

2010 年日本光学会の研究動向

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

表 「2010 年日本光学会の研究動向」における引用学会等の省略表記

略 称	学会・講演会の正式名称
<i>OPJ</i>	日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan
春季応物講演会	応用物理学関係連合講演会
秋季応物講演会	応用物理学会学術講演会
信学会総合大会	電子情報通信学会総合大会
信学会ソサイエティ大会	電子情報通信学会ソサイエティ大会
LDT 研究会	レーザーディスプレイ技術研究会
<i>DH</i>	Digital Holography and Three-Dimensional Imaging
<i>ECOC</i>	European Conference and Exhibition on Optical Communication
<i>ICSE</i>	International Conference on Spectroscopic Ellipsometry
<i>IDW</i>	International Display Workshop
<i>ISOM</i>	International Symposium on Optical Memory
<i>IUCS</i>	International Universal Communication Symposium
<i>IWHM&D</i>	International Workshop on Holographic Memories and Display
<i>MOC</i>	Microoptics Conference
<i>ODF</i>	International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication
<i>ODS</i>	Optical Data Storage
<i>OFCC</i>	Optical Fiber Communication Conference and Exposition
<i>OTOM</i>	Optical Trapping and Optical Micromanipulation
<i>SIGGRAPH</i>	International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques
<i>SSDM</i>	International Conference on Solid State Devices and Materials
<i>UQCC</i>	Updating Quantum Cryptography and Communications

「光学界の進展」から「日本光学会の研究動向」へ

「光学」編集委員長 相津佳永

「光学」では毎年 4 月に、「光学界の進展」と題して、光学 18 分野の前年の進展状況を各執筆者に短く解説していただく号を発行してきました。前年の研究動向を手軽に知る機会、光学界の人材を育成する手段、学会の方向性を議論する材料等として、読者、執筆者、学会の三者に有意義な企画であったと考えます。しかし、光学分野の広範・多様化、会員数の減少、研究環境の変化の中で、最近では執筆者の確保、解説内容・質の維持、検索範囲の統一等に関して、検討すべき課題も現れてきました。

そこで編集委員会では、従来の「光学界の進展」の趣旨を尊重・維持し、議論の継続を前提に、日本光学会における 14 の研究グループに執筆者の推薦を依頼し、前年の研究動向を解説いただく新方式を、2011 年と 12 年の 2 回、試行することにいたしました。解説の主範囲を日本光学会とするため、特集名を「日本光学会の研究動向」と改めました。また、研究グループ以外に、日本光学会の産学官連携等の事業に関する紹介を加えました。

研究グループが当該分野の潮流、話題、魅力、勢いなどをアピールする場として活用いただき、関係分野の研究推進・人材発掘に結び付けていただければ幸いです。

今回の試みに際し、編集委員会では「従来の 18 分野すべてが俯瞰できない」等の意見も出され、よりよい形を模索しつつ議論を重ねているところです。会員諸氏からの率直なご意見を賜りたいと思います。

1. ナノオプティクス

東京大 八井 崇

1.1 概 要

ナノフォトニクスとは、東京大学の天津元一教授が世界にさがかけて提唱した世界の最先端技術である。これは、「近接場光によるエネルギー移動を活用して光デバイス機能を発現したり、微細な加工を行う技術」と定義される。近年、この技術の基礎研究の進展が著しく、近接場光を dressed photon (ドレスト光子) ととらえることにより、いくつかの新現象・新機能が見いだされるようになった。特に光化学反応において見いだされたフォノン励起過程は、エネルギー上方変換という新しい光の応用技術を生み出した。

一方、平成21年12月30日に閣議決定された「新成長戦略(基本方針)」¹⁾の6つの成長分野のうち、第1番目に掲げられている「グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」は、まさにナノフォトニクスが必要不可欠な分野である。

上記の社会情勢をふまえ、以下に本分野の進展について紹介したい。

1.2 理 論

ドレスト光子とフォノンとの結合の現象によって説明されるフォノン励起過程の理論的考察が進み²⁾、以下に述べるエネルギー変換素子、ナノフォトニックデバイス、加工分野におけるさまざまな実験結果との比較を通して、本分野の進展が感じられる一年であった。

1.3 グリーン・イノベーション関連

1.3.1 太陽電池

春季応物講演会の発表のうち1割を占めたのが、太陽電池に関するものであった。太陽電池の効率向上のアプローチとしては、大きく分けて2つあり、1つはプラズモン増強効果を用いたものであり、もう1つはフォノン援用効果を用いたものであった。1つ目のプラズモン増強効果については、金属ナノ構造の形状を制御することで、従来の太陽電池にとって光吸収をもたない波長域において吸収の増大を誘起し、これによって光電変換効率を向上させるというものである。フォノン援用効果を用いる手法では、太陽電池表面にナノ構造を作成し、ここに発生するドレスト光子によってフォノン援用過程を誘起し、太陽電池のバンドギャップよりも低い光子エネルギーに対してエネルギー上方変換を発生させ、光電変換効率を向上させている。この効果を有機薄膜太陽電池に応用した実験では、世界最高性能の光電変換効率を実現しており^{3,4)}、シリコン太陽電池

においても同様な効率向上が達成されている⁵⁾。

1.3.2 水素発生技術

グリーン・イノベーション分野で太陽電池と並び注目を集めている分野が、燃料電池である。燃料電池の燃料となる水素を発生させる水の電気分解技術として、興味深い発表が多くみられた。電気分解効率の向上手法としては、前項の太陽電池同様、プラズモン増強効果を用いた手法と、フォノン援用効果を用いた手法の検討がなされた。プラズモン増強効果を用いた手法では、酸化チタンを用いた光電気化学測定が行われ、プラズモン共鳴バンドに対応して、可視域で高い光電変換効率を示す実験結果が示された。プラズモンの共鳴バンドの制御によって長波長の光に対しても光電変換が高効率に発生することを示した実験結果は、高い関心を集めた^{6,7)}。

一方の、フォノン援用効果を用いた手法では、酸化亜鉛ナノロッドを用いた水の電気分解化学測定が行われ、ナノロッドの直径を小さくすることによって、フォノン援用効果が増大し、従来光を吸収しない可視光により水の電気分解が促進する結果の報告があった^{8,9)}。同様の現象は、酸化チタンナノ構造においても観測されており¹⁰⁾、今後の発展が期待される。

1.4 ナノフォトニックデバイス

従来利用不可能であった光学禁制遷移が励起可能となることは¹¹⁾、ナノフォトニクスのもうひとつの大きな特徴である。この性質によって、微細化が可能となるだけでなく、エネルギー利用効率が大幅に向上するため、グリーン・イノベーションにおいて大きな貢献が期待される。従来よりナノフォトニクスを利用したさまざまなナノフォトニックデバイスが提唱されてきたが、2010年は、さらに大きな進歩がみられた。2層のInAs量子ドット(QD)により構成されるナノフォトニックデバイスによって、全光ナノスイッチの室温動作に成功した画期的な成果が発表された¹²⁾。さらには、多層QDの寸法を制御することによって、発光効率の大幅な向上も報告された¹³⁻¹⁵⁾。

1.5 ナノ光加工

フォノン援用励起過程はエネルギー変換素子のみならず、サブナノ加工への応用も盛んに行われている。その代表例が、近接場光エッチングによるオングストローム平坦化であろう。近接場エッチングにより平坦化されたガラス基板を用いたレーザー鏡では、レーザー耐性が大幅に向上する結果が得られている¹⁶⁾。本成果の一部は春季応用物理学会の展示会場でも製品として紹介され、本分野が実用期を迎えていることを示す証拠である。さらに、非接触加工の特徴を生かして、三次元構造の平坦化も実証されて

いる¹⁷⁾。

前節で紹介したナノフォトニックデバイスの高効率化のためには、QDの粒径制御が重要となる。QDは自己組織的に作製されるため、作製時の熱エネルギーのゆらぎによって決まる粒径分布が生じてしまう。そこで、この問題を解決する手法として、光のもつ光子エネルギーによって制御可能な粒径制御法の開発が進んでいる¹⁸⁾。

1.6 その他

表面増強ラマン散乱の応用については、2010年も春・秋いずれの応用物理学会でも多くの発表が見受けられた。その中でも、ES細胞分化過程の観測の報告があるなど¹⁹⁾、医用分野への進展もみられ、近接光学のますますの発展が期待される。

ナノフォトニクスが進展により、デバイス寸法はシングルナノの世界に突入している。この現状において、シングルナノ金属微粒子中での電子の有効質量に関する研究報告があるなど²⁰⁾、誘電率などといったバルク材料として求められた物性値は、もはやそのままでは利用できないことを感じさせられる状況となっている。

1.7 展 望

近年の研究成果により、もはや光子のみではなく、ナノ物質中の電子やナノ物質近傍のフォノンモードとの相互作用なしにさまざまな現象を理解することは困難となっている。このような相互作用を有効活用することが、今まさに求められているグリーン・イノベーションを実現するための近道であろう。

文 献

- 1) 文部科学省：www.mext.go.jp/b_menu/seisakukaigi/syousai/siryo/1291678.htm
- 2) 小林 潔：春季応物講演会 (2010) 18p-N-2.
- 3) 行武壮太郎他：春季応物講演会 (2010) 18a-P4-13.
- 4) S. Yukutake *et al.*: Appl. Phys. B, **99** (2010) 415.
- 5) 高木裕昭他：春季応物講演会 (2010) 18a-P4-14.
- 6) 西島喜明他：春季応物講演会 (2010) 18a-P4-10.
- 7) Y. Nishijima *et al.*: J. Phys. Chem. Lett., **1** (2010) 2031.
- 8) K. Kitamura *et al.*: *International Symposium on Nano-Micro Multi-Functional Devices* (2010) p. 48.
- 9) 北村 心他：秋季応物講演会 (2010) 16a-NK-5.
- 10) K. Mawatari: *3rd German-Japanese Seminar on Nanophotonics* (2010).
- 11) 辻 真大他：春季応物講演会 (2010) 18a-P4-17.
- 12) 川添 忠他：秋季応物講演会 (2010) 16a-NK-1.
- 13) 赤羽浩一他：春季応物講演会 (2010) 18a-P4-19.
- 14) K. Akahane *et al.*: *SSDM* (2010) K-6-2.
- 15) 大山遼馬他：秋季応物講演会 (2010) 16a-NK-10.
- 16) 平田和也他：春季応物講演会 (2010) 18p-N-3.
- 17) 八井 崇他：秋季応物講演会 (2010) 16a-NK-4.
- 18) 劉 洋他：春季応物講演会 (2010) 18a-P4-16.
- 19) 吉川裕之他：秋季応物講演会 (2010) 17p-NJ-4.
- 20) 北井敏幸他：春季応物講演会 (2010) 17a-P1-12.

2. コンテンポラリー・オプティクス

電気通信大 宮本洋子

2.1 概 要

コンテンポラリー・オプティクス研究グループは、最先端研究の基礎に重点をおいた研究会を通し、女性や若手研究者の啓発と育成を図ることを目的として1993年に設立された。以来、分野の境界を超え、学生や若手が参加しやすい情報交換の場を提供している。

2010年は「量子光学の最近の話題」を取りあげ、4月8日に研究会を開催した。講演は「光強度量子相関を有するツインビームの生成と応用」(笠井克幸氏, NICT)と“Multiphoton interference between spontaneous parametric down-conversion and coherent states”(張賢氏, 電気通信大学)であった。

本稿では量子光学および量子情報分野の研究動向を取り上げる。

2.2 応用物理学会のトピックス

1月8～10日に量子エレクトロニクス研究会「量子情報の最前線と今後10年の展開」が開催された。研究会の一部として「量子情報・物理」のアカデミック・ロードマップについての議論が行われ、その後完成版が「応用物理」8月号に掲載された。2月号には特集「量子情報技術の最前線と今後の10年予測」が、10月号には量子もつれの解説が掲載された¹⁾。

2.3 非古典光の生成

非古典光の生成は量子光学の重要なテーマのひとつであるとともに、量子情報分野の基礎技術としても重要である。

単一光子源については、半導体量子ドットを用いた波長 $1.5\ \mu\text{m}$ の光源²⁾や、ナノ細線構造を用いた $1.3\ \mu\text{m}$ の光源³⁾の研究が報告された。

PPLN (periodically poled lithium niobate) で発生させた波長 $1.5\ \mu\text{m}$ の縮退光子対を分離するため、励起光を TM_{10} モードとすることで、一方の光子を TM_{10} 、他方を TM_{00} モードとする工夫が報告された⁴⁾。 TM_{10} モードの光子は、特殊な導波路中で TM_{00} モードに変換されてファイバーに出力される。また、時間変調された波長 $1.5\ \mu\text{m}$ の光から単一の素子で同波長のもつれ合い光子対を得るため、シリコン光細線中の自然放出四光波混合や⁵⁾、単一のPPLN中で第二高調波発生とパラメトリック下方変換のカスケード⁶⁾を用いる研究が報告された。

スクイーズド光については、PPKTP (periodically poled KTiOPO_4) の両端を球面状に研磨して反射膜を施したモノリシックな光パラメトリック発振器を用いた発生が行われ

た⁷⁾.

2.4 光子検出器

ガイガーモードのアバランシェ・フォトダイオード (APD) は代表的な単一光子検出器であるが、アフターパルスの問題がある。シリコン APD をリニアモードで用いることによってこの問題を解決し、波長 450 nm で光子検出効率 0.72, ダークカウントレート 0.0008 cps が実現された⁸⁾.

超伝導ナノ細線を用いた検出器では, NbN の細線による 4 チャネルの検出器が製作され, 波長 1550 nm でシステム検出効率 16% 以上を達成した⁹⁾. また, 高速化やより高温での運用を目指して MgB₂ の細線が検討されており, 405~1560 nm での単一光子検出が期待される¹⁰⁾.

チタニウム薄膜による超伝導転移端センサー (TES) では, 波長 844 nm のパルスで 98.4% の検出効率が報告された¹¹⁾. この検出器は光子数識別能力をもつことも特徴である.

2.5 状態操作

少数光子のもつれ合い状態を多光子のもつれ合い状態に拡張する操作に興味もたれている. もつれ合い状態の一種である N 光子の W 状態に新たに光子を付け加え, (N+2) 光子の W 状態とする操作が提案・実現された¹²⁾.

真空スクイズド状態をビームスプリッターで分割した 2 本のビームの間のもつれあいについて, 光子を局所的に差し引く操作によってエンタングルメント蒸留が行われた¹³⁾. 前述の TES の光子数識別能力を生かして, 差し引きされた光子数に応じた非ガウス操作を実現する研究も報告されている¹⁴⁾.

2.6 物質との相互作用

トモグラフィックカー回転を用いて, 半導体量子井戸中の電子スピンの状態を光で読み出す実験が報告された¹⁵⁾. 高フィネスの光共振器を用いた実験では, 単一の ¹⁷¹Yb 原子の核スピンによる 10 度を超えるファラデー回転が観測された¹⁶⁾. 一方, スピンスクイズド状態にある ¹⁷¹Yb 原子の集団に対して, 円偏光の照射によってスクイズングを保ったままスピンの回転を行う操作が報告された¹⁷⁾.

Rb 原子集団の電磁誘起透過 (EIT: electromagnetically induced transparency) を用いて, 真空スクイズド状態に対する量子メモリーが実現された¹⁸⁾. この方式は広い帯域のサイドバンドに対応可能である. 半導体量子ドット集合体への光位相の転写・再生も報告された¹⁹⁾.

少数 Cs 原子の蛍光を光ナノファイバーに結合して観測する実験では, 光子相関測定によって得られる強度相関関数をフーリエ変換する手法によって発光スペクトルが

得られ, 光によって原子が強く駆動される条件で現れる Mollow トリプレット構造が確認された²⁰⁾. 超伝導素子による人工原子をマイクロ波の一次元伝送線路と結合させる実験では, パワースペクトルから Mollow トリプレットが観測された²¹⁾. Rb 原子の光糖蜜 (optical molasses) からの共鳴蛍光の光子相関測定では, 空間コヒーレンスの向上により時間差ゼロでの二次の相関関数が熱的なゆらぎをもつ光源の理論値 2 とほぼ一致し, レイリー散乱と Mollow トリプレットの干渉による振動構造がみられた²²⁾.

2.7 理 論

コヒーレント光と真空スクイズド状態による位相測定について, 最適な位相推定方法と, 損失が位相感度に与える影響が検討された²³⁾. 量子計算の分野では, 部分偏光ビームスプリッターを用いた制御 Z ゲートについて, 装置パラメーターの理想値とのずれの影響が検討された²⁴⁾. また, 損失のある伝送路でのコヒーレント状態の送信によるもつれ合い生成について, 性能の上限評価が行われた²⁵⁾.

2.8 Tokyo QKD Network

東京で光ファイバーネットワークによる量子鍵配送 (QKD) の実験が行われた²⁶⁾. 実験は情報通信研究機構 (NICT) のテストベッド JGN2plus 上で行われ, 一般の商用光ファイバーと共通のマルチコアケーブルを使用する部分を含んでいる. ネットワークは小金井, 大手町, 白山, 本郷を結び, NICT, NEC, 三菱電機, NTT, 東芝欧州研, Id Quantique 社, All Vienna が運用する異なる通信方式の区間を結んで構成された. 最長区間は 90 km であり, 秘密鍵の生成速度は 45 km の区間で 100 kbit/s を達成した. 10 月 18~20 日の量子暗号・量子通信国際会議 (UQCC 2010) では, 生成された鍵を用いた TV 電話や, 盗聴検出と安全な経路への切り換えのデモンストレーションが行われた.

この実験の過程で, 古典通信を行う隣接ファイバーからのクロストークの問題が明らかになった²⁷⁾. また, 実用化への進展を受けて光ファイバーの帯域の有効活用も検討されており, 量子ビットを波長 1550 nm, クロック信号を 1570 nm で送る技術や²⁸⁾, 広帯域で発生させたもつれ合い光子対を短波長側 (シグナル)・長波長側 (アイドラ) に分けてファイバーで配送し, 60 GHz のチャンネルに分割して検出する実験²⁹⁾ も報告されている.

