

1992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	放射光学会第5回年会	12
光 学 第20巻第12号	a-0	SPIE 国際会議 (JAPAN)	13
第21巻第 <i>n</i> 号	a- <i>n</i>	生物物理と放射光国際会議 (BSR '92)	14
応用物理 第61巻第 <i>n</i> 号	b- <i>n</i>	PF シンポジウム	15
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 31, No. <i>n</i>	c- <i>n</i>	第8回光ファイバセンサ国際会議	16
(2) Vol. 31, No. <i>n</i>	d- <i>n</i>	第9回光センシング技術研究会	17
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 31, No. <i>n</i>	e- <i>n</i>	第10回光センシング技術研究会	18
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 9, No. <i>n</i>	f- <i>n</i>	12th Int. Display Research Conf.	19
(B) Vol. 9, No. <i>n</i>	g- <i>n</i>	SID 1992 Int. Symp. Seminar and Exhib.	20
Appl. Opt. Vol. 30, No. 34,	h-01	14th Int. Liquid Crystal Conf.	21
Vol. 31, No. <i>n</i>	h- <i>n</i>	第18回液晶討論会	22
Opt. Lett. Vol. 17, No. <i>n</i>	i- <i>n</i>	1992年テレビジョン学会年次大会	23
Opt. Commun.	j- <i>m-n</i> *	Optical Data Storage 1992	24
J. Lightwave Technol. VT-10, No. <i>n</i>	k- <i>n</i>	光メモリンポジウム 1992	25
Phys. Rev. B Vol. 45, 46	l	Int. Conf. Consumer Electronics 1992	26
レーザー研究 Vol. 20, No. <i>n</i>	m- <i>n</i>	Magneto-Optical Recording Int. Symp.	
分光研究 Vol. 41, No. <i>n</i>	n- <i>n</i>	1992	27
Phys. Rev. A Vol. 45, 46	o	第16回日本応用磁気学会	28
Phys. Rev. Lett. Vol. 68, 69	p	Spectral Hole-Burning and Luminescence	
Electron. Lett. Vol. 28, No. <i>n</i>	r- <i>n</i>	Line Narrowing 1992	29
日経サイエンス Vol. 22, No. <i>n</i>	s- <i>n</i>	電気情報通信学会 春	30
Appl. Phys. Lett. Vol. 61, No. <i>n</i>	t- <i>n</i>	電気情報通信学会 秋	31
Micro Opt. News Vol. 10, No. <i>n</i>	u- <i>n</i>	OEC '92	32
Color Res. Appl. Vol. 22, No. <i>n</i>	v- <i>n</i>	IPR '92	33
◆講演会関係	記号	OFC '92	34
第39回春季応用物理学関係連合講演会	1	ECOC '92	35
第53回秋季応用物理学学会学術講演会	2	GRIN '92	36
第17回光学シンポジウム	3	SSDM '92	37
光学連合シンポジウム京都 '92	4	13th Int. Laser Conf.	38
第9回色彩工学コンファレンス	5	Advances in Color Vision '92	39
第23回画像工学コンファレンス	6	冬期視覚研究会	40
第25回光学五学会関西支部連合講演会	7	日本視覚学会夏期研究会	41
CLEO/QELS '92	8	照明学会全国大会	42
日本物理学会講演会 '92 春	9	電気関連四学会関西支部連合大会	43
IQEC '92	10	照明学会東京支部大会	44
日本物理学会講演会 '92 秋	11	SPIE OE/TECHNOLOGY, '92 (Boston)	45

* Opt. Commun. は、*m*: Vol. (87~94), *n*: No. (1~6), Appl. Phys. Lett. は *m*: Vol. (60,61), *n*: No. で表記。

1. 光 物 理

静岡大工 岩井俊昭

NTT 基礎研 井元信之

1.1 基礎的・伝統的光学

1.1.1 回折・干渉・コヒーレンス

「フラクタル」は、79年に Berry の「DiffRACTal」なる述語によって光学へ導入された。わが国においても、「フラクタル」の光学への導入が着実に進んでおり、フラクタルからの回折強度の空間的な統計¹、非フラクタルからの回折強度との比較⁴、フレネル回折場におけるスケージング則²、縮小アフィン変換群の光学的実現によるフラクタル図形の生成¹が報告された。

輪状楕円開口のフラウンホーファー回折パターンによるマイクロ波反射型アンテナの可視的解析^{3-90-4,5,6}や衛星間通信用光アンテナの光線追跡による数値解析¹が行われた。アレー照射系などの検証の基礎として、ランダムドットアレーのフラウンホーファー回折パターンと記録露光時間の関係¹⁻⁸について報告された。さらに、Talbot 効果や Lau 効果に代表される回折格子からの回折現象については、ランダムスクリーンからの部分的コヒーレント散乱光照射の Talbot 像の特性¹や点光源の面内変位ごとの回折像加算による Lau 像生成システム¹の報告があった。

純水や超純水の需要が増大するとともに、その計測・評価が重要な問題である。この研究に関しては、光散乱を用いた粒径 38 nm の粒子計数¹、インラインホログラフィーの原理を基礎としたサブミクロン粒子計数の新しい手法^{1,2}が提案された。

物体照射光のコヒーレンス制御に関しては、光源強度分布をフィルターで直接変化させたときの放射特性²や強度分布制御可能な光源を想定したときの光源-物体-観測面のコヒーレンス特性の解析¹、面内変位点光源からの回折像加算による空間的コヒーレンス制御⁴について報告された。一方、発光デバイスを用いた能動的なコヒーレンス制御としては、半導体レーザーの注入電流や変調周波数を変化させたときの散乱光の空間特性¹やマイケルソン干渉計を用いたコヒーレンス長の測定²、強い戻り光によるコヒーレントコラップス現象を利用したスペックルフリー照明の実現²、有限なスペクトル広がり回折像に及ぼす影響⁴、アレーレーザー素子の構造的ゆらぎから生じる射出光波ゆらぎの回折像への影響⁴が報告された。さらに、テレセントリック光学系を縦続配置したときの光波伝播に伴う空間的コヒーレンス¹

と時間的コヒーレンス²の変化の解析、測定部前面に配置した開口によるスペクトル変化⁴、空間的な有効光源の概念を有効スペクトル光源へ拡張する研究¹の報告があった。

1.1.2 散 乱

光散乱の研究では、超純水における粒子検出や結晶中転位による光弾性効果で生じた光散乱からの転位像¹の研究のように、単散乱現象を仮定できる研究は引き続き報告されていた。一方、92年の大きな特徴は、高濃度媒質中を伝播する光波の多重光散乱現象の研究発表の増加である。春季・秋季応物学会をみると90年以前は皆無であるのに対して、91年には4件、92年には9件に増加した。特に、光散乱場と媒質の時空間における関係の解析のほか、光CTを目的とした研究が9件中5件を占めた。

多重光散乱の研究は、パルス光照射による Time-of-flight 法に基づく手法と連続光照射による時間相関関数や空間強度分布を用いる手法とに大別できる。前者では、直進透過光成分検出における受光角依存性¹とその2次元 CT 像再構成への応用²、時間ゲート法による直接透過光成分の抽出²と媒質内構造物の投影像検出²に関するモンテカルロシミュレーション、1次および2次散乱の影響の定量的評価²、血液溶液中の生成組織エッジ部分の検出²、連続パルス光照射による透過散乱光強度分布のメモリー効果¹の研究について報告された。特に、光CTへの応用を目指して、主に直進透過光成分の有効で効率的な抽出が主たる研究課題になっている。後者では、動的透過光の偏光方向を考慮した時間相関関数測定¹や二波長照射光によるスペクトル時間相関関数測定⁴から媒質全体の面内変位と粒子の熱的運動の分離、後方散乱光の光子局在性と動的な時間相関特性との関係⁴、アクリル球凝集から生じるフラクタル媒質からの後方散乱光の光子局在性²、透過散乱光分布の偏光方向依存性²、ゲル内散乱粒子における高分子間干渉の多重散乱光の動特性への影響¹の研究があった。

1.1.3 今後の展望

コヒーレンス制御や散乱など基礎的・伝統的光学の範疇に入るであろう研究においても、近年のレーザー光源や光検出器の発展に対応して、それらを能動的に利用した研究が増加するであろう。また、散乱における光子局在の研究のように、光と電子のアナロジーに着目した研究は、ここ数年欧米で盛んに議論されている。92年には、単一光子状態におけるフレネル・アルゴの干渉実験¹⁻³やパラメトリック過程により生成した光子対の量

子論的な振舞いについての解説⁶⁻⁸がみられ、今後光の波動性と量子性の研究において新しい展開が期待できる。

(岩井)

1.2 量子・非線形光学

量子光学・非線形光学の分野は1992年も共振器量子電気力学、レーザークーリング、ソリトン、超短パルスレーザー等の広い分野で進展が見られた。

共振器の微小化によりモード間隔を広げ、原子のスペクトルあるいは実空間位置を共振器モードとずらす(または合わせる)ことにより自然放出を抑出(または増強)する共振器電気力学が盛んである。自然放出抑圧の直接的応用はしきい値を下げたレーザーであり、DBR共振器モードによる面発光形ダイオードや、whispering gallery モードによる $2\mu\text{m}$ 径円盤状量子井戸レーザー等が発表され、 $10\mu\text{W}$ オーダーの低しきい値が達成されている⁸。

レーザークーリング技術も定着してきており、その技術の応用である原子ビームの集束・偏向を用いて原子の干渉実験が進展している^{9,10}。現在クーリングダウンしたNe原子で行われているが、今後さらに大きな原子や分子の干渉実験も夢ではない。レーザーで粒子を捕捉する点でクーリングに似たレーザートラッピング技術も進歩した。元来環境媒質より高屈折率の誘電体に有効な技術であり、金属や低屈折率微粒子にはむしろ光子圧の斥力が働いてしまうのであるが、レーザー光のスキャンによる動的トラップによりこれらの粒子もトラップ可能とする技術が確立した^{11,12}。

QND測定(量子非破壊測定)では、フォトンカウンティングのQND版とも言える連続的QND測定の理論が構築された¹³。連続的QND測定の実験は共振器電気力学の手法を用いて原理確認も行われている¹⁴。これは共振器内の定在波フォトンのQND測定であるが、進行波フォトンのQND測定では、二つの光ファイバソリトンの衝突時の位相変化が本質的には光Kerr効果の相互位相変調であることを利用したQND測定実験が行われた¹⁵。

光ファイバソリトンはいよいよ光通信への応用可能性が本格的となった。20ギガビット信号の1020km伝送¹⁰や10ギガビット信号の1万km伝送¹⁶⁻¹⁸など具体的伝送実験が行われるようになった。これらはErドープファイバ増幅器を用いたガイディング・センター光ソリトンである^{19,20}。光ソリトン通信は、最近の量子エレクトロニクス応用としては実用的に極めて有望なものといわなければならない。

Ti:Al₂O₃レーザー周辺の短パルス光源も目を引く。まず超短パルス発生だが、これは共振器内の2次/3次分散補正法や外部圧縮法により17から20フェムト秒パルスを発生させるもので⁸、今後さらに短パルス化が見込める。また、この光源の筋の良さを利用した光パラメトリック発振による波長可変光源開発も進んだ⁸。

一方ここ数年盛り上がりを見せていたスクイーミングの分野では、1992年に目立った進展はなかった。研究フェーズが分光、重力波検出干渉計など具体的応用へと移っており、応用となるとそれなりに難しい局面にある。原理面では、元来ボゾン系の概念であるスクイーミングをフェルミオン系へ拡張する試みが進展を見、非線形ビームスプリッタの提案もあった⁸。これが現実の系でどのような興味深い現象に結びつくかは今後の進展を待たねばならない。

光子を用いた量子力学の基本原理解探の面でも目立った進展はないが、関連分野として量子暗号理論(quantum cryptography)が活発化してきた。1光子の偏光を用いる量子暗号が提案されて約8年経ったが、1992年には2光子の偏光相関を用いたEPRタイプの量子暗号が提案されるなどの動きがあった²¹。量子暗号は量子通信と異なり損失が致命的ではないので、その動向が注目される。

また2光子レーザーの実験が行われ、¹³⁸Ba原子ビームを媒質として光の波長域でcw発振に成功している²²。ゲインが光強度に依存するため発振条件が単純でなく、発振のために光パルスの種が必要なことも実験で示された。

またSTM(走査形トンネル電子顕微鏡)の原理を光のトンネル現象で置き換えるフォトンSTMの実験も進み、単原子操作などバラエティー豊かな応用の可能性を秘めているところも見せた²³。(井元)

2. 結像素子・光学機械

日本板硝子 浜中賢二郎
ニコン 永田 浩

2.1 結像素子・光学機械一般

結像素子としては非球面レンズ、GRINレンズ、マイクロレンズアレイ、フレネルレンズ、HOEなどの光学設計、作製、応用研究が進展し、種々局面での性能向上がなされた。これらの利用分野はステッパー光学系、レーザープリンタなどの走査光学系、光ディスク・光磁気ディスクのピックアップ光学系などであり、上記結像素子を用いたこれら光学機械の性能向上、小型集積化の

発表が数多く出された。特に、HOE については、近年、EB 描画装置の曲線入力対応、露光・エッチング精度の向上などによって性能向上が進んだことから、92年は、HOE 自身の研究とともに、HOE を用いた走査光学系、光ピックアップ光学系の小型化、高性能化を狙った応用研究の発表件数が前年と比較して増加した。また、92年のもう一つの特徴は、光学系集積化に対する種々のアプローチが多くあったことである。上記走査光学系、光ピックアップ光学系についても光導波路やチップ部品実装による集積化の研究が行われ、また、光交換、光コンピュータリングといった将来テーマに対しても光半導体素子と光学素子との集積化実装の研究が行われた。

「光学系の設計、素材、製作、評価を中心にして」をテーマにして開催された光学シンポジウム（6月）、「International Symposium on Optical Fabrication, Testing, and Surface Evaluation」の会議名にて東京で開催された SPIE 国際会議（6月）、などもこの分野の92年のアクティビティの現れであると言える。また、91年の研究内容とも言えるが J. J. A. P. のマイクロオプティクス特集号（MOC '91 特集）にもこの分野の発表が多い⁵。素子と機器との区別も不明確であるが、以下便宜的にいくつかのカテゴリーに分けて概説する。

