

# 光コンピューティングの現状と将来

谷田 純

光コンピューティングは、光の物理的性質の大容量情報処理への応用をめざした光学的演算技術と定義される。狭義には、光を利用した数値演算、例えば、四則演算や行列演算などをさす。また、広義には、光学技術応用による情報処理全般を意味する。特に、日本では後者の意味として用いられることが多く、光情報処理との区別が曖昧である。

光コンピューティングは、並列性や高速性など光が有する物理的特性の有効利用により、既存のエレクトロニクス技術をはるかに凌ぐ高性能情報処理システムの開発を目標として始められた。しかし、エレクトロニクスの急速な発展は光コンピューティング研究開始当初の状況を一変させた。エレクトロニクスに対する光の優位性は絶対的なものでなくなった。むしろ、実装性、既存技術との整合性などの点で光コンピューティング技術の導入は現時点では現実的でない。このような状況のもと、光コンピューティング研究の意義が見直され、従来とは異なった形での展開がみられる。

本稿では、光コンピューティング分野における研究動向を整理し、重要技術と注目分野について解説する。また、将来に向けての検討課題についてもまとめる。

## 1. 光コンピューティング研究の動向

### 1.1 デジタル光コンピューティングへの移行

光コンピューティング研究における特筆すべき動きとして、デジタル光コンピューティングへの研究重心の移行があげられる。従来の光コンピューティング研究では演算技術の開発が主体であったが、エレクトロニクスが実現す

る演算能力を考えると全光方式による演算システムは非現実的である。そこで、スマートピクセル技術に基づいたデジタル光コンピューティングが注目されるに至っている。

デジタル光コンピューティングへの研究資源の投資により、システム開発のための基盤技術が整いつつある。垂直共振器型面発光レーザー (VCSEL)、空間光変調素子などの光エレクトロニクスデバイスをはじめ、半導体プロセス技術を応用した微小光学素子製造技術<sup>1)</sup>が精力的に研究されている。また、光エレクトロニクスデバイスとの融合を前提とした半導体集積回路技術へのアクセスが可能になり、かなりの自由度でカスタムデバイスの設計・開発が行える。

### 1.2 スマートピクセル応用システム

現在考えられているデジタル光コンピューティングシステムの標準形態は、光エレクトロニクスデバイスとCMOSとを融合したスマートピクセルを、微小光学素子による自由空間光インターコネクション技術を用いて、マイクロベンチ上にコンパクト実装するものである。図1にその概念図を示す。洗練された実装技術により、コンパクトかつ安定なシステムの構築をめざしている。

### 1.3 素子標準化の動き

光コンピューティング用デバイスが複数の供給元から入手可能になると、ユーザーの立場からは素子仕様の標準化が望まれる。標準化問題は、ベル研を中心とした米国の研究者からはすでに提唱されていたが、市場主導で緩やかに進んでいる。例えば、VCSELでは、素子間隔125 $\mu\text{m}$ を基準として、その2倍、あるいは、2分の1の素子が事実上の標準となりつつある。光コンピューティングシステムの開発では、複数のコンポーネントの組み合わせが必要であり、資源の共有や効率的な研究開発にとって不可欠な動き

大阪大学大学院工学研究科物質・生命工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: tanida@mls.eng.osaka-u.ac.jp

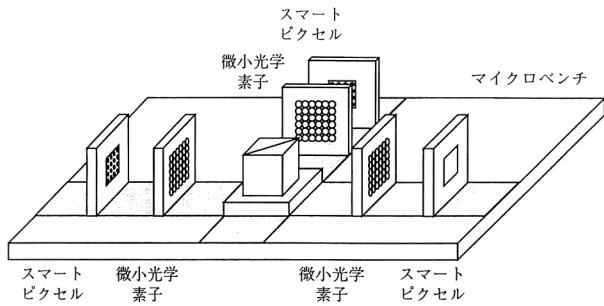


図1 スマートピクセル応用システム。

である。

#### 1.4 応用指向研究の増加

光コンピューティングに限らず、最近では、応用指向の研究が重要視されている。残念ながら、現状の光コンピューティング技術では、光技術を適材適所的に利用しなければ、総合力にまさるエレクトロニクスに対抗できない。例えば、チップ間より長いレベルの信号接続、波長多重伝送、高周波信号の高密度接続などが、光の優位性を発揮できる応用であり、これらを対象とした研究が増加している<sup>2)</sup>。

なお、光技術の適用範囲の拡大により、光コンピューティングという用語は必ずしも適切でなくなってきた。そこで、本分野の国際会議の名称も昨年度より optical computing から optics in computing に変更されている。ただし、略称は従来どおりの OC である。

