

# 情報フォトニクス：その概念とめざすもの

早 崎 芳 夫

## Information Photonics: Concept and Target

Yoshio HAYASAKI

This review paper describes the concept and the target of Information Photonics toward next generation of photonic information systems. A field of study of Information Photonics includes conventional fields of information optics, optical information processing, and optical computing. Information Photonics intends to develop a new photonic information processing system created by a fusion between photonics technology and other technologies including information technology, optoelectronics, biotechnology, and nanotechnology.

**Key words:** VLSI photonics, life photonics, three-dimensional photonics, optical computer

情報フォトニクスの研究領域を生み出した背景として、半導体技術の急速な進歩による電子情報技術の発展や、社会の高度情報化の発展を支える高速光通信網を実現するフォトニクス技術の進歩、国の科学技術政策や人々の科学技術に対する指向の変化に伴う研究開発トレンドの変化がある。それと同時に、量子コンピューティングや分子コンピューティング等の新規計算原理や、フェムト秒パルス操作技術や微細加工技術、マイクロマシン技術等の新規技術の出現によって、多様な技術を融合した新しい情報処理システムへの期待感が挙げられる。このような現状の中、既存の光コンピューティング、光情報処理、情報光学の領域には収まらない新規な情報フォトニックスシステムや、光を情報のキャリヤーとする新しい応用をめざした情報処理が起ってきたといえ、情報フォトニクスは、フォトニクス技術を核とする多様な技術を結びつけたフォトニックス情報システム構築のために新しく考案された研究領域である。

### 1. 光コンピューティングの発展としての情報フォトニクス

フォトニクスとは、従来の光学（オプティクス）の範囲

より広く、光の発生や、伝送、変調、検出から光源、ファイバー、各種の光部品、光情報機器、関連する電子装置やその利用に至るまで、光に関係したあらゆる範囲を扱う研究・開発の領域を指す言葉である。情報フォトニクスとは、その中の情報の操作（生成・収集・蓄積・伝送・処理・検索・提示）に関連する研究領域を指す言葉であり、「情報を操作する過程の中で光を情報のキャリヤーとしていること」が重要であり、「情報を操作する方法に新規性を見いだす研究領域」である。情報フォトニクスとは、情報に関連したフォトニクス分野の中での広い研究領域を有し、関連する光源、光学素子、光マイクロマシン、イメージセンサー等のフォトニックスデバイスを巧みに適用し、光通信、光記録、光加工、ディスプレイ技術を融合しながら、新しいフォトニックス情報システムを実現するものである。

上記のように、フォトニクス技術を介した横断的な研究領域として情報フォトニクスをとらえることができる同時に、これまでに培われた光コンピューティング分野<sup>1-3)</sup>における発想を具現化するための現実的な発展として、情報フォトニクスをとらえることもできる。図1は、「光」と「情報」に関連する研究領域に対して、その包含関係を示し

たものである。それらは、光の物理的特性を有効に利用することにより、多様な情報に対する処理を高速かつ高効率に実現することを目的とすることにおいては同じである。広く用いられている研究領域の名称として、日本光学会の投稿案内の分類にある「光情報処理」や、応用物理学会の中分類分科名にある「情報光学」がある。両者をあえて区別するなら、光情報処理はシステム指向の研究領域であり、情報光学は学問的色彩を有する研究領域となるが、両者を明確に区別して用いている人は少ない。「光コンピューティング」は、光情報処理や情報光学を含む広い分野をカバーする研究領域を示す名称として、1980年代初めごろから一般に使われるようになった。1990年代後半、光コンピューティングの研究は半導体技術と協調する形でかなりのレベルに達した。しかし、半導体技術の急速な進歩に引きずられる形で研究全体の方向性が揺らぎ、発散したことにより、研究者が当初夢に描いた「光コンピューター」の実現に至っておらず、基盤となる概念や理論の創出を果たせないまままでいる。さらに、多様な思惑の結果、光コンピューターを実現するための技術、または、電子コンピューターを光コンピューターで置き換える技術が、光コンピューティングであるかのように矮小化されてしまった。光コンピューティングのもつ魅力的な響きに取って代わる名称はないといわれているが、時代とともに研究分野が変化していくことは必然である。米国でも、光コンピューティング分野の変化が進んでおり、コロラド大学のK. Wagner氏が、optical computing (OC) から photonic information processing (PIP) に変更するといっていた。このように、情報フォトニクスへの流れは、世界的なものであると考えられる。

