

総論

オプトエレクトロニクス



1. 総論†

稲場 文男††

1. まえがき

宇宙創造は光に始まるといわれており、「神、光あれと言給ひければ光ありき」と旧約聖書の創生記の冒頭にあるように、それ以来この広大な宇宙には光が広がっている。そして、地球上のわれわれ人類が目で感知することのできる光の波長が、可視光という電磁波の中のごく狭い範囲に限られているのは、今から約46億年前といわれる地球の誕生以来降りそそいでいる太陽からの放射エネルギーがその領域に極大をもつためと思われるが、光学 (optics) という学問、技術はまさにその光の存在によって生み出されたものといえる。それは人間に与えられた視覚を出発点として、ここ数世紀の間に物体の明暗や色彩などを含む2次元、3次元の画像などのさまざまな光の空間的な情報を正しくとらえ、記録、再生、変換、処理、抽出、表示などをするとところまで進展してきた。

一方、エレクトロニクスは人間に授けられたそのような直接的な感覚に端を発する代りに、長い年月にわたり積み重ねられた多彩な経験に基づく知的活動の一つの所産である電磁気学という学問体系の応用として、前世紀の終り頃から胎動をはじめ、可視光から比べるとはるかに波長は長いが、コヒーレント性という著しくすぐれた特性を備えた電波を駆使して、時間的系列の中での大容量情報の伝送、分波、増幅、変復調、計測、処理、記憶、演算、制御などという、今日見られるような目をみはるばかりの巨大な技術体系を築き上げてきたのである。

しかし、この双方の学問、技術分野にはそれぞれが備えている独自で本質的な長所があり、それらを互いに結びつけるとともに、おのおのが不得手とする側面を補完するように有機的に融合して、止揚したら、は

るかにすばらしい機能や新しいデバイス、システムなどが実現できるのではないかという期待が芽をふき出したのは、1960年のレーザの誕生以降のことである。

オプトエレクトロニクス (Opto-electronics)、あるいは光エレクトロニクスという言葉の内容は今ではそのようにとらえられ、オプティックス+エレクトロニクスというような、個別分野の単なる和からはまったく予想できないような大きなインパクトをもたらすものとして科学技術の全領域から注目されている。このことはもっと端的に述べれば、レーザによって始めて生み出された電波やマイクロ波と同じように位相がきちんと揃っていて、秀いでた単色性と指向性を有するコヒーレント光によって¹⁾、光の最大の特徴である時間的高速性と空間的並列性を完全に活かした、時間と空間にわたる新しい4次元的な制御の可能な数多くの先進技術が期待されるからとみてよい。そして、光情報処理とか、光コンピュータというイメージはこれまでにいろいろな変遷があったにせよ、今ではそのような目標を指向しているものと考えられ、最近の高度情報化社会を目指した大容量、超高速情報処理のニーズとレーザや光ファイバを中心とする光関連産業技術の急速な進展に伴い、これらの革新的なハイテクノロジーの分野が大きく脚光を浴びるようになってきたのである。

そこで本稿では、本特集号の総論として、このような先端技術の一つとして日進月歩の著しいオプトエレクトロニクスについて、まず現時点から洞察されるその基本的概念を明らかにするとともに、オプトエレクトロニクスを今日の姿にまで育成し、さらに4次元的な革新技術の開拓のためにこれから最強の牽引力となるレーザ工学と光ファイバ技術を中心とする基幹技術の進歩について述べることにする。また、オプトエレクトロニクスと光情報処理の研究開発の歴史的歩みに触れた後に、その応用技術と利用分野の現状を展望し、さらにそれらを基盤として急成長が予測されてい

† General Review on Opto-electronics by Humio INABA
(Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University).

†† 東北大学電気通信研究所

る光産業の将来動向に関しても記すことにしたい。

2. オプトエレクトロニクスの基本的概念と 基幹技術の進歩

エレクトロニクスは、その歴史をふり返れば明らかのように、コミュニケーションとコンピュータを二大支柱として大きく発展してきたが、それらの推進力となったデジタル技術と IC, LSI, VLSI などの集積回路技術は、この両支柱を密接不可分形で一体化して、今日の情報化社会における産業、経済、学術、文化、教育、福祉、医療、日常生活などの広汎な局面に多大の影響を与えつつある。しかしながら、エレクトロニクスは人間との情報授受の媒体として、聴覚に頼る音や視覚に頼る光を必要とし、特に後者は百聞は一見にしかずのことわざ通り、前者に比べて格段に優位であるため、古くから光-電気変換と電気-光変換の諸現象の材料やそれらを利用したデバイスの研究、実用化が進められてきた。これらは今世紀初期の光電管とか光陰極材料、アイコノスコープや電球、蛍光灯、ブラウン管、電界発光素子などにまでさかのぼることができるが、いずれも電気（電流、電圧）によって光の検出、制御、調整を行うことを目的としたものである。あるいはもっと類型的に言えば、それらは従来のエレクトロニクスにおいてももっとも本質的な役割を担っている時間的ならびに空間的に位相が秩序正しく揃っている電波帯やマイクロ波帯の電流、または電圧を利用してインコヒーレント光を制御する技術の流れを汲むものといえる。

一方、これに対して光、あるいは光学的技術を電子回路の一部に取り入れようとする試みが、1955年のLoebner²⁾の論文を皮切りとして現れ、電界発光(EL)素子と光導電素子を組み合わせた光カプラ（現在では発光ダイオードと光トランジスタで構成される）に代表されるようなデバイスが考案されて、オプトエレクトロニクスという言葉が始めて登場するようになったのである。すなわち、この当時はまだレーザの出現以前であって、この言葉自体はエレクトロニクスに主体をおいて、この領域に光学的手法を取り入れることによって電子回路的な問題の解決にあたるという意味合いのきわめて強いものであった³⁾。このような考えは、先に述べたと同様の類型的な表現を用いれば、その後主としてインコヒーレント光を利用して（電氣的に絶縁された状態で信号を伝達し）電子回路中のコヒーレントな電流や電圧を制御、変換しようとする技術やデ

