



空間符号化並列演算技術とその応用

谷田 純*

Spatial Coded Parallel Computing Technique and its Application

Key Words : Optical Computing, Parallel Processing, Computing Paradigm, Spatial Coding

1. はじめに

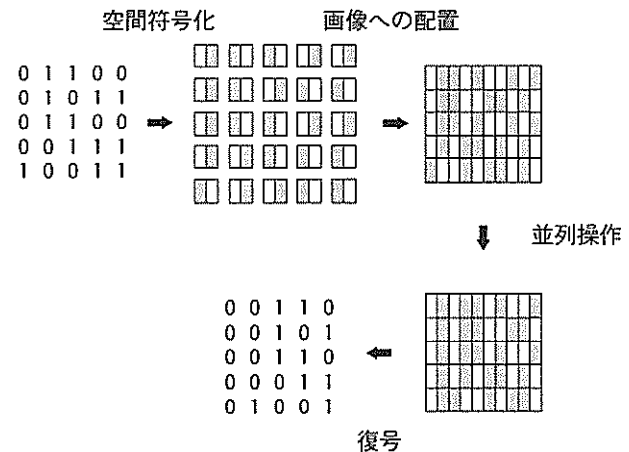
光の物理的特性を利用した情報処理技術は、デジタル光演算の概念が提案された1980年頃を契機として、光コンピューティングの名称のもと、独自の流れを派生した。すなわち、光を用いた大規模な情報処理システム—いわゆる光コンピューター—の開発を目標に、基本ゲート、論理回路構成法、演算方式、システムアーキテクチャなど多岐にわたる研究が展開されてきた^{1,2)}。現在、エレクトロニクスシステムでの信号遅延の問題を解決する光インターコネクション^{3,4)}が注目されているが、これは光エレクトロニクス素子など周辺技術の発達に支えられた光コンピューティングシステムの最もプリミティブな形態であると考えられる。このような具体的なハードウェア開発の一方で、光の特性を有効に活かすための論理的なアプローチも進められてきた。これらの成果は、並列演算パラダイムとしてまとめることができ、光コンピューティングのみならず、さまざまな分野での応用が期待される。本稿では、同分野における筆者らの研究の一端をまとめ、その応用可能性を紹介する。

体として用いる場合、その特徴的な性質として、並列性、可視性、鳥瞰性などがあげられる。光コンピューティングの狙いは、これらの性質を活かすことにより、従来とは異なる新しい情報処理技術を開発することである。そこで、光技術に適した処理や操作の組み合わせにより、さまざまな演算を実現するための枠組み—並列演算パラダイム—が考えられてきた。多くの提案の中で、特に興味ある方式が、情報を空間符号に変換した後、光学的な操作を用いて、それらの情報に対する一括処理を行う手法である。本稿では、この手法を空間符号化並列演算技術と呼ぶ。具体的な提案としては、多重投影光学系による並列論理演算法⁵⁾、記号置換論理⁶⁾、光アレイロジック⁷⁾、画像論理代数⁸⁾などがあげられる。

図1に空間符号化並列演算技術の一般的な手順を示す。これは、情報の空間符号化、空間符号の画像平面への配置、画像平面に対する並列操作、出力パターンの復号により構成される。空間符号とは、2次元平面上で広がりを持つパターンであり、情報表現の最小単位になる。空間符号に変換された情報は、光学的手法による一括処理の準備として画像平面に

2. 空間符号化並列演算技術

まず、光コンピューティングにおける並列演算パラダイムの基本的な考え方を説明する。光を情報媒



* Jun TANIDA
 1958年6月24日生
 1986年大阪大学・工学研究科・応用物理学専攻修了
 現在、大阪大学工学研究科、物質・生命工学専攻、フォトニック情報工学講座、助教授、工学博士、情報光学
 TEL 06-6879-7851
 FAX 06-6879-7295
 E-Mail tanida@mls.eng.osaka-u.ac.jp



図1 空間符号化並列演算技術

配置される。通常、ハードウェア資源を有効に利用するため、画像平面に隙間なく置かれる。光技術の特性として、画像上のすべての点に対して同一の操作を行うことは容易であり、その性質を用いて並列処理を実現する。並列処理形態の分類では、SIMD (Single instruction stream multiple data flow) に相当する。操作後に得られた出力画像を適切に復号することで、全体として並列演算系が構成される。個々の構成手順には、多くのバリエーションが考えられ、その結果、多様な演算技術が展開される。

