

2001 年 光 学 界 の 進 展

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

表 「光学界の進展」引用学会等の省略記号

◆ 学会誌関係	記号	◆ 講演会関係	記号
光学 第29巻第12号	a-0	第48回春季応用物理学関係連合講演会	1
第30巻第 <i>n</i> 号	a- <i>n</i>	第62回秋季応用物理学学会学術講演会	2
Opt. Rev. Vol. 7, No. 6	b-0	Optics Japan 2001	3
Vol. 8, No. <i>n</i>	b- <i>n</i>	第26回光学シンポジウム	4
応用物理 第69巻第12号	c-0	第18回色彩光学コンファレンス	5
第70巻第 <i>n</i> 号	c- <i>n</i>	第34回光学五学会関西支部連合講演会	6
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 39, No. 12	d-0	ISOM 2001	7
Vol. 40, No. <i>n</i>	d- <i>n</i>	第23回光設計研究グループ研究会	8
Jpn. J. Appl. Phys. (2) Vol. 39, No. 12	e-0	第24回光設計研究グループ研究会	9
Vol. 40, No. <i>n</i>	e- <i>n</i>	ICOSN 2001	10
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 39, No. 12	f-0	CLEO 2001	11
Vol. 40, No. <i>n</i>	f- <i>n</i>	CLEO/Pacific Rim 2001	12
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 17, No. 12	g-0	ASSL 2001	13
Vol. 18, No. <i>n</i>	g- <i>n</i>	応用物理学会量子エレクトロニクス研究会	14
J. Opt. Soc. Am. (B) Vol. 17, No. 12	h-0	「量子情報」	
Vol. 18, No. <i>n</i>	h- <i>n</i>	量子効果等の物理現象第4回シンポジウム	15
Appl. Opt. Vol. 39, No. 34	i-01	日本物理学会 2001 年秋季大会	16
Vol. 39, No. 35	i-02	LEOS 2001	17
Vol. 39, No. 36	i-03	近接場光学研究グループ第10回研究討論会	18
Vol. 40, No. <i>n</i>	i- <i>n</i>	3rd Asian Pacific Workshop on Near-field Optics	19
Opt. Lett. Vol. 25, No. 23	j-02	SPIE Annual Meeting 2001	20
Vol. 25, No. 24	j-03	ODS 2001	21
Vol. 26, No. <i>n</i>	j- <i>n</i>	First Asian Conference on Vision	22
Opt. Commun.	k- <i>m-n</i>	The 9th Congress of the International Color	23
J. Light Wave Technol. Vol. 18, No. 12	l-0	Association	
Vol. 19, No. <i>n</i>	l- <i>n</i>	日本光学会視覚研究グループ講演会	24
New Glass Vol. 16, No. <i>n</i>	m- <i>n</i>	カラーフォーラム JAPAN 2001	25
Appl. Phys. Lett. Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	n- <i>m-n</i>		
Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Vol. A467-468, No. <i>n</i>	o- <i>n</i>		
放射光 第14巻 第 <i>n</i> 号	p- <i>n</i>		
分光研究 第50巻 第 <i>n</i> 号	q- <i>n</i>		
Science Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	r- <i>m-n</i>		
Phys. Rev. Lett. Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	s- <i>m-n</i>		
Phys. Rev. A Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	t- <i>m-n</i>		
Phys. Rev. B Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	u- <i>m-n</i>		
Nature Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	v- <i>m-n</i>		
Opt. Eng. Vol. 40, No. <i>n</i>	w- <i>n</i>		
Rev. Sci. Instrum. Vol. 72, No. <i>n</i>	x- <i>n</i>		
Vision Vol. 13, No. <i>n</i>	y- <i>n</i>		

1. 光物理

産総研 白井智宏

1.1 コヒーレンス・干渉

ここ数年の傾向として、コヒーレンス理論の基礎に関する研究が減少し、計測等と密接に関連した応用指向の研究が増加している。

その中では、特に、OCT (optical coherence tomography) 等の低コヒーレンス干渉法に基づくリフレクトメトリーの発展を背景として、光波の時間的コヒーレンスの任意制御に関する研究が注目される。OCT は生体組織の反射断層像を得る有力な計測手法であり、その奥行き方向の分解能は光源の時間的コヒーレンスによって決定される。その光源としては、一般に白色光源や広帯域の SLD (super-luminescent diode) が用いられるが、操作性や分解能の、よりいっそうの向上を考えると、光源の時間的コヒーレンスは任意に制御できることが望ましい。その実現法のひとつとして、複数の LED (light emitting diode) を合成し、OCT 用として最適な時間的コヒーレンスを作り出すアルゴリズムが考案された^{3,k-192-3~6}。半導体レーザーの光周波数変調に基づく時間的コヒーレンス関数の合成法は、今や確立した技術として、加入者系光ファイバーネットワークの遠方監視等に利用された³。

一方、時間的コヒーレンスの制御と類似する効果を得るために、光源の強度分布を変化させて伝搬軸方向の空間的コヒーレンスを制御する手法が検討された³。また、液晶空間位相変調素子を用いた補償光学系は、乱れた波面を実時間で制御するという意味で光波の空間的コヒーレンスを制御するものであり、その適用分野の探索をはじめとする今後の展開が期待される^{1,3,k-188-5~6}。

コヒーレンス理論を基礎としたラジオメトリーにかかわる研究では、より実際的な問題として、自然の多色光源を対象とする三次元干渉分光イメージングの原理について報告された^{c-6,g-4}。

1.2 回折・散乱・伝搬

高性能の計算機が手軽に利用できるようになったためか、スカラー理論の適用できない微細構造による回折の数値計算や、数値計算の効率化に関する研究が目立った。例えば、サブ波長構造をもつ回折光学素子の一例として、高圧縮 Talbot array illuminator の特性が厳密結合波解析 (RCWA) に基づいて評価された^{1,3}。サブ波長構造をもつ三角回折格子にはすぐれた反射防止効果があることが知られているが、その周期構造が部分的にランダムとなった場合でも同様の効果があることが時間領域差分法 (FDTD

法) を用いて明らかにされた³。一方、非整数次フーリエ変換を利用したフレネル回折積分の高速数値解析法の有効性が確認され³、角スペクトルを用いた回折積分の高速計算法が提案された³。

各種光ビームの発生と評価に関しては、電子線描画によって作られたホログラム素子を用いてドーナツ状の強度分布をもつラゲール・ガウス (LG) ビームが発生され³、その収差特性が評価された⁴。また、原子漏斗への利用を目的として、マイケルソン型の干渉計を用いた LG ビームの発生法が議論された²。

1.3 ランダム媒質による光散乱

新しい光計測法の発展に伴い、高濃度の微粒子懸濁液をはじめとする動的ゆらぎをもつ濃厚ランダム媒質の研究が興味深い展開をみせている。具体的には、エバネセント光を用いて、固液相境界における多重散乱効果が実験的に解析された^{1,2}。また、低コヒーレンス干渉法を用いると、選択された局所的な単散乱光のみを検出することが可能となるため、濃厚な多重散乱媒質であっても、単散乱に基づく従来の動的散乱法の原理が適用できることが明らかにされた^{1,3}。

スペックルの研究では、伝搬軸方向に長い強度相関をもつスペックルを生成するためにアキシコンを用いる方法が提案され¹、さらに回折格子を透過した動的スペックルの統計的特性が議論された¹。また、新しいランダム媒質レーザーの作製を目指して、異方性をもつスペックル場を2方向から交差干渉させたスペックル場の統計的特性が解析された²。

1.4 光放射圧

光放射圧に関する研究では、特に、ナノテクノロジーの発展に伴い、ナノ物質や原子の捕捉・操作を扱った研究が注目された。

まず光放射圧分布の解析では、界面近傍に置かれた微粒子に働く放射圧¹や、励起子共鳴による放射圧の増強効果²が理論的に解析された。また、界面近傍で捕捉される微粒子の位置が離散的になる現象が実験的に見いだされ²、それが理論的に説明された³。物体の捕捉・操作手法に関する研究では、新しいアイデアとして、従来は不可能であった周囲の媒質よりも屈折率が低い物体の捕捉方法についての報告があった³。光放射圧の応用では、捕捉された微粒子を使って表面力を測定する装置が開発され^{2,3}、さらに放射圧による単一ナノ微粒子の操作¹、ナノ微粒子の凝集過程のモニタリング法²に関する報告があった。

1.5 展 望

光物理分野といえば伝統的な物理光学に代表される基礎

研究のみを連想されがちであるが、2001年を振り返ってみると、その大部分が計測等と密接に関連した応用指向の研究であった。ただし、それらはしっかりとした基礎に根ざした応用研究であり、光技術に新しい潮流を生み出すブレークスルーの出現を予感させる。今後は、この傾向を継続させるためにも、これまでに取り組まれた基礎研究を応用に結びつける意図的な努力が必要になると思われる。

2. 結像素子・光学機械

オリンパス光学 樋田博文

結像素子としては、自由曲面やレリーフ型回折光学素子が実用的に使われるようになってきた。また、体積型ホログラフィック素子 (HOE) や波長以下の周期構造をもつ回折素子などもそれぞれの特徴や光学的効果が明らかにされつつある。

光学機械では、デジタルカメラと光ピックアップが引き続き進展を続けている。デジタルカメラ用光学系は、さらなる高性能化、小型化が進んでいる。光ピックアップでは、DVD-Blue 用光学系の実現性がみえてきた。また、発表はあまりないが、データプロジェクターを中心として表示光学系の小型化も進んでいる。レーザービームプリンター光学系では、マルチビーム化が進んでいる。ここ数年多くの報告があった HMD については、市場が広がらないためか、この1年間の報告は少なかった。

2.1 結像素子

2.1.1 幾何光学的素子

非球面レンズでは、DVD-Blue システム光ピックアップ用の高 NA 単レンズが試作⁷されたことが注目される。また、自由曲面では、レーザービームプリンター用でレンズ枚数削減および誤差感度低減を行った光学系が設計⁴された。さらに、反射のアナモルフィック面を用いた明るい撮像光学系が設計³された。

屈折率分布 (GRIN) レンズでは、GRIN 媒質で発生する色収差の二次スペクトルについて、理論と実験より通常ガラスと同じ特性をもつこと^{b-1}が示された。

2.1.2 回折光学素子

レリーフ型回折素子を用いたものとして、一眼レフカメラ用超望遠レンズにおいて、2枚の回折素子に向かい合わせに配置することで、二次スペクトルを含む色収差を補正しつつ不要次数光によるフレアを大幅に低減させた光学系が、実用的なものとして開発^{4,9}された。また、分散の異なる2つのバイナリーレンズを積層して2つの波長に対して機能する光学素子が提案³された。

HOE が天体観測用の分光素子として試作^{2,4}された。ま

た、HOE で製造上発生する収差を計算機プログラム (CGH) で補正する方法が提案⁴された。

波長以下の短い構造をもつ回折素子については、パネル照明光学系の導波板としての試作^{1,4}、ガラス表面の反射防止用としての試作²、位相板としての試作²などが報告された。また、波長以下のランダムな構造でも反射防止機能をもつ可能性^{1,3}が示された。

2.1.3 液晶光学素子

液晶の複屈折性を利用し、電圧のオンオフによって焦点距離を変化させる液晶レンズが光学系に組み込まれて試作され³、良好な光学特性が得られた。

液晶光変調素子を用いた実時間補償光学系として、ツイストネマティック液晶光変調器と回折格子を用いた簡便な構成による方式が提案された^{a-4}。また、光アドレス型空間位相変調素子を用い、眼底カメラへ応用した場合の効果³が示された。

2.2 光学機械

2.2.1 結像装置・表示装置・プリンター

結像装置では、デジタルカメラ用光学系において、CCD 画素ピッチの縮小化と非球面の適用によって高性能化と小型化が進んだ。CCD 画素ピッチは $3\mu\text{m}$ を切り、画素数も多いものでは4~5メガピクセルとなった。さらに、等価的な画素ピッチを小さくするためのハニカム配置の CCD も開発⁸された。光学系としては、4メガピクセル対応で F2.0 の高性能ズームレンズ⁸や小型な2倍ズームレンズ⁸が開発された。

表示装置としては、データプロジェクターの小型化が進んだ。デジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を表示素子に用いたプロジェクターは、照明光学系がシンプルにでき、光学系全体の小型化が図られた。

レーザービームプリンターでは、出力速度を上げるためにマルチビーム化が進んでいる。導波型マルチビームモジュールを用いたレーザー走査光学系が試作³され、自由曲面を用いて誤算感度を低減した光学系が設計⁴された。

2.2.2 光ディスク

光ディスクでは、青色レーザー (波長 405 nm) を用い、片面 20 GB 以上の高密度を実現できる DVD-Blue システムのための光学系開発が活発であり、多くの報告があった。中でも、従来難しいと考えられていた NA 0.85 の単レンズ実現⁷が注目される。レンズ両面での偏芯対策などがかぎとなるが、2枚構成のものよりもワーキングディスタンスを長く取れるなどのメリットも大きい。また、プラスチックレンズ2枚構成による光学系試作およびレンズ移動による基板厚誤差補償方法の提案⁴やガラスレンズ2枚

構成による NA 0.9 光学系の試作³が報告された。また、DVD-Blue, DVD, CD の互換を可能とする光学システムが提案⁷された。

2.3 光学設計法

2.3.1 設計・評価方法

光ディスクなど波長オーダーの微細構造を対象にする光学シミュレーションでは、従来スカラーモデルによる回折計算が行われてきた。ところが、ピット構造の微細化やレンズの高 NA 化に伴い、スカラー回折では精度が十分でなくなりつつある。そこで、これに対応するために、時間領域差分法 (FDTD 法) などを用いたベクトルモデルによる回折計算の検討⁹が多く行われるようになった。

光学系の MTF (modulation transfer function) を三次元的に表現する方法について検討⁴された。また、実験計画法の直交表を用いたレンズ公差の決め方が提案⁴された。

2.3.2 最適化

グローバル最適化について、レンズ設計の後期に適用して実用的な解を求める手法が提案³された。

2.4 加工・評価測定

青色レーザー用のプレズ形状回折光学素子が電子ビーム描画を用いて試作^{1,3}され、高い回折効率と良好な波面収差が得られた。

宇宙用望遠鏡組み立てのために、シャック・ハルトマン方式による波面センサーが試作³され、所望の精度が得られた。また、DVD 用光ピックアップレンズの五次収差が反射回折格子を用いたシェアリング干渉計にて高速に測定^{b-6}できるようになった。