バイスを生む源流となったものである。

以上説明したような2つの流れを対比してみた場合、後者の光でエレクトロニクス機能の一部を制御する分野をオプトエレクトロニクスと名付けるならば、前者のエレクトロニクス機能で光の一部を制御する分野に対してはエレクトロオプティクス (Electro-optics) という表現がふさわしいように思われる。しかしながら、いずれにしてもこの2つの分野は歴史的には従来よりエレクトロニクスの概念の中でそれぞれ位置づけられてきたといえるものであって、それらの名称から受けるようなエレクトロニクスと光学の両者にまたがる大きな変革を促すようなインパクトは残念ながら内包するには至らなかったのである。

だが、そのような巨大で目ざましい変革をもたらす驚異的なインパクトはやがて、今世紀最大の発明の一つといわれるレーザの誕生によって放たれることになる。そして、現在オプトエレクトロニクスという言葉はすでに1章でも触れたように、光学とエレクトロニクスを機能的に融合する革新的な技術分野であり、それぞれの単独技術の限界を打破し、時間と空間にわたる4次元的な情報の計測、収集、伝達、処理、制御などを行い、人間により良く適合した形で、新しい多種多様な応用技術を生み出す学問領域を意味するものと理解されている。換言すれば、それは従来の光学、またはエレクトロニクスの一方が実現した機能や効力を他方のもつ手法や技術で補足し、強化するようなものではなく、その両者を止揚したより高い次元における独自の学問、技術を指向しているものといえるであろう。そして、その中には従来から研究開発の進められてきた、上述のようなエレクトロニクスの中で光が密接なかかわりをもっている2つの流れの延長上にある分野も当然包含されることになる。

このような見方からすると、この新しい総合分野は人類が始めて地球上で獲得したコヒーレント光を発生するレーザやそれらの周波数変換、増幅、波面制御などを行う非線形光学を中心とする量子エレクトロニクスを基盤として、長い歴史を通して培われてきた幾何光学、物理光学、電磁波動光学、そして近年の集積・導波光学や画像工学と、今世紀の初頭以降コヒーレントな電磁波をバックボーンとして構築されてきたエレクトロニクス、そしてその概念の中で育まれてきた狭義のオプトエレクトロニクスやエレクトロオプティクスをすべて包括するものと考えられる。したがって、このような広い領域に支えられた躍動的な新世代の分

野に対しては、従来から使われているオプトエレクトロニクスの名称との混同をさけるために、最近では別の言葉を用いようとする傾向が現れており、米欧では optical electronics, photonics, lightwave technology, 我が国では光エレクトロニクスなどがよく目に触れるようになってきている。ただし、本文ではこの特集号のタイトルに従って、特に断りのない限り広い意味でオプトエレクトロニクスという名称を使用することに

する。従来のエレクトロニクスは、自由電子を主体とする荷電粒子の運動や挙動を利用し、一次元の時間領域における周波数をより所として著しい発展をとげてきた。ここでは、各種の電子管やトランジスタ、半導体能動デバイスなどの発明によって実現された、単一周波数で位相のきちんと揃っている、コヒーレント特性のすぐれた電波やマイクロ波を縦横自在に駆使して、今日見られるような壮大な技術体系が築き上げられたのである。図-1はこのようなコヒーレントな電磁波の周波数開拓における歴史的な推移の様子を図示したものであるが、ごく初期の交流発電機やアーク送信機から始まるその数字は、時代とともに急速に上昇してきていることがわかる。そして、中でも興味深い特徴的な傾向として、次のようなことが指摘される^{4),5)}。1) まず第1次世界大戦後の1920年代頃には、周波数は約 10^6 Hz (1 MHz) 程度にまで達して、ラジオや無線通信技術の実用化への道が開かれた。2) それから約20年後の第2次世界大戦をはさむ1940年代には、周

波数はおよそ 10^4 倍も拡張されて、ほぼ 10^{10} Hz (10 GHz) 台にまで及び、その後のマイクロ波技術の目ざましい進展を促した。3) さらに20年近くたった1960年には、最初のレーザーが発振され、人類が自ら開拓し、制御することのできるコヒーレントな電磁波の周波数は一挙に 10^{14} Hz (10^2 THz) のオーダにまで到達したのである。

これらの3つの段階を比べると、大づかみにいっておよそ20年ごとに電磁波の周波数はそれぞれ4桁近い増加をたどっているといえる。そこで、きわめて単純にこの数字を外挿してみると、1980年代にはコヒーレントな電磁波の発生は 10^{18} Hz の桁、波長にして Å 単位のX線領域にまで及ぶことになる。筆者自身はただ単なる数字のパズルめいた組み合わせや偶然の符合を信じるつもりはまったくないが、昨年秋には超巨大なピーク出力の Nd: ガラスレーザー光パルスの照射によって誘起された Se および Y プラズマ中で波長 206, 209 および 155 Å の軟X線の増幅および発振が確認されたとの報告があったことを付記しておく^{6),7)}。

図-1に見られるようなラジオやテレビ、電話、マイクロ波通信、衛星通信、コンピュータなどのあらゆるエレクトロニクスの装置やシステムに用いられている時間的ならびに空間的にコヒーレントな電波やマイクロ波は、20世紀に入って始めてエレクトロニクスが開発した発振器によって、人工的に正確に制御して作られたものである。人類の共通財産ともいえるこのようなコヒーレントな電磁波のスペクトルをどのようにし

