

解説

デジタル光演算法

黒川 隆志

日本電信電話(株)光エレクトロニクス研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1989年2月18日受理)

Digital Optical Computing

Takashi KUROKAWA

NTT Opto-electronics Laboratories, 3-1, Morinosato-Wakamiya, Atsugi 243-01

1. はじめに

光の並列性を生かした光デジタル演算が最近注目を集めつつある。光デジタル演算はアナログ演算に比較して精度が高いこと、処理における柔軟性の点で優れている。デジタル処理におけるプログラマビリティはブール論理の組合せを変えることによって容易に達成される。さらにデジタル光信号処理の技術とデバイスが進歩すれば、光演算のみならず通信や計測の分野にもさまざまな応用が期待できる。

光の並列性あるいは空間的な性質の利点は、レンズ系によるフーリエ変換や空間フィルタリング等のアナログ光学処理¹⁾として良く知られているが、並列性をデジタル処理に持ち込もうとする具体的な展開は NASA の Tse (字) コンピュータの構想²⁾に始まる。Tse コンピュータの構成は、画像のような2次元データを2次元的に配列した論理ゲートにより並列に処理し、データの転送をファイバ束で行なおうというものである。Tse コンピュータの構想には光演算の構成上二つの重要なポイントがある。一つは光を並列に処理するための2次元論理デバイスである。並列処理の構成法としてはこのような2次元デバイスの形態に依存することが多く、これまで多数のデバイスとそれによる演算の方法とが提案されている。もう一つの点は光の並列的な結線である。Tse コンピュータではファイバ束の結線のため光の波動的な性質は利用されないが、空間ビームを用いればよりグローバルな結線が可能となる。

光による論理演算単位を組み合わせることでプログラマブルなプロセッサの構成にまで進まなければ、少なくとも光

演算系ができたとはいえないであろう。そのためには光に適した算法の開発と光演算系の構成手法の二点が重要である。2次元デバイスと光論理構成の基礎的な検討の進展に伴い、実時間動作する光プロセッサのプロトタイプ実現が期待されつつある。

2. 非線形光素子による論理演算

デジタルな論理演算を実行するためには何らかの非線形な過程が必要である。したがって非線形なデバイスがこれまで多数提案され、それらを用いた演算についても多くの試みがなされてきた。非線形光デバイスによる演算の構成および性能は用いる素子の特性に強く依存する。たとえば、デジタルな値として一般的には光強度がとられるが、偏波方向や波長などもその対象となりうる。次に、非線形素子とそれによる論理演算のいくつかについて紹介する。

2.1 空間光変調素子

空間的な光ビームを2次元的なパターンとして変調するデバイスを空間光変調素子という。図1にその概念を示す。入力信号が電氣的なものとしては液晶 TV がよく知られた例であり、時系列なデータを2次元的なパターンにシリアル-パラレル変換する機能をもつ。一方光画像信号を入力とするものではデータを2次元的に並列に書き込み、読み出すことができる。

現在よく使われている空間光変調素子として、液晶ライトバルブ (LCLV)³⁾、Bi₁₂SiO₂₀ (BSO) フォトリフレクティブ結晶を用いた PROM⁴⁾、マイクロチャンネルプレートと電気光学結晶を組み合わせた MSLM (micro-channel plate SLM)⁵⁾ 等がある。LCLV では光伝導層

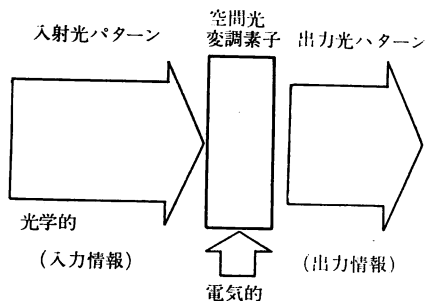


図1 空間光変調素子の動作概念

に光パターンを書き込むとそのパターンに応じて液晶層にかかる電圧が変化する。このため液晶層に入射した読出し光の偏光面がパターンに応じて回転し、アナライザによって強度的な光パターンが読み出される。PROM, MSLM と同様に電気光学効果による偏光状態の変化を利用したメカニズムである。各画素における光の入出力特性は偏光子の対向状態 (平行と直交) によって、光強度を2値でとれば AND と NOR の論理を実行できることになる。