しかし、実際の世の中をみると、フォトニックネットワーク<sup>4,5)</sup>や立体ディスプレイ<sup>6,7)</sup>において光コンピューターとよべるようなシステムが存在している。しかし、それらを光コンピューターとはよばない。そこに根ざしているものは、キーワードのトレンドの問題ではなく、研究者のスタンスの問題である。「システムの研究を行うときは、非情でなければならない」「手段を選んではいけない」「本物であるか否かの目利きが重要である」。これらは、2002年3月15日、第96回光コンピューティング研究会、パネルディスカッションでのパネリストの言葉であり、その通りである。光コンピューティング研究に反省があるとするならば、オールオプティカルや完全な並列性といった光への強いこだわりである。超短光パルス操作技術や微細加工技術などの登場により、光を制御できる技術が出揃う中、目的に必要な技術が何かを検討し、吟味する必要がある、その

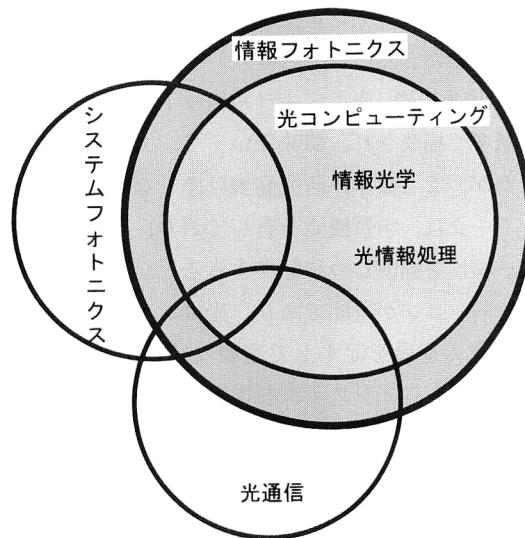


図1 光と情報に関する研究領域の包含関係。

とき、情報フォトニクスは、光分野の研究者に対し、光にとらわれない自由な発想の機会を提供するだろう。ただ、光分野の研究者によって出てくるアイディアが光由来であることは結果として起こりうる。また、図1に示したように、情報フォトニクスに強く関連する研究領域として、「システムフォトニクス」がある。これは、フォトニックデバイスを駆使した、システム構築技術そのものに新規性を有し、新しい機能を有するシステムを実現しようとするものである。情報フォトニクスにおけるシステム指向の研究は、システムフォトニクスであり、システムフォトニクスのめざす研究の方策は重要である。

## 2. 光コンピューティングの研究の進展

情報フォトニクスにおける研究例について議論する前に、光コンピューティングの研究のおもな進展を概観してみる。アナログ光コンピューティングでは、空間光変調素子をはじめとした並列光デバイスを利用してフーリエ光学<sup>8)</sup>に基づく光相関の手法を用いたパターン認識システムの構築と定量的な性能評価がなされ、特に、ジョイントフーリエ光相関システム<sup>8,9)</sup>では、いくつかのシステムが構築され、現状デバイスを利用した光相関システムの限界とデバイスの克服すべき問題点が明らかにされた。光相関システムの光コンピューティング研究への寄与は、指紋<sup>10)</sup>や顔<sup>11)</sup>の認識の研究や暗号化技術との融合の研究において、光コンピューティング技術を情報セキュリティーにリンクさせたことにある<sup>12-15)</sup>。近年、デバイスの着実な進歩やコンピューター画像処理・データ検索の技術との協調により、光相関システムの性能は確実に向している。これに関しては、本号、最近の技術から「光並列顔画像認識装置—垂

直型面発光レーザーアレイモジュールによる小型化一」を参照していただきたい<sup>16)</sup>.