2.5 展望

今後、回折光学素子はより実用化が進み、HOE や波長以下の構造をもつ回折素子もそれらの特徴を生かしたアプリケーションが明らかにされていくと思われる。HOE は光学素子としてレリーフ型回折素子にない特性をもち、今後の展開が期待される。また、従来になく多くの特徴をもつと注目されている三次元フォトニック結晶については、現状では光学素子としてのアプリケーションは明確ではないが、今後適用先の探査が進んでいくと思われる。さらに、有機・無機複合材料などの新光学的材料^{m-1}も出現してくると思われる。

デジタルカメラ用の光学系は、CCD の画素ピッチがさらに小さくなり小型化が進むと考えられる。表示観察光学系でも、モバイルに対応した小型なものが出現してくると思われる。光ピックアップは、DVD-Blue システムが実現され、従来と互換性をもったものとして民生用にも入ってくると思われる。

3. X線結像光学

産総研 藤本弘之

第三世代の放射光は、さまざまな研究を進展させる舞台を提供してきたが、SPring-8 のファーストライトから丸 4 年の経過を含む 2001 年は、多くの成熟した技術の報告がみられた。

3.1 軟 X 線用多層膜

放射光や、X 線レーザー等の高い熱負荷をもつ光源での利用を安定に行うため多層膜界面での原子拡散を抑制する方法が研究されている。波長 13 nm の場合には、Si と Mo の層間に SiO₂ を挿入すると高い反射率を維持するが、さらに Si の両側に SiO₂ を挿入するとさらにすぐれた耐熱性を有することが報告された²。また多層膜のシミュレーションの高度化を目的として、Si-L 吸収端近傍での光学定数の測定も行われている²。

波長 6 nm 近辺の X 線を利用するために、多層膜の開発を行い、重元素層に Co, Cr, CoCr, 軽元素層に C を使用したところ 18% の反射率を得られた。耐熱性は、Cr/C > CoCr/C > Co/C とのことである²。

中性子線用 Ni/Mn 多層膜ミラー形成へイオンポリッシュの導入が試みられた。d=2.6 nm 以上では、界面粗さは改善され 0.4 nm RMS、しかし d=2.0 nm では逆に悪化した¹。

3.2 軟 X 線用ゾーンプレート (ZP)

透過型 X 線顕微鏡を用いて、磁気円二色性を利用した磁化ベクトルの画像化が実証された。アメリカの ALS アンジュレータービームライン 7 番で軟 X 線を用いて行われた。フレネル ZP のスポットサイズは、200 nm 以下であるⁿ⁻⁷⁸⁻¹⁸。

3.3 硬 X 線用ゾーンプレート (ZP)

SPring-8 の兵庫県ビームラインにおける走査型 X 線顕微鏡では、10 keV で 0.8×0.7 μm のマイクロビームが得られている。#2000 メッシュの蛍光像、暗視野像や 0.6 μm のパターンの透過像がクリアに観測されている。病原体に感染した植物の中の、Ca, Mn 分布の変化もクリアに画像化されている⁰⁻²。

SPring-8 のアンジュレータービームラインでは、NTT-AT で製作された Ta 位相 ZP を用いて、回折限界のマイクロビームが得られている。ナイフエッジ走査により垂直方向 0.5 μm、水平方向 0.3 μm、8 keV で 20%、10 keV で 15% の回折効率の集光性能が得られている^{d-3A}。

多層膜フレネル ZP の高度化が研究されているが、蒸着時に蒸着源とワイヤー基板間に円筒状のスリットを使用す

ることによりゾーンの平滑性が向上する²。

3.4 硬 X 線光学系

X 線望遠鏡では、10 keV 以上の結像を行うため、多層膜スーパーミラーを開発している。一次ブラッグピークのみを用いた場合には、エネルギー帯域は 40 keV を超えられなかったが、二次ピークを組み合わせることによって入射角 0.2° において、20~75 keV の範囲で 30% に近い反射率が得られる。直接レプリカ法で界面粗さ 0.34 nm 結像性能 1.4 分角が達成された¹。

3.5 反射光学系

蛍光分析では、色収差のないウォルターミラーを用いることによって、多元素同時観察が可能になる。

高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー放射光研究施設ビームライン 3C2 において、全反射蛍光 X 線顕微鏡を用い、岩石中の元素の遍在的分布を観察した¹。

また、SPring-8 に結像型蛍光顕微鏡を建設し、1 つの試料での多くの方向からの測定を組み合わせ蛍光三次元トモグラフィを実現した。Fe, Cu, Ni ワイヤからなるテスト試料や、合成ダイヤモンドの三次元像再構築が示された。励起波長を選ぶことによって、1 つの元素だけ選び出すこともできる⁰⁻²。

3.6 X 線屈折レンズ

X 線屈折レンズは 1990 年代はじめに考案され急速に発展したデバイスである。これは、物質が X 線に対して 1 よりわずかに小さい屈折率をもつことを利用して、母体に作り込まれた穴がレンズの役割を果たすものである。穴の形態によって、集光、コリメート、結像などの応用も試され 70% を超える透過率、アラインメントが微妙でない等のさまざまなメリットがいわれている。焦点距離が長いことも、放射光ビームラインに適している。SPring-8 において 24 keV の X 線を用いたツェルニケ型位相コントラスト顕微鏡により 190 倍程度の性能が得られている⁰⁻²。TIEGA, LIGA プロセスで作られた単レンズで、数 μm へ集光できる報告もされている⁰⁻¹。射出形成のプラスチックレンズを高圧 X 線回折実験へ応用する試みが報告されている。高強度入射の熱により、寿命が短いことを除けば、S/N 比の向上による有効性が示されている⁰⁻⁴。

3.7 その他の技術

産総研次世代半導体のグループは、レーザープラズマ X 線を光源とする μ -XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) システムでナノメートルレベルの位置制御を行っている²。また、ZP を波長走査型に用いる場合に、ZP の精密な位置決めが必要であることを指摘する報告もあった。X 線は、波長が可視光に比べて、2~3 桁も小さいため、光

学素子、光源が完全になるにつれて位置制御技術、環境安定化技術が今後ますます重要になってくるものと思われる。

4. 分 光

徳島大 岩田哲郎

かなり以前に、「物質にかかわる現代科学技術研究論文の半分以上は、何らかの意味でスペクトロスコピーの概念が関与している」という文章を読んだ覚えがある。現在、その比率はさらに増加しているのだろう。そのように広い守備範囲を有する分光学であるが、特に 20 世紀最後の 10~20 年の進歩は、概念、技術、装置、いずれをとっても、コンピューターとエレクトロニクスの発展に支えられて著しい。思いつくままに例を挙げても、光反応ダイナミクスの解明を目的としたフェムト秒レーザーによる超短パルス時間分解分光学や、さらに短時間の極限に迫ろうとするアト秒レーザー分光学、分子の回転エネルギーレベルを直接測定して半導体等の評価に利用しようとするテラヘルツ周波数領域分光学、レーザー冷却、原子波分光学、三次元単一量子ドット状態の分光学、STM (scanning tunneling microscope) の実用化を契機として理論・応用面の発展が著しい近接場分光学、ニュートリノの実験的検証を通して宇宙の起源に迫ろうとするスーパーカミオカンデの試みや、ハッブル望遠鏡や、すばる望遠鏡などを用いた X 線または赤天文分光学、一方で、生命の起源を解き明かそうとするヒト DNA 全配列構造解析の試みなどなど、分光学的手法がいたるところに取り入れられて、研究の概念、スケール、装置、予算規模などいずれをみても、一昔前のそれとは相当異なってきた。

そのような状況下で日本分光学会が設立 50 周年の節目を迎えた。分光研究誌では、それを記念して、「ノーベル賞と分光学」と銘打った一連の講座⁰⁻¹⁻⁶ が企画された。そのまさに最中、白川先生の導電性高分子の研究に引き続いて、野依先生が不斉合成物質の研究でノーベル化学賞を受賞された。キラリティーのある有機物質を選択的に生成する技術の開発で、すでに抗生物質など製薬業界では広く利用されているらしい。導電性薄膜の評価⁰⁻⁷に使われた赤外吸収分光光度計は、早くから完全に汎用分析機器となっているが、これを契機に、蛋白・アミノ酸構造解析など生命科学関連分野で、円偏光二色性、二色性ラマン、赤外二色性吸収分光分析装置なども、研究のツールとして注目を浴びそうな気配が感じられる。両先生の談話などを拝聴すると、上述の巨大科学の重要性は否定できないものの、一方で昔ながらの研究スタイルの必要性も考えさせられる。また、分光学の直接的な応用の場としての分析化学技術と

その関連機器の研究の重要性も再認識させられる。

2001 年度を振り返ると、「IT」は半導体関連業界の不況でややトーンダウンしたものの、やはり時流を反映して、「ナノ」、「環境」、「バイオ」のキーワードに関連した研究発表が多く、特に視覚に訴える分光イメージングの概念と装置が、ますます重要視されてきているようである。ここで、本来ならばそれらのいくつかをピックアップして、各論を展開すべきであるが、いずれもすでにいろいろな所で書かれていることの繰り返しになってしまう。それよりもむしろ、おのおのの講演会、雑誌ごとの内容を羅列したほうが、内容が浮かび上がってわかりやすいと思われるので、以下そのようにすることでご容赦願いたい。

春の応用物理学会¹は、単一量子ドットの近接場分光とナノ光デバイスへの応用、テラヘルツパルス電磁波の発生とイメージング、超短白色パルスを用いた分光断層イメージングなどのシンポジウム講演があり、情報光学、医用光学のセッションでは、赤外反射スペクトルからの皮膚表面および内部の状態推定のための装置と統計的手法を駆使したデータ処理に関する講演や、近赤外光による脳機能画像計測、マルチスペクトル色画像処理に関する講演が目立った。また、多焦点 CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) 顕微鏡による分子振動イメージングの試みや、分光 ATR (attenuated total reflection) による表面プラズモン共鳴の評価、STM 発光スペクトルの測定など、今後の展開が興味深いものも見受けられた。引き続き秋の応用物理学会²でもほぼ同様の趣旨の講演が多かったが、中でも、近赤外スペクトルによる生体計測、表面プラズモンバイオセンサー、分散型コヒーレンストモグラフィ、レーザートラップ顕微鏡による単一細胞小器官の分光測定、レーザー照射により遠隔駆動された赤外光バイオテレメトリーなどで進展がみられた。さらに、「バイオと半導体の接点を探る」と称したシンポジウムが催され、特に生体環境計測を意識した、「バイオチップの開発研究」の講演が今後の方向を示唆しているように感じられた。その中で、キャピラリー電気泳動チップとマイクロ波誘導プラズマ検出器を同一石英チップ上に作りつけ、小型高感度分離分析システムを構築する試みは注目に値する。Optics Japan 2001³ および、横浜で開催された ICOSN 2001¹⁰ における分光関連の講演数はさほど多くなく、内容的にも上述のそれと似通っていた。主成分分析を用いた分光画像処理、共焦点顕微鏡を用いた単一分子の蛍光分析、反射スペクトルによる生体計測、リファレンス補償型の表面プラズモンバイオセンサーなどの講演があり、装置面では、周波数掃引方式の位相変調型蛍光寿命計、フェムト秒二色パルス干渉法

による血糖値測定法などの提案があった。

応用物理学会誌においては、テラヘルツ時間領域分光法の解説^{c-2}が掲載された。周波数分解は実質 2.5 GHz 程度であるものの、大気汚染、水系、半導体評価などに利用でき、DNA などの生化学物質評価にも使用されている例があることが紹介された。また、照射エネルギーが小さいことを利用して、試料ダメージを与えないイメージングの試みも紹介された。その他、近年の青色、紫外 LED の開発に後押しされて、白色 LED が市販されるようになったが、ZeSe 系白色 LED の解説記事^{c-5}が掲載された。「光学」では、カーボンナノチューブのラマン散乱^{a-2}、光散乱を用いた肌の分光反射率の独立成分分析^{a-10}、白色発光ダイオードの開発と照明光源への応用^{a-11}などの報告や半導体量子ドットの分光^{a-2}、分光画像^{a-5}に関する解説があり、臨床光診断と治療技術の新展開の特集号^{a-2}では、光オキシメトリー、近赤外線脳機能計測、分子振動領域の中赤外パルスレーザーによる生体分子手術などの記事がみられた。また、「OPTICAL REVIEW」では、フェムト秒時間分解三次非線形応答位相変調蛍光計^{b-0}、光子計数型蛍光寿命計^{b-5}などの提案があった。JJAP や外国雑誌については、個々に興味深い報告はもちろん多数あるものの、講演発表時と印刷時との間にタイムラグがあるものが多く、誌面の関係で本稿では割愛する。

なお、分光研究誌では、「21 世紀の分光光学と日本分光学会」と題した座談会^{a-1}が企画された。各分野の専門家のそれぞれの立場での分光光学に対する思いと、21 世紀の展望が述べられており、示唆に富む内容である。また、応用物理学会誌でも、「分光計測技術の進展」と称した特集^{c-6}が組まれた。その内容をそのまま列挙すると、「分光計測技術の発展と展望」、「近接場光学顕微鏡による空間分解分光法の進展」、「食品の非破壊計測のための近赤外分光法」、「光感受性物質による分光スペクトル・画像による病態の確認」、「光熱変換分光法の展開」、「ナノ微粒子合成過程のレーザ分光画像計測」、「電子制御波長可変レーザーによる分光応用」、「分散型干渉分光トモグラフィ」、「肌の分光反射率画像計測とその応用」、その他、「干渉分光イメージング」や「味・匂いセンサー」であり、このようにタイトルだけ眺めても、これだけで最近の分光計測の現状と今後の展開が十分に把握できる。

5. レーザー

NTT 東盛裕一
分子科学研究所 猿倉信彦

5.1 レーザー (半導体レーザー)

2001年度はインターネットの急成長に伴うネットワークトラフィックの急増に対応するため、光化によるネットワークの大容量化に向けた対応が大幅に加速した。中でも波長分割多重化システム (WDM) を中心とした新しい技術開発の波が進展し、チャンネル当たりの伝送速度の高速化と波長数の増加による多チャンネル化とによる超大容量伝送の実現のみならず、ノードの光化による波長切り換え技術を利用した大容量光クロスコネクタ、光交換の実現も期待されるようになった。したがって、システムを構成するキーデバイスのひとつである光源への要求も多様化し、現実的なコストでのデバイス実現のための開発が行われると同時に、特性面では 40 Gb/s 超を目指した高速化への対応だけでなく、小型化、低消費電力化、ならびに波長の安定化、切り換えなども要求されるようになった。

