

解 説**レーザによる情報処理—光コンピュータをめざして†**

世 古 淳 也‡

1. まえがき

高度情報化社会の到来に伴い、処理対象として画像情報を取り扱うことが急増している。その分野も産業、流通、交通、民生、医療など広汎にわたっている。ところが画像の情報量は膨大である。たとえば、地球資源探査衛星における地上への伝送量は一年間に 10^{13} ピット、磁気テープに記録すると 50 万巻にもなる。これだけ膨大な画像情報を、従来の電子技術で処理しようとすると多大な時間を要する。これは従来の電子技術が時間次元での処理に基調を置いていたためであり、空間的な分布で初めて意味を持つ画像情報を、時系列信号に変換し処理していくかざるを得なかったのである。高速化をはばむ障壁を突破できる技術、それがレーザ情報処理技術である。そこでは、光固有の特徴である並列処理能力により、対象を画像としてとらえ画像のまま高速度（光速）で演算処理を行う。本稿では、コヒーレント光学系による情報処理の最近の展望^{1)~6)}、およびアナログ演算からデジタル演算への推移、そして光コンピュータの構想について紹介する。

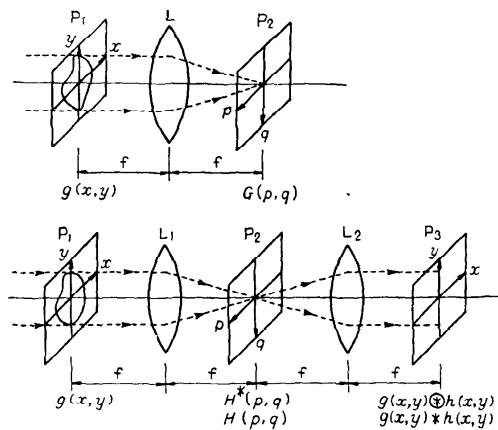


図-1 コヒーレント光学系による情報処理の基本

2. コヒーレント光学系による情報処理の基本

自然光は波長も位相もさまざまな波であったところから、旧来の光学では光の振幅（強度）情報だけを主として取り扱ってきた。これに対し、レーザ出現の情報処理分野への意義は、レーザ光が波長も位相もそろったコヒーレントな波を提供したことにある、位相情報も取り扱えるようになった。ここに初めて光を波として利用できるに至った。以来 20 年の間に、光の波動性を活用したコヒーレント光学系による情報処理は集中的に研究され、完成の域に近づいてきている。最近では欠陥検査装置、像修正装置、画像認識装置など実用装置の開発が進んでいる。

コヒーレント光学系による情報処理の基本は、空間的なフーリエ変換および相関演算である。図-1(a)に示すように、凸レンズの前焦点面 P_1 に対象画像 $g(x, y)$ を置き、これに平面波を照射すると、後焦点面 P_2 には $g(x, y)$ のフーリエ変換像 $G(p, q)$ が光

(a) フーリエ変換

$$G(p, q) = \iint g(x, y) e^{-i(px+qy)} dx dy \\ = \mathcal{F}[g(x, y)]$$

(b) 相関演算

$$\text{相関 (correlation)} \\ u(x_0, y_0) = \iint g(x, y) h(x+x_0, y+y_0) dx dy \\ = \mathcal{F}^{-1}[G(p, q) H^*(p, q)] \\ = g(x, y) \otimes h(x, y) \\ \text{畳み込み (convolution)} \\ u(x_0, y_0) = \iint g(x, y) h(x-x_0, y-y_0) dx dy \\ = \mathcal{F}^{-1}[G(p, q) H(p, q)] \\ = g(x, y) * h(x, y)$$

† Laser Information Processing-In Pursuit of Optical Computer by Atsuya SEKO (Department of Physics, Faculty of Science and Engineering, Keio University).

‡ 康心義塾大学理工学部物理学科

の走る速度で形成される。面 P_2 に適当なフィルタを置き、フィルタを透過した光を再び同様にフーリエ変換すれば、特定のスペクトル成分が抜けた元の像が再生成される。次に、図-1(b) に示すように、2枚のレンズを用い、面 P_1 に第1の画像 $g(x, y)$ を置き、また、面 P_2 には第2の画像 $h(x, y)$ のフーリエ変換像 $H^*(p, q)$, $H(p, q)$ を置くと、面 P_3 には2画像の correlation $g(x, y) \otimes h(x, y)$, convolution $g(x, y) * h(x, y)$ が瞬時に得られる。ここで複素振幅フィルタ H^*, H はホログラフィ技術を用いて作ることができる。

光の位相情報をも記録するホログラフィは、立体像を記録・再生できるだけでなく、耐破損性、大容量性、

画像多重記録、翻訳機能など多くの特長を持つため、機能メモリとしてレーザ情報処理で重要な位置を占めている。

3. レーザ情報処理装置

レーザ情報処理は、まずレーザ光の指向性、集光性を利用した販売時点商品管理システム(POS: point of sales)や光ディスクといったシンプルな応用面から実用化し、徐々に高度並列処理装置へと進んできている。レーザを用いた情報処理装置の例を表-1に示す。ここでは最近のものについて述べる。

空間的なフーリエ変換は、電子技術分野で用いられるスペクトラム・アナライザにおける時間座標が空間

表-1 レーザ情報処理装置

(a) 走査方式	
装 置	手 法
レーザレーダ(公害監視用)	光パルスエコーを光検出器のゲーティング動作で検出 気体分子固有のラマン散乱を分光器で検出
平面度測定装置	レーザビームを回転させて基準平面をつくり、この基準平面と測定面との差を検出
自動レジ(POS)	商品に張った価格コードをレーザスキャナで検出
織物欠陥検査装置	高速度で生産されてくる織物をレーザスキャナで照射し、ミニコンピュータで欠陥検査
外径測定装置	被検出物の影상을光検出器アレーで検出
ビデオディスク	レーザをトラックに照射し、反射光を光検出器で検出 反射光を半導体レーザ自身が検出(SCOOP方式) ¹¹

