

# 新情報処理技術に関する総合的調査研究

## —光コンピュータ・デバイスWG報告書—

平成 3 年 3 月



財団法人 日本情報処理開発協会

この報告書は、日本自転車振興会から競輪収益の一部である機械工業振興資金の補助を受けて平成2年度に実施した「新情報処理技術に関する総合的調査研究」の成果をとりまとめたものであります。





## 序

過去30余年にわたる情報処理技術の進歩は著しく、その成果を支えに社会の情報化も急速に進展し、コンピュータは今やわれわれの社会活動にとって不可欠のものとなった。しかしながら、その利用範囲の拡大や多様化にともない、情報処理機能の一層の高度化が求められ、特に最近では、固定化した逐次処理型の情報処理機能から、人間にとって親和性に富む、より柔軟性の高い知的情報処理機能への変革が、強く期待されるようになった。

このため、従来のコンピュータが不得手とする、人間の脳が行っているような、高度かつ多彩な情報処理の実現に向けて、必要とされる機能、計算原理及び実装技術、さらには、革新的な情報処理技術と社会の係わり等を含めた総合的な調査研究を、平成元年度から開始した。

2年度は、通商産業省における新情報処理技術調査研究委員会の下部機構として、当協会に基礎研究、計算機科学、社会応用の3分科会及び統合型コンピューティングと光コンピュータ・テハイスの2ワーキンググループを設置して調査研究を実施するとともに、大学・研究所への研究委託、海外動向調査等により、21世紀を目指す革新的な情報処理技術がいかにあるべきかを、ニース、ノースの両面から追求し新しいナショナルプロジェクトとしての可能性を検討した。

最後に、本調査研究に多大なご協力を頂いた各分科会及びワーキンググループの委員各位に厚く御礼申し上げる次第である。

平成3年3月

財団法人 日本情報処理開発協会



# 「光コンピュータ・デバイスWG」委員名簿

(順不同)

|     |       |                                       |
|-----|-------|---------------------------------------|
| 主 査 | 神谷 武志 | 東京大学 工学部電子工学科教授                       |
| 副主査 | 一岡 芳樹 | 大阪大学 工学部応用物理学科教授                      |
| 幹 事 | 矢嶋 弘義 | 工業技術院電子技術総合研究所 光情報研究室長                |
| 委 員 | 穂本 能彬 | 東京電力(株) ノシステム研究所 AI 研究室長              |
|     | 浅田 修  | 沖電気工業(株) ヒューマンインターフェイス研究所 文書処理研究室長    |
|     | 伊賀 健一 | 東京工業大学 精密工学研究所教授                      |
|     | 石川 正俊 | 東京大学 工学部計数工学科助教授                      |
|     | 石田 宏司 | (株)日立製作所 中央研究所第10部 主任研究員              |
|     | 石原 聡  | 工業技術院電子技術総合研究所 光情報研究室主任研究官            |
|     | 笠原 健一 | 日本電気(株) 光エレクトロニクス研究所 研究課長             |
|     | 上條 健  | 沖電気工業(株) 半導体技術研究所 光部品研究室長             |
|     | 河合 滋  | 日本電気(株) C & C 情報研究所 パターン認識研究部 主任      |
|     | 久間 和生 | 三菱電機(株) 中央研究所 量子エレクトロニクス研究部 グループマネージャ |
|     | 武内 喜則 | 松下技研(株) 研究開発グループ 主任研究員                |
|     | 外山 正春 | 川崎製鉄(株) L S I 事業部 副事業部長               |
|     | 中神 隆清 | (株)富士通研究所 通信・宇宙研究部門 主管研究員             |
|     | 中村 優  | (株)東芝 総合研究所 電子部品研究室 主任研究員             |
|     | 林 佑三  | 日本電信電話(株) 情報通信処理研究所 主幹研究員             |
|     | 廣瀬 全孝 | 広島大学 工学部電子物性工学科教授                     |
|     | 谷田貝豊彦 | 筑波大学 物理工学系助教授                         |
|     | 和田 修  | (株)富士通研究所 電子デバイス研究部門 主管研究員            |





## 目 次

|       |                                  |    |
|-------|----------------------------------|----|
| 1     | 序と概要                             | 1  |
| 1 1   | 序文                               | 1  |
| 1 2   | 概要                               | 2  |
| 1 3   | 調査の経過                            | 4  |
| 2     | 光コンピュータのニース                      | 7  |
| 2 1   | まえかき                             | 7  |
| 2 2   | 21世紀社会における光コンピュータへの期待            | 7  |
| 2 2 1 | 21世紀社会の展望                        | 7  |
| 2 2 2 | 新しい社会の実現のために期待される光コンピュータ         | 8  |
| 2 2 3 | 21世紀産業分野の展望 —鉄鋼業、電気事業をモデルとして—    | 14 |
| 2 2 4 | 光コンピュータへの期待                      | 18 |
| 2 3   | 未来型情報処理に求められる新機能と光コンピュータ         | 21 |
| 2 3 1 | 3次元情報処理における光技術の役割<br>—前年度調査研究から— | 21 |
| 2 3 2 | 新情報処理と光技術の役割                     | 25 |
| 2 4   | 光コンピュータの応用                       | 27 |
| 2 4 1 | 光並列コンピュータ                        | 27 |
| 2 4 2 | 光ニューロコンピュータ                      | 28 |
| 2 4 3 | 光インタコネクション                       | 28 |
| 2 5   | あとかき                             | 29 |
| 3     | 並列デントル光コンピュータ                    | 31 |
| 3 1   | はしめに —なせ並列デントル光コンピュータか—          | 31 |
| 3 1 1 | 並列光コンピュータとは                      | 31 |
| 3 1 2 | 並列デントル光コンピュータの必要性                | 31 |
| 3 2   | 並列デントル光コンピュータの現状                 | 33 |
| 3 2 1 | 基本的な並列光演算原理                      | 33 |
| 3 2 2 | 並列光アレイロノクシステム (OPALS)            | 36 |
| 3 3   | 並列デントル光コンピュータの実現を目指して            | 44 |
| 3 3 1 | 並列デントル光コンピュータのアーキテクチャ            | 44 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 3 3 2 | 並列光コンピュータ用の演算原理                   | 46  |
| 3.3 3 | 並列光演算システム用光機能デバイス、プロセス、<br>設計製作技術 | 47  |
| 3 4   | むすび                               | 68  |
| 4     | 光ニューロコンピュータ                       | 71  |
| 4 1   | ニューロコンピュータと光技術                    | 71  |
| 4 1 1 | ニューラルネットワークの原理                    | 71  |
| 4 1 2 | ニューラルネットワークに期待される機能と応用            | 73  |
| 4 1 3 | 専用ハードウェアの必要性和展望                   | 75  |
| 4 1 4 | 光技術の優位性                           | 77  |
| 4 2   | 光ニューロコンピュータの現状                    | 78  |
| 4.2 1 | 光ニューロモデルの現状と課題                    | 78  |
| 4 2 2 | 光ニューロデバイスの現状と課題                   | 82  |
| 4 2 3 | 光ニューロシステムの現状と課題                   | 86  |
| 4 3   | 光ニューロデバイス・システムの今後と要素技術            | 90  |
| 4 3 1 | 光ニューロコンピュータの将来像                   | 90  |
| 4 3 2 | 光技術に適したニューロモデル                    | 92  |
| 4 3 3 | 光ニューロデバイスと要素技術                    | 93  |
| 4 3.4 | 光ニューロシステム技術                       | 103 |
| 4 4   | 実証システムのイメージ                       | 105 |
| 4 4 1 | 光ニューロデバイス                         | 105 |
| 4.4 2 | 光ニューロシステム                         | 106 |
| 5     | 光インタコネクション                        | 109 |
| 5 1   | まえかき                              | 109 |
| 5.1 1 | 光インタコネクションの必要性和特徴                 | 109 |
| 5 1 2 | 光インタコネクションの要件と分類                  | 110 |
| 5 2   | 多重化光インタコネクション                     | 112 |
| 5 2 1 | 多重化方式                             | 112 |
| 5 2 2 | 光ファイバ結合を用いた多重化光インタコネクション          | 114 |
| 5 2 3 | 自由空間結合を用いた多重化光インタコネクション           | 116 |
| 5 3   | 柔軟接続光インタコネクション                    | 118 |
| 5 3 1 | 光インタコネクションにおける柔軟性                 | 118 |
| 5 3 2 | 層間光結合を用いた柔軟接続光インタコネクション           | 119 |
| 5 3 3 | 自由空間結合を用いた柔軟接続光インタコネクション          | 122 |
| 5 4   | 光インタコネクションの将来                     | 131 |
| 5 4 1 | 将来研究の方向                           | 131 |
| 5 4 2 | 将来技術                              | 132 |
| 6     | あとかき                              | 135 |

# 第 1 章

## 序 と 概 要



# 第1章

## 序と概要

### 1.1 序 文

新情報処理技術では‘柔らかな情報処理’をパラタイムとして、その展開を図ろうとしている。そこでは“論理的”情報処理と“直感的”情報処理の統合を命題に、その技術的手法として従来の“逐次”的な情報処理に代り、“分散と協調”、あるいは“並列で柔軟”で表現される新しい情報処理の実現を目指している。

新情報処理技術における光技術の位置付けは、情報媒体としての光の特徴を活かし、新情報処理が目指す情報パラタイムの実現に必要なソールを提供することにある。

光技術は、エレクトロニクスかハースの情報処理技術か由来直面するであろう困難を補うものとして期待されている。光の情報媒体としての特徴か高速な逐次処理だけでなく、空間、波長軸における超並列処理を可能にし、新情報処理が目指す“分散と協調”、あるいは“並列で柔軟”な処理の実現に大きく貢献することか期待されるからである。

平成元年度の調査では、新情報処理の実現に必要なデハイス技術全般の中で、光の持つ大容量性、空間・波長並列性といった情報媒体としての優れた特徴を明らかにし、それらを情報処理システムの中に取り入れる方法として光インタコネクション、超高速光演算、超並列光演算、光ニューロ演算等について、その可能性を調査した。

本年度はさらに一歩進め、統合型コンピューティングが目指す新しい情報処理パラタイムとしての“分散と協調”、あるいは“並列で柔軟”に対応する光技術について、その実現イメージとその研究開発課題について詳細な調査を行なった。

すなわち、分散（並列）に対応する光情報処理システムイメージとして並列デントタル光コンピュータを、また協調（柔軟）に対応する光情報処理システムイメージとして光ニューロコンピュータを取り上げた。そして、これらを支える基盤技術として光インタコネクション技術を位置付けている。

本報告書は6章からなり、以下各章の概要を示す。

#### 第1章 序と概要

新情報処理に適するハードウェア技術への期待と光コンピュータ・デハイス研究の戦略について概観する。

#### 第2章 光コンピュータのニース

21世紀社会にける情報化社会の展望と、そこにおける光技術、光コンピュータ技術への期待を述へる。

#### 第3章 並列デントタル光コンピュータ

光の超並列性を活かした汎用並列光計算機研究の現状と、その実現へ向けたアーキテクチャ、デバイス等の開発ナリオを論ずる。

#### 第4章 光ニューロコンピュータ

ニューラルネットワークとして動作する光ニューロコンピュータの実現へ向けて、将来イメージとその実現に必要な要素技術を論ずる。

#### 第5章 光インタコネクション

将来の光情報処理技術におけるインフラストラクチャとしての光インタコネクション技術について分析し、必要な技術開発課題について論ずる。

#### 第6章 あとかき

## 1 2 概 要

### (1) 新情報処理に適するハードウェア技術への期待

現代のVLSI技術の進歩は目覚しく留まるところを知らないようであるが、電子デバイスの超高速化に伴って「配線のボトルネック」と呼ばれる困難が見え始めて来た。すなわちLSIチップ内の電氣的配線に付随する寄生容量が1ピコファラドの桁とし、線路の特性インピーダンスを50オームと仮定するとCR時定数は50ピコ秒 ( $5 \times 10^{-11}$ ) となり、現在の最速のトランジスタのスイッチ遅延時間より数倍長くなる。一方超LSI技術はチップサイズの増大の方向 (Wafer Scale Integration WSI) へと向かっており、配線遅延の問題は益々深刻になると予想される。

このように四半世紀単位の予測として既存のコンピュータ設計手法が行き詰まる、といえる。これを解決するための模索が新情報処理システムの検討として多くの専門家の関心事となってきた。ことに「超分散処理マシン」への期待が高い。これは中央集権的に論理ステップを管理するかわりに、ローカルに信号処理を実行し周囲とコミュニケーションしながら作業してゆくマシン、を意味する。これによって今までより桁違いに複雑な問題を並列的に処理することが可能になったり、これまでのコンピュータのもつ融通の無さを学習、類推などで回避する「柔らかなコンピュータ」が実現されることか期待されている。

このような新世代のコンピュータハードウェアを担うデバイスに期待される特性としては、(A) 並列アクセス、並列出力の可能なデバイス、(B) 隣接演算単位とのフレキシブルな情報交換の可能な素子構造、配列方法の採用、(C) 大規模集積化への適合性、(D) 単一素子あたりにつき高速性、低消費電力性を兼備、などがあげられる。

ここで問題となるのはこれまでに膨大な努力を注いで開発が進められた電子デバイス、VLSIの分野でこれからも抜本的な飛躍、発展が望めるのであろうか、という疑念である。具体的には新デバイスのリソース (発展の余地の大きい技術資源) が見込めるか、という質問になるか、新素材リソース (シリコンベース超格子、化合物半導体、超伝導体、有機分子材料)、新製造プロセスリソース (放射光リソグラフィに象徴される超微細構造製造技術)、新デバイス原理リソース (Hopfieldモデルなどのニューロエレメントのデバイスの実現、光-光制御素子など)、新回路構成法リソース (並列入出力可能な回路形式、超高速+超並列回路構成法)、などこれまでに十分検討の行き届いていない未開拓の分野が極めて多いと感ぜられる。

## (2) 光技術の特質を生かした情報処理ハードウェアはなにか

特に情報媒体としての“光”の特質について考えると、高速(時間軸)、並列(空間軸)、並列(波長軸)、低損失空間伝搬+光カイト、無誘導性、光配線、などかあけられる。広義の情報処理集積回路に光信号を持ち込もうとする考えはまったく新しいものではないか、前述のようなVLSIの配線の輻輳の困難を解決するために特に高いビットレートのデンタル回路において有望とする考えか強まってきている。この観点から光技術の本質的な特徴を表現するならば、まず光は周波数の極めて高い電磁波のヒームであるから電子ヒームと比べると物質との相互作用は穏やかであり、したかつて静電誘導によるCR時定数に相当するものはない。また光をキャリアとする波形の伝達においては包絡線のフーリエ成分は光の周波数の近くまで及ぼすことかできるから極めて短い幅のパルス波形を発生、伝達することも可能である。短い幅のパルス信号は時間軸上に高密度で詰め込むことか原理的には可能であり、時分割多重(Time Division Multiplexing TDM)に適する。また光信号を電気信号と比較すると信号をパターンの形で表現できる特徴かある。これは信号伝送においては空間分割多重(Space Division Multiplexing SDM)への道を与えるものであり、コンピュータへの適用においては並列論理演算への手かかりとなるものである。さらに光のもつもう1つの多様性として色による区別かある。近年光通信の多重方式の1つとして波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing WDM)の重要性か認識されているか、これは1本のファイハの中に異なるスペクトルのキャリアを伝搬させる方法にほかならない。以上を総合すると、光による情報伝達・処理の多重化をフルに活用すればテラビット／秒の桁の超高速処理か可能と予想できる。このような光のもつ潜在的な能力をVLSI技術といかに融合させるかについての検討を本格的に遂行することか必要と考える。

## (3) 光コンピュータ・デバイス研究の戦略

以上のように新しい情報処理技術の主要な要素技術として新世代の光技術への期待、とりわけ超LSI技術との融合に関する新技術開発への要求か強いのか、これを直ちに新構想の大規模光コンピュータプロジェクトとすることか賢明とは思われない。それは新要素技術のもつリスクと光コンピュータアーキテクチャ研究のもつリスクか同時的に重荷となる可能性かあるからである。

一方光技術のうち産業技術として成熟度の高い領域は光通信の分野であり、通信技術を活用してコンピュータネットワークをさらに高度化して行こうとする努力は近未来技術としてすでに始まっている。これをさらに押し進め、コンピュータまわりやコンピュータの内部の配線に光の伝送技術を及ぼして行こうとする技術開発への関心はきわめて高い。この領域は光インタコネクション技術とよはれているか、これらの努力と光コンピュータ要素技術開発の努力は重なる部分か大きいことをわれわれの調査研究の中で強く認識してきた。

研究の持続性の必要、と最終的な目標を高く掲げることへの要望、をともに満たす共同研究の進め方として、光インタコネクションから光コンピュータへ、の経路(パス)をとることか現実的な進め方であると考え。この道はあらかじめよく分かった1本の太い道ではなく、多くの可能性の模索と多くの基礎技術の新たな組合せを含む網目状の道であることか予想される。これらをよく認識した上で研究プロジェクトの前半では複数の可能性

を同時に追求しやすい研究体制をとり、後半に至って次第に明らかになってくる太い道を加速的に踏み固めてゆく体制に移行してゆくことが望ましい。

### 1 3 調査の経過

光コンピュータ・デバイスWGでは、本年度実施すべき調査内容の確認を行ったのち、効率的な調査活動を行うためのWG体制について検討した。その結果、前年度報告書の具体化・詳細化を進めるためには、WGをサブグループに分割し議論を専門化する必要があるとの認識で合意が得られた。本WGの担当する調査内容、WGの委員構成を勘案し、光情報処理技術Sub-WG、デンタル光並列コンピュータSub-WG、光ニューロコンピュータSub-WG、光インタコネクションSub-WGの4つのサブグループに分け、調査活動を進めることとした。各サブグループからの意見・提案については、WG全体会議をつうじて合意を図った。具体的な活動状況は以下に示す通りである。

#### 光コンピュータ・デバイスWG

##### 第1回 [9/5(水)] 12 00 ~ 15 00

- 1 主査の挨拶、各委員の自己紹介
- 2 平成2年度調査研究について(通産省)
- 3 WGの調査研究方針並びにWGの進め方について

##### 第2回 [10/16(火)] 14 00 ~ 17 00

- 1 Sub-WG構成についての説明および検討
- 2 海外調査の概要報告
- 3 国際ワークショップ/国際シンポジウムの招待候補者の検討
- 4 各Sub-WGからの問題提起

##### 第3回 [11/2(金)] 15 30 ~ 17 00

- 1 各Sub-WGからの報告と意見交換
- 2 今後の予定

##### 第4回 [11/20(火)] 15 30 ~ 17 00

- 1 各Sub-WGから検討事項についての報告と討議
- 2 OPTCON'90の概要報告
- 3 WG報告書について

##### 第5回 [12/10(月)] 20 00 ~ 21 00

- 1 国際ワークショップの報告
- 2 各Sub-WGから報告書目次案についての説明



第6回 [ 1/28 (月) ] 14 00 ~ 16 30

- 1 WG報告書案について

第7回 [ 2/18 (月) ] 17 30 ~ 20 00

- 1 WG報告書案について

#### 光情報処理技術Sub-WG

第1回 [11/ 2 (金) ] 13 30 ~ 15 15

- 1 Sub-WG調査（光コンピュータのニーズ）の進め方について
- 2 今後の調査計画

第2回 [11/20 (火) ] 13 30 ~ 15 15

- 1 委員からの報告と検討
  - ・光コンピュータのニーズ
  - ・21世紀、光技術に対するニーズ
- 2 Sub-WG報告書目次案について
- 3 国際ワークショップにおける発表用資料について

第3回 [12/10 (月) ] 17 30 ~ 19 45

- 1 国際ワークショップの報告
- 2 Sub-WG報告書目次案について

第4回 [ 1/28 (月) ] 13 30 ~ 14 00

- 1 Sub-WG報告書案について

#### デジタル光並列コンピュータSub-WG

第1回 [11/ 2 (金) ] 13 30 ~ 15 15

- 1 調査項目と方針について

第2回 [11/20 (火) ] 13 30 ~ 15 15

- 1 開発目標、開発要素、技術体系、研究開発フローについて
- 2 OPALSの構成と原理について
- 3 国際ワークショップにおける発表用資料について

第3回 [12/10 (月) ] 17 30 ~ 19 45

- 1 国際ワークショップの報告
- 2 Sub-WG報告書目次案について

## 光ニューロコンピュータSub-WG

第1回 [11/2(全)] 13 30 ~ 15 15

- 1 調査の項目と方針について
- 2 個別検討課題の割り振り

第2回 [11/20(火)] 13 30 ~ 15 15

- 1 全体課題について
- 2 個別検討課題の報告と討議
- 3 国際ワークショップにおける発表用資料について

第3回 [12/10(月)] 17 30 ~ 19 45

- 1 国際ワークショップの報告
- 2 Sub-WG報告書目次案について

第4回 [1/9(水)] 13 00 ~ 17 00

- 1 Sub-WG報告書案について

## 光インタコネクションSub-WG

第1回 [10/23(火)] 14 00 ~ 17 00

- 1 Sub-WG活動方針について
- 2 今後の調査計画について

第2回 [11/20(火)] 13 30 ~ 15 15

- 1 光インタコネクションの分類について
- 2 3次元光メモリについて
- 3 国際ワークショップにおける発表用資料について

第3回 [12/6(木)] 11 30 ~ 13 00

- 1 Sub-WG報告書目次案について

第4回 [12/10(月)] 17 30 ~ 19 45

- 1 Sub-WG報告書案について

## 第 2 章

### 光コンピュータのニース



## 第2章

### 光コンピュータのニーズ

#### 2.1 まえがき

光コンピュータに何か求められているか？ 一口で言えば、これが本章に与えられた課題である。しかしながら、以下の各章でも示されているように、光コンピュータ自体の具体的な仕様や設計書が既にてき上かっているわけではない。したかつて、現時点で光コンピュータの応用を詳細に論ずることは不可能ではあるか、本章ではあえて、光コンピュータ技術によって実現されるであろう21世紀社会の諸相の展望を試みしてみる。

以下、まず2.2節では、社会応用分科会や通産省関連機関における、将来の情報処理ニーズに関する展望などを参考にしながら、21世紀社会における光コンピュータに期待されるものを探る。特に、これらの過去の調査研究ではあまり触れられていなかった産業応用に関して、委員が関係する分野を例にとりて未来形システムへの具体的な期待を描く。2.3節では、「3次元」というキーワードを軸として将来の情報技術を展望した、昨年度のユニークな調査研究の成果を、光コンピュータの観点から整理し直し、さらに新情報処理技術と光コンピュータ技術との関わりを検討する。最後に2.4節では、以下の各章で詳述される、3つの代表的な光コンピュータ技術について、それぞれの応用の可能性をまとめてみる。

#### 2.2 21世紀社会における光コンピュータへの期待

##### 2.2.1 21世紀社会の展望

日本の経済や社会、およひそれを取り巻く環境は大きく転換しつつあり、このような時期に産・官・学に求められるものは、大局を踏まえて21世紀社会の方向性を鋭く分析、予測する能力と、予想される変化を先見的にとらえ柔軟に対応策を展開することにある。

間近にせまってきた21世紀を、高度情報ネットワーク社会の実現という視点を中心に展望すると次のようなことか言える。

##### (1) 経済

経済、産業のあらゆる面で国際化が一層進展し、経済活動はますます国境を意識しないダイナミックな展開となる。特に、技術革新の柱といわれるエレクトロニクス、新素材、ハイオなどの先端技術が期待とおりの威力を発揮し、あらゆる分野に浸透することによ

て、産業社会の活性化と新たな市場創出に貢献する。さらに全産業分野を通して、いわゆるソフト化、サービス化の傾向が持続的に進展する。

## (2) 社会

諸外国に例を見ないほど一段と高齢化が進み、社会のすみすみにまで多様な変化が現れてくる。また女性の社会進出も一層活発化し、我々の生活スタイルの変化も多面的に進むだろう。21世紀を特徴つける高度情報化社会の到来は、全国すみすみにまで張り巡らされた高度情報ネットワークにより、活発な情報流通と自由な情報選択が可能になる。これとあいまって、事務所ビル、工場などの職場環境の改善が大幅に進み、OA機器の増加に伴うスペースの拡大、空調の高度化、インテリジェントビルの増加などか、社会の全体的な流れとなっていく。

都市化は著しく進展するか、情報化の進展に伴う都市と地方の相互補完システムの形成、地方都市の国際化などにより、産業、人口の大都市圏への集中化傾向は鈍化し、集中と分散のバランスのとれた社会構造が実現するだろう。

## (3) 生活

生活のヘースとなる住宅の規模、および質の両面で欧米水準に近づくことが期待される。とりわけエレクトロニクス、情報処理技術の高度化により、空調、厨房、給湯などの設備は大幅にインテリジェント化する。

また、衣食住の基礎的な生活条件が充足することにより、国民のアメニティ指向が強まり、景観保護や緑地整備など地域環境、広くは地球環境向上のための対策が一層求められるであろう。さらに安全と健康を重視する傾向がますます高まり、人々の生活環境に対する意識だけでなく、もの・サービスの消費行動にも大きな影響が表れる。ホームオートメーションの普及、充実により、家事労働の軽減などもあって旅行、趣味、スポーツといった余暇活動が活発になる。

## 2 2 2 新しい社会の実現のために期待される光コンピュータ

以上のような高度情報ネットワーク社会を実現するために新情報技術としての光コンピュータに期待されるものは、まず第一にコンピュータの扱えるデータ量の量的な拡大とその高速性である。現在計算能力の不足からきている、もしくは経済的にペイしないとされていることも、光コンピュータに期待されている大容量・超高速性により実現できる可能性がある。第二に質的な面でのブレークスルーが期待される。光の並列性、アナログ性を用いて、現在の逐次処理的なコンピュータの限界が突破できそうである。この方向では、光ニューロコンピュータの試みなどか現在行われている。また量的な拡大がある時点で質に変換する効果も忘れてはならない。以下、次世紀の情報ネットワーク社会を想定し、そのニーズを探ってみる。

### 2 2 2 1 さらに情報化社会のために

我々は今後ますます大量の情報の洪水の中で生活するようになる。このような生活環境

の中で必要な情報を的確にコントロールしていくためには、次のような技術が必要である。

### (1) コンピュータのネットワーク化

昨今、コンピュータはかなり身近なものとなったか、今後この傾向は一層強まり、生活の場の至るところにコンピュータが設置され、それが電話線、有線、無線、通信衛星を通して有機的に接続されるようになるだろう。コンピュータは自動車やテレビと同様あたりまえのものとなり、ちょっと水道をひねると水かてるのと同じような感覚でコンピュータが使える時代が到来すると考えられる。

そのためには、まずインフラとしての通信ネットワークの整備が必要である。従来は各企業、各研究団体、各産業団体等での1つのコンピュータシステム内での閉じられたネットワークであったか、専用回線網あるいは公衆回線網で結合された開かれたネットワークが要求される。そしてその回線網の通信容量は今以上に大きなものでなくてはならず、またその回線を通しての情報のやり取りが安価でなくてはならない。光のもつ高速、高信頼性、同報性、大容量を活かした通信技術の進歩が不可欠となり、さらに膨大な情報量の通信が安価にできるような大規模光ファイバ通信ネットワークの実現が必要となろう。

ネットワーク中の個々のコンピュータの使われ方は大きくわけて2つある。第一は、個人専用のコンピュータとして文書作成、小規模のデータベース、データ処理等を始めとした仕事をスタントアロンで行うものである。もちろん現在のパソコンよりも性能的には上位のもので、速度、メモリ容量、マスストレージ容量など、より一層の能力を有するものである。

別の機能として、高速・大容量の通信機能が要求されよう。ネットワークを用いて他のコンピュータと互いに協調しあって仕事を処理したり、自分自身でできない仕事を特殊な仕事に最大の能力を発揮するコンピュータにまかせたりして仕事を行うのである。こういった分散協調システムの前提は高速な通信能力であり、ここでも光通信の技術に頼らねばならない。

### (2) 数値情報以外のものの取扱い

ネットワーク環境でコンピュータを使う時、個々のコンピュータをある意味での入出力機器と見ることかてきよう。つまり、回線網を経由して他のコンピュータにデータを渡したり、もらったりするわけである。ホスト的なコンピュータのデータベースへのアクセスも多くなろう。この時、単なる数値情報や文字列だけでなく、図形情報、3次元も含めた画像情報、音声情報、手書きの情報も扱いたくなる。いわゆるマルチメディア情報である。音声や画像のデータベース、声の付いた文書、ビデオの付いた書類も電子メール等で普通のものになる。これらは、在宅勤務、サテライト・オフィスを実現のものとするための欠くことのできない技術である。

### (3) 大容量メモリ、超マスストレージの実現

図形を扱うというだけでもその処理すべき情報量は大幅に増えるので、まずメモリの大容量化の進歩が望まれる。現状の光ディスクの高速化、大容量化、消去／再書き込み可能化はもちろんのこと、メモリに関してもたとえば大容量高密度波長多重メモリの実用化や、

基本的なデータを2次元情報（上記のひとコマ）とした、光のままにインタフェースのとれるホログラムメモリ（ホログラフィ3次元素子+面発光レーザ）の直接組み込みによる大記憶容量が実現されるのではないか。

（4）大容量データのデータヘースの実現　－曖昧情報を曖昧なまま扱い、曖昧なキーワードで検索できる技術－

次はそのメモリからの高速の検索が可能となる技術である。また単なる高速化だけでなく、曖昧検索技術の実用化も必要となる。不確かなキーワードからの検索、図形、画像の検索などメディアの多様化とユーザインタフェースの改善の面から必要となろう。光の波動性、アナログ性を用いた曖昧高速検索が可能な光メモリが期待される。検索技術だけでなく、曖昧なものを曖昧なままに扱う技術も必要である。

（5）欲しい情報だけを取り出す技術

様々な情報が入手可能となると、今以上の情報の洪水となる。多すぎる情報をふるい分け、必要とする情報のみを必要かつ十分に得る方法が必要になる。ある意味での情報のフィルタ、情報のマクロ化であるか、大量の情報のフィルタ処理にはやはり光技術が有効ではなかろうか。これと関係してミクロな素情報を任意の粗さでマクロ化する技術が必要である。大量の情報を見るための電子的ズームレンズといってもよいかもしれない。情報の圧縮、拡大が自由にでき、どのスケールにおいてもそれが表現するものか元の情報のマクロ的な意味をなすことか望まれる。面（2次元）的なデータを扱え、そのアナログ処理が可能な光の可能性に期待できないだろうか。

（6）知識処理実用化

ここ10年AIがブームとなってきたか、本当の実用化には様々な解決すべき問題があることが明らかになってきた。コンピュータの記憶容量の制限、膨大な記憶からの超高速探索そして知識の獲得、表現や学習をいかに実現するかである。コンピュータの飛躍的な高速化、並列化、大容量化が実現することにより進歩が期待できるものとして、メモリの問題と超高速検索があげられよう。ソフトウェア的に解決すべき問題も多いか、ハードの進歩が新たな展開を招くこともあり、光技術に期待したい。

（7）コンピュータを意識させないトランスペアレントなコンピュータ

現在のコンピュータの問題点として、よく指摘されるものにヒューマンインタフェースがある。一人一台のコンピュータが当り前のものとなり、自動車やビデオのように非専門家も抵抗感なく使えるようになるために解決すべき点は多い。さらに今後は、単なるインタフェースの問題だけでなく、ネットワーク化によりすべての物が分散普遍化するため、ローカル（局所的）なものは少なくなる一方、個々のコンピュータはより一層パーソナル（個別化）するだろう。巨大なコンピュータネットワークとその上に散在する膨大なデータを前にして、ユーザが一体何をしたいのか、目的を実現するためにいかにすればよいのかを支援する、気のきいたシステムが望まれる。電子秘書、電子執事、電子親方とても言うべき物であるか、エキスパートシステムの高度に発展したものと考えてもいい。



以上に例示したような多彩なニーズに応えるために、光技術に期待されるものは大きい。通信に関しては、前述のように光ファイバ通信の発展が不可欠であるし、大容量メモリとマストレーン、そしてそこからの情報検索には光技術が大きな要素となろう。そして個々の仕事について扱わなければならない情報量の肥大化に伴い、現在の電氣的なノリコンによる素子をベースとしたコンピュータでは量の面、スピートの面で限界を生じ、光を情報のキャリアとする「光コンピュータ」が必要となる。もちろん、現在の電子的素子、技術を光に置き換えても、コンピュータのアーキテクチャそのものが従来の逐次処理であれば、結局いくらか速くなってノイズに強くなったというだけであろう。もっとスピートをあげ、大量のデータを扱えるようにするために光の持つ並列性を積極的に使ったコンピュータアーキテクチャが必要である。高速の画像処理には特にこの必要性は高い。光の特徴をより積極的に使うと基本的な素子レベルから並列性を確保できる可能性がある。

## 2 2 2 2 シミュレーション社会のために

高機能、高性能のコンピュータの出現により、我々は仮想環境の中での仮想経験といったものが簡単にできるようになってきている。すべてのものかどこにも存在し、どこからでも何にでもアクセスできるようになる。いわは仮想的なものか現実にとって変わるようなノミュレーション社会での生活が到来する。このような中で必要な技術として、次のようなものか考えられる。

### (1) ノミュレーション機能

一人か一台コンピュータを持ち、それか記号・文書・図形情報を取り扱うことかでき、互いに接続されると、文書を作り、それを複写し、配り、ファイルし、また取り出す、という一般的、基本的な事務作業の効率を飛躍的に向上させることか可能となる。

こういったごく普通の文書作成、事務処理、データベースの完成後に必要な機能はノミュレーション機能である。実際にできないことを仮想的にできるというのはコンピュータの大きなメリットである。従来ノミュレーションは主としてサイエンスやエンノニアリンクで用いられてきたか、オフィスをはしめとする他の分野の業務に取り入れられることにより、従来の手法そのものにも大きな変化、影響を与えるたろう。しかしノミュレーションを精度よく行うには、現実を過不足なく反映した精密なモデルかまず必要である。そして、モデルか精密であればあるほど非常に大きな計算能力か必要となる。現在のスーパーコンピュータは 350MIPS位の速度であるか、ノリコン素子による速さの限界はこれの十倍程度といわれている。飛躍的に計算能力を高めるには前述のように光素子や並列処理能力をもったコンピュータの実現に期待せざるをえない。

たとえば銀座4丁目に支店を作ると、とれたけの利益か見込めるか、顧客の流れはとう変わるか、商品の構成はとうしたら良いか等、いろいろなことか仮想的に、精密にそして事前に実験できるようになろう。電力でも、末端の配電網も含めた電力系統の運用において、最も停電を少なくさせる作業工法は何か良いかといった問題において、現実のデータ収集装置と密着した形でのノミュレータにより系統の運用か的確になろう。

## (2) 仮想環境の実現

シミュレーションは仮想的な実験としてとらえることができるか、この「仮想」的なものかより多くなり、普通になっていくだろう。通貨が金から紙幣、紙幣からクレットカードへと変わってきたように、ますます仮想的なものか現実にとって変わるようになる。オフィスにおけるペーパーレス化も同様である。仮想社会、仮想環境、仮想経験と言ったものか膨大な計算能力をもったコンピュータを背景に実現される。たとえば中央計器室にいなから末端の無人遠隔設備を仮想的に呼び出し、監視、操作かできるようになる（保守を行うにはロボットか必要）。この時、単なる計器情報たけてなく、あたかもその無人遠隔設備にいるかのような、環境の仮想的な実現か望まれる。これはMITて作られたメディアルームの技術の延長線上にある。操作員はその仮想的な、しかし現時点ての実際の設備を100%反映した、無人遠隔設備て的確な対応かとれるようになるろう。設備、工場の無人化には、ロボット化といわゆるテレエクステンションとてもうへき技術か必要である。在宅勤務、サテライト・オフィスといったものもこれか実現されるとごく普通のものとなるはすである。ヘースには光の高速性、大容量性に基ついたコンピュータか不可欠であろう。

## (3) 3次元情報技術

ここては、上に述べたような言わば3次元情報処理技術て必要となる要素技術について簡単に述へる。なお、3次元情報技術については前年度に詳細な調査研究かおこなわれているので、その概要を、節を改め、23節て紹介する。

### (A) 3次元リアルタイム情報処理

情報の伝達は筆記（本）から録音、写真、録画（動画）へと発展してきたか、これをより発展拡張させ、環境や状況、場の記録とそのリアルタイムての通信か必要である。時間も含めた4次元情報の入力、認識、処理、記憶、検索、伝送、出力のための技術である。

### (B) 3次元リアルタイム情報入力、認識装置

テレビカメラは本来同時に見えるはすの1コマを、走査線を使って時間的にスライスして一列に並へている。これは現在のコンピュータの構造にもとつく時間的な繰り返し演算処理には向いた入力装置である。しかし処理速度の飛躍的な改善を行うには、映画フィルムのように1コマを全体として扱い、その1コマことに対し処理てきることか必要である。入力の時点から基本的な素子レベルて並列性を確保てきる可能性かある。

ステレオカメラ等を用いて2次元情報からの3次元情報の抽出か行われているか、ホログラフィの応用により、より直接的に3次元情報の入力か可能となて欲しい。これらの入力装置にもとついて、認識能力も高めて欲しい。見たいものたけをはっきり見ることかてきる、知的なフォーカソク機能もロボットの目の実現のために必要となろう。画像情報そのものは、もともと光学的なものであるので、光学系の処理装置か本質的には向いていてはないか。

### (C) 3次元リアルタイム情報出力装置

出力装置としても、質感、存在感、触覚の表現できるより精緻な出力デバイスが必要である。3次元ホログラフィを応用した、特別な眼鏡のいらない高精度3次元ディスプレイにより、場の再現が可能となる。大中小型の出力装置を組合せ、部屋全体を環境の再現装置としたものを実現させて欲しい。高度なコンピュータ技術を背景にした3次元の映画館も出現しよう。

コンピュータ・グラフィックスを用いた可視化技術が登場してきている。複雑巨大なシステムのシミュレーション結果などを分かりやすく表示するものとして期待されている。光コンピュータ、3次元リアルタイム情報出力装置により、この技術もより精密で、ダイナミクスをリアルタイムで表示できるものとなろう。膨大な数の情報や巨大システムの振舞いをミクロからマクロまで任意の段階で監視・制御するためにも適用できるだろう。

たとえば、電気事業におけるPOS (point-of-sales) 化を考えてみる。すべての需要家の使用状況はリアルタイムで収集される。電力システムの運用者にとっては、これは貴重な情報には違いないが、数字の洪水で、すぐ制御には使えない。電力の負荷状況をリアルタイムに任意の細かさで表示する仕掛けが欲しい。一番マクロな情報は全体負荷という1つの数値である。もう少し細かくみると、たとえば電力会社管内の負荷状況マップ (たとえば色で負荷の大きさを表現する) である。最もミクロな情報は個人需要家のリアルタイムの使用状況である。任意の細かさでリアルタイム情報をマクロ的に切り出し、監視できるようになると迅速・的確・コスト最小の運用が可能となるのではないか。

### 2.2.2.3 ロボット社会のために

ヒル、工場、家庭といったところにおけるオートメーション化は、単なる肉体労働の機械化だけでなく、省エネ、省資源、コストダウン、環境改善といった多面的なコントロールを含め、格段に進展しインテリジェント化する。この主役となるのは、人間の五感の代替をしてくれるロボットであり、これが人間の良き友として活躍してくれる社会が実現する。このため次のような技術が必要であろう。

#### (1) ロボットアイの実現、複合的センサ

知的な作業のできるロボットの実用化に向けて現在活発に研究が行われている。無人設備の監視・保守、肉体労働、極限作業、家事など多くの分野で期待されている。人間と同様、センサ (目、耳など) ・頭脳・アクチュエータ (手足など) でロボットは構成されるか、目と頭脳の実現には光技術の進歩が欠かせない。移動体のロボットには、障害物を障害物としてとらえ、通行可能な道路を道路として認識できる目が必要なのである。もちろん3次元的な認識能力が必要で、3次元リアルタイム情報入力装置がそのままロボットの目として活用できそうである。

この知的な目をもとに、ロボットの頭脳が構築される。自分のいる環境の認識、理解およびその変化の把握ができて、そのフィードバックを得ながらの目的実現、問題解決能力が必要である。環境理解、場の理解、状況の理解が自律的なロボットに要求される。決まりきったルーチンワーク的な作業を行うだけでは、単なる自動機械である。非定型的な業務を回りの状況の変化を取り込み、学習しながらこなしていく機能が不可欠である。AIの

実用化とも密接に関連するか、高速演算・大容量データ処理が可能なハードウェアがますます必要となろう。

目以外にも、光のもつ非接触、高感度、高速といった性質を活かした光センサが開発され、ロボットや制御装置の入力装置として実用化されるようになる。またセンサフュージョンのように、複合的なリアルタイム入力情報の扱いが光コンピュータを背景に実現される。多種類の生のセンサ情報を処理した結果を統合的に、またはマクロ的に表示する仮想計器も実現できるようになる。またこの方向では、音声と口のパターン入力（画像処理）による口述筆記機械が望まれている。

## 2.2.3 21世紀産業分野の展望 —鉄鋼業、電気事業をモデルとして—

21世紀に実現が見込まれる高度情報技術に対する産業界からのニーズに関しては、2.2.2節でも一部述べられているが、本節では具体的な事例として鉄鋼業および電気事業をモデルに、将来の展望を試みる。コンピュータを中心とした情報処理分野の大ユーザは、鉄鋼、電力、金融、流通サービス業等であり、したかつて製造業としての鉄鋼、大規模なユーティリティサービス業としての電力を取り上げれば、情報技術面でのニーズは、ほぼ網羅できると考えられるからである。

### 2.2.3.1 製鉄所の将来像

日本鉄鋼業は、1960～1970年代にかけ、安価なエネルギー源（石油）と国内外の旺盛な需要の恩恵をフルに受け、急拡大を続けてきた。しかし、1次～2次のオイルショック、円高、韓国、台湾等の新興工業国の台頭により、1980年代後半より未曾有の苦境に呻吟してきた。1985年頃以降、設備休止、要員の削減をはしめ、高付加価値製品への傾斜等、鉄鋼部門の抜本的な構造改革を進め、一方エレクトロニクス、情報産業を中心とする多角化への道を模索しつつ現在に至っている。ここ2～3年、内需を中心とした好調な景気を背景に、史上最高レベルの生産を続けているものの、長期的には上記改革を推進し、将来に向けた鉄鋼業を構築しなければならない。