3. 並列デジタル演算

3.1 並列光論理演算法

デジタル演算方式の特徴として、基本構成要素である論理ゲートを用意すれば、その組合せとして任意の演算を実行できる。この性質を活かすために、並列光論理演算を実現したものが投影光学系による並列光論理演算法¹である⁵⁾。図2に演算手順を示す。2枚の離散画像において、0, 1の情報を空間符号に変換し、それらを重ね合わせて入力面に置く。このとき、各画素区画では、入力データの組み合わせ

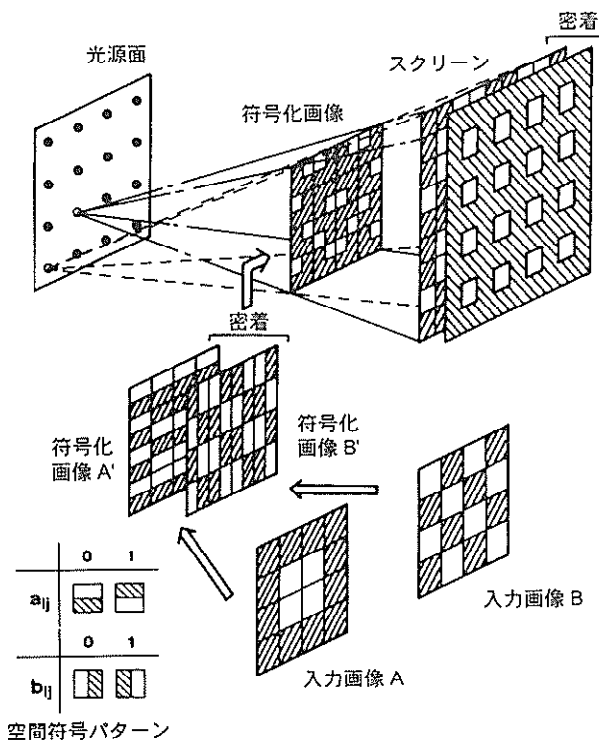


図2 投影光学系による並列光論理演算法

せに応じて4種類の空間符号のうちの一つが生成される。この符号化画像をアレイ状に配置した点光源でスクリーンに投影する。スクリーンは、隣り合った点光源による投影像が、1/2画素区画ずつずれる位置に配置する。そして、スクリーン上で得られた画像を1画素間隔、1/2画素幅の窓でサンプリングし、光信号が入射すれば1、しなければ0とする信号の解釈(復号)を行う。これらの手順により、入力画像の全画素に対する論理演算を完全並列に実行することができる。論理演算の種類は、点光源の点灯パターンで決まり、対応画素間のみならず、近傍にある画素間を対象とする演算も行うことができる。また、処理平面内に配置したデータ数に応じた並列演算が実現できる点も重要な特徴である。この手法は、空間符号パターンの利用と光学的な重ね合わせ操作に基づくものであり、空間符号化並列演算技術の典型的な例としてあげられる。

3.2 光アレイロジック

並列光論理演算法を基礎にして、任意の並列論理演算を実行できるように並列演算パラダイムとしての体裁を整えたものが、光アレイロジックである。並列光論理演算法の手順を整理すると、符号化、離散相関演算、復号という三つの処理として記述できる。点光源による投影は、符号化画像と点光源群の点滅パターン(演算カーネルと呼ぶ)との離散相関演算として表現される。ただし、論理的な考察により、並列光論理演算法の原形では、任意の画素間論理演算が実現できないことが導かれる。そこで、任意の画素間での論理演算を行うために、離散相関演算を多重化し、暗信号を論理値1に対応させる暗論理を導入する。この並列演算のための枠組みを光アレイロジックと称する。光アレイロジックの名称は、プログラマブルロジックデバイスなどで用いられるアレイロジックとの密接な関係によるものである。図3に演算手順を図示する。

光アレイロジックの重要な特徴として、専用プログラム言語により演算内容の記述ができ、その記述が光学的な実現方法に直結する点があげられる。図4にプログラム例を示す。光アレイロジックでは、離散相関演算で用いられる演算カーネルが演算内容を決める。これは、並列光論理演算法における点光源の点灯パターンに対応するものである。光アレイロジックでは複数の相関演算を用いるため、より正確には、演算カーネルの組が演算内容を指定する。

