は可視光波長で決まり、0.7 μm が得られた²⁶⁾。レーザープラズマ軟X線結像型X線顕微鏡では、ウォルター型ミラーを照明および対物ミラーとしてそれぞれSiN窓を介して真空容器に配置し、その中間の大気中に試料を置いた。試料の含水状態を確認するために、試料ホルダーのSiN薄膜上に炭素系グリッドを形成し、炭素吸収端 (波長 4.3 nm) を挟んだ2つの画像から含水状態の判別が可能であることを示した²⁷⁾。

3.6 展 望

X線光学はXFEL発振の成功によって新たな段階に入った。XFELはビームライン数が少ないために利用機会は限られるが、得られる成果は革新的なものが多い。

大型装置による進歩は、一方で、実験室系装置にも大きな刺激を与えている。特に、汎用X線装置を使ったCT実

験は、研究用から産業利用へ広がりを見せている。また、光学素子も、性能の向上とともに、実験室系での利用が盛んになり、プラズマX線を中心にした先端的な画像計測装置や反射率計が組み立てられている。これらの装置と位相コントラストイメージングの組み合わせによって、日常的な高分解能解析装置の利用が可能になるとと思われる。

文 献

- 1) T. Ishikawa *et al.*: Nat. Photonics, **6** (2012) 540.
- 2) T. Higashiguchi *et al.*: Appl. Phys. Lett., **100** (2012) 014103.
- 3) 花元克巳他: 春季応物講演会 (2012) 18-a-B5-1.
- 4) 花元克巳他: 秋季応物講演会 (2012) 12-a-C3-3.
- 5) Kagoshima *et al.*: XRM (2012) TuE-P09.
- 6) 高野秀和他: 日本放射光学学会年会 (2012) 2c003.
- 7) Matsuyama *et al.*: XRM (2012) Tu2-Facil-3.
- 8) Suzuki *et al.*: XRM (2012) Tu4a-Facil-2.
- 9) Y. Ezo *et al.*: Opt. Lett., **37** (2012) 779.
- 10) 垣内巧也他: 春季応物講演会 (2012) 18-a-B5-11.
- 11) 垣内巧也他: 秋季応物講演会 (2012) 12-a-C3-9.
- 12) 今園孝志他: 日本放射光学学会年会 (2012) 8p030.
- 13) 大坂泰斗他: 春季応物講演会 (2012) 18-p-B5-1.
- 14) 岩井達也他: 春季応物講演会 (2012) 18-a-B5-10.
- 15) 西村和真他: 春季応物講演会 (2012) 17-p-DP1-5.
- 16) 鈴木芳生他: 日本放射光学学会年会 (2012) 9p103.
- 17) 上杉健太郎他: 日本放射光学学会年会 (2012) 9p104.
- 18) 渡辺紀生他: 春季応物講演会 (2012) 18-a-B5-8.
- 19) 渡辺紀生他: 秋季応物講演会 (2012) 12-a-C3-7.
- 20) Watanabe *et al.*: XRM 2012 (2012) Mon-p28.
- 21) 竹内晃久他: 日本放射光学学会年会 (2012) 9p100.
- 22) Takeuchi *et al.*: XRM 2012 (2012) We2-Methods-4.
- 23) 森本直樹他: 春季応物講演会 (2012) 18-a-B5-7.
- 24) 藤野 翔他: 秋季応物講演会 (2012) 12-a-C3-8.
- 25) 高橋由美子他: 春季応物講演会 (2012) 17-p-DP1-3.
- 26) 江島丈雄他: 春季応物講演会 (2012) 18-a-B5-5.
- 27) Takaba *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **51** (2012) 092401.

4. 分 光

森澤勇介*・石川大太郎**・山本茂樹**
鈴木利明**・北濱康孝**・尾崎幸洋**
(*近畿大, **関西学院大)

4.1 概 要

最近の分光学の進歩は、素子や装置の進歩と量子化学計算の進歩の両方に支えられているとよいであろう。これらの進歩が、遠紫外、テラヘルツ、ラマン光学活性、チップ増強ラマン散乱、イメージング、顕微分光などの大きな発展を促している。プラズモニクスによるナノ分光、ナノイメージングの研究は、基礎も応用も相変わらず非常に活発である。基礎研究では4.2節の遠紫外分光のところ述べるように、新しい分光学の進歩が新しい化学を生み出すような流れも出てきている。応用に関する最近の進歩のキーワードといえば、超高空間分解、イメージング、小型化、高速化、非破壊などであろう。小型携帯分光器によ

る高速イメージングのように、これらのキーワードを結び付けたようなものもある。ハンドヘルド分光器の開発も相変わらず活発で、赤外分光などは超小型化の時代に入りつつあるとあってよい。本稿では、この1年間に筆者らが関係した分野で特に目立った話題について解説した。

4.2 遠紫外分光

遠紫外 (FUV) 領域にはほとんどの物質が強い吸収 ($\epsilon = 10^4 \sim 10^5 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$) をもつため、凝縮相での研究は困難であったが、減衰全反射法 (attenuated total reflection; ATR) を用いた減衰全反射遠紫外分光 (ATR-FUV) の開発により、液体や固体でも簡便に、試料に制限されることなく遠紫外スペクトルが測定できるようになった¹⁾。これを用いた液体の電子状態研究が行われている。水溶液における電解質の電子状態による水の水和構造の変化^{2,3)} やアルカン⁴⁾ といった基礎的な有機化合物について、系統的な実験研究が行われ、高精度な量子化学計算との比較により、スペクトルの帰属や、これまで電子遷移で研究されてきた π 軌道、 n 軌道だけでなく骨格となる σ 軌道についても、その凝縮系でどのような影響を受けるかについての電子状態研究が行われている。飽和アルカンについての C-C、C-H 結合にある σ 電子軌道の変化を観測し、 σ 電子化学を探る分光法として提案されている⁴⁾。液体だけでなく、高分子固体などにもその応用が広がっている。低密度ポリエチレンフィルムの測定では、分析深さが 20~50 nm という遠紫外域の ATR 測定の特徴から、極表面の電子状態観測がなされた⁵⁾。

ATR-FUV を利用して、これまで測れなかった短波長領域の過渡吸収スペクトルを測定する時間分解 ATR-FUV が開発された⁶⁾。時間分解 ATR-FUV の基本的な設計は、紫外-可視などで用いられる過渡吸収システムのサンプル部分に、ATR-FUV を適用した形になる。連続光をプローブ光源としているために、時間分解能は検出器のプリアンプの応答時間 (40 ns) で、 $\sigma = 0.001 \text{ Abs}$ で測定できる。遠紫外のプローブ光源としてこれまで用いられてきた 30 W の D2 ランプでは、特に 170~200 nm の領域において十分な強度が得られなかったが、近年開発されたレーザー励起 Xe ランプ光源 (LDLS EQ-99, Energetiq, MA)⁷⁾ がこの領域で D2 ランプのおよそ 10 倍以上の強度をもつため、光源として用いられた。これにより、時間分解スペクトルの S/N 比向上につながった。この時間分解 ATR-FUV を用いて、5 mM フェノール水溶液における 256 nm 光照射に対する 170~185 nm の過渡吸収スペクトルが測定された⁶⁾。179~185 nm では単調な減少がみられた一方で、171~176 nm では吸光度が光照射直後に増加し、数 μs のオー

ダーで減衰することが観測された。これは反応物であるフェノールの吸収 (181 nm) は照射された光による光解離によって照射直後に減少した一方で、172 nm に吸収をもつラジカルが生成し寿命をもって減少していることが観測されたためである。

4.3 近赤外分光

近赤外領域 (NIR, 1000~2500 nm) においては、製造プロセス中の非破壊・非接触での製品管理のための装置開発事例、および、ケモメトリックスなどの解析技術と併用した基礎・応用研究事例が数多くあり、ラボベースの基礎的知見を産業応用につなげる分光法としての認知はすでにかなり高い⁷⁾。しかし、通常の近赤外インライン分析計は評価対象物質 (あるいは製品) の濃度分布変化、不均一性等の情報を提供しないため、近年、とりわけ製造プロセスに設置、利用可能な近赤外イメージング装置の開発や、その産業応用への挑戦が目覚ましい⁸⁾。現在、近赤外イメージング装置に求められている技術的課題としては、高速性、広域性に加えて、可搬性が挙げられる。さらに、高感度特性はもちろんのこと、波長分解能、空間分解能の向上に加えて、広波長帯域での二次元スペクトルデータ取得が必要である。

高速可搬型の近赤外イメージング装置として、distribution NIR spectrometer (D-NIRs) が開発された⁹⁾。本装置は、高速・高波長分解能近赤外分光装置である polychromator-type NIR spectrometer (P-NIRs) と一對となってイメージングを行う。P-NIRs の特徴は、高密度フォトダイオード (PD) 検出器にある。従来の NIR 分光計は通常、最高でも、空間的制限要因から 512 素子のインジウムガリウムヒ素 (InGaAs) PD を装備しており、測定波長範囲 800 nm の場合、波長分解能は約 1.56 nm である。一方、本装置は、電極構造などを工夫することで、ピッチを世界最高密度レベル (0.02 mm) まで狭め、640 素子の PD 装備を可能にした。この結果、1.25 nm 未満の波長分解能でデータ取得を行うことが可能である¹⁰⁾。また、イメージングユニットは、ガルバノミラーによる二次元スペクトルのラインスキャン方式の採用によって、151 mm×93 mm×120 mm の小型化に成功している。本装置はガルバノミラーの高精度な制御技術によって、空間分解能についても、最大で 0.025 mm まで向上可能であることが示されている。これらの可搬性および高波長・空間分解能特性により、とりわけ図 1 に示すような医薬品製造プロセスにおけるインラインでの錠剤成分の濃度分布解析への応用が期待されている。

一方、高速性・広域性を兼ね備えた近赤外イメージング

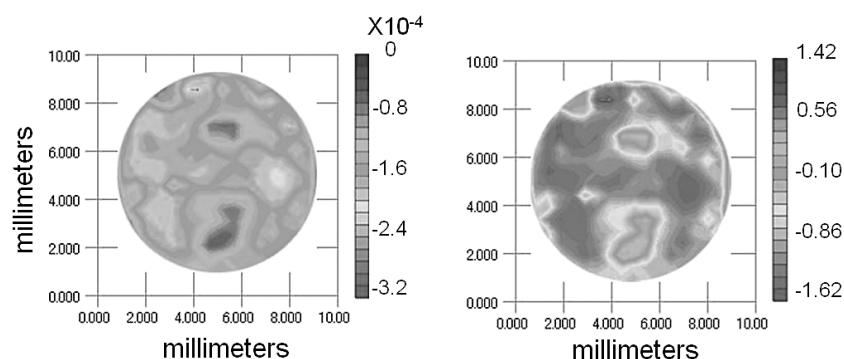


図1 近赤外イメージングによる錠剤の濃度分布評価の一例（左：二次微分画像，右：標準化処理画像）。文献9）より引用。

装置として、「リアルタイム組成イメージングシステム：Compovision」が開発された。本装置の二次元受光素子としては、リン化インジウム（InP）基板の上にインジウムガリウムヒ素（InGaAs）/ガリウムヒ素アンチモン（GaAsSb）素子を積層させたタイプII量子井戸構造を独自に開発している。この素子を用いた検出器を搭載することで、15 cm×20 cm 程度の広域測定がわずか5秒程度で実行できるという高速性ならびに広域性を有している。さらに、本検出器によって、近赤外イメージング装置としては画期的な2350 nm までの広波長帯域での高感度測定を可能としている¹¹⁾。本装置は、現在では薬品や食品の品質管理、検査に有効であることが示唆されており、加えて、クリーム状製品の混合均一性の検査、発酵食品・飲料やバイオ燃料等の精製過程中的の状態変化のモニタリング等、幅広い分野への適用が期待されている。

さらに、近赤外線線の非侵襲という特性から、人体の診断、特に脳活動の評価、把握に特化した機能的近赤外分光法（functional near-infrared spectroscopy, fNIRS）の開発および基礎、臨床研究が進められている¹²⁾。2012年度の進歩としては、言語・視覚・聴覚・運動に伴う脳活動を可視化する近赤外イメージング装置 SMARTNIRS, LABNIRS がそれぞれ発表されている。本装置は従来比の数倍の光ファイバーを搭載しており、最短で6ミリ秒という超高速データ収集およびイメージングが可能である¹³⁾。これらの装置は脳の活動のリアルタイムモニタリングに特化しており、今後のさらなる詳細な基礎研究、臨床研究解析によって、いまだ謎が多い脳活動の解明に貢献するものとして、高い期待が寄せられている。

4.4 テラヘルツ分光

分光法としては赤外よりもさらに長波長となり、凝縮相に対しては結晶における分子間振動など弱い相互作用でつながった、大きな原子団や分子同士の振動モードがスペク

トルに現れる。結晶性ポリヒドロキシ酪酸のテラヘルツスペクトルには、振動の遷移モーメントが結晶中のラメラの長軸方向に平行な2.4 THz と、垂直な2.2 THz の吸収が観測される。90°Cにおける等温結晶成長過程をテラヘルツで観測し、一般化二次元相関分光を用いることで、2.4 THz の吸収が2.2 THz の吸収から遅れて成長することが明らかになった¹⁴⁾。このことは、結晶化過程においてラメラ成長の前に分子ポリマーの分子鎖間の弱い水素結合が形成されるという知見を示唆する¹⁵⁾。このような高分子や結晶における高次構造に対する新しい知見が今後期待される。

テラヘルツ分光は非晶質への透過性が強い一方、結晶に対しては鋭敏な判別能力をもつので、幅広い分野の非破壊分析への応用が期待される。分析化学への応用を見据え、メンテナンスや測定が簡便な減衰全反射テラヘルツ（ATR-THz）分光器が開発された¹⁶⁾。テラヘルツの発生および検出素子をATR測定の内部反射素子（IRE）と一体化させることにより、テラヘルツ光は空気中を伝搬しないので、窒素充填を必要としない。また、ATR光学系では測定物をIREに近接させることで測定することができる。また、広帯域で短パルスなテラヘルツ光発生において最適なLiNbO₃導波路を用いたチェレンコフ位相整合型テラヘルツ光源¹⁷⁾が開発され、それを用いたシステムを用いることで、これまで用いられてきた光伝導アンテナテラヘルツ波発生素子を用いたシステムに対し、4倍近い高感度化が得られたと報告された¹⁸⁾。

また、テラヘルツ領域において高い強度をもち、広帯域に波長可変なコヒーレント光発生として、光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生（injection seeded terahertz wave parametric generation; is-TPG）が近年注目されている。近年開発された光源では2.8~1.2 THzの周波数可変性をもち、1.8 THzでは120 Wにおよぶ高強度な光源が開発されている¹⁹⁾。is-TPGではその発生原理からモードホッ

プが起こらず長時間安定性にもすぐれており、今後、テラヘルツ領域における非線形現象の観測などへの適用が期待される。

4.5 振動光学活性

振動光学活性 (vibrational optical activity; VOA) は分子の光学活性を振動準位で測定する分光法である。ラマン光学活性 (Raman optical activity; ROA) および振動円二色性 (vibrational circular dichroism; VCD) を含む。これら分光法は溶液中のたんぱく質、核酸、糖などの二次構造に非常に鋭敏で、その構造決定に使用でき、また一方で低分子量キラル分子の絶対配置決定および光学活性純度の決定に適用できる。

ROA 分光によって、インスリンアミロイド線維の自然化過程におけるたんぱく質二次構造の変化が測定された²⁰⁾。アミロイド線維は平行 β シートと β ターン構造から成り、線維形成前の中間体は β シートでも α ヘリックス構造でもない PPII ヘリックス構造に似た、部分的に解けた二次構造をとっていることが明らかとなった。さらに、天然状態の“水和 α ヘリックス”構造部位がアミロイド線維形成時に構造変化していることが明らかとなった。

天然状態インスリンの ROA スペクトルが全ペプチドを考慮した量子力学計算によってよく再現され、ROA バンドがペプチド主鎖、側鎖、およびペプチド二次構造に帰属された²¹⁾。インスリンはこれまでに ROA スペクトルが量子力学計算された分子の中で最大のものである。

誘起共鳴 ROA による低分子アルコールおよびケトンなどの光学活性分子の高感度測定が行われた²²⁾。これは不飽和ユーロピウム (Eu) 錯体にキラル分子を溶液中で配位させ、Eu の電子遷移 ROA を誘起する方法である。通常の非共鳴振動 ROA に比べて 10^4 以上の高感度なキラル信号検出が可能であった。キラル分子 0.1 mM 濃度、絶対量 2 μg 、測定時間 3 分で測定可能である。迅速で高感度な絶対配置および光学純度決定への応用が期待される。

コヒーレントアンチストークスラマン散乱 (CARS)-ROA が初めて測定された²³⁾。ヘテロダイナミクス検出法により得られた (-)- β -パインンの CARS-ROA スペクトルは、従来法に基づく ROA 装置により測定された ROA スペクトルとよい一致をみせた。従来法と比べて現在の CARS-ROA の S/N 比は悪いが、今後の装置改良による低ノイズ化が期待される。また、時間分解 ROA 測定の実現も強く待望される。

常磁性分子 NO の 0.1~8 テスラ磁場下における磁気 VCD スペクトルが報告されている²⁴⁾。得られた磁気 VCD スペクトルは回転順位に分解されており、その強度は反磁

性分子と比べ 10^3 強かった。静磁場、一般的な FT-IR 分光器および偏光装置を用いて比較的簡単に分子ゼーマン効果を観測可能であった。キラル分子を電気化学的にラジカル化することで VCD 信号強度を増強させる研究がなされた²⁵⁾。ラジカルアニオン生成により電子遷移波長がずれ、振電カップリングが強くなり増強が起こる。

4.6 低波数ラマン散乱

低波数ラマン散乱スペクトルから、固体および液体中分子の高次構造や水素結合など弱い結合についての分子振動情報が得られる。これまで低波数ラマンスペクトルはダブルもしくはトリプルモノクロメーターを用いて測定されてきたが、極低波数ノッチフィルターの登場により、最低で 4 cm^{-1} までの波数領域が単一のグレーティングと CCD によって測定可能となった^{25,26)}。このフィルターは体積ブラッググレーティング (volume Bragg grating) の集積体である。光学濃度は可視域で 3~4 とそれほど高くないが、2 枚使用することで既存のノッチフィルターと同程度の光学純度となる。

ごく最近、生分解性ポリマー、ポリヒドロキシ酪酸の 50 cm^{-1} までの低波数ラマン散乱および遠赤外吸収 (FIR) スペクトルが量子力学計算によってよく再現され、ピークの帰属が行われた²⁷⁾。 79 cm^{-1} に現れるピークが分子鎖間の CH_3 基と CO 基の相互作用に由来するバンドと帰属され、さらに実験 FIR バンドの偏光依存性と合致から、分子間の弱い $\text{CH}\cdots\text{OC}$ 水素結合に鋭敏なバンドであると結論された。

4.7 表面増強ラマン散乱と発光スペクトル

表面増強ラマン散乱 (surface-enhanced Raman scattering; SERS) は、入射光による局在表面プラズモン共鳴 (localized surface plasmon resonance; LSPR) で発生する金・銀ナノ構造体間隙での増強電磁場が、吸着分子と相互作用してラマン散乱効率が 10^8 倍にも増幅される現象である。これにより極微量の非発光性分子からも詳細な分子構造の情報が得られるので、広い範囲での単一分子レベル超高感度検出への応用が期待されている。しかし、各ピークの SERS 強度が LSPR 波長に依存するので、定量的な分析を行うのが困難であった。その欠点を解決するためにも、SERS と LSPR の関係を詳細に解明する研究が行われている²⁸⁾。

その中で、薄膜波長可変フィルターを用いた HSI (hyperspectral imaging) によって、さまざまな銀ナノ微粒子凝集体からの SERS スペクトルと LSPR スペクトルの同時測定に成功したという報告がなされた。これは、フィルターによる透過波長の変化に同期させて CCD カメラで画像を

撮影するものである。これまでの波長可変フィルターは液晶あるいは音響光学によるものであったが、偏光依存性がある上に、前者はスペクトル分解能が悪く(7 nm)、後者は回折角の関係で CCD カメラに透過光を導入するのが困難であった。この薄膜を使用した装置では、スペクトル範囲 80 nm (530~610 nm) を 5.4 秒で測定でき、スペクトル分解能は 1.5~3.0 nm とのことである²⁹⁾。

また、二次元ガウス関数による発光強度のフィッティングで発光源の位置を正確に決定する超解像イメージングを、SERS とそれに付随する背景発光に適用する研究も行われた。ここでは、明滅する光を、ある閾値以下の強度では背景発光のみが観測されているとし、閾値以上では SERS の寄与も含まれていると考え、それらの画像を解析して発光中心位置を決定している。その結果と電子顕微鏡での観測とを照合することで、SERS は銀ナノ微粒子凝集体の接点から発せられており、背景発光の中心位置とは異なることがわかった³⁰⁾。

上記の超解像イメージングでは時間分解能が求められることもあって、透過波長を時間的に変化させながら行う HSI によって SERS と背景発光を分光しているわけではない。しかし最近、CTIS (computed tomography imaging spectroscopy) に基づいた³¹⁾ 高い時間分解能をもつ HSI センサーが開発された。これは、コリメーションレンズ、二次元透過型グレーティング、結像レンズ、イメージセンサーから構成されている。イメージセンサーには、各点からの二次元に展開された回折光の画像がオーバーラップして記録されているが、これを数値解析によってスペクトル情報と位置情報を復元する。この製品は 3 ミリ秒での撮影が可能であり、スペクトル分解能は 5 nm (スペクトル範囲 440~700 nm)、空間解像度は 200×300~300×500 ピクセルとのことである。ただし空間解像度を上げるとスペクトル分解能は低下する³²⁾。

金ナノ構造体間隙での増強電磁場を、散乱型 SNOM (scanning near-field optical microscope) で直接観測する研究が行われた。これは、金ナノブロックペアに全反射モードの光照射を行って近接場光を発生させ、その状態で極細な探針を接近させて走査しながら散乱光を測定するものである³³⁾。この観測で、ナノブロック間隙に 10 nm 以下の極微細な光局在干渉パターンが現れることが明らかになった³⁴⁾。SERS 明滅現象の特徴からこのような増強電磁場の干渉パターンが予想されていた³⁵⁾。

4.8 チップ増強ラマン散乱 (TERS)

チップ増強ラマン散乱 (TERS) は、表面増強ラマン散乱の原理を応用し、走査プローブ顕微鏡 (SPM) の探針先

端に増強電場を発生させて増強ラマン散乱を測定する手法である³⁶⁾。TERS の空間分解能はナノ探針の先端半径で決まり、光の回折限界を超えた高い空間分解能の領域を感度よく測定することが可能となる。また、測定箇所を厳密に操作することができるため、局所領域の構造変化や相互作用の測定に適している。さらに、マッピング測定を行うことで高分解能の TERS イメージを得ることができるのみならず、SPM との同時測定を行うことでサンプル形状と絡めた議論が可能になる。

TERS の測定において、増強電場を発生させる針は非常に重要である³⁷⁾。針の作製法には、テンプレートになる走査プローブ顕微鏡用のカンチレバーに、金や銀などのプラズモンを発生させる金属を薄く蒸着させる方法がある。このチップ作製過程において、カンチレバーの母材であるシリコンを熱酸化することにより表面をガラス化させると、再現性の高い増強効果が得られることが報告された³⁸⁾。また、光ファイバーをエッチングして作製した針に銀を蒸着することで、歩留まりよく再現性の高いファイバースキャンプローブが作製できることが報告された³⁹⁾。電子顕微鏡などの結果から、カンチレバーに銀を蒸着させる方法で作製した従来のプローブと、同等のプローブが作製できていることが示された。また、金で作製したチップに自己組織化単分子膜の手法を用いて分子を修飾し、増強場のマッピングを行う研究も報告されている。この研究では、ベンゼンチオールを金の針に修飾し、金属ナノ構造体の増強ラマンマッピング測定を行い、増強場の分布の測定、増強場の偏光依存性の研究を行っている⁴⁰⁾。

実際の TERS 測定については、さまざまなサンプルが測定対象になっている。一例として、シリコンカーバイド (SiC) 基板上に熱分解法で作製したグラフェンの測定が行われ、局所の層数の違いを測定した結果が報告されている。SiC 熱分解法で作製されたグラフェンは大面積で比較的均一な性質をもつグラフェンを作製することができるうえ、SiC 基板の性質によって生成するグラフェンの性質も大きく異なる。TERS を用いることで、局所の層数や相互作用の違いについて検討している⁴¹⁾。別の測定対象として、溶液中の二分子膜を液中 TERS 装置で測定した例が報告されている。溶液中の TERS 測定を行うために、針以外を液中にさらさない工夫を施すことで安定して液中 TERS が測定されている⁴²⁾。この報告では液中に作製した二分子膜の測定が行われている。また、ポリマーナノコンポジットの測定例も報告されている。この研究では、厚みのある着色サンプル測定のために反射型配置の TERS 装置を利用している。TERS 測定の結果、ナノコンポジットに混合さ