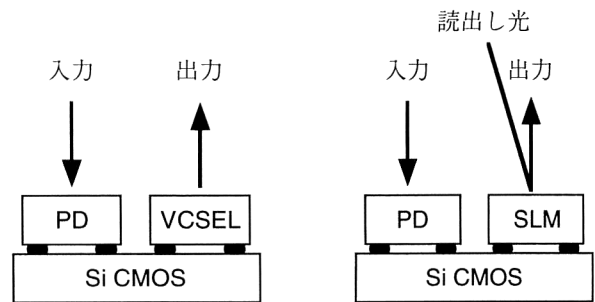
#### 1.5 欧米と第三世界との乖離

スマートピクセル技術に基づくデジタル光コンピューティング研究の進展は、欧米とその他の国との研究レベルの差を顕著にした。技術力のみならず、各研究者の認識、研究者間のコンセンサスなどを含めた意味で、欧米と第三世界との乖離がみられる。残念ながら、わが国でも、一部を除き、新しい光コンピューティング研究の流れに乗った研究を行っている機関は少ない。

#### 1.6 研究体制の充実

光コンピューティングのように総合的な技術が要求される研究分野では、1つの研究機関ですべてをカバーすることは不可能に近い。そこで、欧米では複数の研究グループが、大学、企業を巻き込んだ共同研究体制をもち、それらが効果的に機能している。また、ベル研究所などは量子閉じ込めシュタルク効果に基づく光変調素子である SEED デバイス<sup>3)</sup>の普及を図るべくワークショップを開催し、カスタムデバイスの製造を行っている。さらに、半導体集積回路デバイスについても MOSIS などのマルチプロジェクト方式のチップ試作体制により、大学研究者レベルでもカスタム設計・製造が可能である<sup>4)</sup>。

大規模プロジェクトとしては、米国国防省の支援による



VCSEL集積型

光変調器集積型

図2 スマートピクセル。PD：光検出器、VCSEL：垂直共振器型面発光レーザー、SLM：光変調器、Si CMOS：金属酸化膜シリコン半導体集積回路。

複数の自由空間光インターコネクションプログラム<sup>5,6)</sup>、欧州連合による MEL-ARI Opto プログラム<sup>7)</sup>などがあげられる。日本においては、通産省による「新情報技術開発」(通称リアルワールドコンピューティング)が光インターコネクション研究を支援している<sup>8)</sup>。

## 2. 重要技術と注目分野

### 2.1 スマートピクセル

スマートピクセルは、入出力用光エレクトロニクスデバイスと半導体集積回路を組み合わせた複合素子の総称である。光入力に多重量子井戸構造光検出器を、光出力に VCSEL あるいは光変調素子を、演算回路に CMOS テクノロジーをそれぞれ利用する形態が有望視されている。図2にデバイスの概念図を示す。光出力デバイスとしては、光学系構成、波長許容性の点で VCSEL 集積型がすぐれ、設計自由度、実装密度では光変調器集積型が有利である<sup>9)</sup>。

CMOS 集積回路の問題点として、集積度が上がり最小線幅が細くなるほど、配線による信号遅延が顕著になる。この問題を回避し、かつ、回路の大規模化による配線自由度の相対的な減少を補償する技術として、スマートピクセルを応用した光電子融合技術が有効である<sup>10)</sup>。

スマートピクセルは、半導体集積回路技術の上に成り立っており、デバイス設計から製造までの一貫した技術や資源を利用できる。ここでは、光対エレクトロニクスという構図は存在せず、エレクトロニクス技術の進展をそのままシステム性能の向上に結びつけることができる。スマートピクセルに搭載される集積回路も大規模化しており、通信調停回路<sup>11)</sup>やマイクロプロセッサコア<sup>12)</sup>などの適用が報告されている。

### 2.2 微小光学素子

電子ビーム描画およびエッチング技術により、微小光学素子や計算機プログラムを作製することができる<sup>1)</sup>。この

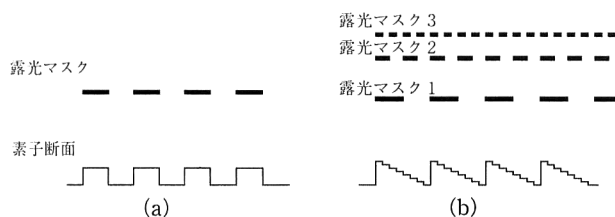


図3 微小光学素子。(a) 二値描画素子、(b) 多階調素子。

技術の歴史は比較的古いですが、デジタル光コンピューティング研究の進展によって、実用技術としての重要性が増している。図3に示すように、従来はバイナリー光学素子と呼ばれる、二値描画素子、あるいは、その作製手順の繰り返しによる多階調素子が主流であった。描画パターンが多階調化により、回折格子のブレード化が行え、回折効率を高めることができるが、マスク合わせ精度や工程数の増加などが問題となる。そこで、露光ビームの強度変調による連続階調パターンの直接描画が注目されている<sup>13)</sup>。