高速かつ小型・低消費電力の観点では電界吸収 (EA) 効果を用いた変調器をモノリシックに集積した EA-DFB レーザーの開発が進展した。EA-DFB レーザーは、EA 変調器の電極構造で集中定数型と進行波型の 2 つに大別することができる。集中定数型の電極を用いた EA 変調器では変調器の長さを短くすることによって電気的容量を低減でき 40 Gb/s での変調動作が相次いで報告された。これに対して、進行波型の電極を用いた EA 変調器はその動作が電気的な容量で制限されないため原理的には 40 Gb/s 超の超高速変調動作への展開が可能で、進行波型 EA 変調器を有する超高速 EA-DFB レーザーの報告も行われた。

波長の安定化、切り換えの観点では、通信用光源はこれまで単一波長が用いられてきたが、本年度は WDM システム用の光源として、波長指定に対応できる波長可変光源や波長選択光源の報告が相次いだ。波長可変光源は、電気的に高速で波長が切り換えられるデバイスとして通信用のみならず、計測用としてもその開発が期待されている。2001年度は以下に示す 3 種類の構造が大きく進展した。

分布反射型 (DBR) レーザーは、活性領域と回折格子が形成される分布反射器とが別の領域に形成され、分布反射器領域の屈折率を変化させることで波長可変を行う。一般的に発振波長の変化率は電流注入による光導波路の等価屈折率の変化率程度に制限されるため、通常、波長可変範囲は 7~8 nm 程度に留まっている。しかし近年、波長を選択するためにレーザー共振器内に設けた反射器やフィルター

に工夫を施すことで (バーニア効果等) この制限を克服した新構造のデバイスが報告され、さらに光源モジュールの外側に波長安定化のための電子回路等を搭載した波長可変光源の報告も行われた。

一方、1つのレーザーで発振波長を可変にするのではなく、波長の異なる多数の DFB レーザーをアレイ化して、広い範囲の波長を選択する波長選択光源も報告された。この光源は波長選択を高速に行うことはできないが、安定な動作を行うことが特徴で、WDM システムにおける故障時のバックアップ用としても注目されている。従来の単一波長システムはシステム全体が同一の光送信機で構成されているため、バックアップ用の光源はシステム全体で共用していた。しかし、WDM システムにおいては光源が多波長、多チャンネル化するため、そのバックアップ用光源の種類が必然的に多くなり、したがって整備のコストや管理の複雑化が予想される。そこで、システム全体で共用でき、多数の波長が切り換えられる光源、つまり波長選択光源が必要となった。

また、垂直共振器型レーザー (VCSEL) においても波長可変光源の報告は行われた。レーザー共振用の高反射鏡ミラーをエッチングで共振器の外部に形成した、いわゆる外部共振器構造を用い、反射鏡を静電応力もしくは熱応力で微調して共振条件を制御して広範囲で連続的な波長可変を実現した。

波長可変光源は前述の DBR 型、DFB アレイ型、VCSEL 型が同時進行で開発されている状況であり、完成度向上に向けた長期信頼性の報告もなされている。2002年度はそれぞれの性能、コストに見合う適用範囲が明らかになると考えられる。

(東盛)

5.2 レーザー (半導体レーザー以外)

2001年のレーザー研究の特徴を一言でいえば、研究の完成度の向上と、レーザー応用の可能性の探索から次のステップへの展開の始まりが実感された年であったといえるだろう。レーザー装置の研究開発は、新要素技術の発掘というより既存の要素展開の到達点を示す局面が、モード同期レーザーや紫外光源の開発を中心として多く見受けられた。従来の完成度の低い光源では応用の原理的可能性を模索するのがやっとであったが、21世紀の高い完成度の光源によりまさに産業応用への現実的導入が真剣に検討できるようになってきた。現に米国の理科学用レーザーの著名なメーカーでも研究開発用レーザーと産業用レーザーの出荷金額の逆転がすでに起きていると聞いている。

5.2.1 超短パルスレーザー

5 fs の極短パルスの発生がチャープミラーなどを用いた

高度な分散制御が可能となった後、モード同期レーザーの制御パラメーターの中で、最後に残っていた光電場の包絡線と位相の同期の大問題が NIST (National Institute of Standard and Technology) やウィーン工科大などのグループで実現されて、モード同期レーザーの開発も行き着くところまでたどり着いた感じがする。その原理は、フォトニッククリスタルファイバーでの自己位相変調でスペクトルを広げた基本波と別途発生した SHG との干渉でのビート周波数をゼロにするように共振器長などを制御することにより、キャリアと変調包絡線の位相関係を完全に固定するテクニックである。このロッキングが実現されることにより、今まで予想されなかったモード同期レーザーの応用として、周波数標準と精密周波数計測が、ロックされた状態で保障されるモード同期周波数の通倍性を利用して可能となったことが大変な驚きであった。極短パルス化そのものについても、ウィーン工科大で超短パルスチタンサファイアレーザーの高次高調波によりサブフェムト秒が発生できたとの報告があるが、個人的見解ではまだデータの解釈に議論の余地があるような気がする¹¹。

5.2.2 紫外非線形波長変換

1995年に阪大の佐々木らにより開発された CLBO 結晶は4倍波発生100Wの長時間動作が三菱電機により実証されたが、遅れて三菱マテリアルの開発した新4倍波結晶 LiB_4 でも430mJの紫外高パルスエネルギー発生が実現され、リソグラフィー応用でなければエキシマーレーザーが不要となる時代の到来を予感させる。また東大物性研と中国のChenらによる KBBF 結晶を用いた179nmの真空紫外光のSHGによる発生は非線形波長変換の金字塔となるすばらしい実験である。この結晶の量産技術が確立されれば、真空紫外光の工業応用も可能になるであろう¹²。

5.2.3 RGB レーザー

ドイツのWallensteinらによるモード同期Nd:YVO₄レーザー励起のOPOとその波長変換によるRGB光源の開発も完成度が上がってきている。その光源の、映画館のレーザー映写機や新しいレーザープロジェクターの応用の可能性などが、現実のコストレンジで十分議論になるようになってきており、潜在市場の大きさや重要性から日本でも類似の研究を始める必要性を強く感じている¹³。

5.2.4 固体レーザーとファイバーレーザー

華々しい新固体レーザー媒質は、近年発明されてないが、東北大金研などによるCe:LiCAF(波長290nm)や中赤外のCr:ZnSeなどの波長可変レーザーが近年、結晶育成の完成度が高まり超短パルス応用や大出力化のめどが立ちつつある。また日本で開発されたセラミックレーザーも電通

大のグループにより100ワットクラスの動作が確認された。通信応用では、すでに成熟したファイバーレーザーの開発のターゲットは大出力化であり、フェムト秒増幅では1ミリジュールクラスが、高平均出力化では100ワットクラスが実現されつつある¹³。

5.2.5 テラヘルツ光源

テラヘルツ光源(パルス遠赤外光源)の研究では、理研の川瀬らによる注入同期パラメトリック発振器による高出力化の研究や、通総研の阪井らによる30THzまでの高周波数化の研究が特筆すべき研究である。テラヘルツ電磁波の研究の問題は、発生デバイスから応用研究に遷移しつつあり、半導体計測や環境計測で定番となるような応用がみつければさらなる汎用化が期待できる。

5.2.6 展 望

長い間夢のように思われていた研究開発目標のほとんどが実質的に達成され、その進歩したレーザーをいかに応用につなげていくか、あるいは次の意味のある研究ターゲットをいかに設定していくかがこれから基礎工学的レーザー研究の課題であろう。産業応用に関しては、加工応用にたえる高平均出力モード同期レーザーの開発や、半導体レーザー励起Ndレーザーの4倍波や5倍波の安定化・高出力化が明確な開発目標として浮かび上がってきた¹³。(猿倉)

6. 量子光学・非線形光学

上智大 江馬一弘

量子光学・非線形光学の分野は基礎・応用の両面で2001年も大きな発展をみせた。特に気体原子のボーズ・アインシュタイン凝縮やフォトニック結晶の分野の進展は著しい。研究項目を量子光学と非線形光学に分類するのは適当でないため、分類分けせずにいくつかの項目を選び、2001年の進展を概観する。

6.1 気体原子のボーズ・アインシュタイン凝縮

2001年度のノーベル物理学賞が気体原子のボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)に対して与えられた。気体原子のBECは世界で30か所以上のグループで成功しているが、日本でも2001年末までに4か所が成功しており、この分野の急速な発展に大きく寄与している。海外での成果の中に日本人が寄与しているものが多く、例えば、ボーズ凝縮した原子のコヒーレント状態とスクイーズド状態の生成²⁹²⁻⁵⁵¹²や、BECの量子渦の位相を干渉計を用いて観測したもの⁸⁷⁻⁸などが挙げられる。また、2001年度中に、準安定状態 $He^{r-294-5516, s-86-16}$ と $K^{r-294-5545}$ のBECに成功し、BECの仲間入りする原子種が増えてきている。1995年以来、気体原子のボーズ凝縮の研究は急速に進展してお

り、新しい光学の分野「原子光学」を築き、その重要性は量子光学に留まらず、凝縮系物理、低温物理、統計物理など幅広い分野にわたるため、今後ますます発展することが予想される。

6.2 量子情報

量子情報の分野も活発であり、2001年は毎月のように研究会やシンポジウムが開かれた。国内では平衡型ホモダイナミック検出法を用いる量子暗号の実験¹⁴や量子テレポーテーションに関する進展¹⁵⁻⁶⁴⁻⁴がみられた。海外では、量子情報には不可欠なエンタングルメント状態の生成に関して、パラメトリック過程で発生した光子対のエンタングルメントが初期では不完全であっても、後から完全なエンタングルメントにすることが可能であることが実験的に示された¹⁶⁻⁴⁰⁹⁻²²。また、Csガスの入った2つのセルを使って、エンタングルメントを生成し、それが0.5 μ sの間保たれることが実験的に示された¹⁷⁻⁴¹³⁻²⁷。多数の原子の間のエンタングルメントが長時間保たれることは、これまでの常識を覆す画期的な成果である。

6.3 フォトニック結晶

フォトニック結晶の分野も急速な発展のまっただ中であり、当初のフルギャップによる自然放出光発生抑制等にとどまらず、光集積回路の可能性やフォトニック結晶ファイバーの開発など光学の一大分野を築いている¹。フォトニック結晶ファイバーは当初数十 dB/kmであった損失が、数 dB/km程度まで下がってきており、短パルスにより白色光の発生などさまざまな分野で使われるようになった。国内での注目する成果としては、二次元正方格子フォトニック結晶レーザーのユニットセル形状（フォトニックアトム形状）を変化させることによって、発振モードの偏光特性を自在に制御できることを実証したこと¹⁸⁻²⁹³⁻¹¹²³や、二次元フォトニック結晶の線欠陥による導波路の群速度分散を初めて測定し、フォトニック結晶中の光速は最大空気中の1/100程度に減速していることを観測した例¹⁹⁻⁸⁷⁻²⁵などが挙げられる。海外では、毛細管現象を利用して、非常に規則性の高い三次元フォトニック結晶構造を大面積でシリコン基板上に作ることに成功した²⁰⁻⁴¹⁴⁻¹⁵ことが注目された。フォトニック結晶の分野は、日本が基礎・応用の両面で世界をリードしており、最近のこの分野への参入者の増加を考えると、今後も日本がリーダー役に立つことは確実だと思われる。

6.4 非線形光学

非線形光学の新しいメカニズムとしてはEIT (electromagnetically induced transparency) とよばれる量子干渉効果による透明化現象を利用したものが数年前から活発に

なっている。ほとんどのEIT効果は冷却した原子集団を用いて実現されていたが、最近になって固体水素でのEITおよびそれに伴う非線形効果が実現されている¹⁵。EIT効果特有の低群速度光伝搬やそれによる巨大非線形性の出現がみられ、固体でのEITデバイスの可能性が開かれた。また、新しい非線形材料としては、強相関系物質¹⁶や有機・無機複合型物質¹⁷⁻⁶³⁻⁷も注目され始めた。前者は光通信の波長帯において高速で大きな非線形性を有することが確認されつつあるが、まだ非線形性のメカニズム等の物理的な解明はされておらず、今後大きく進展する分野であろう。後者は無機半導体を有機物質で挟んだ量子閉じ込め構造であり、10年以上前からその光物性の研究はされていたが、最近になって非線形効果が非常に大きいことがわかり、非線形の起源の解明や時空間変換への応用が示された。

従来からある材料に目を向けると、応用面で画期的な進歩がみられた。国外ではあるが、GaN系の量子井戸サブバンド間遷移が光通信の波長帯で実現され¹⁸⁻⁷⁹⁻¹¹、通信波長帯でサブピコ秒の応答速度をもつ全光学光スイッチ実現の可能性が高まった。また、周期分極反転LiNbO₃ (PPLN)導波路で導波モード分布を対称化することにより1.55 μ mに対するSHGで150%/W/cm²に達する規格化変換効率が得られた¹⁷。これは、DWDMシステム用波長変換などの応用へ向けた大きな前進である。

6.5 展望

量子光学・非線形光学という分類では、非常に広い範囲の分野をカバーするが、ここではそのほんの一部しか紹介していないことを断っておく。この分野の特徴的なところは、基礎的な研究の占める割合がかなり大きいところにある。BECや量子情報の分野はすべて基礎的な研究であり、実用的な応用研究というのは今後生まれてくるものであろう。フォトニック結晶の分野では、基礎研究と応用研究が融合して理想的な進展を示しているように感じられる。それに対して、非線形光学の分野は新しい物理的メカニズムや新しい材料の研究というような基礎的な分野と、通信波長帯に重点を置いた応用研究の間で両分野の交流が乏しいように思われるので、今後は基礎と応用の垣根を越えた交流を期待したい。

7. 近接場光学

産総研 中野隆志

回折限界を超えた高分解特性をもつ光学顕微鏡の実現手段として始まった近接場光学は、多くの分野で重要なキーワードになった。最近では研究の中心が基礎から応用へと進み、目的に特化した解析やプローブ・装置開発が活発に行

われている。2001年の進展を概観する。

7.1 基礎

原理解明のためのシミュレーション手法としては、有限差分時間領域法 (FDTD 法) の利用が標準化されつつあり、さまざまな目的に適した素子・装置の開発や、新現象、特性解析^{k-196-1}に使われている。特に光記録の装置設計に関してシミュレーションが多く用いられ、開口での光の利用効率を向上させるため、高屈折率媒体や表面プラズモンを利用した開口ヘッド¹やトラッキングを考慮した開口形状²等についての解析が行われた。