2.9 展 望

2010 年は量子光学・量子情報分野にとっては節目の年であった. レーザー 50 周年を記念して多数の行事が行われる一方で, 年末には, 量子エレクトロニクス分野に長年

貢献された宅間宏先生の訃報に接することとなった。ご冥福をお祈りするとともに、次代を担う責任を感じている。

実用かなり近い技術と萌芽的な技術とが混在し、基礎科学と実用との距離が近いのが、この分野の特徴である。実用化の進展に伴って高性能の光源や検出器が開発され、それらを用いて光の量子力学的性質や物質との相互作用に切り込む研究が行われ、それがまた新しい技術につながっていくことを期待したい。

文 献

- 1) 枝松圭一：応用物理, **79** (2010) 935.
- 2) K. Takemoto *et al.*: Appl. Phys. Express, **3** (2010) 092802.
- 3) S. N. Dorenbos *et al.*: Appl. Phys. Lett., **97** (2010) 171106.
- 4) Q. Zhang *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **49** (2010) 064401.
- 5) H. Takesue *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 16777.
- 6) M. Hunault *et al.*: Opt. Lett., **35** (2010) 1239.
- 7) H. Yonezawa *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 20143.
- 8) M. Akiba *et al.*: Opt. Lett., **35** (2010) 2621.
- 9) S. Miki *et al.*: Opt. Lett., **35** (2010) 2133.
- 10) H. Shibata *et al.*: Appl. Phys. Lett., **97** (2010) 212504.
- 11) 藤井 剛他：第23回量子情報技術研究会資料 (2010) 13.
- 12) T. Tashima *et al.*: Phys. Rev. Lett., **105** (2010) 210503.
- 13) H. Takahashi *et al.*: Nat. Photonics, **4** (2010) 178.
- 14) N. Namekata *et al.*: Nat. Photonics, **4** (2010) 655.
- 15) T. Inagaki *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **49** (2010) 04DJ09.
- 16) N. Takei *et al.*: Phys. Rev. A, **81** (2010) 042331.
- 17) T. Takano *et al.*: Phys. Rev. Lett., **104** (2010) 013602.
- 18) M. Arikawa *et al.*: Phys. Rev., A **81** (2010) 021605 (R).
- 19) 早瀬潤子他：OPJ (2010) 10pE6.
- 20) M. Das *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 17154.
- 21) O. Astafiev *et al.*: Science, **327** (2010) 840.
- 22) K. Nakayama *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 6604.
- 23) T. Ono *et al.*: Phys. Rev., A **81** (2010) 033819.
- 24) T. Nagata *et al.*: New J. Phys., **12** (2010) 043053.
- 25) K. Azuma *et al.*: Phys. Rev. A, **81** (2010) 022325.
- 26) <http://www.uqcc2010.org/highlights/index.html>
- 27) M. Fujiwara *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 22199.
- 28) A. Tomita *et al.*: Opt. Fiber Technology, **16** (2010) 55.
- 29) H. C. Lim *et al.*: Opt. Fiber Technology, **16** (2010) 225.

3. 視 覚

豊橋技術科学大 鯉田孝和

3.1 概 要

2010年は質感認知の研究が一気に花開いた年であった。そしてその勢いはとどまらず、今後しばらくは加速度的に研究が進みそうである。視覚による質感認知について、特に日本光学会での動きについては、「光学」の2009年11月号に特集が組まれているので、それをお読みいただくのがよいだろう¹⁾。国際的な状況については、2010年のJ. Vis. 10号に色と素材感に関する論文特集が組まれているので参考になる²⁾。ここでは、質感認知研究が光学の中でどのような意義をもつのかについて解説したいと思う。

3.2 視覚光学の沿革

視覚光学が光学の一分野として位置づけられているのは、われわれ人間が光を見ることができるとはなぜかという、光についてのもっとも素朴な疑問に取り組む学術領域だからである。その研究対象は光そのものの物理的性質だけではなく、光を観察する人間側の性質が重要になる。可視光線が眼光学系で結像され、光情報は網膜での視物質の光受容過程を経て神経シグナルに変換され、さらに神経シグナルは脳へと伝達されることで知覚認知が生じる。これら視覚情報処理の神経機構を知ることが視覚光学の目的である。また、視覚光学の代表的な実験手法である心理物理実験では適切な視覚刺激の作成が鍵となることが多く、単色光を用いた分光特性、マクスウェル視光学系による眼球への入射光束量のコントロール、補正光学系による視光学系のひずみ除去といった例からも、光学技術が果たした役割は非常に大きいことがわかる。

その一方で、眼光学系や網膜での情報処理過程の理解が進み、研究者の多くの関心が脳での情報処理に向かうことになる。視覚的注意や記憶といった認知的な効果は脳での情報処理で生じるものであり、色や明るさといった単純な知覚であっても照明光による色の変化を補正して安定した物体色認知を生じさせる色恒常性機能などがあり、脳での情報処理を無視することができない。さらに、fMRI (functional magnetic resonance imaging) に代表される非侵襲的脳機能計測技術の進歩により、心理物理応答と生理学的指標の対応を試みる分野融合的な研究が進み、いまや視覚光学は神経科学のひとつの分野として位置づけられるまでになった。これは同時に、光学としての位置づけがあまりにまいになりつつあることを意味していたが、近年、質感研究によって再び光学の知識と技術が脚光を浴びることになる。

3.3 質感研究とは何か

質感研究がターゲットとしているのは、光沢、透明感、テクスチャーといった観察対象の物質的な属性である。もちろん色や明るさも素材感のひとつであり、質感知覚においては歴史があり最も研究が進んでいる知覚現象である。しかしこれまでの色覚研究は、色票のような一様で単純な視覚刺激を対象とすることが多く、光沢や透明感といった本来物体が必ず持ち合わせている素材特性は生じないように刺激を操作することで実験を行っていた。質感はまた、一言でその特性を表現できないケースが多く、その感覚は多次元である。たとえば「光沢があり、つるりとしてみずみずしく、柔らかく透明感があり、内側に紫色の不透明な物体がある」というのは水まんじゅうの記述例である。こ

のような質感認識はどのような神経機構によって生じているのか、その機構が読み出している光情報は何で、どのような統計指標によってシンプルで決定的な説明が可能となるのか、その理解に基づくことで、特定の質感が高まるような画像表示は可能となるのか、完全コンピューターグラフィックス (CG) 合成でリアルな素材感を生み出すことができるのか、塗装や化粧において意図した結果を得るにはどのような物理組成を加えることが効果的であるといえるのか。以上が質感研究の目指すところである。

3.4 質感研究には光学の知識が不可欠

日常生活で目にする対象は、有機物であったり無機物であったり金属であったりするが、照明光に照らされ、光の反射、屈折、吸収、散乱といった基本的な光学現象によって視覚像が生じていることには変わりはない。複雑な物体であっても顕微鏡下で物体を観察すれば、特に観測技術の進歩により原子レベルまで構造を見ることができるようになった現在では、すべての光線の軌跡をトレースすることは原理的に可能である。そのような極微の世界で生じている光学現象には、対象物の分子組成や構造といった生体に重要な情報を含んでいる。しかしながら人間の視覚は顕微鏡ではないので、これらの極微での光学情報を直接読み取することはできず、物理現象が繰り返された結果としての画像情報のみを得ることになる。部分的であれ人間が物質素材に関する情報を認知することができるのは、網膜に届いた画像情報から統計的な推定を加えることで、物理的な構造や化学的な組成を推定しているからであろう。その推定メカニズムを理解するためには、脳における機構の理解だけでなく、光学現象の知識や測定技術に基づいてどのような画像が生じるのかを解明することが必要不可欠なのである。

3.5 質感研究紹介

2010年に報告された質感研究の代表例を2件紹介する。1つ目として、物体の半透明感を決定づける視覚の手がかりについての研究を取り上げる³⁾。半透明の物体では光の反射、屈折、物体内部での散乱といった光学現象が複雑に生じているが、観察者はそれが半透明なのかどうか即座に判断が可能である。そこで Motoyoshi は CG 合成した三次元物体を視覚刺激として用いて、鏡面反射と拡散反射、物体内部の光の透過度合いをコントロールすることで見えの半透明感がどのように変化するかを定量化し、それが画像のどのような統計量と強い相関をもつのかを確かめた。その結果、半透明感を決定するのは光沢とともに存在する非光沢部分のシェーディングであることを明らかにした。半透明感を生むシェーディングは、ぼやけていてコントラス

トが低く、さらには不透明な物体でのシェーディングとコントラストを反転することによって強力な半透明感を生じさせることも示した。

2つ目の例として、エキスパートによる実物体の視認評価を物理計測に置き換える技術について紹介する⁴⁾。宝石の一種である真珠は、わが国において長い生産の歴史があり、高い品質を誇っている。真珠には光沢とともに、層構造による干渉により独特の色のグラデーションが生じている。その色やパターンによって宝石としてのグレードがつけられるが、グレードの評価は真珠鑑定の専門家が視認評価することで行っているため、客観性や一貫性を担保するデータが乏しかった。中内らの研究グループは、真珠のグレードを決める視覚の手がかりを物理測定に置き換えることが可能であることを示し、測定系を確立した。その成果は装置として販売予定となり、テレビニュースにも報道された (2010年11月26日、ワールドビジネスサテライト、テレビ東京)。

3.6 質感研究が広く注目されている

これらの質感研究の進展を後押しする形で、2010年には科学研究費の新学術領域「質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究」がスタートした⁵⁾。学術的意義が評価されていることを示すと同時に、工学技術の発展へ寄与することが期待されているといえるだろう。今後、公募研究により分野を超えた多くの研究者が集まり、研究が進展することが期待できる。本領域のキックオフシンポジウムには会場に入りきれないほどの参加者が来場したことからも、注目の度合いがみてとれる。また、来場者には研究者のみならず多くの産業関係者が含まれていたことも注目に値する。

3.7 課題と展望

質感研究には視覚光学としてやっかいな問題がある。そのひとつが、質感に関する多次元の感覚量をどうやって定量的なデータとして取り出すかである。今後しばらくは色、光沢感、透明感といった特定の属性に注目しての質感研究が進むと思われるが、実際の対象物はこれらの複数の属性が同時に存在することが明らかである。同時に存在する複数の属性はどのように知覚対象として統合されているのか (あるいは統合されていないのか) について解決しなければならない。その際には、現在の視覚心理物理実験の手法、視覚刺激を見て、二択あるいは数値評価で答えるという手法では、データの量と階調がともに全く不足している。質感研究を大きく進展させるためには、新しい測定手法の確立が期待されている。

文 献

- 1) 特集「視覚における質感の科学」, 光学, **38** (2009) 1.
- 2) Special Issue "Perception of color and material in complex scenes," J. Vis., **10** (2010) 1.
- 3) I. Motoyoshi: J. Vis., **10** (2010) 6.
- 4) 豊田敏裕他: *OPJ* (2010) 10aE7
- 5) 質感脳情報学ウェブサイト <http://shitsukan.jp/>

4. 生体医用光学

大阪大 近江雅人

4.1 概 要

生体医用光学関係の分野は、日本光学会の生体医用光学研究グループ (biomedical optics group: BOG) をはじめ、電気学会、レーザー学会、日本生体医工学会、日本レーザー医学会など、国内の多くの学会でさかんに活動が続けられている。2010年度はOPJにおいて医学・生物学応用関連への発表が70件近くあり、ポスターセッションを含め活発な討論が行われた。また、1月に開催されたこの分野の世界最大級の国際会議である Photonics West BIOS 2010では、生体医用光学関連に1500件を超える演題が集まり、当分野の注目度が非常に高いことがうかがえる。ここでは、主としてこれら学会、発表論文のなかの光学技術の進展について述べる。

4.2 光計測・光診断関連

OCT (optical coherence tomography) に関しては、国内外でも活発に研究開発が行われた。とくに、血管内視鏡OCT、消化器系への応用、眼科では偏光感受型OCTや補償光学の利用など、臨床応用研究がさかんに行われてきている。Photonics West BIOS 2010では、全演題数の約2割をOCT関連が占めている。とくに、2010年は技術開発の演題よりも臨床応用研究の演題数が多くなり、OCT技術がより臨床分野に浸透してきたといえる。内視鏡OCT関連では、波長掃引光源によるSS-OCT (swept source OCT) を用いて、動脈硬化症の脂質性プラークのイメージングやOCTイメージを三次元へ展開したステント治療過程の診断について報告があった¹⁾。消化器系においては、バレット食道腺がんの三次元イメージと臨床診断についての報告があった²⁾。また、内視鏡型OCTによる口腔内の声帯にできたがんの三次元的診断応用について報告されている³⁾。眼科用OCTでは、臨床応用に向けた小型の補償光学型OCTが報告された⁴⁾。レーザー眼底凝固手術プローブにOCTを組み込んだ術中リアルタイムモニターの報告があった⁵⁾。また、OCTの皮下生理学への応用として自律神経活動の評価が報告された⁶⁾。OCTの技術展開に

ついて、高速化として4段のバッファーステージを設けたFDML (Fourier domain mode-locked laser) による20 million A-scans/sの超高速SS-OCTの報告があった⁷⁾。グラフィックプロセスユニット (GPU) を用いたSD-OCT (spectral domain OCT) の高速ディスプレイが報告された⁸⁾。高分解能化に関しては、ガウス型のスーパーコンティニウム光を用いた超高分解能OCTが報告された⁹⁾。

生体細胞イメージングや顕微鏡イメージング分野においては、二次元フーリエ分光イメージング法の眼科医療計測への応用例が報告された¹⁰⁾。金ナノ粒子を利用したラマン分光分析¹¹⁾やフォトメカニカル波による経血管的な薬剤導入法¹²⁾が報告された。また、タイムラプス二光子顕微鏡による脳微小血管のイメージング¹³⁾や生体SHG顕微鏡による熱症診断への応用¹⁴⁾などが報告された。さらに、マルチモーダルイメージングとして、OCTに光音響効果を組み合わせてコントラストを増強する手法¹⁵⁾、多光子顕微鏡とOCTを融合した皮膚がん診断の試み¹⁶⁾、ラマン分光とOCTを組み合わせた基底細胞がんや扁平上皮細胞がんの評価が報告された¹⁷⁾。

生体組織の光学特性に関しては、双積分球光学系と逆モンテカルロ法を用いた生体光学定数の計測¹⁸⁾や光路長マトリクスを用いた肌分光反射率のシミュレーション¹⁹⁾が報告された。また、生体拡散光を利用したイメージングに関しては、光拡散方程式を用いた吸収係数や散乱係数の解析が継続的に研究されている。光散乱の抑制を用いた散乱体内部の三次元構造の再構成²⁰⁾や皮膚の光学特性データを用いた光伝搬モンテカルロシミュレーション²¹⁾が報告された。

4.3 光治療・PDT関連

光治療の分野は、皮膚科・形成外科、泌尿器科、耳鼻咽喉科など多岐にわたっている。皮膚科の治療に関しては、皮膚にレーザーで多数の微小な穴をあける施術により、PDT (photo dynamic therapy) に用いる光感受性物質の取り込み量を向上させる試みが報告された²²⁾。泌尿器科については、治療の対象は前立腺がん、膀胱がん、前立腺肥大、結石であり、これらの診断はこれまでPDD (photodynamic diagnosis) 診断が主流である。内視鏡プローブを用いて脂肪酸由来のピークをラマン分光で検出する、新たな膀胱がんの診断法が報告された²³⁾。また、前立腺がんに対するレーザーアブレーション治療をMRIガイド下で行う術式について報告された²⁴⁾。このMRIガイドは、治療部位の特定に有用なモニターツールとなる。PDTは表在性浸潤がんに対する低侵襲かつ繰り返し可能な光治療法である。光感受性物質と血管内皮細胞増殖因子に対するモノ

クロナル抗体とを混合したマイクロカプセルを用いて、PDTの治療効果の向上について報告された²⁵⁾。

4.4 展 望

生体医用光学関係の分野は、診断においては、パルスオキシメーターや蛍光計測によるがん診断、拡散光トモグラフィ (CDI) / OCT などの生体断層イメージングや顕微鏡技術、ラマン分光、光音響などが利用されている。治療においては、眼科、歯科、皮膚科・形成外科、心臓血管外科、消化器外科、泌尿器科、耳鼻咽喉科にレーザー光が利用されており、組織の切開・凝固治療や PDT 治療など非常に広範囲の光学技術を内包して進展している。

今後は単に最先端の光学技術を導入するのではなく、生体と光の相互作用における作用機序に基づいて、光診断 / 光治療で何ができるかを明らかにすることが重要である。光診断分野においては、MRI や光音響イメージングとの融合などのマルチモダリティ化が進展しており、イメージングの新たな機能による発見に繋がることが期待できる。

文 献

- 1) G. J. Tearney *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7554-01.
- 2) W. Kang *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7554-09.
- 3) K. H. Kim *et al.*: *Opt. Express*, **18** (2010) 14644.
- 4) 須藤健太他: *OPJ* (2010) 10aH4.
- 5) W. K. Tao *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7554-14.
- 6) 高田太輔他: *OPJ* (2010) 9pH12.
- 7) W. Wieser *et al.*: *Opt. Express*, **18** (2010) 14685.
- 8) Y. Watanabe *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7554-100.
- 9) 西澤典彦他: *OPJ* (2010) 9pH6.
- 10) 河尻武士他: *OPJ* (2010) 8aH5.
- 11) 安藤 潤他: *OPJ* (2010) 9aH1.
- 12) 秋山琢也他: *OPJ* (2010) 9aH4.
- 13) 吉原光一他: *OPJ* (2010) 9pH8.
- 14) 田仲亮介他: *OPJ* (2010) 9pH7.
- 15) S. Jiao *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7554-29.
- 16) K. König *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7554-90.
- 17) C. A. Patil *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7548A-20.
- 18) 南條卓也他: *OPJ* (2010) 8pP18.
- 19) 藤原伊純他: *OPJ* (2010) 9aH5.
- 20) 嶋野 心他: *OPJ* (2010) 9aH7.
- 21) 神保直翔他: *OPJ* (2010) 10pP16.
- 22) F. H. Sakamoto *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7548A-02.
- 23) M. C. M. Grimbergen *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7548B-34.
- 24) L. A. Mynderse *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7548B-44.
- 25) T. Hasan *et al.*: *SPIE Photonics West BiOS* (2010) 7551-03.