2.1.1 光学素子

(1) 球面・非球面レンズ

ビデオカメラのズーム高倍率化と広角化を狙った非球面多用の4枚構成ズームレンズの開発³、ステップ用両側テレセントリックズームレンズの設計³、などの設計・作製に関する発表、干渉計測によるトロイダル面測定³、大口径非球面測定³、組上がりレンズの偏心測定³などの評価方法に関する発表があった。いわゆる、コンベンショナルな光学素子を取扱うこの分野も、高性能化、小型化、低コスト化の方向に着実に進んでいる。JOEMの光学設計部会（仮称）創設の動きも興味深い。

(2) GRIN レンズ

上記球面・非球面レンズにない自由度と収差補正能力を利用してレンズの高性能化を狙った研究が進められた。ラジアル型 GRIN レンズについては、光学設計手法に関し、GRIN 媒質を準等価均質媒質に置き換えた設計法⁸⁻¹¹と近軸的重ね合わせによる光線追跡アルゴリズム⁴が、また、実際の設計試作としてはプランアクロマート系への応用³が研究された。また、GRIN の理論研究としてハミルトニアン形式を基礎とした3次収差係数の導出⁴について発表された

(3) 回折素子

冒頭で触れたように、この分野の応用面での進展が特に著しかったと言える。後述の走査光学系と光ピックアップ光学系応用のほかに、2枚の HOE を組み合わせる可変焦点距離光学系⁴、等間隔同心円グレーティングのエバネッセント場形成を利用したニアフィールド走査顕微鏡の超解像化¹、波長分散を積極的に用いた MFL 分光系²、ガウシアンビームの光強度を考慮した等光強度ゾーンプレートアレイ²などがあつた。単なるレンズではなく、HOE ならではの特殊機能を付与した応用が多く今後の実用化が期待される。

(4) マイクロレンズ（アレイ）

面発光レーザーや空間光変調素子などの面型光半導体素子どうしの光インターコネクション素子、あるいは、集積化実装のための光学素子としてマイクロレンズアレイとその応用が種々研究された。VSTEP と組み合わせた集積化の研究が盛んに行われ、VSTEP 基板への MFL 一体形成²、平板マイクロレンズを用いた光集積モジュール¹や多層プレナー光学系¹、などが発表された。ほかに、平板マイクロレンズアレイと単一モードファイバアレイとのセルフアライメント光結合法²、非点収差とコマ収差を補正したプレナーオプティクス用反射型非球面マイクロレンズ¹、マイクロレンズ集積型半導体レーザーの信号検出実験¹、立体画像表示などに応用可能なシリンダカル平板マイクロレンズアレイ²など、光学系小型集積化のためのキーデバイスとしてマイクロレンズ、マイクロレンズアレイの研究が盛んに行われた。

2.1.2 光学系

(1) 走査光学系

レーザープリンタ走査光学系（スキヤナ）の小型軽量化、低コスト化のキーデバイスとして HOE が注目されているが、その実現のためにはいくつかの課題解決が必要であり、HOE 複数枚構成による半導体レーザー波長変動の補正¹、加えて楕円位相法を用いての直線走査性とビーム集束性の向上¹、ビームの集束性・直線走査性・等速性とのトレードオフ関係の明確化¹など、そのための種々研究が進められた。また、小型メニスカスレンズの最適設計による像面湾曲補正の小型スキヤナ試作²、超高速化を狙った光ファイバアレイマルチビーム走査²、などのアプローチもあつた。光プリンタ光学系は、小型低コスト化以外にも、高速化、超高解像度化、など種々の要求があり、今後も新しい光学素子の用途として期待される分野である。

(2) 光ピックアップ

AV 新商品として MD が発売され、光磁気 (MO)

ディスクも民生用途で再び注目された。これによって CD 光ピックアップ同様、MO ピックアップの小型低コスト化の研究も加速された感がある。ここでも HOE が小型化のキーデバイスとして注目された。HOE と半導体レーザー (LD) 一体素子の MO への適用²、LiNbO₃ プロトン交換による偏光性 HOE で記録信号とサーボ信号を検出する MO ピックアップ試作¹、LD・PD・HOE をチップ素子実装した CD-ROM ピックアップ¹、HOE の 4 値位相化による各次回折効率の均一化¹などが研究された。また、光導波路ピックアップのディスク信号読みだし実験¹、遮光帯挿入による超解像ピックアップ¹、非点収差回折格子による新焦点ずれ検出方式¹、など、小型軽量化、高分解能化、高性能化の種々アプローチもあった。

2.1.3 ま と め

望遠鏡などいくつかの例外分野を除いて、種々光学系において小型集積化、高機能化、低コスト化が進み、そのキーデバイスとして HOE とマイクロレンズ (アレイ) が広く利用された。今後、これら微小光学素子の進展とともに、集積化光実装技術の必要性がより高まっていくであろう。(浜中)

2.2 X 線 光 学

応用物理学会の講演会におけるこの分野に関する発表は、3年前頃から X 線・粒子線基礎技術のセッションで増加しだし、1日分の時間を占めるようになってきている。こうした発展をもたらしたのとして、文部省科学研究費の重点領域研究「X線結像光学」の存在が大きい。この研究は3月に3年間の活動を終結したが、その準備期間を含めて研究者・技術者の交流、情報交換、研究開発の促進に大きな役割を果たした。1月に開催された公開シンポジウムでは各研究班、ワーキンググループの概要報告とともに、50件近い成果発表があった。

昨年の動向としては、光学素子の耐熱性などの性能評価、光学系の結像性能などに関する報告が増加してきている。なかでも結像型 X 線顕微鏡の発表が目についた。

まず光学素子に関する進展について述べる。多層膜に関するなかで注目されるものに、反射型の高性能偏光子^{h-01}および透過型のビームスプリッターと偏光子^{1,12,13}の製作・評価があった。反射型は Ru/Si 多層膜で波長 14 nm 付近で最高 99.5% の偏光能を示す。透過型は Mo/Si 多層膜で波長 12.8 nm 用として 41 層、入射角 33° で非偏光に対して透過率 25%、反射率 31% のビームスプリッター、81 層、入射角 41° で偏光能 96% の偏光子、入射角 46° で 1/4 波長板となる。今後の応用が期

待される。

耐熱性の評価では Ni/C⁹、Mo 系^{1,2}、W 系²についてのほか、放射光を照射した状態での反射率測定^{h-7}、X 線レーザーの反射鏡の損傷¹³についての報告があった。加熱加工による周期長分布の均一化¹は熱的な変化を積極的に利用しようというものであった。

その他にはレーザー CVD による加工^{c-4,2}、プラスチック基板上への成膜¹などがあった。

反射・集光に用いられる斜入射反射鏡に関するものでは、100 mmφ で平面度 63 nm、粗さ 0.17 nm の超平滑面研磨¹³、600 mm 長の非球面を加工する切削装置^{13,n-4}、SiC やダイヤモンド反射鏡の評価^{1,12}が報告された。

顕微鏡などの光学機器に関する報告について述べる。分子研の UVSOR を光源にゾーンプレート (ZP) 顕微鏡を組み立てた結像実験では、珪藻や筋原繊維などを波長 3.1 nm と 5.4 nm で観察してきわめて鮮明な X 線顕微鏡像を得た^{1,14,d-11}。高エネ研 PF の放射光と ZP による高分解能顕微鏡も報告されている^{14,15}。

NiCr/C の多層膜鏡でシュバルツシルド (SC) 顕微鏡を組んだ実験で、波長 4.5 nm で 0.5 μm L & S の透過型回折格子の拡大像を得ている^{1,d-10}。多層膜鏡の反射率は 3.5% と低いが、水の窓といわれる波長 2.3~4.4 nm での直入射型顕微鏡へ期待を抱かせるものであった。

ズーム管¹⁴および斜入射鏡とズーム管を組み合わせた顕微鏡^{2,12,14}は、X 線光学系に新しい可能性を示した。ズーム管は重くて取扱いにくいなどの難点もあるが、0.5 μm という高分解能とリアルタイム性を同時に満たすというこれまでの検出器にない特徴を持っており、X 線顕微鏡などの拡大光学系と組み合わせると大いに威力を発揮するものと期待される。

SC 顕微鏡に関する一連の報告として、Mo/Si 多層膜を用いたもののアライメント精度と分解能¹³、小型放射光での結像実験^{1,14}、ナイフエッジ法による評価²、レーザープラズマ X 線源 (LPX) と組み合わせたシステムの評価²、SC 顕微鏡と斜入射照明系を組み合わせた結像性能の検討²などがあった。

このほかにはウォルター鏡の加工¹³や結像性能のシミュレーション²、およびこれを用いた斜入射顕微鏡^{1,2,14}、LPX と ZP 顕微鏡による実験^{1,2}、また結像型のものと異なるが密着型顕微鏡による生物試料の観察^{1,2,14}、マイクロビームおよび走査型顕微鏡では楕円鏡によるマイクロプローブ¹²、蛍光 X 線分析^{1,12,14,15}や XAFS^{14,15}、ウォルター鏡で形成したマイクロビームによる XPS^{1,13}なども報告された。また X 線顕微鏡の解説が二つの学会

誌^{b-7,m-11})に掲載された。

X線縮小投影露光では2枚非球面光学系により0.2 μm のパターンが形成された²。反射鏡およびマスクはMo/Si多層膜で露光波長は15 nm付近, 化学増幅型レジストを上層とする三層レジストに露光した。

光学素子の評価装置としては, LPXと平面結像分光器による多層膜の反射率測定装置^{d-2}, LPXを光源とする時間分解吸収分光装置¹, 多層膜偏光子を組み込んだ偏光反射率計¹³, マイクロフォーカスX線源と放物面鏡でX線の平行光束を形成する反射率計⁴が報告された。

X線源としてはこれまで述べてきたもののほかに, LPXの発生とスペクトル測定が報告された^{1,2}。

以上のように昨年は結像型顕微鏡に大きな進展がみられたが, 今後はマイクロビームによる走査型の技術や分析技術を含んだ科学・産業両面での応用に関する発表がふえてくるであろう。また重点領域研究にかかわる求心力のある活動があると良い。一つの試みとして10月にX線多層膜のインフォーマルミーティングが開催された。

(永田)

3. 光応用計測

大阪府大工 菊田久雄
群馬大工 芳野俊彦

3.1 光応用計測一般

光応用計測の分野は, 測定対象が多岐にわたっており, 包括した進展状況を述べるのは難しいが, それぞれにおいて着実な進歩が見られた。発表は, 旧年と同様, 干渉計, スペックル, センサーに関するものが多かった。スペックル計測では, 液晶の利用により実用的な装置ができつつある。また, 二次計測の実時間化に関する研究が進み, 変位分布, 変位の速度分布, 複屈折の分布などが実時間で計測できるようになってきた。一方, 近接場顕微鏡に代表される光を使った走査型プローブ顕微鏡に関しては, 数種類のものが試作されており, ひとつの分野になりつつある。以下に分野を分けながら, それぞれの進展について述べる。

3.1.1 干渉計

測定原理については旧年と同様, 位相シフト, ヘテロダイン干渉, LDの波長シフトに関連したものが多かった。一方, データ処理の方から進展をながめると, その処理方法にさまざまな工夫が行われており, 測定範囲の拡大や精度の向上が図られた。

大きな球面や非球面の形状を測定するために, 領域を複数に分割して小さい領域で計測し, 計算機を用いて

局所的な形状をつなぎ合わせる方法が提案された^{1,2}。また, 光線を逆方向に追跡して複雑な歯車歯面の形状を最適解として求める方法が提案されている²。これらの計測方法は, 干渉計を巨大・複雑にするかわりに, 多くの計算を行って形状を求めようとするものである。近年, 高速の計算機が使いやすくなってきており, このようなアプローチが今後増えていくように思われる。ただ, もとの干渉計の誤差(とくに収差)が計算結果にどう影響するかは今後の検討課題であろう。

複屈折の測定では, 干渉縞が暗くなる条件で一周期より小さい量の位相シフトを行うことで, 弱い複屈折の二次元分布を検出している²。光の位相分布がわずかな場合, 通常の一周期の位相シフトよりも, 局所的な位相シフトを行う方が誤差が少ない。このような局所的位相シフトは, 他の波面計測等でも利用できる。そのほか, 動的な複屈折測定のために偏光干渉計やファラデー素子を用いた装置が試作されている^{1,2}。

Talbot干渉計についても位相シフト法の導入が提案されている²。干渉計の位相シフトは格子をずらせるだけで簡単に実現でき, その移動精度もマイクロメートル程度で十分なため, 実用性の高い方法であろう。Talbot効果を用いたレンズの焦点距離測定については, これまでいくつかの方法が提案されているが, これらの方法について比較検討が行われた²。

データ処理システムでは, エレクトロニクスによる実時間画像解析システムが試作され^{1,2}, 形状の変化や振動振幅を実時間で表現できるようになった。

そのほか, フォトリフラクティブ効果や2光波混合を用いた干渉計測についての提案があった²。旧年, 白色光干渉計についていくつかの発表があったが, 本年はその件数が減少した²。

3.1.2 スペックル

強誘電性液晶を用いたスペックル写真法がいくつか提案された。強誘電性液晶は光による書き込みが可能であることから, これを用いて現象処理やCCDカメラを必要としない変位計測が実現されている¹。また, この液晶は高速で動作するため, 2枚の液晶を用いて変位だけでなく速度についても計測できている^{1,2}。この方法は, 2枚の液晶でスペックルパターンとそのフーリエ変換像を記録し, 記録時間のタイミングをミリ秒単位でずらせることで, 時間ずれあたりの変位量を計測する。また, 強誘電性液晶は二値化記録しか行えないため, そのしきい値と干渉縞の可視度の関係について検討が行われた¹。

実時間計測についても, いくつかの方法が提案され

た. BOS 結晶を用いた表面粗さ測定¹, 液晶パネルを用いた振動・変位・歪の測定^{1,2}, また, TV スペックル干渉法の実時間位相シフトの導入などがあげられる².

スペックル計測における新しい解析法として, スペックル像の位相分布の二次元相関を求めることが提案されている². 通常, 変位分布を求めるときは二次元相関をとるが, スペックル像をいったんフーリエ変換し, その位相分布の相関関数を求めると, 試料の切り欠きや孔など影響があらわれにくくなる. また, 半導体レーザーの波長変化を利用した時空間のスペックル像から物体の形状を測定する方が提案されている⁴.

3.1.3 流速・速度計

液晶パネルを LDV のデータ解析に用いる方法が提案されている¹. また, 数ゆらぎ相関法によるレーザー流速計が試作された². そのほか, イメージセンサーを利用して微粒子の粒径と二次元運動の軌跡を同時に求める方法が提案されている¹.