¹ 「へいれつ・ひかり・ろんりえんざんほう」と読む。

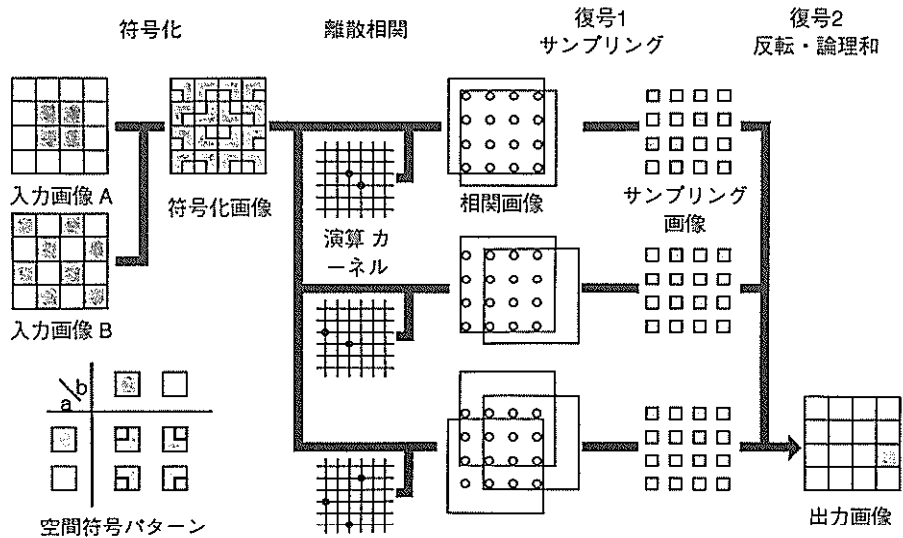


図3 光アレイロジック

```

program addition;
var i, N;
image imagea=../image/add.attr;
image imageb=../image/add.data;
kernel add;

N=7; /* N bit */
add= | 1. |
     |_0. | * | .0 |
           |_ .1 |
+ | 1. |
  |_0. | * | .1 |
           |_ .0 |
+ |_1. |
  | 0. | * |_ .1 |
           | .1 |@(0,1);

for i=1 to N do
  imageb = exec( imagea, imageb, add);
end;
imout add.result imageb;
end addition;
    
```

図4 光アレイロジックによるプログラム例

光アレイロジックでは、すべての画素に対して同一の演算を評価するSIMD形式の並列処理を仮定している。これは、光による実現形態に合致したものであり、制御や演算指定の容易さにおいて利点を持つ。具体的な演算処理として、画像処理、数値演算、データベース操作、並列現象シミュレーションなどが光アレイロジックの枠組みで実現されている。

3.3 パターン論理

光アレイロジックの応用範囲をさらに広げる興味深い考え方として、パターン論理を紹介する。図1の空間符号化並列演算技術の説明では、情報から変換された空間符号を画像上に密に配置するものとし

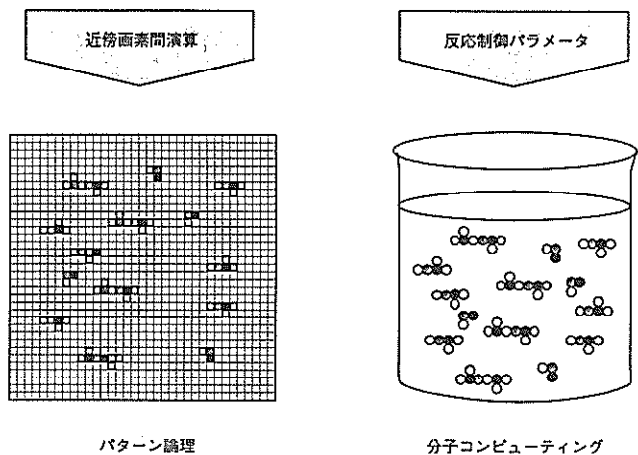


図5 パターン論理と分子コンピューティング

たが、空間符号のかたまり(クラスタ)を作り、それら同士が干渉しないようにまばらに配置してもよい。すると、各空間符号クラスタは自由に変形・拡張ができるようになり、情報の表現自由度が飛躍的に増大する。このとき、画像平面上に配置した空間符号クラスタ数の情報を同時に処理することができる。