5. 情報フォトリクス

大阪市立大 宮崎大介
宇都宮大 早崎芳夫

5.1 概 要

情報フォトリクスは光技術と情報処理技術の融合分野であり、情報の取得、処理、伝送、記録、利用、表示の各過程において、光の特性を生かした新技術を切り開く分野として発展してきた。情報フォトリクスは、電子技術だけでは対処できないほどの大容量情報を処理する技術として期待されてきたが、汎用的な情報処理システムとしての役割を目指すのは今のところ現実的ではない。それでも、光の特性をうまく活用できる処理内容であれば、電子処理だけでは実現不可能な高度な機能を備えた情報処理システムを構築できる可能性は十分にある。特に、光の特性を生かしやすい画像情報を処理対象とする場合が多い。デジタルホログラフィーや立体ディスプレイなど光技術を巧みに利用した三次元映像技術や、光技術と GPU (graphics processing unit) コンピューティングを融合したシステムを実現する GPU フォトリクス、ナノテクノロジーと光技術を融合によるナノフォトリックコンピューティングは、きわめてホットな研究対象である。

情報フォトリクスの技術分野は、これまでに蓄積された多彩な光技術を利用し、さまざまな用途に適用することができるので、関連技術は多岐にわたる。以下に、それらの技術に関する最近の動向を概観する。内容の記述は、5.2 節から 5.5 節までは早崎が担当し、5.6 節以降は宮崎が担当する。

5.2 デジタルホログラフィー

デジタルホログラフィーは、光学系での干渉像の撮影と、コンピューターでの干渉像から複素振幅の計算とその回折計算により構成される。光干渉計測との違いは、回折計算の有無である。おもな研究課題は、レーザーディスプレイと同様に干渉ノイズ (スペckルノイズ) を低減するためのコヒーレンス制御、インライン工業計測において重要な移動・変形物体を計測するための高速・高スループット撮影、光伝搬の高速計算である。デジタルホログラフィーは情報フォトリクス分野の一研究テーマであるが、デジタルオプティクス分野の主要テーマでもあるので技術的な報告の詳細はそちらに譲るとして、ここでは、筆者が出席した「デジタルホログラムと三次元イメージングの国際会議」(2010年4月11日~14日、マイアミ)¹⁾で発表されたデジタルホログラフィーのバイオ関連の応用研究について、興味深い例を述べる。細胞のダイナミックス

のホログラフィック位相計測に関して、得られた位相量とアクションポテンシャルやイオン変化などの生物的な情報との関係に関する研究²⁾、位相像と細胞内のカルシウム濃度を検出する蛍光像を比較することで、化学的な刺激に対して位相像から得られる構造変化と電気的な応答を同時に取得できることに関する研究³⁾、光ピンセットで操作される粒子のデジタルホログラフィーによる位置計測に関する研究⁴⁾、全反射配置のデジタルホログラフィーによるプリズム上を移動するアメーバに関する研究⁵⁾が報告された。

5.3 計算機ホログラムの応用

計算機ホログラムは、デジタルホログラフィーとは逆で、計算機の中でホログラムを設計して、光学系でホログラムを再生する。過去に、光干渉計測や光インターコネクション、光コンピューティングで用いられた。現在、計算機ホログラムが用いられる研究として、ホログラフィックディスプレイ、ホログラフィック光ピンセット、ホログラフィックレーザー加工がある。ホログラフィックディスプレイに関しては他の研究グループの報告にあるのでここでは割愛するが、国内のいくつかのグループによって精力的に研究が進められており、印刷会社などの企業においてもセキュリティー応用でディスプレイホログラムと関連する研究開発もあり、日本の強い分野である。日本では、ホログラフィック光ピンセットの研究を行っている研究グループは数グループ程度であり、農工大⁶⁾、名古屋大⁷⁾、宇都宮大⁸⁾で行われている。一方、海外に目を転じると、筆者が参加した SPIE の会議⁹⁾では、意外なほど数多くのホログラフィック光ピンセットの研究を知ることができた。ホログラフィックレーザー加工に関しては、京都大¹⁰⁾、ニューガラスフォーラム、宇都宮大¹¹⁾、Jean Monnet 大 (フランス)、Jaume I 大 (スペイン)、リバプール大 (イギリス)¹²⁾、Laser Zentrum Hannover (LZH) (ドイツ)¹³⁾のグループが研究を進めている。

5.4 GPU フォトニクス

光の並列伝搬性と画像処理との親和性から GPU 上に光学現象を実装することは、きわめて有用である。高速な画像取得とともに、光伝搬計算も重要である。千葉大のグループは、GPU を用いて回折計算を実施し、NVIDIA 社と AMD 社の GPU での速度比較をした¹⁴⁾。これらのボードの進化は非常に早いので、光学計算を恒常的に実装し、利用環境を整備することは重要である。MIT のグループは、波長依存の光強度輸送方程式の計算を GPU で行い、物体の位相情報を計算した¹⁵⁾。縞投影法による三次元計測の計算に GPU を用いる例¹⁶⁾など、光学計算における GPU

の使用が当然といった状況になりつつある。

5.5 ナノフォトニックコンピューティング

ナノテクノロジーと光技術を融合して新しいコンピューティングシステムを構築しようとする試みは、日本発の独創的な研究である。ひとつは、大阪大のグループによるフォトニック DNA コンピューティングである。一連の研究の中で、DNA 論理演算¹⁷⁾、ナノスケールポジショナー¹⁸⁾等が実証された。もうひとつは、東大のグループで継続的に研究が進められているナノフォトニクスを用いた新しい光情報表現に関する研究であり、ナノメータスケールとマイクロメータスケールで情報を階層化する研究¹⁹⁾や近接場光相互作用の変調²⁰⁾が行われた。そのほか、ナノではないが、光を用いた興味深いコンピューティングシステムとして、神戸大のグループによる干渉型光演算を用いた素因数分解計算²¹⁾や、日本女子大のグループによる光相関システム²²⁾も、独自の研究が継続的に進められている。

5.6 光学現象を高度に取り入れた画像取得・処理

現在の通常の画像処理システムでは電子的処理が中心的な役割を果たし、光技術は単純な結像系による画像の取り込みや結果の表示といったインターフェイスとしての利用に限られている。しかし、光学系に工夫を凝らした光学的処理を積極的に活用することで、新たな機能をもつ画像処理技術が実現できる可能性がある。その一例として、レンズアレイを備えた複眼画像取得システムにより、三次元情報の取得、超解像処理、マルチスペクトル画像取得、時間差画像の取得等を行う研究が行われている^{23,24)}。各レンズを特殊な非球面形状として波面を符号化することで、深い被写界深度を得ながら距離画像を得る手法も開発されている²⁵⁾。

画像処理に関しては、光の物理現象としての特性を積極的に取り入れる研究が活発になっている。例えば、実際に計測した光の伝搬特性に基づき、コンピューターグラフィックスによって現実に近い画像を再現する技術が研究されている^{26,27)}。

5.7 光電子融合集積回路の利用

イメージセンサーに対して、処理内容に合わせた専用回路を組み込むことで、高速・高機能な画像画像が実現できる。専用の集積回路を備えたイメージセンサーを用いてフレームレートで時間相関演算を行うことで、特定の分光特性を有する物体をリアルタイムで検出する撮像システムが開発されている²⁸⁾。

また、画像情報以外の汎用的な情報処理に対しても、光入力をもつ集積回路による高速処理が検討されている。光

入力を備えたゲートアレイに対して、ホログラフィックメモリーに記録した構成情報を適用することにより、効率的な演算を行うために回路を高速に再構成する技術が研究されている²⁹⁾。

5.8 立体表示技術

立体表示技術は、近年の立体映画の公開や立体テレビの市販により注目されるようになった。立体表示は、二次元空間光変調素子からの光学的情報を処理して、人の目に三次元情報を提供する光情報処理である。現在普及しつつあるのは眼鏡式立体表示であるが、眼鏡の煩わしさを解消するために、さまざまな裸眼式立体表示に関する研究がさかんになっている。そのような技術として、ホログラフィー関連の研究が活性化している。それ以外にも、パララクスバリアーやレンチキュラーシートなどにより観察角度に応じて異なる画像を提示する方式³⁰⁾や、三次元的に光点を配置する体積型などが研究されている。体積型表示の新しい技術として、微小ミラーアレイで構成された透過型対称結像素子を実像形成に利用する手法が報告された³¹⁾。また、奥行き融合型三次元表示方式における視野角の評価なども行われている³²⁾。

5.9 光セキュリティー技術

光の伝搬を利用すれば瞬時に行えるが、同じことを計算機によって処理すると多大な時間を要することを利用して、情報保護を行う技術が研究されている。人工散乱体により光を散乱させることで、簡単に情報を隠蔽化する記録メディアが提案されている³³⁾。情報を取得するには、既知の散乱特性に基づく散乱の計算が必要である。特定のマスクをディスプレイの前に置くことにより復号化する視覚復号型暗号も、同様の例といえる。ヘッドトラッキング技術の利用³⁴⁾や、デジタルカメラによる復号³⁵⁾などが提案された。

文 献

- 1) *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH) 2010*.
- 2) N. T. Shaked *et al.*: *DH* (2010) DTuC1.
- 3) M. F. Toy *et al.*: *DH* (2010) DtuA5.
- 4) M. Potcoava *et al.*: *DH* (2010) JMA35.
- 5) W. M. Ash III *et al.*: *DH* (2010) DTuA4.
- 6) 土井雄貴他：春季応物講演会 (2010) 17-a-K-3.
- 7) 恩田一寿他：*OPJ* (2010) 9pP16.
- 8) Y. Hayasaki *et al.*: *Proc. SPIE*, **7762** (2010) 77622C.
- 9) OTOM VII, http://spie.org/x648.html?product_id=850903&origin_id=x648
- 10) M. Sakakura *et al.*: *Opt. Express*, **18** (2010) 12136.
- 11) Y. Takahashi *et al.*: *DH* (2010) DMB4.
- 12) D. Liu *et al.*: *Appl. Phys. B*, **101** (2010) 817.
- 13) K. Obata *et al.*: *Opt. Express*, **18** (2010) 17193.
- 14) 下馬場朋祿他：*Opt Express*, **18** (2010) 9955.
- 15) L. Waller *et al.*: *Opt. Express*, **18** (2010) 12552.

- 16) 吉川宣一他：春季応物講演会 (2010) 17pJ-13.
- 17) 西村隆宏他：春季応物講演会 (2010) 17aK-9.
- 18) 酒井寛人他：秋季応物講演会 (2010) 15aE-11.
- 19) N. Tate *et al.*: *Opt. Express*, **18** (2010) 7497.
- 20) 堅直也他：秋季応物講演会 (2010) 17p-NK-1.
- 21) 神菊貴司他：秋季応物講演会 (2010) 17p-NK-2.
- 22) 内藤あん奈他：春季応物講演会 (2010) 18a-J-8.
- 23) R. Horisaki *et al.*: *Appl. Phys. Express*, **3** (2010) 022501.
- 24) 福西康平他：第4回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会 (2010) 12.
- 25) 香川景一郎他：秋季応物講演会 (2010) 17a-NK-1.
- 26) 橋本賢介他：春季応物講演会 (2010) 17a-J-7.
- 27) 板倉康将他：春季応物講演会 (2010) 17a-J-8.
- 28) 来海 暁：春季応物講演会 (2010) 18p-J-6.
- 29) 間淵隆之他：春季応物講演会 (2010) 17a-J-1.
- 30) 篠崎陽平他：3次元画像コンファレンス (2010) 5-1.
- 31) 前田有希他：秋季応物講演会 (2010) 17p-NK-4.
- 32) 大矢俊介他：*OPJ* (2010) 9pP15.
- 33) 森口翔太他：秋季応物講演会 (2010) 17p-NK-5.
- 34) 梶本和孝他：*OPJ* (2010) 9pP14.
- 35) 生源寺類他：春季応物講演会 (2010) 17p-J-2.

6. 光 設 計

HOYA 竹内修一

6.1 概 要

2010年の光設計分野はインパクトの大きな成果があったとはいえませんが、その中で一番のトピックスは3D(三次元)元年ともいわれる市場の流れに合わせた三次元画像の撮影・表示装置に関する研究成果であろう。よくいわれるように、三次元画像は過去幾度かブームとなりながら、それらのブームは一過性に終わり、現時点でも一般消費者の手に三次元画像の撮影・表示機器が普及するまでには至っていない。そして、今回のブームがそれに倣う可能性もありうる。しかし、近年の撮像素子の高速化や撮像光学系の高性能化、画像処理技術の向上、記録媒体の大容量化、そしてそれらの低価格化によって、ようやく観賞用として十分に楽しめる三次元画像を手軽に扱える環境が整ってきたともいえる。おもちゃでしかなかったデジタルスチルカメラが突如として急速に進化しデジカメとして一般に普及したように、三次元画像機器が世の中のスタンダードになる日が近いという可能性も十分にある。その雰囲気も多くの人々が感じ取っているのか、光設計研究グループが6月に開催した「3D映像技術と光設計」という研究会では、8件の講演に約100名が集まった。光学機器の設計・開発のみならず、市場動向¹⁾や三次元映像を見ることによる人体への影響²⁾、人間工学の観点を考慮した三次元ディスプレイの標準化³⁾も議論され、普段にも増して活発な意見交換がなされていた。

それ以外の成果としては、自由曲面を用いた光学系や、

液晶を利用した偏光制御によるレーザー顕微鏡の高解像化^{4,5)}、国立天文台などがハワイ島マウナケア山頂に建設を計画している口径30メートルの超大型望遠鏡に関する技術⁶⁻⁸⁾、近年のキーワードのひとつである環境技術に関連して、太陽エネルギーを発電に利用するビームダウン式集光太陽熱発電システムが報告されている⁹⁾。

また、製品から少し離れた光学設計法についても地道な研究が続けられており、近年議論されている非球面定義式のよりよい形について議論を深化させる動きや、収差係数の回折光学系への拡張、収差変化の理論的な考察などが示された。

これらの成果について、以下に紹介していく。

6.2 三次元画像関連技術

高画質の三次元ディスプレイといえばメガネを使って見るものが主流だが、メガネなしで見ることのできる高画質ディスプレイがCEATEC JAPAN 2010に出展され、話題を集めた。このディスプレイに使われているインテグラルイメージング方式は新しい方式というわけではないが、用いるレンズアレイのピッチを要素画素ピッチと一致させた平行光線再生・一次元レンズアレイ式とよばれる手法を採用することにより、視距離、視域(視野角)の拡大や最適化が実現された¹⁰⁾。また、インテグラル方式で用いる画像の撮影のために、撮影用レンズのレンズアレイにGRIN(屈折率分布)レンズを用いる試みも報告された¹¹⁾。そのほかにも、自然な立体感が得られる表示デバイス¹²⁾や撮影システム¹³⁾の提案があり、現時点では多くの人々が不満に感じている部分を少しでも改善しようという動きが活発である。コストや画面サイズ、画質の面で万人が満足するというレベルまで来たとはいえないが、関連技術の今後の進展に注目しておきたい分野である。

6.3 自由曲面を用いた光学系

自由曲面(一定の回転軸をもたない非球面)は、少ない部品点数で光学系を構成できる、あるいは非軸対称な構成とすることで光学系を小型化できるなどの利点がある。その自由曲面を利用した光学系の例として、デジタルカメラに搭載する超小型プロジェクターの照明光学系が報告された¹⁴⁾。この例では、2枚の自由曲面レンズを用いて照明エリアのアスペクト比を補正し、高効率化と小型化を両立している。

また、自由曲面を用いることで薄型化しながらも、1つの自由曲面プリズムあたり水平画角 60° を有し、それを3つ並べることで水平画角 180° を実現したカメラが報告された¹⁵⁾。交差点監視などで威力を発揮すると考えられる。非軸対称ではない自由曲面を用いた水平画角 180° の単眼

光学系も報告されている¹⁶⁾。

自由曲面をもつ光学素子の加工技術も年々向上しており、自由曲面素子を有する光学系の適用範囲は今後大きく広がっていく可能性がある。

6.4 光学設計法

非球面の表現で最もよく使われているのは、二次曲面をベースとし、偶数次の高次項の冪級数を付加した形式である。しかし、近年はこの形式では限界があるとの議論がなされている。それを打開する手段として、新たな非球面定義式¹⁷⁾や、奇数次項も加えた冪級数の使用¹⁸⁾の有用性が提議された。このような議論は光学系の最適化設計を効率よく進めるために欠かせないものと思われる。数学的な議論と実設計との対比による検証が中心となっているが、単純な数学的議論ではなく、収差論から導かれる収差係数との関連づけが議論されると、より有意義となるように思われる。

収差係数について、色収差係数の計算を回折光学系にまで拡張した計算式が示された¹⁹⁾。この報告では、光学面の入射側、出射側の関係を表す重要な式であるアッペの不変量が回折光学系では成り立たないことに対して、アッペの計算量という概念を導入することで、色収差係数のみならずザイデルの5収差すべてについて式の表現形式を簡便にし、かつその物理的意味合いを明確にすることも成功している。

非共軸光学系(off-axial光学系)では収差補正の見通しが悪く、コンピューターソフトウェアによる自動最適化の結果を用いることが多いが、off-axial光学系を扱った近軸理論、収差論を活用して設計を行い、収差係数と実際の収差の対応をとる試みが報告された²⁰⁾。off-axial光学系で発生する収差をテンソル成分で表現し、各面で発生する収差から、例えば軸上非点収差を補正できる構成を導出している。

物体距離が変化した際の収差変化について、像面が射出瞳を中心とする球面であるとき、コマの変化が生じないことが導出され、実際の設計事例でも確認された²¹⁾。このことは、射出瞳が無限遠方にある像側テレセントリック光学系であれば、平坦な像面をもつ光学系でも物体距離変化に対してコマの変化が生じにくいことを示している。このような理論的な検証により光学設計の限界と可能性を明らかにしていくことは、非常に重要である。

6.5 展 望

技術の動向としては、三次元画像は引き続き重要なテーマになるだろう。また、環境関連技術や生体・医療応用技術への光設計の寄与も期待される。デジタルカメラなど

の撮像光学系は高画素化が進み回折限界に近い結像性能にまで到達しており、今後の展開の見通しは立てづらいが、自由曲面の活用などによる進展がないか注目していききたい。液晶をはじめとする能動光学素子の開発やその適用にも注意が必要である。

光設計は、日本が国際的に高い競争力をもつ技術分野のひとつである。小型で高性能なズームレンズ、多機能素子を効果的に活用した光記録光学系、三次元画像の撮影・表示機器など、実用的な光学機器はその多くが日本発のものであることがそれを物語る。しかし、その設計理論、技術の優越は国内・国外を問わず高く評価されているとはいいがたく、ともすれば設計はコンピューターソフトウェアによる最適化の成果でしかないとみなされているきらいがある。これは、ひとつには日本国内に光設計を扱う大学、研究機関が少なく、設計理論、技術が主として光学メーカー各社の社内で醸成され、重要なノウハウとしてなかなか表に出てこないことが原因と考えられる。

このような中で、収差論の拡張、収差論に基づいた光学設計の報告や、今や光学設計に欠かせない非球面に関する議論・提案が地道に行われていることは非常に有意義であると思われる。このような研究がより活発に行われ、切磋琢磨していきながら、最適化では答えの出ない新規な光学系の創出を続けていくことが、日本の光設計の優位性を保つために今後いつそう必要になるであろう。

文 献

- 1) 松本郁夫：光設計研究グループ機関誌，No. 44 (2010) 3.
- 2) 小林真理子：光設計研究グループ機関誌，No. 44 (2010) 9.
- 3) 上原伸一：光設計研究グループ機関誌，No. 44 (2010) 15.
- 4) 栗原 誠他：光学シンポジウム (2010) 講演番号 7.
- 5) 橋本信幸他：OPJ (2010) 10pA3.
- 6) 家 正則他：光学シンポジウム (2010) 講演番号 20.
- 7) 秋田谷洋他：光学シンポジウム (2010) 講演番号 21.
- 8) 高見英樹他：光学シンポジウム (2010) 講演番号 22.
- 9) 森 伸芳：光学シンポジウム (2010) 講演番号 10.
- 10) 最首達男他：光設計研究グループ機関誌，No. 44 (2010) 29.
- 11) 岡野文男他：光学シンポジウム (2010) 講演番号 1.
- 12) 高木康博：光設計研究グループ機関誌，No.44 (2010) 41.
- 13) 竹内幸一：光設計研究グループ機関誌，No.44 (2010) 46.
- 14) 後藤孝夫：光学シンポジウム (2010) 講演番号 14.
- 15) K. Takahashi: ODF (2010) 19S1-08.
- 16) 研野孝吉：光学シンポジウム (2010) 講演番号 15.
- 17) G. Forbes: ODF (2010) 19S1-06.
- 18) M. Shibuya *et al.*: ODF (2010) 19S1-07.
- 19) 荒木敬介：OPJ (2010) 9aD1.
- 20) 若園 毅他：OPJ (2010) 9aD2.
- 21) 長谷隼佑他：OPJ (2010) 9aD3.