3.1.4 センサー

三角測量による変位センサーに実用性の高いものが試作されている². 集光レンズを使わずにピンホールを用い, PSD の配置を工夫することで, 拡散物体だけでなく鏡面体でも計測が行えるようになった. また, 半導体レーザーと二つの APD を用いた小型のレーザー流速計が試作されている².

3.1.5 新顕微鏡

近接場顕微鏡などの超解像顕微鏡は, これまでいくつかの方式が提案されてきた. 1992年ではそれぞれの装置を改良することで性能の向上が図られ, 着実な進展がみられた. ローカルプラズモン顕微鏡¹, 近接場光学顕微鏡¹, 赤外エバネッセント場顕微鏡², ウィナー縞顕微鏡²などについての発表があった. また, 超解像ではないが, 光音響顕微鏡¹, 赤外ヘテロダイナミクス顕微鏡², モード干渉顕微鏡¹, 放射率補正型赤外顕微鏡¹などについても工夫が図られている. また, 原子間力顕微鏡について光学的なアプローチがあった^{2,4}.

3.1.6 その他

単パルス光の応用は光 CT と光音響について行われている². とくに光音響では, ピコ秒パルスから発生する約 20 nm の超音波を用いて薄膜の膜厚測定が行われている. 干渉計による光 CT では, シアリング干渉計を用いた場合の再生法について提案があった⁴. 測距装置では, 主局と従局双方で光源をもつトランスポンダ方式の長距離用 (10 km 以上) の 2 色距離計が試作され, 標準偏差で 1 mm という高精度な結果がえられている¹.

3.1.7 展望

1992年を含めてここ数年における光計測の進展は, 液晶をはじめとする新しい光学素子に大きく依存してきた. また, 計算機の導入により複雑な解析手法が可能になった. その基礎となる測定原理についてはほとんど変わっていないが, これらの利用で光計測がより実用化されてきた. この傾向は今後も続くものと思われる. 一方, 位相共役光, 近接場現象など, 新しい現象やこれまで注目されなかった現象を利用する研究も盛んになってきた. また, 超短パルス光の利用も検討されつつある. これらの研究の中から新しい光計測の分野が得意あがることを期待したい. (菊田)

3.2 ファイバ応用・測定器

最近のファイバセンサーの研究は, 総体的に言えばアイデアの段階から実用を目指して個別の測定対象に対してきめの細かな研究開発を行う段階に移行していると言える. それに伴い, 研究は実用化をめざし企業内で進められることが多くなり, その成果として実用的な製品が現れてきている. それに伴い, 応用物理学学会での発表は相対的に減少してきているが, 一つの新しい光学分野が萌芽し次第に成長していく過程として望ましい姿であると言える. とは言え, ファイバの実用化や高性能化のために未解決の基礎研究の課題は依然として多数存在する. ファイバには原理的にもおもしろい現象が多く含まれており, それをセンサーに巧みに応用し, 時折はっとさせるような新味のあるアイデアの発表に出会うこともあり, ファイバセンサーの研究は引き続き応用物理的な興味を多く含んでいる分野となっている. 1992年の初頭にはアメリカのモンレー市でファイバセンサーの国際会議 OFS '92⁶ が開かれたが, そこでは多くの充実した論文が発表され, 「ファイバセンサーのルネッサンス」の到来の感じを受けた. 国内における特筆すべき行事としては, 第9回光波センシング技術研究会¹⁷において, ファイバジャイロ (FOG) に関する特集を行ったことと秋の応用物理学学会²において, 「進展する光ファイバセンシング技術と産業応用の最先端」に関するシンポジウムを開き, この分野の最近の進展を紹介したことが挙げられる.

ファイバセンサーの一つ柱であるファイバジャイロ (FOG) は, 現在徐々に実用期を迎えつつある. これを期に, 第9回光波センシング技術研究会では, わが国における FOG の研究開発と現状と応用に関する特集を行った¹⁷. 現在わが国で FOG に関わっている企業は相当数あり, その大部分の企業に依頼して各社の研究状況

の発表をしてもらった。また、同時に FOG の展示会を開催し、参加者は小型で自動化した各社の FOG を多数目の当たりにすることができ、強い感銘を受けたようだ。FOG に関する展示会は世界で初めての試みであり、現在、国内の企業からの出展のみでこのような充実した展示会が開ける国は世界でおそらく日本のみであろう。FOG はよく知られているようにサニャック効果を利用した回転センサーであり、慣性空間に対する回転を測定できる特徴をもつので、ファイバセンサーが生まれた当初から強い関心を集めてきている分野である。FOG を実用化レベルに到達させるために、さまざまなノイズの除去、装置の安定化と小型化のために多くの基礎研究が行われた結果、近年ようやくその性能が、量産自動車のナビゲータやロケットの姿勢制御などに利用できる程度になってきたことを改めて認識させる研究会であった。また、同研究会では関係各社から FOG の研究状況についての研究発表もあった。現在、実用的になっている FOG の方式は干渉型のもので、光源にはコヒーレンスノイズの低減のために SLD を使い、ファイバには通常のシングルモードファイバまたは偏波面保存ファイバを使用し、信号検出は PZT による位相変調方式で行い、スケールファクタの安定化のためにはアナログ補正を行っている。今後さらに性能を向上させ、用途を拡大するための基礎研究に関する発表としては、スケールファクタを改善するためのセラダイ方式の導入、位相変調素子として集積化したジャイロチップの開発、低価格化のために偏波面保存ファイバを使わないで済むように無偏光を用いる方式の開発、センサーファイバを短くできるリング共振器型の FOG などが紹介された¹⁷。OFS '92 においては、リング共振器型の FOG におけるロックイン現象の打破、高感度の FOG を用いたジャイロコンパスがわが国から発表された¹⁶。

ファイバセンサーによる分布物理量の計測は、ファイバセンサーの中でも特徴のあるセンサーとして特に価値のある分野の一つである。OTDR 法で石英ファイバ中のラマン散乱を検出する方式の温度分布センサーは、既に多数のメーカーによって商品化され実用的なものになってきている。典型的な特性として、測定距離範囲 2 km、測定温度範囲 $-50^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$ において、測温の分解能は数度、距離分解能は数 m 程度である²。測定距離をさらに長くするためには、光強度を強くする必要があるが、その場合には誘導ラマン効果が発生しそれが障害となるのでその影響が調べられている^{1,18}。ファイバを用いた歪分布の測定に関しては、ファイバのブリラン散

乱による周波数シフトの歪依存性を利用したファイバ内歪分布測定法が開発され、ファイバを管路に敷設した前後における歪分布の変化を検出している²。距離分解能が今のところ、100 m 程度と長く、検出系が複雑であること、歪のみならず温度にも影響されることなどがあり今後の改善を期待したい。また、簡便で高感度な歪み分布センサーとして、切り込みのあるプラスチックファイバをセンサーとし、応力によって引き起こされた切り込みギャップの間隔の変化による光量変化を利用する方式が発表された²。ガス分布センサーに関しては、熱硬化型のシリコン樹脂の被覆をもつ偏芯コアのシングルモードファイバをセンサーとし、そのエバネセント波の光吸収からメタン分布を求める方式も発表されている¹⁷。また、光 IC の故障点検出を目的として、SLD を光源とするコヒーレンスコード化による高分解能の分布干渉センサーが発表されている⁸。

干渉ファイバセンサーに関しては、直交 2 周波光源と偏波面保存ファイバを組み合わせたヘテロダイナミクス方式によるセンサー方式の原理と応用、さらに測定精度に及ぼす偏波面保存ファイバの偏光クロストークの影響とその除去の手法が論じられた^{2,16}。また水中音波センサー¹⁷、原子間力顕微鏡 (AFM) のレバーの変位測定への応用¹⁸が発表され、いずれもヘテロダイナミクス検波方式を利用している。

光による磁界・電流センサーの研究も盛んである。光 CT (光電流センサー) の測定原理は、測定電流の周囲のファラデー効果の周回積分に基づくが、現実のセンサーで問題となるのが、構成された光閉回路に含まれる光学的異方性 (複屈折性) である。この異方性を除去する新しい方式として、ガラスブロックをセンサーとし、センサーセル内を進行波が反射で偏光を保持できる反射面を創生する方式の提案と試作が行われ、周囲の電流の影響を受けないことが実証された¹⁷。光磁界センサーの材料に関する研究としては、ビスマス置換磁性ガーネットの磁気光学特性、特にベルデ定数の増大と磁区構造の効果が調べられた¹⁸。また、同様の材料を用いた磁界センサーによる接地事故の検出など電力分野への応用が紹介された¹⁶。ファイバセンサーの電力応用としては他に、集光のための蛍光板と蛍光ファイバを組み合わせた蛍光-蛍光変換方式のコロナ放電検出センサーが発表された^{2,16}。

ほかにも興味ある発表があった。偏波面保存ファイバのリターデーションの温度依存性を利用する温度センサーの場合、履歴現象が存在することは知られている

が、それを詳細に調べ、速い緩和と遅い緩和が存在することが見いだされた¹。曲げのあるファイバの漏れ光の強さが温度によって変化することが見いだされ、新しい温度センサーとして提案された¹。化学センサーとしては、プラスチックファイバのエバネセント波利用の免疫物分析センサーなどが発表されている¹⁶。(芳野)

4. 光情報処理

理研 岡本隆之

サマーセミナーのテーマが「情報光学」であったが、この分野の重要性が強調されながらも、大きな技術的なブレイクスルーは見られなかった。

4.1 画像形成

ホログラフィー記録材料としてフォトポリマーの利用が進んできた。これにより、湿式処理を必要とせず、高効率なリップマン型のホログラムが得られている。また、3次元記録材料への応用もなされている。

ホログラフィック・ステレオグラムの作製では、3枚のレインボーホログラムを多重記録することによって、カラー化が行われた。また、上下方向にも視差を持つマルチドット型のホログラフィック・ステレオグラムではドット間隔を0.3mmまで細かくし、高細精度化が図られた。

Bentonの成功に刺激され、動画ホログラフィー研究会ができたが、国内での発表は少なかった。ホログラフィーカメラで撮影したホログラムを実時間で液晶空間変調素子に表示するホログラフィーテレビの報告があった。

その他の画像生成法として、フラクタル画像の光学的生成法が報告された。縮小アフィン変換を光学系で行い、フィードバックにテレビカメラを用いており、フレームレートで、フラクタル画像が成長するのが観察でき面白い。そのほか、電子線ホログラムからのCTによる3次元像再構成法が開発された。

4.2 画像処理

計算機画像処理の分野では、大気揺らぎを含んだ天体像への取り組みがいくつか報告されている。ブラインドデコンボリューションやシミュレーティッドアニーリングを用いた像回復や、最大エントロピーモデルによる位相回復などが報告された。シミュレーティッドアニーリングの手法を用いることで、複雑な形をした目的関数を持つ系の最適化がローカルミニマムに落ちることなく実現できるようになった。今後とも利用範囲は広がっていくであろう。

ニューラルネットワークを用いた画像検索、画像認識法に対して種々の改良が加えられた。また、マッチドフィルターやジョイント変換相関を光学的に実現したものが多く見られた。これらはいずれもキーデバイスとして、液晶空間変調素子が用いられており、素子の進歩が大きな役割をになっている。

フラクタル画像のスペクトル解析が行われた。フラクタル画像は面白い性質を持っているが、今後何に 응용されていくのか興味を持たれる。

4.3 光コンピューティング

光ニューラルネットに関しては多くの報告があった。多くが積和演算と閾値処理を光学的に実現したものである。ニューラルネットの重要な要素である学習に関する研究もいくつか行われたが、いずれも計算機を主体とするものであった。

光演算用アレイデバイスとして、日本電気はVSEPを、NTTはEARSを、三菱電機は光ニューロチップ、感度可変型人工網膜素子の開発および応用が続けられている。集積化デバイス作りの分野は、大学では手を出せない分野になっており、企業との共同研究が期待される。

色素膜やフォトリフラクティブ結晶を用いた2光波結合や空間光変調素子を用いた2画像光演算がいくつか行われた。中でも、アゾ系色素膜の偏光書き込み特性を利用した演算において、出力画像の美しさが印象的であった。光アレイロジックを実現する方法として、純光学型、光電子複合型や、モジュール化したものなどが報告された。

位相共役鏡として強誘電性液晶空間光変調素子を使用して、長さ20cmの光ファイバーを用いた1方向画像伝送が実現された。今後どこまで伝送距離を延ばせるか興味を持たれる。また、点光源アレイを用いた光画像クロスバスイッチの報告があった。

光コンピューティングの研究が始まって、約10年経つ。この間、光コンピューターが電子計算機にとって変わるという認識はなくなり、それを補間するものとなるといわれているが、未だそれを具現化するようなものは見当たらない。ここで、光コンピューターで何ができるのかではなく、光コンピューターで何をするのかも一度、考え直す時期に来ているのではないかと思う。

5. 画像表示

秋田大鮎 佐藤 進

5.1 概要

92年度の画像表示に関する研究は、これまでと同様に液晶ディスプレイを中心とするフラットパネルディスプレイにおいて特に活発であった。画像表示に関連する国際会議としては、SIDの国際シンポジウム(5月ポストン)、同Japan Display(10月広島)、および国際液晶コンファレンス(6月ピサ)が行われ、国内では応用物理学会(3月千葉、9月大阪)、液晶討論会(10月新潟)他において活発な研究発表がなされた。特に、3年ごとに開催されるJapan Displayにおいては、今回世界で初めてハイビジョンを利用した電子式の発表方式が試みられ、国際会議での新しいプレゼンテーション様式として注目された。また、液晶に関係する発表論文は液晶デバイスの製造・評価技術等の関連する部門も含めると、採択論文中の過半数を占めるという状況であった。

5.2 液晶ディスプレイ(LCD)

スーパーツイスト(STN)による単純マトリクスではアクティブアドレス方式による高速・高コントラスト駆動法の報告があり¹⁹、TFTアクティブマトリクスLCDでは高精度・大型化による性能の改善や高品位化^{19,20}を目指した努力が続いている。