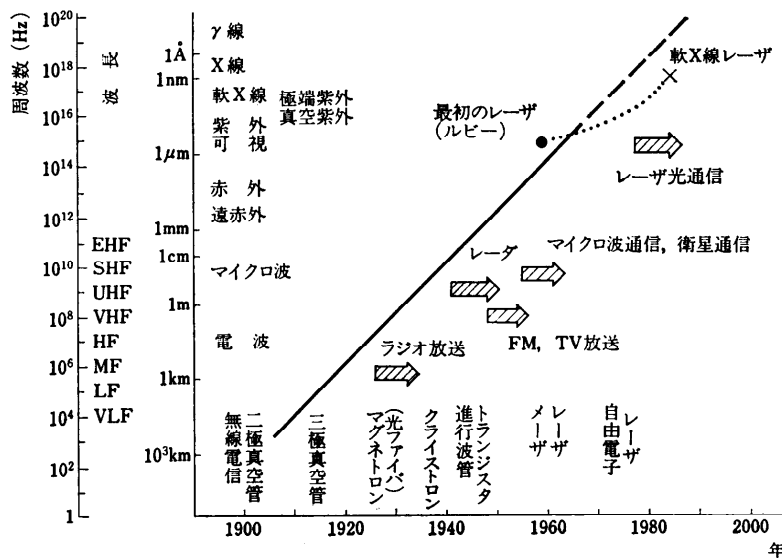


図-1 20世紀におけるコヒーレントな電磁波の周波数開拓の年代的推移

てできる限り拡大し、有効に利用するかは、将来のこの地球上の文化、学問、技術をはじめ文明、社会、福祉などにきわめて大きな影響を及ぼすものと考えられる。レーザはそのために人類の英知を結集して創り出されたものであって、レーザ光の本質的特性である単色性や指向性、空間的および時間的エネルギー集中度、高輝度性、偏光性などは外部からエレクトロニクス的に精確に制御することが可能であるというすぐれた特徴を備えている¹⁾。つまり、レーザ光は従来のエレクトロニクスにとって不可欠であった電波領域の波長の長いコヒーレントな電磁波とまったく同じ性質を備えた、科学技術的にみて最も理想に近い光と理解することができるのである。そして、このようにしてコヒーレントな電磁波が図-1に示されているように、電波からレンマイクロ波の帯域を超えて、赤外から可視、紫外、真空紫外の範囲にまで及び、さらに今後は極端紫外から軟X線、X線へと拡大されようとする現時点では、エレクトロニクスと光学を学問的に区別する境はまったく取り払われてしまったといえるであろう。

一方、従来の光学とその関連分野は主として可視域を中心にして、自然光や人工光などのインコヒーレント光の空間的な広がりや分布を利用して、物体の色彩や形状などを含む2次元、3次元の画像などの情報を対象に記録、再生、処理、抽出、表示などの技術を開発し、数々の実用上の成果を展開してきた。その間には、ほかの分野からの新しい思想や技法を取り入れることもしばしば試みられ、たとえばエレクトロニクスからは通信理論の時間周波数に対応する空間周波数の概念を導入し、空間的なフーリエ変換やフィルタリング、コンポリューション、相関関数などのアナログ的な並列演算法を光学系で樹立して、後に光情報処理と呼ばれる新しい分野を開花させる端緒を築いている。また、ファイバ光学の提唱やガラスファイバの長年にわたる試作開発、電子写真や感光材料、画像や文字の記録・複写技術などをはじめとする数多くのハードウェア面における大きな貢献もその長い歴史の中に留められるものである。

しかしながら、科学技術史上数々の功績を残してきた光学にとって、もっとも革命的で、最大無二のインパクトを与えたものは、なんといってもコヒーレント光を現実にもたらしたレーザの誕生であろう。それまでは長い年月にわたり波動光学や物理光学を通して理論的なイメージとしてしかとらえられていなかった夢のようなコヒーレント光が、実際に目の前に躍り出た

ことは驚喜すべきことであり、光学にとっての新天地は幻ではなくなったのである。そして、従来インコヒーレント光だけに頼ってきたために生じたさまざまな手法や技術の限られた枠や乗り越えられなかった限界が、レーザからのすぐれたコヒーレント光によって大きく押し広げられたり、解消されたりして、これまでとは比較にならないほど幅広い適用範囲と多彩な応用分野が開拓されたことはよく知られた事実である。波面再生の着想に基づいて提案されたホログラフィの原理は、レーザ光を用いて始めて実験的に確立されたものであり、その後のコヒーレント光学系を利用した並列アナログ演算処理や認識、記憶などの技術を中心とする画像情報工学への寄与はその最も重要な一例といえる。

このような時流に呼応して、さらに光学における光の伝播や2次元的画像の伝達とエレクトロニクスにおける時系列情報の伝送という2つの基本概念を緊密に結びつけ、技術的な一体化をはかるのに拍車をかけたのが、光ファイバの極低損失化の成功である。光ファイバは1950年代の半ば頃からすでに医学的応用として内視鏡などに実用化が試みられていたが、多成分系ガラスを材料として用いていたため伝送損失が大きく、km以上のオーダの長距離にわたる光の伝送などは夢物語に等しかった。しかし、米国のコーニング社の技術陣は、1966年に行われた材料の高純度化と製造技術の改善による低損失で、しかも低分散の光ファイバの実現の可能性の指摘²⁾に基づいて、工夫と努力を積み