LCLV に二つの画像を書き込み、それらを直列に光結合して読み出す構成で、何種類かの並列論理ゲート動作が得られている⁶⁾。また同様な実験は MSLM や PROM を複数個結合して、16 種類のすべてのブール論理を実行できることが示された^{7,8)}。さらに読出し光を書込み光にフィードバックすることにより、フリップフロップ動作の実験が行なわれている⁹⁾。このような方法により、組合せ論理のみならず順序論理も空間光変調素子を用いて実現しうる。現状の実用的な空間光変調素子性能は、解像度 10~30 本/mm, コントラスト 20:1 以上であるが応答時間が 10~100 ms と遅く、より高速化が望まれる。

2.2 二次元半導体集積素子

最近の OEIC 技術の進歩や半導体における量子効果の発見に伴い、光電子融合型の二次元半導体デバイスへ

の期待も高まりつつある。LD と PD との組合せからなる BILD (bistable laser diode) は高利得を持つ光双安定素子であり¹⁰⁾、モノリシックな集積化が可能のため多機能なデジタル素子として期待される。2次元アレイが可能になればそれらの組合せ回路により、高速な並列処理系を構成できる。実際に LED とホトトランジスタをモノリシックに集積化した、双安定と増幅機能をもつデバイスの試みもなされている¹¹⁾。最近では、サイリスタ構造と LED とを集積した VSTEP (vertical to surface transition electro-phonic device) と呼ばれる DRAM 機能をもつ閾値素子も 1 kbit のものが作製されており¹²⁾、これによる光演算やインターコネクションへの応用も提案されている¹³⁾。

上記の発光素子と受光素子とを集積した半導体アレイ素子の実現にはまだ技術的課題が多いが、これによる演算系の構成法と演算能力の可能性についての検討がなされている¹⁴⁾。図2に光電子素子を用いた光演算系の構成を示す。符号化部と演算部の積層構造からなり、それぞれはフォトトランジスタと LED を組み合わせた光電子回路がプリント基板の表裏に 10×10 画素配置されている。符号化部は二つの入力パターンを検知し、4種のロジックを LED 出力する。演算部は符号化部の出力のスイッチングを電気または光の制御信号に従って行なう。制御命令が電氣的に与えられる場合は配線の制約からすべての画素が同じ演算を行なう SIMD (single instruction multi data) 構造となるが、光による場合は画素ごとに異なる制御命令を与えることができ、MIMD (multi instruction multi data) 構造が可能となる。このような2次元 OE 素子を集積した場合、10⁴ ビット、スイッチ速度 10 ns で 100 Gbit/s 以上の処理が可能と見積られている。

光シャッター的な受動デバイスは消費電力が小さく、集積密度の点で有利となる。空間的な光変調機能をもつデバイスは半導体の集積効果を利用した SEED (self-

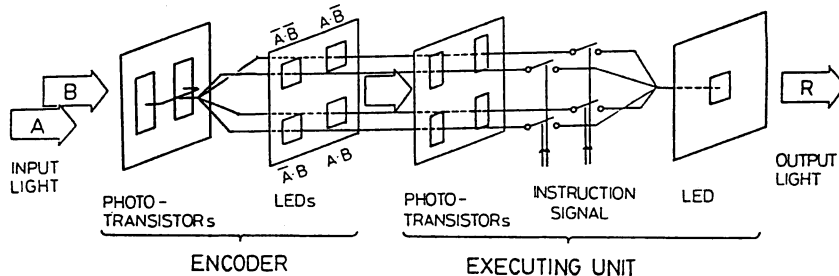


図2 光電子素子によるアレイロジック演算系¹⁴⁾

electrooptic device) が知られている¹⁵⁾。これは多重量子井戸構造 (MQW) を pn 接合中に設けたもので、励起子吸収の電界による移動を利用した光双安定性を示す。集積度は 64 ビット、コントラスト 4:1 程度あり、これらの特性の向上が望まれる。