近接場光学において重要な要素となるプラズモン応用に関する研究も盛んに行われ、表面プラズモン共鳴による光第二次高調波発生の増強¹⁸や微小球における whispering gallery (WG) モードを用いた光スイッチに関する研究結果が報告された。また、積極的に表面プラズモンを利用する方法として、アキシコンプリズム型のプローブが提案された¹⁹。

高効率化等で改善が続くファイバースコープにおいては、さらなる向上を目指して金属膜の表面粗さを向上できるプローブ作製法が提案された¹。また、浮上型光記録ヘッドとして特化された、ソリッドイマルジョンレンズ (SIL) やソリッドイマルジョンミラー (SIM) が作製された^{1,3}。

7.2 顕微鏡応用・分光

顕微鏡応用では、低温における量子構造の発光イメージングや時間分解蛍光像の観察結果が報告された¹⁸。

また、単なる高分解能性能だけでなく、光によるセンシングの必要性を強く示せる顕微分光への応用では、増強ラマン分光¹⁸の報告に加え、専用の開口型カンチレバーと波長可変光源の自由電子レーザーを組み合わせた装置や、専用的高効率ファイバースコープと Fourier transform IR (FT-IR) 分光器を用いた赤外顕微分光測定が行われた¹⁹。紫外域でも、CuCl 量子点の分光測定³や ZnO のフォトルミネセンスⁿ⁻⁷⁹⁻¹⁵測定が行われた。

7.3 光記録

光記録への応用に関しては、依然として数種類の方法が並立して研究が進められている。浮上型ヘッドでは、光の利用効率の向上を求めたスリット型のシリコンウエッジプローブが提案された³。また、SIL を用いたシステムでは、高速回転するディスクへの記録・読み出しが実現し、50 Gbit/in² を目指した研究が続けられている。また、ROM (read-only memory) ディスクを読み出す場合のギャップの制御方式として偏光を利用するシステムが提案された⁷。

浮上ヘッドを用いない super-resolution near-field

structure (Super-RENS) や Super-ROM ディスクにおいては、近接場光学に基づいた新しい読み出しピックアップの設計指針が示された^{7,d-3}。また、ディスク側に SIL を作り込み、トラックピッチを短くする方式が提案され、信号読み出し特性が報告された⁷。

7.4 光加工

近接場光のリソグラフィへの応用として、金属プローブ先端の増強電場を用いたフォトレジストの露光方式²や、2層レジストを用いた密着露光による近接場光転写法¹⁸が提案された。また、ディスクマスタリングプロセスへの開口型 Super-RENS 構造の応用が提案され、最適構造の検討結果¹が報告された。

リソグラフィ以外では、光 CVD (chemical vapor deposition) において近接場光を用いると、非共鳴領域の波長の光によっても堆積できることが報告され、ナノメートルサイズの Zn ドットの作製に成功しているⁿ⁻⁷⁹⁻⁸。また、近接場光を用いて金属薄膜表面の陽極酸化を行いナノメートルサイズの構造を作り、その構造に光を導波させた実験が報告された¹。

7.5 原子操作

近接場による双極子力を用いた原子の制御、走査に関する応用に関して、エバネセント場を用いた原子ファネルによる冷却 Rb 原子の反射についての研究²や、シリコンのスリットプローブによる、高感度、高空間分解能検出装置についての研究結果^{1,2}が報告された。

7.6 ナノデバイス

新しい展開として、近接場光と物体の相互作用を利用したナノデバイスの研究が進められ、応物学会ではシンポジウムが開催された。負誘電体媒質を用いた導波路構造による低次元光波光源²や、Super-RENS による光増幅素子ⁿ⁻⁷⁸⁻¹⁷、表面プラズモンの伝搬を用いたナノデバイスへの光の入出力路素子^{3,n-79-27}、等が提案された。また、プラズモン・ポラリトンや量子ドットによるスイッチング素子も提案された¹。

7.7 展望

近接場光学は学問的にも興味深いですが、今後よりいっそう目的別に特化した解析や装置開発が進み、光の特質を生かした実用レベルの技術となることが期待される。

8. 光応用計測

大阪大 橋本 守

10年前には専門家しか使用することができなかった超短パルスレーザーがモードロック Ti:Sapphire レーザーの登場によって誰にでも使えるようになり、その高ピーク

強度による非線形光学効果や発光波長の広帯域性と高輝度を利用した光計測技術が数多くなされるようになってきた。また Ti:Sapphire とは異なる発振波長をもつ Cr:Forsterite や Cr:LiSAF 等の利用も見受けられるようになってきており、超短パルスレーザー光を利用した光計測技術が今後も発展していくと思われる。また、本誌で特集^{a-1}されたような液晶デバイス、LCD (liquid crystal display)、PAL-SLM (parallel aligned nematic liquid crystal-spatial light modulator)、ならびに MMDM (micromachined membrane deformable mirror)、DMD (digital micro-mirror device) や MLA (microlens array) 等の高度に集積化されたデバイスや AOTF (acoustic optical tunable filter) によって、機械的な駆動のない波面・波長等の高速制御や CCD (charge coupled device) と組み合わせた並列化計測が行われるようになってきた。昨今の計算機の処理速度向上と相まって、従来長時間を要していた計測を実時間計測することもひとつの潮流となっている。

8.1 距離・形状・位置計測

モードロックレーザーの多数の安定した縦モードを利用したギガヘルツ強度変調光波距離計が実現された¹。LD の自己光混合を利用した波長走査距離計測の高精度化が、走査波長幅のブロックゲージを用いた干渉計での同時観測によって行われた³。白色光を 3 色カラーフィルターで分光し 3CCD で 3 色同時に別々に位相差検出する機械的走査機構のないカラー・イメージングエリプソメーターが開発された^{1,4-2}。超短パルスレーザー光を照射した際の時間遅延を、イメージンテンシファイアに印加する電圧を高速に変化させて強度情報に変換する三次元カメラ (奥行き分解能 2 mm, 15 frame/s で観測可) が実現された³。高次回折光を用いた高分解能集積型マイクロエンコーダーが開発された¹。

8.2 速度計測等

自己混合型 LD を用いたドップラー流速計は、小型・経済性・容易操作の点においてすぐれているが³、照射角度の計測が不要な 2 ビーム化^{a-11} や、Y 分岐導波路、ファイバーレンズを用いた集積化の提案³、*in vivo* での血管中の血流測定等¹⁻²⁵ が行われた。ドップラー OCT (optical coherence tomography) において、散乱光を二次元検出することで、流速ベクトル (流速と流れの方向) が計測できることが示された³。また、大きな遅延時間をもつライダにおいて速度計測を可能とするために、光ファイバーによるストレージープを通してリファレンス光を遅延させてから干渉させる手法が開発された¹⁻¹⁸。単一運動微粒子の吸収

係数、速度、粒子径がドップラービートにより同時観測可能なことが示された^{a-6}。

8.3 光ファイバー計測

周期構造をもつブラッググレーティング光ファイバーに、歪みや熱が加わると回折波長が変化する。これを直列に接続し、electro-optic gate を用いて時分割観測するシステムが開発され、50 個まで直列に配置できることが示された¹⁻¹⁶。また、自発ブリュアン散乱を利用した温度センサーにおいて、光ファイバー増幅と、RF-スペクトルアナライザーによるリファレンス光とのヘテロダイン信号 (~11 GHz) の直接観測によって、長さ 57 km、空間分解能 20 m (レーザーの時間幅による) の温度センサーが実現された¹⁻⁶。分布帰還型ファイバーレーザー自身をセンサーとし、縦モード間と複屈折による偏光モード間のビート信号から歪みと温度を計測する手法が開発された¹⁻¹⁹。低コヒーレンス光を、4% 程度の反射膜を複数設けた光ファイバー中に導入し、各部分から反射された光の白色干渉縞を観測する、準分布型歪みセンサーが構築された^{1-19,k-196-1}。高速波長走査によって異なる距離にあるガスセンサーからの信号を分離する光ファイバーガスセンサーが構築され、37 個のセンサーを 2000 ppm の感度で観測可能であることが示された¹⁻⁷。マイケルソン干渉計を通した低コヒーレンス光源からの光を光ファイバーで伝送し、校正機関から離れた現場でブロックゲージの校正を行う手法が開発された³。ファイバー型放射温度計におけるファイバー自身の赤外放射の影響を除くため、可視光照射による赤外ファイバーの透過率変化を利用したロックイン検出法が示された²。面内分解能 16 μm 、奥行き分解能 3.1 μm の直径 1 mm の共焦点蛍光内視鏡が開発された^{k-188-5}。

8.4 補償光学

すばる望遠鏡での試験観測結果が紹介された^{a-8,3}。PAL-SLM を用いた全光型フィードバック系が実現され^{k-188-5}、コヒーレント結像系だけでなく白色インコヒーレント結像系にも適用された¹。目の外部から網膜を観測する眼底カメラでは水晶体の複雑な歪みによって空間分解能が制限されるが³、PAL-SLM³ や MMDM¹⁻¹⁰ を用いた波面補償による高分解能な網膜計測が行われた。実時間波面補償のためのオープンループ系制御の検討^{a-4} や、LED の低コヒーレンス性を利用した不要な干渉縞による影響の低減が行われた³。

8.5 顕微計測

共焦点蛍光顕微鏡、多光子励起蛍光顕微鏡が開発されて久しいが、より高速に観測するための工夫や、蛍光寿命観測の高速化が行われた。MLA の隣り合う各レンズ間に光

路差をつけ、時間的に分離することで各 MLA 間のクロス
トックによる空間分解能の低下を避けて観測することが可
能となった¹⁻²。再生増幅器付き Cr:LiSAF からの光を空
間的に強度変調することで奥行き方向の分解能を得、発
する蛍光を波長によって2つに分離した後、1台の100 ps の
分解能をもつゲート付き二次元検出器上に同時に投影する
ことで、三次元空間+波長+時間の五次元の観測が可能な
蛍光顕微鏡が開発された¹⁻¹⁷。励起光の強度を高周波変調
し、試料の発光波長に等しく励起光とは異なる周波数で変
調した光を同時に入射し、誘導放出によって蛍光色素自身
でヘテロダイン検波させる顕微鏡寿命計測法が開発され
た¹⁻⁷。観測蛍光は低周波なため検出が容易となり、2つの
光の重なった部分のみの情報が得られるため、共焦点配置
をとらなくても光軸方向の分解能をもつ。

Cr:forsterite レーザーを励起光源として、二光子蛍光に
よって機能性分子を、SHG, THG によって subcellular
structure を同時観測することが行われた¹⁻²³。また、SHG
顕微鏡と MLA を組み合わせた多焦点 SHG 顕微鏡による
実時間計測²や、多焦点 CARS (coherent anti-Stokes
Raman scattering) 顕微鏡による多重スペクトル画像の取
得が実現化された¹。また、CARS 顕微鏡では同時に発生す
る非共鳴バックグラウンドの重畳が問題となるが、これを
観測対象の大きさ⁸⁻⁸⁷⁻²や偏光特性¹⁻¹⁷で分離する手法が
開発された。

量子ドットは、退色が少なくその大きさによって発光波
長を制御できるため、染色材料として注目されている。量
子ドットの蛍光寿命が長いことを利用して、自己蛍光と時
間的に分離されたコントラスト増強画像の取得が行われ
た¹⁻¹¹。DMD を用いた多焦点共焦点顕微鏡が提案され、
S/N 比が検討された¹⁻¹⁹⁵⁻⁵。ゼーマンレーザーによるヘテ
ロダイン信号を共焦点光学系で観測することで、散乱の影
響を除いて観測することが可能なことが示された¹⁻⁶。遠紫
外光は可視光や近紫外領域に比べて吸収が大きいため、吸
収の小さい物体を観測することが可能である。Ar, F₂ を封
入した放電光源からの遠紫外光 (192 nm) と、シュワルツ
シルト反射型対物レンズを使用した顕微鏡が開発され、石
英基盤上の 1 nm 厚さのポリマーや、Si 基盤上の 3 nm 厚
さの SiO₂ 薄膜の像が得られた¹⁻¹⁷。

8.6 その他

光トラップにより 1 ATP の加水分解による 8 nm のキ
ネシンのステップと力学的負荷との関係が調べられた²。ま
た、微粒子と界面との表面力の二次元観測が光トラップに
よって行われた³。光トラップした磁性微粒子の磁気による
回転操作が行われた¹⁻¹⁷。

フェムト秒レーザー光からのパルス列のうち、隣り合う
パルス間の干渉を利用した大気中の群屈折率観測法が開発
された³。フェムト秒レーザーを用いた二色干渉計により基
本波と SHG 光間での屈折率分散による光路長差を観測す
ることで血糖値を観測する手法が開発された³。超短パル
ス光を用いて単一サイクルのテラヘルツパルス光を発生・
検出することができる。テラヘルツ光の高い物質透過性と
水に対する強い吸収を用いて、黒インク薄膜の水分含有量
と膜厚の同時測定が行われた²。

スペクトル上での偏光干渉による複屈折分散計測法を用
いた液晶変調素子の詳細な特性観測¹や二次元観測手法の
開発が行われた³。また、構造複屈折を利用した波長板アレ
イによる実時間ストークスパラメーター画像の取得が行わ
れた³。

9. 干渉計測

産総研 平井亜紀子

9.1 概要

Optics Japan 2001 では、光計測分野の発表 43 件のう
ち、67%が干渉計測に該当した。他分野にも干渉計測に該
当する発表があり、日本光学会で活発に研究が行われてい
る分野のひとつである。6月には ICOSN 2001 (Internat
ional Conference on Optical Engineering for Sensing
and Nanotechnology) が開催され、干渉計測に関するセッ
ションも国内外からの発表で盛況であった。測定対象や干
渉計のタイプは多岐にわたっているが、ここでは、原報告
で対象にしている測定物理量によって分類した。距離・形
状等を対象とした報告は多数あるため、さらに手法による
分類も行った。複数の手法を用いたものもあるが、報告の
主眼と思われる手法によって分類している。