7. 微小光学

リコー 横森 清

7.1 概 要

当該分野は微小光学の基礎研究からシステムや応用までを含んでおり、微小光学に関する理論や設計、材料、作製、測定、受動素子、能動素子、多機能素子、集積化、実装などの技術を対象としている。また、当該技術の応用分野としては、光通信や光接続、光記録、光機器、光センシング、光情報処理、ディスプレイのほか、照明、バイオ、医療、環境などにも広がっている。微小光学研究グループは、これらを対象として科学技術情報の交換や討論を行う場を提供してきており、年 4 回の研究会のほか、微小光学国際会議 (Microoptics Conference: MOC) や微小光学セミナーを開催している。これらの会議や春・秋の応用物理学学会講演会、OPJ 2010 などを通じてみてくる 2010 年の特徴は、レーザー 50 周年 (Laserfest) を契機とするさまざまなレーザー研究の進展、光機能材料の多様化、応用面では、3D をはじめとする高臨場感ディスプレイ、再び注目を浴びるようになったコヒーレント光通信の活発化などである。

7.2 レーザー光源

1960 年のメイマンによるルビーレーザーパルス発振、ジャバンによる He-Ne レーザー連続発振から 50 年経ち、ルビーレーザーからナノレーザーに至るまでのレーザー 50 年の展開が、生き字引ともいえる霜田より報告された¹⁾。

半導体レーザーの発振波長域の拡大の試みでは、これまで未開拓であった 320 nm 以下の深紫外レーザーを目指した研究が進んでおり、AlGaIn 系半導体を使った電流注入型レーザー開発の現状とそれを実現するための研究課題が提示された²⁾。長波長側では、ガスセンシングへの適用を狙った 2 μm 付近の発振波長をもつ InP 基板上に作製された高歪み In (Ga) As 量子井戸構造 DFB (Distributed Feedback) レーザーにより、CO₂ (2.0 μm)、CO (2.3 μm) の吸収線の検出を確認した³⁾。InGaIn 系青紫色面発光レーザーでは室温での連続発振が実現されたが、実用化に向けた長寿命化のために長時間エイジングでの劣化メカニズムの解析が進んでいる⁴⁾。超小型プロジェクター用光源では、赤色域の高出力化が望まれているが、端面窓構造を有する発振波長 638 nm の AlGaInP 系ブロードエリア半導体レーザーにより、定格出力 300 mW で安定して長時間動作することが確認された⁵⁾。

グラフェンの発見者が 2010 年のノーベル物理学賞を受賞したが、光照射法で作製したグラフェンでモード同期光

ファイバーレーザーを構成し、980 nm 半導体レーザー (80 mW) で励起して 1.532 μm を発振させ、グラフェンの吸収飽和の緩和が非常に高速 (1 ps 以下) であることを示した⁶⁾。

7.3 光機能材料

ナノテクノロジーの進展に伴い、微小光学分野でもナノメートルオーダーで物質構造を制御することにより新規な機能を実現する光材料の開発が進んでいる。

均一な粒径 (約 5 nm) の銀ナノ微粒子を自己組織化によりほぼ最密充填で二次元に並べることで、局在プラズモン共鳴による電場の増強を確認した。シート状にすることで、欠陥やドメインバウンダリーがあっても、その影響を受けずに均一な電場励起が実現できる⁷⁾。高屈折率のプラスチックレンズの実現のため、高屈折率光硬化ナノコンポジット材料の開発が進んでいる。高屈折率の酸化チタンあるいは酸化ジルコニウムのナノ粒子を UV 硬化樹脂中に分散させることで、屈折率 1.7 以上、アッベ数 25~35 を実現したが、ナノ粒子量を増加させることで吸水率の増加、脆性の悪化などの課題もある⁸⁾。モルフォ蝶など、自然界には色素ではなく構造色とよばれる微細な構造で発色するものがあるが、液晶のらせん構造を制御することで、人工的に構造色を創り出すことができる。生物ナノ構造を解明しながら、新しい光学材料の創成が進められている⁹⁾。ニオブ酸リチウム (LN) のような光学結晶に代わり、ガラスに非線形性を付与して安価な光機能デバイスを作製することを目的として、非線形光学結晶を析出させたガラス材料の開発が進んでいる¹⁰⁾。

7.4 高臨場感ディスプレイ

2010 年は 3D テレビジョンが本格的に市場に出回った年であったが、これにより手軽に臨場感をもつ映像を見ることができるようになった。高い臨場感を達成するにはいろいろな手段があるが、ここでは立体ディスプレイや高精細大画面ディスプレイを取り上げる。現在の 3D テレビジョンは偏光メガネの着用が必須であるが、究極の高臨場感ディスプレイである裸眼での立体表示の開発が加速している。水平方向に 256 視点表示を実現した超多眼立体ディスプレイや、水平方向だけでなく垂直方向にも多視点となるインテグラルフोटोगラフィーがある¹¹⁾。人間の視覚機能に負担を強いな立体表示方式としてホログラフィーがあり、感光材料を使わずリアルタイムに表示できる空間光変調器を用いた電子ホログラフィーによる立体動画像表示が試みられている¹²⁾。臨場感は、高精細でスクリーンを大型化するだけで高めることができる。この目的のために、デジタルシネマ規格は 4K \times 2K という高精細映像であ

り、映画以外にもデジタルサイネージやネットワークゲーム、スポーツ観戦などに用途が広がっている¹³⁾。

7.5 コヒーレント光通信

コヒーレント光通信は周波数や位相を利用して大容量化するもので、近年デジタルコヒーレント光通信として再び注目を浴びている。従来の光技術と高速デジタル信号処理技術の融合により、分散補償や位相雑音、偏波制御などを受信側の信号処理で行うことができる¹⁴⁾。これを実現する技術のひとつとして、多値光変調技術がある。2 つのマッハ・ツェンダー型変調器を直列接続させたものを 2 並列させたモノリシック集積デバイスにより、高速な 16QAM (quadrature amplitude modulation: 直交振幅変調) の伝送が実現できた¹⁵⁾。さらに光位相変調器の特性改善などによる、光 1 チャネルあたり 400 Gbps を目指した高速変復調技術の開発が進んでいる¹⁶⁾。さらなる大容量伝送のために、① 超多値変調による周波数利用効率の向上¹⁷⁾、② マルチコア光ファイバー伝送路技術、③ モード分割多重化技術という 3 つの M が提示された¹⁸⁾。また、多値位相変調方式を実現する石英系ガラスプレーナ光波回路を用いた変調器や復調器の開発も進んでいる¹⁹⁾。

7.6 その他

光の新しい原理として、透明な材料でできているにもかかわらず、中からは光がまったく出られない不思議な箱の提案があった²⁰⁾。正四角錐を立方体の各面に乗せ立方体部分を中空にした構造である。囲われた部分の屈折率を 2.613 以上にすると、中空内にある光線は内部で繰り返し反射をしても外面の斜面で必ず全反射となり、外に出られない。

光デバイスでは、微小光学研究グループの創立当時、複写機用の等倍結像素子として屈折率分布型ガラスロッドレンズアレイが実用になっていたが、それと同等の性能をもつ低色収差屈折率分布型プラスチックロッドレンズが実用になった²¹⁾。

光記録では、BD (Blu-ray Disc) をベースに 16 層を積層した光ディスクを試作し、記録再生実験により、片面 500 GB を原理検証した^{22,23)}。テラバイト光ディスクの実現に一步近づいたといえる。

新規なデバイスでは時空間レンズが提案された²⁴⁾。フェムト秒レーザーを集光すると集光点で波長分散によりパルス幅が伸張してしまうが、多重化回折型時空間レンズを用いることで各波長のビームは色収差なく焦点でのみ重なり、超短パルス化できる。

7.7 展 望

当該分野の今後の展開を考えると、近年使われるように

なってきたグリーン・フォトンクスとよばれる技術分野が注目される。地球環境保全にかかわる技術であり、LED照明や太陽光利用など、いかに少ないエネルギーで機能するデバイス、システムを構築するか(省エネ)、あるいは環境負荷の少ないエネルギーをどうやって創り出すか(創エネ)という課題を解決する技術分野である。

文 献

- 1) 霜田光一: Microoptics News, **28**, No. 1 (2010) 1.
- 2) 川西英雄: Microoptics News, **28**, No. 1 (2010) 7.
- 3) 佐藤具就他: Microoptics News, **28**, No. 1 (2010) 13.
- 4) 大前邦途他: Microoptics News, **28**, No. 1 (2010) 19.
- 5) 八木哲哉他: Microoptics News, **28**, No. 1 (2010) 31.
- 6) A. Martinez *et al.*: MOC (2010) MD3.
- 7) 玉田 薫他: Microoptics News, **28**, No. 4 (2010) 1.
- 8) 上野信彦: Microoptics News, **28**, No. 4 (2010) 13.
- 9) 渡辺順次: Microoptics News, **28**, No. 4 (2010) 19.
- 10) 高橋儀宏他: Microoptics News, **28**, No. 4 (2010) 55.
- 11) 高木康博: Microoptics News, **28**, No. 2 (2010) 1.
- 12) 山本健詞他: Microoptics News, **28**, No. 2 (2010) 7.
- 13) 太田直久: Microoptics News, **28**, No. 2 (2010) 19.
- 14) 菊池和朗: Microoptics News, **28**, No. 3 (2010) 1.
- 15) G. Lu *et al.*: ECOC (2010) Mo.1. F.3.
- 16) 川西哲也: Microoptics News, **28**, No. 3 (2010) 13.
- 17) M. Nakazawa *et al.*: ECOC (2010) PD.2.3.
- 18) 中沢正隆: Microoptics News, **28**, No. 3 (2010) 19.
- 19) 高橋 浩: Microoptics News, **28**, No. 3 (2010) 43.
- 20) 小林哲郎: 春季応物講演会 (2010) 18a-K-1.
- 21) 入江菊枝他: OPJ (2010) 10pA1.
- 22) T. Kikukawa *et al.*: ISOM (2010) Th-L-06.
- 23) M. Ogasawara *et al.*: ISOM (2010) Th-L-07.
- 24) 木村公平: 秋季応物講演会 (2010) 17a-D-8.

8. ホログラフィックディスプレイ

千葉大 下馬場朋禄

8.1 概 要

ホログラフィーは物体光の記録と再生を行うことができるため、この特性を応用した三次元ディスプレイ(ホログラフィックディスプレイ)の実用化が期待されている。ホログラフィックディスプレイは、実在物体を三次元計測して取得したデータや、コンピューターグラフィクスにより作成した三次元物体データから計算機合成ホログラム(computer generated hologram; CGH)を計算し、そのCGHを液晶ディスプレイ(liquid crystal display; LCD)などの空間光変調器上に表示を行い、再生光を照射することで空間に三次元物体を再生することができる。原理的には、このようなシステムを構築すれば理想的な三次元ディスプレイが構築できるが、以下のような問題が実用化の妨げとなっている。コンピューターで光波伝播を計算することでCGHを作成することができるが、その計算量は三次元物体のデータ量とCGHの画素数の積に比例し、実用に

耐えうる三次元像を再生可能なCGHをビデオレートで計算することは困難な状況にある。また、CGHは光の物体光と参照光の干渉現象をシミュレートして計算するため、その縞間隔は波長オーダーとなる。このような微細なパターンを表示できる空間光変調器は存在しないため、その再生像の視域(像に見える範囲)や視野(像サイズ)が制限される。本章では、これらの問題に対しての2010年の進展について述べる。

8.2 CGH計算の進展

ホログラフィックディスプレイ用途のCGH計算は、三次元物体データの表現方法により2種類に大別できる。1つはコンピューターグラフィクス(CG)分野で一般的なポリゴンの集合として三次元物体を表現するポリゴンモデル、もう1つは点光源の集合として表現する点光源モデルである。

ポリゴンモデルは、各ポリゴンから発せられる物体光をCGH面上で足し合わせ、参照光と干渉させてCGHの計算を行う。ポリゴンがCGHと平行であれば従来のフレネル回折や角スペクトル法(angular spectrum method)などの高速フーリエ変換(FFT: fast Fourier transform)に基づいた回折計算を使うが、ポリゴンはCGH面に対して傾いているものもあり、一般的な回折計算の適用が困難であった。傾いた面に対して回折計算ができる手法が開発され、ポリゴンモデルの研究が大幅に進展した。その最新成果¹⁻⁴⁾として、この方法を用いて作成した超高精細・大面積(画素ピッチ $\sim 1\mu\text{m}$, 画素数8ギガピクセル)のCGHを、レーザーリソグラフィ技術によりクロム膜付き石英基板上的フォトレジスト上にパターン描画し、現像後にクロム膜をエッチングすることで作成した。その視域角は 46×37 に達する。この成果はCG分野で最も権威のある国際会議SIGGRAPH(採択率10~20%)にも採択されている⁴⁾。また、これらの研究では、シフト角スペクトル法とよばれる手法が使われている⁵⁾。シフト角スペクトル法は、角スペクトル法の弱点であった光軸から離れた場合に適応可能であり、長距離伝播時のエリアジングを周波数領域のフィルタリングによる抑制することにも成功している。

ポリゴンの拡散・反射特性に関する研究もさかんに行われた。ポリゴンが大きい場合、そこから発する光の回折角が小さいためCGH全面に光波がいきわたらない。これを解決するために、従来手法としてポリゴンを表現する表面関数(複素関数)の位相成分にランダム位相を与えることが行われている。

文献6)は三次元物体の表面特性をランダム位相ではな

く FDTD (finite difference time domain) 法を用いて厳密計算をする方法を提案し、従来手法では表現が困難であった完全鏡面、完全散乱反射以外の反射特性を表現することに成功している⁶⁾。この方法では、JIS (Japanese Industrial Standards) で規定されている表面粗さパラメーターを用いて作成された表面構造からの散乱光を FDTD 法によりシミュレーションを行う。三次元物体と CGH 面は離れており、FDTD 法でフルに計算すると多くのメモリー・計算時間が必要になるため、ポリゴン面近傍の物体光分布を FDTD 法で取得し、その後、FFT ベースの回折計算を行うことで CGH 面上での物体光波の分布を得ている。

文献 1) では、ポリゴンの表面関数に対して CG でよく使われるグローシェーディングやフラットシェーディングとよばれるシェーディング手法 (ポリゴンに対する陰影付け) を適用する方法を検討している。これらのシェーディングをポリゴンの表面関数の振幅部分に適用し、位相部分は Gerchberg-Saxton アルゴリズムにより反復最適化を行うことで決定する。テクスチャマッピングに関しても、同様の方法で表面関数の位相成分を決定している¹⁾。

文献 7) では、Phong モデルを使用して環境光、拡散光、反射光を再現した CGH を作成している。その CGH を 8K4K サイズの LCD パネル上に表示することで、動的にこの効果を表した三次元再生像を得ることに成功している⁷⁾。

文献 8) ではポリゴンで表現された三次元物体と CGH 面の間に光線サンプリング面と名づけた仮想的な面を導入し、三次元物体と光線サンプリング面間の計算は波動光学ではなく光線に基づく。この間の計算は多視点画像と同様、一般的な隠面処理や散乱特性などを定義できることが有利になる。光線サンプリング面から CGH 面までは回折計算を行う。この方法により得られた CGH をホログラフィックプリンターでフィルムに焼きこみ、光学再生による再生像の評価を行っている⁸⁾。

点光源モデルの CGH 計算で、CGH 上のある点を計算する場合、三次元物体を構成する点光源から発する光波をその点ですべて足し合わせる必要がある。この計算法では、三次元物体点数と CGH の解像度の積に比例して計算量が増加してしまう欠点がある。文献 9) はイメージホログラムの特性を利用したカラー CGH 作成方法を報告している⁹⁾。イメージホログラムは三次元物体を CGH の近傍に配置するため、三次元物体の各点光源が発する光波の CGH 面上での光波分布は狭い領域に限られ、計算量を大幅に削減することができる。文献 10) では、物体データと CGH の間に仮想的な面を用意し、はじめに三次元物体か

ら出る光波の複素振幅場を仮想面に記録する¹⁰⁾。このとき、仮想面を三次元物体の近傍に配置すれば、この計算量を大幅に削減できる。次に、仮想面から CGH への回折計算を行い、CGH を生成する。回折計算部分に GPU を併用することで、3 万点程度の三次元物体から 2,048×2,048 画素の CGH を秒間 10 枚作成することができる。

多くの数値計算と同様、ホログラフィックディスプレイ分野でもその計算の高速化のために GPU がよく使われるようになった。ポリゴンモデルの GPU による高速化¹¹⁾ や、点光源モデルを GPU により高速化したリアルタイムカラー再生¹²⁾ についてが報告されている。NVIDIA 社の GPU が一般的に使われるが、AMD 社の GPU による CGH 計算の報告¹³⁾ も行われている。