2.3 純光学非線形素子

電氣的なバイアスを要しない純光学型の光ゲート素子として、光によって屈折率が変化する非線形光学効果を利用した非線形エタロンの研究が進められている。透過型では AND ゲート、反射型では NOR ゲートとして動作する双安定特性が観測される。非線形エタロンはその高速性 (ps オーダー) と面型であることから 2 次元的な論理素子として期待され、これを縦続接続的にループ結合した光演算系も提案されている¹⁶⁾。また後述するシンボリックサブスティチューションの演算実験に用いた報告もある¹⁷⁾。

非線形エタロンを論理素子として用いる場合、カスケードビリティの点から 1 波長での 3 端子動作が必須であるが、信号光と制御光の分離をしないと高いオンオフ比が得られない。そこで直交偏波を用いて両者を分離することにより、図 3 のようなフリップフロップやインバータ等の動作特性が検討されている¹⁸⁾。さらに光ファイバを接続した光スイッチモジュールの試作も報告されている¹⁹⁾。非線形エタロンは現状では 100 kW/cm² 以上の大きな光駆動パワーを必要とし、より効率の高い材料の開発が期待される。

3. 光パターンの性質を利用した演算

光ゲートを 2 次元的に並べた論理デバイスによる並列デジタル演算法では、光による空間的な配線密度の向上はあるが、十分に光の特性を生かしているとは言えない。そこで位相や偏波等光のアナログ的な特性をデジタル演算に生かそうとする方向も提案されている。2 次元的なデータを光のパターンとして取り扱うことにより、線形な光学過程で演算を行なうものだが、あらかじめデータをパターンに符号化する過程で非線形な素子を必要とする。しかし少ない非線形素子で済み、光の特質を生かすことから注目される。

3.1 空間フィルタリング演算

入力信号の符号化を回折、散乱、複屈折などによって行ない、この符号化したパターンを図 4 のようにコヒーレントフィルタリング系に配置してデジタル論理を行なう。たとえば統計的散乱によって符号化すれば、非散乱光は周波数平面の中心にピークが生じるのに対し、散乱光は周辺部にピークを生じるので離散的に信号を分離できる。二つの周波数平面にローパス、ハイパスフィルタを配置する組合せにより、2 変数 2 値論理の演算結果が像面で得られる²⁰⁾。

偏光状態による符号化では直交した二つの偏波光を論理値 0, 1 に対応させる。複屈折プリズムを用いた空間フィルタリング系で演算ができる。光強度の 2 値化に比べ、0 ↔ 1 の変換を半波長板で無損失で行なえる利点がある。