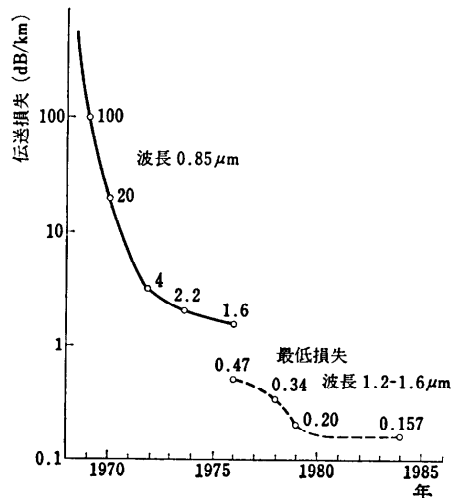


図-2 石英系光ファイバにおける伝送損失の改善の年代的推移

重ねた結果、1970年に化学的気相析出法 (Chemical Vapor Deposition; CVD) を用いて予言通りの 20 dB/km という伝送損失の石英ガラスファイバを開発したのである⁹⁾。それ以降この石英系光ファイバの損失は、CVD法の各種の改良によって、ますます低下の一途をたどり、近年ではほぼ理論的限界に近い伝送損失の波長分布特性を示すに至っている¹⁰⁾。図-2はこのような石英系光ファイバの低損失化の年代的経過を図示しており、日、米、欧全体の動向をとりまとめたものである。図中1976年以後の点は1.2~1.6 μm の波長範囲にある最低損失を与えるもので、右下の2つの値は単一モード光ファイバによるものである。

以上述べたように、レーザはエレクトロニクスと光学の学問的な境界を完全に拭き去り、低損失光ファイバは光による一次元的な時系列情報だけではなく、それと組み合わせた空間的な並列情報の超高速で、広帯域、大容量の伝送という新しい次元の技術を生み出しつつある。そして、近年の半導体集積回路技術と半導体レーザを中枢とする高性能半導体光デバイス技術の進歩によって、さまざまな光と物質の相互作用や効果の利用が促進され、さらに両者の技術や機能を巧みに一体化させる新しい光-電子集積回路 (Opto-Electronic Integrated Circuits; OEIC) の概念に基づく各種の素子や機器が研究開発されつつある。また、これらの最先端の技術と着想は、発光ダイオードや受光ダイオードをはじめとするいろいろな光電変換デバイス、光制御デバイス、光カプラ、太陽電池、光導波路素子や部品、さらに撮像、蓄積、増幅、変換、表示などの多様な画像デバイスや装置にも着実にフィードバックされて、高性能、高寿命、低価格の新しい製品の開発、市場化にも多大の貢献を果たしてきているのである。そして、これらの現在進行しつつある事実こそがオプトエレクトロニクスの現実の姿をまさしく伝えるものであり、それは光学とエレクトロニクスの両者を止揚した融合化をはかることによって、今後ますます増大する高度情報化社会の多角的なニーズに十分応えるために、光の最大の特徴である時間的高速性と空間的並列性を完全に活かした4次元的な革新技術の一大分野にまで発展することが広く期待されているといえよう。

3. オプトエレクトロニクスと光情報処理の研究開発の歩み

オプトエレクトロニクスは前章に記したように、現在もっとも躍動的で若々しい学問、技術の一領域であ

るが、その構成概念や要素技術の種子や芽はそれほど新しいものばかりではない。表-1はオプトエレクトロニクスの研究開発の歴史の中で重要と思われる成果や事項を年代順に列記したものである。表中には、近年におけるこの分野の形成のための最大の原動力となったレーザや非線形光学を中心とする量子エレクトロニクスの関連経過についても別に並記してある。これらのほかにも大事な事柄や開発などがあるものと思われるが、紙面の都合上省略してあり、それぞれの事項の具体的内容や歴史の関係などと併せて、この方面の参考書や教科書を参照されたい¹¹⁾⁻¹⁵⁾。

この表の右側にはまた、光情報処理、あるいは光コンピューティング (optical computing) の分野における現在までの主要な研究や技術開発の歴史的進展の様子を、それらの内容に応じてアナログ的とデジタル的なアプローチの2種類に大別して記入してある¹⁶⁾。周知のように現代の社会生活において、エネルギー、資源、食糧、医療、福祉などとともに必要不可欠な情報の中には、2次元、3次元的に分布した文字、図形、標識などの画像や多種多様な形状の物体に関するものなどがきわめて数多く含まれている。このような性格の大容量情報を取り扱うためには、現在までに高度の発達をとげたノイマン型の電子計算機システムでは機能的および構成的に困難があるとみられている並列処理法がもっとも適していると考えられているが、光学の分野ではその芽生えともいえる空間領域における並列アナログ的な手法を用いた種々の研究が、今世紀の半ば頃から始められた^{12), 17)-20)}。これらはその後レーザの出現に伴って、光学系を用いて行う画像情報処理とその関連技術の研究へと発展し、光情報処理という分野²⁰⁾を生み出す端緒となったものである。

一方、レーザの発明はコヒーレント光を用いた時間領域におけるデジタル的な光演算、光情報処理技術への期待をもたらし、そのための新しい手法や機能素子などの研究開発が1960年代から着手された²¹⁾。しかしながら、通常の電子計算機と同様の1次元的な時系列逐次処理方式を念頭においていたこれらの初期の提案や実験は、当時のレーザとその周辺技術の不成熟に加えて、電子回路的な論理演算素子に比べて非実用的であったため、発展への手掛かりや具体化のための足場を得られずに沙汰止みとなってしまった。

そして、その次に登場するのが光による並列・高速処理性に、高精度でしかも機能性と融通性が期待できるデジタル方式を結びつけた並列デジタル情報処

表-1 オプトエレクトロニクスおよび量子エレクトロニクスと光コンピューティングに関する研究開発の歴史的進展 (年表)