LCDの特性に重要な影響を及ぼす基板表面における液晶分子の配向制御技術として、古くから基板を摩擦する(ラビング)方法が行われているが、これまで十分に解明されていなかったその分子配向効果についてもSTMやAFMによる界面のモフォロジーの観察^{4-12,19,21}や液晶分子のアンカリングエネルギーの解析等により、そのメカニズムが明かにされつつある^{6-7,4-5,19,21}。一方、基板のラビングによる静電気の発生や微細な塵等による汚染を防止するために、ラビング法によらない液晶分子配向法の研究も行われており、これまでのLB法を利用する方式^{4-2,4-5}に加えて、偏光を用いた光化学反応を利用するものや^{6-7,19,21}、基板面に印刷(スタンプ)法により微細な溝状のパターンを付与する方法¹⁹なども発表され注目された。さらに、液晶分子の配向を制御し、微細な領域ごとに逆のプレティルトを持たせることで、TNLCDの欠点である視角依存性を解消し、広視野角を実現した報告もあった¹⁹。

強誘電性液晶や反強誘電性液晶においても、新材料の合成やその諸物性の基礎から応用まで多くの報告がなされ^{21,22}、活発な研究が続けられている。また、強誘電性

高分子液晶によるディスプレイや反強誘電性液晶によるマルチカラーディスプレイ^{6-9,19,20}の発表があった。

高分子マトリクス中に液晶を分散させた構造の高分子分散液晶(PDLC)では、高輝度ディスプレイや新しい機能を有するディスプレイの構成を目指した発表が見られた。PDLCの欠点の一つである電圧印加時の透過特性におけるヒステリシスを小さくする方法^{d-3,22}や、しきい特性の低電圧化²²も材料の面で解決されつつある。また、負の誘電異方性を持つネマティック液晶を用いたPDLC²²や、コレステリック液晶中に少量のポリマーを分散した液晶セル^{19,22}で、off時に透明でon時に光散乱特性を示すリバースモードが報告された。直視タイプの反射形PDLCデバイスとして、TNセルとの組み合わせやGHセルを用いるものも報告された^{19,22}。

一方、PDLCにおける顕著なメモリ効果^{d-3,c-10,22}を利用して熱書き込みを行うデバイスが試みられ、レーザーや熱転写プリンタによる書き込み・消去特性も報告された^{d-8,19,23}。ポリマー基板を用いたPDLCは、可撓性であるという利点を生かした新しい展開が期待される。

5.3 その他のディスプレイ

ELディスプレイデバイス関連としては、ZnS:Tm^{d-1}、Tb^{c-2,20}、Zn_{1-x}Cd_xS:Ag、Cl^{c-2}や、CaS、SrS:Ce系^{c-1}のほかに、Zn₂SiO₄:MnやY₂O₃:Tb、Eu等のEL用の蛍光体材料の研究^{2,19,20}や、ZnS:TbOFを発光層とする薄膜(TF)EL、ZnS:Mn/SrS:Ce多層構造による白色発光TFEL²⁰、パターン化したカラーフィルタを組み合わせたマルチカラーEL^{19,20}、TFELのパルス電圧駆動に対するシミュレーション等の報告があった²⁰。

また、TF有機ELについても、高輝度化や低電圧化を目指した研究が行われており^{d-4,20}、発光材料^{c-6}や接合の構造²⁰、正孔注入層^{d-7}等と発光特性の関係²⁰等が検討されている。このように、ELデバイスによるRGB表示のディスプレイが作られるなど、青色発光の輝度や純度にやや問題を残しながらも、マルチカラーからフルカラー化への進展が見られた¹⁹。

プラズマディスプレイ(PDP)においては、31インチACDPによるフルカラー64階調の大型のパネル²⁰や17インチおよび25インチ256階調のDCPDPによるカラーTV等の開発が進み¹⁹、DC型PDPのパルスメモリ駆動法の改善²⁰、障壁の形成や評価²⁰等の報告、モノクロームDCPDP¹⁹、動作電圧の低減、コントラストの向上等の報告があった^{19,20}。

6. 光 記 録

ソニー総研 金子正彦

1992年の光ディスクの進展を振り返ってみる。まずビジネスとしては、CD プレーヤーの全世界生産台数が1982年の開始以来1987年の1300万台を経て10周年の1992年には4600万台に急増し、累計では2億台に達するまでに普及した。次にデータ用として1991年に市場に出た3.5インチ光磁気ディスクは、1992年には17万台の普及が予測され、順調に立ち上がってきている。また1992年11月に発売開始されたミニディスクは大きな話題を提供し、CDと同じ再生専用ディスク、書換え型ディスクともに今後の急速な普及が予想されている。特に、書換え型ディスクは光磁気ディスクであるので、その量産効果による低価格化がデータ用光磁気ディスクにも良い効果を与えるものと期待されている。

技術的な光ディスクの進展を見ると、ここ数年高密度化とその結果としての大容量化に焦点が絞られている。光磁気ディスクでは、高密度を実現するための方法として、マーク長記録がほぼ完成された技術となった。熱干渉を考慮して、マークの前エッジと後エッジ位置を正確に制御する記録補償技術、再生時の符号間干渉に対処する波形等化技術により高密度記録再生が行えるようになってきた。磁気記録に用いられてきたパーシャルレスポンスとビタビ復号法も用いることで $0.45 \mu\text{m}/\text{bit}$ が達成された²⁴。光波長680~690 nmの赤色半導体レーザーは間もなく実用化されようとしており、これを用いた高密度化の検討が活発になってきた。光波長687 nmの(1,7) RLL マーク長記録で、記録補償、再生等化技術も用いて、 $0.5 \mu\text{m}/\text{bit}$ 、 $1.2 \mu\text{m}/\text{track}$ が報告されている²⁵。

1991年発表された、交換結合磁性多層膜を用いる超解像光磁気ディスクもその後の進展があった。波長780 nmでの実効的なトラックピッチ $0.8 \mu\text{m}$ のもとでクロストークが -40 dB 以下にできたことが報告された²⁶。磁界変調記録用に必要記録磁界を100 Oeに低減した超解像ディスクが実現された^{25,27}。また、面内磁化容易膜を再生層に用いてマスクを形成し、高温部が垂直磁化膜になることを利用して超解像を実現する方式が提案された^{27,28}。

書換え型相変化ディスクは従来オーバーライトに対する消し残りが大きいことが欠点とされていたが、消し残りの原因が消去されるアモルファス部分と結晶部分のオーバーライト時の到達温度の差によることをシミュレーションから明らかにし、差を小さくするディスク構造で

30 dB以上の消去率が達成された^{2,25}。またノート型情報機器への応用を目指して、 0.8 mm の薄型基板、超薄型機構系の採用により、厚さ 15 mm の2.5インチ薄型相変化光ディスク装置が実現された²⁵。

今後の光ディスクの高密度、大容量化を実現する上で光源の短波長化がキーとなることは明らかである。緑、青色半導体レーザーは1991年に米国で発表されて以来、1992年には日本でも発表が相継いで活況を呈してきた。ZnMgSSeをクラッド層に用いて、電流励起により77 Kで447 nm光の連続発振、光励起では465 nm光の室温パルス発振に成功している²。発光機構が不明であることなど未解決の部分も多いが、今後の進歩が期待される。SHG(第2高調波発生)による固体レーザーも盛んに発表され、技術も成熟してきている。LD励起Nd:YAGレーザーとKTP結晶による、共振器長7 mm、出力10 mW、相対雑音強度 $-140 \text{ dB}/\text{Hz}$ 以下の低ノイズ小型グリーンレーザーを用いて、高密度光ディスク再生が実現された²⁵。反射光のモニターによるフィードバックを用いて波長を安定化し、KNbO₃結晶によるLDの直接SHGが、40 mWの429 nm青色光として得られ、これを用いて $0.4 \mu\text{m}/\text{mark}$ 、 $0.75 \mu\text{m}/\text{track}$ で $C/N = 44 \text{ dB}$ が達成されている²⁴。

以上のような技術の進展により、4、5年先に現行の10倍程度の容量を持った光ディスクが商品化される展望が開けてきたと言える。

一方、将来の超高密度光記録のための基礎的研究も進展したので、締めくくりにして紹介する。

室温でホール形成される無機材料が1991年に報告されたが、1992年には活性イオンとして同じSm²⁺を用い、母体のガラス中に分散させた系で室温ホール形成が達成された²⁹。波長領域で多重記録できる将来材料として注目される。また、近視野光走査顕微鏡と呼ばれる技術で、光ファイバーの先端を約50 nmに尖らせてレーザー光でCoPt膜に光熱磁気記録し、30~50 nmの分解能での再生が報告された¹⁻²。この技術は高速走査がまだできていないので、すぐの応用は難しいが、今後システムの検討が進展することを期待したい。

7. オプトエレクトロニクス・光デバイス

古河電工 柳川久治
リコー中研 船戸広義

7.1 光 通 信

この数年と同様に1992年も、Erドープファイバを用いた光ファイバ増幅器に目ざましい進展が見られた。し

かしながら研究開発の焦点は、Er ドープ光ファイバそのものよりも、関連する光デバイス、それをういた光通信システムに移行しつつある。これらのシステムにおいては、以下の四つの顕著な傾向が見られた。まず第1に、従来と同様に、ビットレート距離積が着実に改善され、例えば OFC では 10 Gbps×4500 km の伝送実験結果が報告された³⁴。次に、光ファイバの分散補償技術が、OFC で3件、ECOC でも3件と集中的に報告された。これは、既設の 1.3 μm 零分散ファイバを用いた伝送システムでは、Er ドープ光ファイバ増幅器の使用により、波長 1.55 μm において、信号光パワーの減衰による SN 比劣化はもはや問題ではなく、実際にビットレート距離積を制限する要因となる帯域（分散）を特殊ファイバや特殊光部品を用いて補償しようとするものである。第3に、光ソリトン通信の伝送実験のチャンピオンデータも、10 Gbps×1200 km（単一パス）³⁴、10 Gbps×11000 km（ループ周回）³⁴、5 Gbps×3000 km³⁵、80 Gbps×80 km³⁵ と大幅に進展し、超高速光ソリトン通信の特性限界の議論がなされるに至っている³⁵。最後に、光加入者系を経済的に建設する手段として、光増幅器と光分岐結合器とを組み合わせた光分配伝送システムである PON (passive optical network) の現場試験が行われ³⁵、実用化が身近になりつつある。

一方、光ファイバ増幅器関連以外の各光デバイスでも着実な進展が見られた。中でも、光デバイスチップそのものに加えて、チップへの光ファイバ接続（結合）を中心とする実装問題がクローズアップされてきたのが昨年の大きな特徴である。以下、まず光デバイスごとの進展を紹介し、次に実装関連技術について述べる。

7.1.1 個別の光デバイス

前述したように、光ファイバ増幅器単体としては、波長 1.55 μm 用の Er ドープ光ファイバ増幅器は既に実用化フェーズに入りつつある。したがって、研究の焦点は 1.3 μm 用の Pr ドープのフッ化物ファイバに移行しているが、モジュールとして 11 dB の増幅度が報告される³⁵など、増幅の見通しは立ちつつある。今後は励起効率の改善、関連光デバイスの開発など実用上の課題克服が必要である。また、シリコン基板上に Er ドープ石英導波路を用いて構成したリング型光共振器において、初めてレーザー発振が観察された^{2,31,35}。一方、ここ数年は光ファイバ増幅器の陰に隠れていた感のあった半導体レーザー増幅器であったが、実用上の大きな問題の一つであった偏波依存性を解決したもので増幅度 16 dB を実現したとの報告³⁵や、無損失の 4×4 光スイッチの報

告³¹がなされるなど、着実な進展が窺われる。

LiNbO₃ (LN) 光変調器では一層の高速化が進展し、リッジ導波路とコプレーナ電極を組み合わせたマッハツェンダ干渉計の構成で、波長 1.55 μm における駆動電圧 3.6 V、3 dB 帯域幅 40 GHz が実現された^{31,32}。また、半導体系では、歪を導入した多重量子井戸構造 (MQW) による偏波依存性解消、高効率化の検討が進められ²、ワニャーシュタルク効果を用いた InGaAs/InAlAs 系 MQW 構造の電界吸収型光変調器では、駆動電圧 0.9 V、消光比 10 dB、3 dB 帯域幅 18 GHz が報告された³⁵。

SHG では、分極反転による擬位相整合 (QPM) が、LiTaO₃ (LT) における瞬間熱処理^{1,2}、LN における電子ビーム走査^{1,2,32}、LT におけるプロトン交換²等、さまざまな方法により検討されている。

光フィルタは、光増幅器における雑音除去用、波長多重 (WDM) システムや周波数多重 (FDM) システムにおける信号分離用に重要な光デバイスである。誘電体多層膜フィルタでは、10 dB 帯域幅 0.9 nm とサブナノメータ BPF の試作³⁰や評価結果³¹が報告された。また、石英導波路を用いたアレー回折格子において半波長板を光路中に挿入することにより、TE/TM モード間の中心波長差を 1 nm 以下と、偏波依存性を解消する試みがなされた^{1,30,32}。さらに、レーザービーム描画による周期電極を用いた LN 導波 TE/TM モード変換型フィルタにおいて電極周期のゆらぎが 4 nm 以下で作製できたとの報告^{1,2,8}や、LN 導波路における電極構造を工夫して印加電圧パターンにより駆動電圧 10 V において 5 nm の波長チューニングを実現したとの報告¹もなされた。

導波路型光デバイスでは、光デバイスとしての基本特性改善に加え、強く実用性を意識した報告が多数なされた。光スイッチは LN 等の誘電体結晶よりも半導体系が中心となりつつあり、実用上極めて重要な偏波無依存性を Y 分岐型デジタル応答光スイッチ構造採用によって実現した、4×4 と最大規模のマトリックススイッチの試作が半導体系 (InGaAsP/InP) で初めて報告された³⁵。誘電体結晶では光スイッチよりも光変調器としての検討が進められたが、DC ドリフト、光損傷等材料物性に立ち戻った報告や、微細加工、光損傷耐性に優れたプロトン交換 LT など加工技術に関する報告が多数^{1,2,30,31}なされた。この中で、CVD により形成したシリコンバッファ層による DC ドリフト抑制効果により、LN マッハツェンダ干渉計光変調器について高温加速劣化試験を行った結果、環境温度 80°C において 15 年の動作寿命を保証できる見通しを得たとの報告³⁴が注目され

る。石英導波路による光分岐結合器では大規模化が進展し、マルチフェネル型 1×128 スプリッタ³¹や、 144×144 スターカップラ³²の試作が報告された。また、光デバイスの温度特性を改善すべく、光導波路基板材料の線膨張係数と光導波路材料の屈折率の温度係数をうまく組み合わせることにより、光路長の温度依存性を解消したアサール光導波路の提案・試作も行われた^{2,31,35}。