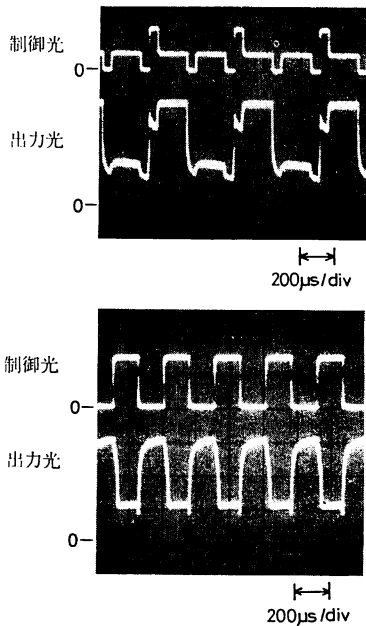


図 3 非線形エタロンによる 3 端子動作¹⁸⁾
 上: フリップフロップ動作,
 下: インバータ動作

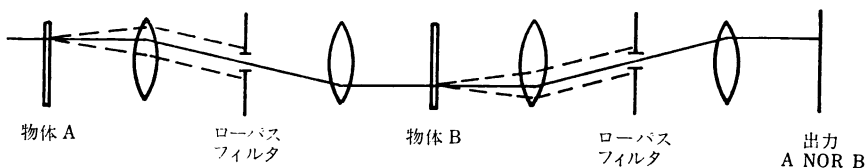


図 4 空間フィルタリング光演算系の構成²⁰⁾

3.2 相関光学系による演算

符号化したデータパターンに対して相関光学系により任意の論理演算を行なう方法が提案されている²¹⁾。この方法は図5に示すように、各画素を二つのデータの組合せ(00, 01, 10, 11)に従った四つのパターンに符号化し点光源(LED)で照明する。複号マスクを通して得られる相関像はLEDの点灯状態に対応した16種類の並列演算結果となる。LEDの点灯状態は演算カーネルの指定に対応し、プログラマビリティを与えている。さらに演算カーネルの範囲を拡張したサンプリングの論理和をとることにより、並列近傍画素間演算が実行できる光アレイロジックに拡張された²²⁾。データを符号化するための方法として、干渉、偏光を利用する方法等が提案されている^{23,24)}。

3.3 シンボリックサブスティチューション

この演算法は入力と出力に対しパターンのままの論

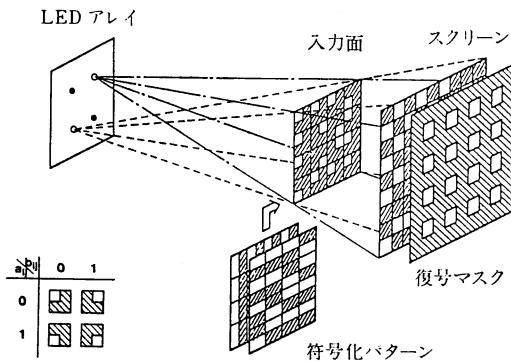


図5 投影光学系による並列光演算²¹⁾

理規則を導入するものである。すなわち図6に示すように、ブール論理ではビットの組合せを認識し一つのビットを出力するのに対し、シンボリックサブスティチューションではビットの相対的位置(パターン)を認識しある規則で配置されたビットの組合せを出力する²⁵⁾。図7に示すように配列データ内からの特定パターンの抽出、特定パターンの他のパターンへの置換の二つの過程をとる。それぞれイメージのコピー、シフト、重ね合わせといった光学的線形変換と光NORゲートによる反転で行なわれる。なお、シフト方向との組合せで、ANDゲートでも可能である。これもデータの符号化は、白黒の2ビットによる組合せや偏光等であらかじめしておく必要がある。

4. 光演算システムへの展開

これまでに述べた演算は入力に対し何らかの論理結果を出力するが、プロセッサとして機能させるためには少なくとも次のような条件が必要となる。

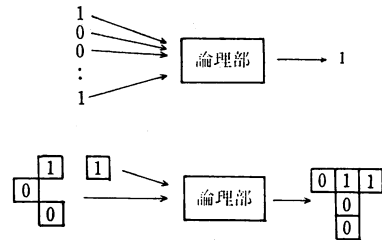
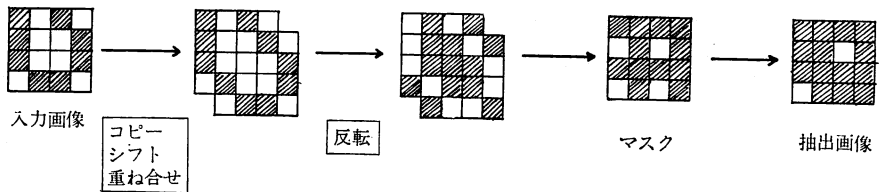


図6 ブール論理(上)とシンボリックサブスティチューション(下)の比較²⁵⁾

[パターンの抽出]



[パターンの置換]



図7 シンボリックサブスティチューションの演算過程

- (1) 単なる論理結果でなく、何らかの意味ある処理を実時間で実行できること
- (2) 処理の内容をプログラムできること
- (3) 入出力を外界とやりとりできること、すなわちそのためのインタフェースあるいはメモリを備えていること