さらに、地球温暖化の原因の1つと言われている炭酸ガス排出問題、日本の人口構成の高齢化による労働人口の減少などの社会的環境の変化も踏まえ、21世紀の鉄鋼業のあるべき姿について、業界として種々の検討を行っているところである。

図2.1に、鉄鋼業の心臓部である製鉄所の未来像をイラストで示す。  
目標とするキーポイントは、次の3点に集約できる。

#### (1) FMS (Flexible Manufacturing System) 化された製鉄所

柔軟な生産形態を可能とし、かつ高度に自動化された生産設備で構成されていることが必須の要件である。鉄鋼製造は、原則として受注生産であり、特に製鋼プラントではロット単位のハッチ生産が基本となっている。しかし、製品の高付加価値化と顧客のニーズの多様化に伴い、ダイナミックに変更可能な設備の運転が要請される。さらに、製品設計の段階から、メカから顧客一体となって開発を進める、いわゆるデザイン・イン鋼材も普及することか予想される。

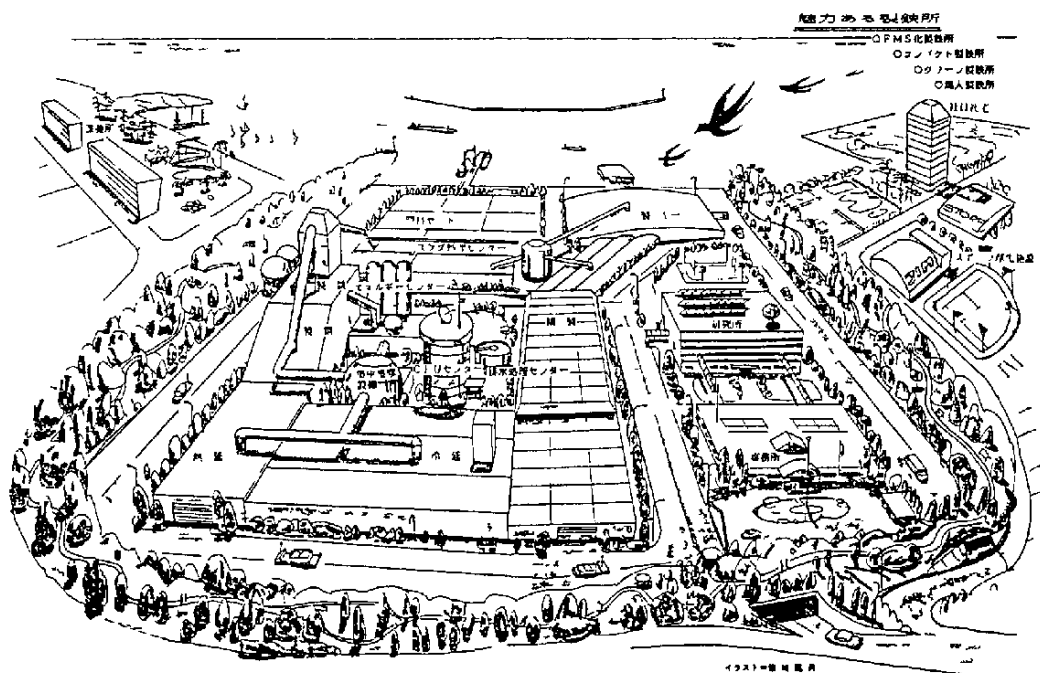


図2 1 製鉄所の未来像 [鉄鋼業AI時代巻頭折込より]

### (2) コンパクトな製鉄所

伝統的な従来の製鉄所は、広大な敷地に高炉をはしめとする巨大なプラント群を配置し、ベルトコンベアや貨車を中心とした輸送設備を網の目のように張り巡らしたものである。さらに、ハッチ的な生産形態が基本であることから、原料、半成品、製品等を貯留する広いヤードを必要とし、大半は1,000ヘクタール前後の面積を有している。21世紀になっても、この基本的な生産形態そのものか一変するとは考えられないか、製造プロセスの革新によるプラントの小型化、高度なネットワーク、情報処理技術、生産管理技術をベースに、プロセスの連続化、同期化を推進することにより、よりコンパクトな製鉄所の実現が期待される。

### (3) クリーンな製鉄所

日本の主要製鉄所は、一部を除き第2次大戦後に建設されたものが多く、原燃料のほぼ全量を海外に依存することから、海運に便な臨海部に立地している点に特徴がある。製鉄プラントは、鉄鉱石の熔融・還元が始まり、鋼の精錬・ casting、さらに加熱、加工処理を行うもので、本質的に高温プロセスや重量物の搬送を伴い、かつ多量のエネルギーを消費する。また、24時間操業が基本である点や、防災、環境面への考慮から、製鉄所は商業・住宅地域から隔離されたサイトにおかれていることが多い。とはいえ、国土が狭隘で近傍に住宅地域を控えた日本の製鉄所は、おおむね“都市型製鉄所”と言える。

このような社会的環境も背景にあって、日本の鉄鋼業は元来、環境問題への取組みは先進的であり、従来から製鉄所建設コストの20%以上は、この方面への投資で占められ、世界的に見てもトップクラスの成果を誇ってきた。しかし、地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨問題等、近年の世界的な地球環境問題への意識の高揚は、鉄鋼業界にとっても極め

て重要な課題を提起しており、21世紀の未来型製鉄所の実現のためにクリアすべき研究開発案件は数多い。まず、排出物を低減するための、革新的なプロセス開発および徹底的な省エネルギー化、さらには排出物を極力内部で循環、無害化するクローズトな製鉄所ノシステムの確立が主要なテーマとなろう。コンピュータを中心とした情報技術が、この中で中枢的な位置を占めることを期待されている。

## 2 2 3 2 電気事業の将来像

電気は安全でクリーン、かつ利用性の高いエネルギーとして、社会のあらゆる分野で利用されており、将来も国民生活および産業社会にとって、不可欠の重要エネルギーであり続けるものと考えられる。電気事業を取り巻く情勢としては、環境面では地球環境問題が急浮上してきており、環境、資源の保護や省エネルギーに対する関心が高まっている。国民生活面ではアメニティ、価値観の多様化、また産業社会面では国際化、高度情報化、経済の安定成長、生産の自動化、高付加価値化、先端技術産業の開花などの進展が予想される。

これらの厳しい企業環境を克服しつつ、社会のニーズに的確に対応してゆくためには、従来以上に電気の安定供給、品質の維持向上、コストダウンに努めると共に、環境快適性に優れ、エネルギー効率の高い総合的なリサイクル社会の実現を目指すなど、社会状況の変化を先取りして対応していくことになる。

しかも、21世紀の電力の将来像という観点から考えるならば、単に電力というエネルギーだけではなく、従来から蓄積してきた情報技術を組合せた新しいエネルギーサーヒスという視点から社会ノシステム、都市ノシステムの将来の中での電力のあるべき姿が重要となる。

図2 2に、こうした視点を踏まえた電力供給の将来像をイラストで描く。

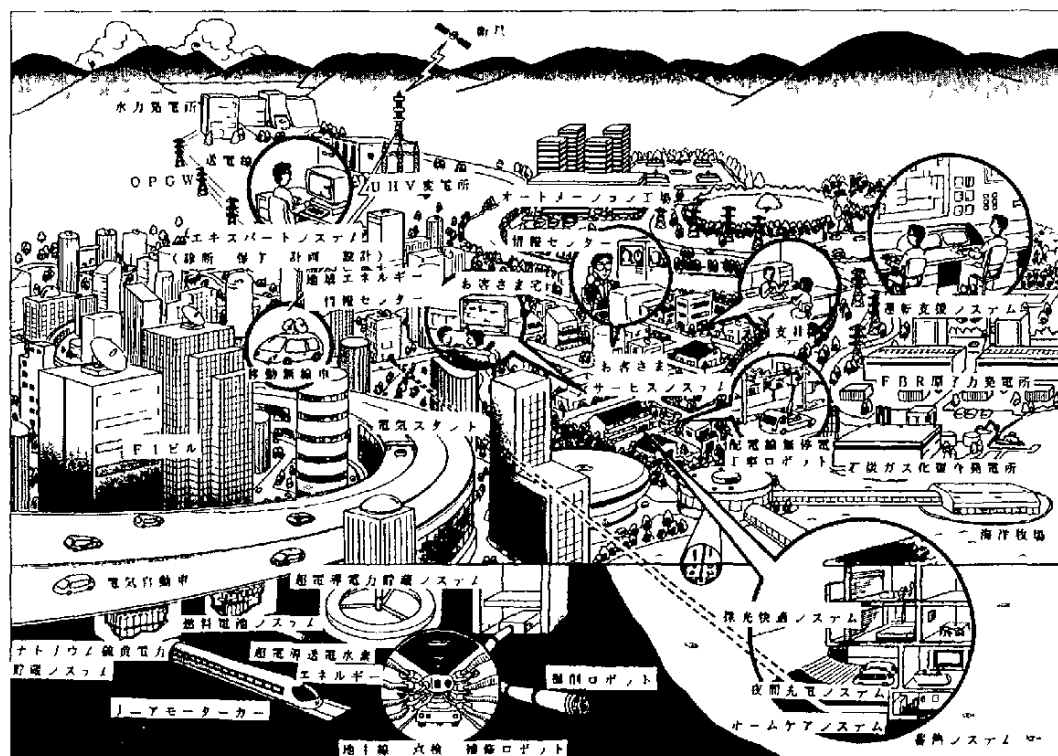


図2 2 電力供給の将来像

### (1) 都市システムのハコホーンとして

今後、大都市では、限られたスペースをより有効に利用するため、大深度地下利用などの開発が重要となってくる。電力設備も、その多くが地下空間を利用して設置され、大都市を支えるエネルギーの動脈となって、快適な都市環境の提供に役立つものとなろう。遠隔の高速増殖炉(FBR)による電源などから、大容量で送電損失の少ない超電導ケーブルを用いて送電し、超電導電力貯蔵システムや、ナトリウムサルファの電力貯蔵システムで貯蔵したり、また遠隔地で作った水素をパイプで導入し、省スペース型の燃料電池でピーク時、非常時に発電することなどが予想される。燃料電池は、地域の冷房、暖房といったものにも利用されることになろう。電気の利用面では、近距離リニアモーターカーや、安全で無公害の電気自動車、そしてそのための充電設備である「電気スタント」も現れてこよう。またオフィスビルも一層高度に情報化されたインテリジェントビルとなり、情報、電力、熱供給など、すべてのユーティリティが統合的に扱われるようになる。

### (2) エレクトロニクス化された住宅システム

エレクトロニクスの発達により、今後より操作しやすく機能の高い各種住宅機器の開発が進むだろう。たとえば、自動採光、AV、HVAC（冷暖房、空調）などにより、快適な環境を提供するシステムや、高齢者、身体障害者の方々のための各種介護機器などのホームケアシステムの普及が考えられる。そして、これらの機器は家庭内の電線で結ばれ、さらには配電線を通して地域ネットワークと結ばれることになるか、これらのネットワークは「エネルギー+情報」といった、より高度なサービスを提供可能なものとなろう。地域毎に分散した電力設備は、地域コミュニティの核として、あるいは電気や熱エネルギーの供給ステーションとして多重の役割を担ってゆくことが期待される。

### (3) 先端技術を活用した電力業務の効率的な運営

電力のさらなる安定供給の確保と、徹底したコストダウンを図るため、設備の運転、保守、建設に先端技術を用いていかねばならない。たとえば、AIロボットを用いて保守、建設作業を省力化したり、作業環境を改善することや、エキスパートシステムを用いた計画設計、設備診断、運転支援などがあけられる。そして、すべての電力設備、業務用事務計算機システムは、ISDN (Integrated Services Digital Network)のネットワークにより有機的に結合され、様々なデータベースシステムを有効に用いた業務形態となろう。

もちろん、原子力や石炭利用技術、高効率発電技術、新エネルギー技術、熱利用技術、大電力送電技術などの、電力固有の技術開発が重要なポイントを占めるか、これとあいまって発電所、変電所、給電所、配電事業所を支える技術として、コンピュータを主体とした通信・情報処理技術のさらなる発展に対する期待は大きい。

電力設備の計画・設計の分野では、より正確なダイナミクスを反映したシミュレーションにもとづいた需給運用計画、需要予測、最適設備計画、最適経済負荷配分、電力融通や電力設備設置のための環境予測や設計があけられる。

電力設備の運転・制御の面では、3次元画像伝送等を有効に活用した高度な設備遠方監視、制御機能、故障点探知、事故復旧などのリアルタイム・シミュレーションが期待される。また、膨大な数のお客さまの的確な負荷要求の把握のために、双方向通信機能を持っ

たロートマネーメントシステムや、お客さまデータベースを基にした、より一層きめ細かい電力供給電気事業そのもののPOS化も必要となる。電力設備の保守・管理に関しては、個々の事業所からリモートアクセス可能な設備に関する電子化された図面・文書のインターネットデータベース、そしてこれとリアルタイムに変化するセンサ情報にもとづいた的確、柔軟なメンテナンスシステムの構築が必要である。またロボットについては、極限作業ロボット、保守ロボット、巡視ロボットなどが有効に利用されたすてあろう。

## 2 2 4 光コンピュータへの期待

2 2 2 節で21世紀社会の展望を基に高度情報ネットワークの諸様相を、また、2 2 3 節で鉄鋼、電力をモデルとして、未来型システムのイメージを述べてきた。これらを実現するためには、コンピュータ技術にととまらず、多岐にわたる周辺技術の開発、適用を必要とし、実証から実用化に至るまでに長い年月を要するものと予想される。これらの検討を踏まえて、表2 1に、未来型システム確立のために必要な諸技術の内、情報技術について、機能と対比しなから、まとめて例示する。特に、21世紀情報化社会を象徴する中枢技術として光コンピュータ／光デバイスに対する期待は極めて高い。すなわち、光が有する空間性、並列性、高速性、非干渉性等の特性を利用することにより、従来の電気技術の制約、限界を超えたコンピュータや素子が出現する可能性が高いと予測されるからである。



表2 1 未来型システム実現のために必要な情報技術

| 機 能                                                                                                 | 必要な情報技術                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ① 低コストの超高速LANの敷設及び外部ネットワークとの有機的接続                                                                   | ①-1 安価、高性能のファイバ製造技術及びその簡便な(工事のいらない)敷設・接続工法<br>①-2 光-光増幅器、分岐器、分波器等の高速光通信部品<br>①-3 ネットワーク管理技術<br>①-4 無線LAN技術                                                                                                             |
| ② ネットワークによるマルチメディア情報の伝送                                                                             | ②-1 コヒーレント光通信、非同期式光伝送/交換技術<br>②-2 大容量情報の圧縮技術<br>②-3 画像情報処理技術<br>②-4 高精細ディスプレイ、大画面省スペース型ディスプレイ<br>②-5 トランスペアレントなコンピュータを実現する高度HMI技術(Human Machine Interface)<br>②-6 プロトコル自動解読・自動変換                                       |
| ③ 大規模な各種産業施設(例えば、製鉄所や発・変電所)等の運営のための大容量データベースの構築及び検索技術                                               | ③-1 大量の文字・図形・画像データの高速入力技術、高速I/O技術<br>③-2 光メモリ等の高密度/大容量の記憶装置<br>③-3 曖昧な概念・キーワードによる情報検索及び曖昧情報処理<br>③-4 ダイノエストを自動生成する情報セクレタリ技術<br>③-5 自然言語処理、定性推論/類推/事例推論等の高度AI技術<br>③-6 データベース用超高速CPU及び光CPU等AI用並列高速CPU                   |
| ④ 各種大型産業施設(例えば製鉄所)の操業・運転計画立案や電力・通信・物流等の大規模サービス網(例えば電力系統網)の運用計画のためのノミュレーション、さらには大気/水質等の大規模環境ノミュレーション | ④-1 上記③-1~6のデータベース技術<br>④-2 情報のフィルタリング/マクロ化等の情報トリミング技術<br>④-3 数理的または試行錯誤による最適解の探索技術<br>④-4 光CPU等のノミュレーション用超高速CPU<br>④-5 波長多重、面発光レーザなどを用いた大容量メモリ/大容量マストレーン<br>④-6 製鉄所や発電所の操業と地域環境との相関モデリング<br>④-7 気象~大気~水等の地球環境全体のモデリング |

| 機 能                                          | 必要な情報技術                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ⑤ 3次元仮想環境 (Tele-Existence) の実現               | ⑤-1 ②-1～6のネットワーク技術<br>⑤-2 精細画像の高速撮像<br>⑤-3 物体の認識技術<br>⑤-4 自然言語処理、定性推論／類推／事例推論等の高度AI技術<br>⑤-5 リアルタイムの3次元CG生成及び高精細ディスプレイ<br>⑤-6 ホログラフィ等の3次元ディスプレイ素子 |
| ⑥ 知能センサ／知能ロボット<br>(簡単な判断業務、材料の運搬、設備の保全等の自動化) | ⑥-1 精細画像の高速撮像<br>⑥-2 情報のフィルタリング／マクロ化等の情報トリミング技術<br>⑥-3 ロボットアイ等の画像認識技術やパターン認識技術<br>⑥-4 超小型高速CPU<br>⑥-5 数理的または試行錯誤による最適ルートの探索<br>⑥-6 超小型、高性能のバッテリー  |
| ⑦ 目視・音感等の官能検査の自動化<br>(半成品・製品の検査、設備の保全等の自動化)  | ⑦-1 ⑥-1～4の知能センサ技術<br>⑦-2 高度エキスパートシステム等AI技術                                                                                                        |
| ⑧ ソフトウェア自動生成                                 | ⑧-1 ノシステム要件記述用高級言語<br>⑧-2 リポトリ(ソフトウェアツール)体系の規格化・モデル化<br>⑧-3 上記③-1～6のデータベース技術<br>⑧-4 自然言語処理、定性推論／類推／事例推論等の高度AI技術                                   |

〔参考文献〕

- [1] 新情報処理技術調査研究委員会報告書, 1990年3月.
- [2] 21世紀情報化社会の断面, キー・テクノロニー研究会.
- [3] 石原 聡 光コンピュータ, 岩波書店.
- [4] 谷田貝豊彦他 光コンピュータ読本, サイエンス社.
- [5] 稲場文男編 光コンピュータ, オーム社.
- [6] 坂村 健 電脳都市, 岩波書店
- [7] 通商産業省製鉄課 鉄鋼業AI時代, 産業新聞社, (1989).
- [8] 中島一郎 21世紀の製鉄環境, 第135回西山記念技術講座, 日本鉄鋼連盟, (1990).
- [9] 電力21世紀ヒョン検討委員会 電気事業の21世紀ヒョン新しい電気文明時代をめざして, 中央電力協議会.
- [10] 電力技術へのAI応用, 電気協同研究第44巻第1号, (社)電気協同研究会.

## 2 3 未来型情報処理に求められる新機能と光コンピュータ

### 2 3 1 3次元情報処理における光技術の役割 —前年度調査研究から—

未来の情報処理技術には従来型逐次情報処理方式が抱える種々の問題に対処し得る新しい能力が求められる。この未来の情報処理が持つ機能としては、認識（高次、能動的パターン認識、理解）、推論・問題解決など、人間の持つ情報処理に近い機能が期待される。

前年度（平成元年度）には、このような機能を特徴つける1つのキーワードとして3次元情報処理があたり、検討がなされた。これは、空間／形状認識、モデリング、立体視など人間にはてきるか従来の逐次型方式では困難な情報処理の例としてその特徴を表しているからである。

3次元情報処理技術の体系を図2 3に示す。

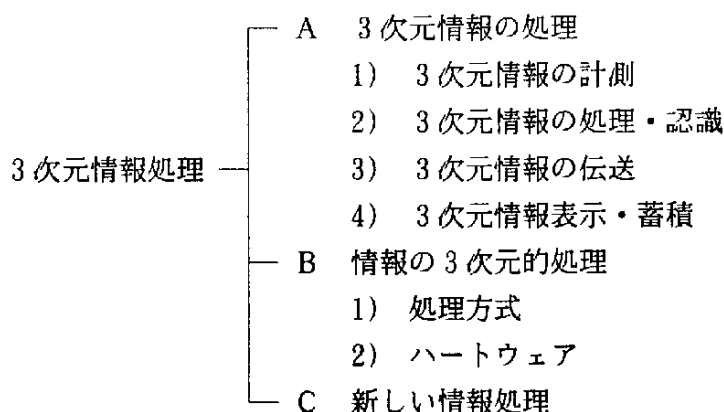


図2 3 3次元情報処理技術の体系

本節では、Aの3次元情報処理を中心に前年度調査結果を光技術の切り口で見直して、新情報処理技術における光コンピュータの役割を述べる。

#### 2 3 1 1 3次元情報の計測

3次元情報の計測にはCT／立体視／投光法／センサフュージョン／インテリジェントセンサなどが含まれる。3次元計測のなかでとりわけ重要なのが距離計測であり、この技術を原理で分類すると表2 2のようになる。ほとんど光技術がベースになっていることが分かる。今後は計測精度、感度、速度、装置規模などの問題を解決することが課題で、これには非常に小型・高性能な3次元視覚センサである生物の眼とその処理を行う脳および神経系の研究がヒントを与えてくれる可能性がある。

表2 2 距離計測法の分類

|               |                        |                                                                                                                |
|---------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ・三角測量法        | ステレオ法<br>運動立体視<br>光投影法 | 両眼視、三眼視、一眼+拘束条件<br>オプティカルフロー、移動ステレオ法、球面写像法<br>スポット光、スリット光、マルチスリット光、符号化並列光、クリット光、規則的パターン光、M系列パターン光、影情報利用、複数光源利用 |
| ・タイム・オブ・フライト法 | 超音波、レーザ振幅変調法、レーザパルス法   |                                                                                                                |
| ・その他の距離計測法    | 光投影-複眼折衷法、焦点調節法、モアレ縞利用 |                                                                                                                |

また、3次元空間内の情報のセンソックという面から計測をとらえると、3次元空間内に存在する様々な情報の中から必要な情報を取り出すために、センサと処理機能の組み合わせによるセンサの知能化が課題になる。そしてアレイ状あるいはマトリクス状のセンサからの情報の並列処理技術、あるいは異種センサからの情報を融合して有用な情報を抽出するセンサフュージョン技術などか研究課題として考えられる。この研究方法には種々考えられるか、有力なアプローチとして生体の高度な並列処理機能をモデルとしたニューロコンピューティングをあげることかてき、これと高い親和性を持つハートウェア技術である光演算あるいは光コンピューティング技術との組み合わせか最近注目され、研究されている。これはニューロコンピューティングか要請する大規模並列性を光演算か原理的に得意とする並列性で実現するとともに、プログラムにとって代わる機構として学習機構を導入することにより光演算の処理の柔軟性を実現しようとするものである。

### 2 3 1 2 3次元情報の処理・認識

この技術分野には、空間認識/形状認識/モデルベース計測などの情報の3次元的理解・認識、記述モデル/データ構造/座標変換などの3次元モデリング、輪郭・面検出/拡大・縮小・回転処理/陰影付加/ホログラフィックフィルタリング/レイトレーンクなどの立体像の3次元処理、特徴抽出/相関処理/予測符号化などの圧縮処理アルコリズムか含まれる。さらに、情報の3次元的处理という概念もこの中に含めることかてきる。

立体図形や3次元空間の認識等の研究はロホットの眼の研究を中心に展開されてきた。前項で述べたように、これらの研究はセンサによる情報の取得と情報の処理の問題に帰着する。このため、応用目的毎の3次元モデルおよびそのデータ構造の最適化、あるいはモデルの統合化等の研究か課題である。また、3次元画像の処理技術は、医療分野におけるCT撮影画像の処理、機械や建築の構造・外形図面の処理などコンピュータ技術の発達とともに広く応用されるようになってきた。

これらの研究では処理方式やアルコリズムにおけるブレークスルーか強く求められる。このソフト面の成果を具体的に実現するインプリメンテーション技術として光技術あるいは光コンピューティング技術か有効と考えられる。

一方、上述の技術分類とは離れて、情報の3次元的处理という新しい概念が前年の調査で提起された。これは情報を3次元的にソフトあるいはハードで処理するという考え方である。ソフト処理には、超並列処理、ニューロコンピューティング／ニューラルネット、セクメンテーション／スライニングなどの面的連続処理、光連想メモリなどに関連項目として考えられた。また、3次元のハード処理としては、ハードウェアが本質的に持っている3次元形態と特性を一層有効に活かす考え方、積層型連続処理プロセッサ／超並列プロセッサ／NCUBEなどの3次元コンピュータ、3次元デハイス（3次元IC、3次元OEIC）／面的光デハイス／空間光変調素子／マイクロオプティクス／3次元ホログラム／3次元実装などの3次元情報処理デハイス技術、ホログラム／光インタコネクションなどの超並列伝送技術などに関連すると考えられた。

この新しい概念は、また明確な定義付けがなされているわけではなく、さらに検討を深める必要がある。本項関連はさらに24項でも述べられる。

### 2 3 1 3 3次元情報の伝送

代表的な例として立体映像、特に立体テレビ信号の伝送がある。また3次元情報の高能率符号化・知的符号化、超並列伝送などもこの技術分野に含まれる。

光技術の適用では光ファイバ伝送が第一にあけられる。光ファイバ伝送には大容量性、広帯域性、並列伝送の干渉性など優れた特性がある。立体映像の伝送の場合、一般的な2眼方式なら信号量が通常の2倍程度にすぎず光ファイバ伝送での問題はほとんど無い。しかし、多眼式立体映像やホログラフィの原理を用いた立体映像の場合、異なる視点から自由に映像を立体的に見ることかてきる反面、伝送すべき信号量が数千倍あるいはそれ以上と桁違いに多いため信号伝送に大きな困難がある。最近、コヒーレント光伝送の研究が急速に進展し、この問題を解決する希望かててきた。特に、異なる波長の光源を多数用いた波長多重伝送は、同時に数千チャンネルの信号を1本の光ファイバで送れるので期待か大きい。また、非線形媒質を利用した光の位相共役波の研究からは光ファイバの伝送歪みを除いた新しい3次元画像伝送の可能性が最近示唆されており、今後か注目される。

一方、符号化技術については立体映像信号の帯域圧縮など当面の課題のほか一層高度な処理をとまなう知的処理、モデルベース符号化などかある。これらは認識・理解・分析・合成など人間の情報処理機構の研究と関係しており、光コンピュータなど光技術の役割か期待できる。

### 2 3 1 4 3次元情報の表示・蓄積

立体映画／全天周投影映像／CG／実時間ホログラフィ／ヘッドマウントディスプレイなど3次元動画像表示や立体写真／ホログラムなど3次元情報の蓄積技術、3次元情報記憶／イメージの多重記憶などの3次元情報記録かその対象になる。

表23に静止画および動画における各種の3次元映像技術の分類を示すように、光技術か重要な役割を果たしている。3次元映像技術は長い研究の歴史かあり何度もブームかあった。最近再び光技術および電子技術、デハイス技術の進歩に支えられて産業用（CG、側量、医学、航空管制等）、娯楽用（万博パビリオン、ビデオゲーム等）などへの応用開発か活発になっている。また、最近ではタイナミックホログラムの研究も進展して、より

高度な3次元情報表示の実現の期待が高まっている。今後、光コンピュータなどとして処理された3次元情報の出力手段として重要性が一層増すと見られる。

一方、3次元情報の蓄積では光ディスクによる大容量記録の他、さらに飛躍的な大容量化としてホログラフィックメモリがよく知られている。この技術分野では最近の液晶デバイスなど新しい材料の出現によって、新たな進展が期待できる情勢になりつつある。

表2 3 3次元映像技術の分類

| 分 類                                            | 使用光      | 方 式                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2<br>眼<br>式<br>3<br>次<br>元<br>映<br>像           | 非コヒーレント光 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・裸眼</li> <li>・鏡（1枚ないしは2枚使用）</li> <li>・プリズム</li> <li>・レンズ</li> <li>・パララックスステレオグラム</li> <li>・2眼式レンティキュラ</li> <li>・2色眼鏡式</li> <li>・偏光板眼鏡式</li> </ul> |
| 多<br>眼<br>連<br>続<br>式<br>3<br>次<br>元<br>映<br>像 | 非コヒーレント光 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・レンティキュラ</li> <li>・投写式</li> <li>・IP（Integral Photography）</li> <li>・固体中の発光現象方式</li> <li>・煙などへの投影方式</li> </ul>                                     |
|                                                | コヒーレント光  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ホログラフィ</li> </ul>                                                                                                                                |
|                                                | 混合光      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ホログラフィックステレオ</li> <li>・白色光再生ホログラフィ</li> </ul>                                                                                                    |
| 切断面再生                                          |          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ハリフォーカルミラー方式</li> </ul>                                                                                                                          |
| その他                                            |          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ワイトスクリーン方式</li> </ul>                                                                                                                            |

## 2 3 1 5 まとめ

以上の各分野での光技術の役割と技術課題をまとめると表2 4 のようになる。

表2 4 光技術の役割と技術課題

| 項 目          | 光技術の役割                                                                                                                                                 | 技術課題                                                                                                                                                                   |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 次元情報の計測    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・距離、方位、空間位置の光学的測定</li> <li>・形状、パターン、立体映像の入力、測定</li> <li>・変位、振動の光学的計測</li> <li>・光C T</li> <li>・ホログラフィ</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・速度、精度、感度、ダイナミクレンの向上</li> <li>・センサと処理の結合（センサの知能化）</li> <li>・光コンピューティング技術</li> <li>・アクティブセンソング技術</li> <li>・並列光センソング素子</li> </ul> |
| 3 次元情報の処理・認識 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・光による処理方式のハートインプリメンテーション</li> <li>・光インタコネクション</li> <li>・パターン処理</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・光演算、処理アルゴリズム</li> <li>・3 次元情報処理光デバイス</li> <li>・3 次元モデリング、データ構造の最適化</li> <li>・センサ融合</li> </ul>                                  |
| 3 次元情報の伝送    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・光通信</li> <li>・イメージン伝送</li> <li>・光インタコネクション</li> <li>・光信号処理</li> </ul>                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・超大容量光伝送技術</li> <li>・群ファイバによる超並列伝送</li> <li>・光演算、処理デバイス</li> <li>・面型光デバイス</li> </ul>                                            |
| 3 次元情報の表示・蓄積 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・立体映像表示技術（立体テレビ、立体写真、仮想視覚ディスプレイ等）</li> <li>・ホログラム</li> <li>・3 次元光メモリ</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・眼鏡等の不要な3 次元ディスプレイ技術</li> <li>・実時間ホログラフィ</li> <li>・ハルク型光メモリ</li> </ul>                                                          |

## 2 3 2 新情報処理と光技術の役割

新情報処理は、「柔らかな情報処理」と「超並列超分散情報処理」の2つのキーコンセプトを骨子としている。前者は、新機能・応用的側面を表わし、不完全あるいは部分的な情報に対して、学習で獲得した知識経験を巧みに活用して実時間処理する人間の情報処理能力の柔軟性あるいは適応性に対応するものである。後者は、計算処理的側面を表わし、情報の連結性・多種多様性に対応した処理の並列性や分散性に対応するものである。新情報処理技術は、柔軟な情報処理原理と膨大な計算パワーを備えることになる。この技術は、新情報処理の原理確立に有力な知識を与える未知なる人間の脳機能や脳内処理を解明するためにも有効な技術である。

新情報処理技術の体系を図2 4 に示す。この体系は、新機能、基礎理論と基盤技術で

構成される。基盤技術に位置する新情報処理システムは、超並列超分散処理形態をもつ。これは、現状の計算機よりも計算パワーを飛躍的に増大させたスーパーコンピュータの実現である。したがって、これまで非現実的と考えられた物理・社会現象の大規模数値シミュレーションなどが可能になると考えられる。このような現状のコンピュータ科学の流れに沿った応用も考えられるか、新情報処理では柔らかな情報処理の理論を超並列超分散システムと結合させることによって技術体系（図2-4）に新機能技術として記載される広い機能・応用範囲が含まれることになる。新情報処理では、様々なスケールの多種多様な情報・情報の相互作用の結果として処理されることになる。情報処理は、1つのダイナミクスである。これは、新情報処理システム・ダイナミクスの枠組みで情報処理をとらえることを意味する。さらに、新情報処理は、自然科学や人文・社会諸科学を情報処理という共通する立場から研究するものであり、諸科学の枠組を広げるものである。

### より人間に近い情報処理

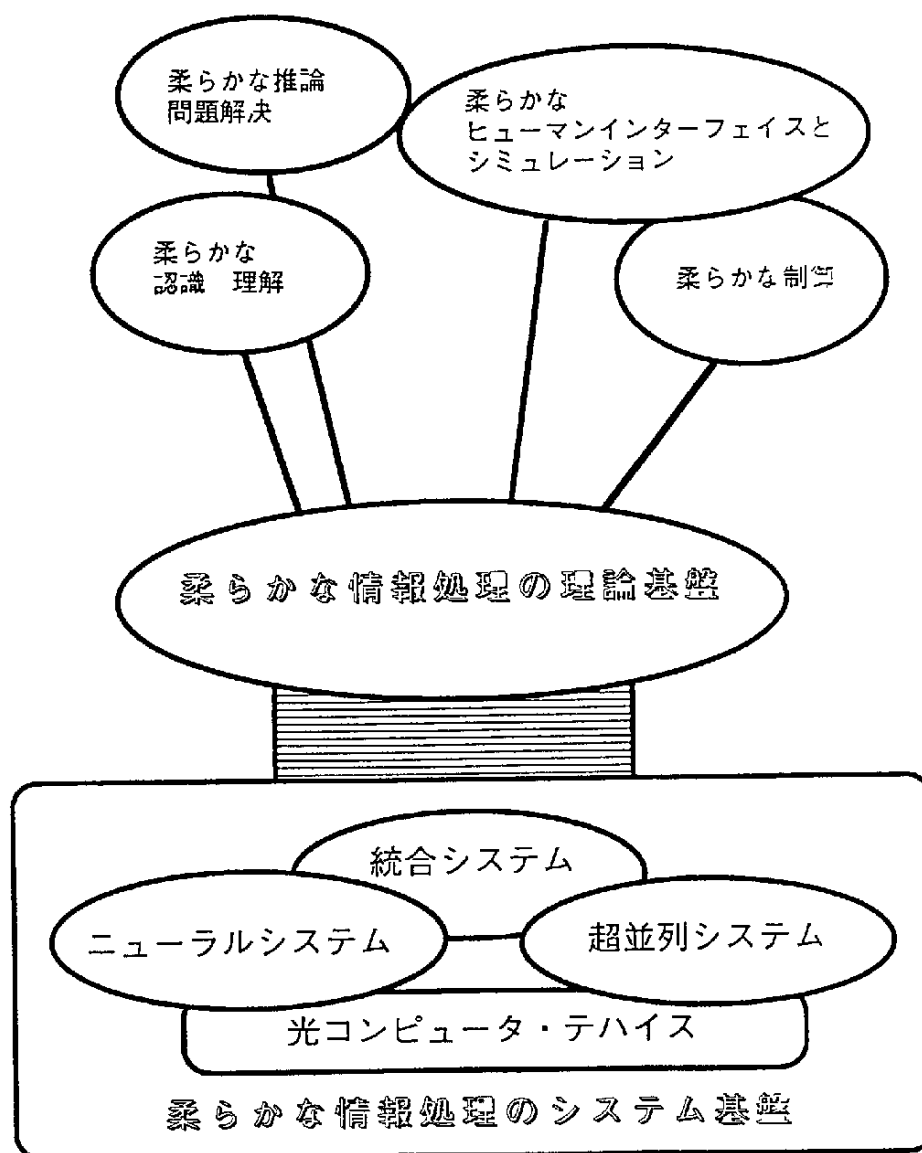


図2-4 新情報処理技術の体系



光技術は、新情報処理の技術体系の中で基盤技術の中に位置つけられる。これは、多種多様でしかも多量の情報を高速処理できるハードウェア構築の技術である。

現状のコンピュータの性能を制限するものとして、フォン・ノイマンホトルネツクと情報媒体容量・処理速度の制限があげられる。前者は、逐次処理をベースとしてコンピュータアーキテクチャの問題であり、その解決として処理の並列化と分散化の考え方が生まれてきた。後者は、通信・帯域幅の制限、電磁誘導による信号干渉、配線密度・自由度における集積化限界などの電子技術の諸問題である。コンピュータを構成するCPU単体の性能についても同様なことが言える。CPUの性能は、スイッチング素子、素子間の結線ワイヤと素子の並列度との全体のバランスで決まる。通常、素子のスイッチング時間が1nsの性能の素子を用いても、そのCPUを駆動できるクロック周波数は100MHz程度である。さらに高速スイッチング素子(ECL、GaAs)を用いても、その効果はあまり期待できない。これは、素子間の信号伝達部分における制限による。こうした電子技術の諸問題に対して、光がそのブレイクスルーとして重要な役割を果たすものと期待されている。

光が有する、情報媒体としての潜在的に優れた性質は、大容量性と多自由度性あるいは情報処理媒体としての高速性と並列性として要約される。このような優れた性質を持った光は、新情報処理の基盤とする超並列超分散ハードウェアを実現する上で有力な媒体である。しかしながら、優れた性質を活用する技術は現在のところ確立されておらず研究段階にある。したがって、光材料・デバイスや光デバイスに適合したアーキテクチャの研究および集積化を含む実装技術の確立に亘る広範囲の研究が必要である。

## 2.4 光コンピュータの応用

光コンピュータはそのモデルとして幾つか提案されているが、現実には存在しない架空のコンピュータである。しかし、その形態如何に関わらず光の特徴が活かされたコンピュータであることには間違いない。光コンピュータは、従来のフォン・ノイマン型の逐次処理をベースとしたコンピュータを光技術により補う、あるいは凌駕するものである。ここでは、次章以降でそれぞれ詳述される光コンピュータの3つの代表的なモデル、すなわち、(1) 光並列コンピュータ (2) 光ニューロコンピュータ (3) 光インタコネクション、について、その特徴と応用を概観する。

### 2.4.1 光並列コンピュータ

光の空間並列性を利用して、高速に多量のデータを処理するものである。光並列コンピュータには、アナログ演算処理とデジタル演算処理の2つの方式がある。

アナログ演算は、結像光学系によるフーリエ変換や相関演算に代表されるように光情報処理の原点である。これは、情報を光の強度で表現するもので、たとえば2次元の画像データを高速に並列処理できるという特長をもつ。この方式は、画像計測、フィルタリング、パターンマッチングやリモートセンシングの前処理として一部、応用・実用化されており、専用プロセッサの役割を果たしているが、次項で触れる光ならではの特徴を活かす将来の光コンピュータ技術においても積極的に利用されるものと考えられる。

デントル演算は、演算精度を満足しなから汎用的な論理処理を実行するものである。ここでは、デントル化された各情報は空間光変調素子や面発光素子アレイにより2次元平面状に配置され、同時に処理される。光による情報のデントル表現には、入力信号を2次元の空間パターンに置き換える方式がある。その他に、光の偏光や波長多重性を利用した方式等が提案されている。デントル方式の基本演算は、従来の論理演算をベースにしている。しかし、光の並列処理性を利用して現在のコンピュータが不得意とする並列演算処理を容易にし、現在のコンピュータの計算能力を飛躍的に増大させている。たとえば、 $1000 \times 1000$ のデータが1MHzのクロック周波数で並列処理されると現行のスーパーコンピュータのスピートをはるかに越える1TFLOPSの高速演算が可能となる。

光並列コンピュータは、並列処理に適した流体や核融合プラズマなど大規模なシミュレーションを必要とする計算物理学の分野（従来、スーパーコンピュータで扱われた分野）への応用、あるいは衛星からの信号を扱う多次元データ処理への応用、ヒンジョンに代表される画像処理の分野への応用に適している。

## 2.4.2 光ニューロコンピュータ

ニューラルネットは、パターン情報処理において学習能力と汎化性において優れ、従来のコンピュータアーキテクチャとは全く異なった情報処理システムとして期待されている。新情報処理においても、人間のような直感的な情報処理を重要視している。特に、パターン情報（音声、画像）処理への応用が期待されている。ニューラルネットは、多数の多入力1出力素子がノナプス結合された非線形システムで、演算素子は荷重和に対する非線形応答信号発生素子を構成要素とする。ニューラルネットの特長は基本要素が単純であることと単純な基本要素の多数の結合によって情報が処理されることである。したがって、その真価は、超並列ハードウェア上で顕著に現われるものである。超並列ハードウェアの実現には大規模な結線が必要となり、そこでは3次元空間を活用できしかも信号間の相互干渉がない光の自由空間高密度配線能力が有効な手段となり得る。

光ニューロコンピュータは実証シミュレータとしてあるいはパターン情報処理装置として期待されているだけでなく、人間の適応能力と処理機能を実現する新しい情報処理原理追求の有効な手段となる。

## 2.4.3 光インタコネクション

現状のコンピュータは、高速化と高密度化の急速な進歩を遂げてきた。しかし、ここに来てその進歩のスピートは鈍りつつあり、質的な転換が求められてきている。その原因として、信号線がローパスフィルタのような分布定数線路特性を持つことによる信号伝達の高速化の制限および配線の自由度の少なさによる集積化の限界が指摘されている。光インタコネクションは、その問題を解決する有効な手段である。

光並列コンピュータや光ニューロコンピュータにおいても、光の自由空間配線が重要な役割を果たす。現実的アプローチという面では、両者の演算部を電子技術で行ない、電気が不得意とする情報伝達（インタコネクション）部分のみを光に分担することと考えられ

る。演算部の規模によって、並列性の内容が異なり適した処理対象を選ぶ必要がある。演算部の構築には、半導体技術で蓄積された高集積化技術が利用できる。光インタコネクションは光と電気の融合技術であり、ここで中心となるデバイスは、光と電気の媒体変換デバイス(OEIC)である。