年	オプトエレクトロニクス	量子エレクトロニクス	光コンピューティング	
			アナログ的	デジタル的
萌芽期	ブラウン管の発明 (1897) 光電管の原理 (1909) 誘電体ロッドによる光導波 (1910) 光陰極材料の開発 (1913) 電界発光現象の発見 (1920) 点接触 SiC の発光 (1923) アイコノスコープの開発 (1933) エレクトロルミネッセンスの発見 (1936)	誘導放出の理論 (1916) 二光子吸収の理論 (1931)	Abbe, Zernike らの先駆的研究 (1870年代)	
	1946 イメージオルシコンの開発		ホログラフィの原理	
	1948			
	1950 ビジコンの開発	光ポンピングの実験		
	1951	誘導放出の観測 メーザの発明		
	1953			コヒーレント・フィルタリングの提案
1954	Si pn 接合太陽電池の発明 クラッド型光ファイバの提案	NH ₃ メーザの実験		
1955	GaAs 発光ダイオードの開発 オプトエレクトロニクスの提唱			
1956	GaP 可視 LED の開発	3 準位固体メーザの提案	空間周波数フィルタリングの一般理論	
1957		3 準位固体メーザの実験		
1958		レーザの提案と理論		
1959			コヒーレント・フィルタリングによる画像修正	
1960	PbO 系光導電形撮像管の開発	ルビーレーザの実験	合成開口レーダの提案	
1961		He-Ne レーザの実験 非線形光学の開幕 (第 2 高調波発生) Qスイッチレーザの開発 Nd ガラスレーザの実験		
1962	GaAs LED の開発 GaAs 半導体レーザの実験	ラマン・レーザの発見 和周波光発生, 光整流 差周波光発生		ニューリスタ・レーザ計算機の提案
1963	ヘテロ接合レーザの提案 レーザ光によるホログラム再生			レーザ間の光結合によるスイッチングの実験
1964	プラスチックファイバの開発	モード同期レーザの実験 誘導ブリルアン散乱の実験	ホログラフィ技術による画像認識	双安定レーザダイオードの提案
1965		光パラメトリック発振器の実験	高速フーリエ変換 (2 次元 FFT) のアルゴリズム 地震波記録の光フィルタリングによる改善	レーザ・インバータ回路の提案
1966	低損失光ファイバの実現可能性の指摘 薄膜光導波路素子の試作開発	色素レーザの発見	合成開口レーダへのコヒーレント光技術の応用	
1967	Al GaAs シングルヘテロ LED の開発 可変波長赤外半導体レーザの開発 Si ビジコン (pn フォトダイオードアレー) の開発		ホログラフィック・フィルタリングによる画像修正	
1968	セルフオックレンズの開発 BED 素子の開発		大容量ホログラフィック・フライングスポット走査メモリの開発 合成開口技術の並列情報処理性の研究	

年	オプトエレクトロニクス	量子エレクトロニクス	光コンピューティング	
			アナログ的	デジタル的
1969	セルフォック光ファイバの試作 開発 集積光学 (光 IC) の提唱 Al GaAs シングルヘテロ接合 レーザの実験 (パルス発振)	超短光パルス (サブピコ秒) の 発生		光双安定性 (1次相転移 的) の提案
1970	室温連続発振 Al GaAs/GaAs 半導体レーザの開発 低損失光ファイバの開発 (20 dB/km) 光導波路中の非線形効果の実験 (第2高調波) 光ファイバ中の誘導ラマン散乱 の実験 超格子構造の提案 CCD 素子の開発	スピン-フリップ・ラマン・レー ザの開発 エキシマレーザの開発	実時間ホログラフィの実 験 (位相共役波現象)	マトリックス演算法の提 案
1972	光ファイバ中の誘導ブリルアン 散乱の実験			
1973	分布帰還型 (DFB) 半導体レー ザの開発 光ビデオディスクの試作			ハイブリッド型光双安定 デバイスの原案
1974			1次元ホログラム計算機 メモリの検討	
1975				剰余演算光コンピュータ 方式の提案
1976	InGaAs P/In P 半導体レーザ の開発			光双安定性 (イントリン ジック型) の実験
1977	位相共役光学の開発	光混合によるコヒーレント軟X 線の発生 自由電子レーザの実験		tse (字) コンピュータ (光並列デジタル演算) の提案 ハイブリッド型光双安定 デバイスの実験
1978	InGaAs P, InGaAs/In P 光 検出器の開発			2次元光双安定デバイス の実験
1979	半導体レーザからのピコ秒光パ ルスの発生			導波路型光マルチバイ ブレータの実験 導波路型光半加算器の実 験
1980	極低損失石英光ファイバの開発			
1981	半導体レーザからのサブピコ秒 光パルスの発生 プラスチックファイバの低損失 化 (レーザディスク発売)	光双安定性におけるカオス現象 の実験		光双安定半導体レーザ (1次相転移的) の開発 光シストリック演算法の 提案
1982		パルス圧縮によるフェムト秒光 パルスの発生		符号化入力画像による並 列光論理演算法の開発
1983	半導体レーザのアレー化による 高出力化			
1984		軟X線レーザの増幅, 発振		ヨーロッパ連合光双安定 性 (光論理回路) 研究プ ロジェクト開始

理技術へのアプローチである。この方法は1970年代の半ば頃より、上に触れた光並列アナログ演算法を中心とする第1世代的な光情報処理方式の難点である。演算精度や適応性の不足、汎用性の少ない単能型の性格などを解決するために着目されるようになったもので、将来の光コンピュータの基本演算方式に発展するものとして広く注目されている。このような動向は、近年ますます顕著になってきている並列論理演算のための新しいアーキテクチャやアルゴリズムのニーズに源を発しているものであるが、光に強い関心が集まる

ようになったのは、それとほぼ並行して研究開発が進められてきたオプトエレクトロニクス、その中でも特に光ファイバ技術や集積光学 (光 IC) を中核とする光導波エレクトロニクスの進歩と半導体レーザや各種の非線形光学デバイス、画像処理・表示デバイスなどの広汎な実用化に負うところがきわめて大きいといえる。

しかしながら、表-1の右側の2つの欄に並記した光情報処理、または光論理演算にかかわるこれまでの30余年にわたるさまざまな提案や試行、実験などを含む研究、開発は、光コンピュータというアーキテクチ