図5に示すように、この考え方は、新しい並列演算パラダイムとして注目されている分子コンピューティング⁹⁾と関連づけることができる。ただし、分子コンピューティングの本質である自己組織化に基づく計算能力はなく、並列度の点でも及ばない。しかし、分子コンピューティングでは、任意の情報をコーディングするために分子形状を設計・合成したり、所望の処理を実現するために反応条件を制御し

たりする必要があり、実現までに課題は多い。その点、パターン符号化論理では、画像平面上に配置されたパターンに対する近傍画素間論理演算のみで処理が完結し、光アレイロジックによる並列パターンマッチングを用いれば、自己組織化現象のエミュレーションも可能である。そこで、分子コンピューティング用プログラム開発環境などへの応用が考えられる。

4. アナログ符号化法

空間符号化並列演算技術の応用対象は、デジタル演算に限られるものではない。アナログ量を表現できる空間符号パターンの利用により、2次元配列データに対する加算、乗算(アダマール積)などを容易に実行できる。アナログ変調空間符号パターンの一例を図6(a)に示す。これは、図2中に空間符号パターンにおいて、0と1の中間状態を許した空間

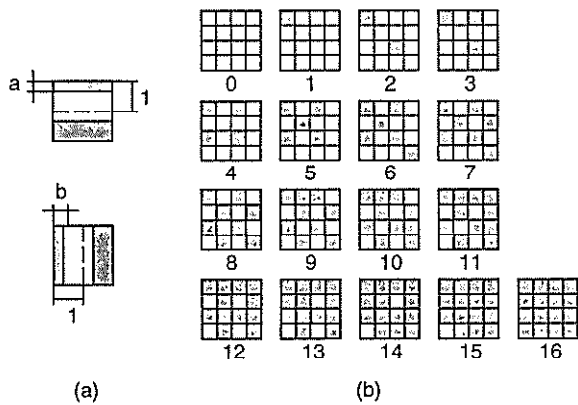


図6 空間符号パターン。
(a) アナログ符号, (b) VACT符号。

符号と考えることができる。例えば、この空間符号パターンを上述の並列デジタル演算技術に組みこみ、光信号強度を出力値として用いると、並列数値演算が実現できる。また、演算カーネルに強度分布を持たせ、フィルタカーネルとして用いると濃淡画像に対するデジタルフィルタリングが行える。

アナログ演算の特性として、情報単位当たりの情報量は多いが、演算精度が低く、汎用性に欠ける。しかし、演算アルゴリズム側でそれらの問題を緩和でき、また、並列演算性が効果的に利用できるならば、アナログ符号化法は有効な演算手段を提供する。具体的な応用例として、ニューラルネットワーク¹⁰⁾への応用が考えられている。

5. 視覚化空間符号処理

5.1 VACT

光情報処理技術の一つの特徴として、情報自体の可視性があげられる。情報媒体の光は視細胞で捕らえることができ、空間符号パターンは視覚的に認識される。この特徴を活かすことにより、演算の中間状態や出力結果を直接人間に提示して、その優れたパターン認識能力や判断力を取り入れる処理系の構築が可能になる。

このような可視化空間符号処理の一例として、VACT(Visual Area Coding Technique)¹¹⁾を紹介する。ハーフトーン処理に用いられる濃度表現パターンは、空間符号パターンの一種とみなすことができる。そこで、多値情報を表す空間符号として、図6(b)に示す空間符号パターンを用いる。二つの符号の重ね合わせと符号反転の適用により、最大値