1980年後半以降、光ニューラルネットワークの実証システムが数多く構築され、興味深いデモンストレーションが行われたが、ここ数年、研究発表は多くない。ニューラルネットワークは、学習機能を有しており、デバイスの空間的な非一様性を補償しつつ動作することから、有効なデモンストレーションが可能であり、光コンピューティングのシステム化の進展を促す上で重要な役割を果たすとともに、大規模な並列光システムを構築する上で重要な指針を与えた<sup>17-20)</sup>。近年、ニューラルネットワーク的な並列処理を有する視覚系の信号処理を電子デバイスにより実現したビジョンチップの研究が盛んである。ビジョンチップの研究開発は、ロボット、ディジタルカメラ、光通信、光計測等多様な分野の研究者によって多様な指向をもって進められているため、一概には語れない。その中で、新しい光電子システムの現実的な解として、光コンピューティング技術を取り込んだ撮像デバイスが開発されている。ビジョンチップに関し、詳しくは、本号の解説「ビジョンチップと情報フォトニクス」を参照していただきたい<sup>21)</sup>。

一方、ディジタル光情報処理では、1980年代、並列光計算のアルゴリズムの研究に始まり、1990年代、純光学的な実現から現実的な解である光電子融合システムへと研究の流れが変化し、原理検証の研究からシステム実証の研究に移った<sup>1-3)</sup>。その現実的な解のひとつとして、演算を半導体集積回路で行い、チップ間やボード間の信号伝送を光により接続を行う光インターフェクション<sup>1,22)</sup>に発展した。光インターフェクションを含む光電子融合型の実証システムを構築するためには、スマートピクセル等の光電子集積化デバイスを製作するための高度な半導体設計・製造技術、高密度の光接続を実現するための高精度なパッケージング技術を要するため、それらの技術を併せもついくつかのグループによって、デモンストレーションが行われた。その一例として、本号、最近の技術から「ディジタル・スマートピクセル」を参照していただきたい<sup>23)</sup>。

### 3. 情報フォトニクスの例

情報フォトニクスが、光コンピューティングのひとつの発展として存在し、単純なフォトニクス技術のひとつとしてではなく、多様な研究領域と関連しながら進んでいくことが必要であることを第1章で述べた。そのような開放的な広い研究領域を形成しているがゆえ、過去の光と情報に関連するいくつかの研究領域でそうであったように、情報フォトニクスの解釈が、各人において異なるだけでなく、

歪みや誤解を生じる場合があると予想される。そこで、本章では、情報フォトニクス研究の方向性について、一般的な例を示して考える。なお、記述が、システム指向であること、デバイス指向の観点に欠いていること、すべてを記述することができないこと、十分なコンセンサスを得られているわけではないことなど、不十分な点があることをご容赦いただきたい。

#### 3.1 ビジョンチップ<sup>24-28)</sup>

新しいコンセプトに基づくビジョンチップを設計し製作した。ビジョンチップは、画像情報（並列の光情報）を取得するデバイスであることから情報フォトニクスに不可欠なデバイスであり、用途を絞ったビジョンチップの開発は、いっそう発展すると予想される。そこに、新しい画像取得アルゴリズムを実装<sup>29)</sup>するための画素配置や光学系の工夫により、ビジョンチップに新しい機能を与えることは、半導体技術とフォトニクス技術の融合による情報フォトニクスの典型であると考える。詳しくは、本号解説「ビジョンチップと情報フォトニクス」を参照していただきたい<sup>21)</sup>。

#### 3.2 コンピューター画像処理

コンピューターによる画像処理のうち、カメラで取得された画像情報（光情報）に対する画像処理は、情報フォトニクスにおいて重要なシステム要素である。特に、光学系とイメージセンサーを含む画像情報を取得する撮像系と連携した画像処理ソフトウェアの開発は、情報フォトニクスの典型的な研究例である。情報端末や情報家電など今後の高度情報通信社会の中での情報機器と人間との直接的関わりを考えると、フォトニクス技術と画像処理技術の融合による人間観測技術の開発は重要であると考えられる。本号の最近の技術から「メディカルビジョン一分光画像計測による肌色モニタリングシステム」では、情報フォトニクスの重要な研究項目のひとつである人間計測の一例について解説されている<sup>30)</sup>。