光検出器では、特性改善が着実に進展し、InAlAs/InGaAs 超格子 APD により GB 積 110 GHz が報告された³⁵。

光集積回路の分野では、RACE プログラムにより支援されたヨーロッパ勢の進展が目ざましい。ECOC においては、偏波ダイバーシティ OIC と PIN-フォトダイオード OEIC との集積化、平衡型偏波ダイバーシティ光検出器 OIC、セルフイメージングによる低損失な光 90° ハイブリッドなどが、相次いで報告された³⁵。

ファイバ型光受動部品では、OFC において、GeO₂/SiO₂ における光誘起屈折率変化を利用したグレーティングによる光フィルタおよびそれを内蔵したファイバレーザーが数件報告された³⁴。また、偏波無依存光アイソレータの初の集積化(4心一括)試作例が TEC ファイバを用いた構成で報告された³¹。

微小なバルク部品を用いた(狭義の)マイクロオプティックスの分野では、フェラデー回転子の偏光回転角波長依存性を水晶旋光子により補償することにより、波長 1.3~1.5 μm の広範囲にわたり 60 dB 以上の高アイソレーションを可能とする光アイソレータの設計が示された³⁰。

光ファイバでは、前述した高 NA 単一モード構造による分散補償ファイバ^{34,35}や、ハーメチックコーティングによる高強度化(強度 9 GPa, n 値 180)³⁴、新しい界面ゲル重合法を利用した屈折率分布制御によりプラスチックファイバにおいて 2 GHz \cdot km もの広帯域特性を実現した発表^{1,35}などが注目された。

7.1.2 光デバイスチップと光ファイバとの接続

実際の光デバイスにおいては、光デバイスチップそのものよりも光デバイスチップと光ファイバとの接続(結合)を中心とする実装技術にはるかに大きなコストがかかっていることが多く、また光デバイス全体の信頼性もやはり実装技術に大きく依存することから、本技術は極めて重要である。昨年はこの技術において、二つの大きな流れが見られたように思われる。

まず第1は、光デバイスチップと光ファイバもしくは複数の光デバイスチップを外形基準により無調心で接続

しようとするものであり、標準的な多心ファイバコネクタ(MTコネクタ)のガイドピンを利用したもの^{32,34,35}、光硬化性樹脂の特性をうまく利用したブッチンマイクロコネクタと呼ばれるもの^{2,32,35}、化合物半導体基板上に形成したガイド溝にレンズや先球レンズ加工を施した光ファイバを設置したもの³⁶、シリコン上に形成したガイド溝を利用したもの³¹など、多数の報告がなされた。

第2は、光デバイスチップと光ファイバのモードフィールドの寸法(スポットサイズ)・形状をレンズ系なしに整合させるモードフィールド変換技術である。光デバイスチップに、モードフィールド変換のためのテーパ導波路を形成した報告としては、半導体レーザーにおいて2重の導波路構造により 0.4 dB もの低い変換損失を実現したもの^{31,32}、同様の構造における計算例³⁵、半導体導波路において選択成長を利用したもの³³、石英導波路において局所加熱におけるドーパントの熱拡散を利用したもの³¹、Arrow-B による3次元変換器で 3.1~3.5 倍もの変換比を実現したもの²、などが相次いで報告された。一方、楕円モードフィールドファイバと(通常の)真円ファイバを融着接続し、接続点の追加加熱時のドーパントの熱拡散を利用した断熱テーパをもつ楕円 \leftrightarrow 真円モードフィールド変換ファイバの試作結果も報告されている^{2,31}。

これらに関連して、光導波路と光ファイバの UV 接着剤による接続部の信頼性の評価結果が、WINC と呼ばれる波長平坦石英導波路カップラ^{31,34}、8心直線石英導波路³¹、 1×8 イオン交換ガラス導波路スプリッタ^{30,31}、 2×8 石英導波路カップラ³²、に関して報告された、また、石英導波路と光ファイバを CO₂ レーザーにより直接融着接続する試みも報告されている³¹。

以上、1992年の光通信用デバイスの進展について紹介した。今後は、現在見えているシステムに適用していく上で必要な課題克服のための、特性改善、実装を中心とした研究開発と、光交換、光情報処理等システム構成、キーデバイスとも未だ不明確な次世代技術のための研究開発が、併せ進められていくものと考えられる。

(柳川)

7.2 信号処理・情報機器用光デバイス

ここでは信号処理、情報機器に応用される光デバイスの'92年の進展を概観する。

まず、短波長光源の実現に向けて引き続き導波路型 SHG デバイスの研究が活発であった。この中では特に擬位相整合(QPM)を用いた分極反転型 LiTaO₃ 素子の進展が著しかった。QPM で高効率変換を行うためには1次の周期分極反転構造を形成することが必要であ

る。松下電産は LiTaO_3 基板を周期状にプロトン交換し、これを瞬間熱処理を行うことで1次周期構造の形成を可能にした¹。この方法により導波路厚とほぼ同じ深さ(約 $1.9 \mu\text{m}$)の分極反転層が形成でき、現在までに 858 nm 145 mW 入力に対し 31 mW の SHG 出力を得て換算効率 $220\%/W$ に達している^{2,4}。またより深い周期分極反転構造を形成する試みも活発である。日立金属はプロトン交換の熱処理時に急激な熱履歴を加えることで $50 \mu\text{m}$ 以上の深さを形成させた²。富士通は従来の電子ビーム走査による方法を発展させ、周期状電極の対向面を電子ビーム走査し深さ $20 \mu\text{m}$ 以上の分極反転層を形成した²。また別の方法として周期状電極と一様電極間に真空中で直接高電圧を印加して周期分極反転構造の形成を確認している²。一方 QPM-SHG 素子の許容波長幅の狭さ(約 0.1 nm)を拡げる試みも行われた。松下電産は導波路幅をステップ状に異ならせて伝搬定数を部分的に変え波長許容幅を 0.35 nm に上げ¹、また互いに周期の異なる N 個のセグメントからなる分極反転構造により許容幅を上げ、4セグメント分割により波長幅を10倍(約 1 nm)に拡大できることを示した²。これらの方法は許容幅は拡大できるものの変換効率は相反して低下することは避けられない。松下電産は安定な波長変換を行わせるためにグレーティングフィードバックによる半導体レーザーの波長安定化を試みた^{2,4}。これはシングルモード半導体レーザーによる光導波路からの出射光をグレーティングで波長選択し、再び光導波路を介して半導体レーザーに戻し波長をロックする。この方法により基本波パワー 44 mW に対し 3.1 mW の青色光を得て半導体レーザーの温度半値幅は従来の $\pm 0.5^\circ\text{C}$ から 18°C に拡大し、温度一定化での出力変動を $\pm 1.5\%$ 以下に安定させた⁴。導波路型 SHG 素子ではこのほか、阪大が電子ビーム走査による LiNbO_3 の QPM-SHG 素子の作製を行った^{1,2}。1次の周期分極反転構造を作り波長 443 nm の SH 光を $70\%/W$ の効率で発生させた²。また光計測技術開発は LiNbO_3 の周期分極反転層を LN 上の Ti の周期パターンの熱酸化により形成する方法を試み、比較的低温 (500°C) で反転処理を可能とした¹。

SHG 素子で課題となっている SH 光の光変調方法について日立は導波路型 QPM-SHG 変調器として提案した¹。LN, LT を用いた QPM 導波路上にバッファ層を介して平行電極を設け、電界印加による電気光学効果で SH 光の位相不整合を生じさせて光変調する方式である。理論的には Gbits/s の変調速度が 10 V 程度の変調電圧で可能と予測している。

以上のように導波路型 SHG は精力的に研究が行われているが、競合技術である II-VI 族半導体レーザーも研究がすすみ、青緑色の室温パルス発振、青色の低温連続発振が実現している。またバルク型 SHG 素子も内部共振器型では半導体レーザーの端面直接結合による小型化、外部共振器型では高効率変換と光変調可能が報告されている。このような短波長光源に関する技術の競合は今少し続くであろう。

光メモリ用の光デバイスについてはホログラムを用いた光ヘッドの研究が引き続き活発であった。日立は非点収差をもつ回折格子による無調整可能な焦点検出方式を提案した^{1,25}。東芝は検出器の位置ズレに強く調整が簡易な点対称収差をもつホログラムによる光ヘッドを作製し²⁵、松下電産は有限系用光学系に用いる HOE としてホログラム内でのブレイズ化断面形状を制御して効率を均一化することを試みた^{1,25}。日電は光磁気用 HOE として LiNbO_3 基板にプロトン交換で作製した偏光性回折格子と誤差検出用の無偏光性格子の二重ホログラム光学素子を提案し機能確認を行った¹。また光源、HOE、光検出器をハイブリッド実装して1パッケージ化した光ヘッドをシャープが光磁気用のサーボ信号検出系に²、日電が CD-ROM 用に開発した^{1,25}。東海大は光源、HOE、検出器に加え対物レンズ用グレーティングレンズを一体化した超小型光ヘッドを提案し、これに用いるグレーティングレンズを試作した⁴。

また光導波路を用いた光ヘッドの発表も多かった。阪大は光源分離型光集積ピックアップにより模擬ディスクの読み出しを行い^{1,25}、日立は検出系を集積した光ヘッドで CD の再生波形を得ている²⁵。リコーは導波路型の光磁気信号検出素子として新規な TE/TM モードスプリッターを用いた光ヘッドを提案し、擬似カー回転信号を検出している^{2,25}。またこのヘッドに関連して光導波路への結合部であるプリズムカップラ¹、および集光性導波路ミラーの作製結果を報告している^{2,26}。

現状のバルク部品を並べた光ヘッドは技術的にはほぼ成熟状態にあり、今後ホログラム、集積型などによるブレイクスルーを期待したい。

光インターコネクションが提唱されて久しいが、そのための光学素子、光源など広く検討されるようになってきた。松下電産は基板内を光伝搬するプレーナ光学系用のマイクロレンズとして反射型非球面レンズを電子ビーム描画によるリソグラフィで作製した。波長無依存で光利用効率が高く回折限界の集光性能を確認した¹。日電はプレーナ光学系用の光学素子として基板中に形成さ

れた平板マイクロレンズにビームを斜入射させて用いることを提案した¹。また光源である VSTEP の基板裏面に回折光学素子をフォトリソでモノリシックに形成した D-VSEP を提案した²。この素子は VSTEP と光学素子が半導体プロセスのマスク精度で位置決めできる特徴がある。また横浜国大は ARROW 型光導波路を積層する構造で上下に光をやりとりする立体光配線を提案した¹。また光源素子としては日電が VSTEP の pnpn 構造に二つのフォトトランジスタを組合せ、制御を全光化する提案³、垂直共振器型 VSTEP の側面を Au で被覆しフォトンリサイクリングにより低閾値化(1 mA 以下)するなどの展開をした^{2,31}。また NTT は反射型 MQW 光変調器と HPT を用いた光スイッチアレイ (EARS) の 8×8 アレイを作製した²。

光情報処理用光デバイスも進展がみられた。三菱電機は GaAs の MSM 型の感度可変受光素子 (VSPD) による 128×128 アレイ光ニューロチップ¹、VSPD アレイによる人工網膜素子^{1,2}、VSPD と MES-FET を組合せたアクティブマトリクス型光ニューロチップ¹、Si 基板に GaAs の LED アレイと PD アレイを形成した Si 上の GaAs 光ニューロチップ¹などを相次いで発表した。人工網膜素子では画像の輪郭抽出に成功している¹。

このほか光学素子として電気光学効果を利用した可変焦点素子も提案された。リコーは PLZT に対向する電極を設け EO 効果で生じる屈折率分布を利用して集光する可変焦点レンズを提案した^{3-9B, 4}。この素子は焦点可変範囲が $\infty \sim 50$ mm と広い。また日立は Ti 拡散 LiNbO₃ を用いた導波路型の可変焦点素子を提案した¹。これを用いてレーザープリンタのドット径可変へ応用している³⁶。

最後に有機非線形材料については SHG 応用が多いが電気光学効果への応用も少しずつ増えてきた。NTT は色素ブランチ高分子材料を分極処理したチャンネル導波路を作製し位相変調器を構成した¹。また阪大は p-NAn-PVA 高分子電場配向膜を用いて交叉指電極による EO グレーティングを形成し 0 次光の光変調を確認している²。有機材料による EO 素子は誘電率が低い特性により無機材料より高速動作が期待できる。今後の進展に期待したい。

(船戸)

8. 分 光

東理大理工 盛永篤郎

光学における分光の分野は、分光学本来の目的である原子・分子構造の解明や分光分析を主体とした発表を取

表 1992 年度応用物理学会分光関係講演数

セッション名	講演数	素子・装置	光源	レーザー分光
光・春	255	3		2
光・秋	203	3		1
量エレ・春	171	1	8	8
量エレ・秋	187	1	9	10

り上げるというよりは、むしろ分光学のための光学素子や光学的手法を主体とした発表を取り扱うものと考えられる。したがって、応用物理学会の光・量エレのセッションでの講演を中心に取り上げる。分光光源としても将来有用であろう 2 通信光源や新しいレーザー光源の開発が盛んであるが、そのうち明らかに分光光源の製作を意図した研究であるもののみ本稿で取り上げることにした。光を中心としマイクロ波分光学、核分光学は除外する。

1992 年度の春・秋の応用物理学会講演会の光と量エレの分科で分光に関する講演を調べてみると、表のように講演数が余り多くないことがわかる。特に、光の分科では 9 件ならず、全講演数 458 件中たかだか 0.2% に過ぎない。3.1, 3.2 の細分に含まれているといえ、既に光学の分科として分光は忘れられた存在であろうか。実際、昨秋多数の参加があった光学連合シンポジウムで、分光に関する発表は 1 件もなかった。一方、量エレ分科では 358 件中 37 件、約 10% ある。多くはレーザー分光のセッションで発表されているが、これもお互いの関連が薄く活発とはいえない。また、分光学会等で発表されているかといえば、分光学会の講演数をみても分光素子・装置に関する講演の絶対数は少ない。これはこの分野が既に円熟期に入っていることを示すのだろうか？ いずれにせよ応物の分野で分光に関する研究者が少ないことを示すのは事実である。それ故、現在の光学の紙面上で「分光」を取り上げる重要性に疑問を感じないわけでもないが、この分野での光学の立場からの研究者が幾らかでも増え、ブレイクスルー的な素子・方法の誕生が研究の隆盛に導くことを期待して、1992 年度の進展をたどることとする。