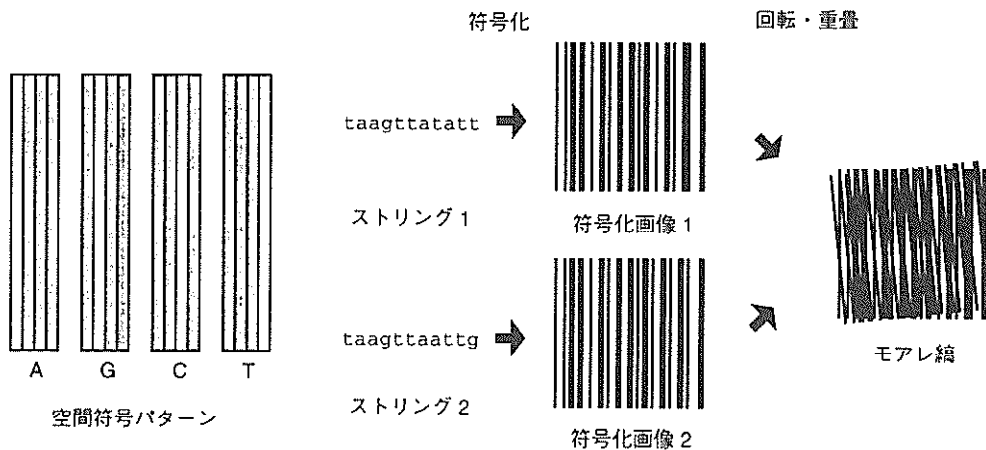


図7 空間符号モアレマッチング法

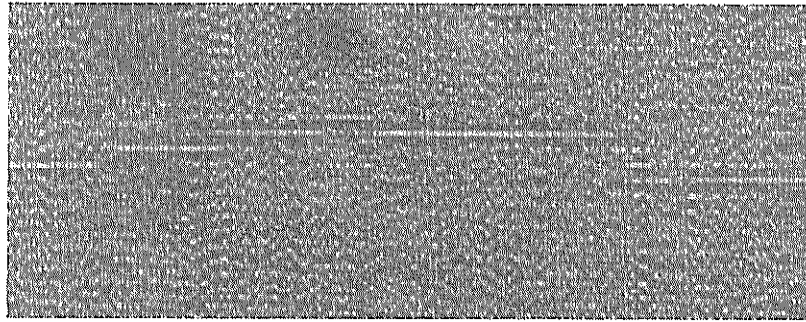


図 8 超好熱始原菌 KOD1 と *Thermococcus Celer* 16S rRNA 遺伝子の部分配列の比較結果

演算，最小値演算を並列的に実現することができる。この場合，演算結果を視覚的に提示できるだけでなく，必要であれば，演算の中間状態を確認できる。応用例として，ファジー推論¹¹⁾，数理形態学フィルタ¹²⁾などが報告されている。

5.2 空間符号モアレマッチング法

可視化空間符号処理の新しい展開として，空間符号パターン同士のモアレ縞を利用したストリングマッチング技術を説明する¹³⁾。これは，二つのストリングデータ間の一致情報をモアレ縞として出力する光学的演算技術である。ただし，通常の文章などを対象とするのではなく，ゲノム情報解析への応用をめざしている。

御存じのように，ゲノム情報はDNAにおける4種類の塩基配列として表現されている。進化の過程において，塩基配列は，挿入，置換，欠失など，さまざまな変動を受け，それが生物種の差異として現れる。異なる生物種間での塩基配列，あるいは，タンパク質合成コードとしてのアミノ酸配列の比較は，進化経路の情報を与えるのみならず，既知生物種のゲノム情報から未知種のゲノム情報を推定する上でも重要な役割を果たす。

図7に空間符号モアレマッチング法の処理手順を示す。まず，処理対象配列の各要素を空間符号に変換する。空間符号には，図中に示すような1次元方向に伸長した符号パターンを用いる。その後，二つの符号化画像を微小な交差角で重ね合わせる。すると，両配列において要素の並びが一致した部分が明るい縞となって現れる。図8は，超好熱始原菌 KOD1 と *Thermococcus celer* の16S rRNA 遺伝子から抽出した長さ500の塩基配列に対するマッチング結果を示す。局所的に一致した部分が明るい線分として，また，挿入・欠失位置が不連続点として得られている。モアレ縞の水平方向は配列内座標を表し，

垂直方向は挿入あるいは欠失した要素数に対応する。さらに，モアレ縞には，垂直方向に並んだ短い線分のパターンが見られる。これは，繰り返し配列の存在を示している。このように，出力パターンから直接に配列情報を鳥瞰的に把握することができる。

ここで実現されている処理は，ゲノム情報解析で用いられるドットプロット法¹⁵⁾と等価なものである。しかし，光が提供する並列性と直接視覚に訴える視認性は，空間符号モアレマッチング法独自の特徴である。また，対称符号パターンによるステム・ループ構造の検出，2進符号によるアミノ酸配列比較¹⁴⁾，カラー符号に処理の多重化など，処理操作の工夫による演算内容の拡張が可能である。この技術は，ポストゲノムシーケンス時代におけるゲノム情報処理分野への光コンピューティング応用(フォトリソグラフィ・バイオインフォマティクス)の足掛かりを与えるものと期待される。