8.3 三次元情報の取得と表示系の進展

CCD (charge coupled device) などの撮像素子により実在物体のホログラムを撮影するデジタルホログラフィーは、ホログラムからの回折計算を行うことでホログラムに記録された三次元情報をコンピューター上に再生できる。ホログラムには目的の物体光以外に共役光と直接光が含まれるため、再生像にこれらが重畳する問題がある。これを解決する方法として、参照光に対して位相シフトを行い、3 から 4 枚のホログラムを撮影する位相シフトデジタルホログラフィーが提案されているが、ワンショット計測が困難である。文献 14) ではランダム参照光を使い、撮像素子の隣接する 4 画素内の物体光の強度・位相は変化しないと仮定し、ランダム参照光の強度も変化しないと仮定することで、ワンショットでの位相シフトデジタルホログラフィーを実現している¹⁴⁾。文献 15) は、撮像素子に偏光子アレイを精密に張り合わせることでワンショットでの位相シフトデジタルホログラフィーを実現している¹⁵⁾。

ホログラムの干渉縞間隔は光の波長オーダーとなるため、撮像素子のピクセルピッチに微細なものが必要であり、大きな三次元物体を記録するためには解像度を大きく取る必要がある。文献 16) では、レンズレス・フーリエホログラフィーを用いることでホログラムの干渉縞間隔を緩やかにし、撮像素子をステージで移動させることで高解像度のホログラムを取得している¹⁶⁾。さらに、文献 17) では、この方法により取得した三次元情報と仮想物体の三次元物体から文献 1~4) の方法を用いて大規模 CGH を作成し、実在物体と仮想物体を合成した三次元再生像を得ることに成功している¹⁷⁾。

文献 18) は、一般的なカメラを自由に配置することで三次元情報を取得し CGH を生成する手法を提案している¹⁸⁾。三次元物体からカメラの結像面 (CGH 面) に入射す

る光を平面波と仮定し、その入射角によって平面波のCGH面上での空間周波数を求めCGHを生成する。カメラがホログラム面に対して傾いている場合や、カメラの設置位置がCGH面と仮定した位置と異なる場合についても検討されている。

文献19)では、多視点画像から三次元物体の点光源情報を抽出しCGHを生成している¹⁹⁾。点光源情報の抽出は、カメラで取得した2枚の画像のある領域の相関を取り、三角計測を利用することで点光源座標を取得している。また、計測された点光源群からフレネル回折を利用してCGHの計算を行っている。三次元情報の取得とCGHの計算に時間がかかるため、GPUを利用して計算の高速化を図っている。

独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の超臨場感基盤グループは、2010年のCEATECH Japanで視域角15度、表示サイズ対角4cmでカラー三次元像を動画再生できるシステムを公開した²⁰⁾。このシステムにはカラー化や、視域拡大、共役光や直接光を除去するための光学系が組み込まれ²¹⁾、対角4cmの3300万画素の高精細LCDパネルを3枚使い、システム全体で約1億画素のホログラムを再現している。LCDパネル3枚を組み合わせることで、1枚の場合の約3倍となる水平方向15度の視域角を得た。また、文献22)は、1枚のLCDパネルに異なる角度で再生光を時分割入射することで、視域を拡大する手法を提案している²²⁾。この際、再生像の結像位置のずれを抑制するため、CGH近傍に三次元物体を配置する工夫を行っている。

ホログラフィックディスプレイは全方向の視差をもつことが利点だが、現在の技術では全方向視差をもつCGHを表示できる素子やコンピューターの計算能力を得ることが困難な状況である。垂直方向の視差を捨てることで、水平方向の視域角を拡大する研究が行われている^{23,24)}。この方法は、高フレームレートのDMD(digital micromirror device)と水平走査を用いた方式で、再生像の大きさは約7cm×5cm、視域角は15°となった。

8.4 その他

CGHはLCD素子などに表示することができるが、解像度および画素ピッチが粗く十分な回折角が取れないため、その再生像は視域・視野ともに小さなものとなっている。静止画再生となるが十分な視域・視野をもった再生像を得るために、ホログラフィックプリンター(フリンジプリンター)の開発が進められている。文献25)では、空間分解能が0.44 μm 、解像度100Gピクセルを超えるCGHを出力可能なホログラフィックプリンターを用いて、実像再生型CGHの検討を行っている²⁵⁾。

ホログラフィックディスプレイのシステムの大規模化に伴い、デバイス間のCGHデータの転送がボトルネックとなる場合がある。CGHのデータ転送に関する研究は後手に回っている感があるが、文献26)は白色LEDを用いたCGHの光空間伝送の基礎検討を行っている²⁶⁾。

CGH計算にはさまざまな方法が提案されており、各方法の優劣を比較するため、数値的な再生像の誤差を比較する必要がある。CGHは奥行き方向のパラメーターを与えればその位置での再生像を得ることができるが、この場合、再生像計算と誤差計算をさまざまな奥行きパラメーターに対して行う必要がある。文献27)では、フレネル回折積分がユニタリー変換である特性を利用してCGH自体の誤差を比較すればよいことを示した²⁷⁾。

文献28)は、初心者がホログラムを体感的に学べるよう、拡張現実技術(augmented reality; AR)を利用したツールの開発について報告を行っている²⁸⁾。

8.5 展 望

本章では、2010年の国内でのホログラフィックディスプレイ関連研究の動向について述べた。CGH計算において、計算高速化のアルゴリズムとともにGPUを利用した高速化についての報告が目立った。GPUの利用に関しては、CGH計算との親和性の高さやGPU自体の性能向上から、今後もさかんに利用されると予想される。また、CG技術とCGHの融合の報告が、いくつかのグループから報告されている。現在は初歩的なCG技術との融合にとどまっているが、今後はさらに複雑なCG技術との融合が研究されていくことが予想される。実在物体をホログラフィックディスプレイで再生するためにデジタルホログラフイー、多視点画像や自由視点カメラを利用して三次元情報を取得しCGHを作成する方法の提案がなされた。ホログラフィックディスプレイの光学系においては、水平視差に限定する方法や8K4K-LCDパネルを使用した大規模なシステムについての報告が行われた。これらの研究ではさらなるシステムの大規模化とともに、新規デバイス(フォトリラクティブ素子など)を利用したシステムの研究が期待される。

文 献

- 1) 松島恭治: 3次元画像コンファレンス論文集(2010) P-6.
- 2) 東健太郎: HODIC Circular, **30**, No.3 (2010) 9.
- 3) K. Matsushima: *IDW* (2010) 1237.
- 4) K. Matsushima *et al.*: *SIGGRAPH* (2010) 120.
- 5) K. Matsushima: *Opt. Express*, **18** (2010) 18453.
- 6) 市川 翼: 3次元画像コンファレンス論文集(2010) 2-3.
- 7) K. Yamamoto: *IUCS* (2010) 193.
- 8) 涌波光喜: 3次元画像コンファレンス論文集(2010) 2-1.

- 9) 北山亮太：映像情報メディア学会誌, **64** (2010) 1744.
- 10) T. Shimobaba *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 19504.
- 11) 寺口 功：3次元画像コンファレンス論文集 (2010) P-16.
- 12) H. Nakayama *et al.*: Appl. Opt., **49** (2010) 5993.
- 13) T. Shimobaba *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 9955.
- 14) T. Nomura *et al.*: Opt. Lett., **35** (2010) 2281.
- 15) 田原 樹：HODIC Circular, **30**, No 4 (2010) 5.
- 16) 有馬恭旭：HODIC Circular, **30**, No 3 (2010) 5.
- 17) 有馬恭旭：OPJ (2010) 9pP13.
- 18) 林 規之：3次元画像コンファレンス論文集 (2010) 2-4.
- 19) 倉橋孝徳：3次元画像コンファレンス論文集 (2010) P-8.
- 20) <http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h22/100928/100928.html>
- 21) 三科智之：HODIC Circular, **30**, No 2 (2010) 12.
- 22) 的場 修：HODIC Circular, **30**, No 4 (2010) 13.
- 23) 高木康博：HODIC Circular, **30**, No.2 (2010) 9.
- 24) Y. Takaki *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 11327.
- 25) 小澤浩行：3次元画像コンファレンス論文集 (2010) P-4.
- 26) 戸塚真隆：HODIC Circular, **30**, No. 3 (2010) 25.
- 27) T. Kiwaki *et al.*: Opt. Lett., **35** (2010) 1112.
- 28) 柴田将志：HODIC Circular, **30**, No. 2 (2010) 17.

9. 光波シンセシス

筑波大 伊藤雅英

9.1 概 要

光波シンセシスとは、光波の諸性質を制御し、所望の特性をもつ“光”を自在に合成し活用することであり、情報通信、物性研究、材料加工、生体工学、化学合成・分析等の理学・工学的応用の各方面から、潜在的・顕在的に強く求められている分野である。

光波の性質を決めるパラメーターには、振幅、位相、偏光、周波数、波面、パルス波形、コヒーレンス、スペクトル、色などがある。こうしたパラメーターを包括的に俯瞰し、制御し、統合することにより、光学、レーザー、光通信、画像工学などの既存の枠組みを超えて議論を行うことが可能となる。

近年、紫外半導体レーザー、半導体レーザー励起固体レーザー、高機能ファイバーレーザー、全固体超短パルスレーザー等、レーザー光源の発展はめざましく、また、非線形光学素子、波長変換素子、空間光変調器、適応光学素子等、光デバイスの性能向上も著しい。これらのデバイスを複合的に用いることにより、“光波”を使う、あるいは使おうとしている研究者が相互に情報交換および議論を行い、光技術に新たなブレイクスルーをもたらすことを目指している。

9.2 中赤外領域での波形整形

中赤外とは波長3~30 μm の波長帯域であり、分子振動モードに多くの共鳴がある。共鳴周波数は分子に固有のものばかりではなく、分子構造や周囲の環境によっても影響

を受けることが知られている。これまでに、多くの分光分析技術が光源開発と検出技術の両面から研究開発されてきた¹⁾。しかしながら、この波長域には、時間分光などに使用可能なコヒーレンスが高くかつ高繰り返しパルス光源がなかった。新しい光源の提案として、側面励起バナデートレーザー増幅器を用いた高出力中赤外ピコ秒レーザーシステムがある^{2,3)}。また、発生した光波を音響光学素子を用いて、周波数領域で振幅と位相を独立に制御することにより、時間領域で波形整形を行い、測定対象に最適な波形整形を行うこともできるようになってきた⁴⁾。

9.3 波長変換技術

コヒーレントな波長域を拡大する手法として、二次の非線形光学効果を用いた波長変換が広く用いられている。代表的な非線形材料であるLiNbO₃では、数 μm より長い波長の変換はその分光特性上困難である。近赤外、中赤外波長域で高い非線形性をもつGaAsなどの立方晶化合物半導体結晶を用いた波長変換の研究が進められている⁵⁾。特に、半導体レーザーとも相性のよいGaAs/AlGaAs擬似位相整合導波路デバイスが注目されている⁶⁾。

一方、中赤外線とミリ波の間のテラヘルツ領域においても、光源および検出器の開発が行われている。チェレンコフ型位相整合を用いた、広範囲で波長可変の高輝度テラヘルツ光源が報告されている⁷⁾。また、有機非線形結晶DAST (4-dimethyl amino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate)などを用いたコリニア位相整合型のテラヘルツ光源および検出器も高効率で高輝度なコヒーレントな光源を実現する上で有望である⁸⁾。

9.4 トポロジカル位相制御

一般に用いられる伝搬光は主として平面波であり、等位相面は進行方向に垂直な平面となっている。現在積極的に研究が進められている伝搬モードのひとつに、ラゲール・ガウス (Laguerre-Gauss; LG) モードがある。LGモードの光波は等位相面が螺旋状をしていて、中心が位相の特異点となり、強度分布がドーナツ状になる。この特異な波面は、光の軌道角運動量を介して物質と相互作用をすることが報告されている⁹⁾。こうした特殊な波面の発生方法についても研究が行われている。波面変換プログラムを用いることにより平面波をLGモード波に変換できることは以前から知られていたが、実時間性、制御自在性に問題があった。電気光学効果や液晶による偏光制御などを利用した空間光変調器を利用することにより、実時間でより高次の特異点をもつモード、あるいは多数の特異点を有する波面も生成できるようになってきている。高出力の波面を得る場合、変調に用いられる素子の光学損傷が問題となる。レー

ザー共振器や光増器に応力やひずみを与えることで、変調器の光学損傷を避けることができる¹⁰⁾。こうした波面変換の方法以外にも、軸対象波長板を用いるもの¹¹⁾など、さまざまな手法が提案されている。また、この分野の新しい基礎的なトポロジカル光学理論も研究されていて、“新しい光”の探索が行われている¹²⁾。

9.5 アダプティブ・オプティクス

強度分布や位相分布など空間領域の光波制御であるアダプティブ・オプティクスは、これまで天文学、レーザー工学、生体計測などいくつかの分野で独自に行われてきた。しかしながら、その手法や理論、用いられる素子や装置などには、共通するところが多い。光波シンセシス分野では光波制御の観点から、分野を超えて、制御のノウハウなどについても議論を行っている。空間光変調器、MEMS (microelectromechanical system) ミラー、波面センサー¹³⁾などの構成部品の仕様や、制御理論、強度と位相分布の関係などについて多次元位相空間に基づく新しい考え方も展開されている¹⁴⁾。

9.6 応用

こうした光波制御は、ホログラム、超解像加工、超微量気体計測、プラズマ加速制御、一分子分光・生体計測、光波と物質の時空間制御、化学反応量子制御など、幅広い分野にわたって革新的な飛躍をもたらすものと考えられる。以下にその一部を紹介する。

9.6.1 ホログラフィックメモリー

ホログラフィックメモリーは、記録および再生方法などはいまだ確立しておらず、多値位相変調、スペックルシフト法¹⁵⁾、角度多重¹⁶⁾、偏光制御など、強度以外の情報を用いることで高密度化を図っている。こうした記録光波特性の制御や、読み出し時における情報の抽出にも、本分野の技術が重要となってくるであろう。

9.6.2 三次元造形

ミクロンあるいはサブミクロンの加工においても、光波の制御は重要な課題である。波長以下の構造物の加工方法として、フェムト秒レーザーによる多光子吸収を用いた加工方法がある。最適化を行うことにより、ナノメートルオーダーの三次元構造物を作製することができる¹⁷⁾。また、トポロジカル位相制御による光渦による角運動量を利用したナノ粒子配列¹⁸⁾、円偏光光渦によるレーザーアブレーションなどの提案も行われている¹⁹⁾。

9.6.3 計測応用

中赤外レーザー光源を用いると、NO_xやCO₂などの環境ガス濃度や温度などを遠方から精度よく計測することができる²⁰⁾。今後光源の開発により、10メートルくらいの距

離での微量ガス濃度計測や温度計測が可能になっていくであろう。また、テラヘルツ領域での分光計測法によって、紙の特性²¹⁾、金属の腐食²²⁾、水中の不純物など、これまでの計測方法では得られなかった新しい知見が得られるようになってきている。

9.6 展 望

上述のように、光波シンセシス分野では特定の研究分野・応用分野の研究者の集まりではなく、広い分野でそのツールとなる“光波”というものの制御を目指して分野横断的に研究を行っている。一見するとテーマの一貫性が感じられないかもしれないが、光の波としての性質を極めるという点で共通している。今後は、さまざまな物理量と光波の相互作用や非線形性、多光子過程を利用した、より高次のシンセシスに展開していくものと思われる。

文 献

- 1) A. W. Mantz *et al.*: Appl. Phys. B, **100** (2010) 231.
- 2) K. Nawata *et al.*: Opt. Express, **17** (2009) 20816.
- 3) 尾松孝茂他: *OPJ* (2010) 9pFS3.
- 4) S. Ashihara *et al.*: Opt. Lett., **34** (2009) 3839.
- 5) 近藤高志: *OPJ* (2010) 9pFS2.
- 6) J. Ota *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **48** (2009) 04C110.
- 7) T. Shibuya *et al.*: Appl. Phys. Express, **2** (2009) 032302.
- 8) 南出泰重他: *OPJ* (2010) 9pFS5.
- 9) 中條恵介他: 春季応物講演会 (2010) 17a-K-14.
- 10) 岩松航輝他: 秋季応物講演会 (2010) 16a-ZG-6.
- 11) 坂本盛嗣他: 秋季応物講演会 (2010) 14a-ZC-3.
- 12) ラケシュクマールスイン他: 秋季応物講演会 (2010) 14a-ZC-5.
- 13) 鈴木二郎他: 秋季応物講演会 (2010) 15a-NK-10.
- 14) 白井智宏: 光学, **38** (2009) 496.
- 15) 紫垣政信他: 春季応物講演会 (2010) 18a-A-4.
- 16) 木下延博他: *OPJ* (2010) 9pAS2.
- 17) 旭 秀典: 春季応物講演会 (2010) 17a-E-5.
- 18) 鹿又 健他: 春季応物講演会 (2010) 17a-K-4.
- 19) 中條恵介他: *OPJ* (2010) 9pE5.
- 20) 安田崇志他: *OPJ* (2010) 9pFS4.
- 21) 公文 光他: 春季応物講演会 (2010) 17p-M-7.
- 22) 佐藤明宏他: 秋応物講演会 (2010) 15p-F-7.