8.1 分光素子・分光装置

大倉 (オプトリサーチ) ^ら は従来の回折形分光器の射出スリット部分に感度波長の異なる複数の検出器を配置することで、高効率化と高分解能化を図った近赤外分光への応用を目指した分光装置を開発した。藤本 (東大工) ^ら は画像を分光分析するため CT 手法を応用したイメージングスペクトロメータの提案を行った。三村 (阪市

大)ら²はプラズマ温度測定のため、計算機ディコンボリューション処理による分解能向上を目指した研究を行った。北浦(阪市大)ら²はマイクロフレネルレンズの焦点位置と波長の関係を利用して小型分光器の可能性を示した。石川(計量研)ら¹は可視から $2\mu\text{m}$ までのレーザー光の波長を高精度で測定するための移動平面鏡を持つ波長比較干渉系を開発し、実際に近赤外域の安定化半導体レーザーらの波長をヨウ素安定化 He-Ne レーザーを基準に 10^{-9} のオーダーで測定した。また、レーザー励起プラズマから放射されるX線を線源とするX線モノクロメーターが開発された¹。

8.2 分光光源

半導体レーザーは分光光源として期待されており、その波長も 650nm までのものが市販されるようになり、さらには、青色レーザーの発振に議論の沸騰した年であった²。分光光源としては、性能—単色性・連続波長可変性—を改善する研究が続けられた。市販品でも線幅 100kHz 程度のものが開発され始めたが、中川(東工大)ら^{1,13}は $1.5\mu\text{m}$ レーザーを電流変調 FM サイドバンド方式で基準共振器に安定化し線幅を 80Hz まで下げた。また、土田(電総研)ら^{1,1}は 830nm レーザーの線幅を高効率の外部位相変調器を用いた外部制御方式で 45kHz まで狭めている。

固体レーザー分光光源としてはチタンサファイアレーザーやLD励起固体レーザーによる光源開発が盛んに行われている。特に、Nd:YAG レーザーの光源では上原(電通大)ら²が狭線幅化を進め Hz 以下の線幅をビートで観測したことを報告している。また、通信による青色・紫外域分光光源が研究された。

広帯域波長可変パルスレーザー装置の開発が色素レーザーやチタンサファイアレーザーで進められた。また、波長域の拡大を目的にアレキサンドライトレーザーやチタンサファイアレーザーの基本波と第2高調波を水素セルに入射させ誘導ラマン散乱を観測する研究が阪市大、九大で行われている^{1,2}。

8.3 レーザー分光

超高分解能分光であるCa光ラムゼー分光の研究では反跳ピークの抑圧や多重ゾーンラムゼー共鳴の解析がなされた。また、伊藤(計量研)ら²はCa光ラムゼー信号を基準として安定化した色素レーザー(波長 657nm)の精度評価を詳細に行った。これらのデータを基礎にCa安定化レーザーは新しい波長標準の一つとして国際的に認められることになった。占部(通総研)ら^{1,2}は将来の周波数標準への応用を目指してrfトラップにト

ラップしたCaイオンのレーザー冷却を行い、トラップイオンからの蛍光の寿命を測定した。大田(同志社大)ら⁴⁵は 633nm 発振安定化内部鏡 He-Ne レーザーを用いて外部ヨウ素セルの飽和吸収分光を行った。ヨウ素セルを外部リング共振器中に置き、FMヘテロダイン分光を行うことにより、弱い11-5バンドR(127)遷移の検出を外部セル方式で始めて検出することに成功した。また、広い同調範囲を利用して強い6-3バンドP(33)遷移を検出し、周波数の絶対安定化が可能であることを示した。光ガルバノ分光では曾我部(阪市大)ら¹はArホローカソード放電中でのスペクトルプロファイルの測定をした。また、西宮(工芸大)ら¹によりKrの超微細構造の測定がなされた。

一方、藪崎(京大)ら¹¹によって始められた試料透過光の強度揺らぎを利用する高分解能半導体レーザー分光について、山田(慶大)ら¹¹は種々のタイプの半導体レーザーで調べ、広帯域でかつ分光感度が通常のFM分光程度であることを示した。そのほか、田久保(農工大)ら^{1,2}は共鳴フォークト効果を酸素分子の禁制遷移を対象にして調べ、そのプロファイルについて検討している。

9. レーザー

富士通研 今井 元
電総研 宮崎健創

9.1 半導体レーザー

92年に開催された半導体レーザー関連の会議のなかで、とくに、9月21日から25日まで香川県高松市で開催された半導体レーザー国際会議が注目される。この会議は1967年にラスベガスで開催されて以来、ほぼ隔年に開催されており、日本で開催されるのは3回目である。半導体レーザーの研究開発者にとってプライオリティの高い会議であり、数多くのホットなトピックスが報告されている。そのために、昨年1年間の進展をみるにはこの会議が重要な一つの情報源となる。

最近、半導体レーザーの分野が拡がり、波長でも可視光でも青色から赤外までと広範囲にわたってきている。また、使用形態でも、これまでの単体での使い方から光インターコネクションといわれる計算機などでの装置間接続や将来のウエハ・ボード間/内接続での並列信号伝送に対応するべくアレイ化の方向が見え始めている。この並列信号伝送はまだ実験室段階であるが、将来の大きな分野になる可能性がある。

以下に、分野別に92年の半導体レーザーの話題を紹介する。

9.1.1 1 μm 波長帯レーザー

1 μm 波長帯レーザーは光伝送システムに使用されることを狙って単一波長化, 高速動作化, コヒーレント化, 波長可変化が図られてきている。最近では歪み量子井戸 (QW) 構造を採用することによる高性能化, 主として低しきい値化が進んでいる。歪みでは引っ張りと圧縮が考えられるが, どちらも低しきい値が進んでおり, 井戸層が InGaAs である 3 元系では端面に高反射膜を形成することで, 1~2 mA を実現し, とくに引っ張り側で 0°C 0.62 mA の低しきい値が得られている。歪み構造を取り入れることよりオージェ再結合係数やバンド内吸収が抑えられるとの報告³⁸があるが, 今のところこの材料での波長帯 (1.5~1.6 μm) では温度特性が改善された報告はない。まだ議論の余地が多い。InGaAsP を井戸層にした 1.3 μm 波長でも低しきい値化が進んでいる。室温で 1.5 mA^{±2}, 120°C で 43 mA^{1,30,35}が得られ, 25~85°C で特性温度 (T_0) が 70 K と求められる。

単一波長レーザーではスペクトル線幅に関してはとくに大きな進展はなかった。歪み QW 構造を取り入れることで線幅増大係数が 1~2 と小さくなり, 変調時の波長チャープが 2~3 Å となる^{2,30}。また, 波長可変では多電極 DBR 構造で連続ではないが, 電流を変えることでほぼ 60 nm の可変域が実現した³⁸。これまで, 外部回折格子鏡を用いないとたかだか 10 nm の波長可変であった。また, 3 セクション MQW-DFB レーザーで, 78~145 kHz の狭線幅を保って 1.9 nm 波長可変ができ, 1 kHz から 100 MHz まで平坦な FM 特性が得られた⁸。

新しい DFB 構造として, 利得結合型 DFB レーザーの報告が多い^{1,2,38}。利得結合型は従来の屈折率結合型となり, ブラッグ波長での発振が可能となること, 反射光に対して耐性が強いことがあげられる。MQW 層を回折格子構造に取り入れることで, 結合係数を制御するもの, 吸収層を回折格子構造に取り入れるものの報告がある。しきい値電流はいずれも 20~30 mA で, 1.7 Gb/s-239 km の伝送, ゲインスイッチングによる短パルス発生等の実験で, 波長チャープが抑えられるのを観測している。

9.1.2 可視光レーザー

可視光領域は ZnSe 系材料による青色域と, GaAlInP 系材料による赤色域の話題が中心である。青色レーザーでは (Cd, Zn) Se 量子井戸層の Cd 量を調節することにより, 77 K でパルス発振ながら 493 nm の発振が得られた⁸。これはどちらかというと緑色に近いが, その

後, ZnSe と ZnMgSSe で構成した MQW 層を Zn-MgSSe クラッド層で挟んだ構造で室温で光励起で 464 nm のレーザー発光³⁷が, 77 K では電流注入により 447 nm の青色のレーザー発光が得られた³⁸。Mg を取り込んだことが改善のポイントで, 77 K での連続発振である。室温での電流注入による発振には電極等の改善が必要だが, さらに高温での発振が期待される。

赤色レーザーでは He-Ne レーザーの 633 nm 波長での発振の高効率化が進んでいる。この領域での安定した連続発振が得られるようになった一因は活性領域からのキャリアの漏れを防ぐために多重量子障壁 (MQB) 層を導入したことがある。MQB はキャリアに対する DFB 構造のようなもので, 電子波の波長に相当する周期で障壁層を形成することでキャリア (電子) のクラッド層への漏れを防ぐものである。このことにより, 室温での発振しきい値電流が 30 mA, 83°C でもレーザー発振し, また小規模ではあるが 45°C-3 mW でのエージング試験をしている^{1,8,38}。

同じ材料系で 670 nm 波長のレーザーは歪み MQW 構造を取り入れることで室温 25 mA のしきい値電流, 100°C で 50 mW 台の高温・高出力動作が実現し, エージング試験でも 50°C-35 mW での 1000 時間, 50°C-20 mW で 8000 時間のデータが得られている^{1,2,8}。

9.1.3 面発光・マイクロ共振器レーザー

面発光レーザーは低しきい値化高出力化が進んでいる。活性領域径を 70 μm と大きくした InGaAs/GaAs レーザー (波長 998 nm) で連続動作 113 mW が得られた。また, GaAs/AlGaAs レーザー (波長 830~850 nm) ではパルス動作ながら 1 W の出力が得られた。1.3 μm では InGaAsP/InP レーザーで光励起ながら 144°C での発振を確認している。注入型の 1.3 μm 帯では 77 K ながら連続動作でしきい値 2.7 mA が得られた^{2,9,11-16}。

面発光レーザーの室温での安定した連続発振を妨げる要因に動作電圧の高いことがある。GaAlAs 系レーザーで p 型コンタクト層の Be 不純物のドーパ量を増やして動作電圧を 2 V 付近まで下げ, 室温パルス発振しきい値が 3 mA となった³⁸。また, 波長可変機構を設けたもので 0.65 mA の低しきい値と 2.2 nm の波長可変が得られた³⁵。

9.1.4 励起用光源

光ファイバー増幅器用 0.98 μm 帯高出力レーザーは寿命試験のデータが揃い始めた。100°C-10 mW で 2000 h, 50°C-100 mW で 7500 h のデータが得られ, 何れも安定な経過を示している^{8,32}。また長寿命を妨げる要因と

思われる Al を除いた InGaAs/InGaAsP/GaAs 系材料でのポリイミド埋め込みレーザーでしきい値 15 mA, 300 mW 光出力が得られた^{2,8}. 温度特性が 215 K と非常に良いことから期待される材料系である.

9.1.5 高出力レーザー

高出力化はアレイレーザーを用いて, ヒートシンクの改善とともに年々向上している. しかし, 室温での動作ではそろそろ限界に近づいているようである. AlGaAs レーザーアレイ (波長 800 nm) で 2°C の雰囲気中で 120 W の連続動作出力が得られた⁸. 半導体レーザーといえども, 出力でも他のレーザーに近づいている.

こうした端面出力型に対し, 表面出力型でも高出力化が図られている. 端面発光型レーザーと作り付けの 45°ミラーを用いたもので, 16×94 アレイで 50 W の cw 出力が得られた⁸.

また, 高出力化を半導体レーザー増幅器と組み合わせるものも現れた. マスターレーザーに DBR レーザーを用い, 回折格子を内蔵した増幅器を通すことで単一波長を保ち高出力を得るもので 1.3 W 出力が得られている. 回折リミットの発光パターンが得られるのは 800 mW までである⁸.

9.1.6 短パルス発生

半導体レーザーの短パルス発生はモードロッキング, ゲインスイッチングによる方法が報告されている. 今回新しく, 吸収型変調器と組み合わせて 33 ps の短パルス発生^{2,38}, ゲインスイッチングと光ファイバー増幅器を組み合わせソリトン効果を用い, 1.2 ps の短パルスが発生した³⁸.

9.1.7 QW/歪み QW 構造

QW 構造はどの種類のレーザーにも取り入れられており, 低しきい値化, 高出力化に大きく貢献している. さらに活性層に歪みを導入することで, 既に紹介したようにさらに特性が向上している. 問題は高速変調であるが, バリヤ層・光閉じ込め (SCH) 層の組成・厚みを最適化することで, 16 GHz の周波数帯域が得られ³⁸, 数ギガビットの変調をした^{30,31,38}.

QW 構造では非線形効果が大きく, 高速変調に向かないとの懸念がされている. この非線形効果が井戸層とバリヤ層または SCH 層との間でのキャリアの出入りに関係つけて解釈する考察が進んでいる. また, 実験でも SCH 層の厚み, 組成を変えたレーザーでの小信号周波数特性, キャリヤ寿命の測定結果から推測している^{1,2,8,30,31,38,r-10}.

9.1.8 量子細線, 箱構造

量子細線レーザーは細線効果についてはそのスペクトルで確認しており, 特性についてはいま一つのところである. これまでは GaAs 系材料での報告であったが, InP 系材料でも室温 cw 発振した^{2,38}. この場合も細線による特性向上については議論となろう.

量子箱についてはレーザー動作に至っていないが, 形状をつけた GaAs 基板で量子箱形状を実現している³⁷.

9.1.9 光インターコネクション

光インターコネクション用として, 単純にはファブリ・ペローレーザーのアレイを用いて伝送実験した報告が出始めた. さらに将来の方向として, 多波長をつかうことを考え, DFB 構造を用い 1.5 μm 波長付近で³⁵, 7 nm⁸ 間隔に 20 の波長の異なったアレイレーザーを実現した. また, 8~10 の多電極 DFB レーザーを作り, 1.5 μm 波長域で 10 GHz 間隔に制御することを実現している³¹.

面発光レーザーを用いて信号伝送実験を行った報告がある. 2×18 の GaAs の面発光レーザーと GaAs の pin ホトダイオードを用い, 155 Mb/s の信号の 200 m 伝送実験を行っている⁸. また, 500 Mb/s まで著しいクロストークによる劣化はないとのことである.