このような光プロセッサ構成の試みに向けて、光に適したアルゴリズム、アーキテクチャの探索がなされている。

4.1 順序論理プロセッサ

論理ゲートの組合せ集合体からなる演算ユニット、データとプログラムを保持するメモリ、外部との I/O 部からなるプロセッサにおいて、プログラムによる動作設定、データの処理が逐次的に行なわれる。このような構成において、論理ゲートを多数並べ同時に多量のデータを処理する場合に生じる配線を、自由空間での光伝播によって行なえば、スループットを大幅に向上させることができよう。プログラマブルなプロセッサ構成のためには、(1) 論理ゲートの動作内容を変更する、(2) 論理

ゲート間の結線を変更する、2通りの方法がある。並列的な順序論理プロセッサの基本概念を図8に示す²⁶⁾。演算部で処理された光信号は空間結線により並列的にフィードバックされる。このとき演算ゲートの動作を変更するか、空間結線を逐次的に制御してメモリとのアクセス状態を変化させれば、プログラマブルな処理が逐次的になされる。LCLV とホログラムを用いた順序論理プロセッサ構成の報告がある²⁷⁾。

数値処理を行なうための基本的演算となる加減算を並列的に実行する光プロセッサが報告されている²⁸⁾。これは図9に示すように多数の半加算器セルを並べたリップルキャリイ型のフィードバック構成をとり、4ビット×2並列の実験がなされている。演算部はMSLMの偏光回転特性を利用した偏光論理で動作し、出力されたサムとキャリイはいったんラッチされた後、フィードバックされる。入力ポートへのデータ転送、MSLMの動作制御、出力ポートからのデータ転送などはマイクロプロセッサにより同期制御される。この系では補数への変換も並列的な光学系で行なわれ、プログラマブルな加減算が可能である。このように電気的なメモリと両立させる場合には、並列度と速度が大きくなったとき、それに見合っ

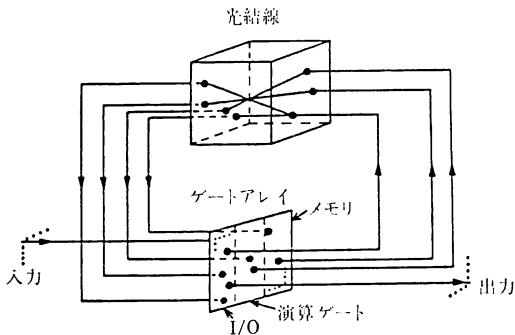


図8 並列光順序論理プロセッサの基本概念²⁶⁾

4.2 並列光アレイロジックシステム

先に述べた光アレイロジックを基礎とした OPALS (optical parallel array logic system) と呼ばれるシステムが提案されている³⁰⁾。図10に3次元集積回路と微小光学素子を用いた機能モジュール型 OPALS の概念図を示す³¹⁾。符号化部でデータはパターンに自動的に変換され、相関モジュール部では光アレイロジックにより