(b) 並列処理方式	
装 置	手 法
欠陥検査装置	空間スペクトル解析: フーリエ変換像をリング形、ウェッジ形検出器アレーで解析 空間フィルタリング: スペクトル面に基づくパターンのフーリエ変換像をフィルタとしておく
粒状度測定装置	空間スペクトル解析: フーリエ変換像をリング形検出器アレーで解析
細線外径測定装置	線材のフラウンホーファ回折像を光検出器で測定
振動・ひずみ測定器	スペックルパターン: スペックルパターン自体を撮影し、これを空間フィルタとして利用 ホログラフィ干渉法: 同一の乾板に変位前と変位後のホログラムを重ね重ね撮りし、再生
速 度 計	スペックルパターンの変化を光検出器で測定
平面度測定装置	原器プリズムと被検出物間の干渉じまを測定
レーザスコープ測距装置	光パルスエコーをイメージ・インテンシファイア(画像増幅器)のゲーティング動作で検出
アンテナ群の放射パターン・シミュレーション	ホログラフィにより室内に放射パターンを再現
文字読み取り装置	ホログラフィを用いた演算(自己相關、相互相關、減算、空間微分)
情報検索システム	ホログラフィによりキーワードから文献名などを検索
翻 訳 機	ホログラフィにより、たとえば英語から日本語に翻訳
指紋照合装置	ホログラフィにより指紋を検査し、その人名を知る
写真植字システム	ホログラムで蓄積した文字をレーザで読み出し、ブラウン管にディスプレイ
医療情報処理装置	相関演算、ホログラフィを利用して生体情報を検出 ¹²
像修生装置	空間フィルタリングにより劣化した像を修復 ¹³
ドップラ信号解析装置	音響光学素子を用いて、レーダ信号を相関演算 ¹⁴

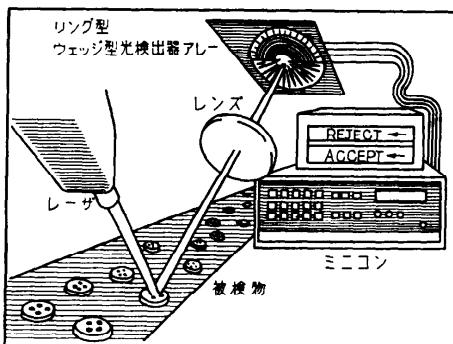
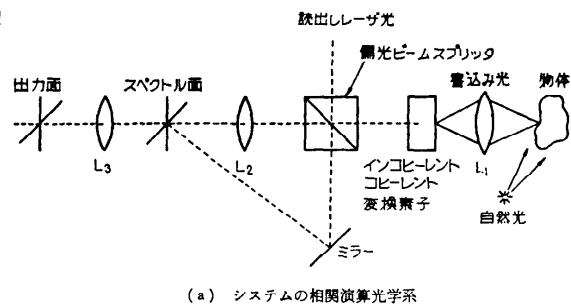


図-2 欠陥検査装置

座標に置きかわったものであり、そのフーリエ変換像（フランホーファの回折像）は対象画像の特徴を空間スペクトルとして分離して示しており、たとえば細かな物体は光を強く回折させるので、フーリエ変換像では光軸から離れた位置に明るい像を生じさせる。また、線状物体はその線分に垂直な輝線を生じさせ、線分の方向に関する情報を提供する。空間的なフーリエ変換の特徴は、対象画像の光軸に対する位置のいかんにかかわらず、特徴情報が光軸を中心に分布し、また対象画像の統計的な特徴を調べられることである。図-2は、スペクトル解析により被検物の欠陥を抽出するシステムであり、解析にふさわしい特殊光検出器アレーが実用化している。この検出器には、被検物中の線分の方向を知るための32個の扇型検出器と、被検物の細かさや尖鋭度を知るための32個のリング状検出器が配列されている。亀裂、穴など欠陥の種類によって固有のフーリエ変換像を生じるので光検出器アレーによって欠陥の種類分けができる。またリング状検出器の位置が空間周波数に対応するので、写真フィルム粒子やセメント粉の粒状度の検出や、表面荒さの測定など広く利用できる。

図-3は、相関演算のリアルタイム・パターン認識への応用例であり⁹⁾、自動化組み立て工程ラインにおいて、三次元物体の認識と位置の決定を行う。まず、物体が自然光で照明され、光電導体と液晶を組み合わせた空間変調器によりインコヒーレント-コヒーレント変換される。コヒーレント光に変換された入力像は、図-1(b)の光学系により、目標物体のフーリエ変換フィルタに送られ、相関演算がなされる。出力の相関平面の輝点の位置により物体の位置が確認される。

相関演算においては、参照画像に対して入力画像がスケールや回転に差異があると、著しく相関が損なわ



(a) システムの相関演算光学系

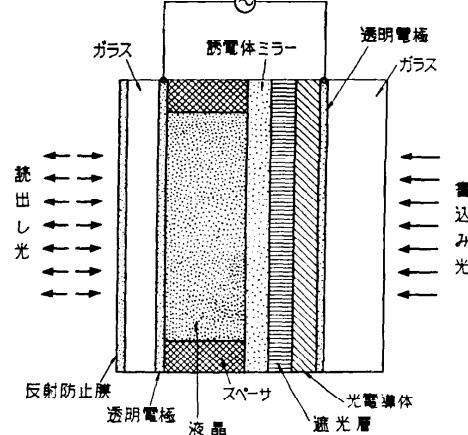
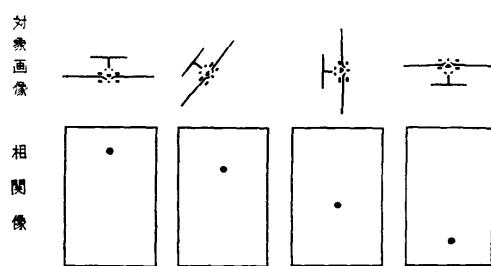
(b) インコヒーレント-コヒーレント変換素子
図-3 リアルタイムパターン認識装置（自動化組み立て工程ライン）

図-4 空間変動相関法による相関像

れてしまう。最近、スケールや回転に変動があっても相関ピークが得られ、またその変動量も測定できる空間変動相関法が開発された¹⁰⁾。まず、スケールに差異がある場合、メラン変換といって、入力関数と参照関数に対数変換を行ってから相関をとると、鮮明な相関ピークが得られ、そのピーク位置から両者のスケール比がわかる。また、両者に極座標変換を行ってから相関をとると、回転した画像に対してても鮮明な相関ピー

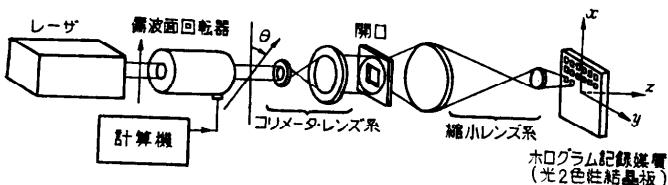
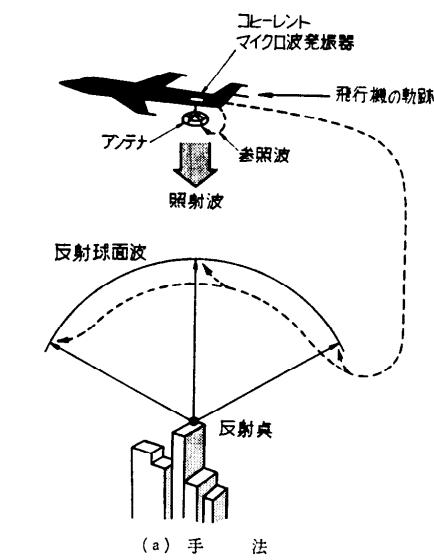
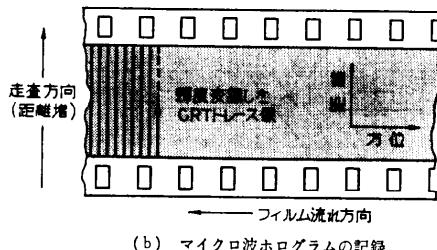