#### 3.3 立体テレビジョン<sup>6,7)</sup>

立体テレビジョンを実現するためには、立体ディスプレイ<sup>31-39)</sup>を中心、立体カメラ<sup>40)</sup>、制御用計算機、高速な情報通信路を必要とする。特に、立体カメラや立体ディスプレイには、三次元情報を取得・表示するためのフォトニクス技術が駆使されている。さらに、その取得した三次元情報を処理し、大容量のデータ伝送された三次元情報を表示するための計算システムの構築は、フォトニクス技術、光電子デバイス技術、ハードウェア技術、ソフトウェア技術の融合を必要とし、情報フォトニクスの重要な研究項目のひとつである。詳しくは、本号解説「三次元情報技術と情

報フォトニクス」を参照していただきたい<sup>41)</sup>.

### 3.4 光干渉計測技術

物体の表面形状や内部構造、屈折率、分光特性等を測定するための光干渉計測技術は情報を取り得する技術として情報フォトニクスの中で必要不可欠である。現状の光干渉計測システムは、干渉系とコンピューター、そして、縞解析のためのソフトウェアで構成される。また、光源や検出器の性能向上は、計測システムの性能に直接的に影響する。このように、高性能なデバイスを駆使して、物体の物理的情報を取り得し、それを処理し可視化する。この研究の主体が計測にある限り、多くの人は、情報フォトニクスとよばないと思われる。しかし、計測した（例えば、物体の形状情報）情報を処理して別のシステム（例えば、加工システム）に伝送し、その情報をもとに何らかの処理をする（例えば、物体を加工する）。すなわち、計測した情報を他のシステムで利用する。また、ビットやバーコードなど、計測された物理量に人工的な情報が与えられている。このような研究の場合、情報フォトニクスの研究であると考えられる。

### 3.5 フェムト秒光加工技術

フェムト秒光加工技術を用いて、ビットオリエンティッドな光メモリー<sup>42-47)</sup>を実現する研究は、光加工技術の情報フォトニクスへの応用の好例である。特に、三次元光メモリーの研究は、次世代の光メモリーとして有用な技術であり、並列記録や並列再生など、多くのフォトニクス技術の融合により実現されると考えられる。

### 3.6 生体と情報フォトニクス

顕微鏡を中心とした計測技術や、分光計測や蛍光計測などの各種の物性計測、光を用いた無侵襲計測等、フォトニクス技術は、人間を含む生体と整合性が高いことは周知の事実である。これは、光が、生体と情報を交換することに適した媒体であることを意味する。DNAチップの読み出しに蛍光が使われていることも、そのわかりやすい例のひとつである。近年では、生体や生命に関連する情報フォトニクス関連の研究も少しずつではあるが増えてきた。光によるエネルギー供給と光通信を可能とする体内埋め込み型機器の研究<sup>48)</sup>や空間コード化とモアレ技術を用いたDNA塩基配列マッチングの研究<sup>49,50)</sup>、生体への光記録の研究<sup>51)</sup>、光と分子との協調したコンピューティングの研究<sup>52)</sup>などである。

### 3.7 異種システム間の光による接続

光メモリーや光通信の基本原理である光接続は、ボード間やチップ間の接続までに至っている。光を情報のキャリアとしてデバイス間やシステム間の情報の通信を行う場

合、光は自由空間中を長距離かつ選択的に接続できるため、熱や化学物質、電子とは一線を画すシステムを構築できる。新しい情報フォトニクスの研究の方向として、光を用いた材料システムと電子システム、生命システムと計算機システム、ナノメートルスケールシステムとミリメートルスケールシステムのように、異種システム間の情報の通信を行う研究が重要となる。