ゃとかシステムを意識したにせよ、しないにせよ、その具現化のためにはまだかなりの隔りがあるように見受けられ、米国を中心にこれまでしばしば用いられてきた光コンピューティングという用語のカテゴリに含まれるものが大部分と考えられる。この両欄を見れば明らかのように、その内容は多彩であって、単純に区別することはできないが、光コンピューティングから光コンピュータへのアプローチのための演算処理方式としては、1)光並列アナログ処理、2)光時系列デジタル処理、3)光並列デジタル処理の3種類に大局的に分類することが可能である^{16), 22)-24)}。これらの各方式の基本概念や動作設計、構成、特徴、要素技術、

ハードウェアなどに関しては、本特集号の第3.章の3.1~3.5 および2.の2.3~2.5にそれぞれの第一線の専門家の懇切ですぐれた記述や解説があるので、ここではこれ以上立ち入らずに各論に譲ることにしたい。なお、表-1の光コンピューティングの分野に関連した各事項の詳しい内容や時代の経過などについても、関心のある方はすでに発表された総合報告や参考書などを参照していただきたい¹²⁾⁻³¹⁾。

4. オプトエレクトロニクスの応用技術の展望と将来

レーザー発振の成功から四半世紀を経た今日、オプト

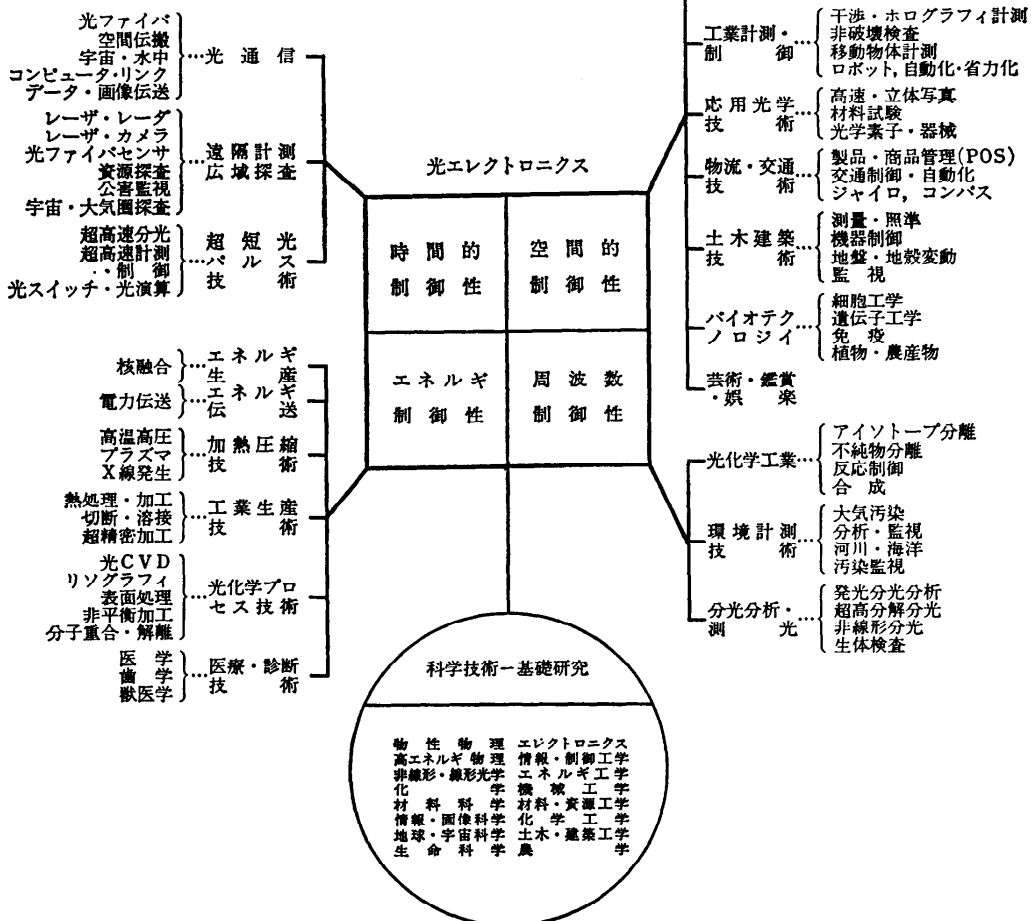


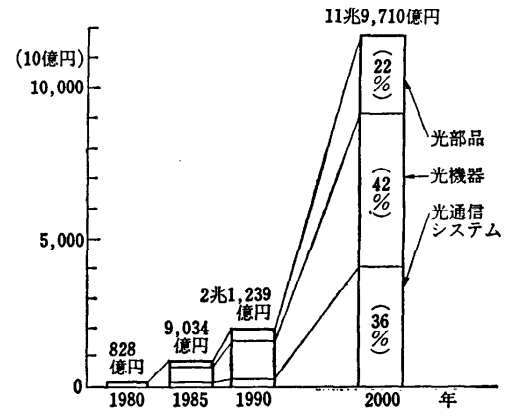
図-3 オプトエレクトロニクスの主要な応用技術と利用分野の展望

エレクトロニクスは数多くの分野で実用化の時代に入りつつある。それらはレーザの備えているコヒーレントな出力光の時間、空間、周波数およびエネルギーの領域におけるすぐれた制御性¹⁾によって本格的に支えられているものであるが、量子エレクトロニクス技術との緊密なフィードバックを通してその間に著しい進展をとげてきた、インコヒーレント光をも包含する各種の発光、受光、光制御・変換、光伝送、光集積回路、画像処理・表示などの技術やデバイス、システムなどに依存するところもきわめて大きい。そして、2.章で説明したようなオプトエレクトロニクスの本質的な概念と性格に基づく広汎な展開によって、その応用技術は物質・材料科学や情報・画像科学、さらにエネルギー科学、生命科学などの諸分野における多種多様な基礎研究との交流を通して、エレクトロニクス、通信、計測、制御、情報処理・記録、応用光学、物性応用、機械、ロボット、材料、加工・処理、燃焼、合成化学、化学工学、エネルギー工学、資源・環境工学、建築、土木、海洋、宇宙から、生物学、農学、薬学、医学、歯学、バイオテクノロジーなどのさまざまな領域で積極的に開発、実用化が進められており、さらに芸術やデザイン、広告、ファッション、娯楽などのジャンルにまで広がりがつつある^{1), 10)~15)}。