図-5 計算機偏光ホログラム



(a) 手法



(b) マイクロ波ホログラムの記録

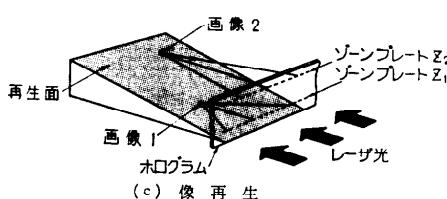


図-6 サイドロッキング合成開口レーダ

クが得られる。図-4に示すように、上の各々回転した対象画像に対する相関像は下のピーク位置のシフト

した像となり、そのシフト量が回転角を表わしている。

ホログラフィックメモリは大容量ファイルメモリとして実用化している。これまでのホログラフィックメモリは光学的に作られるが、計算機で計算して作るのが計算機ホログラムであり、光学演算と電子計算機演算のドッキングに期待される。図-5は、可逆感光材料NaFをメモリ媒体とした、実時間記録再生が可能な計算機偏光ホログラムである¹¹⁾。計算機での計算結果に相応した偏光情報を、レーザ光によりメモリ上に一点一点書き込んでいき、ホログラムを作り、これにレーザ光を一様に照射すると、もとの画像が再生される。

高解像度の航空写真を作成するのに、レーザ利用のサイドロッキング合成開口レーダが開発されている^{3),12)}。図-6(a)に示すように、飛行機の小アンテナからマイクロ波を発射し、反射波と参照波とによる一次元ホログラムの形でCRT上にディスプレイする。図では一個の反射点からの球面波と平面波(参照光)とによる一次元ゾーンプレートを用いて原理を簡単化して説明している。CRT上にディスプレイされたホログラムはフィルム上に、飛行に伴って次々と記録されていく(図-6(b))。フィルムの流れ方向には、各反射点によるゾーンプレートが形成されているので、フィルムにレーザ光を照射して再生処理すると、大型アンテナの開口にみかけ上対応するほどの高解像度写真が得られる。

対象画像と参照画像の一致を調べてパターン認識する際には、画像の位置、大きさ、傾きを正規化しなけ

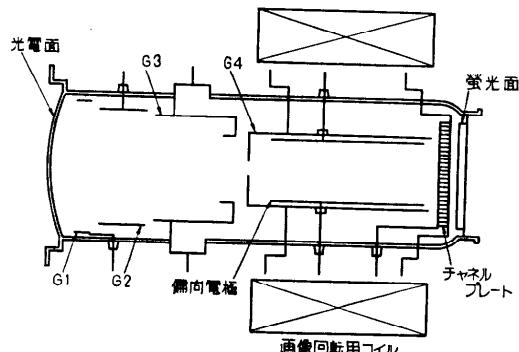


図-7 チャネルプレート・イメージ管を用いた多機能前処理素子

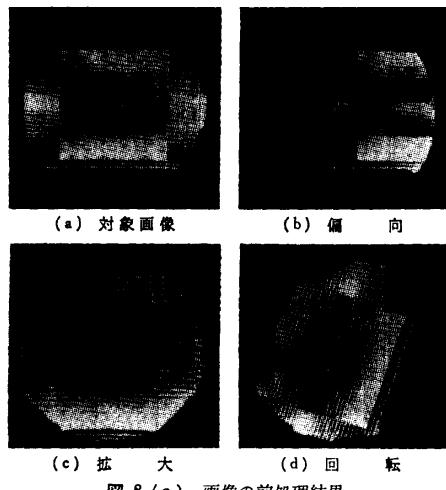


図-8 (a) 画像の前処理結果

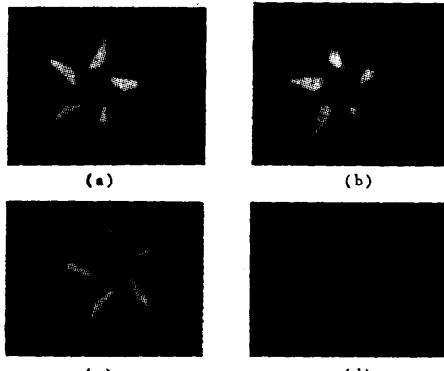


図-8 (b) 画像のパターンマッチング結果

ればならない。これらの正規化を単一のデバイスで高速度に前処理できる特殊イメージ管が開発された¹³⁾。この前処理素子(図-7)は、内蔵した偏向電極により画像を x , y 方向に偏向でき、また光電面のすぐ後方のグリッドの印加電圧の変化により拡大縮小ができる。画像を回転するには、静電レンズの後段に磁場を印加し、電子をサイクロトロン旋回させて行う(図-8(a))。さらにチャネルプレートという二次電子増倍面を内蔵しているので輝度増幅の機能を持ち、またチャネルプレートの特性を利用して二画像の類似度を調べる演算まで行える(図-8(b))。

4. 光コンピュータ

画像情報の急増はコンピュータ分野にも押し寄せて

いる。そこでは、膨大な画像情報を実時間に近い速度で解析でき、またより高度な演算が行えるコンピュータの開発が強く期待されている。それでは、現在の電子計算機が、この要望にどこまで対応できるであろうか。

たとえば、パターン認識分野においては、景色を見判断できる人工の眼を、コンピュータを駆使して作ろうとしている。その手法は、対象物をテレビカメラなどで撮像し、画像の明暗に対応した時系列信号に変換したのち、A/D 変換し、電子計算機のメモリに記録し、その後、計算機内で複雑なアルゴリズムを用いて各種の演算を行い、線画などの特徴を抽出して認識する方式が一般的である。しかし、二次元(もしくは三次元)情報を時間次元にバラバラにしてしまっているため、処理が複雑で、処理に多大な時間を要する。処理速度を速くするには、計算機を構成している個々の論理素子の応答を速くするしかない。現在の技術では1ゲートあたりサブナノsecとなっている。しかし、電子素子によるスイッチは、浮遊容量、電子の走行時間のためにスイッチ時間におのずと限界がある。

高速画像処理を可能にするコンピュータの模範は、生体の視覚情報処理系である。網膜上に配列する数100万個もの光検出器アレー(視細胞)に始まる視神経群は、途中で前処理、特徴抽出を並列的にくり返しながら、脳に達する。その威力を考えると、高速化をはばむ障壁を突破するカギは、並列形計算機であり、光を用いて画像のまま演算処理する並列処理手法によるコンピュータ、光コンピュータ^{14),15)}の登場が期待される。