れているファイラーの界面における TERS スペクトルが、ファイラーのない箇所のスペクトルから変化することが報告された。この結果は、ファイラーとポリマーの相互作用によってポリマーの構造が変化していることを高分解能にとらえた結果であるとしている⁴³⁾。TERS は生体物質への応用も活発で、すぐれた総説が出版されている⁴⁴⁾。

4.9 展 望

それぞれの分野で大きな発展が期待される。遠紫外分光は基礎・応用の両面においてさらなる進展が予想されるが、特に応用では、他の分析機器との連携測定に向けた開発、パッケージ化・小型化が重要なポイントとなろう。近赤外では小型高速イメージングシステムの高性能化（分解能の向上など）が求められる。テラヘルツ分光では素子や装置の発展だけでなく、今後、分析応用の信頼性を保証するために、やはり線幅やシフトの起源を含めたバンドの帰属の研究が必要である。そのためにテラヘルツと低波数ラマンの比較も重要となり、それを裏付けるための量子化学計算のさらなる進歩が期待される。ROA の装置の進歩は目覚ましいが、さらなる高感度化、TERS はイメージングが必ずしも十分には発展していないので、その発展が期待される場所である。

文 献

- 1) Y. Ozaki *et al.*: Appl. Spectrosc., **66** (2012) 1.
- 2) T. Goto *et al.*: Inorg. Chem., **51** (2012) 10650.
- 3) T. Goto *et al.*: Phys. Chem. Chem. Phys., **14** (2012) 8097.
- 4) Y. Morisawa *et al.*: J. Phys. Chem. A, **116** (2012) 11957.
- 5) 森澤勇介他：分子科学討論会 (2012) 2P054.
- 6) Y. Morisawa *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **83** (2012) 073103.
- 7) Y. Ozaki *et al.*: Anal. Sci., **28** (2012) 545.
- 8) S. Šašić and Y. Ozaki eds.: *Raman, Infrared and Near-Infrared Chemical Imaging* (Wiley & Sons, NJ, 2011) 75.
- 9) D. Ishikawa *et al.*: NIR news, **23**, No. 8 (2012) 19.
- 10) K. Murayama *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **84** (2013) 023104.
- 11) D. Ishikawa *et al.*: SciX (2012, MO) 619.
- 12) 皆川泰代：Brain Nerve, **64** (2012) 1023.
- 13) 網田孝司他：Med. Now, **72** (2012) 29; 日本経済新聞 (電子版), 2012 年 8 月 27 日.
- 14) H. Zhu *et al.*: "Spectroscopy: LDLS sheds light on analytical-sciences applications," Laser Focus World (December, 2011).
- 15) H. Hoshina *et al.*: Appl. Phys. Lett., **100** (2012) 011907.
- 16) A. Nakanishi *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **83** (2012) 033103.
- 17) K. Suizu *et al.*: Opt. Express, **16** (2008) 7493.
- 18) 塩田和教他：電子情報通信学会技術研究報告, **112** (2012) 45.
- 19) S. Hayashi *et al.*: Opt. Express, **20** (2012) 2881.
- 20) S. Yamamoto *et al.*: Chirality, **24** (2012) 97.
- 21) S. Yamamoto *et al.*: Anal. Chem., **84** (2012) 2440.
- 22) S. Yamamoto *et al.*: Angew. Chem. Int. Ed., **51** (2012) 11058.
- 23) K. Hiromatsu *et al.*: Phys. Rev. Lett., **109** (2012) 083901.
- 24) B. Wang *et al.*: Phys. Chem. Chem. Phys., **14** (2012) 9586.
- 25) A. Rapaport *et al.*: ICORS (2010) 808.
- 26) J. Ibanez *et al.*: J. Raman Spectrosc., **43** (2012) 237.

- 27) S. Yamamoto *et al.*: J. Phys. Chem. B, **117** (2013) 2180.
- 28) 伊藤民武他：ぶんせき, No. 12 (2004) 699.
- 29) M. Iga *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **83** (2012) 103707.
- 30) M. L. Weber *et al.*: ACS Nano, **6** (2012) 1839.
- 31) T. Okamoto *et al.*: Opt. Lett., **16** (1991) 1277.
- 32) 佐藤世智他：Mol. Sci., **6** (2012) NP0017.
- 33) Y. Tanaka *et al.*: Opt. Express, **19** (2011) 7726.
- 34) 田中嘉人他：秋季応物講演会 (2012) 13a-F3-7.
- 35) Y. Kitahama *et al.*: Phys. Chem. Chem. Phys., **12** (2010) 7457.
- 36) E. Bailo *et al.*: Chem. Soc. Rev., **37** (2008) 921.
- 37) J. Stadler *et al.*: Nanoscale, **4** (2012) 1856.
- 38) N. Hayazawa *et al.*: J. Raman Spectrosc., **43** (2012) 1177.
- 39) 米山英男他：分光年次講演会 (2012) P23.
- 40) 堀本訓子他：分子科学討論会 (2012) 4D13.
- 41) 南 聡史他：分光年次講演会 (2012) P29.
- 42) 野本知理他：分子科学討論会 (2012) 3P052.
- 43) T. Suzuki *et al.*: JSAP-OSA Joint Symposia (2012) 12a-G1-3.
- 44) M. Lucas *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **83** (2012) 061101.

5. レーザー

5.1 半導体レーザー

東工大 小山二三夫

5.1.1 概要

情報技術 (IT) の社会基盤を支える大容量光通信システム、光ストレージなどの中核光デバイスである半導体レーザーに関しては、最初のレーザー発振が 1962 年、室温連続発振が 1970 年に実現され、2012 年に半導体レーザー生誕 50 周年の節目を迎えた。半導体レーザーは、光通信や光ストレージ用光源として展開し、わが国はこの分野を先導してきた。モード制御、高信頼化、長波長化、可視光レーザー、波長制御、集積化技術、量子井戸レーザー、面発光レーザー、高出力化、青色半導体レーザーなど、新しい技術課題がその時代時代で克服され産業化をもたらしてきた。半導体レーザーは、結晶工学、電磁気学、電気伝導、量子力学などの広い学問分野が基盤となっており、最先端の教育の観点からも大学で手がける研究テーマとしてふさわしく、この分野の発展は、これまで、学会発表などを通じて、産業界と大学が緩やかな連携を通して進められ、成功を収めた研究開発のよい事例ともいえる。先にも述べたように、2012 年は半導体レーザー生誕 50 周年の年として各国でイベントが開催された。レーザーと光エレクトロニクスに関する最大の国際会議 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2012) では、特別シンポジウム：50th Anniversary of the Semiconductor Laser が企画され、最近の話題も含め 50 年にわたる半導体レーザー研究についてオーバービューがあった¹⁾。また、半導体レーザーに関する最も伝統・権威のある IEEE 半導体レーザー国際会議 (International Semiconductor Laser Conference,

ISLC 2012) もサンディエゴで2012年10月に開催され、スペシャルセッションなどが企画された²⁾。わが国は、特に光通信分野で多く民間企業、大学が連携してその研究開発に多大な貢献を果たしてきた。現在、半導体レーザーは、光通信システムや光ストレージの光源として、情報通信技術の中核デバイスとして発展している。

そのほか、高出力半導体レーザーによる小型・高効率レーザー加工機、レーザーマウスを発展させたセンサー、緑色半導体レーザーの実用化によって、小型の三原色レーザーによる携帯端末に搭載可能なプロジェクションディスプレイなどの発展も期待されている。また、将来の照明の高効率化のため、青色・紫外半導体レーザー励起による白色照明なども低炭素社会実現に向けて重要な技術開拓分野である。

5.1.2 低消費電力半導体レーザー

データセンターなどで使われるスーパーコンピュータ(以下、スパコン)からパソコン、携帯電話などまで、大量の情報を扱う情報技術は加速度的に発展し、例えばスパコンの演算速度のトレンドは、10年で500倍という爆発的な伸びを示している。この情報機器の進化を支える中核技術が、電気信号に代わり、光による配線やインターフェースを実現する光リンク技術である。光デバイスやそのモジュールにより構成される光リンク技術は、すでにラック間などに利用され始めている。今後、多くの情報機器に利用されることや、ラック間からボード間、チップ間、チップ内へ順次浸透していくことが予測されている。例えば、米IBMが考えるスパコン開発のロードマップでは、2020年度に開発するスパコンは演算速度1000 PFであり、その中で光リンクで用いられる半導体レーザーは数億個にも及ぶことが予測されている。

このような光インターコネクットの応用では、特に低消費電力で動作する半導体レーザーの開発が重要である。フォトリソグラフィを用いた世界最低閾値の電流注入型レーザーが報告され、高速変調の可能性も示された³⁾。そのほか、オンチップ光配線に向けたシリコン基板上の半導体レーザーを目指した薄膜レーザー⁴⁾、量子ドット半導体レーザー⁵⁾の報告がなされた。

5.1.3 面発光レーザー

面発光レーザーは、伊賀健一博士の発明から35年を迎えた。低閾値電流化が進められ、消費電力が小さい、二次元アレイ化が可能、ウェハー単位での性能試験が可能であるなど、従来構造の半導体レーザーに比べて多くの利点を実証されてきた。世界中で精力的に研究開発が進められ、これまでの研究開発により、レーザー単体としての性能も

通常の半導体レーザーを大きく凌ぐようになってきた⁶⁾。サブミリアンペアの低閾値素子の実現や近赤外波長域での実用化が進められて、現在の短距離光ネットワークの光源として中心的な役割を果たしている。さらに、レーザーマウス、高精細高速カラープリンターに搭載されて、スーパーコンピュータや携帯電話の中の光配線用光源としての研究開発も進められている。以前では想像もできなかったような応用面での実用化が進展している。

特に、スーパーコンピュータやデータセンターでは、膨大な数の光配線導入が必須であり、ここでは、低消費電力動作を可能とする面発光レーザーが主役となっている。40 Gbpsを超える高速直接変調動作、1 bit当たりの消費電力として100 fJ以下などの低消費電力動作など、将来の低消費電力インターコネクットのための革新的な開発が進められた⁷⁾。さらに、民生応用でも、10 GbpsのVCSELを用いた高速光インターフェースがノートパソコンに初めて搭載されるなど、実用化面でも大きな進展がみられる。発光波長域も、最近では青色、緑色、赤色の可視光域から、現在データリンクで主流の850 nm帯、高信頼性・高速化を目指した1060 nm帯、中距離のデータ通信用1300~1550 nm帯、センサー応用として1500~2000 nm帯の長波長帯面発光レーザーなど、広範囲の波長域での研究開発が進められている。

機能面では、MEMSとの融合による広帯域での連続波長掃引技術は、OCT (optical coherence tomography)などの生体観測用途で大きな注目を浴びている⁸⁾。実際、100 nmに及ぶ広帯域連続波長は、面発光レーザー構造でなければ実現が困難である。また、微小共振器の特筆を生かすことで、温度変化に対して絶対波長を安定化したアサーマル半導体レーザーや、高密度な多波長集積化技術など、面発光レーザー固有の優れた特性も実証されている⁹⁾。さらに、面発光レーザーを形成する多層膜反射鏡構造を用いたスローライト伝搬を活用することで、数十 μm の超小型の光スイッチ、光変調器、光増幅器、ビーム偏向器の新機能素子の提案・実証も行われ¹⁰⁾、これらの機能デバイスは、面発光レーザーとの集積化も可能である。また、これまで面発光レーザーは低消費電力特性を生かした低パワー応用が主であったが、アレイ化による高出力励起光源、ビーム形状制御による高出力動作など、パワーデバイスへの展開もみられる。

5.1.4 波長可変レーザーと多波長レーザーアレイ

現在の大容量光通信システムには、所望の波長で発光できる波長可変レーザーが広く使用されている。保守コストの低減につながるほか、動的に波長を変える次世代システ

ムへの応用も考えられている¹¹⁾。通常の固定波長レーザーと違って、送信ユニットの発光部品を波長可変レーザーで統一できるため、DWDMシステムの運用性を向上している。最近の研究としては、デジタルコヒーレント通信に向けた高出力・狭線幅波長可変レーザー¹²⁾や、光位相変調器を集積したコヒーレント通信用集積素子の報告がなされた。また、100 Gb イーサーネット用に開発された四波長DFBレーザーを集積した高速直接変調アレイについても開発が進められた¹³⁾。

5.1.5 可視光半導体レーザー

緑色半導体レーザーの実用化によって、小型の三原色レーザーによる携帯端末に搭載可能なプロジェクションディスプレイなどの発展も期待されている。また、将来の照明の高効率化のため、青色・紫外半導体レーザー励起による白色照明なども低炭素社会実現に向けて重要な技術開拓分野である。近年、半導体発光素子を光源としたTVやプロジェクターなどの映像表示機器が市場を賑わせている。現在注目を集めているのが、超小型プロジェクターである。プロジェクター搭載の携帯電話やデジタルカメラは反響を呼んでいる。しかし、緑色については、直接発光のレーザー発振自体が実現されていなかった。いわゆるグリーンギャップの問題である。半導体によって直接レーザー光を得ることができれば、小型、低コスト、高効率な光源を実現可能であり、大きな波及効果をもたらすものと期待され、緑色半導体レーザーの開発が活発化している¹⁴⁾。

緑色発光を可能にする半導体材料は、窒化ガリウムと窒化インジウムの混晶から成るInGaNであり、In組成の増加に伴い紫色(波長400~435 nm)、青色(波長435~480 nm)、緑色(波長500~560 nm)のように発光色が長波長側に変化する。高品質GaN基板や非極性面基板等の利用により性能向上が進められ、発振波長530 nm帯で100 mW以上の光出力を有する純緑色半導体レーザーの開発が報告された¹⁵⁾。

5.2 半導体レーザー以外のレーザー

産総研 鳥塚健二

5.2.1 概要

筆者の専攻から超短パルスに関係する内容が多くなってしまいが、できるだけ項目のスコープに合わせて報告したい。ここで扱う技術範囲では、なおYbドープレーザーによる高出力化の展開が大きな流れとして続いている状況と考えるが、光源を構成するデバイスや要素の革新による性能進歩から、よりシステムの使い方で効果をみせる段階

に発展しているとも感じた。

また、ファイバーレーザーの進展は、高出力の産業用レーザー目的の印象が強いと思うが、超短パルスやコヒーレント加算、光コムのような基礎基盤的研究の観点においても影響は大きく、多様な方向性で発展している。

新しい光源性能という観点では、中赤外への波長域拡大を軸にして、新しい応用展開を考える動きが注目された。

5.2.2 基盤的な研究・技術

この項ではCLEO 2012での動向を中心に昨年度の進展を報告する。

超短パルス発生に関わる研究分野でも、高出力Ybドープレーザーはキー技術となりつつある。また、多様なレーザーの複合した形で利用するようになってきているのも傾向と思う。典型として、フリードリッヒシラー大からは、70 eVまでの高次高調波光発生と、そのスペクトルのCEP(carrier-envelope phase)依存性を観測する実験に高出力ファイバー増幅器を利用した報告があった¹⁶⁾。レーザーシステム部分はTi:サファイア出力をシードとしており、これを光パラメトリック増幅するための励起光を高出力ファイバー増幅器(120 W)で得ている。実測5.39 fs(フーリエ限界5.36 fs)、120 μJのパルスを1 MHzの従来にない高繰り返しで得た。また、ウィーン大からは、多波長の合成で電界整形し、非線形現象での効果を狙う研究動機で、Yb:KGWのコマーシャルなレーザーをフロントエンドとした、クライオ冷却のYb:CaF₂再生増幅器が報告された¹⁷⁾。CEPを固定した6.0 mJ, 180 fs, 1 kHz(最大)の出力を得て、波長変換のための基本波として用いている。

Ybファイバーレーザーの発振器では、より高出力で信頼性の高いものを求める志向が目立つ。ベンチャー企業であるKMレーザーからANDY(全正常分散Ybドープファイバー)構成の1 W, 100 fsのモード同期が報告され¹⁸⁾、フェムト秒の光パラメトリック発振器の励起源として使用された。関連してANDYの開発者であるコーネル大からは最大140 nJの発振器出力がコメントされた。

中赤外の発生関係ではErファイバーを並列動作させて差周波混合によりシーズ光を作り、パラメトリック増幅して最終出力3100 nm, 16 μJ, 55 fs(5 cycle)を得た報告¹⁹⁾が印象的で、分子研で開発された日本発のPPLN(periodically poled lithium niobate)がキーデバイスになっている。一方で、長波長光の直接発生では、2 μm付近でTm:Fiber(~100 mW)+LMAアンプが大変成功している。Ybドープのケースと同様で、同じTmドープの結晶レーザーにおいては、W級、GHz繰り返し、長共振器化によるエネルギー増大など、何らかの特徴が問われる傾向と感

じた。

コム応用をねらった光源研究では、光格子時計との関連はもちろんだが、広域に信号を分配するプロジェクトが各国で取り組まれている報告²⁰⁻²⁷⁾があり、またさまざまなモード同期レーザー媒体の得失も、コム雑音から再検討する余地がみられた。コーネル大の Si のマイクロトロイド²⁸⁾の研究に端を発したマイクロコムの展開も、変調の高効率化や、集積化やモジュール化による高信頼化が期待され興味深い。さらに PD セッションでは、クライオ冷却した Yb:YAG でピコ秒 1 J のパルスを生じしテーブルトップ X 線レーザーに利用する報告²⁹⁾、グラフェンの損失変調デバイスを利用した発表で Tm ファイバー 2 μm で 58 fs パルスの発生とコム制御の発表³⁰⁾ などがあった。

5.2.3 実用志向の開発・技術

PCF (フォトニッククリスタルファイバー) などの新構造を利用した Yb ファイバーレーザーは、連続発振の高出力化では大いに成功しており、実用化・商用化した技術として発展している。レーザー学会年会では、シンポジウムを開催しファイバーレーザー開発とその加工への応用の進展として、企業の講演者よりキロワットクラスの技術が産業的視点で報告されたことが印象的であった。ただ、ファイバーレーザーはピーク強度の増大には弱いため、パルスの光源としてはまだこれからの技術発展に期待するところがある。ナノ・ピコ秒のパルスレーザーではパワー増幅にバルク媒体を用いる Innoslab 方式の開発が注目されていたが、いよいよ企業 (独 edgewave 社) による提供と加工実験が報告されたのがここ 1 年の注目ニュースだった。

5.2.4 その他

表示目的で高出力の可視光 (445 nm) LD が使えるようになったことで、チタンサファイアレーザーの LD 直接励起が最近報告されていたが、いよいよ超短パルスモード同期も実現³¹⁾したことはトピックスである。今後の理化学用レーザーにおける格段のコスト低減効果が期待できる。

自由電子レーザー関連では、SACLA (Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) による超短パルス X 線パルスの利用研究がさまざまに報告され始めたところであるが、時間領域の測定では加速器における光によるタイミング配信が将来の高度化に向けての必須要素技術とみられ、レーザーへの新しい性能要求も出てくる。CLEO 2012 では Er ファイバー 509 MHz-ML レーザーと高品質のマイクロ波 VCO (10.2 GHz) を位相同期制御する研究³²⁾がみられた。光検出した電気信号から、エレクトロニクスで使える正弦波信号に変換する方法だが、デバイス化された干渉光学系を開発するなどで 10~200 kHz で評価して、17 fs

の低ジッターが報告された。

5.2.5 展望

この技術分野は、市場規模や産業技術の観点では加工・改質が大きな出口になる。本格的な製造装置を想定すると、近い将来キロワットクラスのパルスレーザーが普及する必要がある、そのときどのような形態が主流になるのか、興味は尽きない。ファイバーと thin disk (特に Yb:YAG 媒体で使われる極小型の能動ミラー型構造レーザー) に加えて Innoslab に代表されるようになりリニューアルされたバルク形式が加わって、さまざまな性能パラメーターに対応することになるのかと思う。さらに現状ではまだ基礎基盤的なフェーズである超短パルスや光コム、コヒーレント加算などの技術成果を、どのように実用に波及させられるかが、予想を超えた発展の契機になるのではと期待している。

文 献

- 1) *Special Symposia: CLEO* (2012).
- 2) *ISLC*, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=6337023>
- 3) K. Takeda *et al.*: *ISLC* (2012) WC4.
- 4) 土居恭平他: 秋季応物講演会 (2012) 13a-PA8-2.
- 5) 田辺克明他: 春季応物講演会 (2012) 17a-F4-1.
- 6) K. Iga: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008) 1.
- 7) N. N. Ledentsov *et al.*: *ISLC* (2012) WB-1.
- 8) V. Jayaraman *et al.*: *CLEO* (2011) PDPB2.
- 9) H. Sano *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **101** (2012) 121115.
- 10) 小山二三夫: 春季応物講演会 (2012) 16p-F3-1.
- 11) 布谷伸浩他: *NTT 技術ジャーナル*, **24** (2012) 48.
- 12) N. Iwai *et al.*: *ISLC* (2012) TuA-2.
- 13) T. Saito *et al.*: *ISLC* (2012) TuA-1.
- 14) 上野昌紀他: *応用物理*, **81** (2012) 497.
- 15) S. Takagi *et al.*: *Appl. Phys. Exp.*, **5** (2012) 082102.
- 16) S. Demmler *et al.*: *CLEO* (2012) QM4E.8.
- 17) S. Haessler *et al.*: *CLEO* (2012) QTu3H.
- 18) M. Kirchner *et al.*: *CLEO* (2012) CM1B.1.
- 19) A. Thai *et al.*: *CLEO* (2012) CM1B.2.
- 20) S. Droste *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.1.
- 21) K. G. Baldwin *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.2.
- 22) B. Wang *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.3.
- 23) G. Marra *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.4.
- 24) K. Jung *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.5.
- 25) H. Inaba *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.6.
- 26) D. Li *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.7.
- 27) C. Kim *et al.*: *CLEO* (2012) CTh4A.8.
- 28) A. Gaeta: *CLEO* (2012) CTh3A.1.
- 29) B. Reagan *et al.*: *CLEO* (2012) PD-C1.
- 30) J. Jiang *et al.*: *CLEO* (2012) PD-D7.
- 31) C. G. Durfee *et al.*: *CLEO* (2012) CM2J-2.
- 32) A. H. Nejadmalayeri *et al.*: *CLEO* (2012) CTu2A.1.