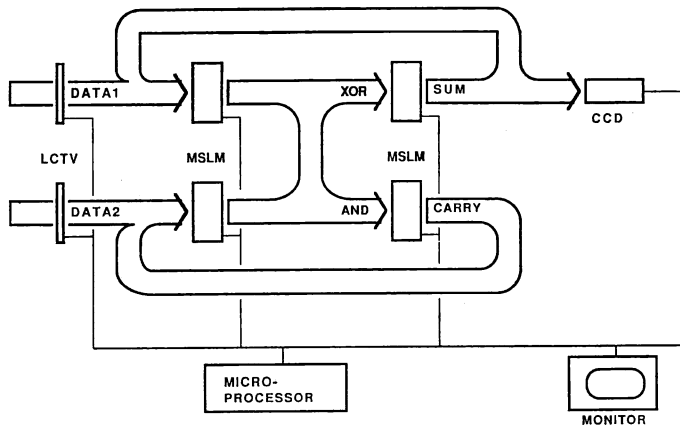


図9 並列光加算プロセッサの構成²⁸⁾

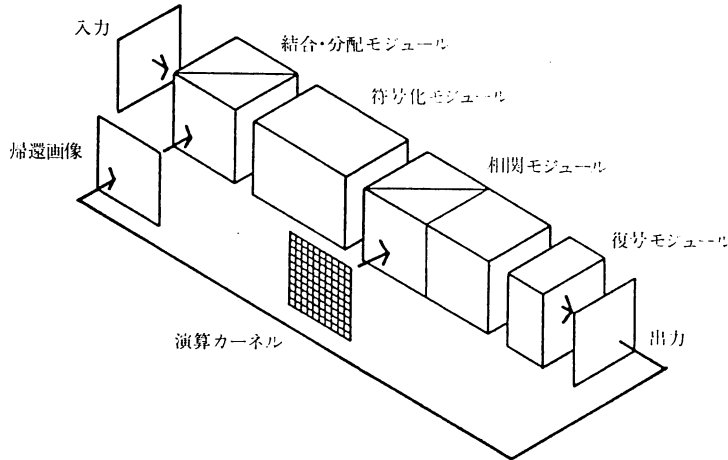


図 10 機能モジュール型 OPALS の構成³¹⁾

並列な画素間演算・近傍画素間演算が実行された後、データに復号される。近傍画素間の接続は光学的な相関系で行なわれるため、帰還系およびモジュール間の接続は2次元的に並列性を保った簡単な形となる。演算系の具体的構成として、複屈折符号化法と反射型相関光学系を組み合わせた光アレイロジックプロセッサが報告されている³²⁾。

4.3 光セルラーロジックシステム

セルラーロジックとは多数配置した論理演算セルレーアレイの近傍セル間の通信を行なう構造のもので、デジタル画像処理の分野で盛んに研究されている。Minnickによって提案されたセルレーアレイでは各セルに対する二つの入力に対し、四つの制御変数によって決まる9種類の出力のみで2値2変数の論理式をすべて合成できる。光演算部では9種類の演算が実行され、ホログラムによるインタコネクションによって近傍セル間の結合を行なうような光システムが提案されている³³⁾。また、3値論理の演算セル間の接続を動的に変化させて自由度を上げた構成も提案されている³⁴⁾。

4.4 シンボリックサブスティチューションシステム

シンボリックサブスティチューションに基づく光プロセッサとしてパーフェクトシャッフルによる光インタコネクションを帰還系に入れて、逐次的に抽出、置換のパターンを変えながら汎用的な演算を実行しようとする図 11 のような形態が提案されている³⁵⁾。入力パターンに対しコピー、左右シフト、反転のそれぞれに対応する可変マスクを用意して処理を行ない、パーフェクトシャッフルを介して帰還させる。複数回の帰還により、加算などプログラマブルな処理を行なう例が報告されてい

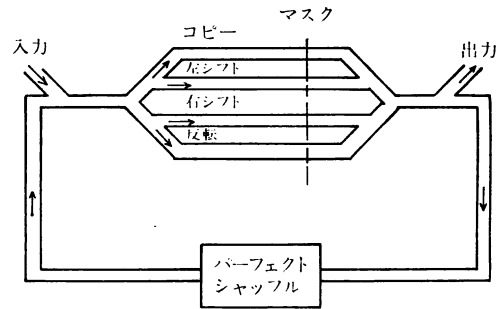


図 11 シンボリックサブスティチューションによる光プロセッサの構成³⁵⁾

る。

5. む す び

汎用的な光コンピュータをめざしたデジタル光演算法について、並列処理の観点からまとめた。デジタルな光信号処理技術は、コンピュータのみならず通信、計測などに適用できる基本的な技術であるが、エレクトロニクスに比べはなはだ未成熟な状態にある。これは光デバイスが十分に揃っていないことはもちろんだが、光の特質を生かした信号処理の方向がよく見えていないことも一因であろう。その点から、光のパターンとしての性質を利用した演算法が提案され始めていることは、きわめて興味深い。

しかしながら、それらに必要なホログラフィ、自由空間光学系等の技術は依然として定盤上の技術にとどまっており、システム化を進めるうえでの基盤技術の位置を確保するに至っていない。このような光学技術の汎用

化, 3 端子光デバイスを揃えていくことが, 今後の光演算の発展の基盤として重要であろう. そのような技術の蓄積と呼応しながら, 光にマッチしたアルゴリズム, アーキテクチャが提案されていくことを期待したい.