描画技術に基づく微小光学素子は、回折現象を利用するため、入射光の波長変動による焦点移動、回折角変動などの欠点をもつ。そこで、複数の回折光学素子の組み合わせで波長変動を補償する方法<sup>14)</sup>、 $2\pi$ 以上の位相変調により波長依存性を軽減する方法<sup>15)</sup>などが提案されている。その他、熱処理や化学処理による屈折光学素子作製法なども研究されている<sup>1)</sup>。

### 2.3 自由空間光インターコネクション

スマートピクセルに代表される光コンピューティング用デバイスは平面上に複数のセルが並列した構造をもつ。各セル間を任意に接続し、かつ、信号を並列伝送できる形態として、自由空間光インターコネクション技術が注目されている。この方式は、光学素子の分解能に相当する接続密度をもち、3次元空間利用による高い配線自由度を特徴とする。さらに、光学素子の特性を動的に変化させれば、再構成可能なインターコネクションを実現できる。複屈折材料上に作製した回折光学素子の組み合わせによる偏波面制御可変インターコネクション<sup>16)</sup>などが報告されている。

### 2.4 デバイス実装技術

光コンピューティングシステムでは、スマートピクセル

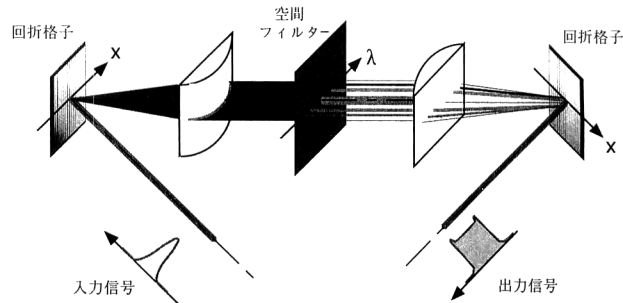


図4 時空間情報処理技術。

や微小光学素子をいかに正確に配置し、安定した動作を保障するかが大きな問題となる。システムにより条件は変化するが、位置精度数 $\mu\text{m}$ 以下、光源波長変動・温度変化に対する安定性、機械的外乱に対する強度などが要求される。ガラス基板内の光波伝搬を利用したプレーナ光学系<sup>17)</sup>、V字溝に円筒型光学ホルダーを磁石で固定するスロットベースプレート<sup>18)</sup>、6U VMEシャーシへの直接実装<sup>19)</sup>、GRINレンズによるデバイス直接接続<sup>20)</sup>、光硬化性樹脂を利用した自導アライメント技術<sup>21)</sup>などが提案されている。

### 2.5 実証システム

最近の光コンピューティング研究の特徴は、実証システムの開発までを含めた形で行われている点にある。表1に開発システム例をまとめる<sup>7,18-20,22,23)</sup>。性能的には必ずしもエレクトロニクス技術を凌駕するものではないが、最終的なシステム形態にまで組み上げることの意義は大きい。技術としての成熟が、光コンピューティング分野の新しい展開につながる。実際、実証システムを提示して、はじめて国際的に評価されるという状況になりつつある。

### 2.6 時空間情報処理

デジタル光コンピューティング以外の分野では、時空間情報処理<sup>24)</sup>が注目されている。時空間情報処理は、図4に示すように、回折格子により時間信号と空間信号を相互に変換し、パルス整形、多次元情報伝送などを実現する技術である。時空間情報処理の考え方は以前から提案されているが、半値幅数フェムト秒という超短光パルス光源の普及により、実証システムの構成が可能になり、一気に研究が加速した。時空間情報処理技術の特徴は、既存のエレクトロニクスでは達成できない超高速信号制御能力にある。

表1 実証システムの開発例。

システム名	開発機関	実装技術	並列度	動作速度
光バックプレーン <sup>19)</sup>	マギル大学 (カナダ)	6U VME シャーシ	4×8	—
ソーティングシステム <sup>18)</sup>	ヘリオットワット大学 (英国)	スロットベースプレート	32×32	50 Mbit/s
クロスパススイッチ <sup>7)</sup>	ヘリオットワット大学 (英国)	スロットベースプレート	32×32	—
パイプラインプロセッサ <sup>20)</sup>	東京大学 (日本)	GRIN レンズ	8×8	—
ATM スイッチ <sup>22)</sup>	NTT (日本)	ブックシェルフ配列プリント基板	2×2	1.25 Gbit/s
プロセッサネットワーク <sup>23)</sup>	日本電気 (日本)	スロットレール	4×4×(4波長)	1 Gbit/s