4.1 光コンピュータの概念

光コンピュータの考え方は、①時系列光演算、②並列アノログ演算、③並列ディジタル演算の三つに分けられる。順次、各々の方式を考えていこう。

時系列光演算は、現在のディジタル電子計算機の論理素子を、スイッチ時間のきわめて速い光論理素子に置き換える、また配線も光ファイバや光導波路に置き換えようとするものである。これまでの電子回路では電子が流れていくのに対し、ここでは光が流れしていくのである。

このような考え方の光コンピュータは、すでにレーザの発明の直後から提案され¹⁶⁾、ファイバ・レーザを用いたニューリスト・レーザ計算機^{17)~19)}や、半導体レーザと可飽和吸収体を組み合わせた光論理素子^{20),21)}等が一時活発に研究された。しかし、具体化には至ら

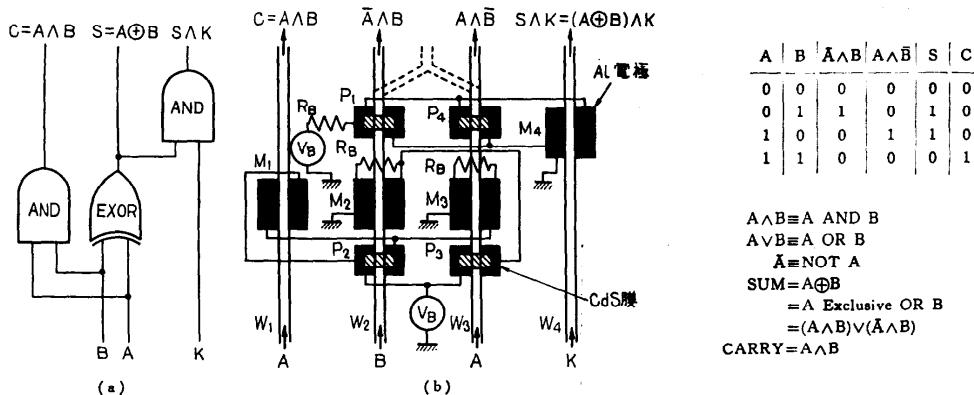


図-9 時系列演算方式光コンピュータ

なかった。

最近、光 IC の研究が活発化するにつれ、基板上に多数の論理ゲートや導波路を配列した光 IC により光コンピュータを実現しようとする動きが出てきている。図-9 は、S. H. Lee らによる、LiNbO₃ 結晶基板上に配列した光 IC 半加算器(half adder)の製作例である²²⁾。半加算器とは、2進の足し算の結果、その桁が 1 か 0 かの信号 SUM および桁上げをするかどうかの信号 CARRY を作る回路である。光導波路 W_i は、結晶基板上に線状に不純物をドープして屈折率を高めて作られている。光導電体 CdS を用いた光検出器 P_i により導波路光を検出し、この信号で、隣の導波路に設けた電気光学変調器 M_i を動作させ、その導波路をゲートする。光検出器と電気光学素子との間の配線の仕方によって、論理積 A \wedge B や、A の否定と B との積 $\bar{A} \wedge B$ を作ることができる。これらの組み合せによって CARRY 信号 C=A \wedge B や、SUM 信号 S=A \oplus B=(A \wedge B) \vee ($\bar{A} \wedge \bar{B}$) が得られる。それぞれの導波路用の光源には半導体レーザが利用される。この例は電気と光とのハイブリッドのゲートを使用しており、スイッチ時間は速くはないが、将来の光 IC のイメージをよく物語っている。

すべてを光素子で構成した時系列演算方式光コンピュータは、光が周囲の電磁波ノイズを受けないなど耐環境性といった特長もあるが、一方でショゼフソン素子のように psec オーダのスイッチ時間の論理ゲートも研究されており、光素子がこれらと競合して十分な性能を発揮できるかは疑問である。この方式は従来通りの時系列演算であるので、画像処理用コンピュータには、あまり威力を発揮するとは思えない。

そこで注目されるのが、画像を走査しないで二次元

のまま処理していく並列演算方式である。たとえば、画像をレーザ光で照射して、一枚のレンズを通過させるだけで、画像のフーリエ変換がなされる。演算はまさに光の走る速度でなされる。このような考え方が②の並列アナログ演算方式である。

先に、コヒーレント光学系による演算の基本は、画像に対するフーリエ変換と相関演算であることを述べた。図-10 は、これらの演算を駆使した並列アナログ光コンピュータの構想であり、人工衛星に搭載するための画像処理用光コンピュータを例にしている。

これは、入力画像をインコヒーレント光のままで前処理(色のフィルタリング、画像の規格化等)する素子、インコヒーレント-コヒーレント変換素子、空間周波数解析や相関演算を瞬時に実行するコヒーレント光学系、個々の素子をコントロールする電気的な制御装置などから構成されている。このコンピュータにより、地上のユーザの指示に沿って、衛星内で必要な情報だけが選び出され、地上に伝送される。

この並列アナログ演算方式は、その並列処理能力に基づく高速性のために、単一目的の情報処理装置としては力を発揮してきた。しかし、コンピュータとしては種々の問題点がある。まず、アナログ演算であるため、演算結果はアナログ量が分布したものとなりあいまいである。すなわち演算の精度が十分でない。また単能であるため柔軟性・汎用性がなく、プログラムが組みにくい。

第3の方式である並列ディジタル光演算は、並列演算による高速性と合わせて、1 か 0 かの二値演算により演算が正確で、自在にプログラムを組むことができる。ディジタル電子計算機の広範な普及を考えると、その理由は、二値論理の利用にある。二値論理を扱う