半導体レーザーは分野の拡がりとともに, 応用分野も広がっている. これまで, ガスレーザー・固体レーザーでなければ難しい領域もだんだんとカバーできる可能性がでてきている. 今後の進歩が期待される. (今井)

9.2 気体, 液体, 固体レーザー

レーザーと関連技術の開発は多くの場合シーズ指向で進められてきた. 気体レーザーや固体レーザーに代表される高出力レーザーについても, それらの代替不可能な機能を最大限に利用する応用技術開発が精力的に行われ, 今日では, 加工, 計測, 医療, 電気・電子, エネルギー, 化学等の広範な分野における基盤技術になっている. 新たな機能を持ったレーザーおよび各種レーザー機能の高度化がレーザー技術開発における中心課題である.

9.2.1 高出力レーザー, 完全固体化レーザー

高出力レーザー関連ではエキシマレーザーが相変らず開発の中心である. 特に「超先端加工システムの研究開発」(通産省大型工業技術研究開発)の中でその高性能化技術開発が組織的に進められており, 平成3年度末には各種性能について中間目標が達成されるとともに, 平成5年度末の最終目標に向けての努力が継続されている. 平均出力 $P=505$ W (XeCl, 繰返し周波数 $f=540$ Hz)

の大出力化技術, $f=4\text{ kHz}$ (XeCl , $P=200\text{ W}$) の高繰返し化技術, 1×10^8 ショット (ArF) の長寿命化技術, 8時間動作で安定度 1.9% (XeCl , $P=200\text{ W}$) の自動出力安定化技術等が実現した^{1,2}. ヨーロッパにおいても類似のプロジェクトが進められており, $P=1\text{ kW}$ ($12.5\text{ J}\times 80\text{ Hz}$, $10\text{ J}\times 100\text{ Hz}$) が報告された. 間もなく kW 級エキシマレーザーの実用機が出現するであろう. 一方, エキシマレーザーの利用技術についてはなお模索の時代が続いている. 大きな光子エネルギーと尖頭出力を利用したアブレーション加工, 表面改質, 露光技術等の研究が進められているが, 産業技術として定着するまでにはなお数年を要しそうである.

CO_2 レーザーはすでに広く加工用として普及しているものの, より高安定・高品質なビーム特性を目指し, マイクロ波放電励起や位相整合共振器の研究が行われている^{1,2}. また, 同位体分離やリモートセンシングへの応用を念頭においたパルス CO_2 レーザーについても, 全固体化電源等の開発による高繰返し高出力 ($f=600\text{ Hz}$, $P=2.9\text{ kW}$) の TEA レーザーや波長可変・狭帯域 TEMA レーザーが開発された^{1,2}. 落雷から電力設備を保護するためのレーザー誘雷の研究では約 8 m のプラズマ長が達成された¹.

銅蒸気レーザーについては主にレーザー同位体分離のための高出力化が進められている. 口径 8 cm の装置で $P=365\text{ W}$ が報告された².

パルス Nd: YAG レーザーは最も完成度の高いレーザーの一つである. 各種製造現場において加工機として広く利用されており, 国産 Nd: YAG レーザー加工機は世界市場の 50% 以上を占めるまでになっている. 一方, 同レーザーを含む固体レーザーの低発振効率, 低い耐衝撃性, 大きな装置サイズ, 励起用ランプの低寿命等の短所を根本的に解決する技術として, 高出力半導体レーザー (LD) を励起源とする全固体化レーザー (all solid-state laser) 技術が関心を集めている. 米国では, 二次元アレー構造により LD の cw 出力 120 W が達成されるとともに, $f=100\text{ Hz}$ で 1 J/パルス ($P=100\text{ W}$) の Nd: YAG レーザーや 20 J/パルスの Nd: glass レーザーが報告されている. 国内の当該技術の研究は, 主に光通信・情報処理, レーザーレーダーや干渉計測用光源等を念頭において進められている^{1,2}. それらは, LD 励起単一モード Nd: YVO₄ レーザーとその SHG の高安定化, LD 励起 Nd: YAG レーザーの高効率・高出力化と増幅技術の開発等である. また, 重力波検出用レーザーとしてビート線幅 193 mHz の超高安定 LD 励起

Nd: YAG レーザーが実現された. このような全固体化レーザー技術は, 加工用途をも含む高出力レーザーの中心的技術として発展することは確実であり, 高出力 LD を初めとする関連技術開発が国内においても一層活性化することを期待したい.

9.2.2 波長可変レーザー, 超短パルスレーザー

色素レーザー等の液体レーザーについては特筆すべき進展は見当たらない. 広帯域波長可変という優れた機能により基礎科学に与えたインパクトは計り知れないが, 媒質の劣化や出力不安定性等の克服困難な欠点を有しており, 現状レベルからの飛躍的な高度化技術開発は望めないかもしれない.

波長可変固体レーザー結晶の出現により, 波長可変レーザー技術は一気に産業レベルにまで高度化されたと言っても過言ではない. 中でも Ti: sapphire レーザーは, 完成度の高い Ar レーザーや Nd: YAG レーザーが励起源として利用できること, 色素レーザーについて開発された波長制御技術がほぼそのまま利用できること等から, cw およびナノ秒パルス発振装置について信頼性の高い多くの製品が開発された. すでに主な技術開発の段階を過ぎ, 半導体技術, レーザー化学, レーザー計測等の分野へ急速に浸透しつつある.

波長可変レーザーでのみ可能な超短パルスレーザー技術も Ti: sapphire レーザーによって急速な高度化が進んだ. パルス幅 $\sim 100\text{ fs}$ を発生する超短パルスレーザー発振器をはじめとして, $f\sim 10\text{ Hz}$ で尖頭出力 0.1 \sim 1 TW (30 \sim 200 mJ/200 fs) のレーザー増幅システムも市販装置として開発された. パルス幅 10 fs 台の高繰返し ($f=3\text{ kHz}$) 超短パルス発生や超高輝度増幅システム開発を目指した研究が進められている^{1,2}.

より新しい波長可変固体レーザーとして Cr: LiSAF や Cr: LiCAF レーザーが知られていたが, 前者について LD 励起およびランプ励起レーザーの研究が国内で初めて報告された^{1,2}. LD (680 nm) 励起では出力 56 mW, スロープ効率 $\sim 21\%$, 可変波長範囲 $\sim 100\text{ nm}$ が, ランプ励起では 6 mJ/パルスのノーマル発振が報告された. Cr: LiSAF 結晶は耐水性に問題があるものの, 励起源となる短波長 LD の高出力化とともに Ti: sapphire レーザーに代わるコンパクトな全固体化波長可変レーザーとして今後の発展が期待できる.

そのほか, Nd: YAG レーザーで励起できる LiF: F₂ カラーセンターレーザーの室温動作特性や Ti: BeAl₂O₄ レーザーの増幅特性, Ti³⁺: CaAlO₄ (R=Gd, Y) 結晶の分光特性等, 新しい波長可変固体レーザーについての

研究も盛んになりつつある²。

自由電子レーザーは、一昨年の国内初の可視域発振に続き、 $\lambda=488\text{ nm}$ での発振が複数の機関で成功した。しかし、同レーザーはなお基礎研究の段階にあり実用技術開発に向けての課題は多い。今後、実用的なレーザーの存在しない短波長域、あるいは遠赤外域での高効率・高出力発振技術等を当面の目標にしつつ、加速器の小型化、高品質・高密度電子ビーム発生・制御技術等の要素技術開発が平行して進められるであろう。

9.2.3 真空紫外レーザー，X線レーザー

$\lambda\sim 200\text{ nm}$ 以下の真空紫外(VUV)からX線域で発振するレーザーは、新たなレーザー応用技術を可能にし、各種先科学技術に与える大きなインパクトが予想されることから活発な研究開発が継続されている。

$\lambda\sim 157\text{ nm}$ のVUV域で発振する F_2 レーザーは、市販装置で発振可能な最短波長のレーザーであり、その高出力化技術については国内の研究が世界をリードしている。ほぼエキシマレーザーの出力に相当する $\sim 200\text{ mJ}$ /パルスが得られるようになるとともに、高平均出力化やビーム品質の改善等の実用技術開発が進行している^{1,2}。また、高分子膜や半導体を対象としたプロセス技術への応用が検討され始めた。 F_2 レーザーの有用性は明らかであるが、今後、同レーザーの短いガス寿命が応用技術開発に際してより深刻な問題となろう。電子ビーム励起でのみ発振可能であった Ar_2 レーザー($\lambda=126\text{ nm}$)等の希ガス分子エキシマレーザーについて放電励起の可能性が検討され続けている^{1,2}。

レーザープラズマを媒質とするX線レーザーは、米国において Se^{24+} レーザー($\lambda\sim 21\text{ nm}$)の大きな増幅利得が観測された1984年頃から研究が本格化し、短波長化、高効率・高出力化を中心とした開発が続いている。国内では Ge^{22+} レーザー($\lambda\sim 23\text{ nm}$)について飽和増幅が観測されており、そのコヒーレンスやスペクトル特性等が詳細に調べられた¹。小型化が最大の課題であり、Class-room sizeあるいはTabletop size等に向けての議論が活発になってきた。パルス出力5 \sim 10 Jの比較的小型の励起用Nd:glassレーザーにより、ピコ秒レーザーパルス列励起再結合軟X線レーザーの研究が続けられている^{1,2}。

尖頭出力GW \sim TWの超短レーザーパルスを原子気体中に $I=10^{13}\sim 10^{16}\text{ W/cm}^2$ の強度に集光することにより著しく高次の高調波が発生できる。比較的小型のレーザーシステムを用いて(波長可変)軟X線コヒーレント光発生が可能なこと、および高次高調波発生が典型的

な非摂動論的非線形光学現象であることから多くの関心が持たれている。HeビームにTi:sapphireレーザー($\lambda\sim 791\text{ nm}$)パルスを集光照射した実験で $\lambda\sim 8.5\text{ nm}$ (93次)までのコヒーレント光発生が、また、Naイオンにサブピコ秒KrFレーザーパルスを照射した実験で19次高調波($\lambda\sim 13.12\text{ nm}$)までの高調波発生が観測された²。

フェムト秒レーザー、波長可変固体レーザー、LD励起固体レーザー等の発展により、高次高調波発生やX線レーザー励起に利用できる超高輝度レーザーはより簡便で信頼性の高い汎用装置へと急速に高度化されるであろう。それとともに、波長可変コヒーレント軟X線光源やX線レーザーもより現実的な技術へと発展することが期待できる。(宮崎)

10. 視覚光学

東工大総理工 中野靖久

1992年の視覚光学に関する動きを振り返ってみると、例年開催されている応用物理学会の春季および秋季講演会、日本光学会視覚研究グループを母体とした日本視覚学会(Vision Society of Japan)が開催する冬期および夏期研究会、日本光学会も企画に深く関わっている色彩工学コンファレンスおよび画像工学コンファレンスなどに加え、新たな企画がいくつか催された活動的な年であった。年の始めには日本光学会(OSJ)と米国光学会(OSA)のジョイント・ミーティングが初めての試みとしてカリフォルニア大学アーバイン校において開催された。このミーティングにおけるトピックスは“Advances in Color Vision”であり、長年にわたりこの分野で優れた業績を残されたUCSDのBoyton教授の退官記念を兼ねての企画であった。本会とのジョイント・ミーティングということもあり、日本からも多くの研究者が参加した⁴⁻⁶。秋には、これも初めての試みとして日本光学会主催による光学連合シンポジウムが京都で開催され、今後定例のシンポジウムとして定着することになった。ここでは、これらの学会・研究会での発表を中心に、今年の視覚光学の進展を振り返ってみる。

10.1 色覚

ここ数年色の見えのモードに関する研究が盛んであるが、これはCRTやプリンターといったメディアの違いによる色の見えの相違を克服するという応用的な側面と人間の色知覚特性を解明するという基礎的な側面の両面があり、それぞれに興味深い。しかし、現在のところ基礎と応用のギャップがまだ大きいように感じられる。応

用サイドでは、まずデバイスに依存しない色の表現空間 (例えば $L^*a^*b^*$ 空間) を確立し、各デバイスに応じて、例えば CRT であれば RGB 空間、印刷物であれば YMCK 空間というようにこの共通空間を介して変換するというテクニカルな研究^{5,6}が主である。一方基礎研究では、物体面をスポット照明し周辺光をまったく与えないことにより光源色を模擬したり、逆にある光源の周りに周辺光を与えることにより物体色を模擬したときに色の知覚がどのように変化するかを測定する心理物理実験が行われている。このとき、光源色と物体色で色のカテゴリーの範囲がどのように変化するか^{2,40}、周辺光の強度を変えていったときに光源色から物体色へどのように移り変わり、輝面度、クロマ、バリュウが変化するか⁵、多色背景の中のある一色を局所照明したときにどこまで輝度を上げると局所照明に気がつくか⁴、周辺光と中心光を時間的にずらして呈示したときに表面色知覚の発現がどのような時間経過をたどるか⁴などを調べる研究が行われている。こうした基礎研究がどのように応用されていくか、今後期待したいと思う。

表面色の知覚と密接な関係にあるのが黒み誘導である。黒み誘導のメカニズムに関する包括的な研究によれば、黒みを誘導する側の周辺光に対しては輝度メカニズムが働き^{39,a-2}、黒みが誘導される側の中心光に対しては輝度メカニズムのみならず色メカニズムが介入すること^{1,a-5}が示された。今後黒み誘導メカニズムと表面色知覚を結び付ける研究が進むことを期待したい。

輝度メカニズムと色メカニズムの役割が議論的となるもう一つの問題として、明るさ知覚がある。明るさ知覚は輝度メカニズムに加えて色メカニズムが付加的に寄与しているというのが一般的な説明であるが、これに対し、明るさ知覚の個人差も含めて精密に予測するモデルが提案され^{39,a-10}、明るさ知覚が視細胞の出力の非線形性と2種類の反対色メカニズムにより説明されることが示された。明るさ知覚の個人差は知覚に基づく測光システムを構築しようとするとき大きな問題となるが、直接比較法による明るさ分光感度データを主成分分析により解析した研究⁷⁻¹¹によると四つの主成分によりすべてのデータを説明できることがわかった。また、明るさ知覚には個人差だけでなく、直接比較法において無彩色を可変とするか有彩色を可変とするかという測定方法の違いにより差が生ずることが示され⁵、ここでも視覚系の非線形な特性が示唆された。明るさ知覚に基づいた測光システムに関しては、現在国際照明委員会 (CIE) で検討が進められており、さらなる研究の進展が求められている。