6. 量子光学・非線形光学

東京農工大 三沢和彦

6.1 概要

本稿が扱う分野としては、応用物理学会学術講演会の分科細目でいえば「量子光学・原子光学」「テラヘルツ全般・非線形光学」である。特に非線形光学は、近年かなり成熟した分野であり、光学、量子エレクトロニクス、光エレクトロニクスのどの分野においても、非線形光学現象が当然のように使われている研究テーマが多く見受けられる。

「テラヘルツ全般・非線形光学」と分類されているように、テラヘルツ電磁波に関する研究は非線形光学の最も重要な応用のひとつである。それは、現段階ではテラヘルツ帯の電磁波の発生が、光周波数の差周波発生あるいはパラメトリック混合によるところが大きいからであろう。さらに、「量子光学」といっても、もつれ光子対発生の例をみても、非線形光学そのものである。

そこで、他の項目で重複して取り上げられる可能性のある題材についても、特に非線形光学の観点から重要と思われるものは、適宜本稿で紹介していくこととする。例えば、Optics and Photonics Japan (OPJ) は、「バイオフィotonics・医用光学」のセッションが全一般セッション数の3分の1を占める。バイオフィotonicsでも、多光子顕微イメージングは非線形光学過程を活用している。

6.2 二波長同時発振レーザー光源

応用物理学会学術講演会における「テラヘルツ全般・非線形光学」の細目で、筆者がまず注目したのは、二波長同時発振レーザー光源の開発である。二波長同時発振レーザーは、単一のレーザー共振器から、周波数差がテラヘルツ帯に当たる2つのモードで発振する。2つのモードが合波して出力されるので、それらの平均周波数を搬送波とし、差周波数のビートが包絡線となる変調出力となる。この出力を非線形媒質に入射することで、差周波テラヘルツ波を高効率に発生できる。さらには、分子の振動・回転モードや結晶のフォノンモードを選択的に励振することにより、センシングや物性研究にも役立つと考えられる。

基本となるのは、外部共振器をもつ半導体レーザーの出力を注入同期して波長選択するものである。注入同期法を用いたレーザーからは、高い周波数純度の高出力が得られる。

具体的な例のひとつは、外部共振器半導体レーザーをシード光とした光注入パラメトリック発生器の報告である¹⁾。波長532 nm、パルス幅10 ns、繰り返し100 Hzの励起光源を用いて、KTP結晶によりパラメトリック光を生

成した。注入用には、1280~1330 nmの連続発振半導体レーザーを用いている。このパラメトリック二波長出力の差周波を非線形光学結晶で生成し、1.3~9 THzの同調範囲を得た。

より高い強度を実現している例として、外部共振器半導体レーザーをシード光とした注入同期チタンサファイアレーザーの開発がある²⁾。2台の外部共振器半導体レーザーからの出力をファイバカップラーで合波し、チタンサファイア結晶を利得媒質とする共振器に注入した。532 nm、10 W励起に対して、2周波数合わせて3 Wの出力が得られた。

このほか、外部共振器に二波長選択素子を挿入して、1つのレーザー媒質から同時に発振させる方法が報告されている³⁾。

6.3 非線形光学過程を用いたテラヘルツ波発生

非線形光学過程を用いたテラヘルツ波の発生は、差周波発生あるいはパラメトリック過程によるものである。差周波発生では、二波長の単色光を非線形光学媒質に入射し、その差の周波数をもつテラヘルツ波が発生する。パラメトリック過程は、単色のポンプ光を非線形光学媒質に入射すると、周波数の和がポンプ周波数に保存されるようなシグナル光とアイドラー光が発生する現象であり、そのうちシグナル光がテラヘルツ波になるような条件を設定する。ここで、ポンプ光にフェムト秒光パルスを用いると、フェムト秒光パルス自体がもつ広いスペクトル成分のうち、任意の2つの周波数成分の組み合わせで差周波発生が起こり、広帯域なテラヘルツ波が発生する。

このような非線形光学過程によるテラヘルツ波発生の最近の話題は、まず、高強度モノサイクルパルスの発生がある。パルス幅17 fs、中心波長1.56 μm のフェムト秒ファイバーレーザーでニオブ酸リチウムLiNbO₃を励起してテラヘルツ波に波長変換した報告が出た⁴⁾。その際、チェレンコフ位相整合を用いて高強度化を図っている。LiNbO₃では、ポンプ光パルスがそこから発生するテラヘルツ波の伝わる速度より速く進行するために、テラヘルツ波がチェレンコフ放射と同様に円錐状に発生する。チェレンコフ位相整合とは、光パルスの進行方向に対してパルス面の傾斜角をチェレンコフ放射の放射角と一致させてテラヘルツ波を発生させることにより、テラヘルツ波を一方向に放射させる手法である。その結果、スペクトル帯域0.2~7 THz、パルス幅190 fsのモノサイクルパルスを得た。

また、LiNbO₃を利得媒質として共振器に組み込み、テラヘルツ波パラメトリック発振器を構成する技術も進展している。特に、アイドラー光だけでなく、ポンプ光も共振

器内に閉じ込めて、高効率の波長変換を実現した二重共振型発振器の報告があった⁵⁾。ピコ秒チタンサファイアレーザー励起で、1.0~3.4 THzの周波数範囲で発振出力を得た。

LiNbO₃以外の媒質として、DAST結晶や空気プラズマからの超広帯域発生も報告されている。DAST結晶は、非線形光学定数が大きく、高い出力が得られる。フェムト秒ファイバーレーザーとの組み合わせで、コンパクトな実用光源として期待される⁶⁾。一方、空気プラズマからの出力は超広帯域が特長である。時間幅10 fs、パルスエネルギー400 μJのフェムト秒パルスを励起源とし、あらかじめ第二高調波を発生させて、残りの基本波と合波して空気中に集光する⁷⁾。誘起されたプラズマからは200 THzにも及ぶ赤外光が確認された。

6.4 メタマテリアルを含む金属微細構造に対するテラヘルツ応答

「テラヘルツ全般・非線形光学」の細目で印象的なのは、メタマテリアルを含む金属微細構造に対するテラヘルツ電磁波の応答に関する研究の進展である。ただし、メタマテリアルによる光学応答自体は、非線形光学過程とはいえないため、本稿に含めるのが適切ではないかもしれない。

0.1~10 THz付近のテラヘルツ波帯では、特性のよい光学素子が豊富に揃っているわけではなく、他の光周波数帯に比べて開発が遅れている。光学素子は材料の屈折率分散に依存するため、所望の性能にあった光学材料を選ぶ必要がある。一方、メタマテリアルは、物質に微細構造を作りつけることにより、人為的に実効的な誘電率や透磁率を実現するものである。メタマテリアルの概念を用いて、新規の実用素子を開発することが盛んに検討されている。

具体的な報告例を列挙すると、金属溝周期構造を用いたレンズ⁸⁾、金属開口アレイ⁹⁾・金属メッシュ構造¹⁰⁾、分散誘電体球を用いたメタマテリアル¹¹⁾、金属V溝導波路構造を用いた超集束¹²⁾、金属周期構造を用いたチャープミラー¹³⁾などである。多数のすぐれた報告例があるので、それぞれの文献を参照されたい。

6.5 テラヘルツ波形整形・位相制御

近年、高い尖頭出力をもつテラヘルツパルスに発生に伴い、テラヘルツ帯での非線形光学過程の観測も報告されるようになった。近赤外から可視域での非線形光学過程では、照射する超短パルスの振幅・位相・偏光を任意に操作して波形整形し、物質との相互作用を制御するコヒーレント制御の研究が進められている。そのコヒーレント制御をテラヘルツ帯に拡張すべく、テラヘルツパルスの振幅・位相・偏光を操作する手法についての報告が出てきた。

ひとつは、差周波を発生させるときの励起パルスの波形

を整形しておくことで、間接的にテラヘルツパルスの操作をする方法である¹⁴⁾。現段階では、まだ初歩的な確認にとどまっているように見受けられるが、テラヘルツ発生用の近赤外フェムト秒パルスのスペクトル位相を操作したことによって、テラヘルツ波の位相にどう転写されるかの報告があった。

このほか、偏光状態が空間ビームパターン内で変化するベクトルビームの生成も、テラヘルツ帯で報告された¹⁵⁾。最も基本的なラジアル偏光状態とアジマス偏光状態を生成した。通常は、半波長板を複数組み合わせた偏光素子を用いて、直線偏光をラジアル/アジマス偏光に変換することが多いが、この報告では、テラヘルツ波を発生させるリン化ガリウム結晶の偏光選択則を活用して、発生と同時にベクトルビームが得られるように工夫しているのが特長である。

6.6 偏光量子もつれ光子対源

話題を量子光学に移そう。現在光を使った量子情報処理は、光子の偏光を自由度として用いている。そこで、偏光もつれ光子対の発生光源の開発は特に重要である。筆者が注目した光源は、オンチップ偏光もつれ光子対源と周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)導波路デバイスである。

オンチップ偏光もつれ光子対源は、シリコン光回路で形成したものである¹⁶⁾。シリコン基板上に集積された平面光波回路は、大規模量子情報処理のプラットフォームとして注目される。報告では、四光波混合過程でシグナルとアイドラー光子を発生させるシリコン細線導波路と、偏光もつれ光子状態を生成するシリコン細線の偏波回転素子とを組み合わせた構造になっている。1.55 μmのポンプ光を導入して生成した二光子偏波もつれ状態の量子状態トモグラフィを測定し、0.91の高い忠実度を実現した。

別の例では、PPLN導波路デバイスを用い、カスケード第二高調波およびパラメトリック下方変換方式によって、偏光量子もつれ光子対を生成した¹⁷⁾。さらに、生成した光子対を通常光通信帯で使われるシングルモード光ファイバーで伝送する実験を行った。二光子干渉波形における明瞭度は、伝送前で91.4%に対して、シングルモードファイバー140 km伝送後でも88.7%とよい値を示していた。

このほかにも、偏光もつれ光子対の差周波過程による波長変換も報告されている¹⁸⁾。780 nmの偏光もつれ光子対の片方をPPLNでの差周波過程を用いて、通信波長帯である1522 nmの光子に波長変換し、変換後の忠実度を測定した。通信波長帯の光子検出器として、超伝導単一光子検出器を用いている。この超伝導検出器は、最近の量子光学の実験できわめて有用な装置である。この超伝導検出器を用

いて、1.5 μm 帯量子ドット単一光子光源の二光子ノイズなどの性能評価も行われている¹⁹⁾。

6.7 多光子顕微イメージング

近年のバイオフォトリクス進展には、目を見張るものがある。コヒーレンストモグラフィーや蛍光顕微鏡は、すでに実用化の域に達している。非線形光学との関連からいえば、特に、蛍光指標を必要とせず、非染色で生体試料を画像化できる第二高調波顕微鏡や誘導ラマン顕微鏡が注目に値する。

誘導ラマン顕微鏡は、分子振動に由来するラマン信号で分子種を顕微鏡下で同定しながらビデオレートで分子の分布を画像化することができる。2波長の同期したパルス光源を同時に集光し、差周波数に共鳴する分子振動を選択的に励振して、そのコヒーレント分子振動に由来する誘導散乱信号をロックイン検出する。従来の誘導ラマン顕微鏡は観測する振動周波数が固定であったが、Optics & Photonics Japan では、波長を高速に切り替えられるパルスレーザーを開発し、フレームごとに異なる振動周波数での画像を取得した報告があった²⁰⁾。観測画素ごとのスペクトル情報から、脂肪滴、細胞質、細胞核や線維等の分離同定を行っている。

6.8 展 望

このように概観してみると、量子光学、非線形光学の最近の話題は、差周波発生あるいはパラメトリック過程が非常に重要な役割を担っていることがわかる。中赤外からテラヘルツ域は、分子の振動・回転や結晶格子のフォノンなど、物質の構造に関わる情報を豊富に含んでいる。本稿では割愛したが、テラヘルツ波を用いたアミノ酸^{21,22)}や高分子²³⁾、糖類²⁴⁾、水和物^{25,26)}などの分析結果もいくつか報告があった。光物性物理学を専門とする筆者からは、今後は、これらの差周波光を有効に活用して、光と物質との相互作用の研究が大きく展開していくことを期待するものである。

文 献

- 1) 縄田耕二他：春季応物講演会 (2012) 15a-GP2-8.
- 2) 川島拓也他：秋季応物講演会 (2012) 12p-B1-10.
- 3) 木本琢也他：春季応物講演会 (2012) 15a-GP2-10.
- 4) 竹内 創他：秋季応物講演会 (2012) 12a-B1-12.
- 5) 田所 讓他：秋季応物講演会 (2012) 12a-B1-4.
- 6) 杉山 宗他：秋季応物講演会 (2012) 12p-B1-2.
- 7) 松原栄一他：秋季応物講演会 (2012) 12p-B1-3.
- 8) 今野拓矢他：秋季応物講演会 (2012) 11p-B1-5.
- 9) 岸 湧大他：秋季応物講演会 (2012) 11p-B1-1.
- 10) 焼山祐也他：春季応物講演会 (2012) 17a-E8-2.
- 11) 奥井雄一郎他：春季応物講演会 (2012) 17a-E8-1.
- 12) 栗原一嘉他：秋季応物講演会 (2012) 11p-B1-3.
- 13) 永井正也他：秋季応物講演会 (2012) 13a-PA6-4.

- 14) 植松浩司他：秋季応物講演会 (2012) 12a-B1-6.
- 15) 今井 亮他：秋季応物講演会 (2012) 12a-B1-7.
- 16) 松田信幸他：秋季応物講演会 (2012) 13a-B1-1.
- 17) 荒平 慎他：秋季応物講演会 (2012) 13a-B1-3.
- 18) 加藤大織他：春季応物講演会 (2012) 18a-E3-7.
- 19) 竹本一矢他：春季応物講演会 (2012) 18a-E3-8.
- 20) 小関泰之他：OPJ (2012) 25aA8.
- 21) 佐々木哲朗他：秋季応物講演会 (2012) 11a-B1-2.
- 22) 中村悠太他：秋季応物講演会 (2012) 11a-B1-5.
- 23) 石井伸弥他：秋季応物講演会 (2012) 11a-B1-1.
- 24) 山内 智他：秋季応物講演会 (2012) 11a-B1-3.
- 25) 青木克仁他：秋季応物講演会 (2012) 11a-B1-4.
- 26) 川辺駿佑他：春季応物講演会 (2012) 16a-E8-11.

7. 近接場光学

富士フィルム 納谷昌之

7.1 概 要

超解像から始まった近接場光学は、いまや局所領域における光と物質の相互作用を探り、新たな機能を作り出すという、より本質的な領域を研究するフェーズに入っている。そして、その応用分野は、加工、センシング、エネルギー応用、情報処理など、きわめて多岐に広がっている。

2012年は、近接場光学を牽引するナノオプティクス研究グループが近接場光学研究グループとして発足してから20周年の節目を迎えた年であった。これを記念して、5月には慶應義塾大学において、ナノオプティクス研究グループ研究討論会第20回記念シンポジウムが行われた。このシンポジウムでは、近接場光学の創成から現在までを支えてきた研究者の講演が行われた。さらに、次の世代を担う研究者からの講演やポスター発表がなされ、近接場光学が世代間で受け継がれながら発展していることが実感された。12月には東京大学においてナノフォトリクス創成20周年シンポジウムが行われ、広い分野に対して近接場光学が今後も重要な役割を果たしていく道筋が示された。応用物理学会においては、春は一般講演、シンポジウムをあわせて80件、秋は一般公演とJSAP-OSAジョイントセッションをあわせて104件の発表があり、また、会場も立ち見が出るほどの盛況であった。さらに、近接場光学以外のセッションで近接場光学の応用技術が発表されており、いまや、単なる一分野にとどまらず、さまざまな領域に対する基盤技術となっている。

7.2 近接場光学顕微鏡

近接場光学の原点ともいえる近接場光学顕微鏡は、イメージングへの応用のみならず、素過程の解明という観点からも大変に重要なテーマである。光ファイバプローブを用いる近接場光学顕微鏡はすでに実用化が進んでいるが、新しい取り組みとして、テラヘルツ領域のナノスケール

ルイメージング¹⁾や、半導体プローブを用いる近接場光学顕微鏡²⁾などの提案があった。また、カーボンナノチューブ光プローブを用いる近接場光学顕微鏡により2 nmの分解能が得られたという報告³⁾もあり、開拓されるべき領域はまだ残されている。素過程の解明に関しては、近接場光の階層性の解析⁴⁾や、ナノスリットで誘起される近接場光の波長依存性の解析⁵⁾などが報告された。さらに、半導体の発光などに関わるキャリア移動を精密に測定する方法として、二短針近接場光学顕微鏡が開発され⁶⁾、測定装置とそれによって得られる知見ともに、今後の進捗が興味深い。近接場光学顕微鏡に関しては、近接場光学を支える重要な基盤として、今後もさらに新しい手法の開発や、それを用いた未知の現象の解明が発展していくことが期待される。

7.3 プラズモン共鳴

プラズモン共鳴そのものは、プラズモンの波動的な性質によるものである。しかし、そこで発生する電場の振動がナノ領域に閉じ込められていて、自由空間にはカップリングしない高い波数をもっており、相互作用が近接場光を介したことになることから、興味深くかつ有用な現象が発生する。また、プラズモン共鳴によって、本来であれば微弱で取り扱いが難しい近接場光が強く増強されるため、近接場光を取り扱う上では大変重要な要素である。特に、金属のナノギャップで生じる強い近接場光は、その素過程の解析だけではなく、センシング、エネルギーなど、幅広い領域への応用展開が期待されており、多くの報告がなされている。2012年の秋の応用物理学学会講演会では、レギュラーの近接場光学のセッションのほかに、プラズモニクスに関するJSAP-OSA ジョイントセッションが開催され、国内外の研究者による活発な議論がなされた。

基礎的な検討としては、プラズモンの伝搬特性の解析⁷⁾や、長距離伝搬表面プラズモンの解析⁸⁾などの報告があった。また、光制御デバイスやセンシングなどの応用研究に関しても、相変わらず精力的な研究が行われている。光制御に関しては、GeSbTe 相変化材料と組み合わせた光スイッチの基礎検討⁹⁾やナノサイズの八木宇田アンテナ¹⁰⁾をはじめ、多数の提案、検証の報告があった。DUV領域で局在プラズモン共鳴を発生させて利用するための金属微細構造¹¹⁾は、プラズモンの利用領域拡大につながるものとして注目される。また、表面増強ラマン散乱光と表面増強蛍光の不安定性に関する報告¹²⁾は、センシングへの応用のみならず、物質の光励起の基礎検討という観点からも大変興味深い。さらに、金属コートされたナノ短針を用いる分光¹³⁾は、ラマンのみならず、SHGなどの非線形

分光イメージングにも応用され、ナノ領域の解析ツールとしてバイオや産業用途などで広く利用されることが期待される。

7.4 メタマテリアル

光のメタマテリアルとは、「光の波長以下のサイズの構造をもち、自然界にはない光学特性を示す人工物」のことである。実際に空間に放射される光は伝搬光であるが、それを生み出す源泉としてナノ空間領域でのプラズモン共鳴や近接場光相互作用が強く関わっていることから、近接場光学の観点からも非常に興味深い。さまざまな応用用途が期待されるため、メタマテリアルに対する関心は高く、2012年春季応用物理学学会のシンポジウムにおいては、大講堂で立ち見が出るほどの聴講者が集まり、活発な議論がなされた。日本におけるメタマテリアルの関心の中心は、負屈折率などの左手系である。それを実現する方法として、レーザー加工や自己組織化を用いる三次元加工¹⁴⁾やナノインプリントを用いる方法¹⁵⁾などの手法が開発されている。一方、欧米においては、左手系にこだわらずに量子現象やスイッチングなどに関する領域を広げた取り組みが進んでいる¹⁶⁾。この流れは日本でも始まりつつあり、一例としてはU型スプリットリング共振器による熱輻射制御の報告¹⁷⁾があり、エネルギーの有効利用のための応用技術としても興味深い。さらに、銀ナノ平板をフィルム上に敷き詰めて近赤外光のみを反射する構造が遮熱フィルムとして実用化として報告された¹⁸⁾。このように、領域を広げて考えることで、今後、メタマテリアルがさまざまな用途で利用される技術として発展することが期待される。

7.5 局所性の利用

ナノ領域で強度に分布が生じるという空間的な局在性は近接場光の本質的な性質である。それを積極的に利用して、伝搬光ではありえなかった新しい性質を引き出すことは、光の可能性を広げるという意味で大変重要である。ナノ微粒子に作用する局在プラズモン放射圧の解析¹⁹⁾は、局所場の作用を考える上で重要な知見である。ドレストフォトンという概念のアプローチからは、フォノン援用タイプの加工や、デバイスの作製、動作などに関して、基礎から実験による検証まで多数の報告がなされた。なかでも、Siの間接遷移による発光はLED発光のみならずレーザー発振にまで至っている²⁰⁾。また、この原理を用いることでSiフォトダイオードの感度域を1.3 μm帯まで広げることも示された²¹⁾。近接場光の局所性の積極的な利用は、従来の光励起の概念を大きく変えるものとして、基礎にとどまらず、実用的な応用技術としてもその発展が期待される。

7.6 情報科学・技術への展開

近接場光学の関心は、おもに光と物質の相互作用に向けられてきた。しかし、それだけにとどまらず、情報科学・技術の分野に対しても近接場光学が強く関わりだしたことは、注目に値する。2012年は粘菌によるバイオコンピュータの概念を量子ドット間の近接場光相互作用を介した光励起輸送によって実現する提案²²⁾や、相変化材料と組み合わせた神経回路機能の提案²³⁾があった。今後の発展が楽しみな領域である。

7.7 展 望

近接場光学は、その創成からすでに20年を経ているが、研究の領域は着実に広がっており、発展を続けている。このように長い間発展を続けてきた理由は、近接場光学が、光と物質の相互作用に関わる根本的な領域を探る学問であり、そこにはいまだに未知の世界が残されていることによると考えられる。今後、これらの領域が開拓され、光科学の新しい知見が見出されていくことと同時に、それらが実用技術として世に出ていくことを大いに期待したい。

文 献

- 1) 梶原優介他：秋季応物講演会 (2012) 14p-F8-1.
- 2) 古川 真他：秋季応物講演会 (2012) 14a-F8-11.
- 3) 中田俊彦他：秋季応物講演会 (2012) 14p-F8-2.
- 4) 是澤太郎他：春季応物講演会 (2012) 16p-GP1-4.
- 5) 大木弘晃他：春季応物講演会 (2012) 17a-B11-1.
- 6) A. Kaneta *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (2012) 083709/1.
- 7) 服部竜己他：春季応物講演会 (2012) 18a-B11-4.
- 8) 伊藤民武他：春季応物講演会 (2012) 18p-B11-4.
- 9) N. Hayazawa *et al.*: 秋季応物講演会 (2012) 12p-G1-10.
- 10) 宮田将司他：春季応物講演会 (2012) 18a-B11-5.
- 11) 本間貴士他：春季応物講演会 (2012) 18a-B11-3.
- 12) 飛子雄介他：秋季応物講演会 (2012) 14p-F8-5.
- 13) K. Watanabe *et al.*: 秋季応物講演会 (2012) 11p-G1-12.
- 14) 田中拓男：春季応物講演会 (2012) 15p-E3-3.
- 15) 上羽陽介他：秋季応物講演会 (2012) 14a-F8-6.
- 16) E. Narimanov *et al.*: *CLEO* (2012) QM2E.1.
- 17) 北岡賢治他：春季応物講演会 (2012) 15p-E3-6.
- 18) 白田真也他：春季応物講演会 (2012) 18a-B11-2.
- 19) 田中嘉人他：春季応物講演会 (2012) 17a-B11-2.
- 20) 川添 忠他：春季応物講演会 (2012) 17a-B11-6.
- 21) 田中 肇他：春季応物講演会 (2012) 17p-B11-3.
- 22) 青野真土他：秋季応物講演会 (2012) 13p-F8-14.
- 23) 内山貴之他：秋季応物講演会 (2012) 13p-F8-16.