さらに、時系列信号処理ベースのエレクトロニクス技術と、並列処理指向の光コンピューティング技術を結びつけるインターフェース技術としての利用も期待される。

### 3. 検討課題

#### 3.1 技術的課題

デジタルシステムに特化されたとはいえ、光コンピューティング技術には課題が山積している。自由空間光学系の光伝送効率と受光素子の光電変換効率は、直接的にシステムの動作速度に影響するが、現状では不十分な性能しか得られていない。しかも、ほとんどのシステムは1対1結像に基づいているが、自由空間光インターコネクションの優位性は、大ファンイン・ファンアウト系で発揮される<sup>25)</sup>。その実現には、伝送効率・変換効率のいっそうの向上が必要となり、微小光学素子の高効率化、高感度・高速な受光素子の開発が待たれる。

光コンピューティング用デバイスの並列度が高くなると、素子の均一性が問題になり、セルの微小化に伴うダイナミックレンジの減少も考慮しなければならない。光ニューラルネットワークにより素子の不均一性の影響を軽減し、エレクトロニクスによる前処理でダイナミックレンジを圧縮する手法<sup>26)</sup>は、この問題に対するひとつの解決法を与える。

実装・アライメント技術は未成熟であり、集中的な研究が必要である。光コンピューティング技術に適合した実用的な応用が示されていない点も大きな問題である。エレクトロニクス技術だけでは達成し得ない性能を発揮できる応用システムの開発が待たれる。

#### 3.2 わが国の取り組み

研究のルーツからみれば、現在のデジタル光コンピューティング研究は、Goodmanらが提唱した光インターコネクション技術<sup>27)</sup>の流れに沿ったものである。それに対して、わが国における光コンピューティング研究は、光の物理的特性の情報処理技術への有効利用を主眼においてきた。その結果、現在の欧米の動きに追従できていないのが現状である。

さらに問題なのは、光コンピューティングは過去のテーマであるとする誤った認識により、新しい光コンピューティング研究への移行が必ずしも円滑でない点である。欧米では、充実した研究支援体制のもと、活発に研究が進められている。D. A. B. Millerは、OC '98の総評として、同分野がhealthyであると述べたが、研究の質と量、テーマのバランス、進展状況などまさにそのとおりである。幸い、わが国においても、日米合同オプトエレクトロニクスプロ

ジェクト (JOP)<sup>28)</sup> や大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC)<sup>29)</sup> など、光コンピューティングシステム開発に利用可能な環境が整いつつある。日本光学会所属の光コンピューティング研究グループも若返りを果たし、新たな方向を探っている。この機を逃さずに、研究の方向づけ、研究体制の整備、研究者間の意思統一など、真剣な議論が必要であろう。

光コンピューティング研究は新たな段階に入っている。さまざまな技術や道具が利用でき、アイデアが具現化できる状況にある。国際的な流れを見誤ることなく、正しい対応ができれば、非常に実りの多い研究分野となる。拙稿が、光コンピューティング再認識の一助となれば幸いである。

### 文 献

- 1) M. Kufner and S. Kufner: *Micro-optics and Lithography* (VUB Press, Brussels, 1997).
- 2) 行松健一: 光スイッチングと光インターコネクション (共立出版, 1998).
- 3) H. S. Hinton, T. J. Cloonan, F. B. McCormick, Jr., A. L. Lentine and F. A. P. Tooley: "Free-space digital optical systems," *Proc. IEEE*, **82** (1994) 1632-1649.
- 4) MOSISのホームページ: <http://www.mosis.org>.
- 5) S. Esener and P. Marchand: "3D optoelectronic stacked processors: design and analysis," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 541-545.
- 6) M. W. Haney, M. P. Christensen, P. Milojkovic, J. Ekman, P. Chandramani, R. Rozier, F. Kiamilev, Y. Liu, M. Hibbs-Brenner, J. Nohava, E. Kalweit, S. Bounnak, T. Marta and B. Walterson: "Fast-net optical interconnection prototype demonstration," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 568-571.
- 7) A. C. Walker: "A crossbar switch based on smart-pixel optoelectronic connections," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 532-535.
- 8) S. Nishimura, H. Inoue, H. Matsuoka and T. Yokota: "Synchronized parallel optical interconnection for the massively parallel computer RWC-1," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 536-540.
- 9) T. Nakahara, S. Matsuo, S. Fukushima and T. Kurokawa: "Performance comparison between multiple-quantum-well modulator-based and vertical-cavity-surface-emitting laser-based smart pixels," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 860-871.
- 10) G. I. Yayla, P. J. Marchand and S. C. Esener: "Speed and energy analysis of digital interconnections: comparison of on-chip, off-chip, and free-space technologies," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 205-227.
- 11) T. M. Pinkston, M. Raksapatcharawong and Y. Choi: "Warrp II: An optoelectronic fully adaptive network router chip," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 311-315.
- 12) F. E. Kiamilev: "CMOS DSP and microprocessor cores using optoelectronic VLSI," *Optics in Computing '98*, Proc.