10. 次世代フォトニックネットワークのための光技術

東京工業大 植之原裕行

10.1 概 要

インターネットの成長によるトラフィックの増大がフォトニックネットワーク分野では頻りに引き合いに出されるが、2010年は40/100ギガビット・イーサネット(以下40/100GbEと記す)の国際標準化(IEEE802.3ba)が6月に完了したことにより、インターネットの大容量・高速化およびそのための要素技術がまだまだ進展していく状況が裏付けられた。また長距離・大容量伝送としては、限られた波長(周波数)の中でいかに多くの情報を送ることがで

きるか、いわゆる周波数利用効率の向上技術がますます発展している。ファイバーの波長分散および偏波モード分散の影響を軽減するために信号を狭帯域化できる多値変調技術 / 多搬送波 (直交周波数分割多重 (OFDM: orthogonal frequency division multiplexing)) 技術, また受信感度の高い方式である位相変調技術・デジタルコヒーレント受信方式が研究開発の中心であった。特筆すべきは3月に開催された Optical Fiber Communication Conference (OFC 2010) にて、光ファイバー1本あたりの伝送容量の世界記録が更新され、1チャンネルあたり 21.4 Gbaud/s の信号を偏波直交・16値直交振幅変調 (16 QAM) 変調を用いて 171 Gb/s に容量を増やし、432波の波長多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 伝送を行い、69.1 Tb/s の信号を 240 km 伝送したとの報告がなされたことであろう¹⁾。以上を背景に、光の位相変調信号を扱えるデバイス技術や、複数の機能素子を集積化して小型・高密度化を狙った技術、40 Gb/s 以上の高速な領域での処理を行える非線形現象を活用した技術が進展したように思われる。

10.2 集積光デバイス技術

40/100 GbE 用の集積デバイスとしては、4波長のDFBレーザーと電界吸収型光変調器をモノリシック集積した半導体集積送信器の報告があった²⁾。温度特性にすぐれる伝導帯のバンドオフセットの大きい InAlGaAs 系歪み多重量子井戸 (MQW: multiple quantum well) 構造を活性層に用い、また吸収効率を向上するために伸張歪み MQW を EA 変調器の吸収層に用いることによって、4波長 25 Gbps 変調信号に対して消光比 8 dB、10 km 伝送結果を得ている。

デジタルコヒーレント方式用の光変調器としては、シリカ系平面光波回路 (PLC: planar lightwave circuit) とニオブ酸リチウムをハイブリッド集積したベクトル変調器構成で四値・八値位相変調 (QPSK・8PSK)・8QAM・16QAM を選択可能な変調器が実現された³⁾。位相変調部は二値の変調を基本とし、QPSK 変調器 (2個の二値位相変調器を90度の相対位相で合波することで構成) を2段連続するとともに、2段目との分岐比を調整することで実現している。低損失化するための PLC の分岐部、シリカ導波路とニオブ酸リチウム導波路の結合損失低減のためのモード整合の設計など、精密な製造技術が着々と成熟している状況がうかがえた。受信回路としては、偏波分離・局発光源との干渉・同相 / 直交位相成分を抽出する90度ハイブリッド干渉計、バランス型受光器を InP モノリシック集積した回路の動作報告⁴⁾があった。同様に、差動四値位相変調 (DQPSK: differential quadrature phase shift keying) 信号の受信回路として、同相 / 直交位相成分用の

遅延干渉計とバランス型受光器を集積したものが報告された^{5,6)}。以上のように、複雑な集積素子も着実に進展していた。

一方、波長多重化された位相変調信号をスイッチする場合には、波長依存性が小さい透過型のスイッチに優位性があり、その関連技術の報告もみられた。1×16 入出力のフェーズドアレイ型光スイッチの報告⁷⁾に引き続き、1×10 入出力スイッチの各出力に、同じものを縦続接続して1×100 入出力に拡張し、その動作実証の報告もあった⁸⁾。

従来の III-V 族半導体を用いた集積光デバイスよりも小型化を狙ったシリコンフォトニクス技術についても、発表者数の増加がみられた。以前は「フォトニック・ナノ構造」での発表が多かったが、「光制御」での発表が増えてきたのもひとつの特徴であろう。マッハ・ツェンダー干渉計型光スイッチのコアに SiGe を導入してキャリア閉じ込めを強くすることで 1.5 mW、4.7 ns 以下での低電力・高速スイッチングを実現する⁹⁾ など、性能の改善がみられた。国際会議レベルでは、デジタルコヒーレント受信回路をシリコンで作製する検討¹⁰⁾もみられた。

10.3 光信号処理技術

光信号処理としては、パケットスイッチのラベル処理や波長スイッチング部、バッファメモリー応用を目指した各種技術、例えば2モード競合半導体レーザーを用いた全光フリップ・フロップとマッハ・ツェンダー干渉計半導体光増幅器 (SOA-MZI) 型波長変換器の InP モノリシック集積回路¹¹⁾、リング共振器型波長可変レーザーと SOA (semiconductor optical amplifier) 波長変換器・アレイ導波路格子 (AWG: arrayed waveguide grating) の 8×8 入出力集積素子¹²⁾、偏波スイッチングを利用した面発光レーザー型フリップ・フロップの 40 Gbps 動作¹³⁾の報告があった。分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) の擬似位相整合 (QPM: quasi phase matching) 動作を利用した波長変換技術¹⁴⁾も着実に性能が向上している。その中で、位相変調を睨んで DQPSK 信号を PPLN を用いて電気信号に変換せず波長変換に成功した報告¹⁵⁾や、高非線形ファイバーを用いて二波長励起による四光波混合 (FWM: four wave mixing) により位相雑音を抑圧し、位相変調信号を全光的に再生する技術 (phase-sensitive amplifier とよばれる) の報告¹⁶⁾が増えるとともに、QPSK 信号への応用¹⁷⁾もみられた。今後、実用ネットワークで位相変調の適用が進むことを考えると、着目すべき技術であろう。また高周波数利用効率の変調方式として研究が活発化しつつある OFDM 変調信号の受信回路として、電子回路のみでなく光信号処理により実現しようとする試みがあり、PLC 上に

遅延線とスターカップラーを形成することにより各搬送波成分の分離を実現する手法が報告された¹⁸⁾。パッシブデバイスとしては、ポリマー光導波路の発表件数が増えており、導波特性のすぐれた分布屈折率型構造をディスプレイを用いて基板上に直接作製する手法も報告された¹⁹⁾。

10.4 その他の光デバイス技術

その他の光デバイスとしては、InAlGaAs 歪み MQW 構造の DR (distributed reflector) 型レーザーの活性領域長の短尺化により、直接変調帯域 28.3 Gbps, 85 度でのアンクルド変調動作が実現された²⁰⁾。またフォトニック結晶レーザーの活性層を InP で埋め込むことにより、20 Gbps, 8.76 fJ/bit での低パワーでの変調動作が確認されている²¹⁾。量子ドット構造としては、8 層積層 p ドープ構造により 11 GHz 変調帯域・15 Gbps NRZ (non-return-to-zero) 信号の良好な開口のアイパターンが実現され²²⁾、またコラムナドットを用いた SOA の 40 Gbps での偏波無依存・低パターン効果動作が確認された²³⁾。

10.5 展 望

フォトニックネットワークでは、しばらくは 100 Gbps デジタルコヒーレント伝送およびその高速化と送受信回路の集積化、40/100 GbE 国際標準規格の送受信回路を中心に進展していくと予想される。シリコンフォトニクスは、発光デバイスの現実的な解 (例えば横方向電流注入型半導体レーザー (室温 CW 動作と直接変調評価の報告あり)²⁴⁾ の Si 導波路への貼り付けなど) と光ファイバーとの接続の低損失・低コスト技術の実現 (i 線ステッパーでの先鋭構造の作製の報告あり)²⁵⁾ がキーになりそうであり、そのための開発も進むであろう。光信号処理技術としては、位相変調対応や、波長・変調方式無依存の観点が重要になっていくと考えられる。速度が 40 Gbps を超えた領域での実現が要求されることから、材料を含めた検討も必要になっていくであろう。

文 献

- 1) A. Sano *et al.*: OFC (2010) PDPB7.
- 2) 藤澤 剛他: 信学会ソサイエティ大会 (2010) C-4-2.
- 3) H. Yamazaki *et al.*: ECOC (2010) We.8. E.1.
- 4) C. R. Doerr *et al.*: OFC (2010) PDPB1.
- 5) R. Nagarajan *et al.*: OFC (2010) PDPB2.
- 6) 鄭 錫煥他: 信学会ソサイエティ大会 (2010) C-31-51.
- 7) I. M. Soganci 他: 信学会ソサイエティ大会 (2010) C-4-7.
- 8) I. M. Soganci *et al.*: ECOC (2010) PD1.5.
- 9) 関口茂昭他: 秋季応物講演会 (2010) 17p-P3-25.
- 10) C. R. Doerr *et al.*: ECOC (2010) PD3.6.
- 11) 武田浩司他: 春季応物講演会 (2010) 18a-N-1.
- 12) 瀬川 徹他: 秋季応物講演会 (2010) 14p-G-3.
- 13) 坂口 淳他: 信学会総合大会 (2010) C-4-10.
- 14) 梅木毅他: 秋季応物講演会 (2010) 16p-G-8.

- 15) 遊部雅生他: 秋季応物講演会 (2010) 16p-G-10.
- 16) P. A. Andrekson *et al.*: ECOC (2010) We.6. E.1.
- 17) J. Kakande *et al.*: ECOC (2010) PD3.3.
- 18) K. Takiguchi *et al.*: ECOC (2010) PD1.4.
- 19) 森川 晋他: 秋季応物講演会 (2010) 15a-G-2.
- 20) 松田 学他: 秋季応物講演会 (2010) 16p-H-8.
- 21) S. Matsuo *et al.*: ECOC (2010) PD1.6.
- 22) 田中 有他: 春季応物講演会 (2010) 19p-E-2.
- 23) 安岡奈美他: 秋季応物講演会 (2010) 17a-H-4.
- 24) 奥村忠嗣他: 春季応物講演会 (2010) 19p-E-5.
- 25) 榊原陽一他: 春季応物講演会 (2010) 17p-P3-11.

11. ボリュームホログラフィックメモリ技術

東京大 志村 努

11.1 概 要

ボリュームホログラフィックメモリーに限らず、光メモリー分野全体に対して逆風が吹いている状況は、昨年来大きく変化していない。2009 年 3 月のソニーのホログラフィックメモリー分野の開発中止がこの分野に与えた影響は大きく、特に国内の記録材料を開発する化学メーカーに与えた影響は大きかった。大きく盛り上がっていたホログラフィックメモリー関連の開発の勢いが 2009 年から低下したことは否定できず、その流れは 2010 年も続いた。長らくこの業界をリードしてきた米国の InPhase 社が、2010 年末くらいから活動休止状態にあるということの影響も大きい。特に記録材料の面でトップを走ってきたベンチャーだけに、システムメーカーにとってダメージである。

しかしながら、製品化開発という点ではペースダウンしたものの、逆にホログラフィックメモリーそのものの研究という点では、地に足の着いた着実なものになってきたといえよう。特に記録材料としてのフォトポリマーの特性と、メモリーシステムの記録再生特性との関係を明らかにしようとする動きが、ボリュームホログラフィックメモリー技術研究グループ (以下 VHM と略す) 傘下のワーキンググループ (以下 VHM-WG と略す) を中心に、静かに進行している。光照射をトリガーとするポリマー化反応と屈折率変化のメカニズムから、照射される光強度分布と記録される屈折率分布の関係を明らかにし、記録材料の最適化、システムの最適化を目指している。

開発を休止するメーカーがある一方で、逆に開発を活発化しているメーカーもある。システムとしては、日立と東芝が中心であり、国内・国際会議でさかんに発表している。記録材料としては、新日鐵化学、東芝、共栄社化学等が発表を行っている。メーカー以外では、NHK 技研がさかんに発表を行っている。また、大学、国立研究所では、北海道大学、宇都宮大学、群馬大学、東京理科大学、東京

大学, 長岡技術科学大学, 山梨大学, 豊橋技術科学大学, 和歌山大学, 神戸大学, 福岡大学, 産総研等で, システムおよび記録材料の研究が行われている。

11.2 国際・国内会議の概要

ボリュームホログラフィックメモリー関連の会議としては, 国内会議は, 春と秋の応用物理学会の講演会 (3月: 神奈川, 9月: 長崎), OPJ (11月: 東京), 第12回VHM技術研究会案内VHM研究会, (6月: 東京), 同13回研究会 (11月: 東京, OPJ内のシンポジウムとして開催) がおもなものであった。

国際会議は, Optics Data Storage Topical Meeting 2010 (ODS) (5月, Boulder, 米国), International Symposium on Optical Memory 2010 (ISOM), International Workshop on Holographic Memories and Display 2010 (IWHM&D) がおもなものである。光メモリー分野全体の発表数の減少に比して, ホログラフィックメモリー分野の発表数はさほど減っておらず, 相対的にどの会議でもホログラフィックメモリーの比率は相対的に高まっていたのが共通する現象だった。

11.3 システム関連研究

InPhase社から, 強度変調信号の検出に干渉を用いた位相検波技術を応用して, SNR (信号対ノイズ比) を向上させるコヒーレント加算の技術の提案があった¹⁾。これは以前にソニーがコリニア方式で提案していた技術と類似しており, ホログラフィックメモリーの二大方式であるコリニア方式だけでなく, ポリトピック方式にもコヒーレント加算が有効であることが示された。また, データページ配置の最適化に関する発表もあった²⁾。

東芝からは, クロストークの減少, ページ選択速度の向上などを狙った, 参照光を2本用いるシステムに関する発表が継続的に行われている^{3,4)}。日立とInPhaseからは, ポリトピック方式でありながら単一の対物レンズを用い, 系のコンパクト化を図ったモノキュラー構造に関する発表があった⁵⁾。また, NHKからは情報画像を分割し, それぞれに参照光角度間隔を最適化するなどの方法を用いた記録容量の向上に関する報告があった^{6,7)}。

大学では, おもにシミュレーションを中心とした研究が行われており, 活発に研究発表が行われている。北海道大学⁸⁻¹⁵⁾, 東京理科大学¹⁶⁻²²⁾, 東京大学^{23,24)}, 山梨大学²⁵⁾, 豊橋技術科学大学²⁶⁾, 和歌山大学²⁷⁾, 神戸大学²⁸⁻³²⁾ 等がその中心である。

11.4 材料研究

記録材料に関しては, 以前から発表はあまり多くない。ただそれでも, 東芝からは材料の長寿命化に関する発表が

あり³³⁾, またその他の材料についても, 長岡技術科学大学と群馬大学のグループから発表があった³⁴⁾。

11.5 その他

その他としては, 日亜化学がホログラフィックメモリー用405nm帯狭帯域光源についての発表を行った³⁵⁾。ホログラフィックメモリー光源用として, 貴重な発表である。また, 偏光記録を用いたベクトル波記録方式のホログラフィックメモリーに関して, おもに偏光記録材料を中心に発表が行われている^{34,36,37)}。

OPJでは, 「ホログラフィックメモリー, 開発状況と大容量メモリの想定アプリケーション」と題したシンポジウムが行われ, 国立国会図書館での文書デジタル化, 医療画像データの記録等の, 現在のメモリーフォーマットでは容量が不足すると考えられるようなアプリケーションに関する実態の紹介があった。

11.6 展望

Blu-ray discの3・4層化による大容量化により, ポストBlu-rayの光メモリーの開発には若干の時間的余裕が与えられた感がある。Blu-ray discの多層化はその先も図られており, 1面あたり16層の両面discの実現可能性に関して, 実験事実に基づいた議論が行われており, これが実現すれば1discあたり1TBの容量が実現されることになる。とすれば, ホログラフィックメモリーをはじめとする新方式光メモリーは, 少なくともそれ以上の記録容量をもたなければ意味がないことになる。

いずれにせよ, 今は少し基礎に立ち返って, じっくりと研究を行うフェーズに入っていると考えられる。今現在非常に元気のいいハードディスクや半導体メモリー分野も, これ以上の大容量化を図るためには, 記録寿命, 消費電力等のさまざまな問題がある。光メモリーの担うべき役割もこれからしっかりと確立させていかねばならない。継続的な研究が必要であると考え。

文 献

- 1) M. R. Ayres: ODS (2010) 7730-1.
- 2) E. B. Fotheringham: ODS (2010) 7730-5.
- 3) T. Usui et al.: ISOM (2010) Th-M-01.
- 4) K. Watabe et al.: ODS (2010) 7730-2.
- 5) T. Hoshizawa et al.: IWHM&D (2010), 16D-3.
- 6) N. Kinoshita et al.: ISOM (2010) Th-M-03.
- 7) 木下延博他: OPJ (2010) 9pAS2.
- 8) Y. Okada et al.: ISOM (2010) Mo-E-03.
- 9) A. Okamoto et al.: IWHM&D (2010) 15P-12.
- 10) A. Okamoto et al.: ISOM (2010) Tu-I-14.
- 11) H. Osawa et al.: ISOM (2010) Tu-H-15.
- 12) A. Shibukawa et al.: ISOM (2010) Th-N-03.
- 13) M. Takabayashi et al.: ISOM (2010) Th-N-02.
- 14) 高林正典他: OPJ (2010) 8aE3.

- 15) 渋川敦史他：OPJ (2010) 8aE2.
- 16) Y. Kondo *et al.*: IWHM&D (2010) 15P-17.
- 17) Y. Kondo *et al.*: ODS (2010) 7730-51.
- 18) A. Nakajima *et al.*: ISOM (2010) Tu-I-07.
- 19) J. Nishide *et al.*: ISOM (2010) Tu-I-03.
- 20) T. Ohori *et al.*: IWHM&D (2010) 15P-18.
- 21) S. Yoshida *et al.*: ODS (2010) 7730-55.
- 22) 吉田周平他：OPJ (2010) 9pAS3.
- 23) T. Shimura *et al.*: ODS (2010) 7780-30.
- 24) T. Shimura *et al.*: ISOM (2010), Th-M-02.
- 25) W. Hu *et al.*: ISOM (2010), Tu-H-10.
- 26) H. Horimai: IWHM&D (2010) 16D-2.
- 27) Y. Saita *et al.*: ISOM (2010) Tu-I-10.
- 28) R. Hiramatsu *et al.*: IWHM&D (2010) 16D-4.
- 29) R. Hiramatsu *et al.*: ISOM (2010) Th-N-01.
- 30) M. Shigaki *et al.*: ISOM (2010) Tu-H-17.
- 31) M. Shigaki *et al.*: ISOM (2010) Tu-I-15.
- 32) 平松亮介他：OPJ (2010) 8aE4.
- 33) M. Terai *et al.*: ODS (2010) 7730-69.
- 34) 佐々木友之他：OPJ (2010) 10pD2.
- 35) M. Omori *et al.*: ODS (2010) 7730-28.
- 36) T. Ando *et al.*: IWHM&D (2010) 15P-19.
- 37) T. Fukuda *et al.*: IWHM&D (2010) 15B-1.