8. 光応用計測

大阪大 高谷裕浩

8.1 概 要

光学的な基本原理の追求だけでなく、実用化に対する期待も高い光応用計測の分野は、高速化、高精度化、環境適応性、測定レンジ拡大など、実用技術としての課題が山積

している。それらの解決方法としては、機械や電気・電子・情報技術との融合や新たな光学デバイスの製作から、計測原理の再構築や基礎現象解析に至る幅広いスペクトルをもつ魅力的な分野である。

光には多様な状態量、すなわちその性質を決めるパラメーター（周波数、振幅、位相、波面、パルス波形、コヒーレンス、スペクトル、偏光など）が存在する。それらの豊かな情報量は、光が広範な分野の計測に応用されている理由のひとつともなっている。そこで、ここで取り上げる内容も、幾何量、表面・微粒子、偏光、生体計測の研究動向を広く含めることとした。

8.2 幾何量計測

メトロロジー（計量）の基礎となるSI単位系には、7つの基本単位が定められている。そのうち「長さ」と「光度」の2つの単位は光と密接に関連している。このような背景ともものづくりにおける重要な計測量であったことから、光応用計測は、寸法、形状、距離、変位および表面微細形状などの幾何量を対象とした計測の分野として発展してきた。現状においても、基礎から実用におよぶ広い技術フェーズでとり扱われている。なお、寸法、形状、距離測定に関しては、干渉計測に関する研究が多いが、ここではおもに実用化に向けた取り組みや光コムの話に絞り、詳細については9章に譲ることとする。

幾何光学に基づく形状計測技術は、おもにレーザー光の直進性と光学系の幾何学的関係を利用して角度や距離（長さ）などの基本量を計測する方式が多く、精密機械制御技術との高度な融合技術として発展を続けている。走査型の三次元形状計測技術として、光線追跡法¹⁾を法線ベクトル追跡型超精密形状測定に適用した例や大型非球面形状をナノメートルの精度で計測可能とするオートコリメーター法²⁾、ナノメーターレベルの絶対精度を目的とした角度測定法³⁾開発など、特に実用性の高い大型加工物の高速高精度な計測として開発が続けられている。

従来より、波長に基づく長さ標準との相性のよさから、寸法、形状計測は光干渉を利用したものが多く、多様な手法が提案されている。しかし、いまだ広領域（あるいは大型構造物）や運動物体への適用が難しく、振動の影響の受けやすさなど、実用上の課題が残されている。干渉顕微鏡の応用として、三波長ワンショット干渉法の導入とマルチバンドパスフィルターを利用した照明系などの光学的工夫によって、高いレベルでの高速化、耐環境擾乱（振動、環境光など）を達成し、数nmの測定再現性を有するインクジェット方式カラーフィルターの自動膜厚測定装置⁴⁾が開発された。また、露光中の干渉計の光路差変化情報と振

動影響を受けた干渉光強度から露光開始直後の位相を抽出する方法を組み込んだ、振動環境に強い干渉応用三次元形状計測⁵⁾も実現されている。さらに、物体粗面における単一周波数の投影干渉縞をホログラフィーによって高速記録し、空間フィルタリングによってスペックル低減を図る、ワンショットデジタルホログラフィーを適用した運動物体粗面の精密形状計測法⁶⁾が報告されている。変形計測に関しては、スペックル干渉法を用いたひずみ測定⁷⁾の現状が報告され、塑性変形領域を簡易的に検出する手法、広範囲かつ大きな変形を測定する手法、外乱振動のある環境でも変形測定を可能にする手法など、実用性を重視した応用例が紹介された。

光周波数コム(光コム)は、2009年7月に計量法の特定標準器(長さ)として採用されたことを背景に、形状・距離計測への応用研究も始まっており、いくつかの実用性の高い計測手法も開発されている。基礎的研究として注目すべき報告に、中心周波数がわずかに異なる2つのスーパーコンティニューム(SC: supercontinuum)光を利用した新たな手法⁸⁾がある。このSC光は、周波数間隔が可変な広帯域コム光として、光パルスシンセサイザー(OPS: optical pulse synthesizer)と高非線形ファイバーを利用して発生している。また、音響光学変調器(AOM: acoustic optical modulator)を用いた光コムのヘテロダイン干渉法⁹⁾による大型構造物計測への適用性が示されたほか、光コムのセルフビートに基づいた粗面の距離計測¹⁰⁾や二波長の光コムによるヘテロダイン干渉計による長距離計測¹¹⁾が報告されている。数10メートル以上の長距離をマイクロメートルレベルの精度で測定することを目的とする長距離計測においては、長光路における空気屈折率の時間的変動や空間的分布による精度劣化が問題となるため、ヘテロダイン干渉による自己補正法を導入してその解決を図っている。実用化に向けた取り組みとしては、セルフビートによる干渉計測手法を用いて大型製品の製造工程における形状計測技術としての検討¹²⁾が始まっている。

距離計測または距離画像計測においても、実時間化、長距離化、高精度(高解像)化および環境変動への対応によって、応用領域の拡大が進んでいる。そのおもな手法は、光飛行時間(TOF: time of flight)方式と急速に高性能化が進む受光素子の融合によるものであり、独自に試作した長尺アバランシ・フォトダイオード(APD: avalanche photodiode)アレイ受光素子¹³⁾やCMOSプロセスを用いて製作した単光子検出器アレイ¹⁴⁾の適用が試みられている。

以上のほかに、さまざまな光学現象を使用した形状計測

原理が研究されている。まず、完全円偏光で照明したときの反射楕円偏光状態から面の法線を求め、その積分から形状を再構築する、傾斜エリプソメトリーとよばれるユニークな計測原理¹⁵⁾が提案されている。さらに表面微細形状計測として、表面の反射率や偏光状態の変化に基づいたスキヤトロメトリーによる回折格子溝断面計測¹⁶⁾や、光放射圧によって捕捉したマイクロガラス球と測定表面の間に局在する定在場をスケールとして用いる走査型のマイクロ形状計測¹⁷⁾が報告されている。光ファイバーを利用した新たな計測手法としては、光ファイバーの先端にガラス製の接触子を固定した光ファイバースローブによる微細三次元計測¹⁸⁾や小型円錐ミラー、光ファイバーコリメーターおよび光変調機能を搭載した半導体レーザーから成る光ファイバー・リングビームプローブを用いた内面形状計測¹⁹⁾が開発されている。

8.3 表面・微粒子計測

環境計測としての微粒子計測や表面粗さ計測において、光散乱を利用した光応用計測の研究が深められた。環境微粒子による大気汚染モニタリングの新たな基準であるPM 2.5環境基準(PM 2.5は2.5 μm 以下の微粒子)に対応する大気中微粒子粒径計測に関する研究²⁰⁾が報告されている。新たな提案手法では、集光レーザーの光放射圧による微粒子捕捉を利用して、安定した散乱光計測を実現している。この手法は、大気環境下における花粉センサーの安定化²¹⁾を図る方法としても利用されている。さらに、キセノンフラッシュランプ照射とイメージセンサーによる側方散乱光計測による手法²²⁾や、散乱光画像の差分処理によって検出感度を高めたナノメートル空間差分法²³⁾などの興味深い報告もある。表面計測においては、フォトンカウンティングシステムを用いた広ダイナミックレンジのスキヤン方式散乱角度分布計測²⁴⁾によって、微弱な散乱光強度しか得られない光学ガラス表面の計測を可能とした。なお、光散乱法以外のナノ粒子計測手法としては、周波数領域蛍光偏光法によるブラウン粒子の回転相関時間計測²⁵⁾に基づいた新たな計測原理が報告されている。

8.4 偏光計測

偏光を利用した光応用計測は、エリプソメトリーによる表面微細構造や薄膜計測に代表されるように、表面層の構造、透過物体内部のひずみ、屈折率分布、異方性などの力学特性、材料および光学物性の計測と深い関わりをもつ重要な技術であり、最近では、サブミクロンオーダーサイズの孤立線やドットパターンから微弱な散乱光の偏光解析や、フォトンカウンティング法を用いたエリプソメトリー²⁶⁾などの研究が展開されている。これまでの実用技術は、計

測系に機械的駆動部や電気的変調部を必要とするため、静的な計測というイメージが強かった。しかし最近の、サブミリ秒の時間分解能をもつ二次元複屈折計測装置の開発²⁷⁾や、光の偏光状態の波長分布をスナップショット(ワンショット)の分光計測で一度に求めるチャネルド分光偏光計測法によって、新たな応用領域が広がりつつある。チャネルド分光偏光計測法は、2枚のサバール板とイメージング分光器を組み合わせる新たな手法²⁸⁾によって波長分解能の向上を実現しており、今後の応用展開が楽しみな計測手法である。

8.5 生体計測

光による無侵襲な生体計測への応用も重要な分野である。光と生体組織構造の相互作用はきわめて複雑であり、計測原理の基礎となる生体組織内の光伝搬を扱う解析手法も、確率的光吸収・光散乱モデル、輸送方程式や拡散方程式など多岐にわたっている。血流中における赤血球の光吸収・散乱信号を扱った実用性の高い生体計測として、レーザードップラー血流計(LDF: laser doppler flow meter)の高速域における流速計測の向上²⁹⁾、レーザースペックル血液濃度イメージング³⁰⁾や集光レーザービームの二次元走査による血管の三次元動態イメージング³¹⁾に関する研究が報告されている。一方、生体組織内部におけるグルコースなどの成分濃度計測法として、分光吸収係数トモグラフィ³²⁾や結像型二次元フーリエ分光法³³⁾の提案、生体組織内部の蛍光イメージング³⁴⁾の基礎的研究がなされている。さらに、分光バイオプシー(組織病理検査)の高度化を進める分光三次元内視鏡³⁵⁾の開発に関する報告も、医療現場の実用計測と直結した研究として注目に値する。なお、今回は誌面の都合で割愛したが、生体組織の立体断層画像が得られる光コヒーレンストモグラフィ(OCT: optical coherence tomography)も、研究の加速によって実用化が急がれる光応用計測のひとつである。

8.6 展 望

光は本質的に多様な状態量を有する現象である。各種光学デバイスの高度化や、多波長干渉、分光、偏光などの同時計測により、多種類の計測量をパラレルに取得できる可能性を秘めている。さらに、光は本質的に高速な現象である。光コム、SC光などの光源や、APDアレイ、CMOSデバイスなどの受光素子およびデータ処理技術の急速な発展により、高速化とともに測定環境や測定対象の制約が少なくなっている。このように光のもつポテンシャルを最大限に活用することにより、光応用計測は、新たな空間的、時間的な広がりを獲得しつつある。幾何量計測においては、マイクロからメートルサイズに及ぶナノ精度形状計測や距

離計測、大面積のナノ微細表面形状計測、運動物体や変形の高時間分解計測を実現し、偏光計測では分光偏光計測や実時間屈折率分布計測、生体計測では血管の三次元動態計測、生体組織内部の成分濃度計測、生体器官面内の三次元形状とその分光特性の同時計測へと、応用分野のさらなる広がりを加速させている。今後も、コヒーレント結像逐次再構成型超解像法³⁶⁾、パッシブテラヘルツ近接場顕微鏡³⁷⁾、偏光指紋³⁸⁾などのような、新たな計測原理の提案や基礎現象解析手法の研究が活発に行われ、光応用計測の新領域が開拓されることを期待したい。

文 献

- 1) 松村拓己他:精密秋季大会(2012)955.
- 2) 石川恭平他:精密秋季大会(2012)959.
- 3) 伊藤晃太他:秋季応物講演会(2012)13a-PA1-12.
- 4) 北川克一他:精密工学, **78**(2012)86.
- 5) 安達正明他:精密工学, **78**(2012)1076.
- 6) 佐藤邦弘他:*OPJ*(2012)23pC4.
- 7) 有川秀一他:*OPJ*(2012)24pCS5.
- 8) 小島崇人他:春季応物講演会(2012)18p-B9-6.
- 9) 松本弘一他:*OPJ*(2012)25pC7.
- 10) 尾上太郎他:精密秋季大会(2012)963.
- 11) 高梨真由美他:*OPJ*(2012)25pC5.
- 12) 針山達雄他:精密秋季大会(2012)629.
- 13) 辻 秀伸他:*OPJ*(2012)25pC8.
- 14) 伊藤晃太他:春季応物講演会(2012)17p-B9-10.
- 15) 津留俊英他:秋季応物講演会(2012)12a-F8-3.
- 16) 廣瀬丈師他:秋季応物講演会(2012)12p-F8-9.
- 17) 道畑正岐他:精密秋季大会(2012)971.
- 18) 村上 洋他:精密春季大会(2012)455.
- 19) 若山俊隆他:精密春季大会(2012)1033.
- 20) 鶴見健太郎他:*OPJ*(2012)23aC3.
- 21) 早乙女聡他:秋季応物講演会(2012)12a-F8-10.
- 22) 山本将史他:春季応物講演会(2012)17a-GP1-10.
- 23) 伊藤雄大他:春季応物講演会(2012)17a-GP1-11.
- 24) 喜入朋宏他:秋季応物講演会(2012)13a-PA1-1.
- 25) L. K. Foong 他:精密春季大会(2012)461.
- 26) 越沼勝太郎他:秋季応物講演会(2012)12a-F9-1.
- 27) 大沼隼志他:精密工学, **78**(2012)1082.
- 28) 羽賀悠人他:*OPJ*(2012)23aC6.
- 29) 郷間雅樹他:春季応物講演会(2012)17p-B9-4.
- 30) 松宮路恵他:*OPJ*(2012)24pA4.
- 31) 小濱正太郎他:*OPJ*(2012)24pA8.
- 32) 石田 茜他:精密春季大会(2012)1023.
- 33) QI Wei 他:*OPJ*(2012)24aA9.
- 34) 小幡恭平他:*OPJ*(2012)24pA9.
- 35) 若山俊隆他:精密春季大会(2012)1021.
- 36) 工藤良太他:精密秋季大会(2012)975.
- 37) 梶原優介他:精密春季大会(2012)463.
- 38) 金 蓮花他:*OPJ*(2012)23aC4.

9. 干渉計測

産総研 平井亜紀子

9.1 概要

干渉計測は、光源の波長を基準とした高精度・非接触な長さ、位相計測が行え、測長、形状計測のみならず、光学定数や散乱係数の測定などに応用されている。最近、スーパーミネセントダイオード (SLD) や超広帯域光などを光源とした白色干渉計・低コヒーレンス干渉計は、引き続き多数報告されているが、従来の He-Ne レーザー等による干渉計測や波長走査型干渉計の報告数は減少傾向にあるように感じる。撮像素子や GPU (graphics processing unit) の技術発展により、デジタルホログラフィーの研究が活発に行われており、その特長を生かした計測応用の報告も増えている。また、これまでの分野別研究動向では偏光計測は取り上げられていなかったが、干渉の一種と考えられるので、計測に関連するものを本稿で取り上げる。

2012 年度も干渉計測に関する研究発表は活発に行われ、春季応物講演会では約 20 件、秋季応物講演会で約 15 件、Optics & Photonics Japan では約 30 件の発表があった。国内研究機関からの干渉計測に関する論文が、「光学」では 3 報、Optical Review では 4 報掲載された。以降、干渉計測分野におけるこの一年の研究動向を、手法ごとに分類して概観する。誌面の都合上、同一テーマで複数の講演会で発表されたものは、代表的な発表のみを紹介する。

9.2 従来型干渉計・干渉応用計測・光コム応用

春季応物講演会で、重力波観測用干渉計“かぐら”に関する日本真空学会との共同企画シンポジウムが開催された。干渉計に関しては、歪み量 10^{-23} という超高感度を達成するための干渉計構成と工夫¹⁾、低周波領域での感度向上のため低温鏡を実装した干渉計²⁾が紹介された。他の発表も含めて極限の感度を達成するためのさまざまな工夫、研究姿勢が印象的だった。

形状・変形計測に関して、高速性と空間分解能の両立を目指した多波長ワンショット干渉計測技術の実用化³⁾が報告された。また、2枚のスペックルパターンのみを用いて変形を計測する方法が提案された⁴⁾。半導体レーザーの周波数変調を利用したものでは、直接周波数変調特性を利用した高速位相シフトによる変化する物体の形状計測⁵⁾、正弦波位相変調法を利用したスピンドルの回転に伴う誤差運動測定⁶⁾が報告された。

光ファイバーの分散測定において、多波長同時ヘテロダイン検波法を用いた分散計測システムの計測範囲拡大が報告された⁷⁾。地球型系外惑星探索で障害となる恒星からの

回折光を消光するための高精度補償光学系において、四分割位相マスクコロナグラフを用いた非対称ナル干渉計による安定化の見通しが報告された⁸⁾。

光周波数コムに関しては、長距離測定において問題となる信号の強度変動がもたらす位相変動の影響を軽減するため、二波長光コムを用いたヘテロダイン干渉計が開発され⁹⁾、長距離測定実験で実証された¹⁰⁾。光周波数コムに音響光学素子 (AOM) を併用したヘテロダイン干渉計による遠方からの非接触形状計測が報告された¹¹⁾。

9.3 波長走査干渉計

波長走査フィゾー干渉計において、位相シフト法で求めた初期位相と最終位相から、ガラス板の厚さと両面の形状が同時に測定された¹²⁾。波長走査を反対方向に行う 2 台の垂直共振器面発光レーザー (VCSEL) を用いて、波長走査中のキャビティー長ドリフトの影響を受けない干渉計が提案された¹³⁾。中心波長が異なる 2 つのコム光を用い、コム間隔周波数を掃引して三次元形状が取得された¹⁴⁾。

9.4 白色干渉計・低コヒーレンス干渉計

白色干渉計・低コヒーレンス干渉計が最も活発に研究されているのは、光コヒーレンストモグラフィー (OCT) の生体計測応用であるが、それらは 17 章「医学・生物応用光学」に譲り、本章ではそれ以外の報告を取り上げる。

形状計測に関する報告では、光路差走査に用いるピエゾの非線形性を補正するために、白色干渉信号をウェーブレット変換し、瞬時周波数変化からピエゾの瞬時速度を求める方法が提案された¹⁵⁾。また、近赤外スーパーコンティニューム光を用いた白色干渉計で光学系の波長依存性抑制による高分解能化が報告された¹⁶⁾。

試料の厚さや深さ方向の構造の測定では、結像型二次元フーリエ分光法による分光断層像計測の深度方向分解能の実験的検証および蛍光染色細胞の分光断層像計測実験が行われた¹⁷⁾。吸収のある層状試料の深さ構造と層ごとの反射分光スペクトル測定が報告された¹⁸⁾。また、反射型干渉分光法による有機太陽電池の劣化測定¹⁹⁾や薄半導体、強誘電体ウェハの厚さ計測法²⁰⁾が報告された。

散乱現象の計測に関して、スペクトル領域低コヒーレンス干渉計で、固液界面²¹⁾、気液界面²²⁾における微粒子の位置変化を測定し、動的光散乱法と組み合わせて微粒子の拡散運動が計測された。また、散乱係数や非等方散乱因子²³⁾、減衰係数²⁴⁾の測定に応用された。

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、10 章「光情報処理」においても取り上げられると思われるが、本章では計測に主眼を置いた報告を中心に紹介する。デジタルホログラ

フィーは光波の複素振幅分布を数値データとして取得できないため、定量計測への応用に関する報告が増えている。

塗料乾燥過程の塗装面反射光再生像の時間変化から乾燥過程が定量的に評価された²⁵⁾。また、三次元屈折率分布測定も魅力的な応用で、フォトポリマーの特性評価への応用²⁶⁾や、被測定屈折率分布による測定光の屈折が無視できない場合のため光波伝搬計算を用いた再構成手法の提案²⁷⁾があった。

最近では、動的現象の計測を目指したワンショットデジタルホログラフィーの提案が増えている。物体粗面に投影された干渉縞をワンショットデジタルホログラフィーで記録し、空間フィルタリングを行ってスペックルを低減した後に再生する方法が提案された²⁸⁾。単一波長で異なる照射角度、偏光方向をもつ2ビームを利用した並列位相シフト干渉計によるシングルショット位相アンラッピング法が提案された²⁹⁾。偏光状態分布の計測については、位相シフト法に必要なホログラムと複数の偏光方向におけるホログラム情報を空間分割多重記録する手法の実証³⁰⁾や、偏光変調参照波を用いた方法が報告された³¹⁾。

三次元立体情報と分光情報の同時取得に関しては、異なる波長の参照波を傾けた角度多重記録の提案³²⁾や、二光波折り畳み干渉計と合成開口処理を利用する系による波長が異なる2つの点光源像の再生³³⁾、異なる連続スペクトルを有する複数面光源像の再生³⁴⁾、計算処理時間の短縮、測定対象への制約緩和を目指した新しい干渉計と再生処理の提案³⁵⁾、新しい合成開口処理による奥行き方向の結像特性改善³⁶⁾が報告された。

また、再生光波が計算機内での数値データであるという特長を生かしたのものとして、位相誤差項を理論式に基づいて計算機上で生成し補正する方法³⁷⁾、光補足された金ナノ粒子からの回折像をデジタルホログラフィーにより記録、再生し、あらかじめ準備したテンプレート画像とマッチングをとることにより、金ナノ粒子の三次元位置計測に応用した報告³⁸⁾は興味深い。

9.6 偏光計測

偏光情報を利用した形状計測に関しては、物体反射光の偏光情報をエリプソメトリーで測定し、そこから求められる表面傾斜情報から三次元形状を計測する方法³⁹⁾や回折格子溝断面計測法⁴⁰⁾、テラヘルツ偏光情報を用いたトポグラフィー画像計測⁴¹⁾、偏光素子と2台の撮像素子を組み合わせた複素振幅分布計測手法に適したアルゴリズムによる位相計測精度の改善⁴²⁾、ワイヤーグリッド偏光ピンホールを用いた偏光点回折干渉計⁴³⁾が報告された。

複屈折分布測定に関しては、2つの電気光学結晶位相変

調器を用いた高速複屈折計測システム⁴⁴⁾、隣接する4画素に方位が異なる直線偏光子を実装した偏光高速イメージセンサーによる動的複屈折分布測定⁴⁵⁾が報告された。

光の偏光状態パラメーターの計測に関しては、液晶位相変調器を用いたストークス偏光計⁴⁶⁾、紫外域の分光ストークス偏光計⁴⁷⁾、サバル板とイメージング分光器を用いた高波長分解スナップショット分光偏光計測法⁴⁸⁾、2つの光弾性変調器 (PEM) と半波長板を用いたミューラー行列偏光計の同時キャリブレーション法による高精度化⁴⁹⁾が報告された。

9.7 展 望

光コム応用、デジタルホログラフィーの定量計測への適用、偏光計測は、しばらく引き続き活発に行われるであろう。偏光イメージセンサーなどの新規な素子作製技術等、他分野の研究成果の干渉計測への応用も期待される。従来型干渉計や低コヒーレンス干渉計は、測定対象を絞って実用化を目指した報告が増えており、この傾向も続くように思う。

分野全体を通じて、新しい計測手法や測定システムを提案した後、精度検証が不十分なまま、目的の物体等を測定した報告が多いように感じた。また、「分解能」と「精度」を混同している報告や、理論や従来法と測定結果が合わない場合の原因説明が中途半端に終わっているような報告も散見された。新規提案の際には、適切なモデル試料等を用いた精度評価や問題点発見に向けた検証実験をしっかりと行うことが重要であろう。

動向調査にあたり、職業能力開発大学校小野寺理文氏、産業技術総合研究所尾藤洋一氏にご協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) 麻生洋一他：春季応物講演会 (2012) 15p-F2-2.
- 2) 内山 隆他：春季応物講演会 (2012) 15p-F2-5.
- 3) 北川克一他：OPJ (2012) 24pCS4.
- 4) 新井泰彦他：光学, **41** (2012) 96.
- 5) 成田賢司他：秋季応物講演会 (2012) 13a-PA1-5.
- 6) 上杉修平他：OPJ (2012) 25aC1.
- 7) 清水直弥他：春季応物講演会 (2012) 17p-B9-14.
- 8) 小林拓自他：春季応物講演会 (2012) 18p-B9-2.
- 9) G. Wu 他：春季応物講演会 (2012) 17p-B9-11.
- 10) 高橋真由美他：OPJ (2012) 25pC5.
- 11) 松本弘一：OPJ (2012) 25pC7.
- 12) K. Hibino *et al.*: Opt. Rev., **19** (2012) 247.
- 13) S. Kakuma *et al.*: Opt. Rev., **19** (2012) 376.
- 14) 小島崇人他：春季応物講演会 (2012) 18p-B9-6.
- 15) 渥美 論他：春季応物講演会 (2012) 17a-GP1-5.
- 16) 柏木 謙他：OPJ (2012) 25pC6.
- 17) 小林宏明他：光学, **41** (2012) 36.
- 18) 坂詰将也他：OPJ (2012) 23pC3.
- 19) 伊藤博之他：OPJ (2012) 23pC1.

- 20) 小野竜典他：秋季応物講演会 (2012) 13a-PA1-9.
- 21) 渡会俊晴他：春季応物講演会 (2012) 17p-B9-5.
- 22) 渡会俊晴他：OPJ (2012) 23pC2.
- 23) 郷 孝一他：OPJ (2012) 23aC2.
- 24) 大宮孝太他：OPJ (2012) 23pP5.
- 25) 横田正幸：OPJ (2012) 24pCS2.
- 26) 有本英伸他：OPJ (2012) 24pCS7.
- 27) 北澤貴宏他：OPJ (2012) 23pD3.
- 28) 佐藤邦弘他：OPJ (2012) 23pC4.
- 29) T. Tahara *et al.*: Opt. Rev., **19** (2012) 366.
- 30) 田原 樹他：OPJ (2012) 23pC5.
- 31) 山下健太他：OPJ (2012) 23pD1.
- 32) 伊藤安軌他：OPJ (2012) 23aD8.
- 33) M. Sasamoto *et al.*: Opt. Rev., **19** (2012) 29.
- 34) シラウィット・ティーラヌタラーノン他：OPJ (2012) 23aD5.
- 35) 橋本哲弥他：OPJ (2012) 23aD6.
- 36) 小原正樹他：OPJ (2012) 23aD7.
- 37) 加藤剛志他：春季応物講演会 (2012) 18a-B9-9.
- 38) 佐藤 聡他：OPJ (2012) 25pP3.
- 39) 津留俊英：秋季応物講演会 (2012) 12a-F8-3.
- 40) 廣瀬丈師他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F8-9.
- 41) 渡邊紳一：OPJ (2012) 24pBS3.
- 42) 野澤 仁他：OPJ (2012) 23pP3.
- 43) 渡邊陽介他：春季応物講演会 (2012) 18a-B9-10.
- 44) 齋藤 壮他：春季応物講演会 (2012) 18a-B9-7.
- 45) 大沼隼志他：OPJ (2012) 24pBS8.
- 46) 田中政之介他：光学, **41** (2012) 149.
- 47) 水谷亮太他：春季応物講演会 (2012) 17a-GP1-8.
- 48) 羽賀悠人他：OPJ (2012) 23aC6.
- 49) 石田章伍他：OPJ (2012) 23aC5.