9.2 距離・位置・形状・断層情報等

9.2.1 位相シフト干渉計

精度向上に向けて、光学系の安定化を行う方式の提案と
位相シフトの誤差を除去するアルゴリズムの提案が多かつ
た。前者には、LD の電流 FM 特性を利用した安定化と位
相シフトを同時に行う方式^{10,1-28}、光熱変調を用いたフェ
ーズロック位相シフト LD 干渉計があった¹⁻¹³。後者には、
位相シフト量の非線形性、非一様性、ランダムノイズを抑
制したアルゴリズム¹⁻⁹、希望の誤差を除去する位相計算
アルゴリズムの一般的設計法¹⁻²⁵、位相シフト誤差を補正
できる自己参照法があった。また、低コヒーレンス光源を
用いた位相シフト干渉計において、シフト量に誤差が含ま
れる場合の系統誤差が解析された³。

9.2.2 波長・周波数走査干渉計

高分解能化を目指し、走査幅拡大の報告が目立つ。チタンサファイアレーザーを光源とした波長走査干渉計の高速・高分解能表面形状測定システムが開発された^{b-1}。正弦波状波長走査干渉計に対して光源のスペクトル幅の拡大³と、二光波混合による波面変換が行われた¹。SLDと液晶ファブリー・ペロー波長走査素子を組み合わせた波長走査素子を利用した系では、素子のタンデム接続による高さ分解能とダイナミックレンジの向上³、波長走査時の縞移動方向自動検出による三次元形状計測が行われた³。自己光混合型LD測長システムでは、周波数掃引幅を拡大するためにブロックゲージ干渉計の干渉縞が光周波数マーカーとして利用された³。その他、波長走査フィゾー干渉計において周波数解析と位相シフト解析による高感度化^{a-12}、2重フィードバック型正弦波状波長走査干渉計による実時間形状計測が行われた^{1,3}。

9.2.3 低コヒーレンス干渉計

ここ数年に引き続き報告が多かった。セキュリティー応用のための、散乱体に埋め込まれたバイナリーデータの読み出しや³、タンデム型干渉計による長さ情報の伝送^{3, w-11}、ヘテロダイン白色干渉計による三次元形状計測^{w-3}、ヘテロダイン信号の周波数同期検出によるビデオレート三次元顕微画像計測が行われた³。

特に生体応用では高速測定が要求されるため、光路差走査が不要な系も提案されている。OCTにおいて時空間結合変換相関器によって深さ情報を得る手法^{k-186-1}、同手法の非線形光学結晶を用いた系^{1,12}、非走査型OCT計測のための空間干渉法における空間的・時間的変調検出法¹²、および位相シフト検出法³が提案された。

低コヒーレンス光源の選択肢を広げるため、利得変調LDを低コヒーレンス光源とした系^{1,12}、光波コヒーレンス関数の合成と位相生成キャリアーを用いた多重化光ファイバー干渉センサーが提案された^{b-2}。

9.2.4 周波数・位相変調干渉計

二重正弦波位相変調LD干渉計における光熱変調と電流変調を用いた距離変化測定³、時分割変調を用いた二波長型正弦波位相変調LD干渉計による段差計測が報告された^{1,10}。低コヒーレンス光でフィゾー干渉計を実現するためにLiNbO₃を位相遅延素子として用いた系で位相変調が行われた¹²。

9.2.5 その他の干渉計

デジタルホログラフィー干渉計測では、位相分布を計算する前にスペックルノイズを除去し、位相アンラップを確実にする方法が提案された³。位相検出波長走査干渉法

との組み合わせも提案された¹。3色のレーザー光源とカラーCCDを用いた位相シフトカラーデジタルホログラフィーが提案され、PZT素子で位相シフトを行う系と、幾何学的位相に基づくアクロマティック位相シフトを行う系が実証された³。

その他、ヘテロダイン干渉計のビート信号の一次と二次成分を用いた位相ドリフト抑制方法^{b-1}、干渉縞位相をロックした干渉計のゆらぎ成分検出と除去³、空気屈折率を補償する二色干渉計における位相誤差の解析と新アルゴリズム提案^{k-187-4}、複数の干渉計を用いた多方向合致法による三次元空間内の移動距離の測定法³、微小開口からの発散球面波を参照波とした点回折干渉計の開発と絶対精度の検証³、空間強度分布制御による伝搬軸方向のコヒーレンス関数合成³が報告されている。

9.2.6 干渉縞解析

空間的縞解析法の通信理論に基づいた検討と新たな縞解析処理法の提案^{a-10}、閉じた干渉縞パターンに有効な、直交座標-極座標変換後のフーリエ変換法の提案¹⁻¹⁰、位相分解相関法の低コヒーレンス光干渉縞解析への適用^{1, j-2}があった。

9.3 速度・加速度

速度計測では、振動物体の位相変調ホログラフィー干渉におけるランダムノイズの影響の考察と新アルゴリズムの提案^{d-6}、二次元光検出器アレイを用いたドップラーOCTによる三次元流速計測³が報告された。

加速度計測では、速度干渉計とストリークカメラの組み合わせによる時間分解加速度測定^{x-4}、小型高感度加速度計¹の報告があった。

9.4 屈折率・屈折率分散

低コヒーレンスタンデム干渉計による屈折率測定法^{3,10}、波長依存性を考慮した高次複屈折の計測^{3,10}が報告された。モードロック周波数走査型フェムト秒パルス干渉計により、隣り合う光パルス間の干渉を利用して空気の群屈折率が測定された³。屈折率測定の実用では、ヘテロダイン干渉計によるガス温度変化計測⁴、微小レーザー結晶の熱伝導率測定のためのシアリング干渉計による熱レンズ効果測定¹⁻⁹があった。

屈折率分散測定では、フェムト秒二色パルス干渉によるグルコース溶液の屈折率分散の測定と血糖値測定応用の検討³、スペクトル領域干渉法による液晶空間光変調器の屈折率分散測定とフェムト秒パルス発生への応用¹、複屈折単一モード光ファイバーのモード複屈折と偏光モード分散測定^{b-3}があった。

9.5 光波のパラメーター (偏光, 空間コヒーレンス, 時間コヒーレンス, スペクトル等)

光波検出では, 光ホモダイン検波法を用いた表面第二高調波の検出法が開発され, 基本波の干渉信号も利用し, 振幅と位相の高精度・同時検出を実現した^{a-2}. 白色コンティニュームとその第二高調波のスペクトル干渉により光パルスのキャリアエンベロープ位相が測定された¹⁻¹⁸.

偏光情報では, くさび型液晶セルを用いたストークスパラメーター測定³, マルチチャンネル分光器を用いた周波数領域干渉法に基づく偏光のスペクトル分布測定²があった.

コヒーレンス関連では, 回転シア型体積干渉計の位相空間解析と, 三次元空間・分光情報取得法^{c-6, g-4}, 移動回折格子を用いた白色光ヘテロダイン変調技術のフーリエ分光法への適用^{d-10}が提案された.

波面計測では, タルボット干渉計における格子の傾きミスアライメントの影響の理論的, 実験的考察^{1-22, i-25, i-32, w-5}, タルボット干渉法を用いた自動コリメーションの高精度化³, 空間周波数多重化デジタルタルボット干渉計とフーリエ縞解析法を用いた波面検出³, 格子パターンの回折光を被測定レンズで重ね合わせる三光束干渉計や二光束干渉計によるリソグラフィレンズの波面収差測定^{b-4}, 開口マスクアレイをもつ多光束干渉計によるエタロンの二次元平行平面度測定³が報告された.

9.6 その他

低損失光学材料の吸収係数測定¹, 動的光散乱法への低コヒーレンス干渉法適用による多重散乱光の影響除去^{1,3}が報告された.

9.7 展 望

ここ数年, 波長走査干渉計や低コヒーレンス干渉計の報告が活発である. フェムト秒レーザーやフォトニック結晶デバイス技術など広帯域光源の技術進歩も伴って, この流れは続くと思われる. 一方応用面からは, 光ファイバーや液晶の屈折率分散, 生体の吸収係数など, 広波長領域の情報要求が増えているように感じられる. 今後, 精度向上, 測定時間短縮など, 実用化に向けた研究も進むであろう. ナノテクノロジーやライフサイエンスをはじめとして, 21世紀の科学技術への干渉計測のますますの貢献を期待したい.

10. 光情報処理

和歌山大 野村孝徳

10.1 概 要

過去の進展記事を顧みると光情報処理とは何か曖昧であり, どの分野に絞るかを苦勞されていることがうかがえ

る. 今年度も例に漏れず, いざ執筆となるとその定義に戸惑ってしまう. この原因は, 過去の記事の繰り返しになるが, 光情報処理という分野が「光学」投稿票の分類「画像形成, 光演算, 光接続, ニューラルネット」で表される狭義の光情報処理ではなくなり, 何らかの形で光にて情報を扱う広義のものとなっているからであろう. 国外に目を向けても SPIE Annual Meeting にて5年目を迎えたコンファレンス「光情報処理のためのアルゴリズムとシステム」の発表内容も広義の光情報処理が増加している²⁰. 幕張で開催された CLEO/Pacific Rim 2001 では, 「Photonic Information Processing System」というスペシャルセッションが設けられた¹². Optical ではなく Photonic という単語を用いていることから, これも広義の光情報処理であるといえる. 狭義の光情報処理においても, 相関信号の信号対雑音比の向上を図るような汎用的な手法の提案はほとんど姿を消し, 特定用途の目的を達成するために光相関器を用いるというように研究内容が変化してきている. また, 計算機パワーの向上により計算機を積極的に利用した光情報処理の研究が増加し, Optics Japan 2001 では「デジタル技術と光学」というシンポジウムも開催された³.

10.2 生体と光情報処理

昨年度に引き続き生体分野における光情報処理の利用が活発になってきている. 空間符号モアレマッチング技術を利用したもの^{1,3,12}以外にも相関光学系を用いて遺伝子機能検索を行う手法³が提案された. 遺伝子情報工学は脚光を浴びている分野であり, 今後ますます研究が盛んになっていくものと思われる.

10.3 光セキュリティー

セキュリティーに関する研究は画像情報を用いた認証目的のもの, 画像の秘匿目的のもの (暗号化), 違法複製防止のものに大別することができる. 認証は相関光学系を特定用途に利用した典型的な例であるが, 顔画像や指紋画像をそのまま用いるのではなく, 認識率を高めるために特徴を抽出したり^{1,3}, 複製を困難にするため位相変調をしたりといった工夫された手法³が報告された. 暗号化は画像を光学的な畳み込み演算によって秘匿する手法が主流で, 光メモリーへの応用^{1,3,20}やデータ通信^{1,3}, 圧縮^{3,20}などの研究がなされた. 違法複製を防ぐための電子透かしとして KL 変換を使用した手法¹や計算機にて作成したフーリエ変換プログラムを利用した手法²が提案された. ただセキュリティーの研究は前年に比べて落ち着いてきた感があり, さらに発展するには何らかのブレイクスルーが必要であろう.

10.4 デジタルホログラフィー

銀塩感光材料の入手が困難となってきたが、ホログラフィーの新たな研究としてデジタルホログラフィーが台頭してきた。これは銀塩感光材料を CCD 素子などの電子デバイスに置き換えてデジタルホログラムとして記録し、基本的に計算機による回折計算によって像を再生する手法である。位相シフト法との併用などによりホログラム上の複素振幅分布を求めることができる。これを用いて任意の面における複素振幅を計算機によって求めることができるため、光暗号化³や三次元物体認識^{2,1-23}への応用が試みられた。その他にも新しいフレネル回折の計算手法^{1,3,b-5}、再生画像の画質の向上手法³の提案があった。

デジタルホログラフィーではないが計算機ホログラム技術のさまざまな工学分野への応用が報告された^{a-3}。計算機パワーおよび微細加工技術の向上に、よりいっそうの発展が期待される。

10.5 立体映像

光の干渉を利用した、ホログラフィーとは異なる眼鏡なし立体映像の研究として、光線再生方式による手法^{1,2}や傾斜平面走査法による手法^{2,3,12,20}が提案された。いずれの方式も動画の表示が可能であり、コヒーレントな光源を必要としないため、実用化が期待される。その他にもフルカラー LED を用いた白昼に屋外で観察可能な大画面立体ディスプレイの研究が報告された²。

10.6 展 望

この他にも、これまでの範疇に捕われない時空間光情報処理の研究^{1,2,12,20}や非線形光フィードバックシステムの研究^{3,12,b-5}も着実な進展があった。光情報処理研究の中心的役割を担ってきた光コンピューティング研究グループが2002年度から名称を情報フォトンクス研究グループへ変更する予定である。名称変更を機に当該分野の研究が新たな展開をみせることを期待したい。そのためにはより多くの研究者の参入が必要である。

11. 画像処理

東工大 小尾高史

画像処理は、光情報処理、医用光学、光応用計測など、さまざまな分野で利用されている。光学界における画像処理の研究は、一般にいわれるところの、与えられた画像またはデータをいかに望ましい画像へと変換させるかを研究するパッシブな画像処理ではなく、画像やデータの取得をどのように行うべきかといったデータ取得系の設計にまで踏み込んだアクティブな画像処理の研究が主体であると考えられる。このため、ここ数年間は、新しいさまざまなデ

バイスや装置の発達とともに幅広い進展を遂げている。ここでは、応用物理学学会講演会および Optics Japan における画像処理関連のセッションで報告された興味深い研究内容を中心に研究の進展状況を概観する。

11.1 分光画像処理

通信基盤の整備や情報通信機器の発達などによって、誰もが容易にカラー画像の処理・伝送・蓄積等を行えるようになってきている。しかし、遠隔医療や電子美術館等のように、物体の色を忠実に再現することが求められる分野では、現在の RGB に基づく画像システムは十分でないと思われる。これに対して、近年、分光情報を利用して正確な色再現を実現するカラー画像システムの開発が注目を集めている。本年度は Optics Japan においてシンポジウム「色覚と分光画像処理」³が開催され、活発な討論が展開された。昨年度報告された六原色を用いた画像表示システムをベースにした研究が数多く報告されており、実物を観察する場合の XYZ 三刺激値とディスプレイ上に表示される画像の三刺激値を一致させるだけでなく、人間の個々の視覚特性を考慮し、両者のスペクトル分布を近似するように信号値を変換する手法³、等色関数の個人差を考慮した色再現手法の評価³などが報告された。また、自然物体の分光反射率のデータベースから基底関数を導出し、カラー入力機器等の設計に利用する手法の開発¹やマルチスペクトル画像の圧縮に関する研究¹、マルチスペクトルカメラを用いて撮影された物体の画像から、鏡面反射成分と拡散反射成分を分離し、任意の光源下での画像を推定する手法²なども紹介された。