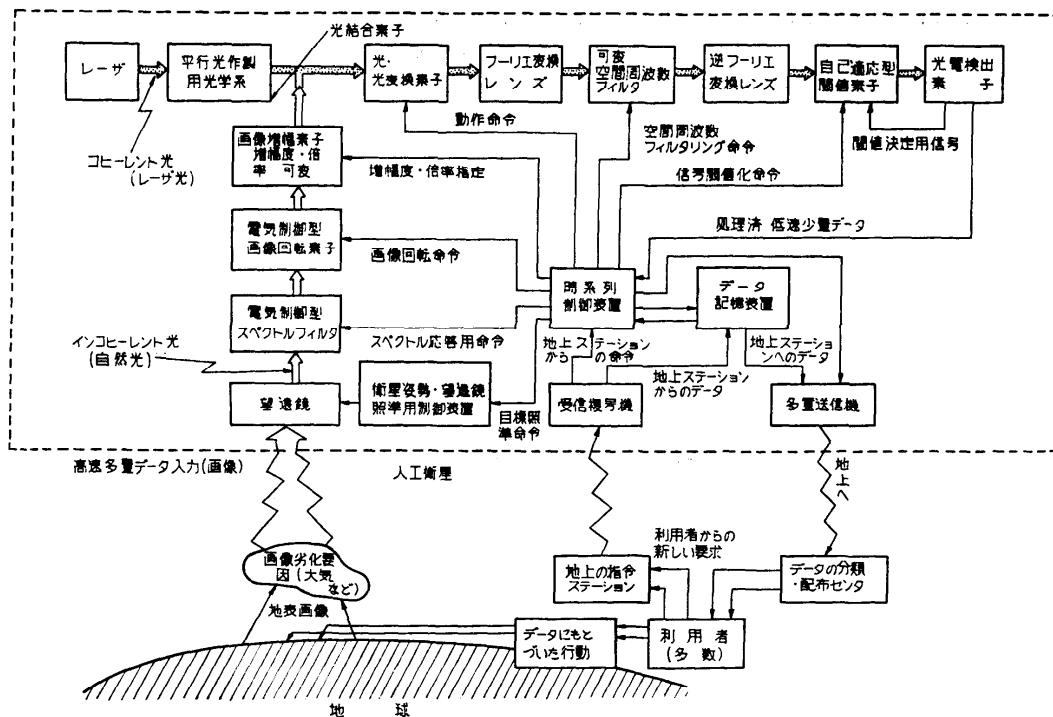


図-10 並列アナログ演算方式光コンピュータ構想図

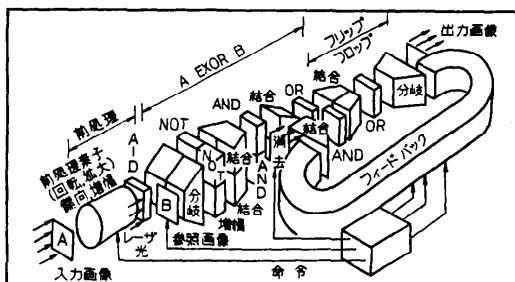


図-11 光コンピュータ構想図（並列デジタル演算方式）

代数、ブール代数を用いると、複雑な論理回路が簡潔に、しかも正確に表現できる。計算機に用いられている回路は、大部分がこのブール代数をもとにした二值論理回路である。電子計算機の成果を考えると、並列ディジタル演算方式が将来の光コンピュータとして最も期待されるといえよう。

そこで、未来の光コンピュータ（並列デジタル演算方式）の姿を考えてみよう。図-11は、大量の画像情報の処理を必要としているNASAの構想²³⁾などをもとにして描いてみたものである。

まず、演算対象となる入力画像は、画像の回転、拡大縮小、偏向が可能な前処理素子によって、画像の傾き、大きさ、位置を演算にふさわしいように規格化される。入力光が暗い場合は、輝度増幅が行われる。また、入力画像は一般に、白、さまざまなレベルの灰色、黒を含んだ中間調画像であるので、これを二次元の A/D 変換器によって、白と黒だけの二値画像に変換される。

次に、この二値画像と、大容量ファイルメモリに蓄えられた参照画像との間で、画像の論理演算が行われる。画像を二つに分岐したり、異なる二画像を同一位置に重ねる素子、二画像の重なった領域のみ1とするAND（論理積）素子、少なくともいずれかが1であれば1とするOR（論理和）素子、入力画像の1, 0を反転するNOT（否定）素子、さらには、減衰した輝度を1になるよう信号再生増幅する素子などが、ブロックを積み上げたかのように配列される。入力画像と参照画像は、これらの素子を通り抜ける間に、所望の演算がなされる。ブール代数により、AND, OR, NOT の基本論理素子があれば、その組み合せによりすべての論理演算を行えることが知られている。図で

は画像Aと画像Bの排他的論理和 A EXOR B を示してある。

演算結果は、二次元フリップフロップ・メモリに記録される。この演算結果は、さらに次の演算に向けてメモリ内で待機している。これらの各演算・処理素子は、アルゴリズムに従った各命令（時系列）に沿って駆動される。

4.2 並列ディジタル光論理素子

それでは未来の光コンピュータを構成する基本論理素子とはどのようなものであろうか。まず筆者らの開発した光論理素子ファイバ・レーザ・プレート（FLP）²⁴⁾を例にして説明しよう（図-12（a））。

FLP は、Nd ガラス（屈折率 $n=1.55$ ）にガラスクラッド ($n=1.52$) をコーティングした直径 $40\mu\text{m}$ のファイバを約 1 万本配列し、共振器は、発振光が 100%

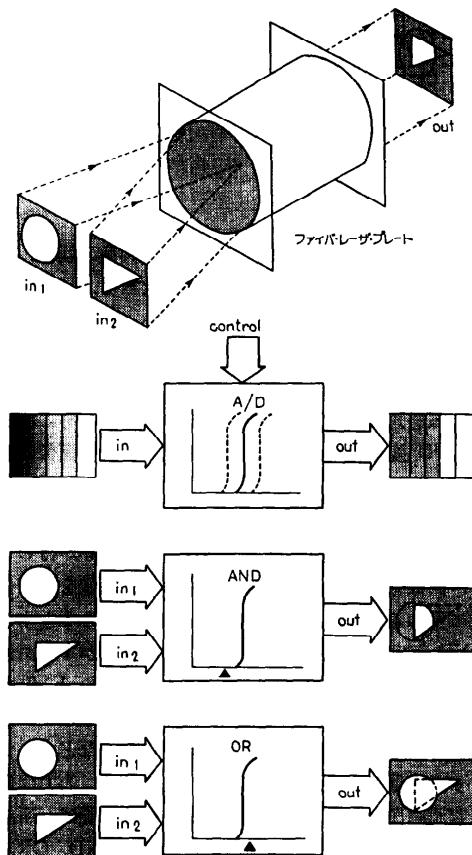


図-12(a) ファイバ・レーザ・プレート
(b) 閾値特性を用いた論理演算原理

反射、励起光が 80% 透過の励起側ミラーと、発振光が 2% 透過、励起光が >90% 反射の出力側ミラーで構成されている。その一端面に光画像を照射して光端面励起（励起光 Rh 6 G 色素レーザ）すると、画像各点の光強度が閾値以上であると、それぞれのファイバがレーザ発振し、指向性の高いレーザ光が画像として放射される。

FLP の急峻な閾値特性、発振遅延特性を利用して、画像に対する A/D 変換、レベルスライシングや、AND, OR, NOT の基本論理演算、および半加算器に必要な EXOR 等の並列ディジタル演算が行える（表-2）。

まず、個々のファイバへの励起光エネルギーを増加していくと、最初は出力光はほぼゼロであるが、閾値に達すると、突如発振し、何桁も高い出力のレーザ光が放出される。つまりこの素子は光論理ゲート（光スイッチ）が一万個並列に配列されていると考えられる。そこで、図-12(b)に示すように、中間調画像を FLP に照射すると、閾値レベル以上の領域のみ発振し、1 と 0 の二値画像に変換され、A/D 変換となる。また、二つの二値画像を、それぞれ閾値よりいくぶん低いレベルで入力すると、二画像中のいずれもが状態 1 である領域のみ閾値を超え発振し、AND 演算がなされる。二画像を閾値より高いレベルで入力すると、その両方の光ゲートが開き、OR 演算となる²⁵⁾。