10. 光情報処理

東京大 堅 直也

10.1 概 要

光情報処理とその関連分野においては、光の基本的な性質に起因する多次元の物理現象から抽出した特定の物理量を、伝送（光通信）や蓄積（光メモリー）をはじめとするさまざまな応用に活用することが主目的とされている。多岐にわたるその応用領域の広がりもさることながら、抽出した物理量を有効に活用するための信号処理に関する独自のアルゴリズムの提案からシステムやデバイスの構築、さらにはそれらを実現するための新材料の探索に至るまで、関連研究を含めた光情報処理分野がカバーする領域は昨今特に幅広いものとなっている。

本稿では、おもに春季・秋季両応用物理学会と Optics & Photonics Japan での講演内容から、2012 年における光情報処理とその関連分野の研究動向について振り返る。近年の国内学会において特に多くの講演件数を数える三次元情報処理や光セキュリティーの分野は、応用に向けた明確な目標設定のもとで引き続き精力的な研究開発が進められている。さらには、光情報処理の領域において基盤ともいえる光計算や光演算およびそれらを実装する光システム・

光デバイスの設計と開発についても、関連各分野の最新技術を導入しつつ着実に進展していることが見受けられる。

10.2 三次元情報処理

三次元情報処理の応用例として典型ともいえる立体ディスプレイは、商品化こそ成されたものの、その普及にはもう一息という現状である。一方で、そのような現状も踏まえた上で、より自然かつより高精度な三次元情報の取得・表示技術の実用化を目指すといった観点から、三次元情報処理の分野に対するモチベーションと期待はより一層高まっているといえる。幸いにして、情報空間を三次元に拡張することに伴う処理情報量の増大に対しては近年の計算機能力の高速化・高機能化により十分許容し得る段階にあることも相まって、より一層活発な研究開発が進行している。

特に、ホログラフィーという枠組みはエレクトロニクス技術との協同的な融合により発展し、デジタルホログラフィーという独自の領域を確立している。その中で物体光成分のみを再生可能な位相シフトデジタルホログラフィーにおいては、諸々の提案において性能向上を目指した研究が行われており、セットアップを簡易化するためにランダム位相光¹⁾や任意量の位相シフト²⁾を活用する方策について報告された。また、再生像同士の相互相関を利用することによる記録範囲と分解能の改善手法³⁾や三次元領域内における蛍光像を再生する蛍光デジタルホログラフィーの精度向上のための補正技術⁴⁾に関する検証結果がそれぞれ示された。さらに、超短光パルスレーザーと空間並列処理とを導入することで動的現象をも記録・再生可能な方式⁵⁾が提案され、フェムト秒オーダーの超高速現象への適用可能性が示唆されている。

そのほか、三次元像の表示システムとして提案されている山型プリズムシートを用いた像面走査方式⁶⁾、ミラーアレイを用いた空中表示方式⁷⁾、円弧状の線刻による光散乱を利用した方式⁸⁾、左右両眼それぞれに空間光変調器を対応させたリアルタイム記録・再生方式⁹⁾といった各方策について性能向上に向けた精力的な検証が進められており、それぞれ着実に進展している。より原理的な側面においては、計算機ホログラム (CGH) の計算手法において、奥行き深さに対する改良を施した手法¹⁰⁾および再生時に生じる自己遮蔽の問題を現実的な計算時間内に解決する手法¹¹⁾についてそれぞれ良好な結果を得ることに成功している。さらには、空間光変調器上に表示される CGH を利用した高スループットなフェムト秒レーザー加工システムが提案¹²⁾され、三次元情報の取得・表示にとどまらない多種多様な成果が報告されている。

三次元情報処理の分野においては、原理確認やプロトタ

イブシステムの試作といった段階を経て、現在はある程度目的や用途を明確に設定した上で実用化に向けたそれぞれの性能向上や問題解決について議論される状況に着実に移行しつつあると見受けられる。

10.3 光セキュリティ

情報社会の充実とともに、有形無形の安全・安心を提供するセキュリティーシステム・セキュリティーデバイスに対する需要は引き続き多大である。光情報処理分野においても、紙幣や有価証券等に標準的に付加されるようになって久しいホログラムの普及以来、光セキュリティという枠組みで継続的に研究開発が進められている。

光セキュリティの特徴のひとつとして、肉眼で容易にそのセキュリティー性を活用できる点が挙げられる。近年盛んに研究開発が行われている視覚復号型暗号方式もその特徴に則った方策であり、複数枚の波長板を組み合わせることによる多色化¹³⁾やデバイスの生産性の向上を目的とした光硬化型液晶の適用¹⁴⁾など、多様な方面から原理検証が成されている。また、同様に光の偏光状態を利用したセキュリティーシステムとして開発が進められているセキュアディスプレイについても、その設計時に懸案事項とされる視野角の問題に関する解析結果が報告された¹⁵⁾。さらに、各人工物の個体識別に液晶相固有の光学組織パターンを利用する手法¹⁶⁾が提案され、その有用性についての解析結果が示された。また、情報セキュリティの本質が攻撃者が持ち得る技術レベルとのいたちごっこにある点を考慮すると、ナノ領域で展開される高度な光技術を活用する手法¹⁷⁾についても、いまだ萌芽的な研究段階ながらさらなる進展が期待される。

10.4 光デバイス・光システム

光情報処理分野においては、旧来よりその多様な目的と用途に応じた独自のシステムおよびデバイスの開発が行われている。その多様性と独自性は、振幅・位相・偏光といった光がもつさまざまな物理量が光情報として活用し得ることに起因するものである。

イメージングシステムは、取得された光信号から目的に応じた二次元画像情報を構成する技術である。その光信号の形態はさまざまであり、偏光情報のイメージングにおいてはその対象自由度を高めるために空間光変調器を採用した方式¹⁸⁾、振動分布のイメージングにおいては法線ベクトルイメージャを採用した方式¹⁹⁾について、それぞれ実証実験の結果が報告されている。また、光源に由来するスペックルパターンを利用したイメージング技術として、レーザーアレイの発光パターン的高速変調とそれに伴うスペックルパターンの変化を利用した方式²⁰⁾や、動的物体

からの反射スペックルの変化を利用した方式²¹⁾が提案された。

複数の光学系により取得された光信号から二次元の画像情報を再構成することで、単一系では実装し得ないさまざまな機能や性能の実現が可能である。関連研究においては、信号処理系の高速度・高機能化に伴いリアルタイムでの処理が可能となっており、すでに具体的な実用形態を念頭においた研究開発が進められている。微小複眼系を応用した内視鏡システムにおいては可動ミラーアレイを導入することで画角を拡張しつつ三次元観察が可能²²⁾となっており、複数台のカメラを用いた動画像撮影システムにおいては各シーンの明度変化にも対応可能な手法²³⁾が報告され、各システムについて興味深いデモ実験の結果が示されている。

一方で、光システムの構成要素となる各種光デバイスについても、設計や特性評価をはじめとするさまざまな研究が進められており、回折限界以下のスポット径を実現する回折光学素子の設計手法の提案と実証²⁴⁾をはじめとして、三次元情報表示システムの構成要素として独自に開発された二倍波振動型液晶プリズムの透過特性²⁵⁾や偏光二焦点レンズの偏光特性²⁶⁾について評価結果が示された。

光システムや光デバイスに関する研究内容はその目的から原理・実装手法に至るまで実に多様化しており、鋭意進行中の従来研究のさらなる進展のみならず、まったく新しい研究テーマの創出も期待できる領域である。

10.5 光計算・光演算・画像処理

光がもつ物理的特性を本質的に生かすことで実装される光計算・光演算に関する研究は、光情報処理分野においては主要な研究領域のひとつである。その一環として挙げられる画像処理応用に関する研究も活発に行われており、自然で現実感のある画像の再現を目指して、全周囲カメラにより取得した周囲環境の情報を利用することでその映り込みまでも再現する手法²⁷⁾、独自の反射モデルに基づいて印刷物表面の光沢むらを再現する手法²⁸⁾、多方向からの光照射による分光計測の結果を用いた色再現の手法²⁹⁾が提案され、各手法について有効性が実証されている。医療面への適用を目的とした提案としては、テクスチャー画像のヒストグラムの類似性から病巣を検出する手法³⁰⁾や、光相関器の高速性を生かして病巣を識別する手法³¹⁾について報告され、産業応用に向けた着実な進展が見受けられる。

その一方で、昨今ではナノ領域における分子や原子の振る舞いに起因する特異な光学応答の特性を光計算・光演算に活用することで、従来研究にはない機能の実現を目指す

研究が増えてきている。その中で、量子計算アルゴリズムの処理手順に倣った形で提案されている光学的素因数分解法については、従来手順に後処理を付加することでその計算精度の向上が実現³²⁾され、DNA上に付加した蛍光分子間のエネルギー移動の傾向からDNA分子の立体構造の変化と論理ゲート動作とを関連付けた分子入力・光出力論理回路³³⁾や、量子ドットを組み合わせたナノ量子系における電子の挙動を利用した組み合わせ最適化問題の解法³⁴⁾について興味深い提案が成されており、今後の進展とさらなる展開が大いに期待される。

10.6 展 望

光情報処理分野にみられる傾向のひとつとして、エレクトロニクス技術、画像工学、材料科学といった周辺各分野の発展と協同したポジティブループを繰り返しながら発展してきたことが挙げられる。特に、既述のデジタルホログラフィーや光システム・光デバイスに関する研究の進展はその事例であり、これらに関しては近年の計算機能力の向上により高度かつ複雑な信号処理や設計理論の導入が可能になったことが大きく影響している。すなわち、光情報処理分野のさらなる進展のためには関連各分野の最新動向を追いつつ発展的な協同を図ることが本質的に重要であるといえ、その傾向に則り今後とも各分野のより一層の発展と進展とともに革新的な研究提案の創出が期待される。

文 献

- 1) 井邊真俊他：OPJ (2012) 23aD2.
- 2) 吉川宣一他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-8.
- 3) 石 雄人他：春季応物講演会 (2012) 16a-B10-10.
- 4) 刀祢嘉基他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-6.
- 5) 角江 崇他：春季応物講演会 (2012) 16a-B10-11.
- 6) 前田有希他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-2.
- 7) 堀川裕太他：秋季応物講演会 (2012) 12p-PA2-4.
- 8) 山田直樹他：OPJ (2012) 24aD5.
- 9) 森 裕他：秋季応物講演会 (2012) 12p-PA2-1.
- 10) 涌波光喜他：OPJ (2012) 23aD1.
- 11) 山東悠介他：OPJ (2012) 25aD8.
- 12) 長谷川智士他：春季応物講演会 (2012) 16a-B10-12.
- 13) 土田智大他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-3.
- 14) 手島昂太朗他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-4.
- 15) 内田景太郎他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-5.
- 16) 中山敬三他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-7.
- 17) 成瀬 誠他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-2.
- 18) 堀崎遼一他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-4.
- 19) 前田拓哉他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-5.
- 20) 矢野佑樹他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-10.
- 21) 井本茂文他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-9.
- 22) 香川景一郎他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-10.
- 23) 三上俊彰他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-11.
- 24) 小倉裕介：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-12.
- 25) 木村文都他：秋季応物講演会 (2012) 12p-PA2-5.
- 26) 黒川隆文他：秋季応物講演会 (2012) 12p-PA2-6.
- 27) 細川菜摘他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-15.

- 28) 高野 豊他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-16.
- 29) 野村 仁他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-18.
- 30) 清水博亮他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-8.
- 31) 森山健太他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-9.
- 32) 仁田功一他：春季応物講演会 (2012) 16a-B10-2.
- 33) 西村隆宏他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-1.
- 34) 成瀬 誠他：秋季応物講演会 (2012) 12p-F3-11.

11. 画 像 処 理

静岡大 香川景一郎

11.1 概 要

画像処理は応用光学のいたるところで使われるツールであることは今さらいうまでもない。光学分野におけるすべての画像処理を網羅すべきであるが、本稿では、おもにコンピュータショナルセンシング、プロジェクションマッピング、スペクトル推定に焦点を絞って報告する。

計算機の高性能化に伴い、イメージングシステムの機能および性能を光学系と計算機で分担する設計思想が、有効に機能するようになってきた。例えば、光学系の解像力を見かけ上犠牲にして被写界深度を稼ぎ、撮影後に計算機により解像力を回復するような方法である。副作用もあるため万能ではないが、可能性を秘めた方法であり、研究が盛んに進められている。

プロジェクションマッピングは、エンターテインメントとして建築物に適用される例を多く目にするようになった。この技術は、製品開発現場におけるプロトタイピングにも即効性がある。3Dプリンターの普及により、開発の早い段階から製品イメージをつかみ、練ることが可能になっている。近年デザインは製品の重要なファクターになっているが、プロジェクションマッピングにより、3Dプリンターにより製造した現実の物体上にさまざまな質感を与え、トライアンドエラーによる効率的な製品開発が可能になりつつある。実物へのプロジェクションは、3Dディスプレイでは表現できないリアルな質感再現が魅力である。

スペクトル推定は、画像計測における色再現や、物質濃度計測に不可欠である。複数の異なる光源が存在する複雑な環境における色再現や、果実や生体のRGB画像からの物質濃度推定が試みられている。画像処理を高速化するハードウェアプラットフォームとして、GPU (graphic process unit) は広く普及し、高速処理の重要なツールとなった。開発環境であるCUDA (compute unified device architecture) も2012年10月にバージョン5.0がリリースされ、プラットフォームとしての完成度と安定性も高まっている。

11.2 コンピューショナルセンシング

拡張被写界深度技術のひとつである波面符号化法では、従来の三次位相板に代えて、円対称位相板の利用が検討されている¹⁾。円対称位相関数を6次の項までもツェルニケ多項式により表し、MTF (modulation transfer function) がより高い周波数成分を含み得る評価関数を定義し、シミュレーテッドアニーリング法により最適化を行っている。その結果、回折限界に対応する空間周波数成分までゼロにならないMTFを得ている。被写界深度拡張効果は従来法に劣るが、偽解像の少ない鮮明な画像を得ている。

重畳により点像分布関数を均一化し、デコンボリューションフィルターにより拡張被写界深度を実現する方法も提案されている^{2,3)}。重畳には、ピントシフトまたは正立結像光学系アレイが用いられており、実験またはシミュレーションにより効果が確認されている。点像分布の均一化により、デコンボリューション後にレンズの収差も除去されることが特徴である。

圧縮センシングは、画像のスパース性を利用することで、少ない観測データからオリジナルのデータを再構成する技術であり、注目を集めている。通常、観測データは元データがまったくわからないぐらい圧縮されているため、観測系のシステム行列を知っていなければ元データを復元できない。そこで、システム行列を鍵とし、圧縮されたデータを変更・取り消し可能な登録情報として利用する指静脈認証システムが提案され、シミュレーションによりその有効性が確認されている⁴⁾。観測データをセンサーで取得した時点で、すでに生体情報が秘匿化されている点が大きな魅力である。

これらの方法の共通の課題として、原信号推定時に発生するアーティファクトがある。真の信号とアーティファクトの識別はきわめて困難であるため、偽解像がさほど問題にならない応用から実用化されると思われる。

11.3 プロジェクションマッピング

プロジェクションマッピングでは、プロジェクターのキャリブレーションと投影画像の歪補正が不可欠である。静止した立体物だけでなく、動体にも投影することで、より迫力のあるプロジェクションが可能となる。文献⁵⁾では動体への投影を目的とし、被写体の移動速度に対するグレイコード投影法と点群パターン投影法の優劣を評価している。ある一定速度以下ではグレイコードが、それ以上では点群パターンが有利であり、物体の移動速度によって形状計測方法を切り替える必要性が示唆されている。

11.4 スペクトル推定

忠実な色再現を目指し、2種類の照明光源が混合した複

雑な環境におけるスペクトル推定法が提案されている⁶⁾。カメラ直前で測定した36方向のスペクトルと、白色板を3バンドまたは6バンドカメラにより測定して得た信号値から、重回帰分析またはウィナー推定により、照明スペクトルを良好に推定している。また、画像の色再現は3バンドよりも6バンドで高い色再現性が得られることを明らかにしている。

RGB画像から物質濃度を推定する応用研究も進んでいる。トマトの品種開発において、変異体トマトの機能性色素量を、長期的に非破壊でモニタリングすることを目的とし、RGB画像からウィナー推定法により推定した分光反射率画像に対して重回帰分析を行い、機能性色素量を推定している⁷⁾。一部、粉碎後の計測結果と一致していないようだが、おおむね良好な結果が得られている。また、RGB画像から皮膚内部の腫瘍な色素蛋白であるメラニン、酸化ヘモグロビン、還元ヘモグロビン濃度を推定し、容積脈波^{8,9)}を得ている。

11.5 その他

生体組織における光散乱は、多くの場合モンテカルロシミュレーションにより解析されるが、正確な内部散乱を解析するためには、より多くの光子を入力する必要がある、膨大な時間を要する。そこで、安価な超並列計算機であるGPUによる実装が提案されている¹⁰⁾。モンテカルロ法をGPUに適した形で並列化するために、スレッド番号を初期値として用い、GPUで乱数を発生することが試みられている。また、モンテカルロ法は条件分岐を多用しているが、これはGPUの処理速度を低下させる。そこで、光子の終了条件によらず、一定の回数ごとにCPUに処理を戻すことで分岐を減らしている。その結果、従来手法とほぼ同等の精度で並列化を実現している。

画像認識も画像処理の重要なテーマである。文献¹¹⁾では、分布間の距離尺度を表すEarth Mover's Distance (EMD)を用いて、肝癌の非病変部と肝転移部分の類似度を評価し、サポートベクターマシーン (SVM) により識別している。

11.6 展 望

画像処理は、光学系から取得した光情報から有益な画像情報を得るためにさまざまな状況で利用され、良否を別にすれば何らかの結果が得られる。しかし最も重要なことは、いかなる環境や条件で得たデータであっても、破綻せず、安定した結果を出力することであろう。これが、その画像処理を使った技術が実用化されるかどうかの分かれ目といえる。今後も新しい画像処理手法や、光学と画像処理を融合した方法が提案・実証され続けていくだろうが、こ

の点に注目して技術を追っていきたい。

文 献

- 1) 白井彬寿他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-13.
- 2) 中村知哉他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-14.
- 3) 中村知哉他：OPJ (2012) 24aD8.
- 4) 鈴木裕之他：第6回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会予稿集 (2012) p. 71.
- 5) 石井慎太郎他：春季応物講演会 (2012) 16a-B10-3.
- 6) 野村 仁他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-18.
- 7) 大江真太郎他：OPJ (2012) 25pP6.
- 8) 富山善之他：OPJ (2012) 25pA7.
- 9) 松田諒平他：OPJ (2012) 25pA6.
- 10) 豊田彩織他：春季応物講演会 (2012) 16a-B10-1.
- 11) 清水博亮他：春季応物講演会 (2012) 16p-B10-8.

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

大阪大 村田博司

12.1 概 要

オプトエレクトロニクス (フォトニクス) および光通信に関わるデバイスの研究においては、高速化、集積化、低消費電力化を志向した高性能デバイスや関連技術の報告が多くみられた。2012年の特筆すべき研究成果としては、複数の多重化伝送技術を巧みに組み合わせることにより1本の光ファイバーのみで1 Pb/sを超える伝送実験に成功した報告¹⁾が挙げられる。光通信はペタビットの時代に突入したといえる。さらに、エクサビット伝送へ向けて関連デバイスの研究が加速していくものと思われる。また、シリコンフォトニクス関係の光制御デバイスの進歩にも目覚ましいものがあり、40 Gb/s級の小型シリコン光変調器²⁻⁴⁾も報告されるようになってきた。

光源としての半導体レーザーの研究についてはすでに詳しく解説されているので、本稿では、レーザー以外のデバイスを中心に2012年の進展について述べる。

12.2 光変調器・光スイッチ

光ベクトル変調器は、高速光通信システムにおけるキーデバイスであり、さらなる高密度光ベクトル変調のために、LiNbO₃光変調器とPLC (planar lightwave circuit) とを集積させた多重マッハ・ツェンダー型高機能光ベクトル変調器⁵⁾の研究が進められている。光通信用半導体レーザーとのモノリシック集積が可能なInP高速光変調器も、信頼性評価や性能向上へ向けた取り組みが報告^{6,7)}されている。

シリコンフォトニクスにおけるキーデバイスであるシリコン光変調器の研究では、急速に小型化・高性能化が進んでいる²⁾。p-n接合を用いたマッハ・ツェンダー導波路型光変調器では、50 Gb/sを超える応答^{3,4)}が報告されてい

る。また、フォトニック結晶構造における遅波特性をうまく利用することにより、100 μmの相互作用長で動作する10 Gb/s マッハ・ツェンダー導波路型Si光変調器⁸⁾も報告されている。シリコンベース高速光位相変調器⁹⁾の報告もあった。今後の動向が注目される。

InPを用いた8×8ノンブロッキング光スイッチ¹⁰⁾も報告された。光ファイバー通信における波長帯Cバンド (1530~1565 nm) 全体にわたって40 Gb/s (10 Gb/s×4ch) 信号のエラーフリー伝送が報告されている。光インターコネクションへの応用が期待される。

12.3 光検出器

光検出器の研究に関しても、シリコンフォトニクス関係の報告が目立っていた。光DQPSK (differential quadrature phase shift keying) 信号復調のための可変遅延干渉計とゲルマニウム光検出器を集積した高速DQPSKレーザー回路¹¹⁾が報告され、10 Gb/s程度までの動作が実証された。また、20 Gb/s級の動作が可能なシリコンベースゲルマニウム高速光検出器¹²⁾の報告もあった。さらなる高速化と高効率化、集積化が期待される。

12.4 非線形光学デバイス

通常のエルビウムドープ光ファイバー増幅器 (EDFA) や半導体光増幅器 (SOA) では、増幅特性は増幅される光の位相に依存しない。一方、非線形光学効果による多光子混合過程をうまく利用すると、励起コヒーレント光と信号光の位相関係によって増幅特性が変わるために、増幅される光の位相によって増幅度に変化する「位相感応光増幅特性」を得ることができる。これは、量子スクイーミング技術を光増幅技術に応用したものとも考えることもできる。周期分極反転構造をもつLiNbO₃非線形波長変換デバイスを用いた位相感応光増幅により、光ベクトル変調信号のI成分・Q成分の選択的増幅特性^{13,14)}が報告されている。全光中継・交換において非常に有効な技術と考えられ、今後の進展が期待される。

また、接着リッジ構造導波路と分極反転による擬似位相整合 (QPM) 技術を用いたLiNbO₃デバイスでは、非常に高い変換効率をもつ高性能光波長変換デバイス¹⁵⁾が報告された。波長多重信号のスイッチングや、量子光学への応用が期待される。

12.5 光導波路型モード変換デバイス

光導波路をベースとするモード変換デバイス、アイソレーター、フィルターに関しては、近年の性能向上に目覚ましいものがある。シリコンリッジ導波路にトレンチを設けた構造のTE-TMモード変換デバイスが報告された。変換効率97%で過剰損失0.8 dBという良好な特性を示すも

の¹⁶⁾で、シリコンフォトニクスにおいて有効な素子となる可能性がある。

シリコン細線導波路においては、その強い光閉じ込め効果のために、他の光導波路や光ファイバーとの接続にはスポットサイズ変換器が必要となるが、低損失スポットサイズ変換器を CMOS (complementary metal oxide semiconductor) プロセスで作製した報告¹⁷⁾があった。導波モードの共鳴効果を巧みに用いた新しいタイプの狭帯域フィルタ¹⁸⁾の動作実証実験も報告された。

LiNbO₃関係では、SiO₂基板上に LiNbO₃ 薄膜を形成した LNOI (LiNbO₃ on insulator) とよばれる構造を利用した導波型光デバイス¹⁹⁾が提案されている。良好な特性をもつ偏光素子の設計が報告されており、新しいタイプの光機能素子となる可能性がある。

12.6 ポリマーデバイス

近年の有機材料のエレクトロニクス分野への普及とともに、プラスチックファイバーやポリマーベースの光デバイスの研究報告も増加しているように思われる。グレーデッド型プラスチックファイバーを用いた 40 Gb/s (4×10 Gb/s) 級の信号伝送実験²⁰⁾が報告されている。

また、射出技術を巧みに利用したユニークな導波路作製の報告²¹⁾や、新しい電気光学ポリマーの作製、電気光学変調器、スイッチへの報告^{22,23)}も目に付いた。今後は、温度安定性や信頼性がポイントになるものと思われる。

12.7 光情報伝送

すでに述べたように、12 個のコアをもつマルチコアファイバーを用いて、1 Pb/s もの超大容量伝送 (世界最高記録) が実現された¹⁾。この報告では、32 QAM (quadrature amplitude modulation) 多値ベクトル変調方式と偏光変調方式を組み合わせて生成された 456 Gb/s 信号を 222 個の波長ごとに用意することで、約 100 Tb/s の大容量信号を生成し、さらに、マルチコアファイバーの 12 個のコアごとに 100 Tb/s 信号を伝送することで 1 Pb/s 超大容量伝送を実現している。単位周波数あたりの情報量伝送は 91.4 b/s/Hz の高密度に達しており、マルチコア技術だけでなく完成度の高い高精度高密度光ベクトル変調技術も記録達成のポイントといえる。

また、マルチコアファイバーのさらなる高密度化の検討やマルチモードファイバーの利用、クロストーク等についての詳細な検討^{24,25)}やモード合分波器²⁶⁾などの関連技術の報告も増加している。今後の展開が楽しみである。

12.8 超高速光信号処理 / マイクロ波・ミリ波フォトニクス

次世代の超高速フォトニックネットワークや超高速デジタル信号処理システムにおいては、高速光 A/D (analog-to-digital) 変換技術が鍵を握る可能性がある。光ファイバーの非線形光学特性を巧みに利用することにより、10 GS/s の 5 bit 実時間光 A/D 変換技術²⁷⁾が報告されている。さらなる高分解能化の取り組み²⁸⁾も続けられており、今後の動向に注目したい。

マイクロ波・ミリ波フォトニクス関係では、高速無線通信と光通信の融合領域の研究が精力的に進められている。災害時の光ファイバー断線時の無線通信によるバックアップや大人数が無線にアクセスする状況下での通信回線確保を可能とする技術²⁹⁾が報告されている。災害に強い通信システム構築に有効と考えられる。また、無線信号受信用アンテナと光変調器とを集積させた無線-光信号変換デバイス^{30,31)}の研究の報告もあった。フォトニクス技術を巧みに用いることにより、20 Gb/s 超テラヘルツ帯無線伝送³²⁾も実現されている。今後は、光技術と無線技術の親和性を生かした研究が活発化すると思われる。

12.9 展 望

光ファイバー通信の研究において培われた高速光制御デバイス技術は、光インターコネクションや、光ファイバー無線等のマイクロ波・ミリ波フォトニクスへの応用が着実に実を結んできている。今後は、光通信関係以外の分野への水平展開がさらに進むことが予想される。

文 献

- 1) H. Takara *et al.*: ECOC (2012) Post deadline paper Th3.C.1.
- 2) 白杵達哉: 信学会ソサイエティ大会 (2012) CI-5-5.
- 3) D. J. Thompson *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **24** (2012) 234.
- 4) 秋山 傑他: 秋季応物講演会 (2012) 13a-C5-3.
- 5) 都築 健他: 信学会ソサイエティ大会 (2012) CI-5-3.
- 6) H. Mawatari *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **24** (2012) 1450.
- 7) 八坂 洋: 信学会ソサイエティ大会 (2012) CI-5-1.
- 8) ホン・グエン他: 秋季応物講演会 (2012) 13a-C5-1.
- 9) 五井一宏他: 信学会ソサイエティ大会 (2012) C-3-50.
- 10) M.-J. Kwack *et al.*: ECOC (2012) Post deadline paper Th.3. B.3.
- 11) 鈴木恵治郎他: 春季応物講演会 (2012) 18a-F4-9.
- 12) 開 達郎他: 秋季応物講演会 (2012) 13a-C5-10.
- 13) 遊部雅生他: 春季応物講演会 (2012) 16p-F4-1.
- 14) 梅木毅他: 秋季応物講演会 (2012) 12a-PA3-2.
- 15) 村中勇介他: 秋季応物講演会 (2012) 12p-C5-1.
- 16) K. Nakayama *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **24** (2012) 1310.
- 17) 武井亮平他: 秋季応物講演会 (2012) 12p-C5-14.