光インタコネクションは、いくつかの階層で分類される。コンピュータネットワークに代表されるシステム間の接続、ボード間の接続、チップ間の接続、チップ内の接続という空間スケールを軸とした階層性である。システム間の接続には光ファイバで接続される。この領域は、光通信技術が直接活かされ実用化の段階にある。ここでは、光の情報媒体としての大容量性と無誘導性が期待される。空間スケールが小さくなるにしたがって、自由空間光配線の重要度が増して来る。顕著な違いは、1対1の接続から1対多、多対1あるいは多対多の高密度光接続形態への変化である。そして、自由空間光配線により処理の並列性が達成されていく。また、再配線可能とするデバイスは、システムのフレキシビリティあるいはロバスト性を超並列ハードウェア上に実現する重要な役割を担う。

なお、光の持つ大きな特徴である「インタコネクション」は、ここで述べた光インタコネクションのみならず、上述の2つのカテゴリを含め、あらゆる光コンピュータ技術で利用されるものと考えられる。

## 2 5 あとがき

以上、光コンピュータの応用的な側面について多角的に検討してきた。はじめにも触れたように、その技術内容自体が明確になっているわけではないので、現在の光技術と直接につながるような形で具体的な応用を示すことはできなかったか、21世紀の高度情報ネットワーク社会における代表的新情報処理技術としての光コンピュータへの期待が明らかにされた。

先人の存在しない新しい技術分野を切り開いて行く際には、技術自体の研究開発が必要であるのはもちろんであるが、同時に、それか何に、どのように使われるのかといった、応用分野の探索についても同様のエネルギーを傾注していくことが重要である。光コンピュータの研究開発にはそのような課題も与えられているのである。



## 第 3 章

### 並列デジタル光コンピュータ



## 第3章

### 並列デジタル光コンピュータ

#### 3.1 はしめに —なぜ並列デジタル光コンピュータか—

##### 3.1.1 並列光コンピュータとは

光コンピュータを一言で言うと、情報の伝送と処理に光を利用する機械ということになる。これは電子計算機が電子という情報媒体を利用していることに對比される。

光が情報媒体として優れている理由は、その情報伝送容量の膨大なことである。その結果、電氣的には不可能な超短パルスの発生による高速逐次情報処理への期待とともに、空間および波長域を利用した同時並列的な情報処理が可能になる。

特に、空間あるいは波長並列性は電子技術側に対応するカテゴリがなく、光の圧倒的な超並列性を生かした情報処理技術が並列光コンピュータということになる。

##### 3.1.2 並列デジタル光コンピュータの必要性

電子計算機はここ30年間、驚威的な進歩をとけてきた。そして、それを支えてきたのか、半導体電子素子技術に象徴されるハードウェア技術の発達であり、また、フォンノイマンが提唱した逐次型情報処理を実現するアーキテクチャ技術である。

しかしながら、人間の情報処理に対する欲望は際限を知らず、より高度な情報処理技術の実現を求めている。取り扱う情報もスカラー量だけでなく、ベクトル量さらにはパターン情報まで、ある一定の拡がりを持つ情報量を単位とした演算処理が要求されるようになってきた。これに対して電子という情報媒体が取り扱う情報量はスカラー量(あるいは点情報)が単位であり、拡がりを持つ情報量については逐次的に表現したり、処理するしかない。電子計算機内では、演算ユニットやバスにおける高々32ビット、64ビットの並列性が利用されているにすぎない。

生物における情報処理過程を見ると、そこでは1つの情報を処理するときにいくつかのチャンネルが同時並列的に各々処理を行ない、その結果を総合して判断を行っている。このような思考過程も電子計算機では逐次的にしか実行しえないから、その計算量や計算時間は膨大なものになり、実時間処理は難かしくなる。

このような困難を解決する手段として、電子計算機においても並列処理の必要性について認識が高まり、これまでに様々な取り組みがなされている。

表3.1にこれまでに発表されている並列電子計算機を示す。ここで粒度とはプロセッサ

の処理能力を意味する。マイクロプロセッサは小粒度であり、これを数千、数万個結合したモデルに対し、粒度の大きいプロセッサを10程度結合したのが現在のスーパーコンピュータである。プロセッサの並列度とプロセッサ当りの処理の複雑さの間には一定のトレードオフがあり、並列度を上げようとするプロセッサ当りの処理内容は単純化せざるを得ない。すなわち、システムとしての情報処理の汎用性と並列性は両立しない。

並列度を向上させるにはプロセッサ間の情報の流れの高速化が必要である。電子計算機の側でもこれを考えてはいるが、電子通信技術では早晚困難に直面することか予想されている。このような情報伝送ネットワークを光で解決しようとするのか光コンピュータの第一義的な課題である。そして粒度の大きいプロセッサ間を光で結合するのか光インタコネクション技術に対応し、粒度の小さいプロセッサを超並列的に結合するのか、光ニューロコンピュータであり、並列テンタル光コンピュータということになる。

表3 1 高並列電子計算機の種類

| 制 御     | 粒 度                       | プロセッサ数                       | システム例                                                                                                                             | 専<br>用<br>性<br><br>汎<br>用<br>性 |
|---------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| S<br>単一 | F<br>(小粒度)                | 1,000~10,000                 | { ICL DAP<br>MPP<br>CAP<br>Connection Machine<br>etc                                                                              |                                |
|         | M<br>(中粒度)                | 10~100                       | { Illiac-IV<br>BSP<br>GF-11                                                                                                       |                                |
| M<br>独立 | M<br>(中粒度)                | ~数10<br>小規模<br>マルチプロセッサ      | { Balance 8000<br>Multimax<br>FX 8<br>Elxsi 6400<br>etc                                                                           |                                |
|         |                           | 100~1,000<br>大規模<br>マルチプロセッサ | { Butterfly<br>Cedar<br>Ultracomputer<br>RP 3<br>DADO<br>Cosmic Cube<br>NCUBE<br>iPSC<br>FPS-T<br>PAX<br>(SM) <sup>2</sup><br>etc |                                |
|         | L<br>(大粒度)                | ~10<br>マルチベクトル計算機            | { S-1<br>CRAY-XMP<br>CRAY-II                                                                                                      |                                |
| その他     | データフローマシン<br>要求駆動マシン<br>他 |                              | Sigma-I                                                                                                                           |                                |



ニューロ処理は現在の情報処理の分類において特殊な処理に位置つけられるかもしれない。これに対して、並列デジタル光コンピュータでは汎用デジタル処理を指向する。これは電子技術ではまねのできない超並列性を利用することにより、光独自のアーキテクチャによる汎用的な論理処理が可能になるからである。

電子計算機の側からは将来、100万プロセッサの並列化も不可能ではないという主張も聞えてくる。しかし、その膨大なコネクションを電氣的に実現することは構成要素の本来の性能の犠牲につながる。同等の性能であれば光システムの方が簡便な構成で実現できることか予想され、逆に光の導入によりシステムの高性能化が期待できる。

ここでは、並列デジタル光コンピュータの1つのモデルとして、並列光アレイロジックシステム(Optical Parallel Array Logic System OPALS)を中心に並列光コンピュータの実現可能性を考察する。

## 3.2 並列デジタル光コンピュータの現状

### 3.2.1 基本的な並列光演算原理

現在、光コンピュータの研究が目指している目標は、1) コンピュータにおける情報伝送のネックを光接続技術を用いて解決し、その性能の向上を図る光・電子コンピュータの実用化、2) データの2次元配列の形をしている問題を、高速並列分散処理する並列デジタル光コンピュータの開発、3) 並列データ入出力システムの開発、4) 神経回路網の工学的モデルを基にした並列演算原理による光ニューロコンピュータ、などである[2]。

これらの光コンピュータは、フォンノイマン型コンピュータの不得手な応用分野を補完すると共に、新しい並列情報処理パラダイムの一翼を担う基本情報システムとしての役割を果たすことになろう[1, 2]。

並列デジタル光コンピュータは、光の並列情報・伝送能力とデジタル演算方式における処理の柔軟性を利用した汎用並列コンピュータである。その基本構成は現在のコンピュータと同様、入出力装置、演算処理装置、記憶装置、制御装置からなる。

重要な点は各装置間(内)のデータアクセスに光の並列性を利用し、すべての機能が2次元並列に作動することである。大容量のデータを2次元並列的に伝送するので、その演算能力は電子計算機に比べて $10^3 \sim 10^6$ と飛躍的な向上が期待できる。

ここでは、現在、最も研究の進んでいる並列デジタル光コンピュータの基本並列光演算システムの演算原理とシステム構成、最近の研究の動向について述べる。

#### 3.2.1.1 並列デジタル光演算

図3-1は、デジタル処理系における問題解法までの過程を示す[3]。左半分が論理に相当する部分、右半分が実現方式に相当する部分で、それぞれソフトウェアおよびハードウェアと呼ぼう。デジタル処理系は階層的に構成されており、下ほど基本的な構成要素に対応している。デジタル処理系はこれら構成要素による構造物であり、その個々の理論、方式、技術により特徴付けられる。

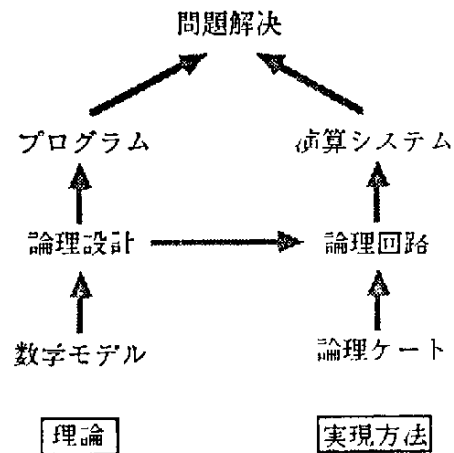


図3 1 デンタル処理系の階層構造

### (1) 並列光論理ゲート

論理ゲートは入力信号の組み合わせに対して特定の関係で信号を出力する機能要素である。光論理ゲートの実現法としては、次の2方式がある。

#### 1) 非線形演算を行う光機能素子を利用する方式

光機能素子としては、光入力信号により2次元的に光信号の強度・位相・偏光状態などを変調する空間光変調素子がある。例として液晶ライトハーフ[4]、PROM素子[5]、MSLM[6]などがある。また、半導体を利用した光機能素子の研究[7]も活発で、たとえば、半導体エタロン[8]、SEED[9]、半導体受・発光素子集積化デバイス[10]、光双安定半導体レーザ[11]などがある。

#### 2) パターン符号化論理方式

パターン符号化論理とは情報を2次元空間符号パターンとして2値符号化し、これらを一括して光学的に並列論理ゲートを実行する手法である。パターン符号化論理の特徴として、1 既存の光学技術が効果的に利用できる、2 処理の柔軟性が大きい、3 与えられた問題に対して本質的に並列処理が可能、などかえられる。

代表的なパターン符号化論理としては、並列光論理演算法(近傍画素間論理)[12]、記号置換論理[13]、並列セルラーロジック、数学的モフォロジー、BIA(Binary Image Algebra)[14]などがある。これらのパターン符号化論理は名称こそ異なるが考え方は類似している。

これらを全て統括的に扱う演算原理として、最近、ILA(Image Logic Algebra)[15]が提案された。

### (2) 光論理回路

並列光論理ゲートで光論理回路を構成する場合、光論理ゲートの並列性と光のすぐれた信号伝送能力(並列光接続)を考慮しなければならない。

光接続技術を大別すると、全てのデータに対して同じ接続パターンを持つスペースインハリアント接続と異なった接続パターンを持つスペースハリアント接続に分類できる。スペースインハリアント接続は高密度信号伝送、光学的実現の容易さの点でまさり、スペースハリアント接続は接続パターンの柔軟性の点で優れる。

スペースインバリエント接続でかつ自由度の高い方法として、パーフェクトシャッフル、クロスオーバーなどの規則的ネットワークを多段に接続する方法がある[16]。各ノードに並列光論理ゲートを配置し、不必要な接続経路をマスクして任意の回路を構成する。各光論理ゲートのファンイン、ファンアウトは共に2である。この回路構成法によりプログラマブルロジックアレイ、ランダムアクセスメモリ、連想メモリなどが設計されている。

光論理ゲートアレイ上の各ゲートをスペースバリエント接続する回路構成法も考えられる。これは、TTL論理ゲートによる回路構成法と本質的に同してある。ただし、各接続は光の自由空間伝搬を利用するため、通信帯域、接続パターン配置などに利点を持つ。また、フィードバック系を利用すると、単純な構成でありながら大きな発展性を有する。

パターン符号化論理を発展させた論理回路構成法としては、光アレイロジックが提案されている。これについては3.2.2で詳述する。

光学系の処理能力を最大限に引き出すには、処理を単純化して少数の演算に正規化した後、光学系で実行すればよい。すなわち、光学系が同一演算の並列処理に適している点に注目し、光学系で実行させる演算をできるだけ同一の形式になるように変換する。“計算おろかみ”は、この思想に基づく回路構成法である[17]。任意の論理回路を正規化して、いくつかの機能を外部信号により選択実行できる機能モジュールアレイに変換する。さらに、このアレイは折り込み操作によって2つの機能モジュールと光信号遅延線として表現できる。結果として得られた処理系では、様々な演算を機能モジュールの制御信号と入力データの配列により実行でき、任意の論理回路を少ないハードウェアで構成できる。

### 3.2.1.2 並列光演算システム

並列光演算システムのアーキテクチャは光回路構成法と密接な関係があり、各方式に対して特徴あるシステムが提案されている。しかし、実動システムはいまだ報告されておらず、基本ブロックの実験的検証に留まっている。

1990年現在、比較的明確なシステム構成を持った並列光演算システムの実験システムが世界の数カ所の研究機関から発表されている。代表的なものを挙げると、並列パイプラインプロセッサ(AT&Tヘル研)[18]、POEM(Programmable Opto-Electronic Multi-processor カリフォルニア大学)[19]、O-CLIPS(Optical-Cellular Logic Image Processor エリオットワット大)[20]、DOCIIP(Digital Optical Cellular Image Processor 南カリフォルニア大)[14]、OPALS(Optical Parallel Array Logic System 阪大)[21]などがある。

並列パイプラインプロセッサのアーキテクチャを図3.2に示す。このシステムは、3.2.1.1の規則的ネットワークを積み重ねて2次元並列化したもので、微小タスク多ステーションのパイプラインシステムとみなせる。現在、光論理ゲート素子としてS-SEEDを、接続光学系としてツイマンークリーン干渉計を応用したシステムの開発が進められている。素子の動作速度は約 $10\mu\text{s}$ である。実験システムの大きさは1990年初頭で $1\text{foot}^2$ であったが、現在小型化を進めており $1\text{inch}^2$ のモジュールを作製中である。S-SEEDアレイは、現在、 $64\times 32$ 素子のものかてきている。

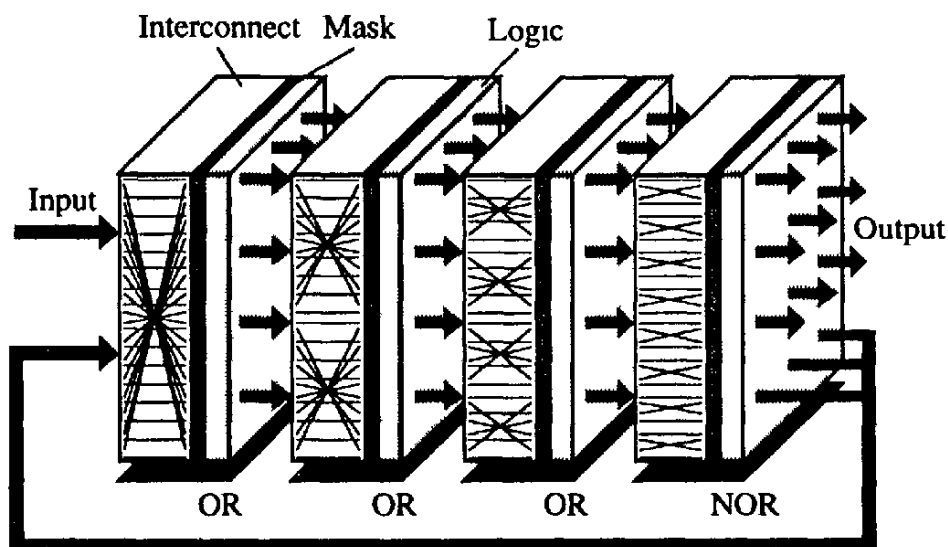


図3 2 規則的接続を利用するシステム[18]

単純並列光接続にもとづく演算システムとしては、VLSIヘースのアレイプロセッサを並列光接続するシステムがある。プロセッサは、論理演算、条件判断、入出力制御などの機能を持ち、メモリおよび光入出力ポートを備えている。光接続の切り替えは光偏向素子で行う。POEMは、この方式を発展させ、ランダム光接続とVLSIプロセッサを組み合わせたシステムである(図5 12)。非線形光学材料を用いたプログラマブル光接続素子により、プロセッサ間の接続パターンを動的に切り替える能力を持つ。その結果、問題に対して最適なプロセッサ構成を作り出すことかできる。

DOCIPはBIAをもとに、スペースハリアント光接続を実現するシステムで、自由接続型非ノイマンコンピュータとも呼べるものである。このシステムでは、要素プロセッサの設計、光学系による構成、検証実験が行われている。

### 3.2 2 並列光アレイロジックシステム(OPALS)

#### 3.2.2.1 システムの概要と特徴

OPALSは、光アレイロジックによる並列演算を基にした汎用並列デジタル光演算システムである。図3 3 にOPALSの概念図を示す。光アレイロジックプロセッサを中心に、入出力ポート、並列フィードバック系により構成される。画像データあるいは画像上に配置された多数のデータ片に対する種々の並列処理が実行できる。OPALSの機能上、構成上の特徴は次の通りである。

- 1) 2次元データに対する任意の近傍画素間論理演算を反復的に実行する。
- 2) 光アレイロジックにもとづいたプログラムにより任意の並列処理を効率的に行う。
- 3) 簡単な相関光学系を用いて容易に大容量データの処理が行える。
- 4) 複数のOPALSを組み合わせて、より自由度の高い演算システムを実現できる。

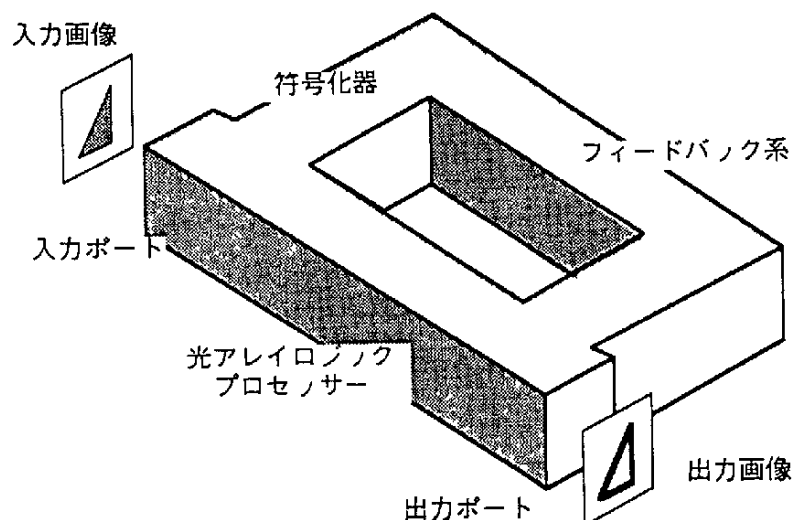


図3 3 OPALSの概念図

### 3 2 2 2 光アレイロシック

光アレイロノックは、画像データの符号化と光学的相関演算を基にした並列デジタル光演算原理であり、2枚の二値画像に対して任意の並列近傍画素間論理演算が実現できる[12, 21, 22]。近傍画素間論理演算は画像データに対する基本的な演算で、2枚の入力画像上の対応する位置にあるデータとその近傍領域にあるデータを入力変換する論理演算を入力画像中の全てのデータに対して行うものである。

図3 4に光アレイロノックの処理手順を示す。まず、2枚の入力画像に対して図中の符号化規則に従った符号化を行う。次に符号化画像と、演算カーネルと呼ばれる点格子状のパターンとの間で相関演算を実行し、相関画像の1画素おきの信号をサンプリングする。同様の操作を異なった演算カーネルを用いて行い、得られた画像に対して画素ごとに論理和をとる。以上の操作により、演算カーネル列で指示された近傍画素間論理演算が実現できる。各処理は単純で、光学処理により、画像中すべての画素に対して並列に実行できる。

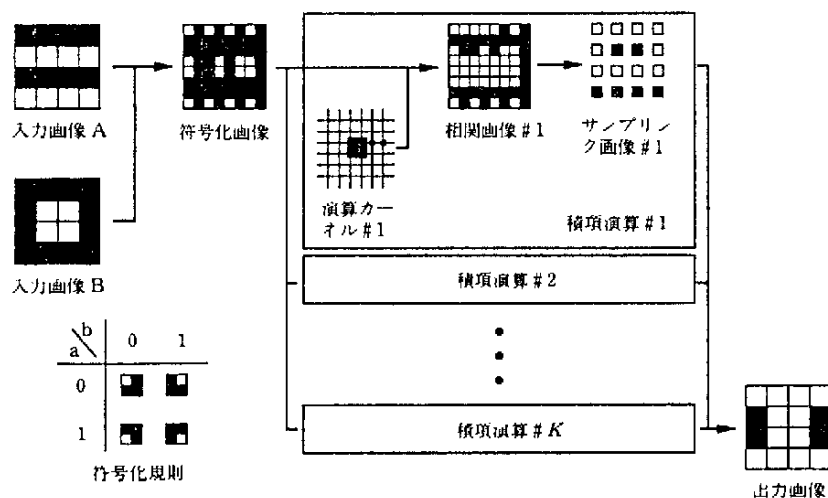


図3 4 光アレイロノックの処理手順。2枚の入力画像に対する符号化、相関演算、サンプリング、論理和演算により、任意の近傍画素間論理演算を実現する。

### 3 2 2 3 OPALSの構成

OPALSには、いくつかの実現形態が考えられている。すべての処理を光学並列的に実現する完全光学型[22]、光学処理系と電子処理系を組み合わせた光・電子複合型[23]、光・電子集積回路にもとづく機能モジュール型(図3 5)[24]、波長多重処理が容易な複屈折型[25]などである。これらのうち、光・電子複合型システムは、複雑な信号伝送に対する光の優位性と非線形演算における電子技術の柔軟性の特長を併わせ持ち、現時点における技術でも十分に構成できる利点がある。透過型液晶表示素子、CCDカメラ、発光ダイオードアレイで構成するテレヒフットバック系を利用した並列度 $20 \times 20$ の光・電子複合型OPALSの実験システムが試作されている[21]。

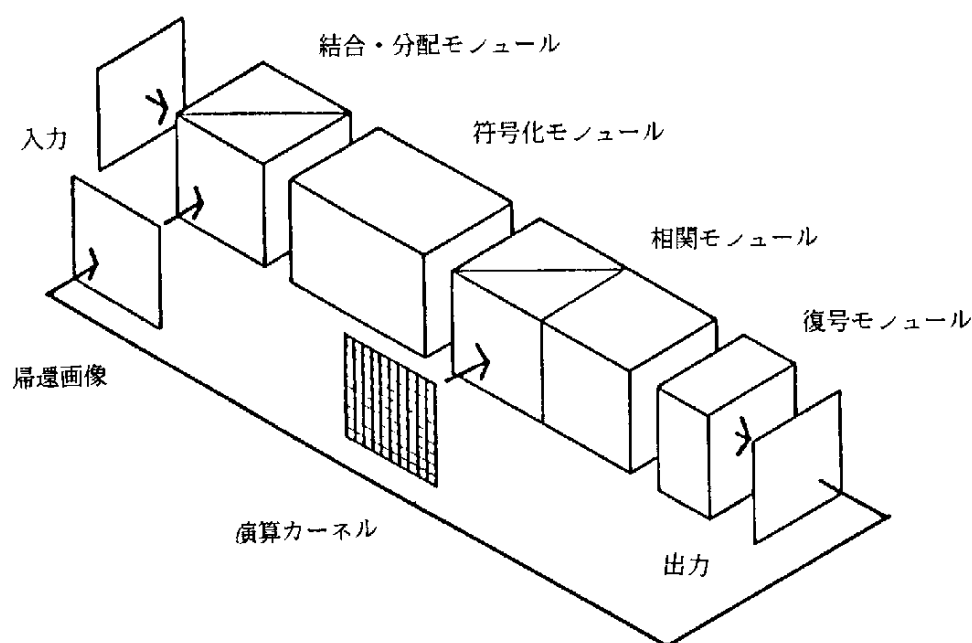


図3 5 機能モジュール型OPALS

### 3 2 2 4 光アレイロシックプログラム

光アレイロシックの処理内容は、演算カーネル列により記述することかできる。可読性・実用性の理由により、プログラムには各画素ことの演算を表す記号を行列形式に配置したカーネル式が用いられる。カーネル式は、演算カーネルと一対一対応しているのて、相互の変換は容易である。

試作システムを用いて並列画像処理、並列数値演算、並列計算機エミュレーションなどの並列処理の実行が確認されている。各処理はOAL言語と呼ばれる専用プログラミング言語で記述する。

### 3 2 2 5 並列デジタル光演算による実行例[26, 27]

図3 6は、実験システムを用いた並列処理による複数の種類の一括画像処理結果である。入力画像Bが被処理像、入力画像A面上の暗部は保存処理、明部は像の輪郭抽出、縞部は像の白黒反転処理をそれぞれ指定する制御画像である。3種類の処理が同時に実行される。右の写真が処理結果である。OPALSの基本動作はSIMD動作であるが、入力像の一方を特徴面として使用することにより、異なる処理を1つのプログラムで実行することもできる。

$$\begin{bmatrix} 0. \\ 0. \end{bmatrix} \begin{bmatrix} .1 \\ .1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1. \\ 1. \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} .1 \\ .0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} .1 & .0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} .0 \\ .1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} .0 & .1 \end{bmatrix} \right) \\ + \left( \begin{bmatrix} 1. \\ 0. \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0. \\ 1. \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} .0 \end{bmatrix}$$



入力画像 A      入力画像 B      出力画像

図3 6 複数の種類の一括画像処理

OPALSによる並列数値演算処理の一例として、並列加算を説明する。この処理では、被加数と加数を一組にして画像上に配置し、そのデータに対して和演算（論理積）と桁上げ演算（排他的論理和）を実行する。ただし、被加数と加数は同一画像上にあるため、判別用として他方の画像上に目印のパターンを置く。論理演算によりこのパターンを検出すれば、被加数と加数は容易に判別できる。nビット数の加算は、上式の演算結果を新たな被加数、加数として、同じ演算をn回反復することにより行える。図3 7は並列加算のOAL言語によるプログラム例である。

この他、具体的な並列演算として、並列ノストリノク行列ヘクトル演算、並列チューリンクマンソンのエミュレーション、並列テータフロー演算、並列ホノプフィルモデル型ニューラルネットワークのエミュレーションなどが試みられている。

# Program Addition,

```

var      1,  N = 8,
image    attr = Attribute,
          data = Data,
kernel   add,

assume   | 1 |

          | 0. | = | <x> |
          | <y> | ,

add =    |__1. |
          | 0. | * |__ . . 1 |
          |      | 1 |

        + | 1. |
          |__0. | * | . 0 |
          |      |__ . 1 |

        + | 1. |
          |__0. | * | . 1 |
          |      |__ . 0 | ,

for i = 1 to N do
    exec (attr, data, add) ,
end ,

end Addition

```

図3 7 並列加算用OALプログラム。attr、dataが画像データ、addが演算カーネルを示す。exec文は光アレイロノックによる一回の演算を表す。

## 3 2 2 6 OPALSの演算能力

図3 8にOPALSの演算能力を示す。横軸は並列画素数／処理速度、縦軸は1秒間に実行できる演算回数である。並列AND演算、並列8ビット加算、並列32ビット加算が例にとってある。加算はビット数に応じて反復演算が必要なため、やや下にある。点線は並列電子計算機NCUBE2の公称最大演算能力である。△は標準テレヒレートの2次元CCDカメラ、液晶テレヒョンなどの現在使用しうる装置を用いて作製する光・電子複合型OPALSの能力を示す。現時点ではシステム構成に使用できる並列光機能素子の欠如のため、OPALSの演算能力は点線よりかなり下にある。しかし、並列度1,000<sup>2</sup>、クロックサイクル1μs以下の性能をもつ並列光機能素子の利用により、ほぼ、並列電子計算機と同程度の演算能力がクリアできることが分かる。



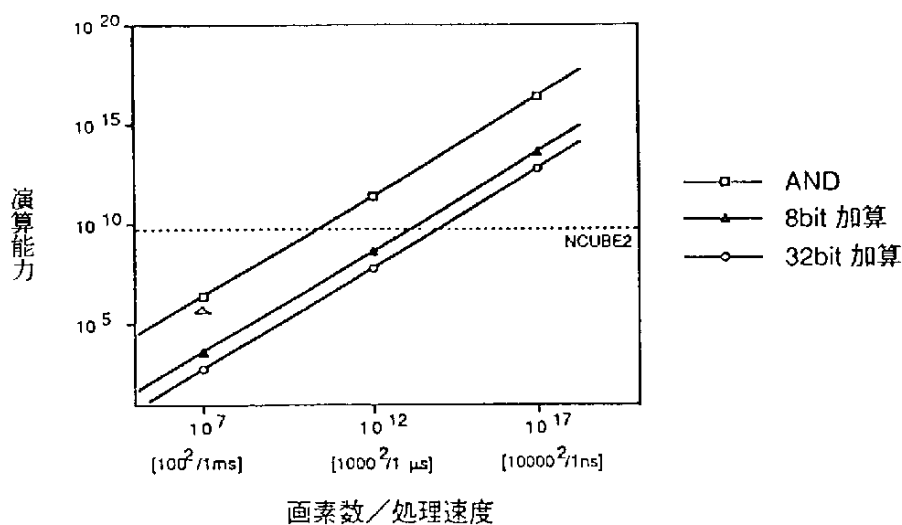


図 3. 8 : O P A L S の演算能力

### 3. 2. 2. 7 並列光機能素子開発への期待

表 3. 2 に、現時点で、O P A L S の実証システムに要求される並列光機能素子と要求性能をまとめた。

表 3. 2 : 現時点 (1991 年) で O P A L S 実証システム作製に必要な  
並列光機能素子と要求性能

| 素子名                  | 用途・機能                              | 要求性能         |                     |                        | 現状                                     |
|----------------------|------------------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------------------------------------|
|                      |                                    | 並列度          | 応答時間<br>( $\mu s$ ) | サイズ<br>cm <sup>2</sup> |                                        |
| L E D アレイ<br>L D アレイ | アレイ光源                              | 50X50 >      | 10 <                | 1                      | なし<br>並列アクセス不可                         |
| 並列受光素子アレイ            | 受光, 増幅                             | 500X500<br>> | 10 <                | 1                      | 16x16<br>並列アクセス可                       |
| 並列ラッチアレイ<br>並列光メモリ   | 情報の一旦記憶<br>情報記憶                    | 50X50 >      | 10 <                | 1                      | なし                                     |
| 並列 2 ビットデコード<br>アレイ  | 受光, 増幅, 論理<br>演算, 発光               | 50X50 >      | 10 <                | 1                      | なし                                     |
| 空間光変調素子              | 変調, 記憶, 論理<br>演算, ラッチ,<br>データ入出力   | 2501p/mm     | 100 <               | 3                      | 2501p/mm 200 $\mu s$<br>a-Si H/FLC-SLM |
| 並列ノックアウト             | 並列光接続制御                            | 50x50 >      | 10 <                | 3                      | 16x16 まで                               |
| マイクロレンズアレイ           | 多重相関,<br>並列光接続                     | 50x50 >      |                     | 1                      | 実用研究段階                                 |
| 平板光集積素子              | 空間可変並列光接続                          |              |                     | 1                      | 基礎研究段階                                 |
| 高性能レンズ               | 並列光接続                              |              |                     | 1                      | 回折限界達成<br>形状大                          |
| 複屈折結晶板               | 並列論理演算                             | 2501p/mm     |                     |                        | あり                                     |
| 結合 分配モジュール           |                                    |              |                     |                        | あり                                     |
| 並列複合光機能素子<br>アレイ     | 受光, 増幅, しき<br>い値処理, 論理,<br>メモリ, 発光 | 50x50 >      | 1 $\mu s$           | 1                      | 基礎研究段階<br>VSTEP S-SEED<br>など           |

並列受光素子アレイは、アレイ構成要素へ同時並列にアクセスできる素子である。現在の2次元CCDアレイは走査タイプであり、並列光演算システムには適さない。システム側か必要とするは走査型ではなく、同時並列アクセス可能な並列光機能素子である。

半導体系の光双安定素子の研究は行われているものの、並列ラッチアレイ、並列光メモリなどはまだ開発されていない。図3-9に並列2ビットデコーダアレイの構成を示す。この素子は光2入力、4分割空間光1出力の半導体光素子を2次元アレイ化したものである。各素子は光電、増幅、発光機能を兼ね備えたものである。

空間光変調素子としては、 $\alpha$ -Si光導電体を利用した強誘電性液晶空間光変調素子か、現在、解像力、応答時間共、最高性能を示している。液晶テレビジョンの実用化に伴い、技術レベルが向上し、今後の性能向上、実用化素子の開発が期待できる。並列光ノックは並列クロスハスノック機能を示す並列光接続素子として利用される。

光受動素子としては、マイクロレンズアレイがほぼ実用化レベルに近づいている。光学型OPALSのCPUは、これを用いて多重相関演算を実行する。平板光集積素子は、平面ガラス上にレンズ、ミラー、回折格子などを2次元配置した非同軸空間光接続素子である。収差を十分補正すれば対応画素間以外の並列光接続や空間可変並列接続が可能である。光・電子複合モジュール型OPALSを作製する上でのキーデハイスは、並列2ビットデコーダアレイ、あるいは並列複合型光機能素子、平板光集積素子、並列光メモリである。

複屈折型OPALSは、空間光変調素子と、複屈折結晶の組合せて並列論理演算を実行し、波長多重化が容易である。

素子に対する要求性能としての、表3-2の数値はかなり控えめであり、段階的に性能向上を図る必要がある。

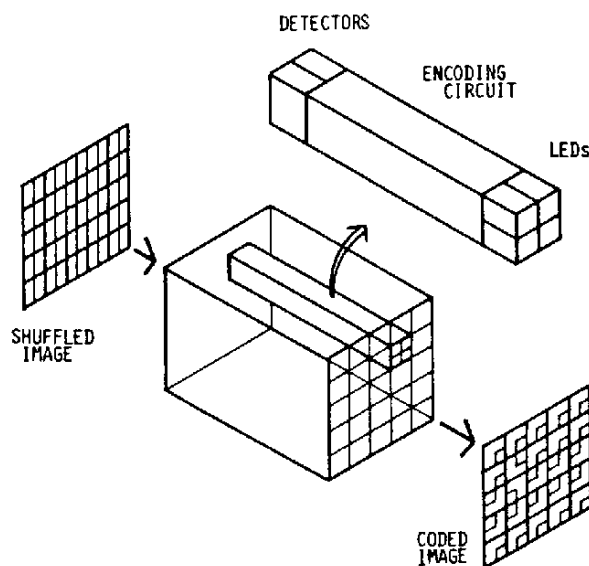


図3-9 並列2ビットデコーダアレイの概念図

[参考文献]

- [1] 一岡芳樹 応用物理, 54, 1019 (1985).
- [2] Conf. Digest of 1990 Int. Topical Meeting on Opt. Computing (1990),  
Streibl, N., Brenner, K.-H., Huang, A., Jahns, J., Jewell, J., Lohmann, A. W.,  
Miller, D. A. B., Murdocca, M., Prise, M. E. and Sizer, T. Proc. IEEE 77, 1954  
(1989).
- [3] 谷田 純 応用物理, 58, 1604 (1989).
- [4] Ginberg, J., Jacobson, A. D., Bleha, W. P., Miller, L., Fraas, L., Boswell, D. and  
Myer, G. Opt. Eng. 14, 217 (1975).
- [5] Hou, S. L. and Oliver, D. S. Appl. Phys. Lett. 18, 325 (1971).
- [6] Warde, C., Fisher, A. D., Cocco, D. M. and Burmaw, M. Y. : Opt. Lett. 3, 196 (1978).
- [7] 笠原健一: 光学, 18, 330 (1989).
- [8] Gibbs, H. M., McCall, S. L., Venkatesan, T. N. C., Gossard, A. C., Passner, A. and  
Wiegmann, W. : Appl. Phys. Lett. 35, 451 (1979).
- [9] Miller, D. A. B., Chemla, D. S., Damen, T. C., Gossard, A. C., Wiegmann, W.,  
Wood, T. H. and Burrus, C. A. Appl. Phys. Lett. 45, 13 (1984).
- [10] Sasaki, A. and Kuzuhara, M. : Jpn. J. Appl. Phys. 20, L283 (1981).
- [11] Ogawa, Y., Ito, H. and Inaba, H. : Jpn. J. Appl. Phys. 20, L646 (1981).
- [12] Tanida, J. and Ichioka, Y. : J. Opt. Soc. Am. 73, 800 (1983).
- [13] Brenner, K. H., Huang, A. and Streibl, N. : Appl. Opt. 25, 3054 (1986).
- [14] Huang, K. S., Jenkins, B. K. and Sawchuk, A. A. : Appl. Opt. 28 1263 (1989).
- [15] Fukui, M. and Kitayama, K. : Appl. Opt. (submitted).
- [16] Jahns, J. and Murdocca, M. J. : Appl. Opt. 27, 3155 (1988).
- [17] Huang, A. Optical Computing, 1989 Technical Digest Series Vol. 9, p. 198  
(1989).
- [18] Huang, A. : Proc. SPIE vol. 1359, p. 259 (1990).
- [19] Kiamilev, F., Esner, S. C., Paturi, R., Fainman, Y., Mercier, P., Guest, C. C.,  
and Lee, S. H. : Opt. Eng. 28, 396 (1989).
- [20] Wherret, B. S., Bowman, S., Buller, G. S., Craig, R. G. A., Mathew, J. G. H.,  
Smith, S. D., Snowdon, J. F., Tooley, F. A. P. and Walker, A. C. Proc. SPIE Vol. 1359,  
p. 154 (1990).
- [21] Tanida, J. and Ichioka, Y. : J. Opt. Soc. Am. A 2, 1245 (1985), 谷田 純,  
一岡芳樹, 応用物理 60, 49 (1991).
- [22] Tanida, J. and Ichioka, Y. : Appl. Opt. 25, 1565 (1986).
- [23] Tanida, J., Nakagawa, J., Yagyu, E., Fukui, M. and Ichioka, Y. : Appl. Opt. 29,  
2510 (1990).
- [24] Tanida, J. and Ichioka, Y. : Appl. Opt. 26, 3954 (1987).
- [25] Ichioka, Y. : Optoelectronics-Devices and Technologies- 4, 39 (1989).
- [26] Tanida, J. and Ichioka, Y. : Appl. Opt. 27, 2926 (1988).
- [27] Tanida, J. and Ichioka, Y. : Appl. Opt. 27, 2931 (1988).