次に、FLP の発振が励起に対し時間遅れがあり、励起レベルが低いほど時間遅れが大きいという発振遅延特性がある。この特性を、入力光量の差異が時間軸に変換されるものと考えることにより、論理演算が行える（図-13）²⁶⁾。

FLP に中間調画像を入力すると、FLP により閾値以下の領域はカットされ、閾値以上ではそれぞれの明るさに応じた遅延時間を持った画素で構成された画像へと並列的に変換される。FLP の出力側に高速シャッタ素子を置き、励起光パルスに対し適度な遅延時間で適度なパルス幅の高速度ゲーティングを行うと、その遅延時間の発振光のみゲートを通過する。このこと

表-2 ファイバ・レーザ・プレートを用いた
並列ディジタル光演算

	閾値特性	発振遅延特性
前処理	A/D	Level Slicing
基本論理演算	AND OR	NOT
半加算器	CARRY=AND	SUM=EXOR

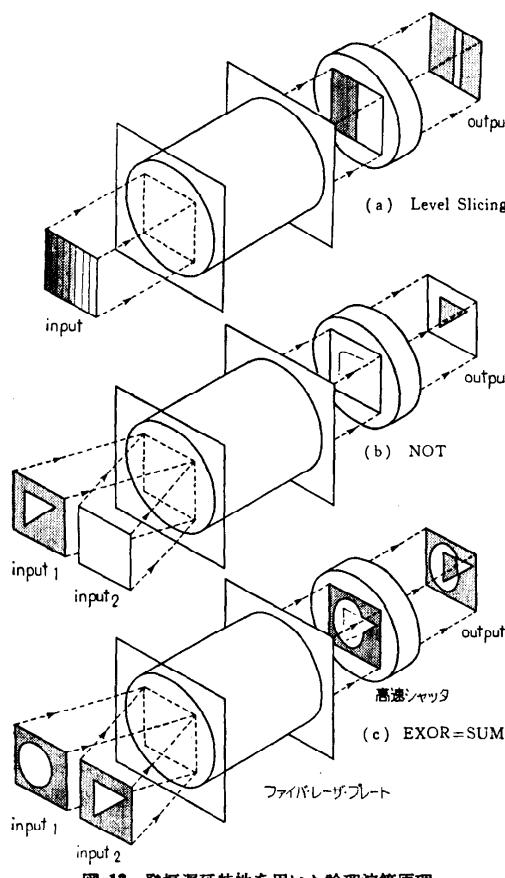


図-13 発振遅延特性を用いた論理演算原理

は、入力中間画像のうち、特定の明るさの領域のみ抽出するレベルスライシングの演算を意味している。

また、入力画像と同時に一様光を照射して全面を発振させると、状態1の領域は直ちに発振し、状態0の領域は遅れて発振するので、ゲーティングによりNOTの演算が実行できる。さらに、二画像を閾値以上のレベルで入力すると、両者の重なった領域は直ちに発振し、ゲーティングによりその領域はカットしてEXORの演算ができる。

ここで、FLPを例にして、並列ディジタル光コンピュータの高速性を説明しよう。試作したものは、約1万本のファイバ（論理ゲート）の束であり、1万回の演算を同時に行なったことに相当する。仮にゲートのスイッチ時間が、これまでの電子計算機の論理回路のスイッチ時間と同じであるとすれば、その演算速度はこれまでより1万倍速い。論理素子を 1024×1024 本配列し、光スイッチにより100倍速いスイッチ時間が

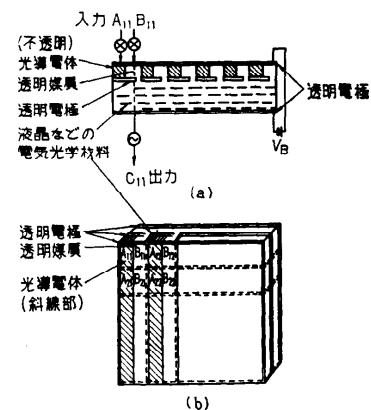


図-14 液晶論理素子

得られれば、あらい話であるが、従来のコンピュータより1億倍も速い光コンピュータが誕生する。

S. H. Lee らは、液晶と光電導体 CdS とを組み合わせたものを二次元状アレーにした並列光論理素子（図-14）を報告しており、この素子を2枚使用して半加算器を並列的に動作させている²⁷⁾。

この素子は偏光子、検光子の間に置かれる。液晶に印加した電圧がある値以下であると、直線偏光した光は、液晶を通過する過程で偏光方向が 90° 回転するが、印加電圧がある値以上になると偏光方向はそのまま透過する。そこで、まず偏光子と検光子の偏光方向が平行である場合を考えよう。

光電導体に光が照射されていない状態、すなわち画像Aの一画素信号 A_{ij} が0の場合は、光電導体の抵抗は高く、液晶にはあまり電圧が加わらない。このため偏光子により直線偏光した画像Bの画素信号 B_{ij} は、液晶により偏光方向が 90° 回転し、検光子を通過できない。ゲートは off である。 A_{ij} が1で、光電導体に光が当たると、印加電圧はすべて液晶の方に加わる。この時、 B_{ij} は偏光方向を保ったまま液晶を通り、検光子を通過する。これは二画像 A, B の AND 対応する。

次に偏光子、検光子を互いに直交（クロスニコル）させると、 B_{ij} は、 A_{ij} が0の時だけ通り抜けられる。すなわち、 $\bar{A} \wedge B$ の演算となる。

この素子を2枚使用すると、半加算器を組むことができる。実験には、画像を分岐したり結合したりするために鏡やプリズムを、また画像を入力するために幾枚かのレンズが使われている。試作した素子は、 8×8 個の論理素子アレーであるが、さらにアレー数を増や

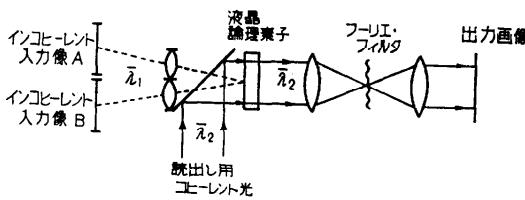


図-15 可変格子液晶論理素子

すことができる。現在の製作技術で、2,000万bit/secの演算速度が得られるとしている。この素子は応答速度は遅いが、並列処理による高速化の効果をよく物語っている。