¹ 12 章「オプトエレクトロニクス・光デバイス」のうち、光通信以外のデバイスについては、今年度は編集の都合により掲載できませんでした。ご了承ください。(「光学」編集委員会)

- 18) 井上純一他：信学会ソサイエティ大会 (2012) C-3-13.
- 19) 齋藤英美他：信学会ソサイエティ大会 (2012) C-3-28.
- 20) N. Schleppe *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **24** (2012) 1670.
- 21) 相馬一友他：信学技報, **112** (2012) no. 259, OPE2012-126, 177.
- 22) 榎波康文他：信学会ソサイエティ大会 (2012) CI-5-4.
- 23) 大友 明他：秋季応物講演会 (2012) 12p-C5-8.
- 24) 國分泰雄：春季応物講演会 (2012) 17a-F3-1.
- 25) K. Saitoh *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **24** (2012) 1898.
- 26) 半澤信智他：信学会ソサイエティ大会 (2012) C-3-85.
- 27) T. Satoh *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **24** (2012) 830.
- 28) 佐藤豪真他：信学会ソサイエティ大会 (2012) B-10-91.
- 29) A. Kanno *et al.*: IEEE Photonics Journal, **4** (2012) 2196.
- 30) 高武直弘他：信学会ソサイエティ大会 (2012) C-14-12.
- 31) Y. N. Wijayanto *et al.* : 秋季応物講演会 (2012) 13p-G1-9.
- 32) 荒川和輝他：信学会総合大会 (2012) C-14-7.

13. 光 通 信

NTT 米永一茂

13.1 概 要

本章では、光通信分野の2つの大きな国際会議 (OFC/NFOEC 2012, ECOC 2012) の内容を中心に、2012年の研究動向について述べる。この2つの国際会議についての報告は、電子情報通信学会・光通信システム研究会 (5月, 11月) の予稿に詳細に記述されている¹⁻⁶⁾。本章 13.2 節では、高速・大容量光伝送システム、13.3 節では空間多重光伝送、13.4 節では、光帯域の効率的運用などを旨とする光ノード・ネットワークングについて述べる。

近年、デジタルコヒーレント伝送技術の登場により光通信技術は大きなパラダイムシフトの途上にあり、デジタルコヒーレント技術を用いた1波長あたり100 Gbpsのシステムが実用化フェーズを迎えている。一方、研究の最前線では、1年前に100 Tbpsを超えたシングルコアファイバーによる伝送容量のトップデータが更新され、マルチコアファイバーを用いた空間多重伝送ではファイバーあたりの伝送容量が初めて1 Pbpsに到達した。また、光ノード・ネットワークングでは、柔軟に効率的にネットワーク資源を活用できるエラスティック光ネットワークとよばれる分野が急速な進展をみせている。

13.2 高速・大容量光伝送システム

2012年は、デジタルコヒーレント技術を駆使したシングルコアファイバーによる大容量化技術および大容量・長距離化技術の研究が着実に進展し、伝送容量と伝送容量距離積のトップデータがそれぞれ更新された。

シングルコアファイバーでの大容量伝送では、2011年のOFC/NFOECのポストデッドラインペーパーで初めて100 Tbpsを超える101.7 Tbpsの伝送実験が報告された

が⁷⁾、2012年のOFC/NFOECのポストデッドラインペーパーでトップデータが1年ぶりに102.3 Tbpsに塗り替えられた⁸⁾。同時に、伝送距離も165 kmから240 kmへ約1.5倍に延伸されている。全ラマン増幅とデジタルパイロットトーンを伴う単一キャリア周波数分割多重の偏波多重64QAM (quadrature-amplitude modulation) を採用していることが特徴である。

大容量・長距離伝送では、2011年のOFC/NFOECのポストデッドラインペーパーで報告された伝送容量距離積のトップデータ141 Pbps・km⁹⁾を大幅に更新する203 Pbps・kmの伝送実験が報告された¹⁰⁾。数千km級の長距離伝送実験では、これまで偏波多重QPSK (quadrature phase shift keying) を用いるものがほとんどであったが、今回は偏波多重16QAMを採用して周波数利用効率を向上させた。多値度の向上による伝送特性の劣化に対しては、単一パリティチェック (SPC: single parity check) 符号、低密度パリティチェック (LDPC: low density parity check) 符号、およびMAP (maximum a posteriori) 受信を組み合わせることで長距離伝送を可能にした点が注目される^{10,11)}。

一方、実用化フェーズにある100 Gbpsシステム関連では、デジタル信号処理LSIによるリアルタイムトランシーバーのデモンストレーションがいくつか報告されている。商用ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexer) システムでのフィールド実験では、40 Gbps信号との混在で100 Gbpsの偏波多重QPSK信号を3760 km伝送することに成功している¹²⁾。また、異なるベンダーの100 Gbpsリアルタイムトランシーバーの相互接続実験¹³⁾が報告されるなど、実用化を見据えた着実な進展がみられる。

ポスト100 Gbps関連では、32QAMと64QAMを組み合わせたハイブリッドQAM伝送^{14,15)}や1 Tbpsを超えるスーパーチャネル伝送^{16,17)}といった技術が注目される。また、伝送劣化の補償技術では、非線形光学効果をデジタル信号処理回路で補償する非線形補償技術が着実に進展をみせている。波長分散と偏波モード分散 (PMD) がデジタル信号処理回路によりほぼ克服されたため非線形光学効果の補償に注目が集まっており、光ファイバーに高出力の光を入射することによる信号対雑音比の改善効果が期待される。しかし、非線形補償は複雑な演算を必要とするため、実用的な回路規模で実現するための工夫が不可欠であり、少ない回路規模で非線形補償を実現する方式がいくつか報告されている^{18,19)}。

13.3 空間多重光伝送

マルチコアファイバーやマルチモードファイバーを用い

た空間多重伝送は数年前から目立ち始め、現在急速な盛り上がりを見せている分野である。シングルモードファイバーの伝送容量限界が見え始めたと考えられる研究者が増えており、その限界を打破する技術として注目を集めている。2011年に7コアファイバーを用いた1ファイバーあたり109 Tbps²⁰⁾ および112 Tbps²¹⁾ の伝送実験が相次いで報告されたが、2012年3月のOFC/NFOEC 2012のポストデッドラインペーパーでは、19コアファイバーを用いた305 Tbpsの伝送実験²²⁾ が報告され、トップデータが更新された。さらに半年後の2012年9月のECOC 2012のポストデッドラインペーパーでは、12コアファイバーを用いた伝送実験で一気に1.01 Pbpsまで到達した²³⁾。マルチコアファイバーによる大容量・長距離伝送では、7コアファイバーを用いて1コアあたり40チャンネル×128 Gbpsの偏波多重QPSK信号を6160 km伝送した実験が報告されている²⁴⁾。マルチコアのエルビウム添加光ファイバー増幅器(EDFA)を用いた初めての実験であり、ファイバーあたりの容量距離積は177 Pbps・kmを記録している。これらの実験はほとんど日本の研究機関からの報告であり、これまでのところマルチコアファイバーとそれを用いた大容量伝送は日本が先行している。

一方、マルチモードファイバーによるモード多重伝送では、海外勢の健闘が目立つ。空間多重伝送に使われるマルチモードファイバーは、マルチモードといってもLANなどに使われている一般的なマルチモードファイバーではなく、ヒューモードファイバーとよばれる数モードをサポートする特殊なファイバーとMIMO (multi-input multi-output) 信号処理を組み合わせたものが主である。

代表的な例をいくつか紹介する。偏波と空間を合わせた6モードでの40 Gbps QPSK信号の1200 km伝送実験では、6×6のMIMO信号処理を用いて6つのモードを分離している²⁵⁾。また、3モードファイバーによる73.7 Tbps (3モード×96チャンネル×256 Gbps) という大容量伝送実験も報告されている²⁶⁾。伝送距離は119 km (84 km+35 km)でマルチモードEDFAを用いて光増幅中継伝送をしているところが注目される。また、強結合マルチコアファイバーを使用してMIMO信号処理で分離する伝送実験²⁷⁾ や、光集積デバイスを用いた全光MIMO処理によるモード分離実験²⁸⁾ なども報告されている。

13.4 光ノード・ネットワーク

光ノード・ネットワークでは、エラスティック光ネットワークとよばれる分野が大きな進展をみせている。エラスティック光ネットワークでは、従来は固定的に運用されていた周波数間隔/ビットレート/帯域幅などを、ト

ラフィックや伝送路の物理的条件などに応じて弾力的に運用できる仕組みを導入し、ネットワーク資源を柔軟に効率的に活用することを狙っている。スペクトル資源を12.5 GHzを基本単位として定義するフレキシブルグリッドの標準化はすでに完了しており、このフレキシブルグリッドを前提にさまざまな検討が進められている。

エラスティック光ネットワーク関連の注目すべき報告例をいくつか紹介する。そのひとつが、フレキシブルグリッド環境下におけるスペクトル資源の無瞬断(すなわち信号を一瞬たりとも途切れさせない)デフラグメンテーションのデモである²⁹⁾。このデモでは、受信機でリアルタイム動作のデジタル信号処理LSIを用いて、送信機と中継ノードの波長選択スイッチ(WSS)を連携制御して波長スweepさせることにより、瞬断を発生させることなしにデフラグメンテーションを実現している。デフラグメンテーションとは、細切れになった空きスペクトル資源を有効利用するために1か所に集めることである。そのほかには、仮想化エラスティック再生中継器(VER: virtualized elastic regenerator)を用いたトランスルーセント光ネットワークの提案とデモがある³⁰⁾。VERは、トラフィックの状況に応じて複数のエラスティック光パスの共通再生中継/周波数スロットの結合や分離/変調フォーマットの変換といった機能をもつ。このデモでは、128 Gbpsのリアルタイムトランシーバーを用いて、エラスティック光パスの共有と周波数スロットの結合を実現している。また別の報告では、空間・時間・周波数の領域でマルチ粒度のスイッチングが可能なエラスティック光ノードのデモがある³¹⁾。マルチコアファイバーを用いた空間多重も取り込んだ大規模な光スイッチングノードを構成して、最大6,000倍におよぶ粒度の異なる光パススイッチングの可能性を示している。また、エラスティック光ネットワークを実現するための要素技術として、LCOS (liquid crystal on silicon) デバイスによる帯域可変のN×MのWSSの提案とデモが報告されている³²⁾。WSSとしては、複数入力×複数出力は初めての報告であり、入出力フリーの5ポートでのデモを行っている。折り返し構成を採用することにより、1×Nとほぼ同程度のサイズで実現している。

13.5 今後の展望

高速・大容量・空間多重伝送関連では、伝送容量が大台(シングルコア:100 Tbps, 空間多重:1 Pbps)に到達したため、今後は長距離化の検討が進むことが期待される。光ノード・ネットワーク関連では、エラスティック光ネットワークの具体化に向けた進展が注目される。

文 献

- 1) 安部淳一：信学技報 (2012) OCS2012-2.
- 2) 大原拓也：信学技報 (2012) OCS2012-3.
- 3) 野田雅樹：信学技報 (2012) OCS2012-4.
- 4) 大石将之：信学技報 (2012) OCS2012-49.
- 5) 小田祥一朗：信学技報 (2012) OCS2012-50.
- 6) 古川英昭他：信学技報 (2012) OCS2012-51.
- 7) D. Qian *et al.*: *OFC/NFOEC* (2011) PDPB7.
- 8) A. Sano *et al.*: *OFC/NFOEC* (2012) PDP5C.3.
- 9) J.-X. Cai *et al.*: *OFC/NFOEC* (2011) PDPB4.
- 10) M. Mazurczyk *et al.*: *ECOC* (2012) Th.3.C.2.
- 11) J.-X. Cai *et al.*: *ECOC* (2012) Mo.1.C.1.
- 12) G. Zhang *et al.*: *OFC/NFOEC* (2012) PDP5D.4.
- 13) M. Tomizawa: *OFC/NFOEC* (2012) NTh1I.1.
- 14) X. Zhou *et al.*: *OFC/NFOEC* (2012) PDP5C.6.
- 15) H. Takahashi *et al.*: *ECOC* (2012) Tu.4.C.4.
- 16) J. Yu *et al.*: *OFC/NFOEC* (2012) OM2A.4.
- 17) X. Liu *et al.*: *ECOC* (2012) Th.3.C.5.
- 18) E. Mateo *et al.*: *OFC/NFOEC* (2012) Oth3C.4.
- 19) L. Dou *et al.*: *Proc. ECOC* (2012) Th.1.D.3.
- 20) J. Sakaguchi *et al.*: *Proc. OFC/NFOEC* (2011) PDPB6.
- 21) B. Zhu *et al.*: *Opt. Exp.*, **19** (2011) 16665.
- 22) J. Sakaguchi *et al.*: *Proc. OFC/NFOEC* (2012) PDP5C.1.
- 23) H. Takara *et al.*: *Proc. ECOC* (2012) h.3.C.1.
- 24) H. Takahashi *et al.*: *Proc. ECOC* (2012) Th.3.C.3.
- 25) S. Randel *et al.*: *Proc. OFC/NFOEC* (2012) PDP5C.5.
- 26) V. A. J. M. Sleiffer *et al.*: *Proc. ECOC* (2012) Th.3.C.4.
- 27) R. Ryf *et al.*: *Proc. OFC/NFOEC* (2012) PDP5C.2.
- 28) N. K. Fontaine *et al.*: *Proc. OFC/NFOEC* (2012) PDP5B.1.
- 29) K. Sone *et al.*: *Proc. ECOC* (2012) Th.3.D.1.
- 30) M. Jinno *et al.*: *Proc. OFC/NFOEC* (2012) PDP5B.6.
- 31) N. Amaya *et al.*: *Proc. ECOC* (2012) Th.3.D.3.
- 32) N. K. Fontaine *et al.*: *Proc. OFC/NFOEC* (2012) PDP5B.2.

14. 光 記 録

福岡工大 片山龍一

14.1 概 要

2012年はCD (compact disc) が世の中に登場してから30周年に当たる節目の年であった。この間、光ディスクはDVD (digital versatile disc), BD (blu-ray disc) と容量を向上させながら発展を続け、光産業の成長に大きく貢献してきた。しかし、現在では記録装置の主役はハードディスク (HDD) であり、半導体メモリー (SSD) の台頭も著しい。これに対し、従来の光ディスクは技術面でも応用面でもBDで限界を迎えており、その限界を打破すべく各種の次世代光記録技術の研究開発が進められているものの、将来展望は決して明るくはない。

光記録関連の主要な成果発表の場としては、日本の応用物理学会が主催するISOM (International Symposium on Optical Memory) と米国のIEEE/Photonics Society, OSA, SPIEが共催するODS (Optical Data Storage Topical Meeting) が長らく双壁であったが、残念なことにODSは2012

年を最後に単独での開催を止めることとなった。

一方で明るい話題もあった。1つは、次世代光記録技術の有力候補であるホログラム記録において、以前からの目標であった1 Tbit/inch²の記録密度がついに実現されたことである¹⁾。もう1つは、米国において、ホログラム記録装置の製品化の一手手前まで漕ぎ着けながら2008年に資金難のため倒産したInPhase Technologies社の資産を引き継ぐ形で、Akonia Holographicsという会社が新たに誕生したことである²⁾。

2012年に開催された光記録関連の学会としては、国内では春秋の応物講演会およびOptics & Photonics Japan (OPJ) が挙げられる。また、国際会議では前述のISOM, ODSに加え、ホログラム記録関連の発表が多数行われたIWH (International Workshop on Holography and Related Technologies) が挙げられる。以下にこれらの学会を中心に2012年の光記録技術の進展を振り返る。

14.2 ホログラム記録

ホログラム記録は次世代光記録技術の中で最も学会発表の件数が多かった。トピックとして、前述のように1 Tbit/inch²の記録密度 (直径12cmのディスクで1TBの容量に相当) を実現したという報告があった¹⁾。信号光と参照光を同一の対物レンズに入射させるモノキュラーアーキテクチャーと称する方式を用いて角度多重記録を行っている。再生時の信号強度と散乱強度の比が角度によらず一定になるように記録時間を角度ごとに調整することにより、多重度を192に高めている。

システム関連では、再生時の参照光の波面補正とGPU (graphics processing unit) による信号処理を組み合わせるHDTV (high definition television) の動画再生のデモを行ったという報告³⁾や、空間光変調器と撮像素子のピクセルミスマッチを解決する超解像再生⁴⁾、デフォーカス収差の高速な補正⁵⁾に関する報告があった。

高密度化に関しては、光通信で行われているような位相と振幅を組み合わせた多値記録が有効である。ファントム信号を用いて媒体の温度変化の影響を抑制する方式により、38値QAM (quadrature amplitude modulation) 信号の記録再生のシミュレーションを行ったという報告があった⁶⁾。また、参照光が不要な方式における四値の記録再生に関する報告もあった⁷⁾。

新しい方式として、コリニア方式におけるページデータの各画素に時系列信号を対応させ、通常の光ディスクと同様にRLL (run length limited) 符号を用いて記録再生を行う方式が提案されており⁸⁾、トラック間クロストークやチャンネル間クロストークの検討結果が報告された⁹⁾。

偏光感受性を有する記録材料を用い、偏光を利用した多重記録により高密度化を図る検討も進められており、偏光ホログラムと強度ホログラムの同時記録再生およびシフト多重記録¹⁰⁾、偏光多値記録のシミュレーション¹¹⁾などの報告があった。

記録材料関連では、高屈折率変調、高記録感度、低重合収縮、高熱安定性という要求を同時に満たす媒体として有望である、フォトポリマー中に無機ナノ微粒子を分散させた媒体に関し、実際にページデータのシフト多重記録を行った結果が報告された^{12,13)}。

海外では、前述した米国の Akonia Holographics 社から製品ロードマップに関する報告があった²⁾。以前に InPhase Technologies 社が試作した装置の仕様は容量 300 GB、データ転送速度 20 MB/s であったが、これをもとにした第二世代から第四世代までのロードマップを示した。容量は 1 TB → 3 TB → 6 TB、データ転送速度は 100 MB/s → 150 MB/s → 350 MB/s と世代ごとに向上している。各世代のキー技術はモノキュラーアーキテクチャー、ホモダイン検出、位相/振幅の多値記録となっている。それぞれの実現時期は顧客の要求に依存するとして明確にされていないが、同社の誕生をきっかけに、ホログラム記録の実用化に向けた研究開発が再び活発化することを期待したい。

14.3 ビット型記録

ビット型記録による大容量化には、薄型光ディスクを用いて体積あたりの容量を向上させる方式、BD の延長線上の多層記録、二光子吸収記録やマイクロホログラム記録などの体積型記録があり、それぞれに進展がみられた。

薄型光ディスクを用いる方式に関しては、アーカイブ応用を想定した HDTV 信号の記録再生システムの報告があった¹⁴⁾。厚さ 0.1 mm のディスク 8 枚を 1 個のトレイ、トレイ 10 個を 1 個のカートリッジに収納する。カートリッジ 1 個あたりの容量は 2 TB である。記録再生は 1 個のトレイ中の 8 枚のディスクを 8 台のドライブに展開して並列に行う。データ転送速度は非圧縮 HDTV 信号に相当する 1.3 Gbps である。また、薄型光ディスクと SIL (solid immersion lens) を組み合わせ、ディスク 1 枚あたりの容量 100 GB、データ転送速度 252 Mbps の条件で記録再生を行ったという報告もあった¹⁵⁾。薄型光ディスクは面振れが少ないため SIL との相性がよいことに着目している。

多層記録に関しては、媒体の作製を簡略化するため、記録層とは別にトラッキング用の溝を有するガイド層を設け、記録層には溝を形成しない構成の媒体が検討されており、16 層で容量 512 GB の媒体が実現されている。記録再生は青色ビーム、トラッキングは赤色ビームを用いて行

う。2つのビームの光軸がずれることによるトラックピッチの変動を抑制するためのスレッドサーボ方式¹⁶⁾、赤色ビームで再生可能なアドレス方式^{17,18)}などが提案された。

二光子吸収記録に関しては、二光子吸収材料から成る記録層と中間層を交互に積層した 20 層の媒体を、コーティングとラミネーティングの繰り返しにより簡便に作製したという報告があった¹⁹⁾。また、同じ記録層を有する単層の媒体に容量 25 GB の条件で記録再生を行ったという報告もあった²⁰⁾。フォトンモードではなくヒートモードでパンプを形成することにより、再生信号の品質を高めている。これらの組み合わせにより、ディスク 1 枚あたり片面で 500 GB (両面で 1 TB) の容量を実現できることになる。

マイクロホログラム記録に関しては、記録再生に用いるビームの空間モード (ラゲールガウスモード) を変化させ、媒体内の同一位置に複数のマイクロホログラムを多重記録するという新規な方式が提案された^{21,22)}。

14.4 その他

歴史上の文化遺産などの長期保存を目的とした、石英ガラスを媒体に用いた永久的なストレージに関する報告があった^{23,24)}。フェムト秒レーザーと空間光変調器を組み合わせ二次元のビットデータを同時に記録し、記録層を 4 層とすることで CD と同等の記録密度を実現している。永久的なストレージには、温湿度に対する安定性とドライブがなくても簡便に再生できることが求められる。前者に関しては、1000°C での加速試験の結果、3 億年以上の寿命を期待できるとのことである²³⁾。また、後者に関しては、光学顕微鏡と信号処理を組み合わせ誤りなく再生できることを実証している²⁴⁾。

基礎研究としては、プラズモニックナノロッドを媒体に用い、三次元の空間自由度と光の波長、偏光の自由度を組み合わせた多次元記録により高密度化を図る検討が進められている。連続光を用いて再生を行うため、光の偏光状態をプラズモン共鳴条件からずらすことにより媒体内での減衰を抑制する方式が提案された²⁵⁾。

光記録とは異なるが、近接場光を利用した熱アシスト磁気記録において、ロリポップ型の近接場トランスデューサーを用いた記録ヘッドにより 1 Tbit/inch² の記録密度を実現したという報告があったことも付記しておきたい²⁶⁾。

14.5 展 望

ISOM '12 では光ディスクのアーカイブ应用に関するスペシャルセッションが設けられ、データの長期保存に向けた課題と戦略²⁷⁾、BD をベースとしたクラウド時代のアーカイブのコンセプト²⁸⁾、医療用データストレージと光ディスクの応用²⁹⁾、光ディスクの信頼性に関する標準化

の動向³⁰⁾、光ディスクを用いたアーカイブの市場拡大に向けた提案³¹⁾について報告が行われた。近未来におけるデータセンターでの情報量の爆発的な増加に対応するには、アクセス頻度の低いデータをいかにアーカイブするかが重要である。光ディスクは他の記録装置に比べて信頼性、環境負荷、コストの面で優位に立っており、データセンターでのアーカイブ用の記録装置として大きな可能性を秘めている。当面はこの分野で戦略的な市場参入を進めつつ、さらなる市場開拓に向けて次世代光記録技術の研究開発を着実に進展させることが望まれる。

文 献

- 1) M. Hosaka *et al.*: *ISOM* (2012) Mo-B-02.
- 2) K. Anderson *et al.*: *IWH* (2012) 13B3.
- 3) N. Kinoshita *et al.*: *ISOM* (2012) Th-N-01.
- 4) N. Ishii *et al.*: *ISOM* (2012) Mo-B-03.
- 5) T. Muroi *et al.*: *ISOM* (2012) Mo-C-01.
- 6) K. Zukeran *et al.*: *ISOM* (2012) Th-L-06.
- 7) M. Takabayashi *et al.*: *ISOM* (2012) Mo-B-04.
- 8) T. Shimura *et al.*: *ODF* (2012) 3PD-08.
- 9) M. Kawasaki *et al.*: *IWH* (2012) 13A2.
- 10) T. Ochiai *et al.*: *IWH* (2012) 13A4.
- 11) Y. Matsushashi *et al.*: *IWH* (2012) P14.
- 12) 高山新吾他：春季応物講演会 (2012) 16a-F4-7.
- 13) 高山新吾他：*OPJ* (2012) 25pP15.
- 14) H. Tokumaru *et al.*: *ISOM* (2012) Th-L-02.
- 15) D. Koide *et al.*: *ISOM* (2012) Th-L-03.
- 16) H. Tanaka *et al.*: *ISOM* (2012) Th-M-02.
- 17) A. Ogawa *et al.*: *ISOM* (2012) Th-M-04.
- 18) T. Shiroto *et al.*: *ISOM* (2012) Th-PD-01.
- 19) T. Mikami *et al.*: *ISOM* (2012) Th-M-01.
- 20) T. Sasaki *et al.*: *ISOM* (2012) Th-M-03.
- 21) H. Mikami *et al.*: *ISOM* (2012) Th-L-04.
- 22) R. Katayama: *ISOM* (2012) Tu-I-24.
- 23) M. Shiozawa *et al.*: *ISOM* (2012) Mo-D-01.
- 24) T. Watanabe *et al.*: *ISOM* (2012) Mo-D-02.
- 25) J. W. M. Chon *et al.*: *ISOM* (2012) Th-L-01.
- 26) A. Q. Wu *et al.*: *TMRC* (2012) A1.
- 27) S. Ishihara *et al.*: *ISOM* (2012) We-K-01.
- 28) S. Murakami *et al.*: *ISOM* (2012) We-K-02.
- 29) Y. Okazaki *et al.*: *ISOM* (2012) We-K-03.
- 30) K. Yamashita: *ISOM* (2012) We-K-04.
- 31) I. Matsumoto: *ISOM* (2012) We-K-05.