12. レーザーディスプレイ

東京大 黒田和男

12.1 概要

2010年はレーザー発明50周年の節目の年であった。この半世紀の間、多くのレーザー応用機器が実用化されてきた。応用分野は科学技術研究用、産業用、医用、光通信用機器など多岐にわたる。家庭用機器では隠れた存在ではあるが、光ディスクのピックアップの中に実装されている。ところで、可視レーザーの鮮やかな輝きは実に印象的である。当然ながら、可視レーザーをディスプレイに使う試みはレーザー発明の初期からあった。実際、万博など特別なイベントでレーザーディスプレイが公開された事例は古くからある。しかし、当時はレーザー装置が大型で、とても実用的とはいえなかった。ところが、今世紀になりレーザーの小型化が一段と進み、ようやく製品化が見えてきた。2008年について三菱電機が米国でレーザーTVの販売を開始するに至り、本格的なレーザーディスプレイ開発の時代が到来したといえよう。2010年にはわが国でも3D表示機能を付加した後継機の販売が始まった。また、国内での販売はまだであるが、携帯用小型レーザープロジェクターも海外のメーカーから出されている。レーザーディスプレイは、色再現領域が広いことや、エネルギー利用効率が高く消費エネルギーを抑えられること、小型化の可能性など、すぐれた特長をもっており、ディスプレイとして大変魅力的である。一般消費者向けのレーザー応用分野として、大いに期待される分野である。

12.2 レーザー光源

現行のレーザーディスプレイでは、赤色と青色は半導体レーザーが用いられているが、緑色は非線形光学効果を用いた近赤外からの第二高調波 (SHG) 光源が用いられている。SHG 光源は、出力、効率など技術的な完成度は高いが、コストの点で不利で、緑色も半導体レーザーに置き換えたいという要望は根強くある。InGaN系緑色半導体レーザーは、2009年に日亜化学から発表が有って以来¹⁾、住友電工²⁾、OSRAM社³⁾、ローム⁴⁾、カリフォルニア大学サンタバーバラ校⁵⁾から立て続けに緑色レーザー発振の発表があった。Appl. Phys. Expressをはじめ学会誌に掲載される関連論文も増えている。使用する結晶面に違いがあるなど、各社特徴をもった開発が進められている。低パワーの用途から、順次緑色半導体レーザーが採用されていくものと考えられる。

プロジェクターや液晶バックライトの光源は、低消費電力化の流れに乗り、ランプからLEDに変わりつつある。これらの従来型の光源では赤色の発光強度が相対的に低く、赤色の発現が不十分であるといわれている。このため、LED光源を補強する目的で、赤色半導体レーザーを使うことが試みられている。実際、カシオがレーザーとLEDのハイブリッド光源と称してプロジェクターの製品発表を行った⁶⁾。また、最近になって三菱電機がレーザーバックライト液晶テレビを発表している⁷⁾。ここではレーザーはLEDでは不足する部分を補完する目的で使われているが、ディスプレイ分野へのレーザー応用のひとつの方向を示すものと思われる。

12.3 システム

レーザーディスプレイ装置は、中、大型のレーザーTVと、携帯用小型ディスプレイ、および網膜投写型のディスプレイが開発されている。

三菱電機は2008年に米国で大型のリアプロジェクション型レーザーTVを発売したが⁸⁾、2010年になってわが国でも3D表示機能を付加した後継機の販売を開始した⁹⁾。大型の装置ではほかに、三洋が足下から投写するレーザープロジェクターの試作を発表している¹⁰⁾。以上は二次元空間光変調器に表示された画像をスクリーンに投影する方式であるが、ソニーは一次元空間光変調器を用い、線状の画像を直交する方向に走査する方式のレーザーディスプレイの開発を進めてきており、2005年の愛知万博で劇場型の装置を展示している。その後、装置の小型化が進められているはずであるが、商品化はされていない。

携帯型レーザーディスプレイは、マイクロマシン (MEMS) を用い、レーザービームをラスタ走査して画

像を表示する装置である。夢は携帯電話に搭載することであるが、現在は光源からすべてを含めて手のひらサイズのものが開発されている。事実、米国の Microvision 社はレーザー走査型ピコプロジェクターとして売り出している^{11,12)}。わが国では、消費生活用製品安全法によるレーザーポインターの規制が小型レーザープロジェクターにも適用され販売が禁止されていたが、昨年末に両者は別のものと認められ、販売できるようになった。小型レーザープロジェクターは、コニカ¹³⁾、船井電機¹⁴⁾、パナソニック¹⁵⁾ などすでに複数の企業が研究開発を進めており、近いうちに Microvision 社製に加え国産品が市場に出るものと思われる。また、レーザープロジェクターに必要な MEMS 素子など、周辺技術の開発がさかんに行われている。

ブラザー工業は、眼鏡に装着し網膜上に直接画像を表示する網膜走査型レーザーディスプレイの研究開発を行っている¹⁶⁾。網膜ディスプレイは二次元画像を網膜上に投影する方式が古くからあるが、眼鏡型の装置が重く、装着感が快適でないという難点があった。レーザー走査方式を採用することにより、レーザー光源をヘッド部から切り離すことができ、小型軽量化が実現された。さらに、この方式ではレーザーを用いてもスペckルノイズが発生しないという長所があり、この意味でも大変魅力的である。

最後に変わり種のレーザーディスプレイを紹介する。Schowengerdt (ワシントン大) のグループは、MEMS 素子の一種と考えられるが、ファイバーの先端を振動させてビームを走査するディスプレイを考案し、装置を試作した¹⁷⁾。この技術のルーツは内視鏡にある。彼らは内視鏡用に、照明光を走査することにより画像を取り込む装置を開発したが、本装置はこれをディスプレイに転用したものである。ヘッドの部分は振動する光ファイバーと集光用のレンズだけから構成され、非常に小型(試作品では直径 1 mm, 長さ 9 mm)になる。特殊な用途に使えるものと期待される。

12.4 スペckルノイズ低減

レーザーディスプレイの課題のひとつが、スペckルノイズによる画質の劣化である。解決法について Goodman (スタンフォード大) が包括的な講演を行ったが¹⁸⁾、広く適用できる特効薬は存在しないというのが現状であろう。ホログラムをはじめコヒーレント光を使ったディスプレイでは逃れられない問題で、古くから多くの研究がある。最近の研究を取り上げよう。スペckルは定量的にはコントラストで評価されるが、測定結果は測定光学系に強く依存する。実際、ヒトの視力には個人差があるから、同じ画像を見ても各人が見るスペckルは異なっているはずであ

る。久保田(東大)は測定器の標準化を提案した¹⁹⁾。また、久保田は Goodman と共著で、振動方式の移動拡散板がスペckル低減に有効であるとの研究結果を発表した²⁰⁾。

製品開発の現場からは、村瀬(三菱電機)が同社製レーザー TV に搭載されたスペckル低減方式について報告している²¹⁾。複数のレーザー光源を束ね、照度分布を均一化するため、マルチモード光ファイバーとインテグレート光学系を用いた装置を設計製作した。最終的にコントラストを 1% 程度まで低減することに成功し、スペckルノイズが観測されないレベルを達成した。レーザー光のコヒーレンスを低くすることがスペckル低減に有効であるが、同様な試みとして、マルチモード発振する面発光レーザーの使用が効果的であるという報告がある²²⁾。面発光レーザーの波長は近赤外なのでただちにディスプレイ用途には使えないが、将来注目される技術動向である。

二次元画像投影方式のレーザーディスプレイでは、マルチモードレーザーや複数台のレーザーを重ね合わせることで光源のコヒーレンスを下げ、さらに、移動拡散板や、マルチモードファイバーやインテグレートなどを併用することにより、相当程度のスペckルノイズ低減が可能になっている。残されたのはラスタ走査方式のレーザーディスプレイである。携帯型ディスプレイが本命視される中、スペckルノイズの低減が急務の研究課題である。

12.5 研究グループの活動

このような状況の中で、われわれは 2008 年にレーザーディスプレイ技術研究グループを設立し、研究会の開催を中心に活発に活動してきた。2010 年における研究グループのおもな活動は次の通りである。通常の研究会は、第 5 回(2月8日)と第 6 回(7月28日)を開催した。第 5 回は「超小型プロジェクタとそれを支えるデバイス」と題し、携帯タイプのディスプレイと、赤色と緑色の半導体レーザー、および、MEMS デバイスを取り上げた。ディスプレイの小型化が着実に進んでいることを確信させる内容であった。第 6 回の研究会は、微小光学研究グループとの共同企画で、「高臨場感ディスプレイの動向」と題し、高精細ディスプレイの最新の動向や、立体ディスプレイ、大型プロジェクター、最新の色再現技術などの講演があった。最後に、レーザーディスプレイ技術のロードマップと将来の市場予測が紹介された。2 回の研究会にはそれぞれ 200 名を超える参加者があり、大変盛況であった。また、OPJ 2010 において「レーザーディスプレイにおける画質評価とその将来展望」と題する国際シンポジウムを開催した。講演会の開催に加え、レーザーディスプレイに関する専門書を企画監修し、オプトロニクス社より「解説レー

ザーディスプレイ」と題して出版した²³⁾。2011年も引き続き第7, 8回研究会とOPJシンポジウムを開催する予定である。さらに10月には、「解説レーザーディスプレイ」をテキストとしたセミナーの開催を企画している。また、2012年4月には応用物理学会主催で、レーザーディスプレイにテーマ絞った国際会議開催の準備を進めている。会議名はLaser Display Conference (LDC 2012)、会場はパシフィコ横浜を予定している。

文 献

- 1) T. Miyoshi *et al.*: Appl. Phys. Express, **2** (2009) 062201.
- 2) Y. Enya *et al.*: Appl. Phys. Express, **2** (2009) 082101.
- 3) http://www.osram-os.com/osram_os/EN/News_Center/Spotlights/Technology/World-record-output-power-and-efficiency-of-direct-green-InGaN-laser-diodes-in-continuous-wave-operation.html
- 4) 岡本國美他: 第5回LDT研究会 (2010) 24.
- 5) Y.-D. Lin *et al.*: Appl. Phys. Express, **3** (2010) 082001.
- 6) <http://casio.jp/projector/>
- 7) <http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2011/0216-d.html>
- 8) 笹川智弘: OPJ (2009) 188.
- 9) <http://www.mitsubishielectric.co.jp/laservue/>
- 10) 池田貴司他: 第31回レーザー学会 (2011) S27.
- 11) 新澤 滋他: 第5回LDT研究会 (2010) 11.
- 12) <http://www.microvision.com/technology/>
- 13) 金野賢治他: 第4回LDT研究会 (2010) 13.
- 14) 西岡 謙他: 第31回レーザー学会 (2011) S29.
- 15) 水島哲郎他: 第5回LDT研究会 (2010) 20.
- 16) 渡辺光由: 第31回レーザー学会 (2011) S31.
- 17) B. Schowengerdt *et al.*: OPJ (2010) 4.
- 18) J. W. Goodman: OPJ (2010) 2.
- 19) 久保田重夫: 光学, **39** (2010) 149.
- 20) K. Kubota *et al.*: Appl. Opt., **49** (2010) 4385.
- 21) 村瀬令奈他: OPJ (2010) 274.
- 22) F. Riechert *et al.*: Appl. Opt., **48** (2009) 792.
- 23) 黒田和男他編: 解説レーザーディスプレイ (オプトロニクス社, 2010).

13. デジタルオプティクス

職業大 高橋 毅

13.1 概 要

デジタル電子技術の発展は著しく、従来のアナログ信号処理は、すべからくデジタル処理に置き換えられている。このような状況から、光学システムにおいても、信号のデジタル処理は当たり前であり、シミュレーション技術の利用を含めると、光学研究分野のほぼすべてがデジタルオプティクスに含まれると広く解釈することも可能である。しかし、ここでは、光学現象をデジタル演算に置き換えることにより、従来にない機能性等を付加することを目的とする研究分野として、デジタルホログラフィー、計算機ホログラム (CGH)、補償光学について紹介することにする。特に、CGHについては、ディスプレ

イ応用以外の分野を紹介する。

13.2 デジタルホログラフィー

29 mm×20 mm のサイズで1億2000万画素のCMOS (complementary metal oxide semiconductor) センサーが開発されるなど、撮像素子の高画素化・高密度化は著しいが¹⁾、現状では、off-axis型デジタルホログラムの再生像の視野角は従来のホログラムに比べ狭くなる。この問題を改善する手法として、撮像素子を微少に横移動することにより得られるデジタル超解像が用いられた²⁾。また、off-axis型ホログラムをヒルベルト変換することによりフォトポリマーに誘起された屈折率変化が測定されている³⁾。

In-line型デジタルホログラムは、撮像素子の限られた画素数の有効利用が可能であるが、0次回折像と共役像を除去し、実像を再生する必要がある。1枚のin-line型ホログラムにヘテロダイン変調とフィルタリングの反復計算を適応し0次回折像と共役像のないホログラムが作成され⁴⁾、ホログラフィック顕微鏡に応用されている⁵⁾。

位相シフト法を用いホログラムの位相と振幅分布を求めることにより実像のみの再生が可能となるが、この際、一般に3枚以上のホログラムの記録が必要となる。位相シフト法を運動物体へ適応するため、撮像素子の各画素に偏光素子を配置した偏光イメージングカメラ等を用い、一度の撮影で位相シフトしたホログラムを取得する手法が提案されている。この際、任意の位相シフト量により物体光の複素振幅を算出し、像再生が行われた⁶⁾。また、高速度カメラを用いて、世界最速である毎秒18万フレームの動画イメージングが達成されている⁷⁾。また、90°位相シフトした2枚のホログラムから粗面物体の移動変化前後の位相ホログラムを計算し、粗面物体の移動量が計測された^{8,9)}。

位相シフト量の誤差は、測定位相に系統誤差を生じさせる。スペックル統計により位相シフト量を正確に推定し、高精度な位相解析が実現された¹⁰⁾。さらに、アクロマティックな位相シフトにより低コヒーレンス干渉において位相誤差が低減されている¹¹⁾。また、物体光と参照光の間にドップラー効果によるビートを生じさせ、そのホログラムの時間変化を高速度カメラにより記録するドップラー位相シフト法において、画像枚数と誤差の関係が明らかにされた¹²⁾。

位相シフトデジタルホログラフィーは、塗料の乾燥過程や円筒内の表面形状の計測に応用されている^{13,14)}。さらに、合成開口法により取得した物体光波の複素振幅と仮想物体を用いて、ハイブリットCGHが作成されている¹⁵⁾。

低コヒーレンス光源や波長走査光源を用いる干渉法がデジタルホログラムに応用されている。低コヒーレンス

干渉において光路差がゼロのとき、変調強度が最大化する。この際、ホログラムの再生像が最大強度となることから、光路差を走査して取得したホログラムの再生像の最大値から物体形状の測定が行われている¹⁶⁾。また、低コヒーレンス光源を用い再生像のコヒーレントノイズを低減することにより、回折限界以下のナノ粒子の三次元位置計測が可能となった¹⁷⁾。二光波折り畳み干渉計と合成開口処理により、白色面光源のスペクトル情報と三次元空間情報の再生が行われた¹⁸⁾。さらに、波長走査によるヘテロダイナミクス干渉法により、光路上に存在する多物体を選択的に再生できることが示された¹⁹⁾。

近年、GPUを用いるコンピューティングが話題となっている。フレネル回折計算とテンプレートマッチングにGPUを用い、水中の微小粒子の位置計測が高速化された²⁰⁾。デジタルホログラフィーの応用分野は多岐に及んでおり、フェムト秒レーザー加工におけるレーザー誘起現象の顕微鏡観測が行われている。この際、光学的な観測から正確な位相変化を求めることが困難であるため、時間領域差分法を用いて透過光の複素振幅を算出し、実験結果との比較から物体形状と屈折率の推定が行われた²¹⁾。

発光ダイオードとGabor型ホログラムの光学系を用いる低コストのデジタルホログラフィック顕微鏡が開発された²²⁾。安価で高性能なシステムの開発により、デジタルホログラフィーのさらなる普及が期待される。

13.3 計算機ホログラム

空間光変調素子を用いたCGHによるレーザービームの複数分岐は、レーザー加工等の応用において重要である。この際、ピーク強度の自乗に比例する第二高調波の強度分布に基づくCGHの最適化によって、フェムト秒レーザーによる高精度な加工が実現された²³⁾。また、ビーム強度の測定結果をCGHの設計に反映する設計手順を反復することにより、16×16のマルチビームのpeak-valley値が11%から1.6%まで改善した²⁴⁾。

13.4 補償光学

補償光学は、波面センサーで波面を測定し、波面補正素子をフィードバック制御して収差を動的に除去する技術である。大型地上望遠鏡で必要とされる制御帯域100 Hz以上を実現するために、CMOSセンサーを用い繰り返しレートを改善したシャック・ハルトマンセンサーが試作された²⁵⁾。また、位相差顕微鏡の原理として知られている位相差法を波面センサーとして用いることにより、補償光学系が動作することがシミュレーションにより確認された²⁶⁾。

走査レーザー眼底顕微鏡の収差補正に補償光学系が用いられている。この際、3分間の計測で回折限界分解能が実

現され、収差補正の安定性が確認された²⁷⁾。また、走査プロトコルの改善により、広視野の網膜像が取得されている²⁸⁾。さらに、臨床使用に向けて、3.4 mmのビーム径により6 μmの分解能と34 μmのレイリー長を有する補償光学型光コヒーレンストモグラフィーが提案された²⁹⁾。

13.5 展 望

デジタルホログラフィーにおけるホログラムの位相解析は、干渉計測法に基づいており、干渉計測の新しい原理の研究や新規のデバイスの開発がデジタルホログラフィーにさらなる発展をもたらすことが期待される。さらに、応用分野からの要請による進化が応用分野の広がりとともに期待される。

一方、計算機に目を向けると、スレートコンピューターに代表される携帯情報端末とクラウドコンピューティングの組み合わせが今後の主流となるであろう。この流れを光学分野に取り込んでいく必要がある。

文 献

- 1) <http://web.canon.jp/pressrelease/2010/p2010aug24j.html>
- 2) 石 雄人他：OPJ (2010) 10pPD2.
- 3) 有本英伸他：OPJ (2010) 10aC2.
- 4) 岩山義秀他：OPJ (2010) 10aC4.
- 5) 佐藤邦弘他：OPJ (2010) 10aC3.
- 6) 野村孝徳他：秋季応物講演会 (2010) 17a-NK-8.
- 7) 角江 崇他：OPJ (2010) 10aC5.
- 8) 喜入朋宏他：秋季応物講演会 (2010) 14p-NK-3.
- 9) 喜入朋宏他：OPJ (2010) 8pP13.
- 10) 片岡基史他：春季応物講演会 (2010) 19a-J-7.
- 11) 早崎芳夫：OPJ (2010) 10aF6.
- 12) 茨田大輔他：春季応物講演会 (2010) 17p-J-7.
- 13) 横田正幸他：春季応物講演会 (2010) 19a-J-6.
- 14) 横田正幸他：OPJ (2010) 10aF5.
- 15) 有馬恭旭他：OPJ (2010) 9pP13.
- 16) 吉野晃平他：OPJ (2010) 8pP8.
- 17) 楠美祐一：秋季応物講演会 (2010) 17a-NK-6.
- 18) 笹本益民他：春季応物講演会 (2010) 17p-J-11.
- 19) 石井行弘他：OPJ (2010) 10aF7.
- 20) 杉本大介他：秋季応物講演会 (2010) 17a-NK-7.
- 21) 田北啓洋他：OPJ (2010) 9pBS7.
- 22) 下馬場朋禄他：OPJ (2010) 8pP9.
- 23) 長谷川智士他：OPJ (2010) 9aC8.
- 24) 松本直也他：秋季応物講演会 (2010) 17a-NK-5.
- 25) 鈴木二郎他：秋季応物講演会 (2010) 15a-NK-10.
- 26) 服部雅之：OPJ (2010) 10pF5.
- 27) 黄 洪欣他：OPJ (2010) 10aH3.
- 28) 佐々木一浩他：OPJ (2010) 10aH7.
- 29) 須藤健太他：OPJ (2010) 10aH4.