上記のようにいくつかの例を通して、情報フォトニクスの研究の方向性を考えた。近年、微細加工技術の進歩による可視光の波長以下のナノメートルオーダーの構造を有する高効率な光学素子、フォトニクス技術とマイクロマシン技術を融合した光マイクロマシン<sup>53-55)</sup>、フォトニック結晶による超小型光集積回路<sup>56-58)</sup>等の実用性の高いデバイスが出現している。また、超高速光技術を用いた時間と空間、信号領域とスペクトル領域が自由に入れ替わった多次元空間の情報処理により、電子技術では実現できない超高速の信号処理を可能とする時空間フォトニック情報処理<sup>59)</sup>や、ナノフォトニクスにおける近接場光を用いたナノメートルオーダーの空間での光伝送や光スイッチからなるナノ光回路<sup>60)</sup>、光子を用いた量子情報処理<sup>61-64)</sup>のように、光を情報のキャリアとする新しいフォトニック情報処理のコアとなりうる方式が出現している。

情報フォトニクスとは、半導体技術、ソフトウェア技術、バイオ技術、情報技術、微細加工技術を含むあらゆる技術の中のひとつもしくは複数の技術とフォトニクス技術を用いて情報の収集・蓄積・伝送・処理・検索・提示を行う広い研究領域を指す言葉である。情報フォトニクスにおいて、その情報を操作する方法にこそ新規性を見いだしていくことが重要である。情報フォトニクスでは、フォトニクス技術を核として、多様な技術の助けを借りながら、光を情報のキャリアとする新しいフォトニック情報システムの開発を目的としている。最後に、現時点で、情報フォトニクスの概念形成は十分でなく、本稿により、その議論が高まることを期待する。

## 文 献

- 1) 谷田 純：“光コンピューティングの展望”，光学，28 (1999) 2-6.
- 2) 谷田 純：“光情報処理”，光学，31 (2002) 239-241.
- 3) 稲場文男、一岡芳樹編：光コンピューティングの辞典（朝倉書店, 1997).
- 4) 北山研一：“フォトニックネットワーク—全光化へ向けて—”，光学，32 (2003) 2-9.
- 5) 北山研一：“総論—21世紀ネットワークの創造と限りないインパクト—”，電子情報通信学会誌，85 (2002) 298-305.