15. 視 覚 光 学

豊橋技術科学大 永井岳大

15.1 概 要

視覚研究分野の役割のひとつとして、われわれの視覚経験の基礎となるメカニズムや特性を知り、人間を取り巻く視環境をより快適なものへ改善することが挙げられる。新しい照明装置や視覚情報呈示デバイスが次々と開発されていく中で、それらデバイスと人間の視覚の調和性評価は常に行っていくべき重要な研究課題となる。また、近年のコ

ンピュータグラフィックス技術の劇的な向上により、日常に近い視環境をディスプレイの中に容易に構築できる環境が整ってきた。2012年は、そのような新しい視覚情報呈示デバイスの評価や、日常に近い視環境における視覚特性評価に関する研究発表がますます増えてきたように思われる。本稿では、視覚情報呈示デバイスに対する視覚特性と、近年特に注目を浴びている質感認知特性に着目し、視覚分野の研究内容を概説する。

15.2 視覚情報呈示デバイス

われわれを取り巻く視環境は新しい照明デバイスの発展により大きく変わろうとしている。例えば、LED照明の本格的な普及や次世代照明として期待される有機EL照明の実用化が進んでいる。これらの照明は従来の照明光とは波長特性、発光特性、拡散特性などが大きく異なるため、その下では従来の白熱電球下や蛍光灯下とは異なる視覚体験が生じることが容易に想像される。そしてその影響は、色の見え、明るさ感、快適さ、作業効率などさまざまな項目に及ぶはずである。視覚研究領域では、さまざまな照明環境に対するヒトの見え・感覚の定量化が試みられている。例えば、波長特性が蛍光灯等と大きく異なる有機EL照明下での色の見え方¹⁾や、有機EL照明の特徴となる波長成分の角度依存性が視覚に与える影響²⁾などについて複数の報告があった。その中で、有機EL照明色下では、従来の蛍光灯下と色表に対する色の見え方が異なることが指摘されており¹⁾、有機EL照明の仕様策定において重要な基礎データとなることが期待される。また、近年青色照明がヒトに与える心理的・生理的な影響に注目が集まっているが、その効果に関する学術的な研究が十分認知されている状況ではない。2012年には照明学会の公開研究会「青色照明光の心理的・生理的効果」が開催され、青色照明光の生体へのさまざまな影響に関する報告があった。改めて、新しい視環境と生体の関係性に関する正確な情報を伝えることの重要性が確認された。

新しい照明環境のみならず、既存の照明環境の評価に関する報告も引き続き多くみられた。窓サイズが明るさ感に与える影響³⁾や照明環境が基礎的な視覚特性に与える影響⁴⁾についても報告がある一方で、オフィスでの昼寝に適した照明環境の検討⁵⁾、照明環境によるくつろぎ感への影響⁶⁾、節電時の照明印象⁷⁾、照度や色温度と作業効率の関係⁸⁾など、実環境の照明に対して重要な感性項目を直接評価した研究報告が多かった。これらの研究は、照明環境を目的に応じて改良していくプロセスにおいて非常に重要な役割を果たす。実際の照明環境における視覚・感性特性ならびにその原因の両面において理解が進みつつある状

況といえよう。

ここ数年、両眼視差を利用した立体呈示デバイスに注目が集まっている。立体映像の呈示方法にはさまざまな方式があり、その視認性や安全性・疲労の評価は立体映像呈示における大きな課題のひとつである。昨年から引き続き、立体映像が輻輳や調節、瞳孔径といった眼特性に与える影響に関する報告⁹⁾や立体映像観察時の主観的疲労と脳活動の関係を調べた報告¹⁰⁾、立映像観察時の調節と輻輳の矛盾による映像ばげ評価に関する報告¹¹⁾などがあった。例えば、立体映像視聴による疲労の一因は調節と輻輳の不一致であるといわれているが、電子ホログラム表示法や超多眼表示法ではこれらを軽減できることを示すデータが紹介された⁹⁾。また、この問題の注目度の高さを示すように、日本視覚学会 2012 年冬季大会では、「立体映像の知覚、視覚疲労とその医学的視点」というシンポジウムが開催され、立体知覚の基礎や視覚疲労の要因、生体への影響などさまざまな視点からの講演があった。立体映像呈示方式による疲労、臨場感等への影響がこれらの研究により明らかになることで、それぞれの方式の利点、欠点を定量的に示し、よりすぐれた立体映像提示方法の開発につながる事が期待される。

15.3 質感認知

視覚研究領域では、視覚刺激をシンプルにし、その刺激中ではなるべく単一の物理パラメーターのみが変化するような実験条件を設定することで、視覚の基礎特性を明らかにしてきた。一方、われわれの周辺の視環境は非常にリッチでさまざまな視覚情報を含んでいるため、実験室的なシンプルな刺激における知見のみから日常環境における視知覚、視覚認知を予想するのは困難である。例えば、物体が何であるか、物体がどういう状態かを知る際に、物体分光反射率の感覚としての現れである色は重要な手がかりとなる。しかし、その物体がつるつるしている、透明感がある、など、「質感」に依存した物体の同定や認知をわれわれは日常行っている。この質感認知の特性はわれわれの日常に密接する重要な視覚特性であるにもかかわらず、質感を生じる視覚刺激には複雑な光学要因が関与するため、従来のシンプルな刺激を用いた研究だけでは明らかにできない。

このような質感認知の重要性が認識されていくにつれ、近年少しずつ質感認知特性に関する研究報告が増えてきている。質感認知研究において比較的長い間行われている研究として、光沢感や透明感といった物理特性として捉えやすい質感属性に関する研究がある。本年も透明感知覚に関連する画像特徴¹²⁾やハイライトと三次元形状知覚との関

連¹³⁾についての報告があった。ここ数年の心理物理実験の結果により、ハイライトや拡散反射成分の画像特徴と質感認知の関係性に関する理解が進みつつある。さらに、心理物理実験のみならず、サルを用いた電気生理実験¹⁴⁾やfMRI 実験¹⁵⁾により、サルにも光沢に選択的に応答する細胞群があることや、その脳部位の同定など、生理学的にも質感認知を支えるメカニズムの解明が進んでいる。基礎研究にとどまらず、質感認知と画像特徴の対応関係に関する知見をコンピュータグラフィックス生成のアルゴリズムに採用している例も増えてきている¹⁶⁾。

質感を表現するための形容表現が無数に存在する(つるつるな、でこぼこの、固い、など)ことから、質感とは多種多様な物体表面に関する感覚の総称といえる。これらの無数の質感属性のうち、従来調べられていない質感属性を新たな研究対象とする試みも報告された。例えば、物体の粘性も質感属性のひとつと考えられるが、物体粘性を表す静止画像中の画像情報や動画中の運動情報に関する報告があった^{17,18)}。また、無数の質感属性が考えられる中で、それらの質感を同列に扱ってよいかどうか疑問が残る。そこで、それらの関係性を刺激呈示時間や被験者の応答時間などの時間特性から明らかにしようとする試みも報告されている¹⁹⁾。さらに、質感をひとつの視覚属性としてとらえた、質感と色等の基本視覚属性との相互作用に関する報告も増えてきている^{20,21)}。

上述した各々の視覚属性に関する研究を基礎とし、われわれの生活に密接する質感知覚特性を探ることは産業応用上も重要である。2012 年は、特に質感が重視される美術品・工芸品に対する人の評価特性を明らかにしようという試みが始まった年であった。このようなアプローチは質感を保ったまま美術品を画像として表現する際、保存すべき画像要因を知る上で非常に重要となる。また、美術品や工芸品には制作者や販売者といった専門家が存在するため、素人と専門家の質感認知特性の違いを探ることで、専門家が経験・学習により獲得したであろう質感判断に本質的に関わる画像情報を検討することもできる。具体的には、微妙な干渉色や光沢がその質感の特徴となる真珠²²⁾や、黒みや光沢が特徴である漆²³⁾の価値判断に関する研究が報告された。いずれの研究もまだ手探り状態であるものの、各物体の質感判断における刺激観察方法や質感判断と関連する画像特徴量など、質感認知に影響を及ぼすファクターは少しずつ明らかになっている。今後、実験手法が洗練されることにより、質感認知の一端が明らかになっていくことが大いに期待される。

15.4 展 望

有機 EL 照明のような照明装置や立体映像呈示装置など、視環境を支えるデバイスはどんどん進化しており、それに伴い非常にリッチな映像情報に触れる機会が増えている。そのような新デバイスや質感を有する刺激の見え方等に関する研究はここ数年で大幅に増えてきており、それらに対する視覚特性については理解が進んでいるように思われる。しかし、従来の視覚情報処理の基礎的知見と日常の見え方に関するギャップは埋まらないまま、解決すべき問題として残っている。視覚研究領域において、最先端デバイスに対する視覚特性の定量化と、それを支える基礎メカニズムの解明の両方を睨んだ研究展開が重要となってくるだろう。

文 献

- 1) 庄司雄平他：視覚学会夏季大会 (2012) 7o08.
- 2) 板山卓也他：視覚学会夏季大会 (2012) 7o09.
- 3) 丸山隆志他：OPJ (2012) 25aE5.
- 4) 菅野雅人他：視覚学会冬季大会 (2012) 1p10.
- 5) 山 元気他：視覚学会冬季大会 (2012) 2p15.
- 6) 奥谷晃久他：照明学会全国大会 (2012) 8-27.
- 7) 李 麗珍他：照明学会全国大会 (2012) 6-2.
- 8) 石井千恵子他：照明学会全国大会 (2012) 8-22.
- 9) 水科晴樹他：視覚学会夏季大会 (2012) 8p01.
- 10) 根岸一平他：視覚学会夏季大会 (2012) 8o02.
- 11) 上本啓太他：視覚学会冬季大会 (2012) 2o05.
- 12) 吉田和輝他：視覚学会冬季大会 (2012) 1p17.
- 13) 阿部哲也他：視覚学会冬季大会 (2012) 1p02.
- 14) A. Nishio *et al.*: *NeuroImage*, **63** (2012) 1321.
- 15) G. Okazawa *et al.*: *J. Neurosci.*, **32** (2012) 10780.
- 16) M. Hasegawa: *ICCE* (2012) T04-S02.
- 17) 河邊隆寛他：視覚学会冬季大会 (2012) 3o15.
- 18) 丸谷和史他：視覚学会冬季大会 (2012) 3o16.
- 19) 松島俊樹他：視覚学会夏季大会 (2012) 7o12.
- 20) 佐藤智治他：視覚学会夏季大会 (2012) 7p01.
- 21) 松本 剛他：視覚学会冬季大会 (2012) 3o06.
- 22) 谿 雄祐他：視覚学会冬季大会 (2012) p05.
- 23) 土井晶子他：視覚学会夏季大会 (2012) 8p8.

16. 光源・測光・照明

東芝ライテック 東 洋邦

16.1 概 要

東日本大震災による電力不足に伴い、節電対策への社会の関心はかつてないほど高まっている。市場では、消費電力を大幅に低減する対策として、業務用、家庭用分野を中心に発光ダイオード (LED) の製品が急速に普及しつつある。また、政府は、2012 年に閣議決定した日本再生戦略の中で、「公的設備・施設の LED 等高効率照明の導入率 100% 達成」の方針を示した。このような背景の中、2012 年は、高効率を実現する固体照明 (solid state lighting) の

代表格である LED 照明を中心とした技術開発が各分野で盛んに行われた。

16.2 光源・回路・照明器具

一般市場で 100 lm/W を超える製品が次々と投入される中、2012 年 4 月にドイツで開催された Light+Building にて、LED 照明エンジン用ソケットの業界規格「Zhaga」に準拠した製品が初登場した。LED 照明は急速に製品開発が進んでいるが、Zhaga 効果でさらにそのスピードが促進する可能性がある。また、LED 照明の製品機能を向上させるため、熱伝達を考慮した LED ライトエンジン¹⁾、白熱電球と同等に光束と光量に変化する調光ユニット²⁾、低光束出力の制御方式^{3,4)}、動作回路と発光効率^{5,6)}などの技術開発が行われた。

実験的な納入事例はあるものの、普及が足踏み状態であった有機 EL (OLED) 照明が、普及の兆しをみせ始めた。これまで OLED 照明は、おもにコストが高いため普及の兆しがみえなかった。しかし、スマートフォン向けや大型ディスプレイ向けに OLED が使用される可能性が出てきたことから低コスト化の見通しがつき、さらにそれに加えて光取り出し効率の向上、青色発光材料の改善、素子構造や製造方法などにより発光効率の向上に見通しがついたため、普及の可能性が出始めた⁷⁾。

そのほか蛍光ランプや HID (high intensity discharge) ランプなどの光源については、電極の予熱特性⁸⁾、音響共鳴を利用したアーク放電の安定化^{9,10)}などの検討がなされ、さらなる性能の向上が試みられた。

16.3 測 光

LED 照明などの固体照明を今より一層普及させるには、製品性能の信頼性の確保が必須であり、そのためには正しい性能表示、すなわち正しい性能評価が求められる。性能を正しく評価するためには、適切な測光技術が必要になるが、固体照明は、従来照明とは配光や分光分布が異なるため、従来の測光技術をそのまま適用できないことが多い。固体照明は世界的に注目されている低炭素社会への貢献が期待されていることから、その測光技術は国際的な課題として、国際照明委員会 (CIE) を中心に標準化活動が進められている¹¹⁾。国内でも標準化活動に関連した技術開発が LED 照明を中心に進められており、日本の分光拡散反射率標準 (国際標準にトレーサブルな標準白色板) の国際整合性¹²⁾、精密な全光束測定や全放射束測定を行うための不確かさに関する検討が行われた¹³⁻¹⁷⁾。また、ハイパワー LED 向けの基準となる LED の開発¹⁸⁾、積分球と積分半球との測定値比較¹⁹⁾などについても行われ、世界的に行われている測光技術開発の中で存在感のある開発が数多

くなされた。

そのほか、青色光傷害評価用の放射輝度測定における課題²⁰⁾、デジタルカメラで撮像した動画像から輝度を測定する方法²¹⁾など、輝度測定に関する検討が行われた。

16.4 照明設計・評価

オフィス、店舗、街路、道路など場面によって照明設計の考え方は異なるが、照明がLED照明に変わったとしても、その考え方は基本的には同じである。照明設計の基本的な考えはJIS規格に記述されているので、一般的なLED照明の設計は、JIS規格に準拠して行われる。しかし一方で、LEDは発光部の大きさや分光分布などが蛍光灯などの従来照明とは異なるので、これまでの研究知見から考えると、JIS規格などに記載されている従来の設計方法では、適切に照明設計ができないおそれがある。このような背景から、最近、LEDの特徴に影響を受けやすい照明要件である不快グレアや演色性について、従来の設計方法における適用範囲の整理^{22,23)}やLED照明にも対応した設計技術の開発²⁴⁻²⁶⁾が進められている。また、LED照明は従来照明よりも波長制御がしやすいことから、近年、明所視中心の照明だけでなく、良質な睡眠と覚醒を得るための照明²⁷⁾や、薄明視環境下での照明²⁸⁾に関する技術開発が行われている。

節電対策として最近再び注目を浴びているのが、タスク&アンビエント照明方式(TAL)である。TALとは、全般照明のみで環境を照らすのではなく、照明を作業用と全般用に機能分離することで消費電力を下げる照明方式のことである。TALはこれまでも注目されていたが、導入コストなどのさまざまな問題があり、普及には至らなかった。しかし昨今の電力事情やLED照明の普及があいまって、普及の兆しがみえ始めており、作業照明と全般照明のバランス²⁹⁾や作業照明の好ましい照度³⁰⁾、TALに適した光色の検討³¹⁾などが行われている。また、節電対策として注目を浴びているのが昼光利用である。昼光利用は制御が難しいため、照度や不快グレアなどの設計が難しくなるが、大きな省エネルギー効果が期待できるため、昼光を利用しても良い照明環境が確保される設計の検討が行われている^{32,33)}。

照明の波長や光色がヒトの心理生理に与える影響については、これまでも研究が行われてきたが、最近話題となっているのが「青色」をキーワードにした照明である。数年前から話題になっている青色防犯灯や、睡眠に影響があるホルモン(メラトニン)は短波長領域に抑制感度が高いという知見などに加え、現在主流のLED照明は青色LEDに黄色蛍光体を組み合わせて白色化していることから、最近

の照明は「青色」というキーワードが含まれる機会が多い。このような現状を踏まえ、照明学会は、「青色」をキーワードにした既往研究をまとめ³⁴⁾、さまざまな分野での「青色」に関する知見を整理した。

そのほか、東日本大震災後の節電状況の調査^{35,36)}や日中韓共同で行っている住宅照明の実態調査³⁷⁻³⁹⁾の報告などがなされた。

16.5 展 望

低炭素社会の実現に貢献するLED照明は急速に普及が進んでいる。しかし同時に、製品の価格競争が激化し、普及まもない時期にもかかわらず、製品のコモディティー化が起こり始めようとしている。ここ数年盛んに行われているLED照明の性能向上や性能評価に関する技術開発は、LED照明が普及するためには当然必要な開発であるが、技術を提供する側としては、照明の価値を高める技術開発も合わせて取り組まなければならない。コモディティー化の一因は、LED照明の市場は参入障壁が低く、製品の差別化が図りにくいためといわれているが、LED照明は真空管の技術を主とする従来の照明と比べさまざまな面で制御がしやすいため、今までできなかったことができるようになり、差別化を図るチャンスは大いにある。

差別化の鍵を握る技術は数多くあるが、その中で特に注目されているのが、照明ソフトとよばれる照明の使い方に関する技術である。照明は極端にいうと、使い方を考えなければ、光源を単純に設置するだけなので、コストや効率が重要視される。しかし、「雰囲気をよくしたい」などの使い方を考えると、コストや効率だけでなく、光源の配置や色なども重要視される。つまり照明は、使い方を考えれば、コストや効率以外の価値を見いだすことができる。照明の使い方に関する技術である照明ソフトは、差別化を図るコア技術のひとつとして大きな期待がよせられている。

LED照明などの固体照明は、相性のいい社会インフラ技術やIT技術との融合により、今後ますます普及が加速すると予想される。製品の普及が加速しても、市場の収益性を低下させないために、照明の付加価値を高める照明ソフトの技術開発がさらに進んでいくものと期待される。

文 献

- 1) T. Yasuda *et al.*: *LS13* (2012) 261.
- 2) 山本裕也他: 照明学会全国大会 (2012) 9-22.
- 3) 赤星 博他: 照明学会全国大会 (2012) 2-6.
- 4) 鳴尾誠浩他: 照明学会全国大会 (2012) 9-23.
- 5) T. Shi *et al.*: *LS13* (2012) 237.
- 6) 中村佑太他: 照明学会全国大会 (2012) 2-4.
- 7) 日経エレクトロニクス (2012) 10月29日号, 53.
- 8) W. Zhang *et al.*: *LS13* (2012) 91.

- 9) K. Stockwald *et al.*: *LS13* (2012) 133.
- 10) A. Hafidi *et al.*: *LS13* (2012) 141.
- 11) 蒔 洋司: 照明学会誌, **96** (2012) 337.
- 12) 蒔 洋司: 照明学会全国大会 (2012) 11-7.
- 13) 神門賢二: 照明学会全国大会 (2012) 11-6.
- 14) 長谷川和雄他: 照明学会全国大会 (2012) 11-11.
- 15) 森川宏之他: 照明学会全国大会 (2012) 11-9.
- 16) 岡村尚幸他: 照明学会全国大会 (2012) 11-10.
- 17) K. Niwa *et al.*: *CIE Lighting Quality and Energy Efficiency* (2012) p. 659.
- 18) K. Godo *et al.*: *CIE Lighting Quality and Energy Efficiency* (2012) p. 619.
- 19) K. Oshima *et al.*: *CIE Lighting Quality and Energy Efficiency* (2012) p. 663.
- 20) 竹下 秀: 照明学会全国大会 (2012) 11-15.
- 21) 鈴木広隆他: 照明学会全国大会 (2012) 11-12.
- 22) 古賀翔大他: 照明学会全国大会 (2012) 9-25.
- 23) 小林信治他: 照明学会全国大会 (2012) 9-29.
- 24) 東 洋邦他: 照明学会全国大会 (2012) 9-26.
- 25) 今井良枝他: 照明学会全国大会 (2012) 9-28.
- 26) H. Higashi *et al.*: *CIE Lighting Quality and Energy Efficiency* (2012) p. 706.
- 27) 岩田利枝: 照明学会誌, **96** (2012) 693.
- 28) 明石行生他: 照明学会誌, **96** (2012) 298.
- 29) 丸山 悠他: 照明学会全国大会 (2012) 5-4.
- 30) 大塚俊裕他: 照明学会全国大会 (2012) 5-18.
- 31) 中林沙耶他: 日本建築学会環境系論文集, **77** (2012) 633-640.
- 32) 小島義包他: 照明学会全国大会 (2012) 5-19.
- 33) 渡邊健一他: 照明学会全国大会 (2012) 5-21.
- 34) 照明学会: 「青色照明光の心理的・生理的効果に関する研究調査委員会」報告書 (2012) JIER-115.
- 35) 市原真希他: 照明学会全国大会 (2012) 6-7.
- 36) 伊藤大輔: 照明学会誌, **96** (2012) 214.
- 37) Y. Inoue *et al.*: *The 5th Lighting Conference of China, Japan and Korea* (2012) p. 51.
- 38) M. Miyamoto *et al.*: *The 5th Lighting Conference of China, Japan and Korea* (2012) p. 55.
- 39) M. Kunishima *et al.*: *The 5th Lighting Conference of China, Japan and Korea* (2012) p. 59.