文 献

- 1) A. Van der Lugt: Proc. IEEE, **62** (1974) 1300.
- 2) D. H. Schaefer and J. P. Strong, III: Proc. IEEE, **65** (1977) 129-138.
- 3) W. P. Bleha, *et al.*: Opt. Eng., **17** (1978) 371.
- 4) B. A. Horwitz and F. J. Corbett: Opt. Eng., **17**(1978) 353-364.
- 5) C. Warde and J. I. Thackara: Opt. Lett., **7** (1982) 344-346.
- 6) M. T. Fatehi, *et al.*: Appl. Opt., **20** (1981) 2250.
- 7) T. Hara, N. Mukohzaka and Y. Suzuki: Proc. SPIE, **625** (1986) 30.
- 8) T. Minemoto, *et al.*: Appl. Opt., **24** (1985) 2055.
- 9) U. K. Sengupta, *et al.*: Opt. Lett., **3** (1978) 199.
- 10) Y. Ogawa, H. Ito and H. Inaba: Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) L 646.
- 11) A. Sasaki, *et al.*: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-29** (1982) 1382.
- 12) 田代義春, ほか: 第 48 回秋季応用物理学学会学術講演会 (1987) p. 724.
- 13) 河合 滋, ほか: 電子情報通信学会春季全国大会予稿集, **1** (1988) p. 278.
- 14) S. Fukushima and T. Kurokawa: Opt. Lett., **12** (1987) 965.
- 15) D. A. Miller, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **QE-21** (1985) 1462.
- 16) A. C. Walker: Appl. Opt., **25** (1986) 1578.
- 17) M. T. Tsao, *et al.*: Opt. Eng., **26** (1987) 41.
- 18) T. Kurokawa, H. Tsuda and S. Fukushima: IQEC, TuI-9 (Tokyo, 1988).
- 19) 黒川隆志, 津田裕之: 電子情報通信学会春季全国大会 (1989) p. 4-251.
- 20) J. Weigelt: Opt. Eng., **26** (1987) 28.
- 21) J. Tanida and Y. Ichioka: J. Opt. Soc. Am., **73** (1983) 800.
- 22) J. Tanida and Y. Ichioka: J. Opt. Soc. Am., **A 2** (1985) 1245.
- 23) M. Ikeda, T. Yatagai, S. Ishihara and Y. Mituhashi: *Tech. Dig. Topical Meeting on Optical Computing* (Nevada, 1987) p. 237.
- 24) 谷田 純, 一岡芳樹: 第 48 回応用物理学学会学術講演会 (1987) p. 599.
- 25) K. H. Brenner, A. Huang and N. Streibl: Appl. Opt., **25** (1986) 3054.
- 26) A. A. Sawchuk and T. C. Strand: Proc. IEEE, **72** (1984) 758-779.
- 27) B. K. Jenkins, *et al.*: Appl. Opt., **23** (1984) 3455.
- 28) T. Kurokawa, S. Fukushima and H. Suzuki: *Topical Meeting on Optical Computing, WA2* (Salt Lake City, 1989).
- 29) 黒川隆志, 福島誠治: 第 48 回応用物理学学会学術講演会 (1987) p. 599.
- 30) J. Tanida and Y. Ichioka: Appl. Opt., **25** (1986) 1565.
- 31) J. Tanida and Y. Ichioka: Appl. Opt., **26** (1987) 3954.
- 32) 谷田 純, 中川 純, 一岡芳樹: 第 35 回応用物理学関係連合講演会 (1988) p. 737.
- 33) T. Yatagai: Appl. Opt., **25** (1986) 1571.
- 34) 第 27 回微小光学研究会光コンピュータ研究会合同講演会予稿 (1988) p. 56.
- 35) M. J. Murdocca and N. Streibl: *Tech. Dig. Topical Meeting on Optical Computing* (Nevada, 1987) p. 9.