- 6) 岡野文男：“立体映像技術の現状と将来”，光学，**31** (2002) 140-147.
- 7) 本田捷夫：“3次元ディスプレイ技術総説”，レーザー研究，**30** (2002) 702-707.
- 8) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed. (McGraw-Hill, New York, 1968).
- 9) C. S. Weaver and J. W. Goodman: “A technique for optically convolving two functions,” Appl. Opt., **5** (1966) 1248-1259.
- 10) Y. Kobayashi, H. Toyoda, N. Mukohzaka, N. Yoshida and T. Hara: “Fingerprint identification by an optical joint transform correlation system,” Opt. Rev., **3** (1996) 403-405.
- 11) K. Kodate, A. Hashimoto and R. Thapliya: “Binary zone-plate array for a parallel joint transform correlator applied to face recognition,” Appl. Opt., **38** (1999) 3060-3067.
- 12) B. Javidi and J. L. Horner: “Optical pattern recognition for validation and security verification,” Opt. Eng., **33** (1994) 1752-1756.
- 13) P. Refregier and B. Javidi: “Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding,” Opt. Lett., **20** (1995) 767-769.
- 14) O. Matoba and B. Javidi: “Encrypted optical memory system using three-dimensional keys in the Fresnel domain,” Opt. Lett., **24** (1999) 762-764.
- 15) T. Nomura and B. Javidi: “Optical encryption system using a binary key code,” Appl. Opt., **39** (2000) 4783-4787.
- 16) 渡邊恵理子, 小館香椎子：“光並列顔画像認識装置—垂直型面発光レーザーアレイモジュールによる小型化—”，光学，**32** (2003) 437-439.
- 17) M. Ishikawa, N. Mukohzaka, H. Toyoda and Y. Suzuki: “Optical associatron—A simple model for optical associative memory—,” Appl. Opt., **28** (1989) 291-301.
- 18) J. Ohta, Y. Nitta and K. Kyuma: “Dynamic optical neurochip using variable-sensitivity photodiodes,” Opt. Lett., **16** (1991) 744-746.
- 19) Y. Hayasaki, I. Tohyama, T. Yatagai, M. Mori and S. Ishihara: “Optical learning neural network using selfoc microlens array,” Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 1689-1693.
- 20) C. Garvin and K. Wagner: “Real-time signal classification using an acousto-optic triple product processor cascaded into a volume holographic classifier,” Appl. Opt., **35** (1996) 3937-3944.
- 21) 太田 淳：“ビジョンチップと情報フォトニクス”，光学，**32** (2003) 416-423.
- 22) 小柳光正：“光インターフェクションと集積回路”，光学，**28** (1999) 7-14.
- 23) 武内喜則, 川合英雄, 若林信一：“デジタル・スマートピクセル”，光学，**32** (2003) 431-433.
- 24) 小室 孝, 並木明夫, 石川正俊：“多機能な目”，映像情報メディア学会誌, **56** (2002) 356-359.
- 25) H. Kawai, A. Baba, M. Shibata, Y. Takeuchi, T. Komuro, H. Fujimura and M. Ishikawa: “High-speed image processing on digital smart pixel array,” Electron. Lett., **3** (2002) 590-591.
- 26) 米津宏雄：“ビジョンチップ—生体の視覚機能に学ぶ—”，光学，**31** (2002) 699-707.
- 27) J. Ohta, N. Yoshida, T. Furumiya, K. Kagawa and M. Nunoshita: “An image sensor based on pulse frequency modulation for retinal prosthesis,” Proc. SPIE, **4669** (2002) 37-42.
- 28) K. Kyuma, E. Lange, J. Ohta, A. Hermanns, B. Banish and M. Oita: “Artificial retinas—Fast versatile image processors,” Nature, **372** (1994) 197-198.
- 29) I. Ishii and M. Ishikawa: “Self windowing for high-speed vision,” Syst. Comput. Jpn., **32** (2001) 51-58.
- 30) 津村徳道, 奥山真寛, 横山直広, 三宅洋一：“メディカルビジョン一分光画像計測による肌色モニタリングシステム”，光学，**32** (2003) 434-436.
- 31) E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston and R. Macfarlane: “A three-color, solid-state three-dimensional display,” Science, **273** (1996) 1185-1189.
- 32) A. R. L. Travis: “Autostereoscopic 3-D display,” Appl. Opt., **29** (1990) 4341-4343.
- 33) N. A. Dodgson: “Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display,” Appl. Opt., **35** (1996) 1705-1710.
- 34) S. A. Benton, T. E. Slowe, A. B. Kropp and S. L. Smith: “Micropolarizer-based multiple-viewer autostereoscopic display,” Proc. SPIE, **3639** (1999) 76-83.
- 35) D. Miyazaki and K. Matsushita: “Volume-scanning three-dimensional display that uses an inclined image plane,” Appl. Opt., **40** (2001) 3354-3358.
- 36) H. Yamamoto, M. Kouno, S. Muguruma, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu and N. Nishida: “Enlargement of viewing area of stereoscopic full-color LED display by use of a parallax barrier,” Appl. Opt., **41** (2002) 6907-6919.
- 37) H. Hoshino, F. Okano, H. Isono and I. Yuyama: “Analysis of resolution limitation of integral photography,” J. Opt. Soc. Am. A, **15** (1998) 2059-2065.
- 38) J. Jang and B. Javidi: “Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics,” Opt. Lett., **27** (2002) 324-326.
- 39) 泉 武博監修, NHK放送技術研究所編：3次元映像の基礎(オーム社, 1995) pp. 73-92.
- 40) M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai and K. Takizawa: “Axi-vision camera (real-time distance-mapping camera),” Appl. Opt., **39** (2000) 3931-3939.
- 41) 宮崎大介：“三次元情報技術と情報フォトニクス”，光学，**32** (2003) 424-430.
- 42) D. A. Parthenopoulos and P. M. Rentzepis: “Three-dimensional optical storage memory,” Science, **245** (1989) 843-845.
- 43) E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R. J. Finlay, T.-H. Her, J. P. Callan and E. Mazur: “Three-dimensional optical storage inside transparent materials,” Opt. Lett., **21** (1996) 2023-2025.
- 44) Y. Kawata, H. Ishitobi and S. Kawata: “Use of two-photon absorption in a photorefractive crystal for three-dimensional optical memory,” Opt. Lett., **23** (1998) 756-758.
- 45) H. E. Pudavar, M. P. Joshi, P. N. Prasad and B. A. Reinhardt: “High-density three-dimensional optical data storage in a stacked compact disk format with two-photon writing and single photon readout,” Appl. Phys. Lett., **74** (1999) 1338-1340.
- 46) M. Watanabe, H.-B. Sun, S. Juodkazis, T. Takahashi, S. Matsuo, Y. Suzuki, I. Nishii and H. Misawa: “Three-dimensional optical data storage in vitreous silica,” Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) 1527-1530.
- 47) K. Yamasaki, S. Juodkazis, M. Watanabe, H.-B. Sun, S.