17. 医学・生物応用光学

愛媛大 大嶋佑介

17.1 概 要

非破壊的に生体組織の形態や生体分子を計測できる光を用いた技術は、基礎医学・生物学研究や医療現場において幅広く用いられており、今やなくてはならない存在である。また多くの革新的な技術が日々生み出され、その実用化に名乗りを上げている。特に2012年は、山中伸弥教授がiPS細胞樹立の業績が称えられノーベル生理学・医学賞を受賞したことを受け、再生医療をはじめとして医学・生物学分野が脚光を浴びることとなった。研究の動向としては、基礎医学・生物学研究に役立つ新しいツールとしての二光子蛍光イメージング、ラマン散乱によるライブセルイメージングや超解像顕微鏡、生体組織の光散乱計測の技術開発やその応用の成果についての報告が相次いだ。また、

臨床診断や治療をターゲットとしている技術としては、光バイオプシー、光音響イメージング、CARS (coherent anti-storcks Raman scattering) イメージング、近赤外イメージングなどが着々と実用化への道を進めており、すでに臨床現場で用いられている PDT (photo dynamic therapy) やレーザー治療についても、症例報告や治療実績をさらに積み重ねている。昨年中に講演会や誌上で発表があった技術や成果のなかで重要と思われるものについて取り上げ、紹介していく。

17.2 二光子蛍光・超解像イメージング・光操作

超短パルス赤外レーザーを励起光源として、非線形光学過程である二光子励起蛍光を利用した分子イメージング技術は、脳科学研究分野に端を発して生体組織の深部イメージングに威力を発揮している。生活習慣病へのアプローチとして、生きたマウスで肥満脂肪組織のリモデリング過程をイメージングし、免疫細胞の関与が明らかになった¹⁾。また、レーザーアブレーションによる血栓形成モデルと組み合わせた解析についても報告があり²⁾、生活習慣病の予防や治療に役立つことが期待される成果であった。一方、測定原理に迫る研究成果としては、超広帯域フェムト秒パルスレーザーを用いたフーリエ変換非線形分光による蛍光たんぱく質の光褪色スペクトルを観測したという報告があった^{3,4)}。同研究グループでは、空間重なり変調非線形光学顕微鏡 (SPOMNOM) とよばれる、二波長励起時にそれぞれのパルスの空間的な重なりに変調を与えて、これをロックイン検出することで、空間分解能を高め、かつ背景光を抑えることに成功しており⁵⁾、これらの成果は蛍光タンパクの励起効率の向上と、二光子励起顕微鏡システムの性能向上に今後大きく貢献するであろう。また、超解像のアプローチとしては、二光子励起顕微鏡の光源にベクトルビームとよばれる空間的に特殊な偏光分布をもつビームによる微小スポットの形成⁶⁾や、電子線励起を利用することで光学顕微鏡の限界を超えた生体の超解像イメージング⁷⁾が実現しつつある。これらの顕微鏡をベースとしたイメージング技術と並行して、脳神経科学の分野では光操作による遺伝子発現の制御、いわゆるオプトジェネティクスが普及してきた。チャネルロドプシン-2 (ChR2) とよばれる光感受性イオンチャネルたんぱく質を神経細胞に発現させ、興奮刺激を与える手法が用いられるが、いかに効率よく ChR2 を目的の生物・細胞で効率よく発現させるかが、実用化の鍵を握っているという^{8,9)}。今後の遺伝子導入システムの発展に期待したい。

17.3 生体組織の光散乱・吸収・光音響計測

脳神経組織のバイアピリティや神経細胞の活動状態の

モニタリング手法として、光を照射したときの分光拡散反射計測および光伝搬モンテカルロシミュレーションによって組織酸素飽和度を推定することで、脳血流動態のモニタリングに応用できるという報告があった¹⁰⁾。ファントムを用いたシステム評価およびラット露出脳の計測から、刺激による血流量の変化をとらえることに成功している¹¹⁾。このような内因性光学信号の計測によって、脳組織の虚血・低酸素状態における機能回復の境界を判定する研究がなされている¹²⁾。脳組織の光散乱計測により、シトクロムcオキシターゼの酸化還元状態による光吸収変化をモニタリングし、ATP産生量の変化との相関が明らかとなった¹³⁾。脳組織バイアビリティの計測手法としての実用化が期待される成果である。また別の視点からは、パルスレーザーを光吸収媒質に照射したときに発生するレーザー誘起応力波（フォトメカニカル波）を利用した遺伝子導入に関して、システム開発や再生医療への応用の報告があった。システム開発に関しては、内視鏡やカテーテルを用いた遺伝子導入のための光プローブが製作されており、ファイバーで導かれたレーザー光が先端に装着された黒色ゴムに吸収され、フォトメカニカル波が発生する仕組みである¹⁴⁾。応用研究としては、脊髄損傷モデルに対する局所遺伝子導入による治療法の検討がなされている¹⁵⁾。このようなシステムによって、部位選択的に安全な遺伝子導入が可能となれば、遺伝子治療の実用化への道が開かれるであろう。また、パルスレーザーを生体組織中の光吸収体に照射したときに熱弾性過程により生じる音響波（光音響波）を利用した生体組織のイメージングに関する報告もあった¹⁶⁾。皮膚診断への応用としては、熱傷における受傷深度の計測や皮膚移植における生着モニタリングなど、臨床応用のためのシステム開発が進んでいる。また、光音響イメージング顕微鏡システムの開発も進んでおり、三次元培養細胞の計測による評価実験の結果についての報告もあり、分解能や深部到達性に関する議論がなされていた^{17,18)}。今後、臨床診断への応用が期待される技術のひとつである。

17.4 OCT・近赤外分光・ラマン分光分析

光コヒーレンストモグラフィ（OCT）は、生体組織中の光散乱体の断層画像を参照光との干渉信号を利用して得る手法である。システムに関しては、内視鏡型あるいはカテーテル型OCT用の光プローブの開発¹⁹⁾やフーリエドメイン（FD）-OCTの高速画像化処理技術の開発²⁰⁾などの報告があった。生体機能の可視化への応用研究としては、ドップラーOCTを利用して非侵襲的に眼底の血管造影を行うことに成功している²¹⁾。また、精神性発汗の動態解析を目的として、ヒト指汗腺の活動状態を定量的に評価す

る方法論についての報告^{22,23)}があり、OCTを用いた生体計測技術の有用性を改めて認識できた。近赤外分光による血管障害モニタリングへの応用を目指して、近赤外分光断層像の計測を定量的に行うシステムの開発²⁴⁾について報告があった。また、近赤外ハイパースペクトラルイメージングによる動脈硬化診断の試み²⁵⁾や、迅速がん診断のためのフーリエ変換赤外（FT-IR）分光顕微鏡に試料の鮮度を保持する機能とアレイ検出器を搭載したシステムの開発と応用に関する報告²⁶⁾もあった。赤外吸収やラマン散乱などは、分子固有の振動を反映した信号を含むため、ラベルや標識が不要な無染色イメージングに多く利用されている。大腸がんモデルマウスを用いて、がん組織のラマン散乱スペクトルを詳細に解析し、診断へ応用しようという試み²⁷⁾が報告されている。また、細胞レベルでの計測においては、皮膚培養細胞を用いた脂質酸化状態のモニタリング²⁸⁾、がん細胞・ES細胞の細胞周期や分化の過程を解析した研究成果²⁹⁻³¹⁾が報告されている。ラマンスペクトルの検出感度や解析法に課題が多く残されているが、がん診断やiPS細胞を用いた再生医療への貢献が期待される技術である。生体組織の線形ラマン散乱はきわめて弱いため、アルキンタグを用いた非常にユニークなラマン計測技術が開発された³²⁾。ラベルフリーではないが、タグが低分子量であるため、本来の分子機能への影響は少ないと考えられる。また、非線形ラマン効果を利用した技術としては、誘導ラマン散乱（SRS）と主成分分析を組み合わせた生体イメージング³³⁾により、非常に鮮明な画像を高速で得られていた。

17.5 PDT・レーザーアブレーション・レーザー治療

PDT（光線力学治療）は、腫瘍等に親和性のある光増感剤を投与したのち、可視光線を照射したときに生じる活性酸素種によって選択的に病巣を破壊する光治療法である。正常組織への侵襲性が低いため、悪性脳腫瘍の治療に対しては、神経機能の維持と腫瘍細胞の根絶の効果が期待される³⁴⁾。臨床研究によって得られた光増感剤の適応量やレーザー照射条件および治療成績のデータから、PDTの有効性や安全性を検討している。2012年11月に大阪で開催された日本レーザー医学会総会において、産・官・学がそれぞれの役割を再認識してレーザー医学研究、機器開発そして臨床現場での普及を促すシンポジウムが企画され、非常に活発な議論が交わされた。演題の中には、食道がん、胃がん、胆管がんに対するポルフィマーナトリウム（商標フォトフリン）、タラポルフィンナトリウム（商標レザフィリン）を用いたPDTの検討に関する報告や皮膚科・美容外科・泌尿器科・血管外科および歯科領域のさま

さまざまな疾患に対して臨床試験の報告³⁵⁾があった。基礎研究においては、疾患ごとの適切なレーザー治療のための分子振動領域の波長の検討について報告があり、臨床応用において非常に重要な知見であるといえよう。

17.6 展 望

レーザー医学、バイオメディカルフォトリニクスの分野における2012年の技術革新や研究成果を筆者なりに総括したが、生きたモデル動物を用いた*in vivo*計測、ありのままの状態での*in situ*計測をベースとした研究や要素技術が多数見受けられた。2013年は、これらの技術や研究成果により磨きがかかり、診断・治療・創薬に繋がる発見や実用化システムの出現が相次ぐことが期待される。また、このような研究を支え推進する医工連携、基礎と臨床を橋渡しするトランスレーショナルリサーチの概念と重要性が社会に受け入れられ、本研究分野がさらに活気づき医療の発展を通じて社会還元できることを祈念して、結びの言葉としたい。

文 献

- 1) 西村 智他：レーザー学会年次大会 (2012) I501aVI01.
- 2) 西村 智他：日本レーザー医学会総会 (2012) O1-1.
- 3) 高橋弘史他：レーザー学会年次大会 (2012) I501aVI04.
- 4) 戸田圭亮他：レーザー学会年次大会 (2012) I501aVI05.
- 5) 磯部圭佑他：レーザー学会年次大会 (2012) I130pIV08.
- 6) T. Nemoto *et al.*: 秋季応物講演会 (2012) 11p-G2-1.
- 7) Y. Nawa *et al.*: 秋季応物講演会 (2012) 12p-G2-10.
- 8) 松井 広他：バイオイメージングフォーラム (2012) 講演.
- 9) 松井 広他：O plus E, No. 396 (2012) 1085.
- 10) 西舘 泉他：レーザー研究, 40 (2012) 299.
- 11) 西舘 泉他：日本レーザー医学会総会 (2012) S3-2.
- 12) 川内聡子：レーザー研究, 40 (2012) 236.
- 13) S. Kawauchi *et al.*: 秋季応物講演会 (2012) 12p-G2-7.
- 14) 佐藤俊一他：レーザー学会年次大会 (2012) I431pVI04.
- 15) 安藤貴洋他：レーザー研究, 40 (2012) 259.
- 16) 佐藤俊一他：O plus E, No. 396 (2012) 1056.
- 17) 櫛引俊宏他：日本レーザー医学会総会 (2012) O8-3.
- 18) 石原美弥他：分生年会 (2012) 1W12I-2.
- 19) 菅原祥朗他：レーザー学会年次大会 (2012) I130pIV01.
- 20) 渡部裕輝他：レーザー学会年次大会 (2012) I130pIV02.
- 21) 安野嘉晃他：レーザー学会年次大会 (2012) I130pIV06.
- 22) 近江雅人他：レーザー学会年次大会 (2012) I130pIV03.
- 23) 近江雅人他：日本レーザー医学会総会 (2012) O8-5.
- 24) 石丸伊知郎：レーザー学会年次大会 (2012) I431pVI03.
- 25) 北藪晃子他：レーザー研究, 40 (2012) 305.
- 26) 三好憲雄他：分生年会 (2012) 2W4III.
- 27) 竹谷皓規他：レーザー学会年次大会 (2012) I431pVI02.
- 28) 前田裕衣他：レーザー学会年次大会 (2012) I801pVI09.
- 29) 小杉浩司他：レーザー学会年次大会 (2012) I801pVI08.
- 30) 橋本剛佑他：レーザー研究, 40 (2012) 280.
- 31) 大嶋佑介他：レーザー学会年次大会 (2012) I601aVI08.
- 32) 藤田克昌：日本レーザー医学会総会 (2012) S3-4.
- 33) Y. Ozeki *et al.*: 秋季応物講演会 (2012) 11a-G2-3.
- 34) 秋元治朗他：レーザー研究, 40 (2012) 269.
- 35) 石井克典他：日本レーザー医学会総会 (2012) 285.

18. 光 学 教 育

日本女子大 小川賀代

18.1 概 要

昨今の経済・社会の情勢において、産業構造、就業構造が変化し、若年者の高い失業率・早期離職率、若年無業者が深刻な問題となっている。この状況を改善するために、文部科学省は、2011年春から全国の大学、短大に、教育課程内外を通じて「社会的・職業的自立に取り組むための体制の整備 (キャリアガイダンス)」を義務付けた。これは社会的・職業的自立、社会・職業への円滑な移行を実現できる力を修得することを目的としており、これらを実現するのに必要な力の要素として、①基礎的・基本的な知識・技能、②基礎的・汎用的能力、③論理的思考力、創造力、④意欲・態度、⑤勤労観・職業観等の価値観、⑥専門的な知識・技能、が挙げられている。ここに挙げた力のほとんどは、文部科学省が提示している「学士力」や経済産業省が提示している「社会人基礎力」と重複している。よって、次世代を担う人材を育成する教育機関において、専門分野を問わず、上記の能力が備わった人材が求められているといえる。理科教育・光学教育に携わる者も、この流れを強く意識しており、近年、単なる理科教室だけでなく、上記のような力の育成を意識した取り組みも出てきた。また、大学の実験教育・専門教育においても同様で、「アクティブ・ラーニング」や「産学連携」をキーワードとして、社会で活躍できる人材育成を念頭においた取り組みが行われ、それらの報告が増加傾向にある。これまで、応用物理学会講演会の教育のセッションでは、教材研究の発表がほとんどであったが、2012年の春季は28件中9件、秋季は27件中13件がキャリア教育を念頭においた人材育成に関する発表であり、社会情勢を反映しているといえる。本稿では、これらの社会的・職業的自立、社会・職業への円滑な移行を実現できる力の修得を意識した人材育成を中心に、理科・光学教育の取り組みについて紹介する。

18.2 理科教室・イベントを通じた人材育成

近年の傾向として、大学生・大学院生が理科教室を企画、運営することによって、より子どもたちに対して科学啓発を活性化し、かつ学生自身も自主性や協調性を磨いたりしており、理科教室が、キャリアアップ教育の場、学んだ専門知識を活用する実地訓練の場として活用され、教育的効果を上げている^{1,2)}。2006年から始まった科学技術振興調整費「女性研究者支援モデル育成」(現在は科学技術人材育成費補助金「女性研究者研究活動支援事業」)の取

り組み内で、女子生徒の理科系への興味・関心を喚起するために、女子大生が中心となって理科教室を行う事例が随所で紹介されたこともあり、女子学生を中心とした取り組みの報告もみられた^{3,4)}。また、理科教室において工作したり、実験を行ったりするだけでなく、将来必ず必要となる「まとめる力」を子どものころから意識させ、養うことも目的とした科学教室⁵⁾の取り組みも報告されており、理科教室を通じた人材育成の取り組みが積極的に行われる傾向がみられた。

このように、イベントを立案、運営することを通して人材育成を図る取り組みは、理科教室にはとどまらない。光学の分野では、2011年6月11、12日にOSAとSPIEの学生チャプターのメンバーが中心となって1st JS-NetS (Japan SPIE Network of Students)を大阪大学で開催した⁶⁾。セミナー、グループディスカッション、学生のポスター発表等を通して、博士の現状や未来、研究者としての歩み方やスキルを学び、学生研究者間のネットワークを広げることができ、学生たちにとって、とても刺激のある2日間だったようである。引き続き2012年10月6~7日にJP-NetS 2012 Tokyoが東京大学で開催され⁷⁾、学生たちは、イベントの運営、参加を通して、専門知識を深めるだけでなく、コミュニケーション、プレゼンテーション能力を磨き、先生や学生間のディスカッションから自分の将来に対して深く考える機会となったようである。そのほかにも、情報フォトニクス研究グループの関東学生研究論文講演会は学生が中心となって年1回運営されている⁸⁾。

このような人材育成の流れを受け、応用物理学会は2012年春季応用物理学会講演会のインフォーマルミーティングにおいてStudent Chapterの設立に向けて議論の場が設けられ⁹⁾、2012年10月から順に全国で5拠点が発足した。専門分野が近い人との所属や世代を超えた交流を通じた人材育成は、今後も増えていくと予想される。

18.3 教材研究

当然ではあるが、これまでの啓発活動を主目的とした理科教室に対する重要性の認識に変わりはなく、むしろ理科教室の企画・運営を通じた人材育成は、従来の理科教室に付随して得られた効果である。理科教室の開催そのものに多くの効果を含むことが認識された現在、質の高い理科教室の実施が求められる。

2012年秋季応用物理学会講演会の際には、「FD 理科教室」と題し、15年間の実績があるリフレッシュ理科教室のノウハウを共有するために、これまで各支部で実施してきた教材・テーマを持ち寄った合同理科教室が行われた¹⁰⁾。これは、不況の影響を受けて学会からの資金援助や各種団

体からの寄付が漸減し、実習を担当している職場では人員削減が進む厳しい状況の中で、負担を軽減しながら理科教室を継続していくための模索のひとつとして、応用物理学会人材育成委員会が企画したものである。教材・テーマの共有の必要性は、教育に携わる者の中では共通の認識であり、雑誌「応用物理教育」(応用物理学会応用物理教育分科会発行)では、2012年よりシリーズとして演示実験教育用の装置の紹介を始めている¹¹⁻¹³⁾。また、2012年に報告された光学をテーマとした興味深い教材研究としては、出前授業などにも使用できる可搬型人工虹スクリーン¹⁴⁾、有機結晶の偏光特性を利用した教材¹⁵⁾、LEGOブロックを用いた簡易分光器¹⁶⁾などが挙げられ、前者2つは、実際に理科教室で活用しており、多くの人の関心を集めたと報告されている。3つ目は、中学生が大学教員の指導のもとで行った教材研究であり、応用物理学会講演会のポスターでも本人が発表を行っていた。子どもたちが親しみやすいLEGOブロックを用いて分光器を実現しており、今後の活用が期待される。

18.4 高等教育機関における人材育成

大学入試形態の多様化に伴い、大学生の学力レベルも多様化する中、高等教育機関では社会で活躍できる人材育成として、レベルに応じてさまざまな取り組みを行ってきた。2005年頃から、初年次教育として自主的な学習を行えるよう指導する導入教育や高校までの学習範囲を補修するリメディアル教育の重要性が指摘され、積み上げを必要とする理系分野においてもさまざまな努力がなされており、物理学基礎学力向上を目指した学習支援^{17,18)}などの報告がされている。とかく、ボーダーラインの学生に対する質の保証に力点が置かれる傾向があったが、日本の高度な科学技術の基盤を支え、将来の科学技術の発展を牽引する有能な研究者、技術者の育成に対する強い懸念と重要性も認識されており、理系分野においては、2007年から文部科学省では「理数学生応援プロジェクト」(2011年度より「理数学生育成支援事業」に名称変更)を開始している。これは、理数分野に関して強い学習意欲をもつ学生の意欲・能力をさらに伸ばすための取り組みに補助金を出すもので、参加学生を選抜し、各年次を通じた体系的な特別教育プログラムを実施する取り組みが対象となっている。採択されたプログラムの中の多くで、アクティブ・ラーニング(能動的学習)を支援し、意欲を喚起する取り組みが盛り込まれている。応用物理学会講演会においても、採択機関からの報告があった^{19,20)}。また、伸びこぼしを防止するための取り組みとして、東アジアや欧米の学生たちと同じ工学・技術的な課題に対して一定期間共同で解決(協

業)に取り組む課題探求型教育課程を実施し, 国際的技術者の育成を目指す取り組みの報告もあった²¹⁾.

前述のように, 次世代のリーダーとなる人材育成のプログラムの中で積極的に取り入れられているアクティブ・ラーニングであるが, 物理教育の中で熱い注目を集めている。2003年にエドワード・F・レディッシュが認知科学や脳科学の成果を取り入れ, 科学的な手法に基づいて研究する「物理教育研究」(Physics Education Research: PER)の本を出版した。この内容は同年に「物理教育通信」に紹介され, 2006年に日本で開催された「物理教育国際会議」(ICPE 2006)において原著者が講演し, 教育関係者に大きな反響を呼んだ。そして, 6年の歳月をかけて2012年6月に邦訳が出版された²²⁾。特に, PERの代表的な成果である「アクティブ・ラーニング」について注目が集まっており, 日本の高校・大学における物理授業においても, その効果を実践的に検証する報告が始まっている^{23, 24)}。

さらに, 社会のさまざまな分野で幅広く活躍する高度な人材を育成する大学院博士課程, 修士課程を対象とした, 大学院教育の実質化およびこれを通じた国際的教育環境の醸成を推進する取り組みは, 2007年から文部科学省の指導のもと, 各分野で始まっている。光分野においては, 本会誌「光学」において特集「2009年日本光学会の進展」内の光学教育²⁵⁾で詳細な報告があったように, 先端レーザー科学教育研究コンソーシアム(CORAL)²⁶⁾が, 東京大学を中心に2007年から先端光企業19社との密接な連携による教育プログラムを実施しており, 現在も継続され, 成果を挙げている。

18.5 展 望

本稿では, キャリア教育を意識した人材育成の取り組みを中心に紹介をしており, これは光学界に関する教育活動のごく一部に過ぎない。しかし, 近年の社会情勢を受け, 社会で活躍できる人材の育成を意識した取り組みが活発化していることは, 本稿の取り組みの紹介からもうかがえると思う。資源のない日本にとって, 科学技術分野の人材育成(人的資源の確保)が重要であることは疑う余地はなく, ここでは紹介しきれないほどの取り組みが行われている。春季応用物理学会講演会では, 開催校の早稲田大学と応用物理学分科会の共催で「理科実験の改革—初等・中等教育から高等教育まで—」と題したシンポジウムが開催

されたり²⁷⁾, 日本光学会が主催で「応用新産業創出フォーラム—光技術の継承と人材育成—」が開催されたりしている²⁸⁾。教育や人材育成は, すぐに成果の出るものではなく, 継続することで効果がみえてくるものである。特に, 求められているものは, 知識や技能の向上だけではなく, 意識や取り組む姿勢の向上であり, 自分の相対的な価値や位置を知ることによって, より効果的に改善, 向上されていくと考えられる。したがって, 地道な活動, さまざまな体験, 多くの人との交流を積み重ねることによって, 着実に育っていくと信じている。学会は, 専門を軸にさまざまな人が集まるコミュニティであるため, 専門性, 社会性を育てる恰好の場所であるといえる。日本光学会内においても, 情報交換, 育成の場を増やし, 学会を挙げて将来の日本の光学分野を担う人材を育成していくことを期待したい。

文 献

- 1) 長谷川誠: 春季応物講演会 (2012) 15p-B4-7.
- 2) 今園浩之: 秋季応物講演会 (2012) 12p-PB2-18.
- 3) 土井康平他: 春季応物講演会 (2012) 16a-GP1-9.
- 4) 伊藤智幹他: 春季応物講演会 (2012) 16a-GP1-10.
- 5) 曾江久美他: 秋季応物講演会 (2012) 12p-PB2-16.
- 6) <https://sites.google.com/site/jsnetsweb/home>
- 7) http://qopt.iis.u-tokyo.ac.jp/pub/OSA_S_C/jpnets.php
- 8) <http://www.i-photonics.jp/>
- 9) http://www.jsap.or.jp/activities/talent/2012/2012spring_meeting.html
- 10) 荒木 勉: 応用物理教育, **36**, No. 2 (2012) 3.
- 11) 岡島茂樹: 応用物理教育, **36**, No. 1 (2012) 3.
- 12) 岡島茂樹: 応用物理教育, **36**, No. 2 (2012) 7.
- 13) 月僧秀弥: 応用物理教育, **36**, No. 2 (2012) 11.
- 14) 原田建治他: 応用物理教育, **36**, No. 2 (2012) 15.
- 15) 金 蓮花他: 応用物理教育, **36**, No. 2 (2012) 21.
- 16) 青山友幸他: 秋季応物講演会 (2012) 12p-PB2-21.
- 17) 寺田 貢他: 春季応物講演会 (2012) 16a-GP1-4.
- 18) 水野貴敏他: 秋季応物講演会 (2012) 12p-PB2-4.
- 19) 船木修平他: 春季応物講演会 (2012) 16a-GP1-11.
- 20) 岡村直利他: 秋季応物講演会 (2012) 12p-PB2-5.
- 21) 川崎仁晴他: 春季応物講演会 (2012) 16a-GP1-3.
- 22) エドワード・F・レディッシュ (日本物理教育学会監訳) 科学をどう教えるか (丸善, 2012).
- 23) 谷口和成他: 秋季応物講演会 (2012) 12p-PB2-8.
- 24) 小林昭文: 情報処理学会研究報告. コンピュータと教育研究会報告, 2012-CE-116 (9), (2012) 1.
- 25) 五神 真: 光学, **39** (2010) 199.
- 26) <http://www.cuils.org/coral-ut/index.html>
- 27) 岡島茂樹他: 春季応物講演会 (2012) 15p-B4-1~8.
- 28) <http://www.jsap.or.jp/announce/seminar/detail/20120201.html>