### 3 3 並列デジタル光コンピュータの実現を目指して

#### 3 3 1 並列デジタル光コンピュータのアーキテクチャ

##### 3 3 1 1 開発のシナリオ

並列光コンピュータの実現には、段階的な開発目標の設定が必要である。すなわち、比較的既存のデジタル計算機に近い形態を持つシステムからはじめ、より光の特質を活かせるものへと開発の対象を広げていく。あるいは、個別部品による構成から集積化システムへと発展させていく。これらの開発過程において、並列光演算システムを構築するための周辺技術を確立し、高度な並列性を有するシステムの実現をめざす。

##### 3 3 1 2 システムアーキテクチャ

並列光コンピュータのアーキテクチャには様々な方式が考えられる。たとえば、従来のフォンノイマンコンピュータを2次元的に拡張した保守的なものから、光の物理的な性質である並列性や可干渉／非干渉性を積極的に応用しようとする革新的なものなどが検討されている。ここでは、小規模並列光プロセッサをもとにした並列光コンピュータのアーキテクチャを開発シナリオに従って考察する。

1) 開発前期では、並列光コンピュータの基本形としての小規模並列光プロセッサの開発を想定する。小規模並列光プロセッサは光アレイロジックになどの並列論理演算技術を利用して、2次元データに対する並列処理を実現するものである。この小規模並列光プロセッサは並列光コンピュータが持つべき基本的な機能を備え、初期の開発目標として妥当なものと考えられる。小規模並列光プロセッサ自身はデータを保存するメモリ装置を有しないため、コンピュータの全システムを構成できるものではない。

2) 開発中期では、並列光コンピュータシステムが開発目標となる。このシステムは、たとえば、図3 10に示すように、複数の専用演算ユニット、並列レノスタ、並列メモリ、並列クロスハ接続装置、並列入出力装置により構成され、システム制御器からの命令により、決められた手順にしたがって2次元データに対する処理を実行する。各ユニットは、開発前期の目標である小規模並列光プロセッサを簡素化した並列演算処理モジュールの組み合わせにより構成する。すなわち、図3 11に示すように、同一規格のモジュールを多数用意し、所望の演算用に内部状態を設定したモジュールの組み合わせで、種々の並列演算・処理回路を実現できる。たとえば、図3 12に示すように、並列演算モジュールを組み合わせで並列算術演算回路などを構成する。

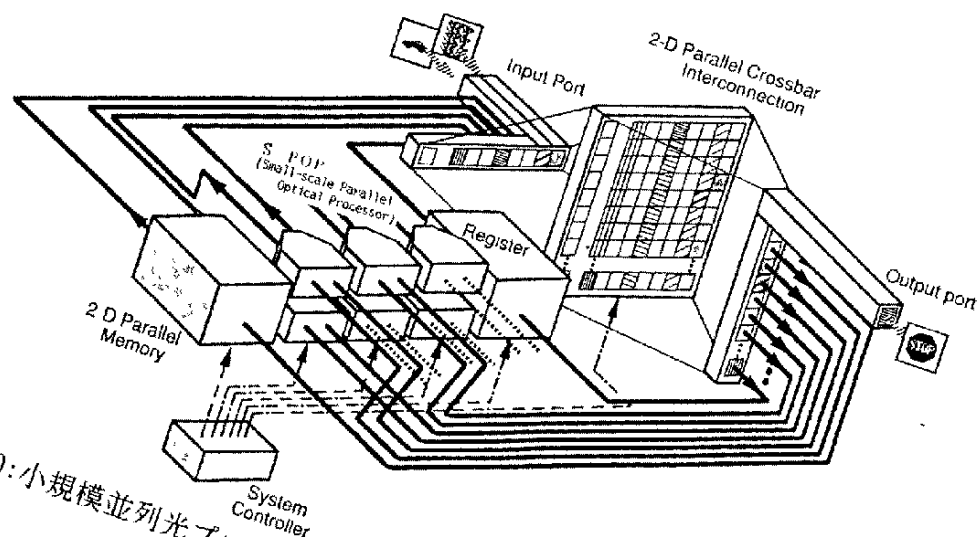


図 3.10: 小規模並列光プロセッサ集積にもとづく並列光コンピュータの構成例

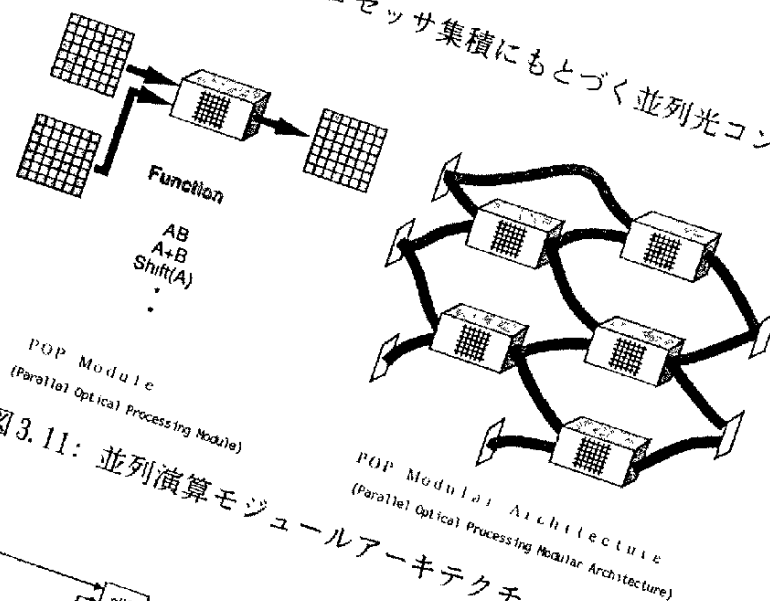


図 3.11: 並列演算モジュールアーキテクチャの概念図

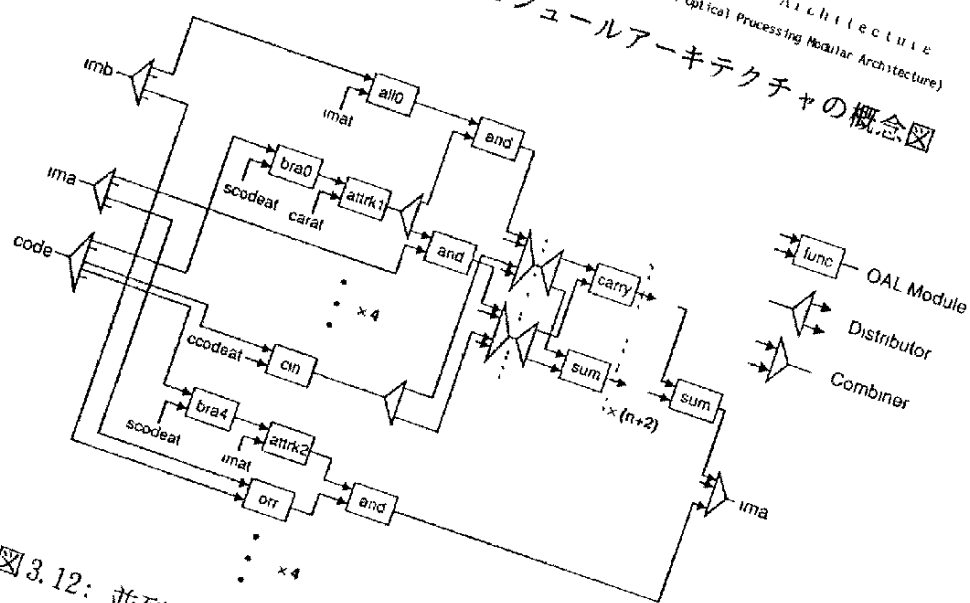


図 3.12: 並列演算モジュールによる算術演算回路の設計例

3) 開発後期では、さらに大規模な並列光コンピュータの開発を目標とする。このシステムは中期までに開発されたシステムを統合する形で構成される。並列演算モジュールを多数接続し、柔軟な処理をはしめとする高度な情報処理の実現をめざす。システムの巨大化にともない、3次元光集積回路の確立をはしめ、さらなる並列演算モジュールのコンパクト化が要求される。また、システムの安定性・信頼性を保証するための自己診断機能、自己補正機能などの技術が確立されなければならない。さらに、システムの並列性を活かすため、並列化コンパイラなどの並列ソフトウェア技術の研究も非常に重要となる。

### 3 3 1 3 並列光入出力システム

光コンピューティングの高速並列演算特性を活用するには、インタフェース、入出力もそれに対応して、並列で高速でなくてはならない。光源や光検出器の超並列化、非線形素子の並列化などによって、入出力の並列化も大きく進展するであろう。入力装置に関しては、音声や画像などの多次元情報の実時間入力、センサフュージョン（検出器融合）などにおける異次元情報の実時間入力などの可能性が開けてくることか期待される。これらの発展として、実時間3次元像表示装置やカラー3次元像表示装置、対話型立体像入出力装置が可能となろう。

### 3 3 1 4 光メモリ

並列光デバイスの高速化により並列ラッチメモリが利用可能になり、これらのモジュール化により本格的な並列デジタル光コンピュータの設計試作が可能となる。並列ラッチメモリは並列入出力でも重要なデバイスであり、素子の信頼性・均一性の向上、アクセス時間の短縮、並列度の向上をなお一層進めることか重要である。また、光メモリの大規模並列アクセスの可能性と柔軟な情報検索法との関連も検討項目となろう。

### 3 3 1 5 光アナログシステム

アナログ光コンピューティングシステムは、従来から、専用光コンピューティングのアーキテクチャとして注目されてきた。光スペクトルアナライザ、光相関器、欠陥検出装置、側視レータ像再生装置などで実用化されている。しかし、潜在的な並列処理の能力に対して実用化の分野がひろからなかった理由は、(1) 処理の柔軟性がない、(2) 適当な高速並列デバイスがない、(3) 精度が不足である、などがあげられる。これらの問題点は、高解像度の並列デバイスの開発、ニューロコンピューティングや学習・自己組織化過程を取り込んだ柔軟な情報処理との統合化により新しい局面が開けてこよう。

## 3 3 2 並列光コンピュータ用の演算原理

超並列のデジタル光コンピュータ開発のためには、新しい並列デバイスの開発ばかりでなく、新しい演算原理の探求と新しい機能の実現・応用が必要である。並列光演算法に関しては、光アレイロジック、パターン符号化論理や符号置換論理などの並列基本論理演算の追求ばかりでなく、

### (1) 多値論理や波長多重化論理

## (2) 超並列モルフォロノ

などの研究もさらに進める必要がある。

従来のアルコリズムはほとんどすべて逐次的な演算原理にもとづいていた。また、現在までに提案されている並列演算も画一的固定的なものが多い。光による超並列演算においては、各並列要素が分散的協調的に演算処理が実行できる演算原理を確立すべきである。このためには、各並列要素はある意味で自立的であり各要素間の接続は再構成可能でなくてはならない。このような光接続法は、柔軟かい光接続と呼んでも良いであろう。柔軟かな再構成可能超並列接続実現のためには、

(1) 新しい高効率高帯域な並列光接続法

(2) 受光・発光、増幅、しきい値処理、記憶などの機能を複合化した並列デバイス

(3) 学習機能や自己組織化機能を持ったネットワーク制御の開発

などが必須である。

超並列光コンピュータ駆動原理としては、学習機能を利用したニューラルネットワーク応用システムが当面の目標であると考えられる。ニューロシステム導入により並列システムのプログラムの問題が解決可能となる。さらに、これらの光ニューロシステムの統合化により、自己組織的な分散協調システムが可能となろう。自己組織的な分散協調システムに関しては、各要素間の最適役割配分、作業状況の監視など、未開拓の研究分野が多いか、システムの柔軟性やロバスト性の発揮など超並列システムに不可欠の特徴を獲得できる。

並列入出力技術と並列メモリ技術に関しては、単に光演算の要素技術としての観点からはかりでなく、ディスプレイ、計測の観点からも重要性が高い。並列演算システムとの統合により、環境や使用者の状況に対応できる能動的ディスプレイ、分散協調型の知的なセンサシステム、などへの道が開かれる。

### 3.3.3 並列光演算システム用光機能デバイス、プロセス、設計製作技術

#### 3.3.3.1 半導体光機能デバイス

##### (1) 現状

半導体光デバイスとしては光の高速性ととともに、並列性（空間軸、波長軸）を情報処理に利用する研究が活発になっている。光の持つポテンシャルを十分に使いこなすためには時間、空間、波長（周波数）の各軸への展開と、それらを上手に組み合わせる方式の開発が重要となる（表3.3）。

光インタコネクションでは発光素子の方が良いか、それとも消費電力の点からパッシブな変調素子を用いた方が良いのかという問題がある。しかしながら、変調素子を使う方式にしても結局は外部に発光素子が必要であり、そのためにも、低消費電力で小型な光源の開発が不可欠である。その様な光源の候補として、垂直共振器型面発光レーザがある。一方、変調素子としてはMQW面型光変調素子などが重要になるであろう。

表3 3 半導体光機能素子の分類

| 機 能 |                                                      | 現 状                                                                             | 課 題                                                                                                                         |
|-----|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 空間  | 発光                                                   | 面発光レーザ                                                                          | 低消費化（閾値電流、内部抵抗の低減）<br>電気－光変換効率の増大                                                                                           |
|     | 受光                                                   | LED<br>PD                                                                       | 電気－光変換効率、速度<br>発光素子に対応したPDの開発、高効率化                                                                                          |
|     | 光変調<br>機能デバイス<br>発光、<br>スイッチ、<br>メモリなど<br><br>光ヒーム制御 | MQW 面型光変調素子<br><br>面型光電融合／<br>集積素子<br>双安定半導体レーザ<br>SEED<br>偏光、偏向素子<br>光ヒーム収差・発散 | 変調効率、高コントラスト比<br><br>低消費化、低スイッチングエネルギー<br>低消費化、小型・集積化、安定性<br>高コントラスト比、低スイッチングエネルギー<br>ヒーム偏光角の増大、屈折率制御技術<br>波面制御技術（位相共役効果など） |
| 波長  | 波長可変                                                 | 波長可変レーザ、<br>可変波長フィルタ                                                            | 波長可変幅の拡大、屈折率制御技術<br>小型・集積化                                                                                                  |
|     | 波長変換                                                 | 双安定半導体レーザ                                                                       | 安定性、小型・集積化                                                                                                                  |
| 時間  | 超高速<br>発・受光<br>超高速変調                                 | 超短光パルス<br>発生素子など<br>進行波型光変調素子<br>非線形光学素子                                        | 小型・集積化<br>低電力化、小型・集積化<br>新材料、デバイス構造                                                                                         |

光インタコネクションから光演算へと展開するには発・受光のほかに、光スイッチや光メモリ、光増幅機能などの半導体光機能デバイスや、光ヒームを制御する機能光デバイスの開発が必要となる。また、小型で低消費な波長可変レーザや波長可変フィルタなども光の波長軸の利用の観点から必要になるものと考えられる。

時間軸の追求は、光通信の100Gb/s、あるいは1Tb/sといった流れの中で研究が活発に進められているか、光コンピュータへの応用の観点からは、2－3次元集積化の実現が課題である。

以下では、ここ最近、活発に研究が行われている半導体光デバイスに絞って、最近の進展を中心に現状と課題について述べる。

#### a 空間軸を指向したデバイス面発光レーザ(図3 13)

垂直共振器型面発光レーザ[東工大, 1]は、他の水平共振器+回折格子タイプや、半導体レーザ+45°反射鏡タイプなどとは比べた場合、素子サイズが数 $\mu\text{m}$   $\phi$ と小さく、高密度



な2次元集積化に関して有利となる。垂直共振器型面発光レーザでは活性層の体積を多重量子井戸層(MQW)として小さくし、上下の反射鏡に高反射率の半導体多層膜を形成した構造で、数mA台で発振するものかここ1年、何件か報告された。AlGaAs/GaAs系で活性層はInGaAs歪量子井戸(波長 $\sim 960\text{nm}$ )からなり、 $7\mu\text{m}$   $\phi$ の素子において室温連続動作で閾値電流 $2.5\text{mA}$ 、微分量子効率 $10\%$ 以上、また光出力は $6\text{mA}$ 通電時で約 $0.3\text{mW}$ という値か実現されている。また、高速特性に関しては緩和振動周波数 $\sim 6\text{GHz}$ 、 $3\text{dB}$ タウ周波数で $\sim 8\text{GHz}$ という値か実現され、また利得スイッチング法で $30\text{ps}$ 以下の短光パルスの発生も実現されている[AT&T Bell, 2]。cw最小閾値電流に関しては $0.7\text{mA}$ というデータも報告されている[UCSB, 3]。また、 $32\times 32$ の面発光レーザアレイも報告されている[Bellcore, 4]。

垂直共振器型面発光レーザの基本的な課題は、1)消費電力の低減、2)電気-光変換効率の増大、にある。1)に関しては発振閾値電流かとの位まで低減できるかという問題かある。理論的には $1\mu\text{m}$   $\phi$ の径の素子で、数 $\mu\text{A}$ くらいに閾値電流はできるはずであるか、現状では活性層側壁での非発光電流のために2 $\sim$ 3桁大きくなっている。横モード制御と絡んで非発光電流の低減のための方策か必要である。2)に関しては内部抵抗の低減か必要である。

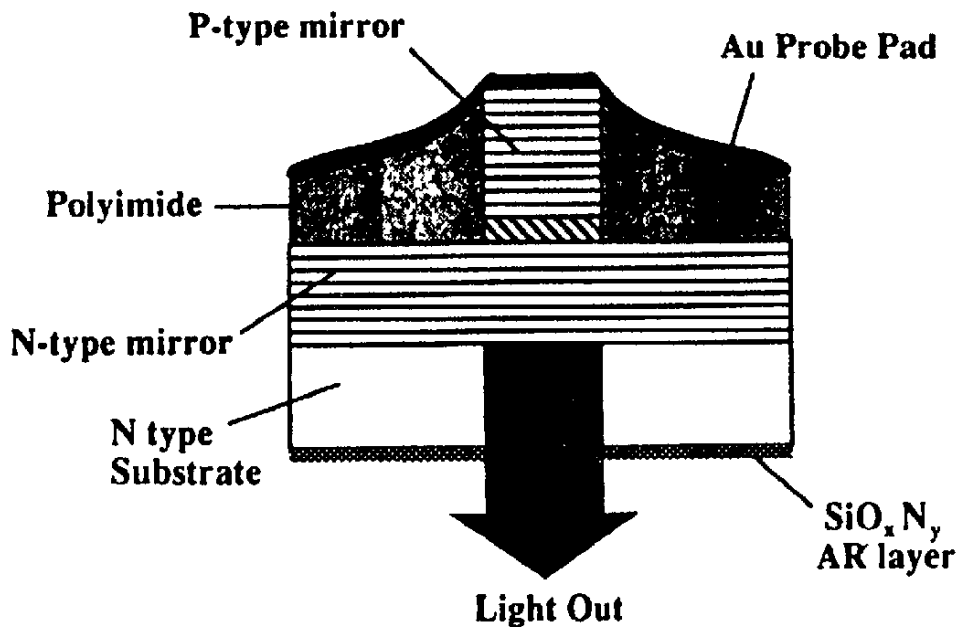


図3 13 垂直共振器型面発光レーザの構造

#### MQW面型光変調素子

I層を多重量子井戸(MQW)構造にしたPINフォトダイオードに逆バイアス電圧をかけて用いる構造か代表的である。印加電圧の大小によってMQW中の励起子単位によって生じた急峻なバンド端かノフトし、それによって光の透過特性や反射特性か変化する。

課題はコントラスト比を上げると共に、変調効率を増大させて印加電圧は小さくすることである。そのための構造としてPINフォトダイオードの上下に異なる反射率を持った半導体の多層膜反射鏡を形成し、ファブリペロー共振器の共振特性を利用する構造か検討

されている。この構造で変調効率か20%/V、コントラスト比は17dBという値か実現されている(UCSB)。

たし、共振特性を使うことて印加電圧や膜厚に対する設計トレランスは小さくなる。したかつて、素子作製上の観点からは膜厚制御性の高い結晶成長技術の開発か鍵となる。

### 面型光電融合／集積素子

ON状態でLED発光するpnpn構造の面入出力光電融合素子(pnpn-VSTEP)はスイッチやメモリなどの機能を持つ素子である(図3 14)。材料はAlGaAs/GaAs系て報告されている。光電融合構造の特徴を生かして、入力は光(面に垂直方向)、電気(面方向)、両方とも可能であるので、比較的に既存の電子コンピュータと接続の相性が良いものと考えられる。pnpn-VSTEPの2次元アレイ化(32×32)か報告されている。この素子てはさらに、ON状態ての発光をLEDモードからレーサモードにした、垂直共振器型pnpn-VSTEPか報告されている[日本電気, 5]。InGaAs歪量子井戸活性層をpnpn構造の中に形成し、上下にレーサ発振用のAlAs/GaAs多層膜反射鏡か設けられた構造となっている。素子サイズか $10\mu\text{m}^2$ のものて発振閾値電流は2.5mA(室温パルス)であり、発振波長は955nmである。

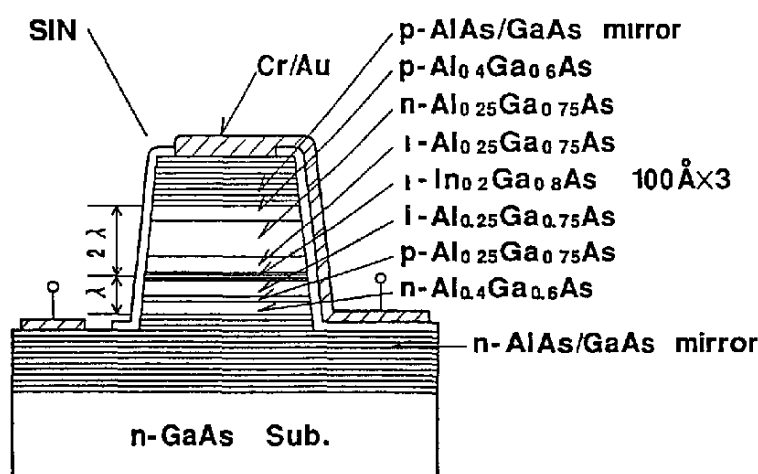


図3 14 レーサ型pnpn-VSTEPの構造

またpnpn構造素子を用い、発受光機能を兼ね備えた自己走査型発光素子も作られている。1次元光ノフトのほかに2次元光ノフト機能を有する3×3集積素子か報告されている。発光はLEDモードである[日本板硝子, 6]。GaInAsP/InP系てはLEDとヘテロ接合フォトランスタを積層した構造の素子か研究されている。光メモリ動作か得られるか、同素子に並列にヘテロ接合フォトランスタを1個、設けた構造を基本セルとして光セリトだけでなく光リセリトできるものか作られている。そして、この素子を10×10集積化したデバイスか報告されている[松下, 7]。

### 双安定半導体レーサ

光スイッチ、光メモリ、光波形整形などの機能を持つ双安定半導体レーサは現状ては光通信や光交換への応用を目的に研究されている。双安定半導体レーサを小型て2次元並列化てきるような構造とすることは必ずしも容易てはない。このタイプの素子は通常のエリ

ノエミソティソクノ半導体レーサノように横方向から光か入って反対ノ端面から出力光か出ていく構造をしていくか、活性領域と可飽和吸収領域を設けるたけでなく、さらにDBR領域と位相ソフト領域を設けることによつて1Gb/sノ波長変換動作なとか得られていく[富士通, 8]。

#### SEED (表3 4)

AT&T Bell 研か進めていくSEEDは、MQW中ノ励起子準位ノQCSE効果を用い、外部電子回路ノ帰還効果によつて光吸収を変化させ、光双安定特性を得るものである。各種ノ基本構成か発表されているか、素子間ノ特性ノばらつきに対するトレランスか広がり、抵抗を別個に形成して集積する必要かないなとの利点を有したS-SEEDか中心になっている(図3 15)。

S-SEEDノ高速スイッチング動作に関しては、ハリア層ノ厚さを薄くすることにより、33ps(25V電圧印加時、スイッチングエネルギー $4 \pm 1$  pJ)という値か実現されている。また集積度に関しては $62 \times 32$ というアレイか報告されている。

$16 \times 8$ 個から成る2次元ノS-SEEDアレイ3段か光クロスオーハ接続された系か、6日間にわたつて無調整で安定に動作したことか報告されている。クロスオーハ光接続はミラーとプリズムクレティソクを使った系で実現される。S-SEEDへノ最終的な入力光強度は200nWであり、これによつて動作速度(31kps)か決定されている[9]。

また、最近では量子井戸pin フォトダイオートを電気配線で結合した論理ゲートも発表されている(L-SEED)。入力か光で電気ノNMOSに似た構成と、入出力共に光ノCMOSに似た2つノ構成を発表されている。S-SEEDノ特徴と同しように、ハイス条件か微妙でない、従続接続か容易になる、入出力間ノアイソレーソソンか良くなるなとの利点を有している。

表3 4 各種SEEDノ構造、特徴

| 分 類                                            | 基 本 構 造              | 特 徴                       |
|------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| SEED<br>(Self-Electro-<br>Optic-Effect Device) | MQW-pin +抵抗          | 光メモリ、スイッチ                 |
| D-SEED<br>(Diode-biased SEED)                  | MQW-pin              | 光アトレスか可能                  |
| S-SEED<br>(Symmetric SEED)                     | 2個ノMQW-pin<br>を直列に接続 | 動作条件ノ緩和ノセツト、<br>リセツト動作    |
| F-SEED<br>(Field-effect<br>transistor SEED)    | MQW-pin+FET          | 電子素子を取り込み、機能拡張<br>3端子光増幅器 |
| L-SEED                                         | 何個かのMQW-pin          | 光論理動作ノ拡張                  |

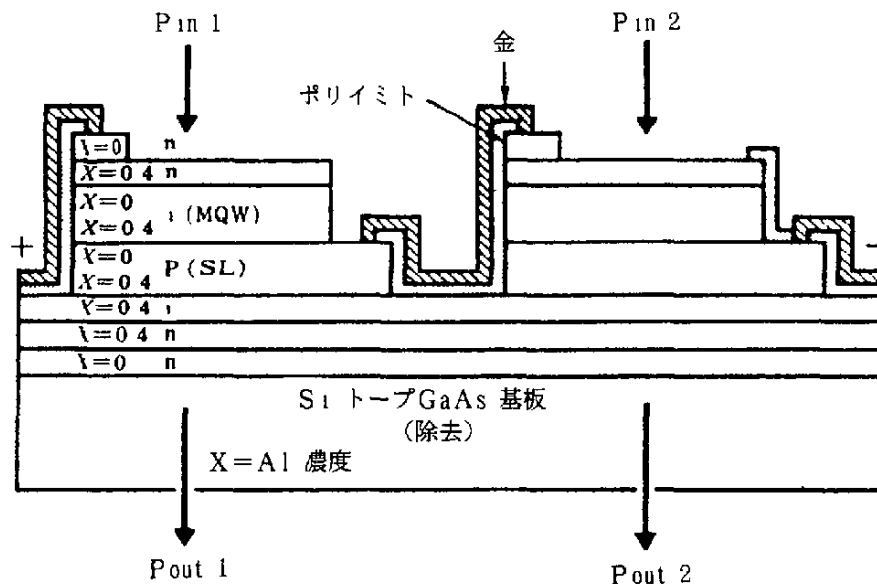


図3 15 S - S E E Dの構造

#### 光ヒーム制御素子

ヒーム偏向ツインストライプレーザと回折格子型素子が報告されている。ヒーム偏向ツインストライプレーザ[電総研, 10]は光ヒームの偏向が連続的に $\pm 5$ 度程度まで成されている。回折格子型素子は波長可変半導体レーザが基本となっており、波長の変化に対して面方向に出てくる光の出射角度が変化する。

#### b. 波長、周波数軸を指向したデバイス

波長可変レーザや可変波長フィルタは大容量光通信や光交換への応用を目的にして研究開発が行われている。DFBレーザやDBRレーザをベースにした構造で、波長可変レーザではInGaAsP/InP系の素子で、連続的な波長可変幅が70Åという値が実現されている[Siemens, 11]。可変波長フィルタでは波長帯域が15Å、23dBの利得のあるフィルタが報告されている[日本電気, 12]。いすれにしても、光コンピュータへの応用では波長可変幅の一層の拡大だけでなく、素子の低消費電力化と小型化によって、2-3次元の集積化が可能となるようなデバイスがてきるかとうかが鍵となる。

#### (2) 今後の課題

並列光コンピュータには小型で2次元集積化が可能な面型光デバイスの開発が必要となる。光コンピュータのアーキテクチャを支える光インタコネクションのフェースとしては固定接続からスタートし、次に電気、光制御の可変接続へ展開し、さらにはプロトキャストへと進んで行くことが予想される。そのために、まずは面発光半導体レーザアレイや受光素子アレイ、面型光変調素子アレイの開発が必要となる。さらに可変な光接続を実現するためには閾値やスイッチ、メモリ、光増幅などの機能を持った光機能素子アレイが不可欠である。また光コンピュータと言えど、シリコン(Si)などの電気回路を完全に不要とすることは不可能であり、電気系とのインタフェースとなるOEICの開発も大事である。

多数の面型光素子によるプロトキャストを実現するためには、光の波長や周波数軸を

使って多重度を上げて識別する方法が考えられる。そのためには、面型の波長可変光源や波長可変フィルタなどの実現が鍵となる。

集積度としては $10^3 \sim 10^6$  bit/チップが必要となるだろう。そのために開発を要する技術の内て、製作に関する主要テーマは以下のようなものか考えられる。

#### a 高膜厚制御、大面積結晶成長技術

並列光演算システム用の半導体光機能デバイスの製作には、各半導体層の層厚を数原子層オーダー、しかも大面積にわたって制御することが必要となる。現状のMBEなどの技術を用いると、数cmφのウェハで1%台の膜厚均一性を達成することかできるか、さらにもう1桁以上の制御性の高い技術が必要とされる。その様な結晶成長技術として、ALE（原子層エピタキシー）の研究が行われているか、成長速度が遅く、数 $\mu\text{m}$ 程度の膜厚形成が難しいなど実用上の問題点があり、数インチにわたって均一な半導体結晶を実用的な速度で成長する技術の開発が必要である。

#### b 異種材料・結晶成長技術

光学的なアライメントをできるだけ低減し、実装を簡単にするためにはS<sub>1</sub>デバイスなどの融合を図るべく、化合物半導体(GaAs/InP系) on S<sub>1</sub>、Si<sub>m</sub>/Ge<sub>n</sub>歪超格子などの結晶成長技術の開発が必要となる。これらの研究は現在、すでに進められており、GaAs on S<sub>1</sub>では最近、転位密度が $10^4/\text{cm}^2$ 台にまで下がったという報告もなされているか、市販のGaAsウェハの転位密度を考えると、さらにもう1桁以上の低減が必要である。

#### c 高精細な立体微細素子加工技術

面型光デバイスは光の波長にして数波長程度（1波長で $\sim 1,000\text{\AA}$ ）の微細なデバイスであるか、この位のサイズになると新しい物理現象(cavityQEDなど)が現れてくることが理論的に予測され、実験的にも観測され始めている。電子デバイスで量子波動効果を実現するには、さらに1/10くらいに素子サイズを小さくしなければならず、素子サイズの点で光デバイスの方が電子デバイスより有利である。上記現象を応用して超低消費で高速な面型光デバイスを実現するためには凸凹面上での高精細な立体微細素子加工技術の開発が不可欠である。表3.5に半導体デバイスの開発目標を示す。

表3 5 半導体デハイスの開発目標

|         |                                                                                              |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 機 能     | 発光・受光素子アレイ、光変調素子アレイ<br>光機能素子アレイ<br>(光伝達、閾値、スイッチ、メモリ、光増幅)<br>SLM、並列処理用OEIC<br>波長可変光源、波長可変フィルタ |
| 速 度     | 数100Mb ～数Gb/s・素子                                                                             |
| 集積度     | $10^3 \sim 10^6 \text{ bit}$                                                                 |
| 開発すべき技術 | 設計技術<br>製作技術——高膜厚制御、大面積結晶成長技術<br>異種材料・結晶成長技術<br>高精細な立体微細素子加工技術<br>実装技術<br>標準化技術              |

[参考文献]

- [1] 伊賀健一, 小山二三夫 面発光レーザ, オーム社
- [2] Jewell, J L et al CLEO, CFF1, p 500 (Anaheim, 1990)
- [3] Geels, R S et al 12th IEEE Int. Semiconductor Conf, B-1 (Davos, 1990)
- [4] Orenstein, M et al CLEO, CTUF, p 88 (Anaheim, 1990)
- [5] Sugimoto, M et al LEOS Annual Meeting, PD-8 (Boston, 1990)
- [6] 楠田幸久 他 90 年秋季応物予稿 27a-H-4 p 786
- [7] Matsuda, K et al CLEO, CM16, p 40 (Anaheim, 1990)
- [8] 近藤賢太郎 他 90 年春季応物予稿 30p-F-3 p 941
- [9] McCormic, F B et al CLEO, CPDP-1, p 597 (Anaheim, 1990)
- [10] 向井誠二 他 O plus E, 8, p 114 (1989)
- [11] Aman, M ECOC, TuF1 p 761 (Amsterdam, 1990)
- [12] Numai, T IEEE Photonics Technol Lett, 2, p 401 (1990)

### 3 3 3 2 空間光変調素子

光を用いた超高速かつ並列的な演算には、光の空間的な状態を高速に変調する素子が必要となる。これが空間光変調素子である。ここでは、現在研究が行われている空間光変調素子の中で注目されているものについて、その特徴と課題を概説する。

(1) 強誘電性液晶空間光変調素子 (FLC-SLM Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulator)

FLC-SLMは、光アトレス材料として光導電体を用い、光変調材料として強誘電性液晶を用いた空間光変調素子である[1]。その代表的な構造を図3 16 に示す。この素子の多くは、内部に誘電体ミラーを有する反射型の構造をしている。光導電体として水素化アモルファスシリコン (a-Si H) を用い、書き込み光感度はサブpJと小さくなっている。また、強誘電性液晶の層厚が $1\sim 2\mu\text{m}$ と薄く、極めて精細な画像の書き込みが可能であり、限界解像度 $200\text{lp/mm}$  ( $1\text{mm}$ 当り白黒線対が200対書き込める)と写真フィルムに近い解像度を持ったものも報告されている(図3 17) [1]。これを利用したホログラフィックなパターン認識システムの研究も報告されている[14]。

FLC-SLMの動作速度は、1画面を書き込むのに $70\sim 500\mu\text{s}$ と現有の空間光変調素子で最も高速な部類に属する[1, 2]。強誘電性液晶の持つ能力から推定すると、動作速度は数 $\mu\text{s}$ 程度まで改善されるものと期待される。書き込みに要する光照射時間だけであると $100\text{ns}$ 以下でよいという報告もある。これは、レーザ走査で1ヒットつつ情報を書き込んでも、 $1,000\times 1,000$ の情報を書き込むのに $100\text{ms}$ 以下で書き込めることを意味している。この方法は、部分消去やヒットサイズの変調が可能であり、並列デジタル光演算系を電子系のインタフェースとして有力な方法である。図3 18に、この方法で書き込まれたイメージを示す[3]。

強誘電性液晶は双安定性を有しているため、並列デジタル光演算や二値化処理を要する光演算に適している。しかし、アナログ的な光演算には連続階調を持ったイメージの書き込みも必要である。駆動電圧制御法は、素子に印加する直流電圧成分を変化させるだけで二値化イメージも連続階調イメージも表現できるため、より柔軟な並列光演算を実現できる優れた方法である。二値化イメージは、フレームレート $100\text{Hz}\sim 2\text{kHz}$ で記録することかてきている。図3 19に、駆動電圧制御法によって得られた二値化イメージと連続階調イメージの例を示す[15]。

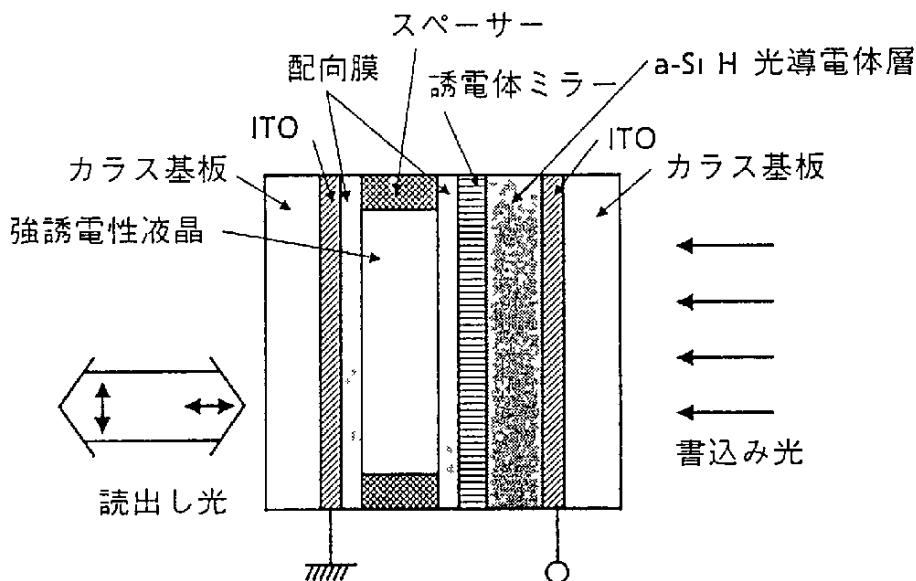


図3 16 FLC-SLMの構造

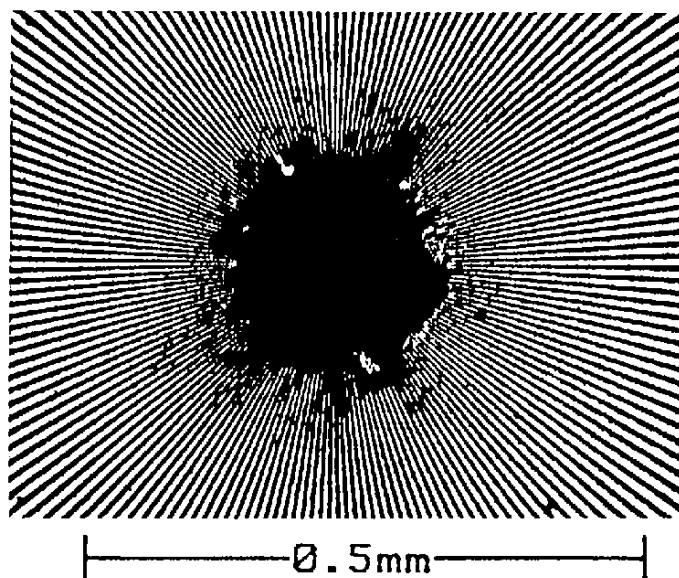


図3 17 F L C - S L Mに書き込まれたシーメンス・スターのイメージ  
中心近傍の解像度は200lp/mm。

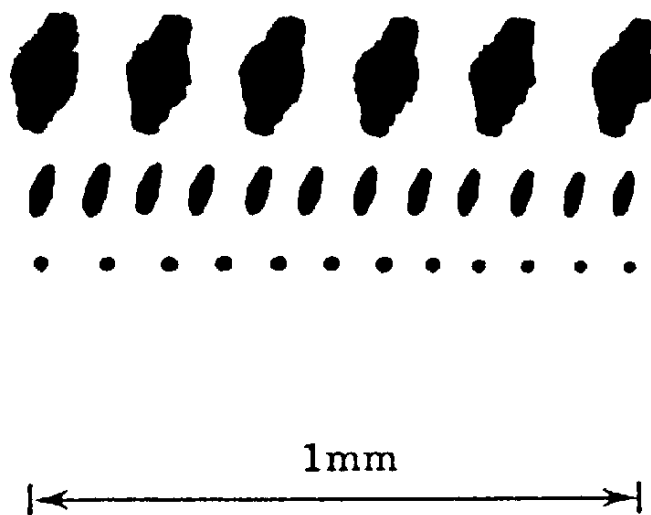


図3 18 F L C - S L Mに書き込まれたレーサ走査によるトリートイメージ  
レーサ照射時間は、上段10 $\mu$ sec、中段1 $\mu$ sec、下段100nsecである。





(a) 二値化イメージ



(b) 連続階調イメージ

図3.19：FLC-SLMに駆動電圧制御方式で書き込まれたイメージ

以上説明したFLC-SLMと各種空間光変調素子の特性を表3.6に示す。

表3.6：各種空間光変調素子とFLC-SLMとの比較

|                            | 素子                             | 有効径<br>(サイズ)<br>(mm) | 解像度<br>50%MTF<br>(lp/mm) | 応答速度<br>(ms)      | 光感度<br>(pJ)           |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|
| 強<br>誘<br>電<br>性<br>液<br>晶 | a-Si/FLC <sup>4)</sup>         | 40.00                | 28.00                    | 0.500             | 0.20                  |
|                            | a-Si:H/FLC <sup>2)</sup>       | 10.0                 | 60.00                    | 0.070             | 0.11                  |
|                            | a-Si:H/FLC <sup>1)</sup>       | (25×30)              | >100                     | 0.500             | 0.03                  |
|                            | TFT-LCLV <sup>5)</sup>         | (40×40)              | 330μm□                   | 0.290             | 200μJ/cm <sup>2</sup> |
|                            | FLC-SLM <sup>6)</sup>          | 20                   | >20                      | >0.1              | 6.25                  |
|                            | BSO-SSFLC <sup>7)</sup>        | —                    | —                        | >0.1              | 0.008                 |
| T<br>N<br>液<br>晶           | Hughes LCLV <sup>8)</sup>      | 25.00                | 16.00                    | 100.000           | 50.00                 |
|                            | Hoechst Celanese <sup>9)</sup> | 40.00                | 38.00                    | 25.000            | 36.00                 |
|                            | a-Si:H/nematic <sup>10)</sup>  | 38.00                | >35.00                   | 100.000           | 2.00                  |
|                            | a-Si/nematic <sup>11)</sup>    | >35.00               | 5.00                     | 1.400             | 2.50                  |
| そ<br>の<br>他                | PROM <sup>12)</sup>            | (15×15)              | 15                       | 5                 | 5μJ/cm <sup>2</sup>   |
|                            | MSLM <sup>13)</sup>            | 15                   | 15                       | 30                | 5 pJ/cm <sup>2</sup>  |
|                            | Thermoplastics <sup>12)</sup>  | (30×30)              | 1000                     | 5×10 <sup>3</sup> | 10μJ/cm <sup>2</sup>  |

## (2) 液晶テレビ

液晶テレビは、電子システムと光システムのインタフェース、特に、2次元情報の入力手段として最も重要な空間光変調素子である。これまで大型平面ディスプレイとして開発が急速に進み、現在では14インチフルカラー液晶ディスプレイも商品化されようとしている。

空間光変調素子としての液晶テレビに要求される特性は、より高い解像度と、より高速な動作である。解像度に関しては、 $90\mu\text{m}$  角の画素を1インチ画面に $220\times 300$ 配列したものが既に液晶プロジェクタ用の素子として製品化されており(図3 20)、解像度としては約6 Lp/mmとなっている[16]。多結晶シリコンを用いて駆動用ICを内部に集積して小型化しており、解像度も従来の液晶テレビの4~6倍高い値である。しかしながら、 $1,000\times 1,000$ 以上の並列度を目指した並列光演算を実現するためには、解像度、画素数ともにまた不十分であると言わざるを得ない。

液晶テレビは、現在、ヒテオレートである1フレーム当り30Hzの速さで動作するように作製されている。しかし、並列テンソル光演算を行なうには、1フレーム当り1 KHz以上の高速動作が可能な液晶テレビを実現する必要がある。このような高速動作には、光変調材料や駆動トランジスタに用いられている半導体材料をより高速に動作できる材料に代えていく必要がある。

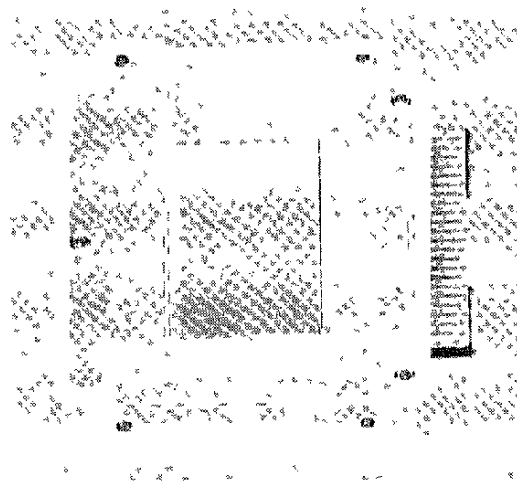


図3 20 液晶プロジェクタ用の高解像度小型液晶テレビ

## (3) 電気光学結晶を用いた空間光変調素子

その他の空間光変調素子で重要なものとしてBSOポッケルス型空間光変調素子(Pockels Readout Optical Modulator PROM)、マイクロチャンネルプレート空間光変調素子(Microchannel Plate SLM MSLM)がある。これらは、いずれも電気光学結晶のポッケルス効果を利用したものである。

PROMの構造を図3 21に示す[12, 13]。PROMに用いられているBSO結晶は、ポッケルス効果と同時に光導電性を有しているため、非常に簡単な素子構造になる。PROMは、1,000 1以上の高いコントラスト比を持っていること、連続階調イメージの記憶かてきることか特徴である。しかしながら、2 Kv程度の高い駆動電圧を用いなければならないこと、読み出し光で記憶されたイメージがリークして消去してしまうことなど問題点も多い。