一方、医療への応用では、非圧縮デジタルビデオと IEEE1394 ボードを用いて測定された RGB 画像から、実時間で分光反射率の推定および肌の色素成分量を算出し、分布変化量を測定するシステムの開発¹や拡張ランバート・ベールの法則に基づく皮膚の色解析手法の開発³、皮膚の散乱・吸収を考慮し、医療用刺青の色を推定する手法の開発³、移植病理診断に用いられる組織標本中の繊維化組織占有量を分光画像を用いて求める手法³、生体内の癌と正常部位といった組織構造の違いと波長ごとの深達度の違いに着目した分光反射率解析の手法の開発¹および同様の考えを用いて内視鏡に用いる照明光の分光特性を最適化する手法の開発¹などが報告された。これらの手法は、他のさまざまな生体分光画像への応用も含めてさらなる多機能化が期待でき、今後の発展が楽しみである。

11.2 セキュリティ技術

急速に情報化が進む中で、光画像処理の分野においても個人情報などの情報の安全性確保のための研究が盛んに行

われている。本年度も、光技術を利用したセキュリティー技術に関して幅広い報告がなされた。

カラー画像のRGBの各バンド画像間に相関性があることを利用し、電子透かしを埋め込む手法¹や透かし情報をデジタルホログラフィーとして画像に埋め込んだ際の画像圧縮に対する特性の調査³が報告された。また、デジタルフレネルホログラフィーを用いた暗号化手法として、振幅が一定でランダムな位相分布をもつマスクを暗号鍵として用いることで安全性の高い光暗号化を行う方法³が報告された。

また指紋認証システムとして、TOMBO とよばれる薄型画像情報入力装置を用いて指紋画像を接写撮影し、指紋識別に十分な分解能の画像を取得可能であることが示された³。また、他のモダリティーとの連動面から、今後急速に普及が予想されるスマートICカードと連携し、ICカード活性化のためのパスワードをICカード表面に指紋画像を用いてホログラムとして記録し、利用する指紋認証システムの開発³も行われている。しかしながら、この分野はまだまだ緒についたばかりであり、システム全体としての暗号強度や実現可能性に関して今後さらなる検討を行っていく必要がある。さらに、光の並列性を生かした高速暗号技術や、画像暗号等に特化した大容量暗号技術の研究を期待したい。

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

横国大 馬場俊彦

本来本章では、さまざまな光制御デバイスについてまとめるべきであるが、ここでは筆者が専門とする微小構造を用いた素子（近年、フォトニックナノ構造、あるいは俗にフォトニックデバイスとよばれるもの）を中心に報告する。微小素子の特徴は、小さな領域に光を閉じ込めるために強い反射機構が必要という点であり、具体的には多重反射（ブラッグ反射）、または一境界反射（全反射や金属のプラズマ反射）が利用される。多重反射を利用するものを広い意味でのフォトニック結晶光素子とよぶ。一境界反射を利用するものをまとめて高屈折率差光素子とよぶことにする。以下ではまずこれらの1年間の発展について述べ、その後、これら以外の素子の興味深い研究成果を紹介する。

12.1 フォトニック結晶光素子

フォトニック結晶は光学波長程度の周期性をもつ多次元構造であるが、最近では多層膜や回折格子を一次元フォトニック結晶ともよび、広い意味でのブラッグ反射・回折構造を指す言葉として使われるようになってきている。世界的にみて研究発表件数は最近の3年ほどで飛躍的に増大し、

発表内容も作製技術、光学特性評価だけでなく、各種素子応用の提案と実証にまで及ぶようになった。さらに、注目すべき応用研究を公表しているのは主に日本である。以下でも日本の研究を中心に述べたい。

まずこの1年は、世界的にフォトニック結晶導波路の研究発表が目立った。これは光を遮断するフォトニックバンドギャップとよばれる特性を導波路の光閉じ込め機構として利用するもので、急激な曲げや分岐、方向性結合が可能になると期待されることから、微小光回路の母体として注目を浴びている。筆者らが初めて実証したのは2年前になるが、当時は単に伝搬を観測した、あるいは設計を行ったという単発の研究であった。今年は少なくとも直線導波路に関して低損失伝搬、単一モード、カットオフといった主な条件が理論的に明確になり、フォトニック結晶スラブとよばれる薄膜構造において理論と実験が完全に整合する結果が得られるようになった^{1,2}。伝搬損失は10 dB/mm程度と高いが、これは製作不均一の影響が大きいと考えられる。上記の急激な曲げ等を利用すればきわめて小さな光回路が構成できると考えられ、あと一桁程度損失を減らせれば、実用上十分と思われる。むしろ急激な曲げ等において反射をいかに抑制し、高い透過率を広帯域で確保するかという点と、サブミクロン断面のコアに効率的に光を結合させるかという点が今後の焦点であろう。この導波路については超低群速度²による光利得、電気・磁気光学効果の増大、点欠陥^{1,2}による光フィルターあるいは光メモリー機能が実証されている。さらに特異な分散特性を利用した分散補償素子としても注目されつつある。単なる導波路を超えた機能素子としての発展にも注目したい。

この他、フォトニック結晶素子として二次元分布帰還(distributed feed back:DFB)レーザーも注目された。これは大面積にわたって形成された二次元回折格子によって面垂直方向に高出力な光を取り出すレーザーである。今年、単一波長、単峰性ビームに加え、単一偏波が実現された²。今後、低閾値化、光取り出し効率の向上を図れば、高出力レーザーとして、将来有望である。またこれは別の章でも述べられるかもしれないが、多数の空孔が開けられたフォトニック結晶ファイバーは大幅な特性改善が図られ、市販されるようになった点が注目される。このファイバーは大きな非線形や分散補償が理論計算されており、吸収損失の低減を含む作製技術の向上が望まれていた。今年、3 dB/km以下という劇的な低損失化が図られたことで、将来展望が明るくなってきた。非線形増大によるスーパーコンテニューム光の発生、空孔を減らしたタイプのファイバーでの分散係数の増大などが実証された。今後、さらにさま

さまざまな形で利用されていく可能性がある。

ところでフォトニック結晶とは直接関係ないが、類似の構造で微細な突起の二次元配列構造が無反射コーティングの代替として利用できることが、複数の機関で実証された¹⁴。広帯域で動作する点が興味深く、今後、さまざまな素子への導入が考えられる。

12.2 高屈折率差光素子

半導体と空気のような、極端に大きな屈折率差をもつ組み合わせでは、ほとんどの立体角の光が境界面で全反射を受けるため、素子をミクロンからサブミクロンの領域まで小さくしても光を閉じ込めることができる。例えば Si をコアに用いた導波路が挙げられる。周囲が空気や低屈折率誘電体であれば、波長程度の曲げ半径が可能になり、フォトニック結晶と同様に光回路を劇的に小さくする可能性がある。SOI 基板を用いたこのような導波路の作製はすでに行われてきたが、低損失な曲げや分岐の実証例はなかった。今年、サブミクロン断面のコアをもつ曲げ半径 $3\ \mu\text{m}$ 以下の曲げ導波路で、波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯に光に対する曲げ損失 $0.1\ \text{dB}$ 以下¹、分岐の過剰損失 $0.3\ \text{dB}$ ² が実証され、今後の展開が楽しみになってきた。ここでも伝搬損失の低減とファイバーとの接続が課題だろう。この導波路ほど高屈折率差を利用したものではなくても、従来の石英系より屈折率差を上げた導波路で、さまざまな微小素子や機能素子が検討された。高密度 WDM 用フィルターを狙うリング共振器アレイは、特性の狭帯域化、平坦化が実現された^{1,2}。

一方、金属を直接導波路として用いる研究発表も目立った。これは表面プラズマモードを導波モードとして用いる試みである。従来は $1000\ \text{cm}^{-1}$ 以上ときわめて損失が大きいと思われていたものが、光通信波長帯では数十 cm^{-1} と低いことが明らかにされた²。曲げ等が微小化できるかどうかは不明だが、今後、電界印加などの外部制御によって新しい機能を生み出す可能性が期待されている²。あるいは近接場プローブなど、極微小領域に光を導く目的に限定的に用いられる可能性もある³。表面プラズマモードを用いるわけではないが、導波路の温度依存性を完全に除去するため、金属反射を用いた中空導波路も検討された²。

12.3 その他の光制御素子

米国では以前から話題となっていた MEMS を用いた光スイッチ、光フィルターなどが国内でも注目され、さまざまな光素子に適用する試みが定着しつつある。多層膜面型共振器の一方の反射鏡をカンチレバーとし、加熱によって共振波長のチューニングを可能にしたフィルター²、半導体歪み薄膜を利用して容易に三次元構造を組み立てるマイクロ折紙²などが興味深い発表であった。

また最近では半導体光増幅器がスイッチング素子、波長変換素子、非線形素子などの機能素子の母体として定番となりつつあり、これを使ったさまざまな研究が報告された。

12.4 むすび

高密度 WDM や光インターコネクションのように光素子を大量に必要とする応用が本格化し、それに向けて光素子の形態を抜本的に見直す必要がささやかれている。個々に取り上げた微小素子はそのような可能性をもつが、要求される性能を満たすにはまだ課題が多い。技術的ないっその努力とともに、多角的な視点で素子の最適な応用を見直してみる必要があるかもしれない。

13. 光通信

NTT 吉國裕三

インターネットの急速な拡大による通信トラフィックの爆発的増大に対応し、光通信システムの大容量化が進められている。2001 年は、いわゆるネットバブル崩壊により通信網の整備に急ブレーキがかかった年であったが、一方で ADSL (asymmetric digital subscriber line) や FTTH (fiber to the home) によるブロードバンドアクセスの急速な普及によって通信トラフィックは増勢を強めており、近い将来の通信網増強に向けた大容量化の検討が不可欠であることを示唆している。光通信の大容量化は従来電子回路の速度向上に伴う伝送速度の高速化によって達成されてきたが、近年のトラフィックの増加は電子回路の高速化を大きく超えるペースで進展しており、波長多重技術 (WDM) による並列化を併用することが不可欠となっている。2001 年は、高速化と WDM による並列化を組み合わせることによってファイバー 1 芯当たり $10\ \text{Tb/s}$ を超える伝送容量を実現したエポックメイキングな年でもある。チャンネル当たりの伝送容量を現在の商用レベルの 4 倍である $40\ \text{Gb/s}$ に引き上げ、これを波長多重により 273 チャンネルを 1 本の光ファイバーで伝送することによって $10.9\ \text{Tb/s}$ の超大容量伝送が実現されている。

現在商用化されている伝送速度は $10\ \text{Gb/s}$ が限界であるが、InP 等の化合物半導体を用いた電子デバイスの進歩によって実験室レベルでは $40\ \text{Gb/s}$ が用いられるようになってきており、高速電子回路技術の進歩につれて光送受信器については商用レベルに近づいてきている。伝送媒体に関しては、 $10\ \text{Gb/s}$ を超える高速伝送では媒質中の光の伝搬速度が光の波長や偏波状態によって変化する分散現象による伝送パルス幅広がり深刻な問題となっており、伝送路全体で分散をゼロに近づけることが必要になってきている。波長分散に関してはファイバーの零分散波長を伝送波

長に近づける分散シフトファイバーを用いてファイバー自体の分散を減らす技術、伝送用ファイバーと逆の特性をもった分散補償用ファイバーを一定間隔で配置する分散制御技術を用いた検討が進められている。特に 40 Gb/s については分散に対する要求が厳しいため、温度などによる伝送路の分散の変化をダイナミックに補正できる分散補償素子も注目されている。偏波分散に関しては、ファイバー自体を真円に近づけて偏波特性を減らす努力が続けられており、既設のファイバーの偏波分散を解消する偏波分散補償回路も注目されている。

光伝送で使用可能な周波数帯域は主にシステムで用いられる光増幅器によって制限されており、従来はエルビウムドープ光ファイバー増幅器の帯域で決まる約 4 THz の C バンド帯だけが用いられていた。WDM による多重化は、当初はこの帯域の中に 200 GHz 程度の周波数間隔で 4~16 チャンネル程度を配置していたが、チャンネル数の急増につれて周波数帯域の拡大および周波数間隔の縮小が必要となっている。エルビウムドープ光ファイバーのパラメータを調整して利得帯域を長波長側にシフトさせた増幅器が開発され、この増幅帯域を利用した新しい周波数帯 (L バンド) が商用化され始めている。実験室レベルではトリウムなどの新しいドーピング材料を用いた増幅器やファイバースパランを用いた増幅器の開発が進められており、これらの増幅器を複数並列に配置することで 10 THz 以上の帯域が使用可能になっている。

チャンネル間の周波数間隔については、システムで用いられるレーザー、合分波器などの波長制御を精密化することにより商用レベルの 10 Gb/s 伝送システムで 50 GHz の周波数間隔が用いられ始めている。実験室レベルでは、抑圧サイドバンド (VSB)、デュオバイナリー変調など強度と位相の変調を組み合わせることで光信号の帯域幅を縮小する変調方式が検討されており、50 GHz の周波数間隔で 40 Gb/s で変調された光信号を伝送することが可能となっている。

これらの技術、超高速変調、周波数帯域拡大、およびチャンネル間隔の縮小を組み合わせることによって 10 Gb/s を超える大容量伝送が実現されているが、ファイバー 1 芯当たりの伝送容量としてはしだいに限界に近づいてきている。今後の光通信技術は伝送容量の増大よりもネットワーク全体の高度化を目標に進んでいくと考えられる。現在の通信ネットワークでは光技術はもっぱら伝送の部分だけに用いられており、多数のファイバーが集中するノードでのルーティング処理は光信号を電気信号に変換し電気的な処理に頼っている。このため、光伝送の大容量化が進んだ場合ノードでの電気的な処理がボトルネックとなりネットワ

ーク全体の処理能力を制限してしまう可能性が大きく、ノード処理を部分的に光技術で置き換えることが検討されている。ノード処理では最終的には光によるパケット処理が期待されているが、現在のところパケットを電氣的に処理し、低速のパス切り換えを光で処理する光クロスコネクタの開発が先行しており各種のプロトタイプシステムが作製されている。光クロスコネクタでは、WDM 技術による光信号の合分波と、マイクロマシン (MEMS) や熱光学効果を用いた光スイッチを組み合わせることでパスを任意に切り換えることが可能であり、パケット処理の負荷を大幅に削減することによりノード処理のボトルネックを解消することが期待されている。