- Matsuo and H. Misawa: "Recording by microexplosion and two-photon reading of three-dimensional optical memory in polymethylmethacrylate films," *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 1000-1002.
- 48) K. Goto, T. Nakagawa, O. Nakamura and S. Kawata: "Near-infrared light transcutaneous telemetry system having an implantable transmitter driven by external laser irradiation," *Rev. Sci. Instrum.*, **72** (2001) 3079-3085.
- 49) J. Tanida: "String data alignment by a spatial coding and moire technique," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1681-1683.
- 50) K. Niita, H. Togo and J. Tanida: "Matching information terminal based on spatially coded moire technique," *Opt. Eng.*, **40** (2001) 2386-2391.
- 51) A. Takita, M. Watanabe, H. Yamamoto, S. Matsuo, H. Misawa, Y. Hayasaki and N. Nishida: "Recording of micro-dots in human nail for data storage," *Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine*, Sapporo (2002) pp. 256-257.
- 52) 小倉裕介, 白井伸弘, 谷田 純: "VCSEL アレイ光トラップによる物体操作と情報処理への応用の検討", レーザー学会学術講演会第 22 回年次大会講演予稿集 (2001) p. 208.
- 53) 藤田博之: "光 MEMS の通信用デバイス応用", 電子情報通信学会誌, **85** (2002) 496-503.
- 54) 特集 "最近の MEMS", *O plus E*, **23** (2001) 187-227.
- 55) 小野崇人, 江刺正喜: "MEMS から NEMS へ", *応用物理*, **71** (2002) 982-988.
- 56) 特集 "フォトニック結晶", *O plus E*, **25** (2003) 146-203.
- 57) 野田 進: "フォトニック結晶", *電子情報通信学会誌*, **85** (2002) 839-846.
- 58) 井上久遠: "フォトニック結晶による光制御の最新技術", *光学*, **31** (2002) 410-415.
- 59) Y. Fainman, K. Kitayama and T. W. Mossberg (eds.): "Innovative physical approaches to the temporal or spectral control of optical signals," *J. Opt. Soc. Am. B*, **19** No. 11 (2002) 2740-2823.
- 60) 大津元一: "ナノフォトニクスとナノ集積光デバイス", *O plus E*, **24** (2002) 28-33.
- 61) 山本善久: "量子情報システムのための単一光子", *応用物理*, **72** (2003) 146-156.
- 62) 南部芳弘: "光量子暗号システム", *電子情報通信学会誌*, **85** (2002) 606-612.
- 63) 竹内繁樹: "量子コンピューター研究の近況レポート", *応用物理*, **72** (2001) 1367-1371.
- 64) 富田章久: "光による量子ゲートの実現について", *Computer Today*, No. 105 (2001) 17-23.

(2003 年 2 月 21 日受理)