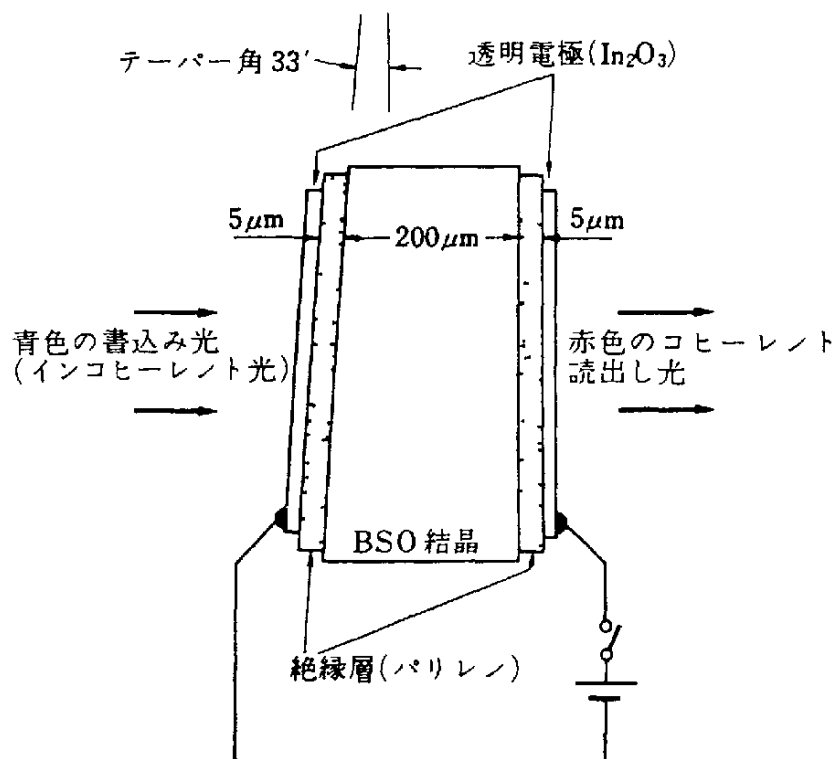


図3 21 PROMの構造

MSLMは、現在最も応用実績のある空間光変調素子である。MSLMには、電子ヒームアトレス方式のものと光アトレス方式のものがある。図3 22に光アトレス方式のMSLMの構造を示す[13]。メッシュ電極の電位を制御することによって、二値化イメージと連続階調イメージを選択することかてきる。解像度は15Lp/mm、コントラスト比は1 100以上である。応答速度が30msと遅いのが欠点である。

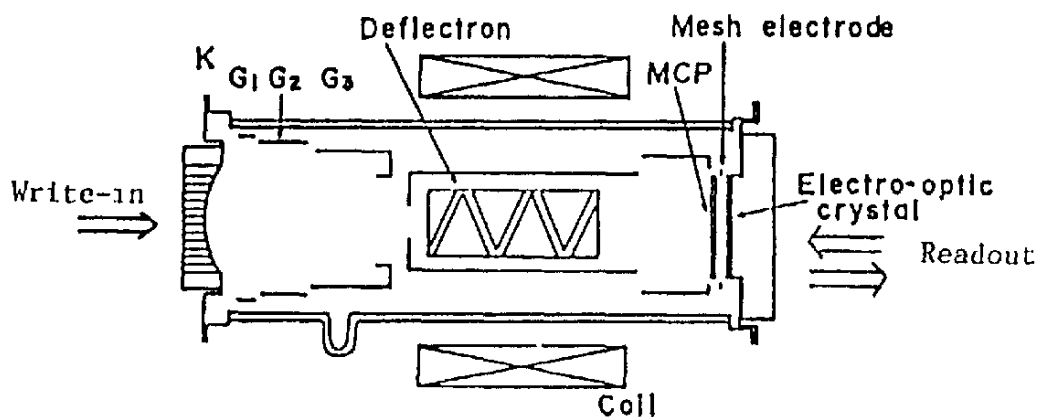


図3 22 光アトレス方式MSLMの構造

#### (4) 性能向上

空間光変調素子に求められる性能は、解像度・画素数、コントラスト比、動作速度、階調、書き込み感度、寸法、均一性、経時的信頼性などである。日本電子工業振興協会のアンケート

ートによると、将来の空間光変調素子の目標仕様として次の結果が報告されている[17]。

- ① 画素数  $400 \times 640 \sim 10,000 \times 10,000$  以上
- ② 解像度  $50 \sim 1,000 \text{ lp/mm}$
- ③ 動作速度  $20 \text{ msec} \sim 1 \text{ nsec/frames}$
- ④ コントラスト比  $1,000 \sim 10,000 : 1$
- ⑤ 階調 16階調
- ⑥ 書き込み感度  $0.1 \mu\text{W/bits}$
- ⑦ 寸法  $1 \sim 2$  インチ対角

これら目標仕様の最も緩い条件のものは、既に実現されている。空間光変調素子の作製において現在最も重要な開発課題は、素子の均一性と信頼性の向上である。

ここでは、上述の目標仕様を最も満足していると思われる強誘電性液晶空間光変調素子 (FLC-SLM) について考えられている均一性、信頼性に関する性能向上のための対策について説明する。FLC-SLMは、光変調材料として層厚  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  に制御された強誘電性液晶を用いている[18]。したがって、素子の構成部材の特性を均一にするだけでなく、この液晶層厚をいかに均一にするか特性の均一性を保証するための条件となっている。そのためには、有効使用領域全面にわたる  $\pm 0.05 \mu\text{m}$  以下の層厚制御精度の実現や、 $\lambda/4$  以上の面精度を持った基板と、その基板間隙を制御していくための種々の制御プロセスの開発等を進めていく必要がある。

FLC-SLMの信頼性向上には、液晶配向技術の向上と、液晶材料の開発促進が必要である。そのためには、真空蒸着法による配向膜形成技術や、ポリイミドなどの有機単分子を基板上に規則正しく配列させて高分子膜を形成することかてきるランクミュアプロシエト法[19]による配向膜形成技術の基礎研究が重要である。また、 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$  にわたる広い温度領域において安定な強誘電相を持った液晶材料の開発や、SmA\*相などの新しい液晶相の積極的な活用が望まれる。

電気光学結晶を用いたBSOポッケルス型空間光変調器 (PRM) やマイクロチャンネルプレート空間光変調器 (MSLM) は、 $100 \sim 1,000 : 1$  以上の高いコントラスト比を持っており、連続諧調のイメージ記録が可能であるか、解像度が  $15 \text{ lp/mm}$  と低い。解像度を向上させるためには、電気光学結晶の厚みをより薄くすること、電気光学結晶に印加される電界をより均一にすることか必要である。最近、BSO結晶をガラス板に接着して研磨加工することにより、従来  $300 \mu\text{m}$  の厚みであったBSO結晶を  $10 \sim 15 \mu\text{m}$  と薄くすることかてきるようになった。また、絶縁膜の代わりに  $20 \mu\text{m}$  と薄いガラス板をBSO結晶に接着して用いることにより、PRMの絶縁耐圧を向上させると同時に印加電界を均一にすることかてきるようになった。これらの結果、PRMの解像度は  $25 \sim 36 \text{ lp/mm}$  と向上し、コントラスト比も  $10,000 : 1$  以上に向上させることかてきている[20]。

電気光学結晶を用いた空間光変調素子の作製に研磨加工・接着技術が重要な意味をもたらしてくるのは電気光学結晶薄膜の育成が極めて困難なためである。薄膜結晶育成に関する基礎技術を積み上げることにより、膜厚  $1 \mu\text{m}$  程度の電気光学結晶薄膜を育成できるようになれば、FLC-SLMと同程度の解像度を持つ素子を実現することも可能となろう。同時に、素子を駆動させる電圧も数ホルト程度に低下させることかてき、 $1 \mu\text{s}$  での動作や半導体素子との複合化も可能になる。

液晶テレビに関しては、ビデオ信号に同期させた駆動方式だけではなく並列デントル光演算に適した駆動方式の採用や、より高速に動作させるための駆動トランスタの技術開発が必要である。また、1インチ画面に1,000×1,000画素を有するような高解像度・高密度の表示を実現しようとする、配線が複雑になるために、駆動制御回路自身を液晶テレビ内部に実装しなければならない。そのためには、高密度実装技術が可能なノリコンプロセスをベースにした技術展開が必要であり、ノリコンウェハ上に素子を作製するための開発が必要である。

#### (5) 機能の複合化

空間光変調素子は、光変調を行うだけでなく、メモリ機能を有していたり、光学系や電子系と自由に情報の交換を行えたりするのか望ましい。このような機能の複合化を行うためには、空間光変調素子と半導体素子との複合化が必要である。空間光変調素子の画素1つ1つに対して受光素子やメモリ素子それに電子的演算素子を同時に集積化することかてきれば、これ自身を1つの光演算ユニットとして取り扱うことも可能であり、これらを任意に組み合わせることによってさらに柔軟な並列デントル光演算システムを構築することかてきであろう。このような光演算ユニットに用いるメモリ素子や電子的演算素子は、10～100万画素程度の並列情報を $\mu\text{sec}$ の速さで動作させるために、100psec以上の高速動作が可能な単純な素子を2次元的に配列したような素子となるものと思われる。しかし、これにはサブミクロンで素子を作製することかてきるノリコンプロセスあるいはマイクロマニーン技術をベースにした着実な研究が必要であり、また、新しい素子構成を考案する必要もある。

空間光変調素子とノリコンプロセスとの複合化の例としては、TFT (Thin Film Transistor) を用いたアクティブマトリクス型液晶テレビがよく知られている。しかしここでは、より高速で並列性を高めようとする試みの1つとして、CCD/液晶空間光変調素子[21]とSi/PLZT空間光変調素子[22]を図示する(図3-23、図3-24)。将来的には、光学基板上に形成された薄膜上で単結晶ノリコンベースの微細加工を行うためのSOG (Silicon On Glass) やSOS (Silicon On Sapphire) などの技術開発、あるいは単結晶ノリコン薄膜を実現するための研磨加工・接着技術の開発を進め、ノリコンプロセスを空間光変調素子との複合化に適応していくことが重要と思われる。

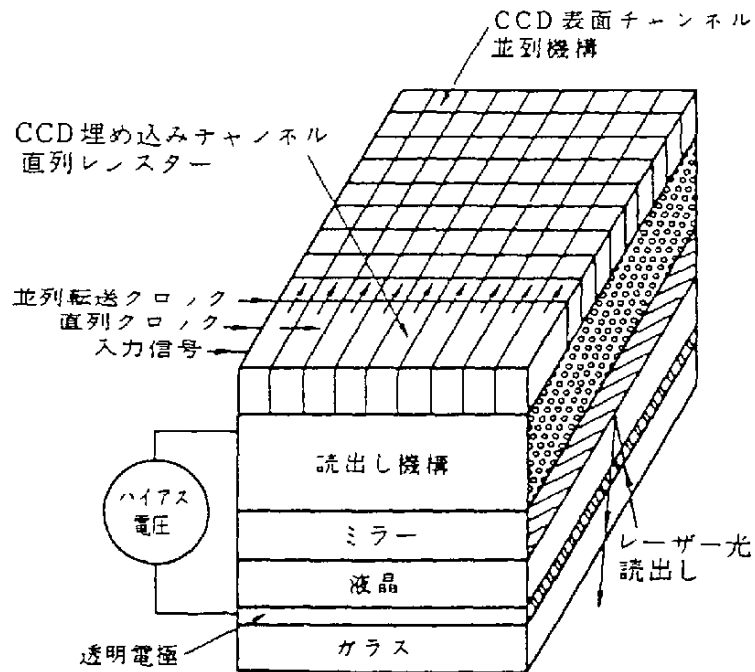


図3.23 CCD／液晶空間光変調素子の構造

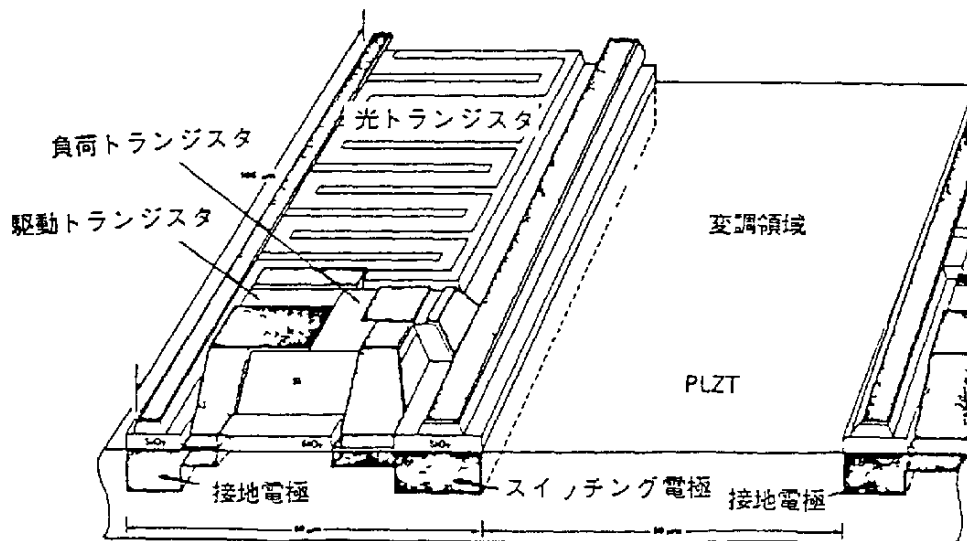


図3.24 Si／PLZT空間光変調素子の構造

[参考文献]

- [1] Yamamoto, S. et al. Proc. SPIE, 1211, 273-283 (1990).
- [2] Kurokawa, T. et al. Conference Record of 1990 International Topical Meeting on Optical Computing, 17-18 (1990).
- [3] Yamamoto, S. et al. Conference Record of 1990 International Topical Meeting on Optical Computing, 29-30 (1990).
- [4] Williams, D. et al. J. Phys. D. Appl. Phys., 21, S156 (1988).
- [5] Tsujikawa, S. et al. Conference Record of 1990 International Topical Meeting

- on Optical Computing, 23-24 (1990)
- [6] 松尾真治 ほか 第50回応用物理学会学術講演会, 764 (1989)
  - [7] Armitage, D et al Mol Cryst Liq Cryst, 144, 309-316 (1987)
  - [8] Sexton, C S Proc SPIE, 684, 69-76 (1986)
  - [9] Latham, S G et al GEC J Res, 4, 219 (1986)
  - [10] Ashley, P R et al Appl Opt, 26, 241 (1987)
  - [11] Armitage, D et al Proc SPIE, 825, 32-40 (1987)
  - [12] 光材料開発調査委員会昭和62年度活動報告書 財団法人大阪科学技術センター, 昭和63年3月, 225 (1988)
  - [13] 峰本工 他 光学, 18, 337-342 (1989)
  - [14] Iwaki, T et al Proc. SPIE, 1211, 284-295 (1990)
  - [15] 海老原 他 第51回応用物理学会学術講演会, 751 (1990)
  - [16] Amako, J et al Post-Deadline Papers 1990 International Topical Meeting on Optical Computing, 3-4 (1990)
  - [17] 光機能デバイスに関する調査研究報告書Ⅲ 社団法人日本電子工業振興協会, 平成2年3月, 230 (1990)
  - [18] Yamamoto, S et al Proc. SPIE, 1211, 273-283 (1990)
  - [19] 他野英徳 他 応用物理, 58, 1084-1089 (1989).
  - [20] Osugi, Y et al. Conference Record of 1990 International Topical Meeting on Optical Computing, 21-22 (1990).
  - [21] Welkowsky, M S et al Proc SPIE, 825, 41-48 (1987).
  - [22] Lee, S H et al Opt Eng 25 (1986).

### 3 3 3 3 並列光接続素子

#### (1) 現状

並列光演算や光インタコネクション用の受動デバイスの開発の方向としては、従来の光学素子の小型化並列化を目指すものと、新しい原理を追求するものとかある。前者の例としては、結像レンズ、マイクロレンズアレイ、ホログラフィック光学素子、フーリエ変換レンズなどがあり、後者の例としては、光IC、平面光学素子、などがある。

#### a マイクロレンズアレイ

個々のレンズの口径が数 $\mu\text{m}$ から数mmの微小レンズを2次元的に配列したものである。微小レンズとして、イオン交換法による分布屈折率型レンズ、ロット型セルフホログラムレンズ、マイクロリソグラフィによって作られるマイクロフレネルレンズなどが用いられている。光演算の空間多チャンネル化、入力画像信号の多重複写などには必須の素子である。

#### b ホログラフィック光学素子(HOE)

ホログラフィの波面変換機能を利用した光学素子であり、結像、分岐、合波、分散、分光、などの目的で利用されている。また、他の光学素子と異なり、これらの機能を組み合わせて1つの素子にすることも可能である。HOEは一種の回折格子であるので、光の干渉によってもあるいはリソグラフィ技術によっても製作可能である。レーサスキャナや光

ピコアップ用光学素子として利用され小型化軽量化に寄与している。他の光学素子に比べて設計の自由度が大きく機能の複合化も可能であるか、従来は回折効率か必ずしも高くなかったのが、利用分野が限られていた。しかし、格子形状のフーズ化や高効率記録材料の開発などにより現在ではほとんど100%の回折効率のものか得られるようになった。マイクロレーサアレイ用のコリメータ、光インタコネクション用のヒーム分割器、空間周波数フィルタなどでの利用か検討されている。

#### c 結像レンズ、フーズ変換レンズ

光演算における、結像光学系あるいはフーズ変換光学系の役割は極めて高い。すでに開発されている製版用結像レンズあるいはIC焼き付け用のレンズでは、回折限界の性能を有し有効結像面積も $100 \times 100 \text{ cm}^2$ あり $10^6$ の結像点のものかある。また、フーズ変換レンズに関しても、この目的で多数のレンズか開発されている。しかし、いずれの光学系も実用システム用としては、サイズか大きく、小型化軽量化か今後の課題である。

#### d 平面光学素子

従来の光学系は、各光学素子の光軸か直線的に配置された共軸光学系か大部分であった。光学系の小型化と機械的安定化を図るためには、各素子の小型化と同時に各素子の距離を縮める必要かあった。また最近、非共軸光学系も提案されている。光学素子は、回折型の平面光学素子であり、光軸は基盤カラスをノクサクに進む。このような光学系では、各平面光学素子かフォトリソグラフィ技術で製作できるので微細化量産化か容易で、また、光学系の安定性も高い。さらに、光ICなどの集積化技術との整合性もよい。

### (2) 今後の課題

光演算システムのケート間あるいはデハイス間の光接続素子としては、マイクロレンズアレイ、ホログラム素子(HOE)、平面光学素子などは製造技術を含めて今後とも着実に進歩し、自動設計手法も確立する。それにともない、アーキテクチャ、素子の選択、光学配置、などを含めたニューミレータもしくはCADか開発される必要かある。上記の受動素子の性能向上かあっても、結像レンズは依然として利用される。しかし、実用的に利用されるためには、レンズの小型化か必要である。システムのロハスト性を高めるためには、(1) スーム化、(2) 自動焦点化、(3) 振動に対する空間位置不変化対策などを施した高機能結像レンズ系の開発も必要となろう。

並列光演算システムとして並列度を $10^4 \times 10^4$ 、デハイスサイズを $100 \times 100 \text{ mm}^2$ を想定しよう。この場合、1チャンネル当たり $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}^2$ か必要である。したかつて、このサイズで光検出器、光変調器、光増幅器などを製作し集積しなければならない。また、少なくとも、 $1 \text{ } \mu\text{m}$ 程度の精度で各デハイスの位置決めかてきなくてはならない。

光接続のための能動素子としては、

- (1) 高性能光スイッチや変調器
- (2) マイクロ光偏向器
- (3) 動的な偏光器
- (4) マイクロ光増幅器

なとも開発されねはならない。この能動化は、平面光学素子に対しても当てはまる。

このほか、現在の技術の延長で開発可能なデハイスとしては、



- (1) 偏光制御可能な極微細周期クレーティング格子
- (2) 焦点距離可変フレネルレンズアレイ
- (3) 並列書き込み読み出し光メモリ

などがある。新機能光接続素子の開発によって新しい並列光演算システムの開発も一層促進される。

### 3.3.3.4 集積実装技術

光コンピュータは、光空間変調器、発光素子アレイ、光演算処理アレイ等の能動光デバイスと平板マイクロレンズアレイやホログラフィックデバイス等受動光デバイスを、精度良く配置して光学的に結合することにより、初めてその機能を発揮することかてきる。現在までに発表されている並列光演算システムの多くは、一部を除いて、微動ステージを用いて光学台上に組み立てられており、実用システムからほとんどの現状である。実用に供し得るような並列光演算システムを構築するには、2次元アレイ化された多数の能動デバイスと受動デバイスを、3次元的に集積実装する技術が不可欠であり、これに関する要素技術開発の進展が期待される。これに要求される重要なポイントは、

- (1) 光学アライメントの容易性と環境変化に対する安定性
- (2) システムの容積

である。

プロセッサエレメント間でデータ転送を正確に行うには、2次元アレイデバイス間の精密なアライメントが必要である。各デバイスの集積度が大きくなり、並列光演算システム全体の構成が複雑になるに伴って、アライメントに要求される精度が高まり、同時にアライメントを要求される箇所が著しく増大することか予想される。これか、実用システムの実現へ向けての困難の1つとなるだろう。したかつて、アライメントを容易にするか全く必要としない集積実装技術を開発することか、実用並列光演算システムへの第一歩となる。

実用システムでは、振動や温度といった環境に対してのアライメントの安定性についても考慮する必要かある。特に、温度は各デバイス間の物理的な相対位置の変化をもたらすだけでなく、屈折率変化を通して実効的アライメントずれを生じさせる可能性かあり、対策が必要である。

エルランゲン大学のグループから、1,000個のプロセッサエレメントを持つ直径200 $\mu$ m程度のプロセッサアレイを用いる記号置換論理システムを想定した集積実装技術[1]が提案されている。これは、リソグラフィで形成した構造を利用してアライメントを容易にしようというものである。具体的には、基板上的PMMAにSOR放射光を照射して、深さ300 $\mu$ mのプロセッサアレイ等の2次元デバイスの実装用の溝と、ヒームスプリングはを形成した実装基板を用いる。この提案の方式では、またアライメントを必要とする自由度が残っており、微小なデバイスを用いているだけに残されたアライメント部位の調整は容易ではない。

実用システムとして、プロセッサエレメントの大きさ $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ で $1,000 \times 1,000$ のプロセッサアレイを想定すると、 $10 \times 10\text{mm}$ の大きさのプロセッサアレイとなる。これを、少なくとも1 $\mu$ mの精度で、容易もしくは無調整で配置できる集積実装技術が必要である。並列光演算システムの構成デバイスそのものか、それを実装基板の所定の部位に1 $\mu$ m以

下の精度を持つ3次元構造に形成することによって、配置の自由度を制限する事が解決の1つの方法である。また、従来のインサートマシンの様な2次元的配置を行う装置を發展させて、構成デバイスを3次元的に精密に配置し固定する装置の開発も必要である。このとき、アライメントのキーの構造やキーに合わせる方法等の基礎的検討も必要であろう。

2次元アレイの要素の実装に合わせた最適配置の検討と、統一規格作りにも取り組む必要がある。システム全体の光学的アライメントに対する信頼性を増すためには、大規模なシステムを、特定の機能に分割して演算モジュール化する事も有効である。モジュール化により、システムの安定性が増すだけでなく、実装時のアライメントが容易になるとともにシステムの拡張性を得ることかできる。

集積実装技術に求められる第2のポイントは、システムの容積である。光並列演算装置を構成する各デバイスの小型化に伴い、システム全体の大きさは、大幅に小さくなって行きたろう。しかし、通常のハルク型のレンズやプリズムを用いた光学系やホログラフィックデバイスで並列光演算装置を構成すると、2次元プロセッサ要素を、その2次元的な大きさに見合う間隔で配置することか必要である。このようなシステムでは、大規模で複雑なシステムを構築することか難しいたろう。また、プロセッサ間の距離が長ければ、それらの相対的位置関係を保持することか難しく、システムのアライメント安定性も悪くなってしまふ。可能な限りプロセッサアレイ間の距離を短縮できる光接続デバイスの開発か望まれる。

比較的単純なデータ転送を考えるとときには、平板マイクロレンズアレイやいろいろと提案されている平板型の光接続素子を用いて、これてプロセッサアレイを挟み込むような構造のシステムか、プロセッサアレイ間の距離を短縮するのに有効である。平板型の光接続素子は、基板の対抗する面にミラー、クレーティングやホログラムを形成したもので、平板板面内方向の光の移動と面垂直方向へ光の入出力を行うデバイスである。特にこの種のデバイス發展か、実装技術の基礎となると考えられる。パーフェクトフォール等の光接続を短い間隔で実行する光接続には、さらにひと工夫必要で、新たな原理にもとづく光接続素子の開発も求められる。たとえば、上記の $10 \times 10 \text{ mm}$ のプロセッサアレイを $1 \text{ mm}$ 以下の間隔で配置し、一方のプロセッサアレイの端部のプロセッサ要素と、他方のプロセッサアレイの反対側の端部のプロセッサ要素を光接続しようとするれば、偏向角は約 $85^\circ$ となり要求される精度は約0.005であり、要求は厳しい。

多数の構成デバイスをハイブリットに組み合わせて行きたけでなく、モノリシック化していく試みも必要である。モノリシック光並列演算システムとしては、薄膜積層構造か、最も考え易い構造である。この点で、短い間隔でプロセッサアレイを積層実装する技術は、光並列演算システムのモノリシック化に道を開くものである。性質の大きく異なる材料を、薄膜形成技術と、微細加工技術を駆使しながら、積層化していくには克服しなければならない課題か数多くあるものの、アライメントの安定性の点では、理想的な解決手段の1つである。

#### [参考文献]

- [1] Karl-Heinz Brenner Optical Implementations of Symbolic Substitution.

### 3 3 3 5 開発目標と計画

新情報プロジェクトにおける並列デントル光コンピュータシステムの実現に向けた各種要素技術と、そのフローチャートを図3 25に示す。

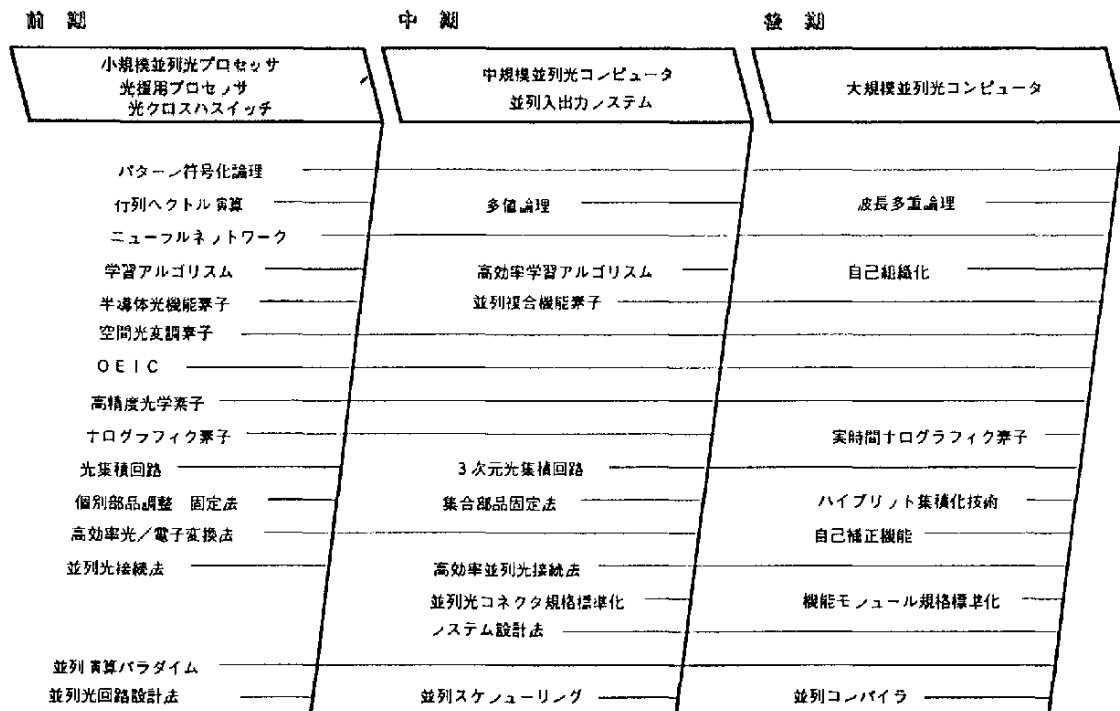


図3 25 並列デントル光コンピュータの開発フローチャート

1) 前期では、小規模並列光プロセッサの実証システムの作製が目標である。システム作製には、LED(LD)光源アレイ、並列受光素子アレイを始め、並列度50×50画素程度の並列光機能素子が必要である。システムアーキテクチャの研究と並行して必要な並列光機能素子の開発に当たる。並列光機能回路は、並列加算、並列除算、並列メモリアトレノンクなど並列デントル演算に必要な個別の演算機能のみを実行する1チップ並列光素子である。このような分散機能を持つ素子の組合せとしてシステムを組み上げる。前期の実証システム作製には、半導体光機能素子と空間光変調素子両者の利用が考えられる。前期における並列光機能素子作製技術の進歩が早ければ、並列度50×50～100×100画素の光／電子複合機能モジュール型の実験システム作製が可能である。

光援用プロセッサとしては、行列ヘクトル光演算器、行列一行列光演算器などが開発目標となる。光ニューロチップは基本的に行列ヘクトル演算プロセッサなので、並列度を向上させた実用化素子を作製し、計算機内に組み込みシステム構成を試みる。

光クロスハススイッチは、光通信システムのみならず、光コンピュータにおいても重要な構成要素である。また、並列光メモリについても開発に着手する。

いずれのシステムも、この時期における並列光機能素子の開発速度に依存している。

システム構成の基礎となる並列演算原理については、柔軟な処理、統合型処理用の新しい並列演算原理(学習機能、自己組織化など)の基礎的な研究を進める。

2) 中期では、光システム技術、光デハイス技術の進展が期待されるから、コンパクトなサイズの並列デントル光演算システムのプロトタイプの作製に挑戦する。システム構成法

は3.3.1に述べた手法による。視覚情報の高速、実時間処理を目的とした並列光演算システムのプロトタイプ、あるいは並列プログラムの利用により準実時間、実時間で柔軟な処理（たとえばニューラルネットワーク）を実行するプロトタイプシステムも開発目標とする。この時、処理する並列画素数の目標値は $500 \times 500$ 、フレームレート $1,000 \text{ Fr/s}$ 以上とする。このシステムは、主としてニューラルネットワークの並列シミュレータ、新しいニューラルネットワークアルゴリズムの開発に利用する。

この時期になると、並列アクセス光メモリもある程度開発されていると思われるので、並列デジタル光コンピュータのプロトタイプシステムも作製可能である。

並列光コンピュータ実用化の要である並列入出力システムも並行して開発する。開発目標は並列度 $1,000 \times 1,000$ 画素、フレームレート $1,000 \text{ Fr/s}$ の並列データ入力システムである。この時期には高分解能高速空間光変調素子も開発されていると思われ、並列度 $1,000 \times 1,000$ 、フレームレート $1,000 \text{ Fr/s}$ の性能をもつ入力装置の開発はそれほど困難でなからう。また、3次元ホログラムを利用した3次元ディスプレイ装置の開発も課題である。

中期は、時系列デジタル電子技術を基にした電子計算機、時系列アナログ電子技術を基にしたテレビジョンシステムを中心とした現在の情報処理パラダイムに加えて、同時並列情報処理を基にした新しい並列情報処理パラダイムが構築され始めるときである。

3) 後期は世紀の変わり目で、並列情報処理パラダイムの構築が進行中である。その中心となる並列演算システムの一翼を担う並列光コンピュータシステムのプロトタイプの開発が具体的な目標となる。中期で開発した、並列光演算システムを2次元、3次元並列配置した超並列分散光コンピュータを開発目標とする。このシステムは汎用並列演算能力を持つとともに、2次元高分解能画像データの実時間処理を可能にする。この時期になるとデハイス技術の進歩と相まって、光機能素子の3次元モジュール化が実現されよう。

並列度 $10^4 \times 10^4$ 画素、フレームレート $10^6 \text{ Fr/s}$ の処理能力をもつ並列光システムが開発目標となるか、並列度 $1,000 \times 1,000$ 、処理速度 $1 \mu\text{s}$ の並列光機能素子作製技術が確立されておれば、素子の2次元並列組合せにより上記性能をもつ並列システムが十分開発できる。この時の並列光コンピュータの演算能力は $10^{14} \text{ IPS}$  ( $100 \text{ TIPS}$ )である。

並列光コンピュータでは、並列光機能回路を基本としてシステム構成をとるため、素子単体に要求される性能は並列度 $1,000 \times 1,000$ 、処理速度 $1 \mu\text{s}$ 位に押え、システム構成の段階で素子を2次元、3次元的に組合せて並列度を上げていく方が得策のように見える。したかつて、並列演算能力の限界はほとんど無限に近くすることかできる。

さらに、素子レベルの空間拡張性、システムレベルの空間拡張性により、好みの並列光情報システムを構築することかできる。素子の拡張性を維持するためには、素子の実装技術、標準化技術などが重要になる。並列情報処理パラダイムの将来性は素子レベル、システムレベルの拡張性如何にかかっている。

### 3.4 むすび

21世紀まであと10年、高度情報化社会、高齢化社会、環境情報社会、宇宙情報化時代が話題になっている今日、我々が認識しなければならないのは、これからの時代の膨大な情報量の増大である。特に、様々な分野で視覚情報の利用が増大するであろう。これからは、

人間に最も親しみやすい視覚情報(パターン情報や画像情報や並列情報)を難なくこなし、しかも、柔軟い処理に対応しうる新しい並列情報パラタイムの構築が必要である。残念ながら、現在のフォンノイマンコンピュータは、これらの目的には適していない。並列光コンピュータやニューロコンピュータは、まさにそのパラタイムを支える基本演算情報システムである。医療、看護、弱者の福祉における画像情報の有用性は疑う余地かない。人に優しい処理システム、たとえば、画像認識や音声認識を応用した福祉用情報システムなども必要になろう。情報が特定の人に独占されるのを避けるには、大容量の情報を分散させる方がよい。それにはクローハルな高速分散情報処理システムが必要である。さらに、並列光情報システムの優位性は強力な電磁場に晒される宇宙空間でその特性を遺憾なく発揮するだろう。

並列光コンピュータの実現のためには、1) 並列光コンピュータのアーキテクチャの明確化、2) 並列光メモリシステム、並列光入出力システムの開発、3) システム作製に必要な並列光機能素子の早急の開発態勢の整備、4) 並列処理に向けたソフトウェア技術の開発、などの課題を解決する必要がある。並列光コンピュータの構成に大切な基本概念は、時間、空間、波長領域における並列性と、機能の分散化である。並列光コンピュータは、並列分散アーキテクチャをもつシステム構成が最も有利なものと思われる。

実時間並列光メモリシステムは、同時並列アクセス可能な大容量メモリシステムであり、その実現には、空間光変調素子の性能向上や光双安定素子アレイの実用化が必要である。

並列入出力システムは、光の特性に最も整合したシステムである。時系列走査機能を除外した、2次元データの同時並列アクセス可能な並列入力システムは、並列光コンピュータだけでなく、現在の計算機工学からも強く要請されている。超高速カメラ機能を持つ同時並列データ入力装置などと考えられる。2次元、3次元データの表示システムは、ホログラムを見るまでもなく並列光システムの独壇上になろう。

並列光演算システムに必要な並列光機能素子は、並列光論理演算素子、並列光メモリ、並列アレイ光源、並列受光素子アレイ、並列光シャッタ、光/電子複合型集積素子(3次元OEIC)、空間光変調素子、並列光接続素子などである。新しい並列光機能素子としては、並列機能複合化素子アレイが開発目標になろう。この素子は、受光、増幅、しきい値処理、メモリ、発光の複合機能を兼ね備えたものである。素子単体でも1つの並列光演算システムを構成しているところかミソである。

空間光変調素子、並列光接続用のマイクロレンズアレイや平板光学素子は基礎研究が進んでおり、特に、強誘電性液晶系の空間光変調素子の性能向上は注目値する。

集積化素子アレイは、最初から高集積化を目標とする必要はない。システムが分散アーキテクチャを取る限り、素子の超高集積化は不要である。SILSIと光子とのハイブリット化も短期的には大きなメリットかあろう。



## 第 4 章

### 光ニューロコンピュータ





## 第4章

### 光ニューロコンピュータ

#### 4.1 ニューロコンピュータと光技術

##### 4.1.1 ニューラルネットワークの原理

情報化社会の高度化に伴い、画像、文書、音声などの多形態の情報の高次認識、曖昧な情報の処理、不完全な情報からの学習など、人間の直感的情報処理に類した柔軟な情報処理技術が求められている。

このような情報処理を実現する技術として、生物の神経回路網（ニューラルネットワーク）を模倣したニューロコンピュータが期待されている。図4.1に示すように、ニューラルネットワークは、ニューロンと呼ばれる多数の演算素子と、それらを結合するノブスと呼ばれるアナログ量の分散記憶素子で構成される。このアナログの結合度をノブス荷重と呼ぶ。ノブス荷重には正（興奮性）と負（抑制性）の結合がある。

図4.2に示すように、ニューロンは多入力／1出力型の素子で、入力信号の積和演算と飽和型の非線型入出力特性を与える機能をもつ。すなわち、結合されている他の多くのニューロンの興奮状態がノブス荷重をつけて加重加算され、非線型入出力特性にしたかって自分の興奮状態（出力）が決まる。

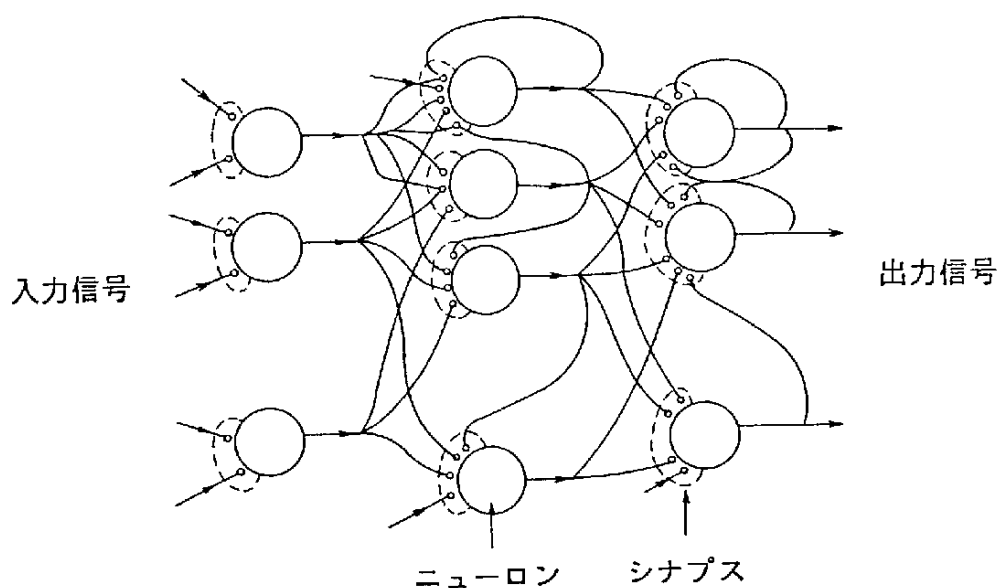
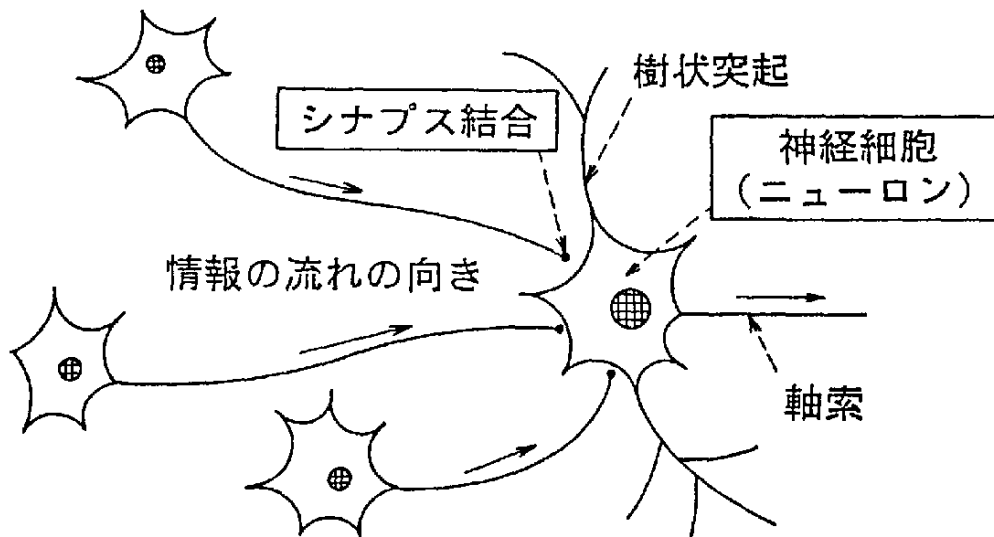
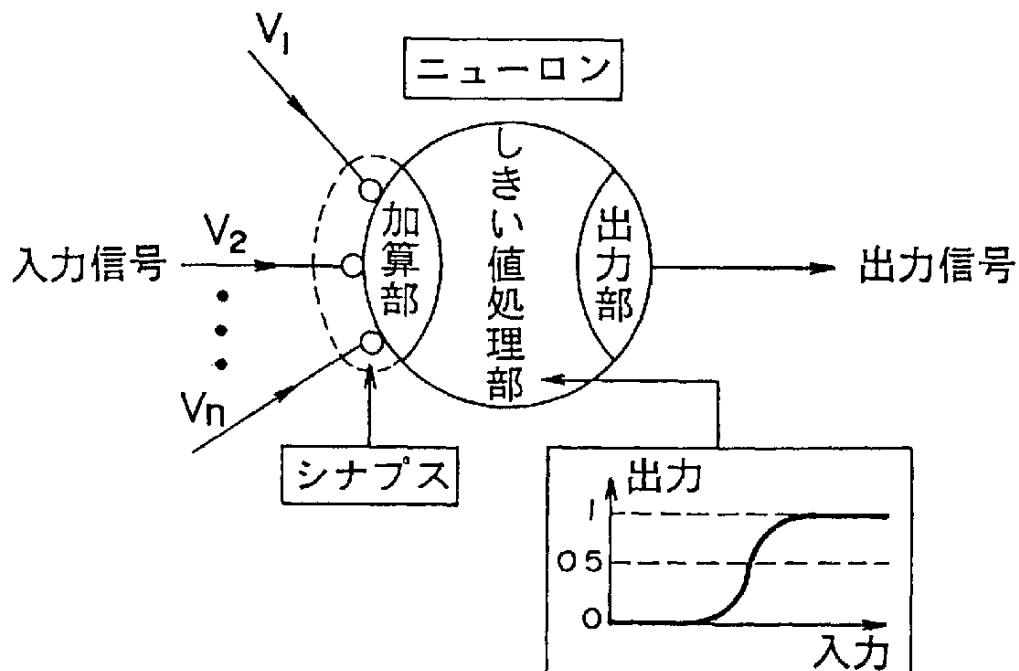