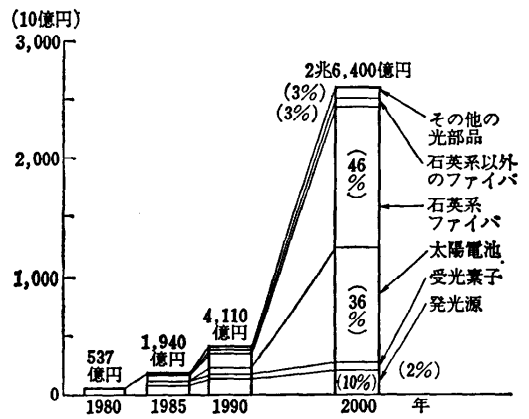
図-3 はこのようなオプトエレクトロニクスの主要な応用技術と利用分野の現状を、関連的に分類して図示したものである。この中にはすでに利用価値が十分認められて実用の座を占め、技術的、産業的に大きなインパクトを与えているものも少なくないが、なお質的にも量的にも研究開発の余地が残されているものもある。この図-3 では、オプトエレクトロニクスの技術全般にとって基幹となる、最も重要な光の4通りの要素である、時間ならびに空間と周波数およびエネルギーに対する制御性の利用という観点から大別してみた。これらは先に触れたようなすぐれたコヒーレント特性から派生するレーザ光の単色性、指向性、干渉性、集光性、偏光性、変調性、パルス性、高輝度性、ゼロエントロピ性、高出力性、可変波長性などの諸特性の要求に応じた制御、調整によって実現されること¹⁾を念頭においたものであるが、自然放出に基づく各種の発光デバイスからのインコヒーレント光についても、これらの4つの要素のそれぞれの可能な範囲内の制御性が実用上の価値を決めていることは明らかであろう。しかし、これらの応用技術はより詳しく検討すれば、いずれもこれらの要素が多かれ少なかれ機能的に関連

しており、上図はその中の主眼とみられる要素の下に区分してみたものである。

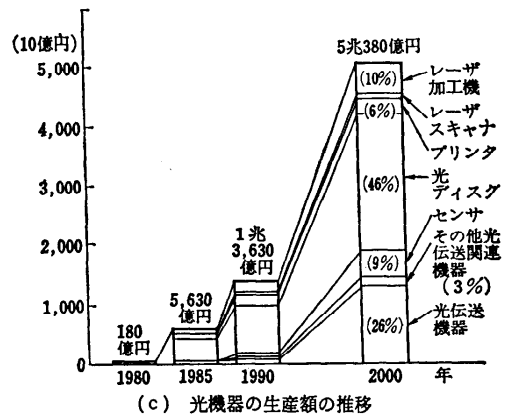
すでに与えられた紙数を超過しているので、ここで



(a) 光産業規模の推移



(b) 光部品の生産額の推移



(c) 光機器の生産額の推移

図-4 日本における光産業の規模と光部品および光機器の生産額の未来予測¹⁶⁾ (カッコ内は構成比)

は図-3 に示した応用技術の進歩の現状や利用分野の具体的な紹介などに立ち入る余裕はないが、この図-3 からいかにオプトエレクトロニクスは間口が広い上に奥行きも深く、基礎科学・技術の研究開発、産業分野をはじめ、情報からエネルギー、資源、環境、医療など、社会・生産活動の全般におよぶことが理解され、これからの高度情報化社会における基幹中枢技術として大きく成長することが予測できるであろう。

したがって、このようなオプトエレクトロニクスを基盤とする光産業の将来にはきわめて強い期待がよせられており、最後に参考のために図-4(a)~(c)に我が国の光産業の規模と光部品および光機器の生産額の今後の推移予測を示しておく³²⁾。これらは光産業技術振興協会が1982年に発表したものであるが、1980年に約800億円(光部品65%、光機器22%、光通信システム13%)であったものが、1990年には2兆円強(光部品19%、光機器64%、光通信システム17%)に達するとみられている。これは現在の原子力産業を上回る規模に相当する。そして、21世紀の冒頭までには約12兆円のオーダにまで急成長すると予測されているが、この数字は1981年の日本の全エレクトロニクス産業の生産規模の総額11兆円強に匹敵するものである。ただし、これらの数値の中には、光ICや光コンピューティング関連の素子、部品、さらに光コンピュータやその周辺装置などが含まれておらず、システムについても光通信以外は考慮されていないので、図-4の推移予測はその下限に近いものとみられるとのことである³²⁾。なお、1978年に発表された米国の光エレクトロニクス関連の市場予測では1990年には約8.3億ドル(2.1兆円)になるとみられていたが、最近ではその13倍近くにまで達すると期待されているようである。

5. む す び

オプトエレクトロニクスはレーザー工学と光ファイバ技術の目ざましい進展を中核として、半導体や新材料、画像などの幅広い技術分野との密接な交流を通じて、情報・通信をはじめとする広汎な産業ならびに社会からの強い要請に応えるために、ますます発展の度合いを深めつつある。そして、質的にも量的にもマイクロエレクトロニクスに比肩できるようなキーテクノロジーに成長し、今後の高度情報化社会を実現するための最先端技術としてきわめて大きな影響力をもつものとの期待が非常に高まっている。それは、オプトエレクトロニクスの中には光の最大の特徴である時間的