ある種の液晶には、電圧の印加によりストライプ・ドメインが形成されるものがある。このドメインを、電圧により格子定数が変化できる(100~600cycles/mm)位相格子を見たてることができる。T.C. Strandらは、この性質を持つ液晶に光電導膜を積層して並列論理素子を作っている^{28), 29)}(図-15)。これは、入力画像中の明暗が空間周波数の相違に変換されることになるので、後方に空間周波数フィルタリングを行う光学系を置くことにより、レベルスライシング、AND、OR、EXORなどの演算が可能である。

4.3 双安定光素子

基本論理演算素子のほかに、フリップ・フロップあるいは双安定素子などの二値メモリも計算機に不可欠である。

ここ数年の間に、双安定光素子の研究が急速に活発化してきた^{30)~32)}。この素子はすでに1969年に理論的に予言されていた³³⁾。ファブリ・ペロー共振器の鏡の間に、入射光量がある程度高くなると、急速に光吸収が少くなり光を透過するようになるという性質を持つ可飽和吸収体を置くと、双安定の特性が得られるはずである。1975年、H.M. GibbsらはNaガスを使ってその実験に成功した³⁴⁾。予言では、可飽和吸収を用いるとあったが、効果は分散が入射光量に対し非線型に変化する非線型分散特性の方で生じた。

図-16において、光量に応じて屈折率が変化する材料を置いた共振器に光が入射すると、反共振状態では多重反射する光の波どうしで弱めあって光は共振器をほとんど透過しない。入射光量を増加していくと、屈折率が変化していく、光の位相が変化し、ある時、鏡の間の距離がちょうど光の波長の整数倍となり、共振状態となって光は共振器を通り抜ける。

入射光、透過光の光量をそれぞれ P_i 、 P_t とすると、

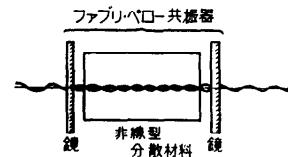


図-16 双安定光素子

透過率 τ は

$$\tau \equiv \frac{P_t}{P_i} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \delta} \quad (1)$$

ここで R は反射鏡の反射率、 2δ は共振器中を一往復する時の光の位相変化である。

一方、非線型分散により屈折率 n は透過光出力 P_t に依存し、 $\delta = 2\pi n o l / \lambda + K P_i$ と書ける(l :共振器長、 λ :光波長)。その結果、透過率 τ は次のようにも書き表わされる。

$$\tau \equiv \frac{P_t}{P_i} = \frac{\delta - 2\pi n o l / \lambda}{K P_i} \quad (2)$$

(1)式と(2)式の連立方程式は図-17に示すようにgraphicalに解が得られる³⁵⁾。すなわち、入射光の増加は(2)式を表す勾配 $1/K P_i$ を持つ直線の傾きを減少していくことに相当し、交点は、A, B, Cと移動し、CからはDへと交点が飛ぶ。次に入射光を減らしていくと、交点はE, D, Fと移動し、FからはBへと飛ぶ。したがって、入射光量と透過率の関係は図-17(b)に示すように履歴現象を示す。

そこで、第一の光を照射して、特性図の点Pに保持した状態0に、第二の光がパルス的に入射すると、点Qの状態1に飛ぶ。第一の光を瞬間に減少すると再び点Pの0の状態に戻る。光による双安定効果であり、1ビットを記憶できるメモリとなる。最近では非線型

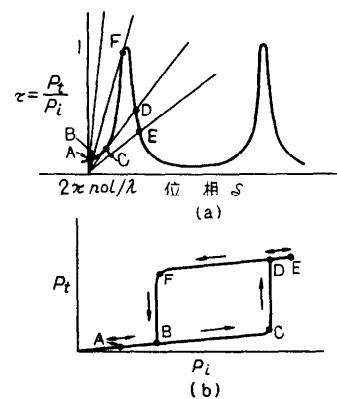


図-17 (a) 式(1), (2)のグラフによる求解
(b) (a)に対応する入出力特性

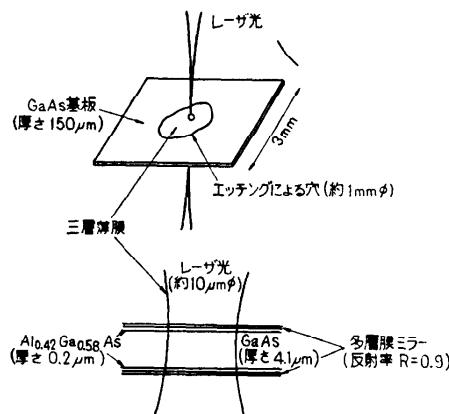


図-18 GaAs 薄膜双安定光素子

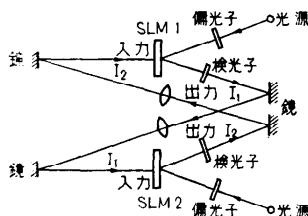


図-19 液晶論理素子を用いた二次元フリップ・フロップ

分散材料として、ルビー³⁶⁾、InSb³⁷⁾、GaAsなど種々のものが検討されている。その多くは時系列的素子であるが、図-18に示すGaAs薄膜を用いた双安定素子³⁸⁾³⁹⁾は、並列ディジタル光コンピュータにふさわしい二次元メモリに発展する可能性があり興味深い。

また、先に示した液晶論理素子を二枚用いて、図-19に示すように、それぞれの出力を互いの入力にフィードバックすることにより、二次元的な双安定光素子が得られることが報告されている³⁹⁾。

これら双安定素子は、現在の段階では、大出力、狭帯域の光源とか、偏光、低温を必要とするものが多いが、一步一步実用素子へと発展していくものと期待される。

5. あとがき

レーザによる情報処理、特に並列処理手法を中心にして述べてきた。対象情報一検出一増幅一演算一認識一指令の情報処理過程は、従来の技術ではすべて一次元的(時系列的)に行ってきた。並列処理手法は、これらの過程を二次元的に行おうとするものである。これは技術を一次元から二次元へと変革させるものである。し

かし、これまで実用化された並列処理装置は必ずしも多くはない。その理由は、次元の変革の困難さにある。電子技術ではごく単純な増幅器も、A/D変換器も、演算素子も、またメモリも、いざ並列素子となると実用的な素子はほとんどない。今後、このような基本構成素子を地道に開発していくことが重要であろう。

本稿後半では、将来の光コンピュータを構成する並列ディジタル光論理素子や双安定光素子などについて述べたが、これらの研究はまだ緒についたばかりである。これまでの光情報処理技術はレンズを主体としたコヒーレント光学系によるアナログ演算技術が中心であったために、ディジタル素子の開発は困難なのである。これらの素子はまだ実用レベルの段階にはきていないが、GaAs半導体薄膜を用いた画像発振レーザ⁴⁰⁾や面発光型半導体注入レーザ^{41),42)}などは効率の高い光論理素子開発への糸口になると期待され、またモノリシックGaAs赤外-可視変換デバイス⁴³⁾などの研究が進めば、波長変換、増幅に関する問題を解決できるかもしれない。