図4.1 ニューラルネットワークの基本構造

# ニューロン



(a) ニューロンの構造



(b) ニューロンのモデル

図4 2 ニューロンの構造とそのモデル

ニューラルネットワークは空間的あるいは時間的なパターンの非線型変換装置である。図4-1において、何らかの空間パターンを入力すると、ニューロン間の配線状態、シナプス荷重、ニューロンの入出力関数によって、出力パターンが決まる。

ニューラルネットワークの重要な特長は、ソフトウェア的には、学習性・自己組織性と一般化性である。ニューラルネットワークは、外界からの入力に応じて、学習によって、ネットワークを構成するシナプスの荷重値を望ましい値に変化させ自己組織化する能力がある。デジタルコンピュータのように論理的なプログラミングを必要としないため、定量化が困難な曖昧な情報や不完全な情報を処理できる。また、ニューラルネットワークはアナログ処理装置であるので一般化性に優れている。つまり、入力か多少変化しても出力はあまり変化しない。したがって、ある学習パターンに対して適切な応答か出るようになると、その近傍の入力に対しても大体同じ出力か得られることか保証される。

一方、ハードウェアからみた重要な特長は、ロバスト性、フェイルセーフ性に優れた高信頼なシステムの実現である。学習によって獲得した知識は、ネットワーク全体のシナプスに分散的に記憶される。したがって、ネットワークの一部か故障してもシステムは正常に動作する。また、ニューロチップのような専用ハードウェアでは、学習機能によって、ニューロン素子やシナプス素子の欠陥や特性のバラツキの影響を吸収できることも重要な特長である。

#### 4.1.2 ニューラルネットワークに期待される機能と応用

上述したように、ニューラルネットワークを用いることによって、従来のコンピュータとは全く質的に異なる、新しい計算方式のコンピュータか構築されることか期待される。ニューラルネットワークに期待される処理機能を大別すると、①学習・自己組織化機能と、②ネットワークのダイナミクスにもとづく探索機能である。

①の機能は、ノイマン型処理ではプログラムの複雑さか著しく高く、プログラムの作成か不可能か、あるいは可能であっても現実的な長さで書き下すことか困難な問題（認識、制御、予測など）に適用できる。一方、②の機能は、取り扱うデータ量か膨大で場合の数の極端な増大か発生し、ノイマン型処理では現実的な時間で処理できない問題（組合せ最適化問題など）に適用できる。表4-1にニューラルネットワークに期待される応用分野の例を示す。

表4 1 ニューロン数と処理機能のマッパ

|                            | ニューロン数          |                 |                 |                   |   |   |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---|---|
|                            | 10 <sup>2</sup> | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>4</sup> | 10 <sup>5</sup>   | ・ | ・ |
| 予<br>測<br>問<br>題           | 診断              |                 |                 | 小規模プラントの診断        |   |   |
|                            | 経済              |                 |                 | 大規模プラントの診断        |   |   |
|                            | 自然現象            |                 |                 |                   |   |   |
|                            |                 |                 |                 |                   |   |   |
| パ<br>タ<br>ー<br>ン<br>認<br>識 | 音声              |                 |                 | 母音                |   |   |
|                            | 文字              |                 |                 | 不特定話者26語          |   |   |
|                            | 画像              |                 |                 | 特定話者語彙<br>音声認識    |   |   |
|                            |                 |                 |                 |                   |   |   |
| 制<br>御                     |                 |                 |                 | 手書き数字             |   |   |
|                            |                 |                 |                 | アルファベットの          |   |   |
|                            |                 |                 |                 | かな漢字変換 印刷漢字4000文字 |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 手書き漢字 300文字       |   |   |
| 問<br>題<br>解<br>決           |                 |                 |                 | 簡単な雑音除去           |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 2次元オブティカルフロー      |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 自動目標認識            |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 物体の形状認識 半導体検査装置   |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 特徴抽出              |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 立体視               |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 画像復元              |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 概念形成              |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 逆キネマティクス          |   |   |
|                            |                 |                 |                 | センサフュージョン         |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 逆ダイナミクス           |   |   |
|                            |                 |                 |                 | マニピュレータの軌道計画      |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 自律移動車             |   |   |
|                            |                 |                 |                 |                   |   |   |
|                            |                 |                 |                 |                   |   |   |
|                            |                 |                 |                 |                   |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 同音異義語判定           |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 個人用辞書 共用辞書        |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 技術文書翻訳            |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 大規模ルールベース         |   |   |
|                            |                 |                 |                 | オセロ               |   |   |
|                            |                 |                 |                 | 囲碁                |   |   |
|                            |                 |                 |                 |                   |   |   |
|                            |                 |                 |                 |                   |   |   |

以下、代表的応用例を述べる。

#### (1) パターン認識と特徴抽出

曖昧あるいは不完全な画像、音声、文字などのパターン認識や特徴抽出への応用が期待される。特に、画像情報のように、問題そのものが大規模な並列情報である分野への応用が期待される。画像の認識や連想あるいは分類など脳を模倣した機能や、画像の輪郭抽出、特定方向のエッジの抽出、オブティカルフロー、雑音除去フィルタなど視覚機能を工学的に実現できる。

## (2) 制御

ロボットやプラントなどの制御への応用も期待される。たとえば、ロボットの制御には種々のセンサからの情報の認識、判断、計画などの処理と、その結果を用いたマニピュレータ等の運動制御がある。運動制御には、逆キネマティクスや逆ダイナミクスなどの複雑な数式群の高速演算処理が要求される問題が多い。これらの問題に学習・自己組織化機能を適用すれば、実時間制御がきかつ適応性のあるロボットの実現が期待できる。

## (3) 予測

天候や地震あるいは経済問題は原因と結果の因果関係が曖昧かつ複雑なため、従来の論理的プログラミングによる解析法では、結果を予測することか困難である。また、予測ができてても現行のノイマン型処理では現実的な時間内で処理できないことか多い。ニューラルネットワークを用いると、学習・自己組織化機能によって、人間には発見か困難なルールを自動的に獲得できる。

## (4) 最適化問題

巡回セールスマン問題やヒノチコク問題など組合せ最適化問題への応用が期待される。これらの問題はNP完全[注]と呼ばれる問題で、解析的な解法が存在せずすべての組合せをしらみつふしに調べるほかない。そのため、ノイマン型コンピュータで解くと膨大な時間かかかる。フィートバクモデルやホルソマンマンソンなどダイナミクスをもつニューラルネットワークのエネルギー最小化の原理を利用することにより、これらの組合せ最適化問題の近似解が高速に得られる。

### [注]

NP完全 Non-deterministic Polynomialの略。要素数が増加すると、組合せの数か要素数のへき乗ておさまることか保証されていない問題をいう。

## 4 1 3 専用ハードウェアの必要性和展望

ニューラルネットワークを実現する方法としては、現在までに大きく分けて、2つの方法が提案されている。提案されている方法とその特徴を表4 2 にまとめた。

ニューラルネットワークモデルは明示的な計算モデルであるから従来のコンピュータ上の仮想マシンとしてその演算構造を実現することは容易である。特に、積和演算が主要な演算となることから、乗算器を内蔵したアクセラレータや汎用の並列処理マシンなどを利用することにより高速化が試みられている。このようなアプローチは演算処理の柔軟性が高く実現可能な範囲が広いため、ニューラルネットワークの研究に便利な道具と快適な開発環境を提供するものである。

表4 2 ニューロコンピューティングのハードウェアの研究開発例

| 分 類             | 現 状                                                                       | 長所・応用                      | 問 題 点                |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 従来のコンピュータ技術の延長上 | < アクセラレータ ><br>多くの企業が開発・市販している<br>< 汎用並列マノン ><br>Connectionマノン, NCUBE等を利用 | 導入・実現が容易 汎用性・信頼性が高い 研究開発向き | 並列性に弱点がある 演算速度に限界がある |
| 新しいハードウェア技術の開発  | < LSI技術の利用 ><br>各種モデル実現, センサの知能化<br>< 光技術の利用 ><br>チップ化, 学習の実現が焦点          | 大規模並列化・高速化が容易 専用プロセッサ・実用向き | 今後の研究課題が多い 特に汎用性の付与  |

しかしながら、基本的に演算処理を時間軸上に展開する直列情報処理の組み合わせであるため並列処理に対する原理的な弱点が存在する。すなわち、演算対象を空間的に展開する一般的手法を持ち合わせていないため、時間軸上の演算密度の限界すなわち計算速度の限界ならびにプログラムの記述力や生産性の限界が存在し、将来の大規模並列化に対応できない。

ニューラルネットワークモデルが要請する大規模並列性は単機能のプロセッサ・ノンクエメント(ニューロンモデル)を多数並列に用い、しかもこれらの演算素子間を高密度に接続するネットワークの実現を意味している。ニューロンモデルは処理内容が比較的単純でしかも固定アルゴリズムであるから、均質性が高く集積化のしやすい並列処理構造である。人間の脳では演算素子としての神経細胞が $10^{10}$ のオーダーで並列化されているとされており、ニューラルネットワークのハードウェアでの実現にあたってはノンブルなプロセッサ・ノンクエメントをいかに数多く並列化できるか1つの焦点となっている。

このようなコンピューティングシステムを実現するため、限界のある従来の方法とは違って、基本的なハードウェアから変えていこうとするアプローチが行われている。このようなアプローチの代表的なものか、LSI技術を用いる方法と光技術を用いる方法であり、従来の方法では実現できない大規模並列性や高速性の実現を目指している。

LSI技術(デジタル及びアナログLSI)を用いるタイプとして、アトオンプロセッサとして各種のネットワークアルゴリズムを高速に実行するLSIや視覚センサと一体化してセンサの知能化を目指すもの等が開発されている。既に成熟しているLSI技術をそのまま用いることかできるため汎用性の高い回路が容易に実現可能であるか、回路規模が比較的大きくなるためその集積化に限界があって、ニューラルネットワークが要請する完全並列方式で大規模並列化を実現するのは難しく、特に基本的に2次元の配線技術であることから、大規模のインタコネクションの実現には大きなボトルネックが存在する。

これに対して光技術は原理的な大規模並列性を有しているため、将来の大規模並列化に対する有力な技術と考えられている。また、インタコネクションの実現や画像情報の直接処理等にも大きな魅力がある。このため、その実現を目指して多くの研究が行われ、進展が著しい分野の1つとなっている。

このような点を考慮して電子技術と光技術との比較を試みる。表4 3に比較表を示す。

表4 3 電子技術と光技術との比較

| 項 目      | 光 技 術      | 電 子 技 術          |
|----------|------------|------------------|
| 並 列 性    | 原理的に高い     | 配線や放熱等に起因して限界が存在 |
| インタコネクショ | 大規模並列化が可能  | 平面的低密度           |
|          | 空間的高密度     | 容量負荷等に弱い         |
| データ表現    | 高速で信頼性が高い  | 完全並列に難点          |
|          | 2次元並列      | 直列表現向き           |
| 高 速 性    | 画像の直接処理が可能 | 現実に速いか、限界に近い     |
|          | 原理的に速い     |                  |
| 柔 軟 性    | 高速動作の実証が課題 | 汎用性が高い           |
|          | 柔軟な演算が課題   | プログラムの記述が難       |
|          | 大容量に対応可能   |                  |

現状では柔軟性や高速性はもちろん、並列性についても成熟した技術である電子技術の方が未成熟の技術である光技術を上回っている。またインタコネクションについても電子技術の柔軟性により現実的には高密度のインタコネクションと等価の機構が電子技術で実現できている。しかし、光技術の原理的な可能性は高く、将来の課題を克服することにより、光技術が電子技術を大きく上回ることが可能となる。

#### 4.1 4 光技術の優位性

このように光技術はニューロコンピューティングに対して親和性の高い技術を提供することが可能であり、逆にニューロコンピューティングの学習機能の導入により光コンピューティングに柔軟性の高い演算構造を実現することが可能となる。この点に注目し、その融合を図ろうとする考え方が光ニューロコンピューティングである。この技術は新しい技術分野を切り開く可能性を持ち、同時に双方の分野に新しい視点を提供するものとして今後の研究の発展が期待されている。

ここでもう一度ニューラルネットワークを実現するハードウェアとしての光技術の優位性を整理する。

第1の特徴は、光技術の持つ大規模並列性である。ニューラルネットワークは演算構造を空間的に展開するモデルであり、光技術の持つ空間的な並列性がそのままの形で利用可能である。光の持つ空間並列性は原理的には3次元空間内（空間配線）で波長のオーダーを持つものであり、基本的に2次元空間（平面配線）での配線である電子技術を大きく凌駕するものである。また、空間的な並列性はかりてなく波長軸上の並列性、すなわち波長（周波数）多重性により、さらに高い並列性を実現することかできる。

第2の特徴は、処理の高速性である。光デバイスの中には電子デバイスでは実現が困難とされる高速動作の可能性が示されているものもあり、デバイスの面からもその高速性が

実現されようとしている。しかも、ニューラルネットワークの本質であるアナログ処理が直接実現可能である。また、テハイス面はかりてなく、3次元配線を可能とすることからプロセス間コンタクト間の配線長を短く抑えることが可能となり、また容量性の遅延を受けないため全体の配線遅延を小さく抑えることが可能となる。

これら2つの特徴を合わせると、大規模並列で高速なニューラルネットワークが実現可能となる。

また、応用面からも光技術にはいくつかの特徴がある。

第1の特徴としては、画像を2次元パターンとして直接扱えることがあけられる。画像を直接扱えるということは、たとえば従来の画像処理のようにビデオ信号のフレームレートにとらわれることなく、視覚パターン情報に対して高速の処理が実現できることを意味する。これは高速の認識判断を必要とする場合には本質的な問題である。

さらに第2の特徴として、コンパクトな演算回路を実現できる可能性があけられる。光技術は、その大規模並列性、アナログ情報処理、画像の直接処理等、演算処理回路をコンパクトに実現する要素に富んでおり、しかもそれほど多くの周辺回路を必要としない回路が実現可能である。このことは同じ規模の回路でより多くのニューロンを実装可能であることを意味する。

ニューラルネットワークモデルが持つ並列処理構造は従来のコンピュータとはまったく違ったアーキテクチャを必要としている。この新しいアーキテクチャを実現するには従来とは違ったハードウェアが期待されている。光技術はこの期待に魅力的な解答を与えうるハードウェア技術である。

## 4.2 光ニューロコンピュータの現状

### 4.2.1 光ニューロモデルの現状と課題

#### 4.2.1.1 光ニューロモデルの現状

表4.4は、現在知られている主要なニューロモデルの特徴を記したものである。また、光の処理に適した、いわば光ニューロモデルのようなものは研究されていないか、これらのモデルの中の処理の一部を光で実現した試みがある[1, 2, 3]。これらのモデルではニューロンからの出力とニューロンを結合しているシナプスの結合強度の積を求める演算と各ニューロンに入力されるこれらの積の和を求める演算が計算の主要な部分を占めている。したがって、この積和演算を光によって高速に実現できれば、光を用いたニューラルネットワークが現実的なものとなる。このような積和演算光学系は、既に、いくつか提案されており、4.2.3において述べるような光ニューロシステムが報告されている。この節では、表4.4のモデルの中から、アプリケーションにおいていくつかの効果を表しているHopfieldモデル[4]とハックプロパケーションモデル[5]、および光の物理的な特長を用いた光連想記憶モデル[6]について記す。



表 4.4 : 主なニューラルネットワーク

| ニューラルネットワーク                            | 入力       | 内部表現 | 出力       | 層の数    | 伝達関数             | 学習則                    | 応 用                          | 提 案 者                                                                              | 光 |
|----------------------------------------|----------|------|----------|--------|------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---|
| ART (Adaptive Resonance Theory)        | 多値       | 連続   |          | 1      | Sigmoid          | ART                    | パタン認識                        | G Carpenter (North-Eastern U)<br>S Grossberg (Boston U)                            |   |
| BP (Back Propagation)                  | 連続       | 連続   | 2値<br>連続 | 2以上    | Sigmoid<br>双曲線正接 | 一般化デルタ則                | パタン認識、音声合成<br>ロボット制御<br>株価予測 | D Rumelhart (Stanford U)<br>S Amari (Tokyo U)                                      | ○ |
| BAM (Bidirectional Associative Memory) | 2値       | 連続   | 2値       | 1      | Psi              | Hebb                   | 連想メモリ                        | B Kosko (USC)                                                                      | ○ |
| Boltzmann Machine                      | 2値<br>連続 | 連続   | 2値       | 2以上    | 不定               | Boltzmann              | パタン認識                        | J Hinton (U of Toronto),<br>T Sejnowsky (Johns Hopkins U)<br>H Szu (Naval Res Lab) | ○ |
| BSB (Brain State in a Box)             | 2値       | 多値   | 2値       | 1      | Signum<br>線形     | Hebb<br>Widrow-Hoff    | 知識データベース                     | J Anderson (Brown U)                                                               | △ |
| Counterpropagation                     | 連続       | 連続   | 2値       | 2 or 4 | 線形<br>Sigmoid    | Widrow Hoff<br>Kohonen | 画像圧縮                         | R H Nielsen (HNC)                                                                  |   |
| Hopfield                               | 2値<br>2値 | 連続   | 2値       | 1      | Sigmoid<br>Step  | Hopfield<br>(Hebb)     | 画像修復<br>巡回セールスマン問題           | J Hopfield (Caltech)                                                               | ○ |
| Madaline (Multilayer Adaline)          | 2値       | 連続   | 2値       | 2      | Signum           | Adaline                | エコーキャンセラ<br>信号処理、天気予報        | B Widrow (Stanford U)                                                              |   |
| Neocognitron                           | 多値       | 連続   | 2値       | 2      | 線形               | Cognitron              | 文字認識                         | K Fukushima (Osaka U)                                                              |   |
| Perceptron                             | 連続       | 連続   | 2値       | 1      | Perceptron       | デルタ則                   | 文字認識                         | F Rosenblatt (Cornell U)                                                           | ○ |
| Self-Organizing Feature Map            | 連続       | 連続   |          | 1      |                  | Kohonen                | 幾何学的マッピング                    | T Kohonen (Helsinki U of Tech)                                                     |   |

## (1) Hopfieldモデル

Hopfieldモデルはフィードバックモデルの1つで、単層構造全結合型ニューラルネットワークにおいて、入力パターンから記憶パターンが自己想起される。ネットワークの中のすべてのニューロンは互いに全結合されており、各ニューロンからの出力信号がフィードバックされて再び他のニューロンに入力される。これを繰り返すと、ネットワークのエネルギーの極小値の1つの安定状態に収束して、もっとも類似した記憶パターンが出力される。

いま、N個のニューロンから構成されるネットワークにおいて、記憶させるパターンの数をMとし、j番目のパターンをベクトルに展開して、 $V_j$ とする。ここで、シナプスの結合強度を表わすシナプス行列Wを $V_j$ の積

$$W = \sum_j V_j V_j^T \quad (\text{ただし、} w_{jj} = 0) \quad (1)$$

として定義すると、i番目のニューロンの出力は、

$$v_i = f \left( \sum_j w_{ij} v_j + u_i \right) \quad (2)$$

で表わされる。ただし、(1)式において、 $V_j^T$ は $V_j$ の転置行列、Wのij要素を $w_{ij}$ とする。また、(2)式において、 $u$ はニューロンの固有の閾値、 $f(x)$ は、ニューロンの出力関数を表わす非線形関数、 $V$ の要素を $v_i$ とする。この時、シナプス行列にパターン $V_j$ を作用させると、

$$WV_j = \left( \sum_j V_j V_j^T \right) V_j$$

$$= \sum_{i=1}^n V_i (V_i V_j + V_j' V_i V_j) \quad (3)$$

か得られる。 $V_i$ と $V_j$ が直行している場合には第1項が0になりさらに、 $V_j$ が正規化されている場合には、(3)式の解としてベクトル $V_j$ が得られる。これらの条件が完全に満たされない場合でも、パターンを記憶するということが、ネットワークのエネルギー値の

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} w_{ij} v_i v_j - \sum_i u_i v_i \quad (4)$$

極小値になることが示されている。したがって、不完全な記憶パターンが入力された場合には、(2)式のエネルギー値が小さくなるように、もっとも類似したパターンへ収束する。ただし、極小値を求める際に大域的な極小点に収束せずに、局所的な極小点に収束した場合には記憶されたパターンは得られない。この問題を回避するためにニューロン数 $N$ が記憶パターン $M$ よりも十分大きいという条件が必要であり、また局所的な極小点に収束しないように、収束過程でアンニhilしてその状態から抜け出すという方法も考えられている。

## (2) ハックプロパゲーションモデル

ハックプロパゲーションモデルはレイヤー型モデルの1つで、多層構造のニューラルネットワークにおける学習則を与えるものである。学習によって、外部からの教師信号とネットワークの出力信号との二乗誤差を最小にするように、各層のニューロン間を結合しているシナプスの結合強度を変える。ネットワークは、入力層、1個以上の中間層、出力層から構成されており、入力層と中間層間のニューロン、中間層間のニューロン、中間層と出力層間のニューロンは、通常はそれぞれ全結合されている。

入力信号は、入力層から中間層、出力層へ順方向に伝わる。次層への出力信号は、前層の各ニューロンの出力信号の和を、たとえばシグモイド関数のような非線形関数によって処理したものである。いま、 $(k-1)$ 層目と $k$ 層目のシナプスの間の結合強度を $w_{ij}^k$ 、ニューロンの固有の閾値を $u_i^k$ とすれば、 $k$ 層目のニューロンの出力は、

$$v_i^k = f \left( \sum_j w_{ij}^k v_j^{k-1} + u_i^k \right) \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 $f(x)$ は、シグモイド関数などの非線形関数である。各層において(5)式を順に計算し、出力層におけるニューロンの出力をネットワークの出力結果とする。

あるパターンを入力した時のネットワークの出力結果 $v^N$ （ただし、 $N$ はネットワークの層の数を表わす）と、所望の出力結果（教師信号） $t$ との誤差 $\varepsilon$ が最小になるように、最急降下法を用いて、 $w_{ij}$ を変えることによって、学習が行われる。各層の誤差は、

$$\varepsilon_i^k = f' \left( \sum_j w_{ij}^k v_j^{k+1} + u_i^k \right) \sum_j w_{ij}^{k+1} \varepsilon_j^{k+1} \quad (6)$$

て与えられ、これより各層の $w_{ij}^k$ の変化量は、

$$\Delta W_{ij}^k = \alpha \varepsilon_i^k v_j^{k-1} \quad (7)$$

て表わされる。ただし、 $\alpha$ は学習の速度を決める係数である。この時、(6)式に示されるように、誤差信号か、入力信号とは逆に、出力層から入力層へ伝播する。

### (3) ホログラムを用いた光連想記憶モデル

ホログラムは2つの光波の干渉パターンを記録したもので、記録した光波の一方を参照波、他方を物体波とし、参照波をホログラムに照射することによって物体波が再生される。たとえば、平面波を参照波として、参照波の入射角度を変えながら複数の画像を記録した場合、記録した画像を不完全な状態でホログラムに入射させると、回折によって、複数の平面波が再生される。これらの平面波は画像を記録した参照波に相当する。この時入射した画像にもっとも近い画像を記録した参照波がもっとも強く再生されるので、回折波を閾値処理してその参照波のみを取り出すことができる。その参照波の複素共役波を発生させることができるならば、その複素共役波をホログラムに照射して、入射した画像にもっとも近い画像を完全な形で再生させることができる。

いま、参照波を $R$ 、物体波を $O$ とすると、これらを干渉させた面での光強度分布は、

$$I = |R + O|^2 \quad (8)$$

て表わされる。この光強度分布に比例した振幅透過率をもつ素子（ホログラム）を作れば、このホログラムを不完全な物体波 $O'$ で照射した時の透過光は、

$$\begin{aligned} A &= O' |O + R|^2 \\ &= O' (|O|^2 + |R|^2) + O' O R^* + O' O^* R \end{aligned} \quad (9)$$

て表わされる。ただし、 $*$ は、複素共役を表わす。第4項は、近似的に、 $O'$ と $O$ の相関と、 $R$ とのコンホリューションに等しいことが知られている。したがって、ホログラムからは、 $O'$ と $O$ の相関に比例した信号が再生され、その光強度を閾値処理することによって、 $O'$ に近い物体波 $O$ を記録した参照波 $R$ のみが得られる。この参照波 $R$ の複素共役波 $R^*$ が得られれば、これを再びホログラムに入射させることによって、完全な物体波 $O$ が再生される。

このモデルの具体的な光学系については、4.2.3において述べる。

### 4.2.1.2 光ニューロモデルの課題

ニューラルネットワークを光学的に実現するには、表4.4に示したような従来のモデルを光学的にインプリメントする方法と、4.2.1.1(3)に示したような光の特長を生かしたモデルを実現する方法がある。

光は電気と異なりアースを必要としない特長を有するか、逆にノイズに弱く、 $S/N$ を

高くするには十分なノイズ対策が必要であり、精度の高いアナログ演算や多値の演算を行うことは難しい。また、光テハイス技術はケートレヘルのデハイスが実証された段階にあり、光を用いて電気と同等のデジタル演算を行うことは難しい。したがって、光を用いてニューラルネットワークを実現するためには、比較的精度の低いアナログ演算や固定小数点のデジタル演算で対応できるようなモデルが望ましい。しかし、従来のモデルは、デジタルコンピュータで計算することを前提にしたものが多く、必要演算精度やアナログ処理の可能性を示したものは少ない。

光テハイスは複雑な構造を有するものが多く、素子の均一性が電子テハイスに比べて悪い。したがって、アナログ演算に用いる場合にはこの問題を考慮しなければならない。また、光はプロトキャストに伝播する特性を有するか、逆に素子を集積した場合には隣接する素子へのクロストークが問題となる。外部からの教師信号によって学習するニューロモデルでは出力信号がネットワークの中にフィードバックされ、系の状態を変えることができる。したがって、素子の不均一性やクロストークについてもこれらを系の状態変数の1つと考えることによりある程度吸収できることが報告されている。

ニューラルネットワークを光学的に実現するためには従来のニューロモデルを光学的にインプリメントするだけでなく、光の特長を生かした新しい光ニューロモデルの提案が必要である。

#### [参考文献]

- [1] Psaltis, D. et al. Optical Information Processing Based on an Associative-Memory Model of Neural Nets with Thresholding and Feedback, Opt Lett, Vol 10, No 2, pp 98-100 (1985)
- [2] Kosko, B Adaptive Bidirectional Associative Memories, Appl. Opt. Vol 26, No 22, pp 4947-4960 (1987)
- [3] Ticknor, A J and Barrett, H H Optical Implementations in Boltzmann Machines, Opt Eng, Vol 26, No 1, pp 16-21 (1987)
- [4] Hopfield, J J Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities, Proc of Natl Acad Sci. USA, Vol 79, pp 2554-2558 (1982)
- [5] Rumelhart, D E, McClelland, J L and the PDP Research Group Parallel Distributed Processing, Vol. I and II, The MIT Press, Cambridge (1986).
- [6] Owechko, Y et al Holographic Associative memory with Nonlinearities in the Correlation Domain, Appl Opt, Vol 26, No 8, pp 1900-1910 (1987)

## 4 2 2 光ニューロテハイスの現状と課題

光ニューロテハイスを開発する目的は大規模かつ高速に動作するニューラルネットワークのハードウェアや画像情報を直接処理できるハードウェア、あるいはコンパクトなハ

ートウェアを実現することである。

光ニューロデハイスは、①電子技術か不得手とするニューロン間のノナプス結合網（アナロクの重み付配線網）のみを光デハイスで置き換え、ニューロンの非線型処理は電子デハイスで行う光電子方式と、②ニューロン素子、ノナプス素子とも光デハイスで構成する全光方式に分類される。以下、代表的な2～3の光ニューロデハイスの現状と課題について述べる。

#### 4 2 2 1 光電子方式

発光素子アレイ、空間光変調素子、受光素子アレイをGaAs基板上に層状構造に集積化した光ニューロチップの構造図を図4 3に示す。このニューロチップの機能はニューロンの興奮状態を表すベクトルとノナプス荷重を表すマトリックスの乗算を完全並列に行うことである。現在までに、固定ノナプス型で90ニューロン、処理速度～1 GCPS を有する英アルファヘント26文字を認識するチップが報告されている[1]。図4 3と類似の構造で電気アドレス方式の変換ノナプス型の（学習機能付）光ニューロチップも最近提案され、小規模ながら試作結果も報告されている[2]。この他、基本的には図4 3の構造で、S1不揮発性メモリをノナプス素子に用いる光電子回路の提案[3]や、通常の発光素子の代わりにpnpn光デハイス(VSTEP)を用いるチップの提案[4]もある。高速にノナプス荷重の書換えか可能な空間光変調素子とそれを用いた光ニューロチップが開発できれば、実用に大きく前進すると思われる。

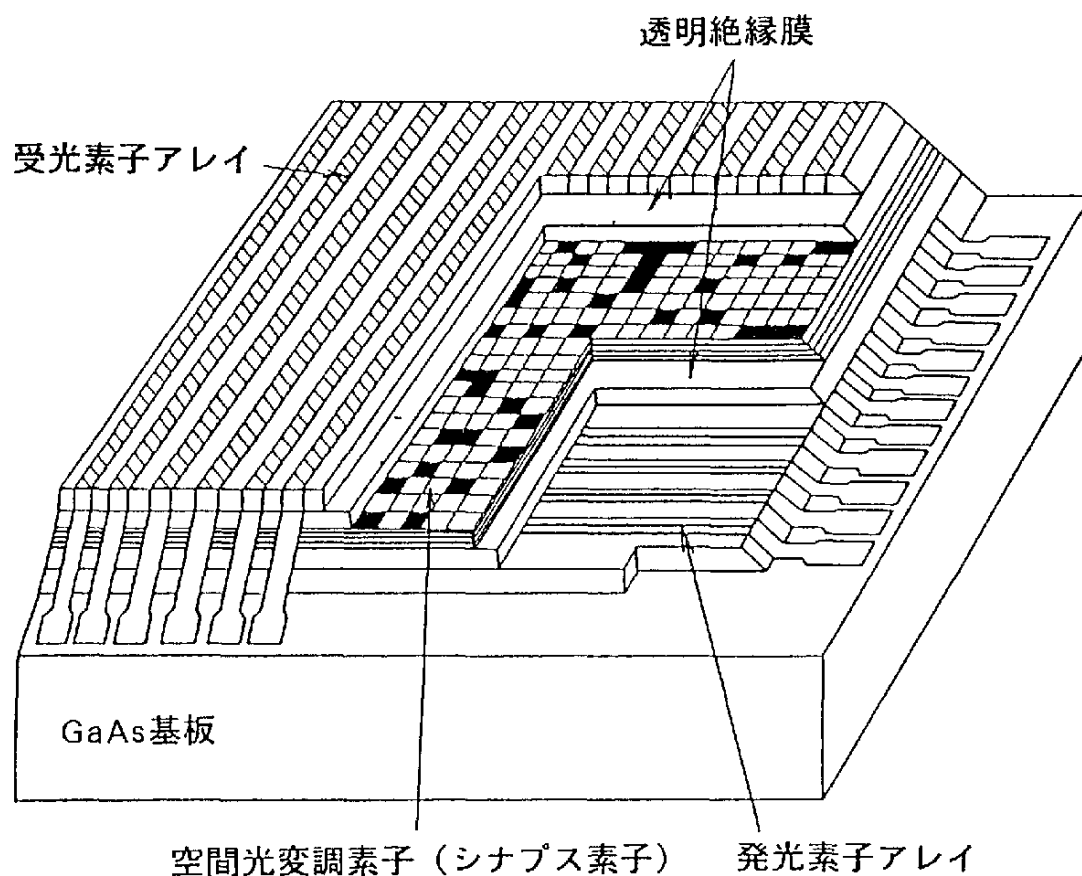


図4 3 GaAs光ニューロチップの構造図

図4 4はCCD(Charge Coupled Device)をノナプス素子に用いた光ニューロチップの構造例である[5]。空間光変調素子を透過した光情報を2次元CCDアレイ上に照射して、CCDの各井戸に光強度に対応した電荷を誘起、蓄積することによってノナプス荷重を与える光アトレス方式のチップである。ヘクトルとマトリックスの乗算は電氣的に行う。256ニューロンを有する完全結合型のチップが試作され、電気アトレスによる予備実験がなされ、処理速度 $\sim 0.5$  GCPsを得ている。この他、CCDの代わりに $\alpha$ -Siの光導電性を用いたチップやフォトランスタアレイを用いたチップの報告例[6]もある。高速に動作してかつ高い空間分解能を有する光アトレス型のニューロチップと光源を含めたモジュールの実装技術の開発が重要である。

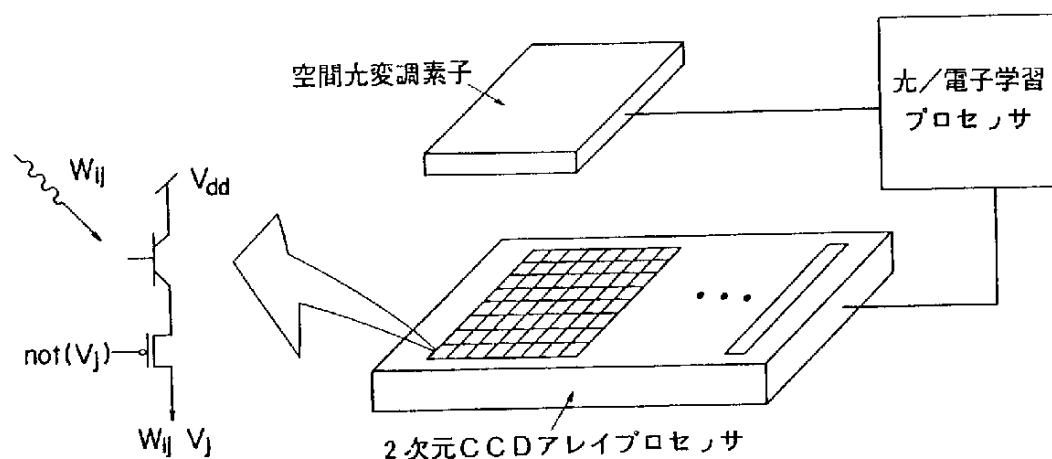


図4 4 CCDを用いた光ニューロチップの構造図

#### 4 2 2 2 全光方式

2種類のトーパントをもつ電子捕獲材料(CdS)をノナプス素子に用いる報告がある。電子捕獲材料のエネルギーバンドを図4 5に示す[7]。電子捕獲材料に情報の書き込み光として青色光を照射すると、その空間パターンが第1のトーパント(Sm)の基底単位に捕獲(記憶)される。情報の読出しは赤外光で行う。空間的に一様な赤色光を照射すると、第1のトーパントの基底単位に捕獲されていた電子は、第2のトーパント(Bu)の基底単位に遷移する。この時、電子捕獲材料に記憶された情報の空間パターンの赤外光を放出する。したがって、ノナプス荷重を強める時は青色光を、弱める時は赤外光を照射することにより、全光学的にノナプスの学習、自己組織化が可能である。またヘクトルに対応する空間パターンの赤外光を照射すれば、ヘクトル/マトリックスの乗算が行える。小規模なデバイスの実験結果が報告されている。全光方式のニューロデハイスは電氣的配線を全く必要としないため光技術の特長を最大限に利用したデバイスと言える。しかし、電子捕獲材料やフォトレフラクティブ材料などの新機能光学材料の探索や、それらの高速化技術や安定化技術の開発が必要である。

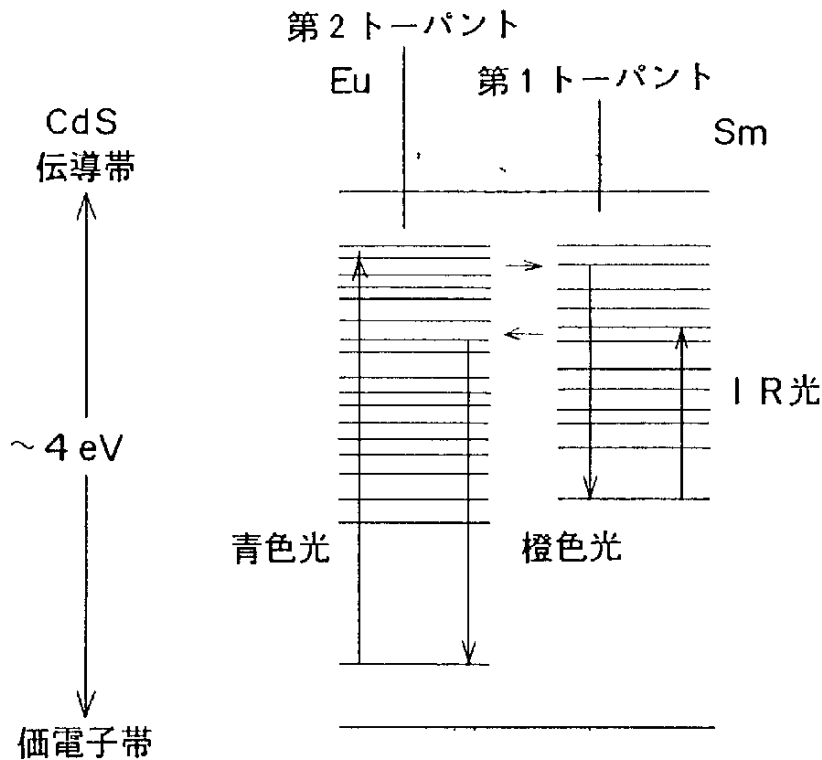


図4 5 電子捕獲材料のエネルギーハント図

#### 4 2 2 3 光ニューロデバイスの課題

このように、現在までに多くの光ニューロデバイスの提案、試作例が報告され、光技術の潜在的な優位性が実証されつつある。今後、光デバイス的高速化、大規模集積化、および電気または光アトレス方式の空間光変調素子を集積化した可変ノナプス型の学習機能付き光ニューロデバイスの開発が必要である。

#### [参考文献]

- [1] Ohta, J , Kojima, K., Nitta, Y , Tai, S and Kyuma, K Optical neurochip based on a three-layered feedforward model, Opt Lett , 15, 1362 (1990)
- [2] Kyuma, K , Nitta, Y., Ohta, J , Tai, S and Takahashi, M The first demonstration of an optical learning chip, Optical Computing Topical Meeting, Salt Lake City, WB2 (1991)
- [3] Yonezu, H , Himeno, T , Kanamori, K , Pak, K and Takano, Y An optoelectronic synaptic connection circuit with variable analog and nonvolatile weights, Jap J Appl Phys , 7, L1314 (1990)
- [4] 山田, 河合, 小倉, 田代, 杉本, 笠原, 窪田, フィートフォーワート型光ニューラルネット動作に及ぼす素子特性の不均一性の検討, 1989年(秋期)応用物理学会学術講演会講演予講集第3分冊, 30p-ZD-7
- [5] Agranat, A , Neugebauer, C F and Yariv, A IJCNN' 90( Washington D C , 1990) で発表された。著者らは本会議に印刷論文を投稿せず発表のみを行った。詳細は、

(財)日本情報処理開発協会編, 新情報処理技術に関する総合的調査研究—米国実態調査報告書—, p 21 (平成2年3月)に記載されている。

- [6] Kornfeld, C D , Frye, R C , Wong, C C and Rietman, E A An optically programmed neural network, IJCNN' 88, II-357 (1988)
- [7] Jutamulia, S , Storti, G , Lindmayer, J and Seiderman, W Optical formation of interconnection weight matrix for a neural net using electron trapping (ET) materials, IJCNN' 90, II-147(1990)

## 4 2 3 光ニューロシステムの現状と課題

現在のところ、実用的な光ニューロシステムが現われていないか、ここでは今後実用的なシステムとして発展が望める光ニューロシステムについて述べる。

### 4 2 3 1 光連想メモリ

#### (1) Hopfield型光連想メモリ

Hopfield型の光連想メモリは、図4 6に示すように、光学的ヘクトル—行列演算器により積和演算を高速に実行できるため[1]、注目され続けており、モデルの改良[2]や時分割多重、周波数多重によるシステムの大容量化、大規模化[3]の検討も進められている。また、4 2 2に述べたように光ニューロチップとして集積化も精力的に行われ、連想メモリとしてのモデルの性能向上、周辺電子デバイスとの集積一体化が進めば、最も実用化に近いシステムであるといえる。

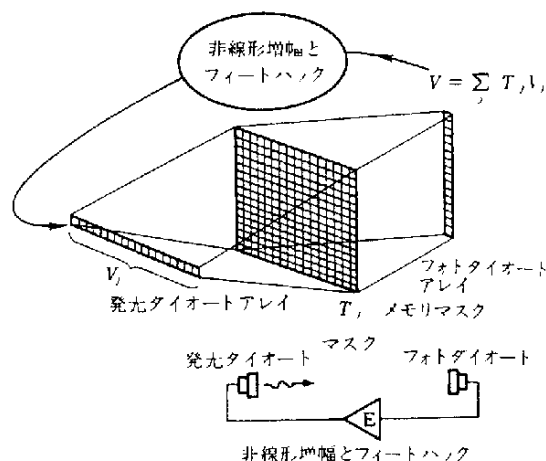


図4 6 Hopfield型連想メモリの光による実現の概念図[1]