14. 光 記 録

ソニー(株) 市村 功

14.1 概 要

2000 年 12 月には BS デジタル放送が開始され、多チャンネルの HDTV 番組が家庭へと届けられている。また、インターネット接続においては、ブロードバンドコンテンツ時代の本格的な到来を間近に控え、大容量ストレージ実現への期待が高まっている。光記録の領域においても、この状況を背景に、23~32 GB の容量を実現するポスト DVD 光ディスク技術が数多く提案され、実用化に向けて大きな流れを形成した。ここでは、国内開催の各学会、シンポジウム、ならびに学会誌に加え、光記録関連の主要な国際学会である ODS, ISOM での発表内容から、光記録領域全般にわたる 1 年間の進展を報告する。

14.2 ポスト DVD 光ディスク技術

14.2.1 要素技術

青紫色半導体レーザーを光源とするポスト DVD 光ディスク装置に関しては、対物レンズの開口数を 0.85 とし、0.1 mm の光透過保護層 (カバー層) を介して情報記録層にアクセスする方式が主流となっている^{2,7,21}。その要素技術として、高開口数レンズの実用化技術が開発され、中でも、2 群プラスチックモールドレンズ⁴ や単レンズの実用化⁷ が注目を集めた。さらに、補正素子を追加することで CD や DVD との互換性を確保する試みも報告されている⁷。

一方、再生専用、および記録可能媒体も上記大容量光記録に対応する必要がある。すなわち、ディスク原盤作製において微細加工が必要となるため、電子ビームや波長 248~266 nm の紫外線レーザーを用いる原盤作製技術、反応性エッチングを適用する手法等が提案された^{2,7,21}。

14.2.2 記録媒体

SbTe 共晶点系材料を用いた相変化記録膜は、核生成型

の GeSbTe 系材料に比べて結晶成長速度が速く、高転送レート化に対応できる。昨年は、ポスト DVD 光ディスク用途で 100~200 Mbps の可能性が示された^{7,21}。また、青紫色半導体レーザー用の追記型記録媒体として、有機色素材料を用いる手法が報告された⁷。

情報記録層の構成を多層とする試みも数多く報告された^{1,2,7,21}。再生専用ディスクでは 2 層 50 GB 容量、書き換え可能な相変化ディスクで 2 層 45 GB、追記型では 4 層 90 GB 容量の可能性までが示された。いずれの場合においても、層間距離を数十 μm 程度まで離す必要があるため、カバー層の厚み誤差によって生じる球面収差を補正する機構が必要となる。補正量を光学的な誤差信号として検出し、液晶素子等を用いて波面収差を補正する手法も提案されている²¹。

14.3 光磁気記録の進展

光磁気記録においても、青紫色光源を用いた高密度光記録が試みられた。CAD (center aperture detection) 方式により、直径 50 mm サイズでの記録容量を 2 GB に高めている²¹。短波長化に伴うディスク傾き許容度の減少を抑えるため、ディスク基板の厚さは 0.5 mm まで薄くされた。また、開口数 0.85 の対物レンズを搭載した浮上型の光磁気ヘッドを用い、10~20 μm の薄いカバー層を介して信号記録再生を行う試みも提案された。この手法は first surface MO recording とよばれ、短波長光源と磁区拡大技術を組み合わせることで、50 Gbit/in² 超の面記録密度が実現可能とされている²¹。

一方、赤色半導体レーザー光源を用いた光磁気記録方式の進展としては、まず zero-field MAMMOS (magnetic amplifying magneto-optical system) の提案が挙げられる²¹。再生時に外部磁界を印加することなく、磁区拡大が実現される。波長 640 nm、レンズ開口数 0.6 の光学系を用いて、最短マーク長 0.12 μm の信号再生が報告された⁷。DWDD (domain wall displacement detection) 方式においては、ランド・グループ記録の手法を適用することで、現行 MD (mini disc) の容量を 2 GB まで高める技術が報告された⁷。

14.4 将来技術

14.4.1 近接場光記録

SIL (solid immersion lens) や SIM (solid immersion mirror) 等の光学素子を用いる近接場光記録に関しては、素子を浮上スライダに搭載する方式、記録媒体との間で形成される静電容量値や光学的な検出信号に基づいて能動的な距離制御を行う方式の双方において、光学ヘッドの作製方法や信号記録再生結果が報告された^{1,2,7,21}。記録密度の

検証に関しては、青紫色半導体レーザーと実効開口数 1.5 の SIL との組み合わせで、溝構造を有する相変化光ディスクに 50.4 Gbit/in² の面記録密度が実現された⁷。

ディスク媒体側で発生する近接場光を光記録に応用する手法として、Super-RENS (super-resolution near-field structure) が知られている。従来から、相変化記録膜への適用が報告されてきたが、同方式をディスク原盤作製に応用する手法²や光磁気記録に応用する試み^{7,9-79-16}も報告された。また、散乱型 Super-RENS である AgO_x Two LSCs (light scattering centers) におけるプラズモンの働きに関する検証も行われている⁷。一方、ディスク媒体内に形成された円筒形状によって近接場光を発生する手法 (nOptic) も提案された²¹。nano-cylinder とよばれる形状は、ディスクスタンパーによって複製され、TiO₂、ZnS-SiO₂ 等の高屈折率誘電体材料を充填することで、同部を横断する方向にレンズ効果をもたらされる。DVD 光学系を用いて 2 倍のトラック密度が検討された⁷。

さらに、記録時に光アシスト、再生時に GMR センサーを用いる hybrid recording の手法は、磁気記録媒体を用いた場合の SNR (signal-to-noise ratio) を大幅に改善できる。bow-tie 型や矩形開口型の光学素子を用いたプラズモン励起を近接場光記録に応用する試みが検討されている^{12,21}。

14.4.2 三次元光メモリー

従来のホログラム記録に代わり、信号情報を積層型の光メモリー媒体に記録する試みも行われた。フェムト秒レーザーを用いた三次元光記録では、ウレタン-ウレア共重合体多層薄膜に二光子吸収での記録を行った結果が報告された^{2,w-10}。また、積層導波路型のホログラムメモリーに関しては、2P (photo polymerization) の手法を用いて作製された 100 層からの信号再生が報告されている²¹。

14.4.3 多値記録再生

照射パルス波形を工夫して相変化記録マークの大きさを変化させ、信号レベルを多値化することで、単一の記録マークに対して複数の情報ビットを格納することが可能となる。この手法をポスト DVD 光ディスクに適用する試みが検討された。8 レベルの記録再生を適用することで、44 GB の記録容量が達成可能と報告されている²¹。

14.5 展 望

光ディスクの大容量化に関しては、ポスト DVD 光ディスクの標準化が当座の課題となろう。CD、DVD との装置互換を可能とする要素技術も出揃いつつあり、今後の実用化へ向けた動きに期待したい。また、発売が予定されている米国 Data Play 社の直径 32 mm、容量 500 MB の小径

光ディスク装置は²¹、モバイル用途への展開を占う試金石となる。一方、磁気ディスク装置や半導体メモリの将来動向と比較して、現時点で、光記録における5~10年後の方向性を明確に示すのは難しい。磁気記録や半導体メモリの一部に光記録を適用する hybrid recording の実用性も模索されているが、リムーバブル性を堅持したテラバイト級大容量光メモリーを実現するために、光記録の領域において飛躍する技術が現れることを願っている。

15. 視覚光学

豊橋技科大 中内茂樹

15.1 概要

工学だけに限らず、神経生理学、心理学、医学、神経心理学等とも密接にかかわる視覚光学（視覚科学）は、最近その学際的な性質がより顕著になったように思える。脳科学としての視覚研究といういわば伝統的なスタイルによる研究と、バーチャルリアリティー（VR）など近年のメディア工学の発展に伴い活発化してきた応用研究の間にあった境界は次第に曖昧になり、むしろ積極的にそれらを融合しようとする研究報告も増えている。一方、fMRI や MEG などのイメージング技術を駆使した研究や、視覚的注意などに関する研究も依然として活発であり、脳の働きとしての視覚の新しい側面が少しずつではあるが明らかにされている。したがって、これまでの基礎研究の成果が単に应用到に結び付けられつつあるという単純な変化ではなく、まさに研究の裾野を広げるような変化がこの視覚科学分野で生じている印象を受ける。以下、本年度の進展について概説する。

15.2 明るさ・色知覚

いわゆる色覚の基礎特性に関する研究として、錐体信号の位相差²²、ユニーク黄と L/M 錐体比の関係^{23,24}、色誘導^{22,23}などが報告された。また、色覚特性と反対色あるいは高次色表現のかかわりについて、色順応^{22,y-1}、不均一刺激における色弁別^{22,y-1}、カラーテキストチャーター弁別^{y-1}のほか、視覚探索課題^{22,y-3}、色記憶マッチング^{y-3}などを用いた検討が行われている。視覚系における色表現の問題は色覚研究の重要テーマであり、現在もなお論争が続いている。従来に比べさまざまなタスクを用いてその特性が調べられており、今後の展開が期待される。

色恒常性に関しては照明認識視空間による説明^{3,23}といった高次認知機能を対象にしたものから、鏡面反射成分との関係^{1,3}や視覚探索課題を用いた研究²²まで、さまざまなアプローチが試みられている。色恒常性機能はデジタルカメラ等への搭載が期待されることから、基礎研究のほ

かに応用を志向した研究^{6,25}も報告された。

このほか、色彩画像再現に関する応用研究は依然として活発であり、視環境に依存した色の見え (appearance)^{3,22,y-3} や色差に関する報告^{3,22,23}が目立った。

15.3 空間視・立体視

VR 技術と密接に関連しており、今年も多くの研究成果が報告された。視覚研究から VR 技術への貢献もさることながら、VR 技術を用いた視覚実験という形での関連もあり、そうした意味でも今後の発展が期待される分野である。ヴェクシオン（視覚誘導性自己運動知覚）は網膜に映し出される刺激の運動から自己運動を分離し知覚することにほかならない。ヴェクシオンの成立条件に関する報告^{1,3,22,a-5,y-1}が多いのも、基礎研究としての興味だけでなく、そのメカニズムの同定の可否が VR が真のリアリティーをもちうるか否かにかかわる問題でもあるからであろう。

立体視に関しては水平視差と垂直視差の統合^{y-1,y-3}や運動視差^{y-1}、視野特性^{y-1}などが報告された。視差から奥行き情報への対応付けという問題から、複数の視差情報あるいは複数の奥行き手がかりの統合という問題への移行がみられる。

15.4 運動視

昨年に引き続き、フラッシュラグ効果に関する報告^{3,22,y-1}がみられた。また、運動残効を指標としたジター錯視^{y-1}、頭部運動との関連性^{y-1}や運動対比・同化^{y-1}に関する報告もあった。また、色情報が運動検出に用いられていることを示唆する研究²²も複数報告された。

15.5 視覚的注意

視覚的注意に関する研究は、後述する fMRI や MEG などのイメージング研究のほか、神経生理学的なアプローチなど、まさに学際的な色合いが濃い研究分野である。いわゆる刺激-知覚という単純な図式で視覚を理解することの限界と新しい視覚に対する理解の枠組みへの要請もあり、今後とも活発な研究が期待される。基本的には、検出閾や弁別閾などを指標として視覚的注意の影響を計測し、その影響が及ぶ処理レベルと時空間特性に関心が集中している。今年は輝度・色増分閾値^{3,y-3}、ベクシオン^{y-1}、コントラスト感度^{22,y-3}、運動順応²²などへの注意の影響のほか、視覚探索における探索効率への寄与^{y-1,y-3}、RSVP による特徴的注意の解析^{y-3}、注意の移動速度の測定^{y-3}などに関する報告があった。

15.6 イメージング関係

fMRI や MEG などを使った研究は、年々その報告数が増加しているように思われる。VEP に関しては図地分離^{y-1}、運動視^{y-1}、視野特性²²が、MEG に関しては立体

視^{y-1}、空間的注意^{y-1}、運動視²²、色恒常性²²、fMRI に関しては輝度応答^{y-1,y-3}、色応答^{22,y-3}、視覚マスキング^{y-3}が報告された。ただ、従来の心理物理あるいは神経生理学的な知見の再確認という研究がまだまだ多く、新たな研究パラダイムの登場に期待するところが大きい。

15.7 その他

視機能計測に関して人眼の波面収差計測、調節・瞳孔径・眼球運動の同時計測の報告があった。これらは視知覚そのものを計測したものではないが、当然のことながら、網膜像の質に大きな影響を及ぼすものであり、常に意識しなければならない問題である。そのほか、視知覚の加齢効果について、空間周波数特性¹、色の見え^{1,22,23}、色記憶^{y-1}などに関する報告があった。VR などの工学応用だけでなく、医療や福祉への展開が期待される研究分野であり、今後ますます活発化するものと思われる。

15.8 展望

人間は視覚的動物とよばれるように日常生活において視覚情報の果たす役割はきわめて重要である。その視覚特性の理解を目的とする基礎研究は、今後も学際的広がりをみせ活発に推進されるであろうことは容易に想像できる。一方、技術的応用研究との関連性に関しては今後の動向が注目される。概して基礎研究の成果は、技術者の必要とする実際的な要求と直接結びつくことはまれであるといわれてきた。しかしながら、最近の視覚研究は、基礎研究と応用研究の相乗効果を生みつつあり、それが今後この分野をさらに発展させる原動力となるだろう。

16. 光源・測光・照明

福岡工大 行田尚義

16.1 光源

電子管が半導体素子に取って代わられたように、光源もランプから固体発光体を取って代わられる時代がみえてきたように思う。1998年に通産省（現経済通産省）の「高効率電光変換化合物半導体開発」国家プロジェクトが開始されている。青色LEDと黄色発光体を組み合わせた白色固体発光素子が照明用として開発された。これは、紫外線を発光させて発光体を光らせていることから、現在付けられている白色LEDという名称は誤解をまねく恐れがある。固体発光ランプとでも称すべきと考える。効率は電球よりやや高く、寿命も長い、耐振性も強いので、価格が下がれば小型電球の分野は急速に取って代わられるであろう。しかし、発光体などを使わないで発光体自体が発光する白色のLEDの出現（R、G、Bの組み合わせでもよい）が白色LEDとしての最終の姿になるであろう。一方、電球も進歩