高速性と空間的並列性を十二分に活かした、時間と空間にわたる4次元的な制御の可能な、さまざまな独創的なハードウェアやソフトウェアを生み出す夢が含まれているためと見てよいであろう。しかし、そのためには真正面から取り組んで解決し、乗り越えなければならぬ数多くの難問や壁があり、長期にわたる技術革新を持続して、高度な実用化の要望に応えるためには、この分野を中心として広い範囲に及ぶ研究者や技術者の今後の一層の協力とたゆみない努力の上に、柔軟な創造力が必要なことは多言を要しないと思われる。最後に、紙面の制約上本特集号の総論として十分意のつくせなかった部分や説明の不十分な点を心からお詫び申し上げ、詳細は2. 以後の報文に読むことにして結びとする。

参 考 文 献

- 1) 稲場文男: レーザの本質と応用技術の展望, 電子通信学会誌, Vol. 68, No. 4, pp. 328-336 (1985).
- 2) Loebner, E. E.: Opto-Electronic Devices and Networks, Proc. IRE, Vol. 43, No. 12, pp. 1897-1906 (1955).
- 3) 神山雅英: 光エレクトロニクス I, 総論, 電気学会雑誌, Vol. 85, No. 6, pp. 939-944 (1965).
- 4) 稲場文男: レーザとその材料, 量子エレクトロニクス, 電子通信学会東京支部編, 電子通信学会, 東京, 第4章, pp. 82-141 (1964).
- 5) 稲場文男: 短波長レーザーへのアプローチ, レーザー—その科学技術にもたらしたもの—, 日本物理学会編, 丸善, 東京, 第10章, pp. 183-200 (1978).
- 6) Matthews, D. L.: Significant Gain Measurements at 206 and 209Å in Selenium Exploding-Foil Plasma, Tech. Prog. Opt. Soc. Am. 1984 Annual Meeting, p. 64 (Oct. 1984).
- 7) Rosen, M. D. et al.: Exploding-Foil Technique for Achieving a Soft X-Ray Laser, Phys. Rev. Lett., Vol. 54, No. 2, pp. 106-109 (1985).
- 8) Kao, K. C. and Hockham, G. A.: Dielectric-Fiber Surface Waveguides for Optical Frequencies, Proc. IEE (London), Vol. 113, pp. 1151~1158 (1966).
- 9) Kapron, F. P., Keck, D. B. and Maurer, R. D.: Radiation Losses in Glass Optical Waveguides, Appl. Phys. Lett., Vol. 17, No. 10, pp. 423-425 (1970).
- 10) 例えば, 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫: 光ファイバ, オーム社, 東京 (1983).
- 11) Yariv, A.: Introduction to Optical Electronics, Holt, Rinehart and Winston, New York

- (1971); 多田邦雄, 神谷武志訳: 光エレクトロニクスの基礎, 丸善, 東京 (1974).
- 12) 稲場文男 監修: 新版レーザー入門, 電子通信学会, 東京 (1979).
- 13) 後藤顕也: オプトエレクトロニクス入門, オーム社, 東京 (1981).
- 14) 大越孝敬: 光エレクトロニクス, コロナ社, 東京 (1982).
- 15) 末田 正: 光エレクトロニクス, 昭晃堂, 東京 (1985).
- 16) 稲場文男: 光コンピュータへのアプローチ, 東北大学電気通信研究所主催第19回シンポジウム「光コンピュータへのアプローチ」論文集, pp. 1-6 (Mar. 1983).
- 17) 例えば, Stroke, G. W.: Optical Computing, IEEE Spectrum, Vol. 9, No. 12, pp. 24-41 (1972); Kock, W. E.: Optical Computing, An Example of Change, Proc. IEEE, Vol. 65, No. 1, pp. 6-9 (1977) 参照.
- 18) 桜井健二郎, 柏木 寛: 光情報処理, レーザーハンドブック, 稲場文男他編, 朝倉書店, 東京, 10.3, pp. 622-639 (1973).
- 19) 辻内順平, 村田和美編: 光学情報処理, 朝倉書店, 東京 (1974).
- 20) 辻内順平: 光情報処理の歩み, 応用物理, Vol. 51, No. 5, pp. 543-545 (1982).
- 21) 例えば, Reimann, O. A. and Kosonocky, W. F.: Progress in Optical Computer Research, IEEE Spectrum, Vol. 2, No. 3, pp. 181-195 (1965); Basov, N. G., Culver, W. H. and Shah, B.: Applications of Lasers to Computers, Laser Handbook, Eds. F. T. Arecchi and E. O. Schulz-DuBois, Part F 5, North-Holland Amsterdam, pp. 1649-1693 (1972) 参照.
- 22) 一岡芳樹: 光計算機の可能性, 計測と制御, Vol. 22, No. 10, pp. 851-858 (1983).
- 23) 世古淳也: 並列光論理素子, 応用物理, Vol. 53, No. 5, pp. 409-414 (1984).
- 24) 谷田貝豊彦: 光コンピュータ, 光学, Vol. 14, No. 1, pp. 2-10 (1985).
- 25) Cathey, W. T.: Optical Information Processing and Holography, John Wiley and Sons, New York (1974).
- 26) 大越孝敬: ホログラフィ, 電子通信学会, 東京 (1977).
- 27) 桜井健二郎, 森川滝太郎: レーザーによる情報処理, レーザー—その科学技術にもたらしたもの—日本物理学会編, 丸善, 東京, 第16章, pp. 292-313 (1978).
- 28) 石原 聰, 島田潤一, 桜井健二郎: 光コンピュータ, 電子通信学会誌, Vol. 64, No. 1, pp. 89-94 (1981).
- 29) 石原 聰: オプティカルコンピューティング, 応用物理, Vol. 51, No. 5, pp. 570-572 (1982).
- 30) 三橋慶喜: 光情報処理, レーザーハンドブック, レーザー学会編, オーム社, 東京, 第32章, pp. 643-652, (1982).
- 31) Optical Computing 特集号, Proc. IEEE, Vol. 72, No. 7 (1984).
- 32) 光産業技術振興協会編: 光産業の将来ビジョン II, 57-001, 光産業技術振興協会, 東京 (1982).
(昭和60年6月26日受付)