#### (2) ホログラム素子、位相共役素子によるホログラフィック連想メモリ

従来から、ホログラム素子による多重画像記憶、画像キーによる内容検索的な連想メモリが研究されてきたが、図4 7のような体積ホログラム素子、光位相共役素子による連想メモリの研究も進められている[4]。現在のところでは、また記憶される画像の数が少ない、読出し光の角度変更が必要である、読出しの応答速度が遅い、S/N比が低いなどの



課題は多いか、微小な結晶を多数利用した連想メモリを構築すれば、実現に向けて大きく進むと思われる。

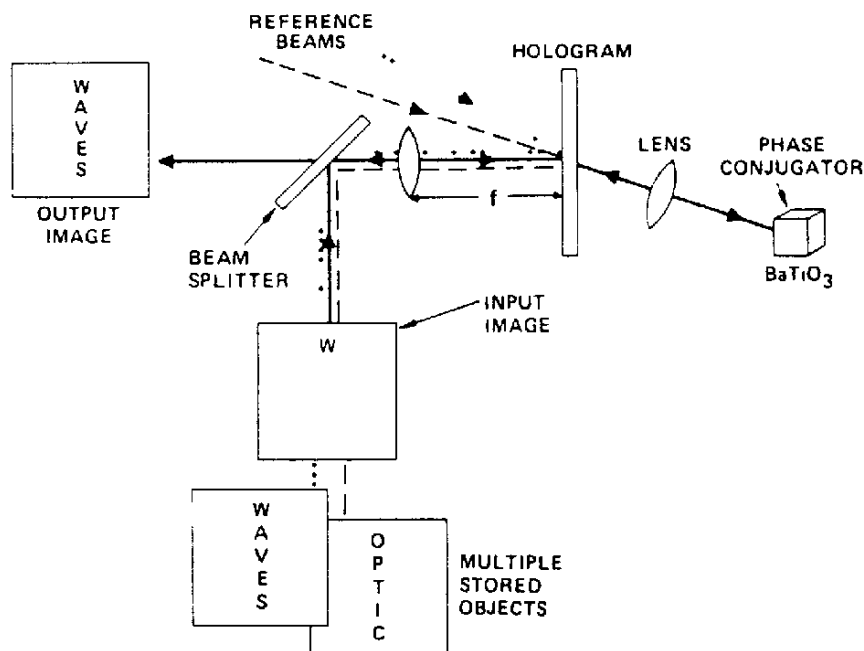


図4 7 ホログラフィック光連想メモリ [4]

### (3) 光ディスクを利用した光連想メモリ

図4 8は、光ディスクへのホログラム記録とコヒーレント光学相関計を用いた連想メモリ [5] の例で、1970年代の光画像検索（フィルムに記憶された画像から一致する画像を探す）を技術的に一新させる可能性を持つ。書換え可能な光ディスクを用いれば、画像の内容による直接検索に有望と思われる。一方、光相関計による一致／不一致の判定には、画像の拡大・縮小、回転、類似画像でのピークの判別ピーク強度の正規化後の判別など従来からの課題が残されたままであり、これらの問題を電子的メカニズムでいかに解決するか課題である。

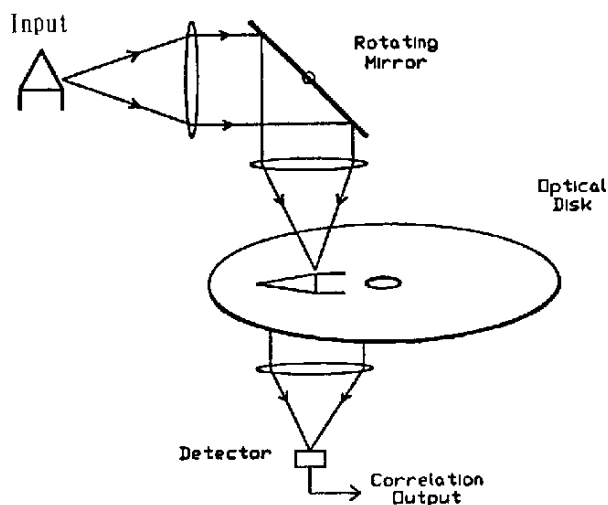
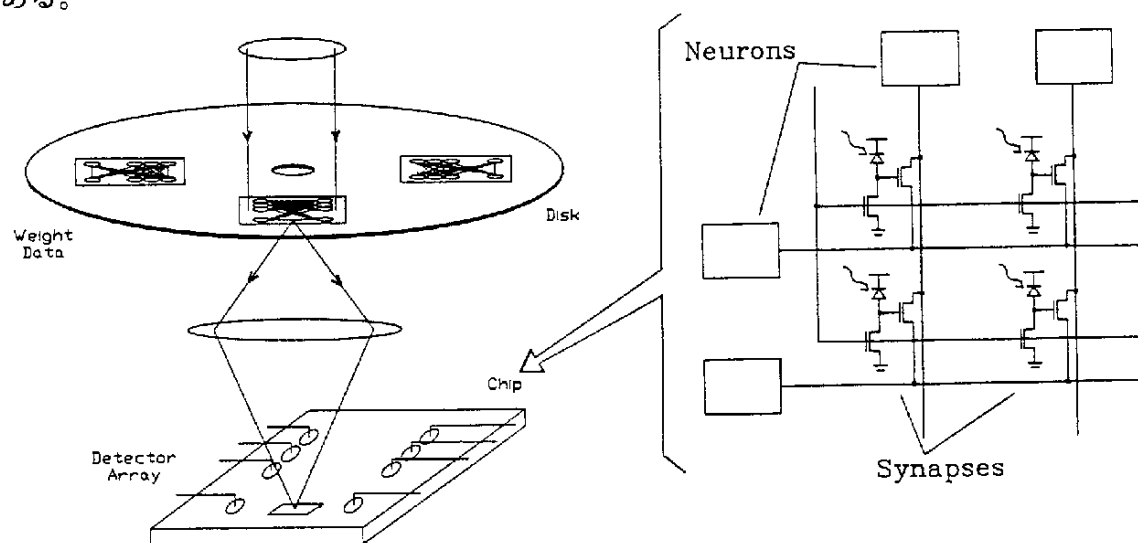


図4 8 光ディスクを用いた画像検索 [5]

#### 4 2 3 2 多層構造光ニューラルネットワーク

図4 9は光ディスクと光電子ニューロチップを用いた多層構造のネットワークの構成例である[5]。光ディスクが各層間のシナプス結合行列を記憶し、ニューロチップには、電子回路で構成された入出力ニューロンとフォトタイオードとトランジスタで構成されたシナプス結合素子が集積されている。動作原理は次のとおりである。まず、光ディスクに一樣な光を照射して、第1層と第2層間のシナプス結合行列を並列に読み出し、シナプス素子アレイに照射する。これと同期させて、入力ニューロンの状態ベクトルをシナプス素子に入力すると、行列とベクトルとの積和が得られる。これを、出力ニューロンでしきい値処理すれば、第2層の出力電圧が得られる。次に、光ディスクを回転して、同様の手法で第2層と第3層の演算を行う。この操作を繰り返すことによって、多層構造のニューラル処理が実現される。

各種ニューロチップ（電子、光にかかわらず）において、シナプスの重みの変更は大きな問題である。重みの制御のために電気配線を行うのは困難であり、この例のように光の照射により重みを変化させるアイディアは重要である。また、大規模なシステムの実現には、光電子ニューロチップを多数組合せる必要があり、次に述べる光結線も重要な技術である。



(a) 光ニューラルネット

(b) 光電子ニューロチップ

図4 9 光ディスクを用いた多層構造光ニューラルネット[5]

#### 4 2 3 3 光による結線

ニューロシステムでは、多数のニューロン間の接続が必要となるが、ニューロンが電子回路か光回路かにかかわらず、これを光結線により行おうとする試みは多い。図4 10のように、パスの切替えをホログラム素子、空間光変調器等で行うことが考えられている[6, 7]（詳細は 第5章 光インタコネクション 参照）。

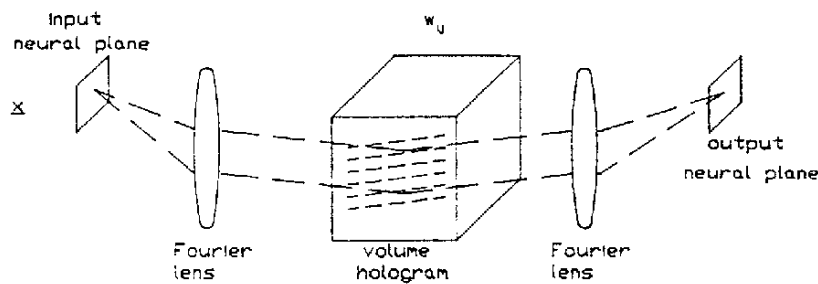


図4 10 ニューロチップの光配線[6]

#### 4 2 3 4 現状の光ニューロシステムの課題

以上で述べてきたように、現状の光ニューロコンピュータの研究・開発は実用的なシステムになるには程遠く、さらに研究の余地を残している。具体的な技術内容は4 3 4において触れるとして、ここでは課題のみを列挙する。

- ①適用する問題に対応した光ニューロコンピュータの機能的・階層的なモジュール化の手法の確立
- ②多数のモジュールが協同・連合して動作する光ニューロコンピュータの構成方法
- ③画像を2次元情報のまま扱え、かつニューロン間での多数のシナプス結合の実現方法
- ④学習メカニズムの光学的な実現方法

#### [参考文献]

- [1] Farhat, N. H., Psaltis, D., Prata, A. and Peak, E. Optical implementation of the Hopfield model, *Applied Optics*, Vol. 24, No. 10 (1985).
- [2] Lee, S -Y, Jang, J -S, Park, J -S, Shin, S -Y. and Shin, C -S Modification of the Hopfield model and optical implementation for correlated images, *SPIE*, Vol. 963 *Optical Computing* 88 (1988)
- [3] 太田, 田井, 追田, 久間 光ニューロコンピュータの大容量化, *信学技報*, OQE88-62 (1988)
- [4] Owechko, Y, Dunning, G. J., Marom, E and Soffer, B H Holographic associative memory with nonlinearities in the correlation domain, *Applied Optics*, Vol 26, No. 10 (1987)
- [5] Psaltis, D, Neifeld, M A, Yamamura, A. and Kobayashi, S Optical memory disks in optical information processing, *Applied Optics*, Vol 29, No 14 (1990)
- [6] Psaltis, D, Brady, D and Wagner, K Adaptive optical networks using photo-refractive crystals, *Applied Optics*, Vol 27, No 9 (1988)
- [7] Shamir, J, Caulfield, J and Johnson, R B Massive holographic interconnection networks and their limitations, *Applied Optics*, Vol 28, No 2 (1989)

### 4 3 光ニューロデハイス・システムの今後と要素技術

#### 4 3 1 光ニューロコンピュータの将来像

21世紀は、画像、音声、文字などの多形態の情報を区別なく統合して扱うマルチメディアの時代である。自動翻訳機械や立体映像機器など一昔前までは夢の技術か、21世紀に向けて盛んに研究されている。しかし、これらの技術か実現されても特定の専門家しか機械を操作できないのでは意味かない。ニューロコンピュータを研究開発する究極的な目的は、プログラムによらず人間のように学習や経験によって試行錯誤を繰り返しながら知識を獲得して、入力情報か曖昧であっても正しい結果か得られる、誰にても利用できる「人にやさしい」コンピュータの実現である。

人間は五感を通して様々な情報を外界から得ているか、そのほとんどは光を介した視覚画像情報である。したかつて新しい概念のコンピュータ技術を構築するには、S I-L S I技術の一層の発展に加えて、電子技術に欠けている画像処理機能と高速性・並列性を備えた光デハイスの開発か必要である。光ニューロコンピュータの特長は、電子技術のみでは実現か困難な画像（映像）処理と高速情報処理か得意なことである。

人間の視覚と脳の情報処理機能を模倣した光ニューロコンピュータの将来像を図4 11に示す。2次元、3次元の複雑な画像情報を直接とりこみ並列処理する人工網膜、入力画像情報を自動的に整理する自己組織化光情報ヘース、高速学習機能をもち画像の認識・連想処理を即座に行う光ニューロモジュール、それらを統合した光ニューロコンピュータの実現か期待される。また、論理処理か得意なデタルコンピュータと融合することにより、柔軟で高速の汎用性のあるコンピュータの実現か期待される。このような光ニューロコンピュータの応用例として自動車の自動走行システムの概念図を図4 12に示す。標識、路上の妨害物、歩行者などの画像情報を高速に処理して、それに対応した行動を迅速に処理するのに光ニューロコンピュータを利用するシステムである。

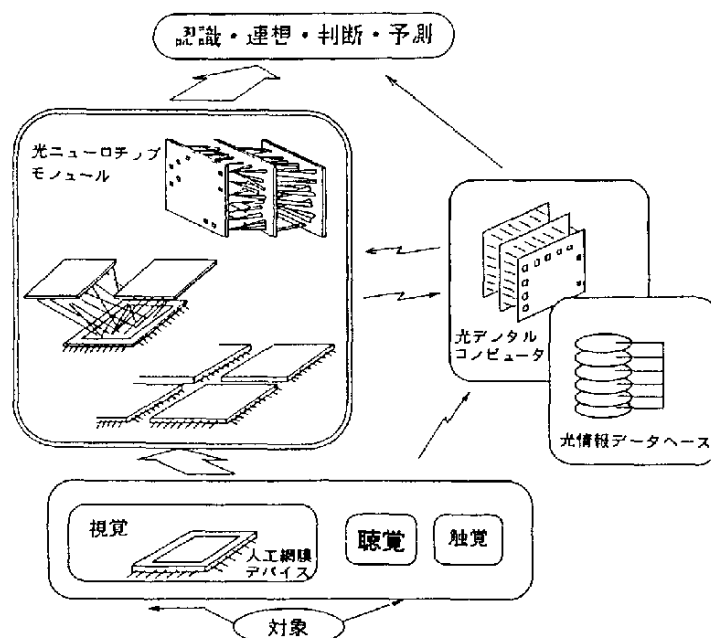


図4 11 柔軟な情報処理機能をもつ光ニューロコンピュータの将来像

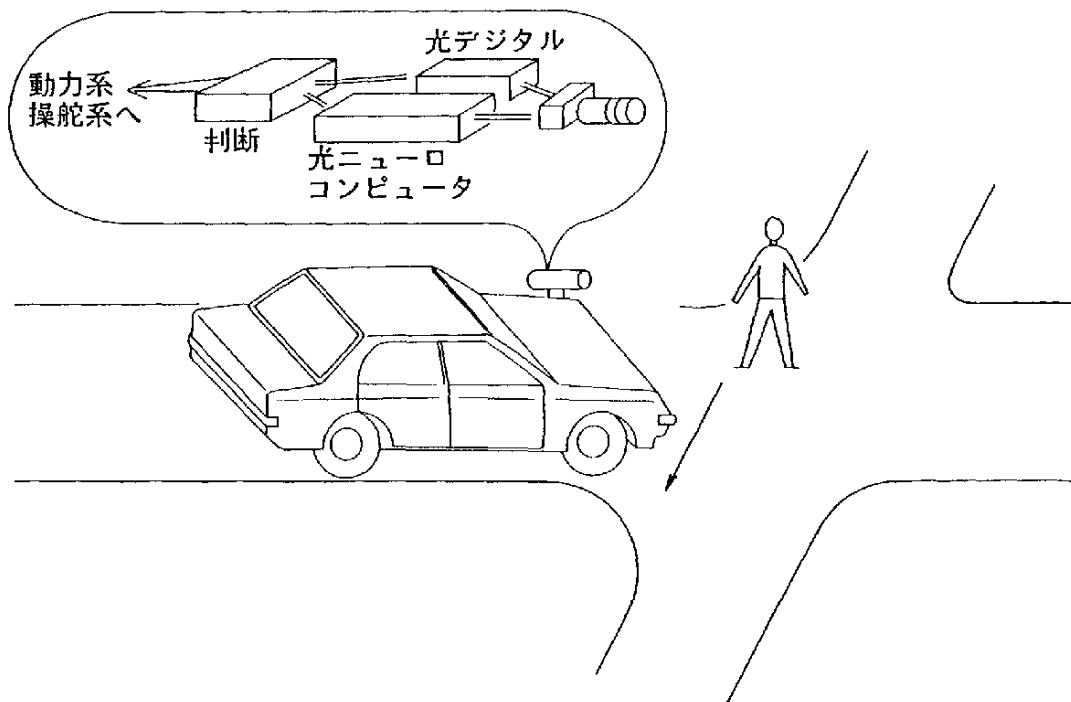


図4 12 光ニューロコンピュータを用いた自動車の自動走行システムの将来像

このほか、図4 13に示すように、ニューロ技術を用いた自然言語のコンパクトな自動通訳機械の開発が期待される。日常会話を認識するにはかなり大規模なニューラルネットワークが必要になると予測される。これを実時間処理し、なんの違和感のない自動通訳機械を実現するには、大規模・高速性にすぐれた光技術の導入が必要と思われる。さらに、3次元の画像情報を伝送する光ファイバニューラル通信技術と自動通訳機械を融合した自動翻訳・3次元テレビ電話の実現も期待される。

光ニューロ技術を開発することにより、電子技術と光技術が互いの不得手な部分を補完し、またデジタルコンピュータとニューロコンピュータが融合して、「人にやさしい」コンピュータ技術が社会の隅々まで浸透することか期待される。

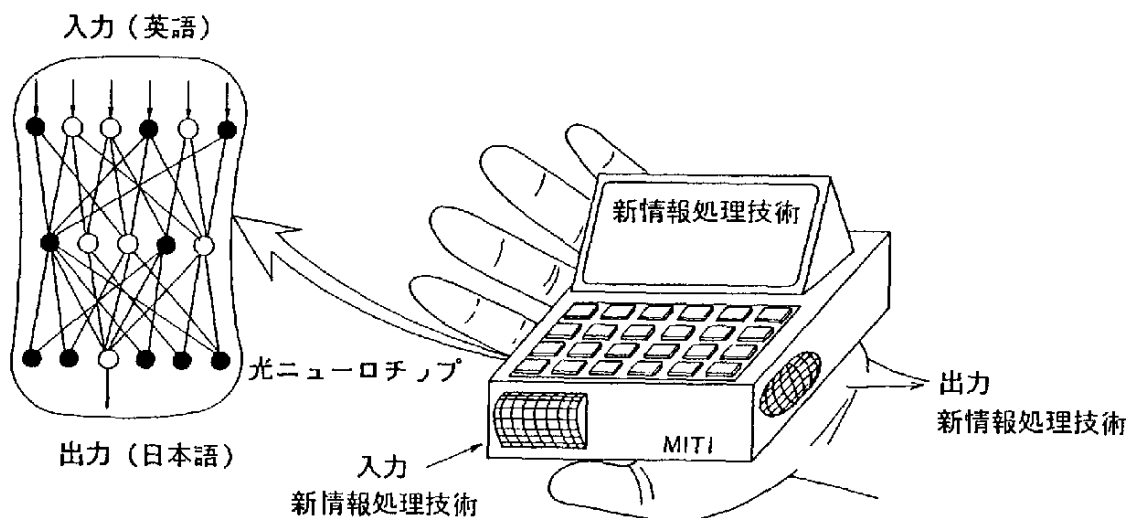


図4 13 光ニューロコンピュータを用いた自動通訳機械の将来像

## 4 3 2 光技術に適したニューロモデル

4 2 1 節で述べたように、ニューラルネットワークを光学的に実現して、有効に作用させるためには、光の特長を生かしたニューロモデルが必要である。しかし、またこのような光技術に適したニューロモデルというものは、提案されていない。そこで、本項では、光技術に適したニューロモデルのイメージについて検討する。

4 2 1 節では、光の性質から、

- ①精度の低いアナログ演算や固定小数点のテンタル演算で処理できる。
- ②学習によって、系の状態を変えることかできる。

ようなモデルか望ましいことを示した。また、光を用いれは、物体を結像することによって、容易に、その2次元画像を得ることかできる。この画像をそのままの形でニューラルネットワークへ入力し、処理するようなモデルか実現されれば、光技術に適したモデルの1つと考えることかできる。特に、画像の場合には、非常に多くのニューロンを必要とするために、電気を用いた処理では難しくなり、並列性に優れた光の特長を生かすことかできる。以上のことを考慮すると、たとえば、ネオコクニトロン[1]のような、視覚系のモデルは、光技術に適したニューロモデルの1つであると考えられることかできる。

また、従来のニューロモデルは、数少ない中間層、ニューロン数、結線数でも十分な結果か得られるように、逆に、学習アルコリズム、積和演算メカニズム、閾値処理などか、複雑になっている。一方、光を用いれは、光の並列性、フロートキャスト性などの特長を用いて、個別のニューロンやノナプスの処理機能を単純化することも考えられる。究極的には、レーサ共振、光双安定、光カオス、位相共役波の発生などの光の物理現象を、直接ネットワークの中に取り込むことかできるようなモデルか、光技術に適したニューロモデルであるように考えられる。

このように、光技術を用いて、ニューラルネットワークを実現する場合には、モデルの選択か、デハイスやシステム構成と同程度に重要である。まず、光技術に適したニューロモデルを検討し、デハイスやシステムサイトにトップダウン的に示し、逆に、それらのサイトからのフィートバックによって、モデルを改良するようなループ的な研究か必要になると思われる。

### [参考文献]

- [1] Fukusima, K Neocognitron A Self-Organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position, Biol Cybernet, Vol 36, No 4, pp 193-202 (1980)

### 4 3 3 光ニューロテハイスと要素技術

#### 4 3 3 1 光ニューロテハイス技術

光技術は、高い並列性、高密度配線性、アナログ／デジタル処理の両面性、画像情報の直接入力が可能など、潜在的にニューラルネットワークとの整合性がよい。しかし、4 2 2で述べたように、光ニューロテハイスの研究開発はまた緒についたばかりである。

ここでは、光ニューロテハイスの進むべき方向と、今後必要な技術的課題について議論する。

##### (1) 大規模・高速光ニューロテハイス

光技術の空間・波長並列性、高密度配線性を利用すれば電子技術では実現が困難な大規模・高速でコンパクトな光ニューロテハイスが実現できる可能性が高い。空間光変調素子は光ニューラルネットワークを構成するノナプス素子として極めて重要な素子である。

図4 14に光アトレス方式の新しい空間光変調素子の概念図を示す。この空間光変調素子では、入力光信号と学習光信号は逆向きに伝搬するようになっている。学習光信号の1部は分光・透過用窓において抽出され、ノナプス荷重の更新が実行される。一方、入力光信号は光変調素子を透過して、更新したノナプス荷重の積が出力光信号として得られる。この空間光変調素子と、光ニューロン素子としての非線型光デハイスをカスケード接続することによって、光ニューラルネットワークが構成される。

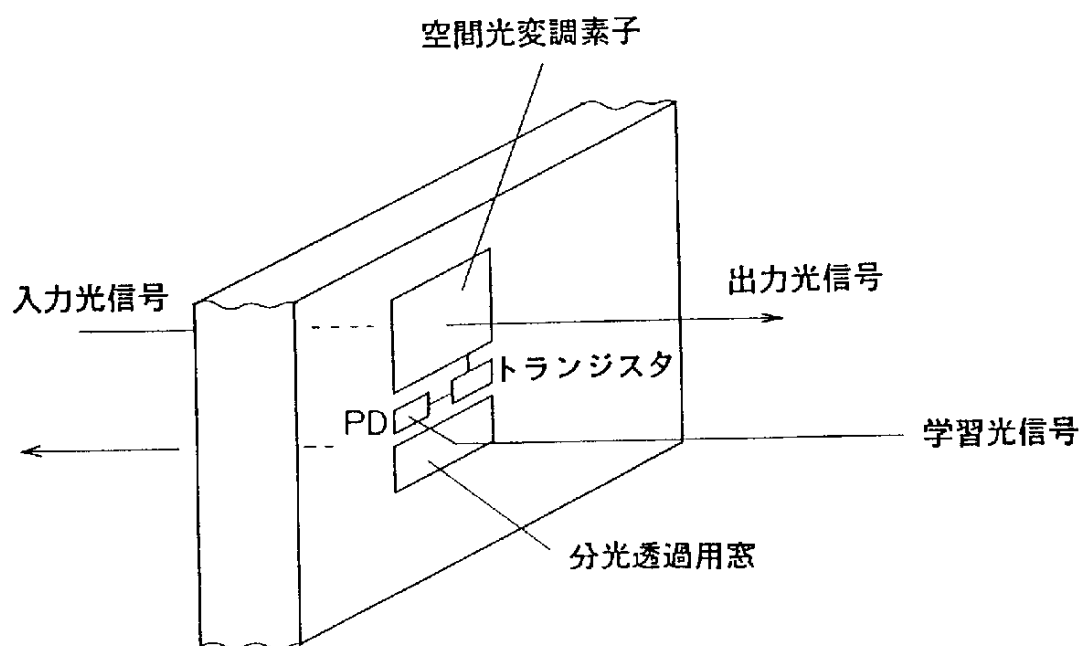


図4 14 光アトレス方式空間光変調素子の構成例

図4 15、図4 16に別の光ニューロテハイスの例として、ニューロンの興奮状態とノナプス荷重の積和演算の機能を有する光ニューロチップの基本構成図を示す。図4 15、図4 16は、それぞれノナプス荷重を電氣的、光学的に書き換える方式である。高速に動作する(電気または光アトレス方式の)空間光変調素子、発光素子(発光素子アレイまたはヒーム偏向半導体レーサ)、受光素子アレイなどで構成される。これらはアナログチップとし

でもテンタルチップとしても実現可能である。アナログ方式は並列性が高く生体との対応も容易なため、特に大規模化・高速化 ( $> 1 \text{ TCPS}$ ) が期待されるか、シナプス素子としてのアナログ空間光変調素子、電子回路とのインタフェース、学習結果などの情報の記憶形態に技術的ブレークスルーが必要である。一方、テンタル方式は演算の柔軟性が高く電子デバイスとの整合性に優れているか、光テンタルメモリや光スイッチング素子などのテンタル光デバイスの超大規模集積化技術の開発が必要である。また、非線型なしきい値機能をもつ光双安定素子などの光ニューロン素子の大规模集積化が開発されれば、電子回路とのインタフェースが容易なシナプスでコンパクトな光ニューロチップが実現できる。

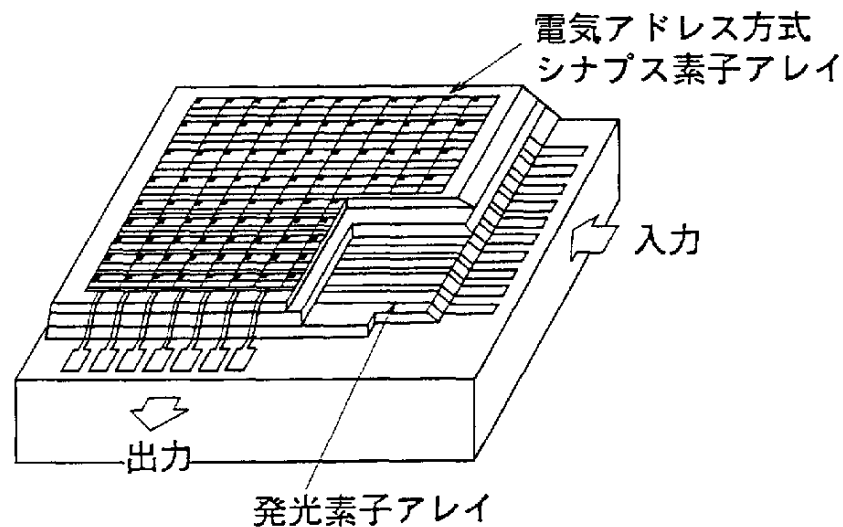


図4 15 電気アドレス方式光ニューロチップ構成例

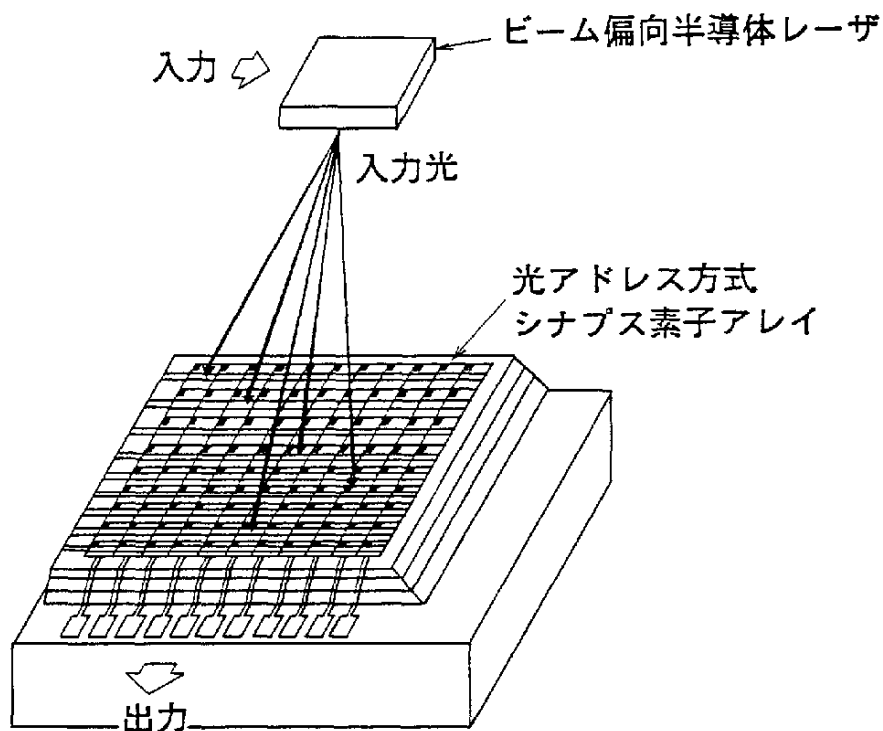


図4 16 光アドレス方式光ニューロチップ構成例



## (2) 画像処理用光ニューロデハイス (視覚情報処理素子)

電子技術にない光技術の特長の1つは画像情報を直接処理可能なことである。すなわち、画像情報の完全並列入力、完全並列処理が可能なことである。4.1.2で述べたように、ニューラルネットワークを用いた画像処理には、画像の認識や連想処理と画像の特徴抽出がある。前者に関しては、2次元の平面画像あるいは3次元の立体画像を直接ニューラル処理するアルゴリズムとそれらをハードウェアとして構成するための光ニューロデハイスの開発が望まれる。画像情報を直接処理する光ニューロデハイスの概念図を図4.17に示す。ヒーム偏向機能、焦点位置調節機能、しきい値機能などを兼ね備えた新しい光機能デバイスアレイの開発が期待される。他の構成例として、2次元の画像情報を処理するための4次元のノナプス結合網を実現する手段として、光の空間並列性と波長並列性を両用した新しい概念の光ニューロデハイスも考えられる。一方、後者の特徴抽出については、画像の輪郭抽出や特定方向のエッジの検出、オプティカルフローなど視覚機能を有する光ニューロデハイスの開発が望まれる。一例として、最近基本原理が報告された、画像の輪郭抽出を行う光情報処理素子の概念図を図4.18に示す[1]。これらの視覚情報処理デバイスの実現には、SEEDやpnpn光デバイス等の機能デバイスの集積化技術や Photorefractive材料などの機能材料の高性能化が必要である。

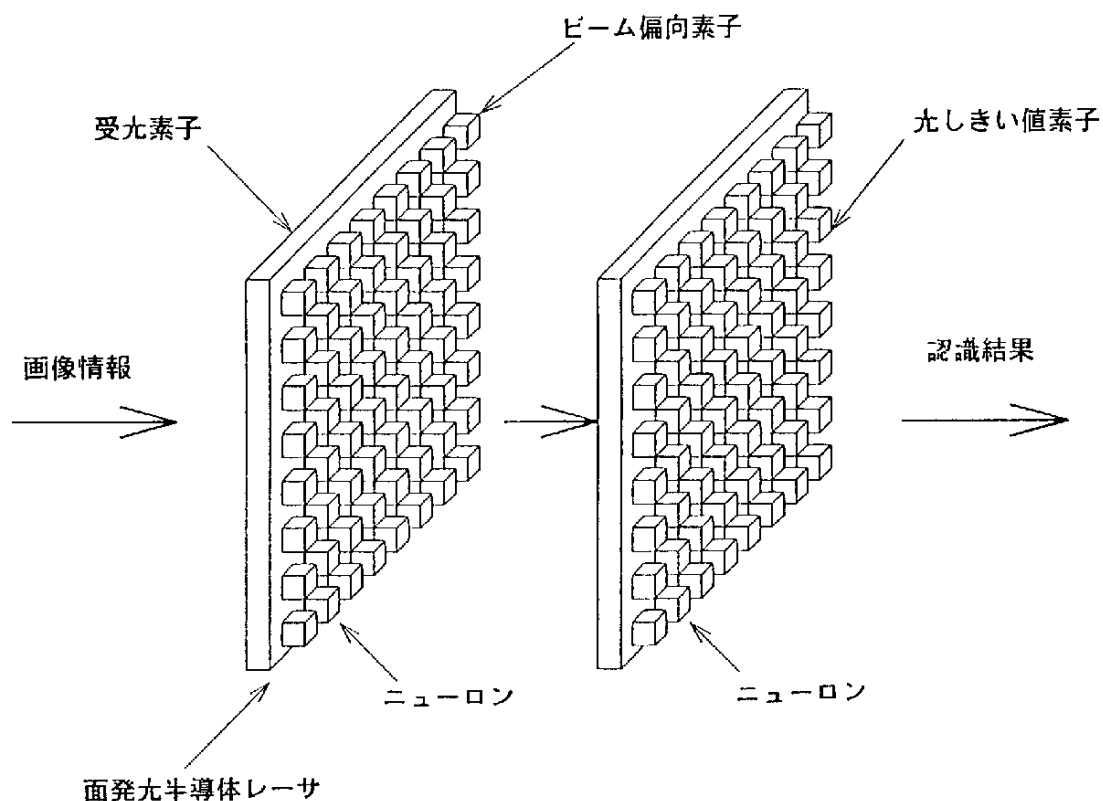


図4.17 画像処理用光ニューロデハイスの概念図

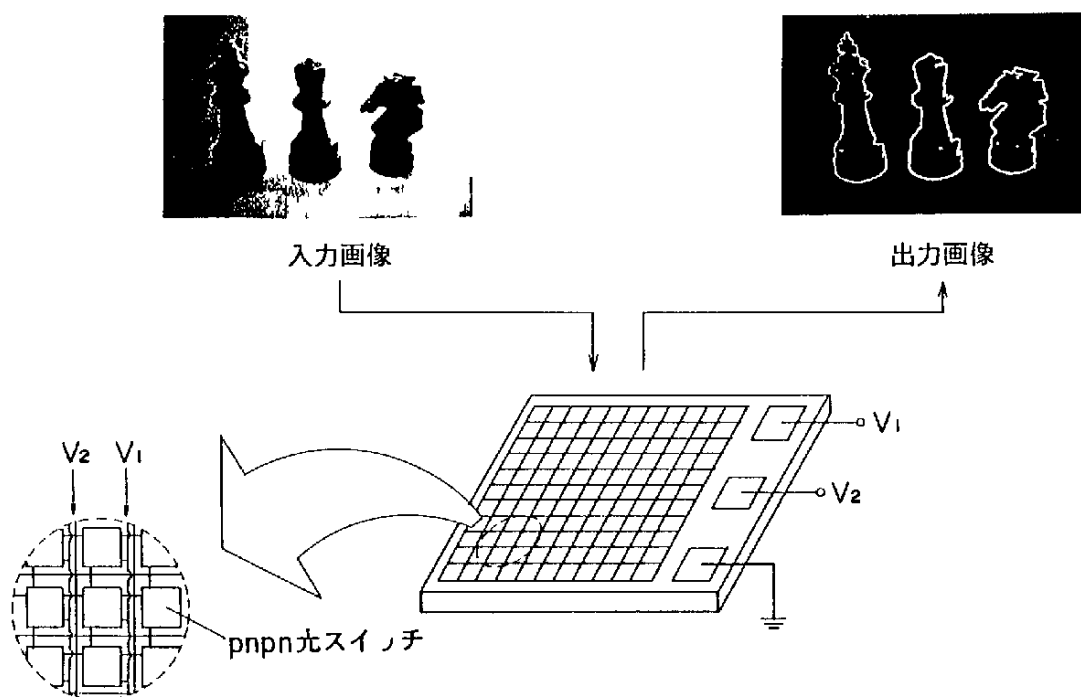


図4 18 輪郭抽出機能をもつ視覚情報処理素子（人工網膜）の構成例

### （3）光ニューロデハイスの要素技術

光ニューロチップや視覚情報処理素子などの光ニューロデハイスを構築するには、様々な要素技術（光デハイス技術とその基盤技術）の開発が必要である。

光デハイス技術では、発光・受光素子アレイ、ヒーム偏向レーザ、空間光変調素子などの基本デハイス、SEED、pnpn光デハイス、（実時間）ホログラム素子などの光機能デハイスなどがあけられる。光ニューロデハイスの集積度としては、デハイスの機能や応用に依存するか、 $100 \times 100 \sim 1,000 \times 1,000$ が必要である。

一方、基盤技術としては、まずGaAsなどのIII-V族化合物半導体のエピタキナル結晶成長技術があげられる。2次元アレイ光デハイス作製には大面積にわたる均一な膜の成長が必要である。また、Si電子デハイスとの融合をはかるには、GaAs/Siなどのスーパーヘテロエピタキナル技術を見直す必要がある。また原子層エピタキナル技術は新機能デハイスを生み出す可能性がある。次に、プロセス・実装技術が重要である。トライプロセス技術や微細加工技術の他、光デハイスの3次元集積化技術は特に重要である。また、光集積デハイスのアソセンブル技術、パッケージング技術、冷却技術の開発が不可欠である。最後に、光集積デハイスあるいは光電子集積デハイス(OEIC)の設計技術として、デハイスノミュレーション技術とプロセスノミュレーション技術が必要である。

### 〔参考文献〕

- [1] Hara, K , Kojima, K , Mitsunaga, K and Kyuma, K Demonstration of pattern edge extraction using a parallel-connected AlGaAs/GaAs pnpn optical switch, LEOS' 90 Conference, Boston, OE3 3, 132 (1990)

#### 4 3 3 2 材料・プロセス技術、設計技術

##### (1) 半導体人工量子井戸結晶成長技術

発光素子アレイ、空間光変調素子、受光素子アレイなどをはじめとする光ニューロデハイス用としてもっとも重要な材料はGaAs、InPなどの化合物半導体結晶である。化合物半導体結晶は発光機能を持つのみならず、その混晶を含めた多彩な組合せにより様々な材料を目的にあわせた材料設計が可能である。またハントキャップの異なる異種の材料を組み合わせることによってヘテロ界面が形成され、ヘテロ接合の組み合わせにより、半導体レーザをはじめ、受光素子、光変調器などの様々な光デハイスが実現されている。

しかしながら光ニューロデハイスにおいては、多くの素子を同一基板上に集積した大規模・高速の光集積デハイス、あるいは光双安定性などの新しい機能を持つ光デハイスが必要となり、それらの実現にはデハイスのみならず、それを支える材料およびプロセスなどの基盤技術においても新しいブレークスルーが必要である。

新しい光デハイス用材料としてもっとも期待されているのは、人工量子井戸結晶である。最近の化合物半導体エピタキナル成長技術の目覚ましい発展によって、結晶内の電子をそのトブロイ波長より狭い空間に閉じ込めた量子井戸構造、あるいは超格子構造と呼ばれる新しい材料の可能性が見え始めてきた[1]。これらの人工量子井戸構造結晶は、従来のハルク結晶の状態密度が連続的であるのに対し、階段状となることでハルク結晶では得ることのできない優れた電氣的、光学的特性を持つため、将来の大規模集積化された光ニューロデハイス用材料として非常に期待できる。たとえば光ニューロ用発光素子としては、1チップに1,000×1,000程度の集積規模が必要とされ、これに搭載される半導体レーザのしきい電流値の低減は光ニューロ素子実現の最重要課題の1つである。これに対し、半導体レーザの活性層に量子細線や量子箱などの人工量子井戸を用いると、半導体レーザのしきい電流値は10 $\mu$ A/台になると期待されている。

人工量子井戸結晶のもう1つの期待は非線形効果である。量子井戸構造ではポテンシャル井戸に閉じ込められた2次元励起子の存在により、ハルク結晶よりもはるかに大きな光学的非線形効果を持つことが知られている。光励起した量子井戸に垂直に電界を印加すると、励起子は量子井戸の障壁層の作るポテンシャルの壁により解離せず、電子と正孔の波動関数は井戸内で反対方向にひずむ(量子ノクタルク効果)。その結果、実効的なハントキャップや吸収係数などを外部電界によって変調することかてきる。外部電界に代えて光電場で誘起した光ノクタルク効果を用いた光-光変調器も基礎的研究が進んでいる。

量子井戸構造では励起子がハルク結晶よりも大きな束縛エネルギーを持っているため、室温以上の温度領域で励起子を媒介とした素子を実現できる可能性があり、今後の発展に期待が持たれている。これまで述べた人工量子井戸はキャリアの閉じ込め構造が膜厚方向のみであったか、面内方向にも同様のポテンシャル構造を形成できれば、2次元量子構造である量子細線やさらには3次元量子構造である量子箱構造を作成することかてきる。このような構造を実現するための研究はまた端著についたばかりであるか、量子効果かさらに顕著になるので超低閾値レーザをはじめとする種々の光デハイス実現の可能性がある。現在は作成技術が未熟なため十分な結果が得られていないか、今後この方面の技術開発が非常に重要である。

化合物半導体結晶材料の目覚ましい発展を支えてきたのは、分子線エピタキナル(MBE)

法および有機金属気相成長(MOVPE)などの高精度エピタキナル成長技術である。これらの新しい成長技術は、従来の液層エピタキナル成長法に比べ、膜厚の均一性、平坦性に優れているばかりではなく、非常に薄い膜厚の制御が可能であるという特徴を持っている。人工量子井戸結晶は、これらの新しい結晶成長技術の発展があって初めてその実現が可能となった。このようにすでに実績のある結晶成長技術ではあるか、今後、光ニューロデハイスの研究を進めていくためには、新たな課題を解決する必要がある。