している、3重コイルのハロゲンランプが開発された。その結果、器具効率が20%向上した。高温タングステンの表面のマイクロ構造を改質して放射効率の向上を図るための一歩として複素屈折率の測定が試みられている。海外では相変わらずコールドミラー反射鏡を利用したハロゲンランプやビームランプの新製品が売り出されている。蛍光ランプやHIDランプ（高圧放電ランプ）は環境に有害物質を出さないための研究に注力している。有害物質としての水銀を使わないで紫外線を放射する放電ランプの開発や、鉛を使わないガラスの加工技術の開発や、鉛を使わないはんだの利用に注力している。蛍光ランプで注目される技術は電極を使わないので寿命がほぼ永久になる無電極型がアマルガムの利用によって実用化されている。コンパクト型蛍光ランプの省電力調光システムやインバーター型の安定器が開発された。蛍光ランプの研究では水銀の偏りであるカタホレシスの研究、蛍光体の凝集粒子の形成、蛍光体の劣化のメカニズムなど地味な努力が続いている。液晶ディスプレイのバックライトに使われる冷陰極蛍光ランプの電子放射特性の研究や極細管のランプの水銀の挙動の研究などが行われている。HIDランプでは液晶プロジェクターなどの光学機器用の光源の基礎的な研究が行われている。メタルハライドHIDランプは放電容器がセラミックで構成された小型の自動車用光源が開発された。点滅を容易にするために高圧パルスで点灯されるので電極の消耗が激しい。そこで電極材料の研究が行われている。

16.2 測光

国際度量衡委員会に設置されている測光・放射測定に関する諮問委員会（Consultive Committee for Photometry and Radiometry: CCPR）では分光放射照度、分光応答度、光度、光束、分光拡散反射率、分光透過率の6種類の項目について国際比較を行っている。光度、光束の国際比較に関してドイツのドイツ物理工学研究所が中央局となり各国の国立研究所が購入した複数個のランプを中央局にもち込み比較した。国際比較の結果に基づき各地域標準の同等性の確認が積極的に実施されている。光放射関係の標準の確立に努力してきた電子技術総合研究所は平成13年4月に独立法人産業技術総合研究所となり、旧工業技術院傘下の計量研究所、電子技術総合研究所、物質工学研究所内の標準関連部門は新たに作られた計測標準研究部門として集結した。

国際照明委員会（CIE）ではLED関連技術委員会の活動が活発に行われている。

また、色彩輝度計を利用した液晶ディスプレイ輝度測定装置が開発され、色度・輝度分布測定・変角測定などの評

価がなされた。さらに、反射型液晶用色彩計が開発された。三刺激値の補正により、測定精度を向上させた色彩照度計による液晶プロジェクターの評価が行われた。また、自動車の塗装などにメタリック系塗装、パール系塗装などの干渉色が利用される変角測色法が開発されているが、その測色結果が報告された。

照明環境の測定に CCD の電子カメラやビデオカメラを利用して輝度分布を測定する試みを行っている。

色彩計測に関して色差知覚の明度およびクロマの色差式の性能比較が行われ、CIE 94 の性能がすぐれていることが報告された。光沢感と色との交互作用について調査され、光沢感と明度の相関関係が示された。また、光源の演色性の評価に採用されている演色評価数とは異なった演色性の評価方法として提案されている目立ち指数を計算する方法が提案された。

16.3 照 明

世界的にみて照明の質の問題が取り上げられている。とくに生物心理学的なアプローチであり、従来の照度では覚醒に対する影響がはっきりしなかったが、Seasonal Disorder の研究から 2500 lx 以上で内分泌に変化が出ることが約 10 年前にはっきりしたことを踏まえ、推奨照度を高めることが論じられているが結論は出ていない。垂直面照度を高くして心理的に照明環境の改善を目論んだり、作業面の照度むら（輝度むら）が論じられているが、絵画におけるロンドン大学の Zeki 博士のアプローチ（神経学生物学）のような強引なところはみられないので物足りなさがある。

太陽光の利用に関して地道な努力がみられる。利用面もさることながら自然光による人への照度の負荷を測定している。また、照明空間にたいする建築学的な観点からの研究が行われている。実際的な問題としてはサッカーの世界大会が日本で開かれることから屋外競技場の照明問題の検討結果の報告が多い。

LED の照明への応用から光の制御に関する光学的なアプローチが目立ってきた。一方実際的な LED 利用器具が発表されている。現在作られている照明器具は光源が変わっただけの面白みにやや欠けたものである。光源の性質から広い発光面積が得られないことから、多列に並べたりするので、従来にない照明器具の出現が期待される。

17. 医学・生物応用光学

慶應大 荒井恒憲

17.1 はじめに（全般）

医学関連の光学は、昨年と変わらず、photoacoustic

imaging（光音響法）、optical coherence tomography（OCT）、などの画像診断法に関して、実用化あるいは実用化一步手前の検討が数多くみられる。前者に関しては、乳癌のスクリーニング用の画像としては十分なものが得られるようになっている。後者は、超高精細、ドップラー成分検出など、付加価値を高める努力がなされている。しかし、全般としては目立った進展は少ないといえよう。超短パルスレーザーの治療応用の検討は精密度および加工量の両方において角膜に限られており、すでに PRK（photo-refractive keratectomy）を一部改変した術式である LASIK（laser in-situ keratomileusis）が十分な治療効果を発揮している現在では、研究の動機づけが不十分であろう。

治療用光学において著しい動きがみられたのは photodynamic therapy（光線力学的治療、光化学（癌）治療、PDT）である。以下、この話題に絞って解説する。

17.2 癌以外の疾患への PDT への適用

最近、PDT は癌以外の疾患の治療、すなわち血管拡張後の平滑筋増殖抑制、血管新生病変の治療として加齢性黄斑変性症（age-related macular degeneration: AMD）の治療、感染症治療、ワクチン製造、ニキビ治療などへの新しい応用が立ち上がりつつあり、活気が感じられる。

AMD は網膜の黄斑（最も視神経細胞密度が高く、視覚の大部分を担っている部分）に新生血管が増殖し、失明に至る高齢者に多い病気である。従来から光凝固法が行われ、米国では 1 年間に 20 万件も施術されているが、予後はよくない。PDT でも完全に血管新生を抑えられるわけではないが、数か月に 1 回治療することで、失明までの期間をより長く確保できる画期的な方法であるといえる。固形癌治療において解明された、PDT の血管に対する閉塞効果がうまく利用された形である¹。

動脈硬化狭窄に対する PDT は、従来のバルーン拡張後の平滑筋増殖抑制すなわち、バルーン治療法の補助法として検討されている。PDT とはいえ、カテーテル下血管壁ドラッグデリバリー法によって薬剤が圧入された部位への PDT であり、PDT の選択性は使用されておらず、PDT の特性を生かした応用とはいいいがたい²。

面白いところでは、ワクチン製造に PDT を使うアイデアがある。ワクチンの製造過程においては抗原を作り出すのにアポトーシスを喚起するような病原細菌の死滅法がよいのだが、従来行われている、紫外光照射、X 線照射などに比べて PDT ではよりアポトーシスが強く作用し、よい能動免疫を発揮するワクチン製造が可能であるという。具体的に試験的なワクチンを作って実証した報告がある。PDT の地道な原理的解明がここにきて役に立ったとい

える³。

17.3 おわりに (展望)

PDT は従来癌治療法として検討されてきた。管腔臓器表層の早期癌治療法として方法論的にはかなり確立されてきたにもかかわらず、普及は遅々として進んでいない。これは、管腔臓器内において癌の確定診断を行う唯一の方法が切除標本の組織学的検査である点が原因である。すなわち、切除法は治療のみならず診断用の検体を提供できるのに対して、PDT を含むレーザーや電気治療器の焼灼法では診断検体が取れず、治療の予後確認も長期のフォローアップを必要としている。OCT は無侵襲、非接触で細胞組織診断に必要なマイクロメートル級の空間分解能画像を提供できる方法であるが、実際の管腔臓器内においてこのような高精度が出せるわけではない。素晴らしい特性をもつ第二世代の光感受性物質が開発されたにもかかわらず、現行法にも有効なものが多い早期癌に対する PDT 治療は手詰まりの感があった。癌であれば、安全な治療にて quality of life の向上を目指す進行癌治療、また従来有効な癌治療法がない、膵臓癌や脳腫瘍 (神経膠腫: glioma, 神経芽腫: blastoma) の難治性癌の治療に展開すべきであろう。

18. 光学関連の規格

千歳科技大 川瀬正明

光学関連の規格は ISO (国際標準化機構)/IEC (国際電気標準会議) で国際標準が議論され、JIS (日本工業標準) はこれら国際標準との整合をはかって規格化される。

2001 年はわが国の中央省庁の再編と同時に審議会等の体制見直しを実施され、JIS に関する調査審議機関である日本工業標準調査会 (JISC) も組織の再編が行われた。同時に標準化戦略の議論も行われ、21 世紀の標準化の体制、考え方が刷新された年となった。

これらの経緯をふまえ、まず ISO/IEC の概要とわが国の標準化のしくみを解説し、具体的な標準化の動きについては JIS のオプトエレクトロニクス分野については 2001 年

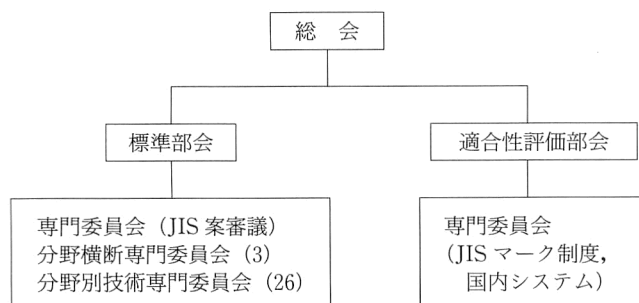


図1 日本工業調査会 (JISC) の審議体制。

の状況をふれることとした。

18.1 国際標準化 (ISO/IEC)

光学の国際標準は ISO 規格として多く発行されており、ISO/TC172 (光学および光学機器) で審議される。IEC では TC86 でファイバーオプティクスが、TC76 でレーザー安全性が審議されている。

また、両者のジョイントの ISO/IEC JTC1 において光メモリーなどの情報関連の審議が行われている。

両機関とも、その存在価値を高めるため長期の戦略を策定しており、ISO では ① 市場のニーズを反映した ISO 規格を実現するため、ISO 規格の市場適合性の向上、② ISO の国際的な影響力の向上、を大きな課題とし、その具体策を提示している。また、IEC では ① IEC 規格および新標準情報の市場適合性の向上、② IEC 規格の各国標準や技術基準としての最大限の活用、③ 新標準情報を活用した補足的な標準化ルートの整備、④ IEC 規格利用メリットの認識向上、⑤ IEC 規格の開発期間を 50%以上短縮、などを列挙している。

これらの状況から ISO/IEC の位置づけはさらに高まると考えられ、わが国の技術をいかに国際標準に反映していくかが今後ますます重要な課題となる。

18.2 JISC (日本工業標準調査会) の新体制

中央省庁再編という枠組みの変化と、前年にまとめられた「21 世紀における標準化課題検討特別委員会報告」に基づき、JIS の調査審議手続き等の「迅速化・簡素化・実質化」を目指して再編された新組織の概要を図 1 に示す。主な役割は以下の通りである。

総会は標準化政策のあり方、総合的なビジョンを作成する最高議決機関であり、標準部会は国家標準化および ISO/IEC 等の国際標準化にかかわる基本的な指針および計画を作成する。さらに、標準部会の下に、26 の技術分野ごとの「技術専門委員会」が設置され、併せて、分野横断的事項を扱う専門委員会として、ISO・IEC 対応を取り扱う「ISO 専門委員会」および「IEC 専門委員会」、分野横断的な環境配慮・資源循環関連を扱う「環境・資源循環専門委員会」が設置されている。

個別の JIS 原案を審議する技術専門委員会は以下に示す 26 委員会が設置され、オプトエレクトロニクス関連は電子技術専門委員会において光通信用部品、光応用センシング、レーザー加工等が審議される (技術専門委員会: 土木技術/建築技術/鉄鋼技術/非鉄金属技術/溶接技術/一般化学技術/化学製品技術/窯業技術/消費生活技術/紙・パルプ技術/医療用具技術/福祉用具技術/労働安全用具技術/機械要素技術/産業オートメーション技術/計測計量技術/産

業機械技術/自動車技術/航空・宇宙技術/鉄道技術/船舶技術/物流技術/電気技術/電子技術/情報技術/基本技術)。

18.3 わが国の標準化戦略

JISC 標準部会で2001年8月にわが国の標準化戦略がまとめられた。内容のポイントは以下の3点である。

- (1) 市場適合性および効率性の確保
きめ細かく、かつ的確な標準化の推進、JIS 制定プロセスの迅速化など
 - (2) 戦略的な国際標準化活動の推進
アジア太平洋諸国との連携、戦略的な規格を提案する産業界の支援など
 - (3) 標準化活動と研究開発の連携
標準化を視野に入れた研究開発の推進など
- さらに技術分野ごとの専門委員会でも個別に戦略の検討が行われ、具体的な対応策が報告されている。

18.4 オプトエレクトロニクス関連 JIS

2001年末におけるオプトエレクトロニクス関連のJIS (TR: 技術情報を含む) 件数を技術項目ごとにまとめると以下の通りであり、総件数は138件にのぼる。

光ファイバー: 23件, 光コネクタ: 19件, 建物内配線: 1件, 光能動部品: 14件, 光受動部品: 14件, 光測定器: 10件, 光ファイバー増幅器: 7件, レーザー安全性: 2件, 太陽電池: 19件, 光ディスク: 27件, 光メモリー:

2件。

また、2001年中に標準部会傘下の電子技術委員会に付議された規格等は以下の通りである。

JISC6122-3 光ファイバー増幅器—測定方法—第3部: 雑音指数パラメーター測定方法

JISC6122-5 光ファイバー増幅器—測定方法—第5-1部: 光反射率パラメーター測定方法—光スペクトラムアナライザを用いる方法

TRC0021 光ファイバー増幅器—測定方法—第3-1部: 雑音指数パラメーター測定方法—光スペクトラムアナライザ試験方法

JISC6831 (改正) 光ファイバー心線

TRC0017 (改正) ビルディング内光配線システム

18.5 その他

プラスチックファイバー (POF) の広帯域化に対応して POF の帯域特性評価法を確立し、国際規格への提案を目的に、新規産業支援型国際標準開発事業として「プラスチック光ファイバー試験評価方法の標準化」が進められていたが、その調査結果をまとめた規格案が IEC 規格原案として採用された。また、IECTC 86 傘下で Dynamic Modules (cross-connect, 可変分散補償等) を扱うことが決まり、今後新たな標準化の動きが具体化する状況である。