14. 偏光計測・制御技術

東京工芸大 川畑州一
産総研 安田哲二
東北大 津留俊英
徳島大 水谷康弘
埼玉医科大 若山俊隆
山梨大 金 蓮花
宇都宮大学 CORE 喜入朋宏
宇都宮大学 CORE 大谷幸利

14.1 概 要

2010年4月1日に日本光学会に偏光計測・制御技術研究グループが誕生した。偏光は、古くて新しい学問であるが、液晶ディスプレイ、光ディスクのピックアップなど身近な製品から、エリプソメトリーやポラリメトリーによる材料評価に至るまで、偏光計測技術は日本の産業界と強固に結びついている分野である。このように多岐にわたる偏光を用いた計測のため、分散する状態が長く続いていた。“分野にとらわれずに横断的な議論・討論の場が必要”との有志共通の認識があり、2007年11月に東北大学の故山本正樹先生の呼びかけで第1回偏光計測研究会が開催された。この研究会が年2回のペースで第5回まで開催されたのを機に、ようやく2010年に研究グループとして設立された。

ここでは、この1年の偏光関連の行事とそれに関するトピックス、最後に将来展望を述べる。

14.2 偏光関連のトピックス

偏光関連研究の発表の場は、春と秋の応用物理学会、およびOPJであるが、2010年の特徴は、2010年7月16日に学習院創立百周年記念会館において、「偏光—その計測と制御の最前線—」偏光計測・制御技術研究グループ設立記念研究会が開催されたことである。また、同年11月9日、OPJ 2010においては、偏光計測・制御技術研究グループ企画「進化する偏光の計測技術—偏光を調べて何がわかる / どうやって測る—」が開催され、多くの参加者による議論が行われた。また、2010年1月21～22日には第36回冬期講習会「光計測と偏光—基礎から最先端の応用まで—」が開催され、偏光解析、分光偏光計など関連の5件の講演があった。

海外では、3年ごとに開催される5th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE-V) が、5月23～28日にニューヨーク州立大学アルバニー校にて行われた。

以上の講演発表と学術雑誌からの注目すべき研究につい

て、以下に述べる。

14.3 国内の状況

春秋の応用物理学会とOPJから偏光関連の統計をとると、多い順に、偏光計21件（ミューラー行列計測3件、複屈折計測3件含む）、偏光素子関連14件、偏光光渦関連11件、エリプソメトリー関連9件、光メモリー関連7件、ナノ構造・偏光シミュレーション関連6件、偏光OCT関連4件、暗号2件、その他5件となっている。FDTD (finite difference time domain) やRCWA (rigorous coupled wave analysis) を代表とする偏光シミュレーション技術は、ナノ構造を扱うにはなくてはならない道具となっており、上記の分類に数えられていない多くの研究が発表されている。

ストークス・パラメーター計測法は、変形サバル板を用いた偏光計¹⁾や分光透過型4ディテクター偏光計²⁾によって高速化が試みられた。また、高精度にとらえようとする技術として、6個の検出器によるもの³⁾、液晶変調による偏光計⁴⁾、また、サニャック干渉計を用いた一般化ストークス・パラメーター偏光計が提案された^{5,6)}。複屈折計測では、デュアルの電光学結晶を用いた手法⁷⁾、ミューラー行列偏光計は、海外に比べてまだ報告数が少ないが、液晶変調器や波長走査半導体レーザーによるチャンネルドスベクトル偏光計が提案された^{8,9)}。

エリプソメトリーは、すでに多くは薄膜、材料開発のツールとなっており、ここでは計測器として注目するものを挙げる。高压容器内の外部からその場計測を行う際に、入射側と出射側の窓を2つの位相子とみなして補償する手法¹⁰⁾や、回転位相子法での補償子の回転角の差分和分による誤差の低減法が提案されている¹¹⁾。

デジタルホログラフィーでは偏光が有効に使われており、カメラの画素ごとに方位の異なる偏光子を取り付けた偏光イメージングカメラが活躍している¹²⁾。

光メモリーの分野では三次元ベクトルホログラムや偏光感受性ホログラムとして記録材料とした報告が目立っている¹³⁻²¹⁾。将来的にテラバイトメモリーとして期待されている。

生体医療計測は報告があまり多くないが、耳たぶ装着用のグルコースセンサーを目指して偏光コヒーレンスを用いた偏光計が提案されている²²⁾。活発な発表がなされているOCTにおいても、偏光計測は決して多くはない。円錐角膜や線維柱帯切除術後のヒト病眼やウサギモデルの複屈折測定への適用²³⁾、豚眼の複屈折とヤング率を偏光OCTと荷重測定器の比較による検定²⁴⁾、眼のヘンレ線維の複屈折計測が報告された²⁵⁾。

偏光素子は、液晶デバイスと位相子、偏光子に分けるこ

とができる。液晶による可変焦点レンズやこれを用いたシステムが提案された²⁶⁻³⁰⁾。また、LCOS (liquid crystal on silicon) による位相子も今後、位相変調の高速、小型化に対応でき注目されている³¹⁾。偏光シミュレーション技術によってナノ構造を用いた新しい位相子や偏光子が設計可能となっているが、波長以下の周期構造を2層にした四分の一波長板³²⁾、リソグラフィ技術で製作するArF用ワイヤグリッド偏光子³³⁾、無電解銅メッキ技術で製作する赤外用偏光子³⁴⁾が報告された。さらに、水素結合性高分子を偏光紫外線によって配向させた複屈折性を使った大面積、フレキシブル対応の偏光子³⁵⁾、複屈折ファイバーを並列に並べたものを2枚直交させたマトリックス状の偏光子³⁶⁾が新しい素子が提案された。種類の少ない紫外や赤外の波長帯の新しい素子が期待される。

光渦関連は、偏光を利用することで新しい現象が発表されている。OPJのシンポジウムでトポロジカルな偏光現象の講演があった³⁷⁾。光渦に円偏光を組み合わせてアブレーション加工を行うと、方向に応じたパターンが得られることが示された³⁸⁾。

14.4 第5回分光エリプソメトリー国際会議

プレナリー講演7件、招待講演20件、口頭発表48件、ポスター発表200件の講演があった。測定法に関しては、異方性をもった測定対象へのミューラー行列エリプソメトリーの適用やイメージング、二次元マッピング機能により応用対象が広がってきている。また、シンクロトロン放射光を使って、広波長域(赤外, 真空紫外)で精緻な測定が行われている。第二高調波や和周波発生などの非線形光学と線形光学(エリプソメトリー)とを結びつけることにより表面や界面の解析が可能であるとの報告があった。非線形光学については、分光エリプソメトリーを初めて開発したAspnes教授(ノースカロライナ州立大)から、「エリプソメトリーが単一波長から分光へと進んだことで情報量が大幅に増えたように、レーザー技術の進展が線形光学から非線形光学への展開を可能にし、新たな分野が拓けつつある」とのコメントがあった。また、測定対象に関しては、太陽電池関連の材料・プロセス評価の報告が目立つとともに、ナノ粒子(plasmonics)の光応答についての報告があった。また、ポリマー材料や、バイオ・メディカル関連の応用が着実に増えている。

今回は2013年5月26日~31日、京都市サーチパークで開催される予定である。

14.5 展 望

偏光関連の研究は、光学から材料まで多岐に分岐している。しかしながら、波長、時間の極限化およびシミュレ-

ション技術とリンクしたパラメーターの扱い、および半導体やバイオなど産業分野への展開が期待される。波長の極限化は、軟X線(84~100 eV)で6軸ステージに設置されたMo/Siミラーで偏光計³⁹⁾や透過型X線偏光計が提案されている⁴⁰⁾。時間の極限化では、偏光が大きく影響するが、モードロックファイバーレーザーにおける複屈折制御による安定化のために、8ディテクター偏光計によって非線形偏光回転をポアンカレ球上で安定領域を見いだす報告がされている⁴¹⁾。バイオの分野では分子構造キラリティー測定のための偏光ホログラムを用いた円二色性計測法⁴²⁾、ナノ構造のシミュレーションでは、粗い表面からの散乱光の偏光度変化を電磁気理論からのモデル化⁴³⁾なども報告されてきている。これらの分野を中心に偏光技術の今後が期待される。

文 献

- 1) 北原倫太郎他: *OPJ* (2010) 8aC2.
- 2) 久保田義人他: 春季応物講演会 (2010) 18p-K-10.
- 3) 王 汀他: 春季応物講演会 (2010) 18p-K-11.
- 4) 田中政之介他: *OPJ* (2010) 8a-C-1.
- 5) R. K. Singh *et al.*: *OPJ* (2010) 9aG6.
- 6) R. K. Singh *et al.*: *OPJ* (2010) 10pP2.
- 7) 金 蓮花他: 春季応物講演会 (2010) 18p-K-12.
- 8) 大谷幸利他: 秋季応物講演会 (2010) 15a-NK-2.
- 9) 木下貴博他: 秋季応物講演会 (2010) 15a-NK-3.
- 10) 小高和也他: 春季応物講演会 (2010) 18p-K-15.
- 11) 田ノ岡大輔: 秋季応物講演会 (2010) 15a-NK-5.
- 12) 喜入朋宏他: 秋季応物講演会 (2010) 14p-NK-3.
- 13) 岩戸孝憲他: 春季応物講演会 (2010) 17p-K-6.
- 14) 川越陽介他: 春季応物講演会 (2010) 17p-K-12.
- 15) 関口寛基: 秋季応物講演会 (2010) 16p-P11-2.
- 16) 川越陽介: 秋季応物講演会 (2010) 16p-P11-3.
- 17) 茨田大輔: 秋季応物講演会 (2010) 16p-P11-5.
- 18) 茨田大輔: *OPJ* (2010) 9aAS3.
- 19) 佐々木友之他: *OPJ* (2010) 10p-D2.
- 20) 関口寛基他: *OPJ* (2010) 10p-D3.
- 21) 川越陽介他: *OPJ* (2010) 10p-D4.
- 22) 大原英憲他: 秋季応物講演会 (2010) 16p-C-10.
- 23) Y. Lin *et al.*: *OPJ* (2010) 9pH1.
- 24) 山成正宏他: *OPJ* (2010) 9pH3.
- 25) B. Cence *et al.*: *OPJ* (2010) 9pH4.
- 26) 佐藤 進他: 春季応物講演会 (2010) 20a-L-1.
- 27) 葉 茂他: 春季応物講演会 (2010) 20a-L-2.
- 28) 梁瀬 智他: 春季応物講演会 (2010) 20a-L-3.
- 29) 河村希典他: 春季応物講演会 (2010) 20a-L-4.
- 30) 河村希典他: 春季応物講演会 (2010) 20a-L-5.
- 31) 加藤聖子他: *OPJ* (2010) 10aD2.
- 32) 片田健介他: *OPJ* (2010) 9aD7.
- 33) 浅野功輔他: *OPJ* (2010) 9aP4.
- 34) 森川拓真他: *OPJ* (2010) 10aD5.
- 35) 江本顕雄他: *OPJ* (2010) 10aD1.
- 36) 戸谷健朗他: 春季応物講演会 (2010) 17p-K-13.
- 37) 若山俊隆: *OPJ* (2010) 9aBS-6.
- 38) 中條恵介他: 春季応物講演会 (2010) 17a-K-14.
- 39) T. Imazono *et al.*: *AIP Proc.*, **1234** (2010) 347.
- 40) S. Kitamoto *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.*, **81** (2010) 023105.
- 41) C. Provenzano *et al.*: *Opt. Rev.*, **35** (2010) 1822.

- 42) M. Zerrad *et al.*: Opt. Express, **18** (2010) 15832.
 43) T. Hellwig *et al.*: Appl. Phys. B, **101** (2010) 565.

15. 産学官連携事業

慶應義塾大 石樽崇明

15.1 概要

産学官連携委員会は、応用物理学会分科会日本光学会における産学官連携推進事業の実行組織として、2003年度に設立された。「ポテンシャルの高い光科学技術を発現させ、新産業の創出を促し、社会に貢献する」という基本理念のもと、「光関連技術を産学官連携の中で創出・活用し、革新的価値を創造しながら豊かな社会の建設に役立つ事業とする」のビジョンを掲げて、活動を行ってきた。議論を進めていく中で、学会が主導すべき産学官連携活動とは何か、という問題が強く意識されるようになってきた。日本光学会に限らず、学会組織が主導する産学官連携活動は、特定の企業や業種に偏ることなく、関連分野全体が恩恵を得るようなものが望ましい。その帰結として、個別事例に踏み込んだ活動ではなく、光応用新産業創出フォーラムや光みらい奨励金など、広く学会会員に行き届くような活動に落ち着いた。本稿では、特に光応用新産業創出フォーラムに関する活動に関して報告する。

15.2 光応用新産業創出フォーラム

日本光学会産学官連携委員会では、2003年度より開始した事業の第1フェーズとして、「将来あるべき豊かな社会を想定したビジョンとロードマップの作成」を、以下の3つの領域を対象に実施した。

- (1) 健康・医療・福祉 (主査：春名正光 大阪大学教授)
- (2) 情報 (主査：谷田純 大阪大学教授)
- (3) 環境・安全・安心 (主査：竹内延夫 千葉大学グラウンドフェロー)

さらに、各領域のビジョン、ロードマップをもとに、日本光学会が貢献しうる技術領域を抽出し、その展開支援に関する実現シナリオ作りを行う第2フェーズに事業展開することを試みてきた。その中で、光応用新産業創出フォーラムは、このビジョン、ロードマップを出発点とし、日本が真の科学技術創造立国となるための産学官の連携による人材育成、ブレインネットワークの構築、産業種の創出・育成に向けた議論の場を提供することを目的として、2005年より過去6回にわたって開催してきた。特に、第5回(2009年度)、第6回(2010年度)のプログラムと概要を下記に示す。

●第5回光応用新産業創出フォーラム—光が綾なす新産業—
 招待講演：「高効率 GaN 系 LED 開発の現状と応用」井上光宏 (豊田合成), 「人の知的活動を高めるスペースデザイン」渡邊朗子 (東京電機大), 「アグリフォトニクス LED を利用した植物工場」後藤英司 (千葉大), 「忠実な色情報の映像記録と再現：ナチュラルビジョンの応用技術」山口雅浩 (東工大)

招待講演 (2008年度光みらい奨励金A受賞者)：「光演算によるディスプレイのセキュリティ技術」山本裕紹 (徳島大)

特別講演：「光科学技術の開発だけで、イノベーションが起こせるのか?—競争力のからくりを明らかにする—」妹尾堅一郎 (東京大学)

パネルディスカッション「新しい照明による新産業創出」井上光宏 (豊田合成)・後藤英司 (千葉大)・妹尾堅一郎 (東大)・山口雅浩 (東工大)・渡邊朗子・(東京電機大)伊藤日出男 (産総研)

概要：昨今、高い注目が集められている環境技術と光学分野との融合を目的として、特に「LED」に着目した主題を設定した。昨今、LEDは照明分野に大きなイノベーションをもたらすと期待されるが、実際に照明を取り入れるスペースデザインに携わる建築家、LED光による植物工場を実現して農作物の安定供給を考える研究者など、LEDのユーザーを講演者に招き、「光が綾なす新産業」なるテーマで、活発な議論を行った。また、特別講演として、妹尾堅一郎先生(東大)にご講演いただき、昨今のわが国の産業競争力衰退の具体例をあげていただきながら、光科学技術によるイノベーションの可能性について解説いただいた。「技術力」だけでグローバル競争を勝ち抜けるという時代は終焉を迎えており、「技術力をいかに収益に変えられるか」のビジネスモデルの構築が重要であることをわかりやすくご説明いただいた。パネルディスカッションにおいても、「新産業に結びつけるには、どのようなモデルを構築すればよいか」について活発に議論が行われた。新産業創出フォーラムの名にふさわしい議論の場が作られたといえる。

●第6回光応用新産業創出フォーラム—技術戦略と人材育成—

招待講演：「フォトニクスのロードマップと技術戦略」尾松孝茂 (千葉大学), 「オプティクスのロードマップと技術戦略」佐藤 学 (山形大学)

特別講演：「技術経営における産学連携の位置づけ」生駒俊明 (キヤノン)

招待講演 (2009年度光みらい奨励金A受賞者)：「画素値飽

和を起こしたカラー画像の明度知覚（クリッピング錯視）」鯉田孝和（豊橋技科大学）

パネルディスカッション：「光学の技術戦略と人材育成—日本の光学技術は継承し続けられるのか？—」荒井則一（コニカミノルタオプト）・石原 聰（科学技術振興機構）・尾松孝茂（千葉大）・河合 滋（職業能力開発大学校）・佐藤 学（山形大）・槌田博文（オリンパス）

概要：新産業の創出のためには、技術トレンドを見極め、将来にあるべき社会の姿を描くことが、重要な役割を果たす。数多くの技術調査が報告される中、応用物理学会が発表したアカデミックロードマップは、分野ごとに中長期スパンにわたる技術の方向性を示した貴重な資料である。そこで、光関連分野のアカデミックロードマップ作成に携わった尾松孝茂先生（千葉大）、佐藤学先生（山形大）から、今後発展が期待される光関連技術のご紹介をいただいた。

一方、企業経営の現場では、技術トレンドのみならず、国際的な視野に立った企業戦略が練られ、企業発展のための努力が続けられている。社会全体を俯瞰する立場からの視点は、技術優先志向の視点では見えない地形を知る上で、きわめて有益なものとして期待される。そこで、キヤノン副社長であり、過去にテキサスインスツルメンツ社長など

経営実績をお持ちの生駒俊明氏に、わが国が進むべき方向、特に産学連携に関する課題に関してご教示いただいた。産と学の理想的な役割分担、モデルケースなどを紹介していただいた。

新産業創出を実現するためには、既存の分野に精通し、発想力にすぐれ、しかもフロンティア精神に溢れる優秀な人材の育成が重要となる。光産業はわが国が国際的に優位に立つ産業分野であるにもかかわらず、大学における教育カリキュラムには、産業界の要望からの乖離が見られる。この点に関し、産学官の立場から意見を交換し、解決策を探るパネルディスカッションを行った。

15.3 展 望

産学官連携委員会は、本稿の光応用新産業創出フォーラム、光みらい奨励金など、学会が主導すべき産学官連携活動を目指した仕組みを残し、2010年3月にその活動を終了した。しかしながら、一般的な技術志向の研究会、講演会とは若干異なるテーマで議論を行える場となった光応用新産業創出フォーラムに関しては、多くの方から今後の継続を望む激励の言葉をいただいている。日本光学会員をはじめ、参加者にとって有益な場となるようなフォーラムの継続・発展を願う次第である。