また、仮に実用レベルの光論理素子が開発されたとしても、その並列コンピュータをいかに使うかといったソフトウェアなりアルゴリズムの点に関しては、本稿ではふれなかった。すでに、光剩余コンピュータと呼ばれる並列処理性を生かしたソフトウェア面の提案もなされているが⁴⁴⁾、さらに並列処理にふさわしい新しいソフトウェアの研究が集中的になされる必要がある。

いずれにしても、世の中の要求は一次元から二次元へと大きく流れを変えており、それが困難であっても、今われわれは並列処理デバイス・装置の開発に挑戦していかなければならない時にきている。

参考文献

- 1) Proc. IEEE, Vol. 65, No. 1, Special Issue on Optical Computing (1977).
- 2) Opt. Eng., Vol. 19, No. 2, No. 3, Special Issue on Optical & Digital Processing (1980).
- 3) Stroke, G. W.: IEEE Spectrum, Vol. 9, No. 12, pp. 24-41 (1972).
- 4) 桜井: 計測と制御, Vol. 13, No. 1, pp. 2-9 (1974).
- 5) 島田: テレビジョン, Vol. 31, No. 3, pp. 219-226 (1977).
- 6) Casasent, D.: Proc. IEEE, Vol. 67, No. 5, pp. 813-825 (1979).
- 7) Seko, A., Mitsuhashi, Y., Morikawa, T., Shi-

- mada, J. and Sakurai, K.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 27, No. 3, pp. 140-141 (1975).
- 8) Seko, A.: *Technocrat*, Vol. 11, No. 11, pp. 11-18 (1978).
- 9) Gara, A.: *Appl. Opt.*, Vol. 16, No. 1, pp. 149-153 (1977).
- 10) Casasent, D.: *Proc. IEEE*, Vol. 65, No. 1, pp. 77-84 (1977).
- 11) Mitsuhashi, Y., Sahara, M., Okada, N., Nakajima, M. and Morikawa, T.: *Appl. Opt.*, Vol. 16, No. 5, pp. 1138-1140 (1977).
- 12) Ausherman, D. A.: *Opt. Eng.* Vol. 19, No. 2, pp. 157-167 (1980).
- 13) Seko, A., Niikura, T. and Kobayashi, H.: *Appl. Opt.*, Vol. 19, No. 15, pp. 2507-2512 (1980).
- 14) 世古: ASCII, Vol. 4, No. 9, pp. 91-95 (1980).
- 15) 石原, 島田, 桜井: 信学誌, Vol. 64, No. 1, pp. 89-94 (1981).
- 16) 桜井, 三橋: 電子技術, Vol. 10, No. 2, pp. 33-37 (1968).
- 17) Koester, C. J. and Snitzer, E.: *Appl. Opt.*, Vol. 3, pp. 1182-1186 (1964).
- 18) Kapany, N. S., et al.: *Optical and Electro-Optical Information Processing*, J. J. Tippett et al., Eds. (MIT Press, Cambridge), p. 305 (1965).
- 19) Kosonocky, W. F.: *Optical Processing of Information*, p. 255, Spartan Books, Baltimore (1963).
- 20) Lasher, G. J.: *Solid-State Electron.*, Vol. 7, pp. 707-716 (1964).
- 21) Nathan, M. I. et al.: *J. Appl. Phys.*, Vol. 36, pp. 473-480 (1965).
- 22) Goldberg, L. and Lee, S. H.: *Appl. Opt.*, Vol. 18, No. 12, pp. 2045-2051 (1979).
- 23) Schaefer, D. H. and Strong, J. P.: III, *Proc. IEEE*, Vol. 65, No. 1, pp. 129-138 (1977).
- 24) Seko, A. and Sasamori, A.: *Appl. Opt.*, Vol. 18, No. 12, pp. 2052-2055 (1979).
- 25) Seko, A.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 37, No. 3, pp. 260-262 (1980).
- 26) Seko, A. and Murakami, K.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 38, No. 7, pp. 494-496 (1981).
- 27) Athale, R. A. and Lee, S. H.: *Opt. Eng.*, Vol. 18, No. 5, pp. 513-517 (1979).
- 28) Chavel, P., Sawchuk, A. A., Strand, T. C., Tanguay, A. R. Jr. and Soffer, B. H.: *Opt. Lett.*, Vol. 5, No. 9, pp. 398-400 (1980).
- 29) Soffer, B. H., Boswell, D., Lackner, A. M., Tanguay, A. R. Jr., Strand, T. C. and Sawchuk, A. A.: *SPIE*, Vol. 218, pp. 81-87 (1980).
- 30) Gibbs, H. M., McCall, S. L. and Venkatesan, T. N. C.: *Optics News/Summer*, pp. 6-12 (1979).
- 31) 花村: 応用物理, Vol. 49, No. 4, pp. 387-394 (1980).
- 32) 伊藤, 稲場: 信学誌, Vol. 63, No. 10, pp. 1025-1027 (1980).
- 33) Szoke, A., Daneu, V., Goldhar, J. and Kurnit, N. A.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 15, pp. 376-378 (1969).
- 34) Gibbs, H. M., McCall, S. L. and Venkatesan, T. N. C.: *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 36, pp. 1135-1137 (1976).
- 35) Smith, P. W., Turner, E. H. and Maloney, P. J.: *IEEE J. Quantum Electron*, Vol. QE-14, No. 3, pp. 207-212 (1978).
- 36) Venkatesan, T. N. C. and McCall, S. L.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 30, No. 6, pp. 282-284 (1977).
- 37) Miller, D. A. B., Smith, S. D. and Johnston, A.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 35, No. 9, pp. 658-660 (1979).
- 38) Gibbs, H. M., Venkatesan, T. N. C., McCall, S. L., Passner, A., Gossard, A. C. and Wiegmann, W.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 34, No. 8, pp. 511-513 (1979).
- 39) Sengupta, U. K., Gerlach, U. H. and Collins, S. A.: *Opt. Lett.*, Vol. 3, No. 5, pp. 199-201 (1978).
- 40) Seko, A. and Nishikata, M.: *Appl. Opt.*, Vol. 16, No. 5, pp. 1272-1274 (1977).
- 41) Melngailis, I.: *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 6, No. 3, pp. 59-60 (1965).
- 42) 北原, 上林, 若尾, 森本, 伊賀: 信学技報, OQE 78-157 (1978).
- 43) Benecking, H., Grote, N. and Svilans, M. N.: *IEEE Trans. Electron Dev.*, Vol. ED-28, No. 4, pp. 404-407 (1981).
- 44) Huang, A., Tsunoda, Y., Goodman, J. W. and Ishihara, S.: *Appl. Opt.*, Vol. 18, No. 2, pp. 149-162 (1979).

(昭和56年8月14日受付)