6. おわりに

新しい並列情報処理システムの形態として，エレクトロニクスと光技術を組み合わせた光・電子融合情報システムが注目されている¹⁶⁾。これは，情報獲得，処理，表示，保存など情報を対象とした各種の応用システムを，エレクトロニクスだけではなく，光技術を組み込んだ形態により実現するシステムの総称である。現在，垂直共振器型面発光レーザー(VCSEL)，空間光変調器CMOS光センサ，CMOS集積回路，スマートピクセルなどの光エレクトロニクスデバイスが利用できるようになり，また，光学系実装においても回折光学素子などオーダーメイド光学素子が容易に作製できる環境が整ってきた。その結果，これまではアイデアだけであったシステムが実現されつつある。しかし，単にエレクトロニクス方式の模倣だけでは光技術導入の意義は薄く，そこ

で、空間符号化並列演算技術をはじめとする並列演算パラダイムの活躍の場が開かれる。光の特性を考慮して考え出された空間符号化並列演算技術の成果は、新しい情報システム開発における基礎概念を提供するものと期待される。また、情報処理にこだわらなくとも、計測やヒューマン・インターフェースなど空間符号化並列演算技術は幅広い分野に応用可能であると考えられる。本稿が、それらを検討する上でのヒントになれば幸いである。

なお、超好熱始原菌遺伝子利用にあたり、適切なアドバイスと有用な情報をいただいた本学金谷茂則教授、森川正章助教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 谷田 純：“光コンピューティングの現状と将来”，光学，28，2-6 (1999).
- 2) J. Tanida and Y. Ichioka：“Digital optical computing”，*Progress in Optics*, XL(Elsevier, Amsterdam, 2000) Chap.II.
- 3) 黒川隆志：“スマートピクセルとその応用”，応用物理，68，624-632 (1999).
- 4) 石川正俊：“Light Wareの時代がやってきた！”，エレクトロニクス，No.557，26-29 (2000).
- 5) J. Tanida and Y. Ichioka：“Optical logic array processor using shadowgrams”，*J. Opt. Soc. Am.*，73，800-809 (1983).
- 6) K.-H. Brenner, A. Huang, and N. Streibl：“Digital optical computing with symbolic substitution”，*Appl. Opt.*，25，3054-3060 (1986).
- 7) J. Tanida and Y. Ichioka：“A paradigm for digital optical computing based on coded pattern processing”，*Intl. J. Opt. Comput.*，1，113-128 (1990).
- 8) M. Fukui, K. Kitayama：“Image logic algebra and its optical implementations”，*Appl. Opt.*，31，581-591 (1992).
- 9) 横森 貴：“ナチュラルコンピューション”，情報処理，41，925-931 (2000).
- 10) W. Zhang, J. Tanida, K. Itoh, and Y. Ichioka：“Optoelectronic implementation of bipolar analog neural network using shadow casting”，*Jpn. Jnl. Appl. Phys.*，29，L1325-L1327 (1990).
- 11) T. Konishi, J. Tanida, and Y. Ichioka：“Visual-area coding technique(VACT)：optical parallel implementation of fuzzy logic and its visualization with the digital-half-toning process”，*Appl. Opt.*，34，3097-3102 (1995).
- 12) T. Konishi, S. Taniguchi, J. Tanida, and Y. Ichioka：“Optical implementation of visible gray-image morphology with the visual-area-coding technique”，*Appl. Opt.*，35，1234-1239 (1996).
- 13) J. Tanida：“String data alignment by a spatial coding and moire technique”，*Opt. Lett.*，24，1681-1683 (1999).
- 14) J. Tanida and K. Nitta：“String data matching based on a moiré technique using 1-D spatial coded patterns”，*Optics in Computing*, SPIE 4089, 16-23 (2000).
- 15) 中村春木，中井謙太：バイオテクノロジーのためのコンピュータ入門(コロナ社，1995).
- 16) 谷田 純：“光・電子融合情報システムの新展開”，エレクトロニクス，No.557，58-62 (2000).