- SPIE, **3490** (1998) 320-324.
- 13) M. T. Gale: "Direct writing of continuous-relief micro-optics," *Micro-Optics, Elements, Systems and Applications*, ed. H. P. Herzig (Taylor & Francis, London, 1997) pp. 87-126.
  - 14) Y. Arieli, S. Ozeri, N. Eisenberg and S. Noach: "Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 823-824.
  - 15) S. Sinzinger and M. Testorf: "Transition between diffractive and refractive micro-optical components," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 5970-5976.
  - 16) K. Panajotov, N. Nieuborg, A. Goulet, I. Veretennicoff and H. Thienpont: "A free-space reconfigurable optical interconnection based on polarization-switching VCSEL's and polarization-selective diffractive optical elements," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 151-154.
  - 17) S. Sinzinger: "Planar optics as the technological platform for optical interconnects," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 40-43.
  - 18) A. C. Walker, T. -Y. Yang, J. Gourlay, J. A. B. Dines, M. G. Forbes, S. M. Prince, D. A. Baillie, D. T. Neilson, R. Williams, L. C. Wilkinson, G. R. Smith, M. P. Y. Desmulliez, G. S. Buller, M. R. Taghizadeh, A. Waddie, I. Underwood, C. R. Stanley, F. Pottier, B. Vogele and W. Sibbett: "Optoelectronic systems based on InGaAs-complementary-metal-oxide-semiconductor smart-pixel arrays and free-space optical interconnects," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2822-2830.
  - 19) Y. Liu, B. Robertson, G. C. Boisset, M. H. Ayliffe, R. Iyer and D. V. Plant: "Design, implementation, and characterization of a hybrid optical interconnect for a four-stage free-space optical backplane demonstrator," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2895-2914.
  - 20) N. McArdle, M. Naruse, A. Okuto and M. Ishikawa: "Design of a pipelined optoelectronic processor," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 302-305.
  - 21) D. Miyazaki, S. Masuda and K. Matsushita: "Self-alignment with optical microconnectors for free-space optical interconnections," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 228-232.
  - 22) K. Hirabayashi, T. Yamamoto, S. Matsuo and S. Hino: "Board-to-board free-space optical interconnections passing through boards for a bookshelf-assembled terabit-per-second-class ATM switch," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2985-2995.
  - 23) M. Kajita, K. Kasahara, T. J. Kim, D. T. Neilson, I. Ogura, I. Redmond and E. Schenfeld: "Wavelength-division multiplexing free-space optical interconnect networks for massively parallel processing systems," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 3746-3755.
  - 24) A. M. Weiner, J. P. Heritage and E. M. Kirschner: "High-resolution femtosecond pulse shaping," *J. Opt. Soc. Am. B*, **5** (1988) 1563-1572.
  - 25) J. Tanida, K. Nitta, T. Inoue and Y. Ichioka: "Comparison of electrical and optical interconnection for large fan-out communication," *Optics in Computing '98*, Proc. SPIE, **3490** (1998) 131-134.
  - 26) T. Hashimoto, I. Fukushima, M. Namiki and K. Yamamoto: "Image compression using an improved optical inner product processor," *Opt. Rev.*, **5** (1998) 152-157.
  - 27) J. W. Goodman, F. I. Leonberger, S.-Y. Kung and R. A. Athale: "Optical interconnections for VLSI systems," *Proc. IEEE*, **72** (1984) 850-866.
  - 28) JOP のホームページ : <http://www.oitda.or.jp/jop-j.html>.
  - 29) 鳳紘一郎, 浅田邦博: "大学における VLSI チップ試作", *応用物理*, **66** (1997) 858-861.

(1998年8月31日受理)