以上色覚研究の最近の動向を筆者の主観的な立場から述べてみたが、これらのほかにも、色弁別のメカニズム^{1,40,41}、色恒常性^{2,41}、色順応・色対比^{1,2,5,40}、色応答の時間特性^{4,41}、周辺視・薄明視における色の見え^{1,39,40,41}、カテゴリーカルな色の知覚および記憶^{1,4,39,40}、点滅光の明るさ・色知覚^{2,5,41}等のオーソドックスなテーマも新しい観点から盛んに研究されており、この分野の奥の深さを感じさせる。

10.2 パターン認識

パターン認識と色覚は決して独立した研究ではなく、境界領域に属する研究も少なくない。例えば、陰影から感じられる立体感がどのようなメカニズムによって生ずるかを調べた研究^{6,39,40,a-11}では、等輝度条件では陰影による立体感が生じないことから、これが輝度メカニズムにより生じていることが示された。この場合は単眼でも静止した視覚情報からの立体感であるが、立体視に関しては両眼視差や運動視差に基づく研究も依然活発に行われている^{1,2,40,41}。

運動視も色覚と密接に関わる研究分野である。等輝度刺激に対する運動視の低下は周知の事実であるが、近年これに加えて等輝度刺激の運動捕捉という現象も注目されている⁴⁰。運動視のメカニズムは生理的にもかなり解明が進んでおり、心理物理学においても生理的なデータを意識した研究が多くみられ^{40,41}、今後の発展が期待される分野である。

また、注視点移動の際生じる眼球運動 (サッケード) の前後で不連続な知覚が生じないのはサッケード中の視覚情報が抑制されるためであると考えられ、盛んに研究が行われているが、このサッケード中の抑制が輝度情報を選択的に抑制するという研究結果が示され^{2,39,40,41,a-7}、ここでも輝度メカニズムのパターン認識における重要性が示唆された。サッケード前後の視野の安定性を考える場合、サッケード抑制だけでなく、サッケード前後の視覚情報の統合という観点からの研究も重要である。これに関しては、等輝度刺激を用いたときの影響³⁹、サッケード前後における刺激のマスキング^{1,40}、運動情報の統合^{2,41}、サッケード時に文書を変位させた時の読み取りへの影響⁴¹といったことが調べられている。

10.3 まとめ

視覚光学の今後の発展の鍵は何かと考えてみると、人間の脳における視覚情報処理メカニズムの解明という大目標に向けてのさまざまなアプローチを包括的な視点から眺め、統一的な解釈を模索するところにあるのではないかと思う。そのような意味で、この分野で生理的な研

究^{40,41}やニューラル・ネットを用いた研究³⁹等の発表が増えつつあるのはよい傾向であると思う。今後さらに視覚光学が学際的な方向に発展していくことを期待したい。

11. 光源・測光・照明

松下電工 阪口敏彦

11.1 光源

この一年光源としては、特に新しい研究はなかったように思うが、照明学会全国大会や支部大会の発表内容から、今年の傾向を述べる。

まず、注目すべきは、2年前に技術発表された『無電極蛍光ランプ』が各社から実用化され、その報告および商品発表がなされた⁴²。10月に池袋で開催されたインターナショナルライティングフェア（日本照明器具工業会主催）でも、国内外の多くのメーカーがこの無電極蛍光ランプを商品展示した。研究所レベルで検討されてきたランプが多方面で実用化の時代に入ったと言えるであろう。そういった中、無電極蛍光ランプの光束劣化の原因を追求し、このランプの特徴である長寿命・メンテナンスフリーをさらに向上させるための検討も報告された。

もう一つの光源での傾向として、『液晶バックライト向』の光源の開発が引続き活発であり、各社から報告がなされている⁴²。このことは、この分野での光源開発が日進月歩していると同時に、液晶ディスプレイ用として、これという決め手がまだ完成していないことを示していると思われる。

11.2 測光

純粋な測光とはすこし異なるかもしれないが、この一年測光分野においては、CCDカメラを使った二次元パターン短時間計測が数多く発表されたので、ここではそれに注目する。

室内のグレア評価等に利用するために、CCDカメラで取り込んだ画像輝度情報から、光源の位置や輝度・立体角を測定する方法が報告された⁴²。この方法においては、測定のダイナミックレンジを広げるためにカメラの絞りを高輝度用と低輝度用の二段階設定し、二度の測定によりデータを合成している。

また、輝度分布を測定する方法もいくつか報告されている。仁平らの方法は、室内の輝度分布をカメラでネガフィルムに撮影し、そのネガ画像を12ビットAD変換器を通して、13,500画素・4096階調の輝度情報として取り込もうという方法であり、ネガフィルムの感度補

正も自動的に行われ、室内の輝度分布計測に利用できるとしている⁴²。村上らの方法は、ランプの高い輝度等も同時に計測することを考えた方法で、NDフィルターを使うことにより、約25万画素の輝度情報を、ダイナミックレンジ約1:60,000で一分程度の計測時間で測定できるとしている⁴²。

それ以外にも、二次元の色情報を瞬時に測定する測光システムとして、CCDカメラとパーソナルコンピュータを使った測色システムが発表され、10月のインターナショナルライティングフェアにも出品展示され、色情報を扱う研究者から注目を浴びていた。

測光の分野としては、精度を追求することも重要であるが、瞬時に簡便に多くの情報を処理するということが今後の重要なニーズとなると思われる。その意味で、ここに紹介した技術は、今後の測光システムの基本となるであろう。

11.3 照明

照明の分野としては、快適性との関係を研究したものが増えている。しかも、一時多かった官能評価の研究から心理物理的研究、さらに生理学的研究や視覚情報処理的研究の発表がこの一年で急増している。

例えば、三種類の照明空間に対して、被験者の事象関連電位P300や副腎皮質刺激ホルモン・脳波(α 波)などを計測し、集中力・ストレス・快適性を評価している研究発表があった⁴²。また、色温度と照度の異なる空間で、特定作業をした場合の心電図を計測し、緊張度や抑制作用を生理データから説明している例もある⁴²。

照明を視覚情報として研究している例としては、局所照明の照射エリアの認識のされ方を視覚モデルを用いて説明しようという試みが報告されている⁴³。また、照明の実空間を考慮した大視野・低周波域の空間周波数特性の測定結果も報告されている⁴³。いずれも、照明分野では新しい取り組みであり、今後、照明空間での照射状態の見えを説明していくうえで有効な手法になると思われる。

心理物理的取り組みも盛んで、色彩計画としての色情報の目立ちを考慮した研究も報告されている⁴⁴。これは、『自然環境の中で、構造物を目立たないようにするためにはどうすべきか』とか、逆に『色の氾濫した都会の中で、どうすれば、目立つ標識・信号ができるか』などに今後役立っていくと思われる。

無彩色モンドリアンパターンを全般照明し、任意の単位刺激のみをプロジェクターで局所照明して、局所照明の認識閾を求める研究も報告された³。従来、背景照度に

対し何 % アップとかで、局所照明器具を選択していたが、この研究結果を利用することにより、それぞれの商スペースに応じた局所照明の決定が可能になる。

高齢者問題では、照明レベルが下がると、光色によって高齢者の色識別性に大きな差が出るという報告があった⁴⁰。また、実際の高齢者の色の見え、誤認状況を全国各地で対面調査を実施し、フィールドデータを集めたという報告もあった。このようなデータは、今後、高齢者の見えを検討したり、色の見えのメカニズムを解明していく上でも、重要なデータとなってくる。

照明理論の新しい流れとして、『照明空間における光の流れの可視化』という報告があった⁴²。始まったばかりの研究のようで、まだこれといった活用できる成果はなかったが、今後、照明空間を評価していく手法として大いに注目・期待すべき研究であろう。

最後に、具体的な器具・システムとしての発表の中から、目立ったものを紹介しておく。

変化するあかりということで、リビングルームの生活シーンに相応しい四つの照明雰囲気を設定するとともに、シーンからシーンへの適切なフェードコントロールを検討した報告がなされた⁴²。時間変化に対する快適性というものに着目している点が新しい研究である。

色温度を 3000~30,000 K まで連続的に変化させるといふ調色照明システムも報告され、これにより空間の雰囲気を大きく変化させることができる⁴²。このシステムは、雰囲気に応じた商スペースでの照明変更への活用のほか、各種照明雰囲気内での評価実験への活用なども考えられる。

安全面では、地下街などの緊急時の避難誘導システムとしての『光点減速走行避難誘導システム』が、照明器具工業会の委託のもと、照明学会より委員会研究成果として報告された⁴²。このシステムは、今後ますます増え続けるであろう地下街開発に対応させたもので、照明業界としても必要な研究である。この研究の中でも、画像処理装置を用いた視認性・認識性の実験などが行われているが、モデル実験とともに照明分野でも、CG や画像処理を利用した評価実験が増えてきている。

器具の発表としては、無結線照明システムというものが発表され話題になった。原理的には、新しいものではないため、学会発表等技術発表はなかったが、各種展示会で参考商品の展示があった。特殊な用途では、このようなシステムの採用も今後普及してくるかもしれない。ロープに吊したロウソクの提灯の代りに、送電線に自分の名前入りの無結線照明器具のボンボリを吊して、フェス

ティバルに参加する時が来るのを楽しみに、『光源・測光・照明』の報告記事を締めくくる。

12. 光学関連の規格

キヤノン 桑山哲郎

工業規格は、時代とともに進化する製品と技術を反映し、変化する。本年のこの報告では、紹介される機会が少ない JIS 規格の制定・改正の流れを取り上げ、つぎに 1992 年の 1 年間の JIS 規格の動向を紹介する。

●規格の制定から廃止まで

人の一生と同様、工業規格もそれぞれ固有の寿命を持っている。図は、現在の JIS 規格の制定・改正の流れを説明したものである (JIS 総目録—1992 より)。産業界である規格の必要性が生じてくると、多くの場合工業会あるいは学会に JIS 原案作成委員会が組織され、作業が行われる。また、業界などの自発的な活動では原案作成が困難な場合には、国からの「工業標準化調査研究委託」が民間機関に対し行われる。

JIS 原案の審議は、工業標準化第 11 条に基づき、通商産業省工業技術院に設置されている日本工業標準調査会が行っている。原案は、1005 設置されている専門委

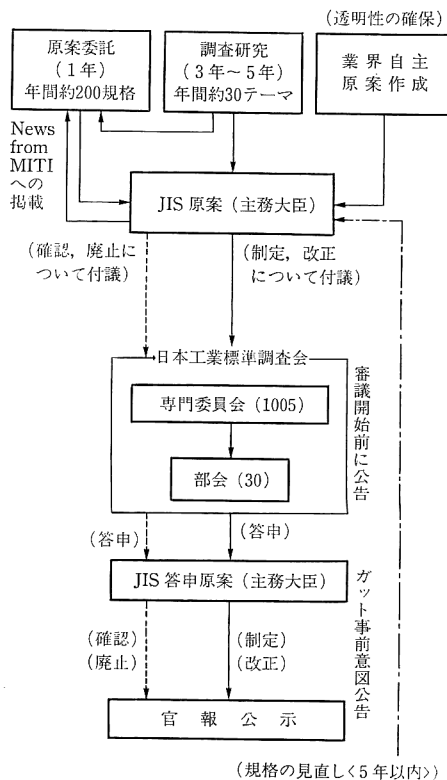


図 JIS 規格の制定・改正の流れ

員会, 30 設置されている 部会の審議の後, 原案広報を経て制定が行われる。

いったん制定された規格は, 5年以内に見直しが行われる。変更の必要がない場合は「確認」, 変更が行われたものは「改定」として広報が行われる。また, 見直しの結果存続の必要がないと決定されると, 「廃止」されることとなる。

●廃止された JIS 規格

下記は, 1992年の1年間に廃止された JIS 規格である。

B 7128 8mm 映画撮影機によるフィルム上の画面の位置と寸法, B 7129 8mm 映画映写機で映写できるフィルム上の画面の位置と寸法, B 7130 8mm 映画撮影機のスプール軸, B 7169 8mm 映画映写機用リールの寸法, B 7171 8mm 映画映写機, B 7172 8mm 映画映写機用映写レンズ, B 7178 8mm 映画撮影機用フィルムスプール, B 7179 8mm タイプS映画撮影機, B 7180 8mm 映画撮影機用解像力試験標板, B 7219 8mm タイプS映画用フィルム上の磁性帯および磁気ヘッドギャップの位置と幅寸法, C 8011 配光測定方法(照明用反射がさ)。

上記11件の JIS 規格のうち10件までが8mm 映画に関連するものである。廃止の理由として「製造されていないため」というごく当然の理由が書かれているが, この結果に時代の流れを改めて感じる方も多いことだろう。以下, 新規制定, 改定, 見直しの順に紹介する。

●新規に制定された JIS 規格

B 2828 眼鏡棒-表示, B 7231 35mm 映画製作に用いられる高精細度テレビジョン(HDTV)用モニター映写画面, C 5871 干渉フィルタ試験方法, C 5872 空間ビーム光用光アイソレータ通則, C 5873 空間ビーム光用光アイソレータ試験方法, C 5900 光伝送用受動部品通則, C 5901 光伝送用受動部品試験方法, C 5910 光ブランチングデバイス通則, C 6183 光スペクトラムアナライザ試験方法, C 6836 全プラスチックマルチモード光ファイバコード, C 6837 全プラスチックマルチモード光ファイバ素線, X 6272 90mm 書換形および再生専用形光ディスクカートリッジ(ISO/IEC DIS 10090の翻訳), X 6281 120mm 再生専用光ディスク(CD-ROM)。

●改正された JIS 規格

B 7148 顕微鏡用接眼レンズ, B 7153 工具顕微鏡, C 5870 干渉フィルタ通則(JIS C 5871の制定に伴う一部改正), C 7014 光電管の形名, C 7016 光導電セルの形名, C 7608 測光標準用高圧水銀ランプの測光方法, C 8010 配光測定方法(道路照明器具)。

●見直しを開始した JIS 規格

C 5970 F 01 型単心光ファイバコネクタ, C 5971 F 02 型単心光ファイバコネクタ, C 5972 F 03 型単心光ファイバコネクタ。

上記の名称から, 時代とともに急速に変化していく JIS 規格の状況をご理解いただきたい。国際化の進展に伴う新しい動きも多数あるが, また別な機会に紹介する。