膨大な数の光ニューロ素子を均一に作成するには、膜厚の均一性を現在よりも格段に向上させる必要がある。それには、最近注目を集めている単原子層エピタキナル(ALE)技術などをはしめとする、新しい結晶成長技術の開発が必要と思われる。ALEは結晶を1原子層ずつ成長させる方法であり、膜厚は基板面積に関係なく均一であることが保障されるばかりではなく、集積化プロセスに必要な選択成長においても、平坦性が良い、サイトウォールエピタキナル成長が1原子層単位で可能であるなどの新しい機能を持っている。

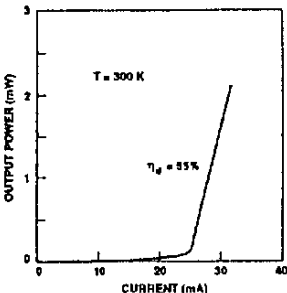
ALE技術の研究は、大規模集積光デバイスおよび新機能材料、新機能デバイス研究の基盤技術として、今後の取組みが重要である。

## (2) ヘテロエピタキナル成長技術

S<sub>1</sub>基板上にGaAsあるいはInP結晶をエピタキナル成長させる技術は、集積度の極めて高いS<sub>1</sub>デバイスと光デバイスをウェハ上に集積できる可能性を持っていることから、将来の光電子集積回路(OEIC)作成のキーテクノロジーになると期待されている。発光素子形成には $10^4/\text{cm}^2$ 程度の低転位密度が必要である。ここ数年の間に2段階成長、熱サイクルアニール、歪超格子の導入などの手法によって転位密度は徐々に下ってきており、現在は $3 \sim 5 \times 10^5/\text{cm}^2$ の値が得られている。またS<sub>1</sub>基板上に半導体レーザを試作した例も報告されており最近では通常の半導体レーザと同程度のI-L特性が得られた例もある[2]。

表4-5にヘテロエピタキナル技術の研究の現状を示す。S<sub>1</sub>基板上のGaAs成長に代表され異種基板上へのヘテロエピタキナル技術が確立すれば、従来の格子整合を指導原理としたヘテロエピタキナル成長の範囲は大幅に拡張し、さらに広範囲な応用を引き起こすことが予想される。しかし、異種材料間の熱膨張の違いによる歪や反りの問題など、実用化に向けて解決すべき課題は多くある。また、歪超格子などかとのように格子不整を緩和し良質の成長層が得られるかという基礎的問題も十分に解明されているとは言い難い。今後、これらの課題について解決していく必要がある。

表4 5 スーパーヘテロエピタキナル成長技術の現状

|           | GaAs/Si Si(100) off 基板 (2°)                                                                                                                                                                   | InP/Si Si(100)off基板 (2°)                    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 構造        | 1) GaAs/SL/GaAs/SL/GaAs*/Si<br>2) GaAs/SL/GaAs*/Si<br>(* 2 段階成長)                                                                                                                              | 1) InP/GaAs/GaP/Si<br>2) InP/SL/InP/GaAs/Si |
| 低欠陥成長結晶技術 | 1) 2 段階成長<br>2) SL buffer層の導入<br>3) 高温アニール<br>4) 不純物ドーピング<br>(成長法: MOCVD, MBE, MEE)                                                                                                           | 同左<br>(成長法: MOCVD)                          |
| EPD       | $3-5 \times 10^5 / \text{cm}^3$                                                                                                                                                               | $1 \times 10^7 / \text{cm}^3$               |
| デバイス      | LD Ith=25mA (Jth=350A/cm)**<br>MESFET<br>LED<br><br>(**H K Choi and C A Wang<br>J Appl Phys ,68,1916(1990)) | LD Ith=45mA                                 |
| 技術課題      | 欠陥数低減<br>基板の反り低減                                                                                                                                                                              | 同左                                          |

SL Super Lattice

MOCVD Metal Organic Vapor Phase Epitaxy

MBE Molecular Beam Epitaxy

MEE Migration Enhanced Epitaxy

EPD Etch Pit Density

### (3) フォトリフラクティブ結晶

化合物半導体結晶と並んで光ニューロデハイス用材料として興味ある材料はフォトリフラクティブ結晶である[3]。フォトリフラクティブ結晶とは光照射で形成された空間電界によって非線形屈折率変化を示す物質で、光の非相対的増幅・発振や自己励起型位相共約波の発生などの新しい非線形光学現象およびその応用に興味を持たれている。これまでに報告されているフォトリフラクティブ結晶は、 $\text{LiNbO}_3$ や $\text{BaTiO}_3$ 等の強誘電体、BSO等の常

誘電体、GaAs等の化合物半導体に分けられる。これまで応用面では多くの報告があるが、フォトリソグラフィ効果の成因について全てが明らかになっている訳ではない。フォトリソグラフィ効果に寄与するトナー（あるいはアクセプター）とキャリアの同定の問題、複数のフォトリソグラフィ準位トラップの影響の問題など、解決すべき課題は数多くある。

#### （４）プロセス技術

トライエッチングをはじめとする微細加工技術は、微細な光素子を大規模に集積化した光ニューロチップなどのデバイス構築に欠くことのできない重要な基盤技術である。またこの技術は量子細線や量子箱構造などの低次元人工量子井戸構造の研究にも必須の技術である。光集積回路用微細加工技術は現在までフォトリソグラフィ、電子線リソグラフィ、X線リソグラフィなどの露光技術、収束イオンビーム(FIB) エッチング、反応性イオンエッチング(RIE)、イオンミリング、化学エッチングなどか使われているが、サブミクロン以下の微細加工を再現性よく行う手法はまた実現されていない。イオンビームを用いた微細加工は化学エッチングに比べて種々の利点を持っているが、加工に伴う損傷が問題となる可能性があり、新しい低損傷微細加工技術の研究、開発が求められる。またマスクを用いずに不純物を微小領域に選択的にドーピングする収束イオンビーム打ち込みなどの選択ドーピング技術も、将来の大規模光集積回路作成に重要な基盤技術であり、今後の研究が必要である。

近年、結晶表面をある方位から僅かに傾けた基板上にエピタキシャル成長させることにより、低次元人工量子井戸構造を作成する試みが行われている。この手法は結晶成長のみで2あるいは3次元の極微細構造を形成できるため、将来の新機能光材料研究の基盤技術として期待できるが、研究の端緒についたばかりであり、今後の発展が望まれる。

#### （５）光デバイス計算機支援設計

集積回路の計算機支援設計(CAD)は、開発期間の短縮および開発コストの低減という観点から重要である。通常、CADはプロセスCAD、デバイスCAD、そして回路CADに大別できる。シリコン集積回路では、これらが専門化され、設計手法として確立されている。しかし光集積回路あるいは光素子と電子回路を同一基板上に集積した光電子集積回路(OEIC)の場合、異種のデバイスが組み合わされるため、現状では個々のデバイスに対して専用のデバイスシミュレータが開発されている段階にある。光集積回路あるいはOEIC用CAD開発の現状を表4-6にまとめた。GaAs ICなどの化合物半導体電子回路を対象としたCADは、汎用性があるため一部OEICの設計にも使われているが、プロセスに関するシミュレーションはほとんど行われていない。

表4 6 光デハイス及び光電子集積回路 (OEIC)  
の計算機支援設計 (CAD) 技術

| デバイス                  |                   | 現 状                             |
|-----------------------|-------------------|---------------------------------|
| 光<br>デ<br>バ<br>イ<br>ス | 半導体レーザー           | 2-3次元デバイスシミュレータ                 |
|                       | pinフォトダイオード       | 1次元デバイスシミュレータ                   |
|                       | 雪崩増倍型<br>フォトダイオード | モンテカルロ法によるイオン<br>化率比計算          |
|                       | 光導波路型デバイス         | ヒーム伝搬法 (BPM)による2-3次<br>元導波路解析   |
| 電子デバイス                |                   | トリフト拡散モデル、モンテカルロ法<br>による2-3次元解析 |
| 光電子集積回路               |                   | デバイスシミュレータ、プロセス<br>シミュレータ共に無し   |

#### 将来技術

1. 異なるデバイス間の相互干渉効果
2. プロセスシミュレータ
3. トータルCAD
  - 入力：マスクパターン
  - 出力：デバイス特性

光素子に関してはもっとも歴史のある半導体レーザに対して、光系と電気系の基本式をセルフコンシステントに2次元解析するデハイスシミュレータが実用化されている。また、ごく最近、発振スペクトル特性の解析も可能な3次元シミュレータも開発された。受光素子のCADは、PINの場合1次元解析が中心であり、雪崩増倍型受光素子(APD)におけるイオン化率の算出はモンテカルロシミュレーションが広く行われている。一方、電子デハイスに対しては、拡散・トリフトモデルによる2次元解析が中心で、相互コンタクトンスやケート容量といったパラメータの算出を目的にしている。さらに、光導波路に対しては、導波路断面での光分布の解析やヒーム伝搬法による伝搬方向の光分布の解析が行われている。

デハイスCADの共通の課題は、最近研究が盛んな量子効果の導入である。たとえば、量子井戸レーザにおけるキャリアの注入緩和過程や光変調器における量子ニュタルク効果

(QCSE)などを考慮したデハイスノミュレーションはまた手か付けられていない。光導波路に関しても、電界印加やキャリア注入の効果を直接取り扱う解析は行われていない。また、OEICは必ずしもプレーナ型でなく段差や傾斜面が含まれるため、数値解析手法として、非平坦構造に対応できる有限要素法などの導入も検討する必要がある。さらに、集積化で問題となる電流、光、あるいは熱の素子間での相互干渉については、複数のデハイスを一括して解析する必要があり、今後の課題の1つである。また、3次元ノミュレータあるいは2次元過渡解析ノミュレータも開発されているか、メモリ容量や演算速度の点で現在のスーパーコンピュータでも十分でないため、実用化を難しくしている。したかつて、今後さらに高速かつ安定な数値解析手法を検討していく必要がある。以上述べたように大規模光集積回路を対象としたCADは現在ほとんど未着手であり、光ニューロチップや視覚情報処理素子などの光ニューロデハイスの構築に向けて、研究のいっそうの進展が必要である。

[参考文献]

- [1] 江崎玲於奈, 榊博之 超格子ヘテロ構造デハイス, 工業調査会, 1988年9月
- [2] Choi, H K et al Room-temperature continuous operation of GaAs/AlGaAs lasers grown on Si by organometallic vapor-phase epitaxy, J Appl Phys Vol 68, No 4, pp 1916-1918 (1990)
- [3] 富田康生 Photorefractive効果とその非線形光学への応用, 応用物理, Vol 59, No 9, pp 1154-1174 (1990)

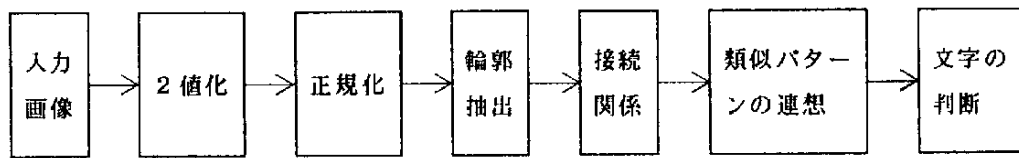


#### 4.3.4 光ニューロシステム技術

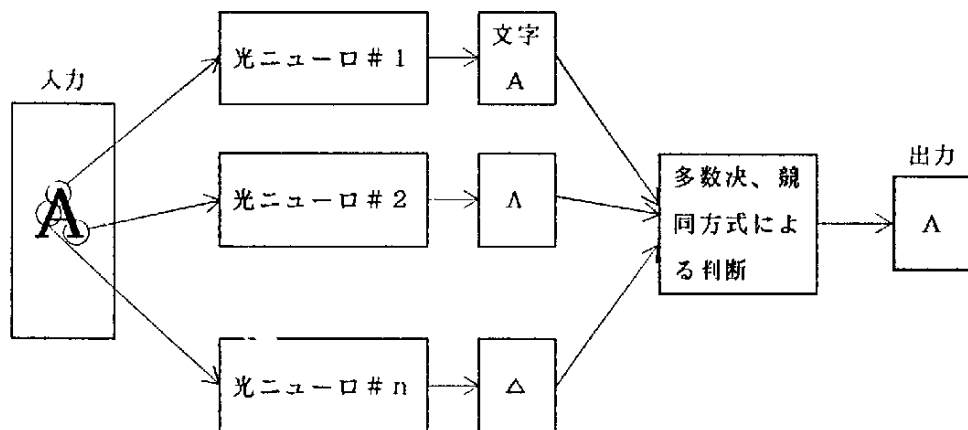
ニューロシステムは、また小規模システムの実験段階であり、光かその特徴を発揮する大規模並列システムの実現はこれからであり、設計手法、学習手法等に多くの課題が残っている。

##### (1) 設計上の方法論の確立

- ①問題に応じた機能分割、階層化、分散化 物理的制約により単位モジュール1つで大規模システムを構築するのは現実的ではない。そのため、機能分割、階層化、分散化等により、多数の小規模単位モジュールを組合せて大規模システムを構築することが必要である。たとえば、文字認識の場合、図4.19に示すような前処理をしたり、いくつかの判断機能をもとに総合的に判断するメカニズムも必要になる。
- ②処理結果に関する信頼性設計 たとえば、認識処理において、認識結果が正確でなければ困るような応用もある。判断の確からしさを出力したり、曖昧な場合には複数の候補を出力するなど、応用に応じた信頼性設計が必要である。



(a) ニューロシステムの階層化



(b) 複数ニューロシステムによる協同判断

図4.19 ニューロシステムの設計・モジュール化

## (2) 学習手法の確立

- ①学習の際のフィードバックの高速化 学習の際に、出力と教師信号との差分からノブス結合の重みを変更するか、ノシステムの大規模化は変更箇所も膨大になり、変更量の計算の高速化が必要である。
- ②学習結果の整理 学習結果を他のノシステムに能率的に活用できるように、学習結果を構造化された知識として整理し、さらに学習とは別のメカニズムでそれを移植する手法の開発が必要である。さらに最終的には、自己組織化できるニューラルネットが望ましい。

## (3) ヒューマン・フレントリィな入出力インタフェースの実現

- ①画像、音声等多様な入力情報への対応 2次元情報や時系列情報の扱いについては、情報を取込んで1次元ベクトルに変換して処理する方法が研究されているか、入力情報を直接処理するのか望ましい。
- ②特徴抽出やカテゴリ化等の結果の画像による出力 文字認識では文字あるいはコードを出力するか、画像の分類等では、漫画の似顔絵のような出力が望まれる。
- ③画像内容での類似像の検索 テータベースの検索はキーワードにより行われるのか一般的であるか、画像データベースでは、キー画像による検索がより使いやすい。画像の特徴の画像化をサポートするシステムの開発が望まれる。

## (4) 光技術に関連する課題

これまで、大規模ニューロシステムの課題を中心に述べたが、光化に際して解決すべき課題も多い。

- ①演算精度の向上 現在の光ニューロ実験システムの多くは、積和演算を光強度によるアナログ演算で行っているか、演算精度が実用上問題にならないか、大規模化時に問題を生じないか等の検討が必要である。同時に、演算精度の向上策の検討もしておく必要がある。また、全光化の場合、減算の実現方法の検討も重要である。
- ②入力の2次元化 光ニューラルネットの場合、入力として画像情報をそのまま使えることか望ましい。画素数 $N^2$ の入力像に対する完全結合のニューラルネットでは、 $N^2 \times N^2 = N^4$ の光結線が必要になる。これを実現するには、レンズアレイ、多段接続網、体積ホログラムによる光結線が必要となろう。一方、レーザアレイ、空間光変調器の高解像度化、高S/N化も必要であろう。
- ③結線の多重化 前述の画素数 $N^2$ の入力に対する $N^4$ 接続を、光結線で実現する場合、 $N^4$ 画素の空間光変調器等を必要とし、実装上も集積度上も課題が多い。しかし、光の高速性、広帯域性を利用した時分割多重、周波数多重等の用いれば、ハードウェアの大きさを変えずに、処理の多重度(並列性)を上げることができる。しかし、現在のところは、コンパクトな波長(周波数)選択・変換フィルタや波長(周波数)対応に感度を持つ空間光変調器が開発されておらず、これらの開発が望まれる。また、高S/N比、低エネルギー光で書込める体積ホログラム素子の開発も望まれる研究が重要である。
- ④シリコン技術との一体化 光ニューロコンピュータを構築する場合、能動的な素子(GaAs

等の半導体素子)との親和性のよいことが望まれる。光学部品(ミラー、レンズ、導波路等)も何らかの形でシリコン技術と一体化、集積化が行えることが望ましい。たとえばプレーナー・オプティクス、液晶によるレンズなどが望まれる。

#### 4.4 実証システムのイメージ

光技術の特長である、①画像情報の直接並列入力・処理が可能なこと、②完全並列処理・超高速演算処理が可能なことの2点を生かして、画像の輪郭抽出や特定方向のエッジの検出など生物の視覚機能を有する光ニューロデバイスおよび学習機能、連想機能など生物の脳の機能を有する光ニューロデバイスを開発する。さらに、それらのデバイスを融合した光情報処理・伝送システムを実証する。図4.20に実証システム開発のフローチャートを示す。

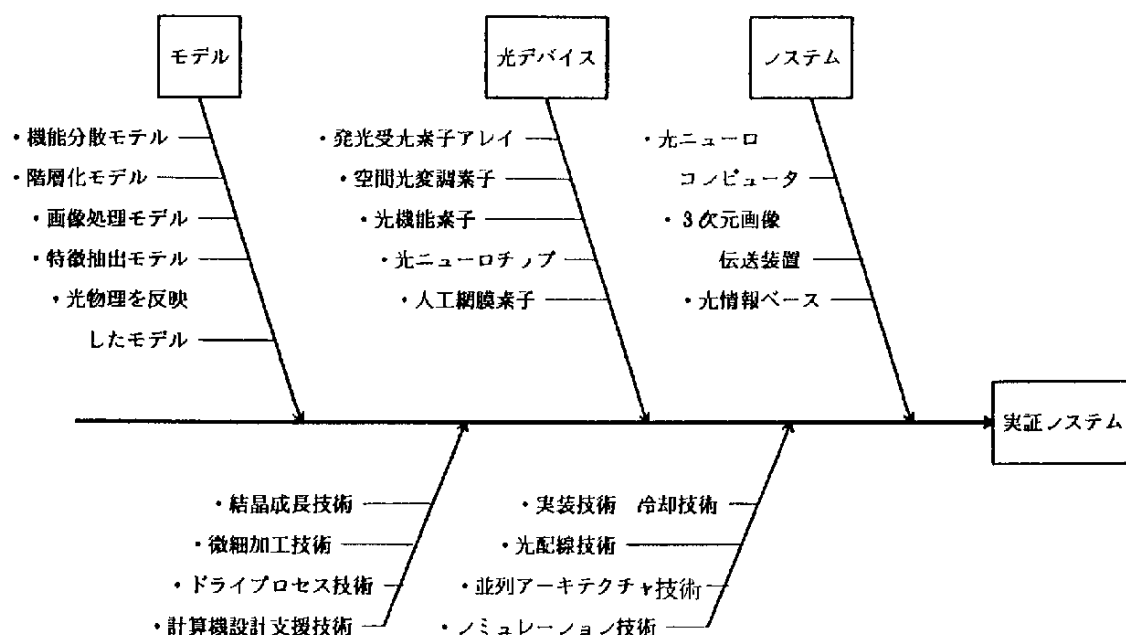


図4.20 実証システム開発のフローチャート

##### 4.4.1 光ニューロデバイス（実証デバイス）

光ニューロシステムを構成する要素となる光ニューロデバイスを開発する。開発する光ニューロデバイスの構造例は4.3.3に示されている。プロジェクトの前期（3年間）では、結晶成長技術、プロセス技術、デバイス設計技術、構成光機能デバイスの実証など、光ニューロデバイスを実現するための要素技術の開発を行う。中期（4年間）では、比較的規模の小さな光ニューロデバイスの動作を実証するとともに、光集積デバイスのアソシエーション技術、パッケージング技術を開発する。後期（3年間）では、光ニューロデバイスの集積度の大規模（ $100 \times 100 \sim 1,000 \times 1,000$ ）化、処理速度の高速化（ $\sim 1$  TCPS）を推進するとともに冷却技術などの周辺技術の開発も行う。

#### 4.4 2 光ニューロシステム（実証システム）

実証システムの例として、生物の柔軟な情報処理機能を模倣した光ニューロコンピュータの開発を提案する。提案する実証システムの構成例を図4 21に示す。プロジェクトの前期では、光技術に適したニューラルネットワークモデル、画像処理に適したニューラルネットワークモデルの基礎理論と、空間／波長並列性を用いた並列光アーキテクチャの開発を行う。中期では、光ニューロデハイスを用いた小規模なシステムの試作とその機能の実証を行う。また、多数の光ニューロモジュールを用いた大規模光ニューロシステムの理論を構築する。後期では、生物の視覚機能を模倣した光ニューロデハイスと生物の脳の機能を模倣した光ニューロデハイスを融合した光ニューロコンピュータを実証する。

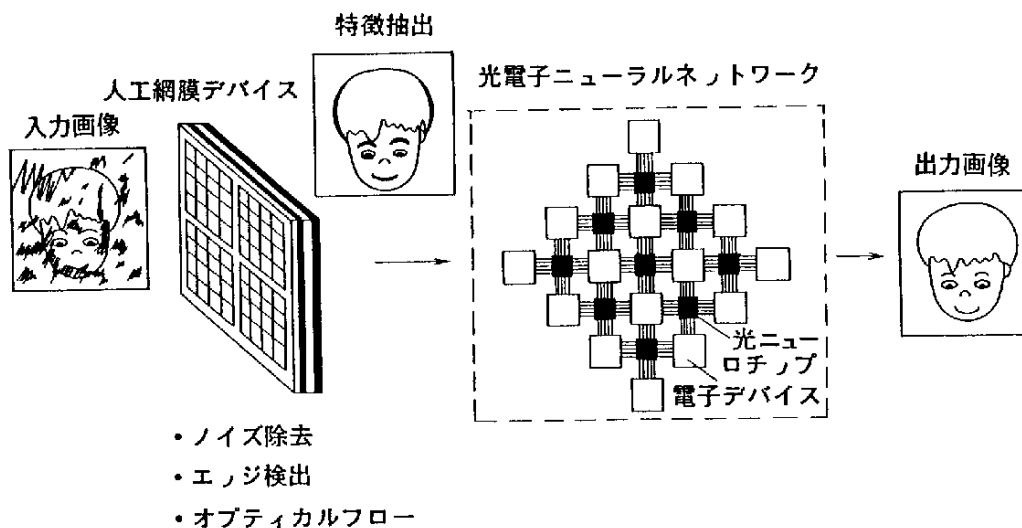


図4 21 実証システムの例 人工網膜素子とニューロチップを融合した光ニューロコンピュータ

他の実証システムの例として、2次元または3次元の画像情報を自ら学習し整理統合する自己組織化情報ヘースと光伝送システムを融合したシステムを提案する。提案する実証システムの構成例を図4 22に示す。プロジェクトの前期では、自己組織化画像情報ヘースを実現するための光アーキテクチャの開発を行う。また自己組織化のための基礎理論を開発する。中期では、小規模な自己組織化画像情報ヘースを試作しその機能を実証するとともにシステムの動作の安定化技術を開発する。後期では、光ファイバ画像伝送システムと大規模自己組織化光情報ヘースを融合した知的な画像伝送システムを実証する。

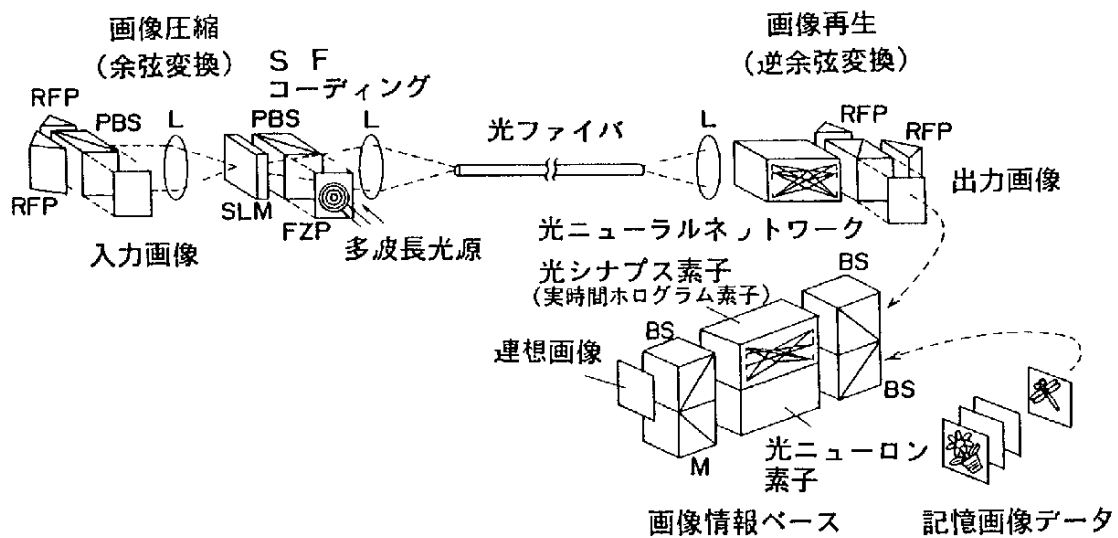


図4 22 実証システムの例 光画像情報ベースと光通信システムを融合した知的画像伝送システム



## 第 5 章

### 光インタコネクション





## 第5章

### 光インタコネクション

#### 5.1 まえがき

##### 5.1.1 光インタコネクションの必要性和特徴

電子システムの中で、いかに素子の集積度が上がっても処理速度は配線遅延によって制限される。今のコンピュータでは、信号処理速度の数分の1もか電気配線の遅延によって生じている。一方、システムの処理速度を確保するには、ケーブルの輻輳に伴う装置の大型化、消費電力の増大、実装の困難などシステム構築上の障害が出てきている。このような「配線ネック」の問題は、21世紀に向けてのコンピュータ高性能化に対して、最大の問題点となっている。この「配線ネック」を回避するために、超電導配線や超高速素子などのデバイス開発と、コネクションマノン等のアーキテクチャ開発が行われているもののいずれにも限界がある。光インタコネクションは、この「配線ネック」を解決する最も有効な手段になり得る[1, 2, 3]。配線に光を導入することによって期待できる優位性は数多い。これを表5.1にまとめた。図5.1は、現状素子を基本とした電気および光インタコネクションの可能性を並列性と高速性とを示す座標上に示したものである[4]。

表5.1 光インタコネクションの優位性

| 光の特 徴             | コンピュータ応用における優位性                      |
|-------------------|--------------------------------------|
| 伝送媒体の広帯域性         | 大容量性                                 |
| 伝送の高速性            | 超高速性                                 |
| 無誘導性・非干渉性         | 空間並列性<br>波長多重性<br>偏光等の利用<br>} 超並列性   |
| 光波特性の利用           |                                      |
| インピータンス整合・アース線の不要 |                                      |
| 自由空間伝播の利用         | 高ファンアウト                              |
|                   | 再構成可能性<br>高接続自由度<br>} 高機能性<br>(柔軟接続) |

単位面積当りの接続数における光の優位性は少なくとも3桁に及ぶか、波長多重性等の活用によりさらに著しい優位性を得ることかてきる。また光の導入によって、データ処理の目的や内容に応じた接続の拡張性・柔軟性が実現てきる。光インタコネクションは外部制御信号で接続を自由に再構成する方法を併用することにより、単なる信号の伝送にととまらず、データ処理の中枢を担うものとして将来における意義は極めて大きい。

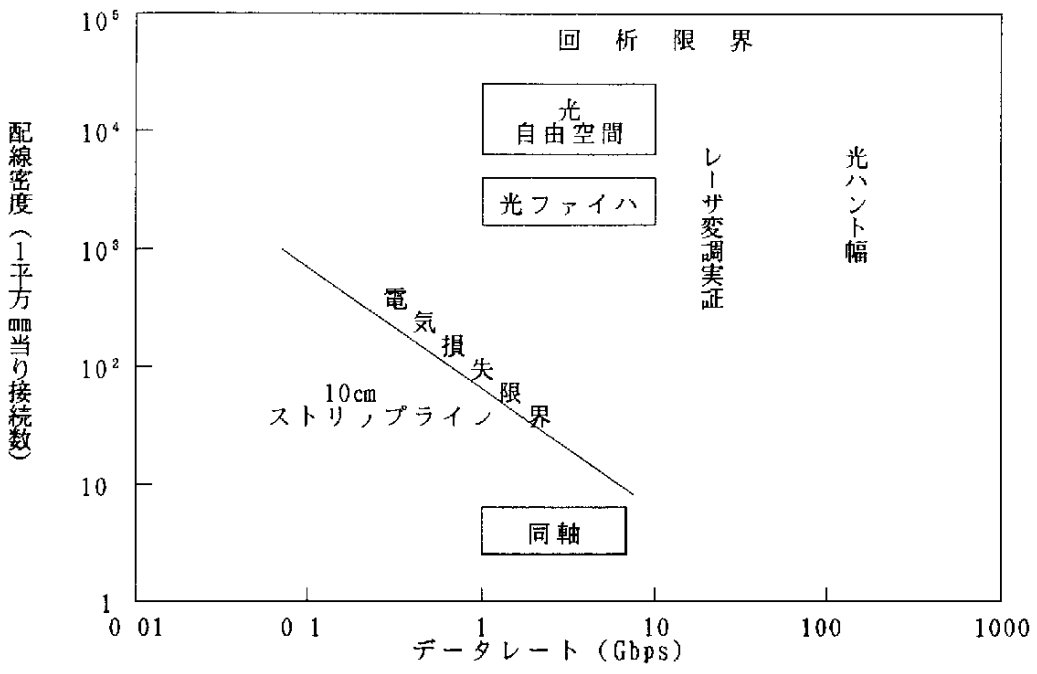


図5 1 電気および光インタコネクションの性能限界の比較

### 5. 1. 2 光インタコネクションの要件と分類

光インタコネクションの技術的内容を検討していくために、包括的にとらえた光インタコネクションの構成を図5 2に示す。特徴を押さえるための要件としては、伝送距離、データ量、接続の機能を考えることかてきる。伝送距離によって、光ファイバ、導波路、自由空間のいずれかの伝送媒体を効率的に使う。データ容量によってはデータの多重方式を選択する必要かある。従来の時間多重に加え、光の特徴である空間並列性や波長多重性が有効に使える。

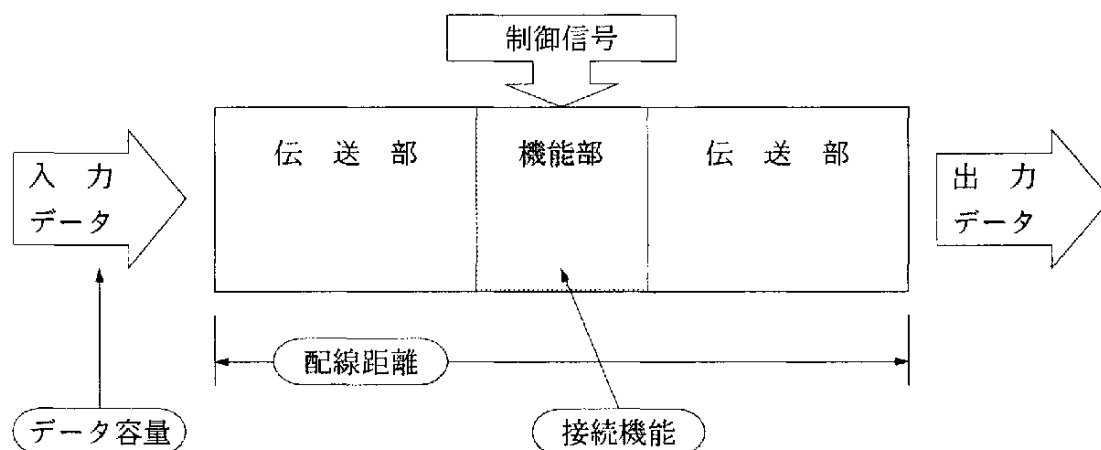


図5 2 光インタコネクションの構成

前項の要件を座標軸に用いて光インタコネクションの分類を試みたものを図5.3 に示す。

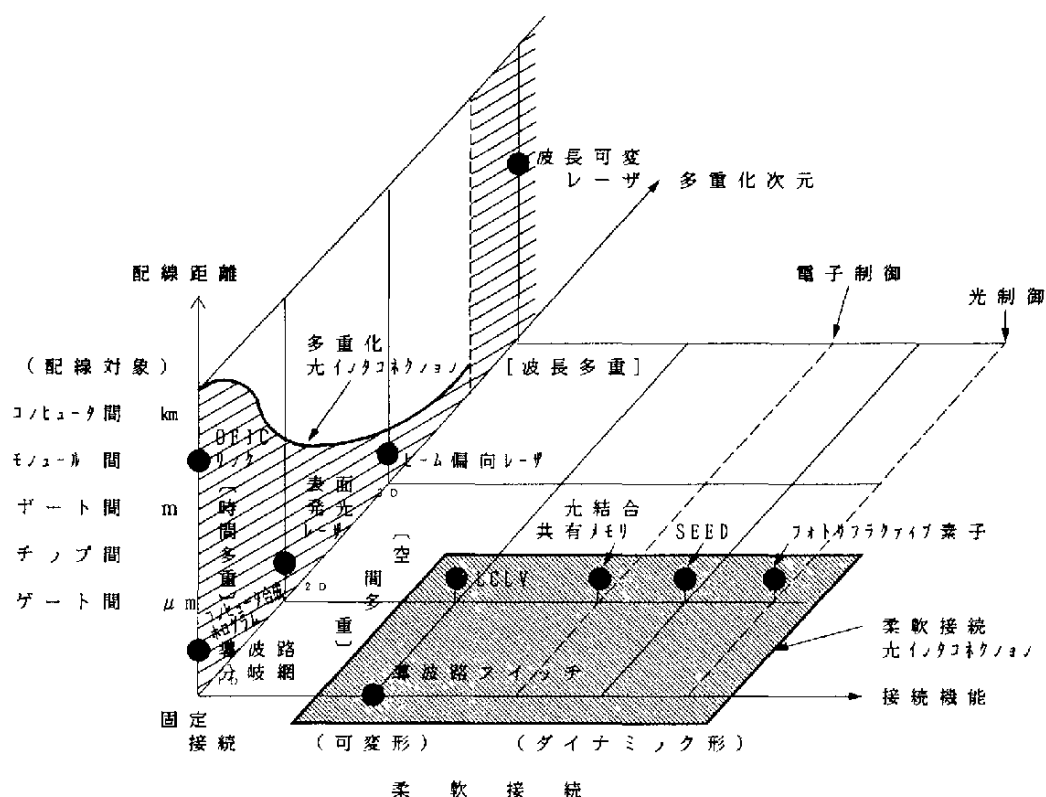


図5 3 光インタコネクションの分類図

伝送距離としては、コンピュータ間からゲート間に至る広い範囲が含まれる。データ多重化の次元としては、現在の光通信システムに利用されている1次元空間における時間多重を行うものから、2次元空間および光ヒーム偏向を利用して3次元空間を用いるもの、さらには波長等光波独特の多重性を用いるものまでを含む。接続機能としては固定接続と柔軟接続に大別される。前者は1対1接続とそのアレイ化を基本とし、結線が固定的なもの、後者は外部制御信号によって結線が可変できるものおよび高速信号によって動的制御が可

能なものを示す。さらに、柔軟接続では制御の方法として電子的なものと光を用いるものを含む。図中に現在提案されている光インタコネクションの例を示した。開発を目指す領域としては、固定接続で各種方式によってデータ多重化を指向する領域と、並列性を確保しなから接続を制御して柔軟な接続を指向する領域との2つを考えることかできる。光インタコネクションの開発に必要な技術も領域によって異なる。以下では各領域における、光インタコネクションの特徴と開発技術の内容について述べる。

#### [参考文献]

- [1] 一岡芳樹 デジタル光情報処理, 「光情報処理」(辻内, 一岡, 峰本著), 第3章, オーム社(1989)
- [2] Goodman, J W, Leonberger, F J, Kung, S and Athale, R A Optical Interconnections for VLSI systems, Proc, IEEE, 72, p 850-866 (1984)
- [3] Appl Optics, 光インターコネクション特集号, 29, No 8, (1990)
- [4] Haugen, P R S, Rychnovsky, A, Husain, A and Hutcheson, L D Optical Interconnections for High Speed Computing, Opt Eng 25, p 1076-1085 (1986)

## 5.2 多重化光インタコネクション

### 5.2.1 多重化方式

前節で述べたように光インタコネクションは超高速性や高並列性に加え、多重化することによって接続の多様性を増大させ得る。光通信とは異なり光コンピュータではその接続は多重性、並列性をもつことが普通である。すなわち、コンピュータ内部の処理はビットパラレル的な動作が行われている。今後の方式としては入出力から処理、メモリへの出し入れなど全てのステップを並列的に行うことが鍵となる。光の多重性を考慮して、表5.2に空間、時間、波長による多重化の特徴と限界についてまとめた。いずれの多重化技術についても既に光通信技術の中で一応は試みられているか、扱う多重度の規模や用途が大きく異なるため再考を要する。

表5 2 空間、時間、波長による多重化の特徴と限界

| 多重化           | 光ファイバ（光導波路）結合 |                                                                                                           | 空間結合（対光ファイバ比較）                                                                                                                                                                         |
|---------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 空間多重<br>（アレイ） | 特徴            | ・ 構成はノノブル<br>素子数を増やすだけで多重度が増大<br>（1次元から2次元への拡張）                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 非接触で光導波路が不要</li> <li>・ 3次元接続が可</li> <li>・ 多分岐接続が容易</li> <li>・ 柔軟接続への拡張性大</li> </ul> <p>高精度の位置合わせ技術要<br/>（高精度光学技術）<br/>回折、反射などによるクロストーク対処要</p> |
|               | 限界            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 光電変換の消費電力</li> <li>・ 光素子の信頼性</li> </ul>                          |                                                                                                                                                                                        |
| 時間多重<br>（TDM） | 特徴            | 光通信技術の延長線上にあり技術が安定<br>光接続としては処理オーバーヘッドが重い                                                                 |                                                                                                                                                                                        |
|               | 限界            | ・ LDの動作限界から～10Gbps程度                                                                                      |                                                                                                                                                                                        |
| 波長多重<br>（WDM） | 特徴            | 波長多重からコヒーレント周波数多重への拡張性<br>固定接続から自由接続への拡張性                                                                 |                                                                                                                                                                                        |
|               | 限界            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 波長多重では光フィルタの帯域幅（～数nm）</li> <li>・ 周波数多重では波長掃引量（～数10nm）</li> </ul> |                                                                                                                                                                                        |

空間多重は構成がノノブルで素子数を単純に増やせば多重度が増大するという利点を持ち、1次元アレイから2次元アレイへと拡張性が容易である。しかしながら多重数分だけ光素子を必要とすることから、個々の光素子の消費電力の低減と信頼性の向上が重要となり、それらがシステム構成上の限界を与えることにもなり得る。

時間多重は光通信技術の延長と考えられ技術が最も安定しているが、LDの直接変調の場合せいぜい10Gb/sの容量に留まるため他の多重化技術と併用せざるを得ない。また処理のオーバーヘッドも重く、計算機として汎用的に使用するには難もある。

波長多重はコヒーレント周波数多重へと拡張性があり、いま光通信で最も研究が盛んな技術である。光インタコネクションでは固定技術からより柔軟な接続への発展が可能という点で利点があり、魅力のある技術といえるが波長掃引素子などの波長制御技術が開発課題である。

多重化した信号を結合する手段としては光ファイバ結合（作り付け光導波路を含む）と空間結合とが考えられる。空間結合を対光ファイバ結合との比較で論するならば非接触で3次元接続への拡張性を持ち、さらに自由接続が可能となる大きな利点を持つ反面、高精度にアラインメントする光学技術の必要性や、回折、反射などによるクロストークへの対処等をも考慮しなければならない。しかしながら、光コンピュータの発展には欠くことのきぬ技術と位置付けられる。以下の節では具体例を参照してもう少し詳しく述べる。

## 5 2 2 光ファイバ結合を用いた多重化光インタコネクション

光ファイバ結合を用いた空間多重の代表例としてIBMのCrow等が発表したOEIC技術を用いた多チャンネルの光インタコネクションがあげられる[1]。図5 4に示すブロック構成のとおり、コンピュータ間をファイバネットワークで接続し、メモリの共有やCPUを並列動作させてコンピュータの性能向上を計るものである。100GByte/sのメモリを共有し、10から100MIPSのスーパーコンピュータ間を接続して同期運転をさせる場合には、転送容量としてGByte/s級のネットワークが必要とされている。既に4チャンネルの伝送でそれぞれ1Gb/sの転送速度を持つ光インタコネクションが報告されている。レーザは1個のOEICチップとなっており、4個のMSM(Metal Semiconductor Metal) - PDアレイか8,000個のMESFETからなる増幅器やデタル処理機能らとモノリシックに集積されている。送信側にはLDアレイを使用している。この例では材料として現在の光技術とIC技術との安定性を考慮してGaAsを用いている。LDの性能としては現在InGaAsP系の研究が盛んであり、温度特性が悪いことやしきい値が高い問題も解決される余地がある。

時間多重は現在のデタル光通信技術がこの時間多重を基本としているため最も従来技術との整合性が高い。光通信や光交換に向けていかに変調速度を向上させるか、またいかに高速信号を多重させるかについての導波路変調器(光スイッチ)の研究が盛んである。現在検討されている変調器はLiNbO<sub>3</sub>と半導体導波路型とがある。前者は高速動作の点で優れ、駆動マイクロ波との位相整合をとる進行波型スイッチで20GHz程度のものが作られている[2]。後者はLDやLD増幅器等との集積化できることか利点と考えられ、種々検討が進められている。欠点とされている小さな電気光学効果は量子閉し込めニュタルク効果の利用で解決するべく努力が払われている[3]。

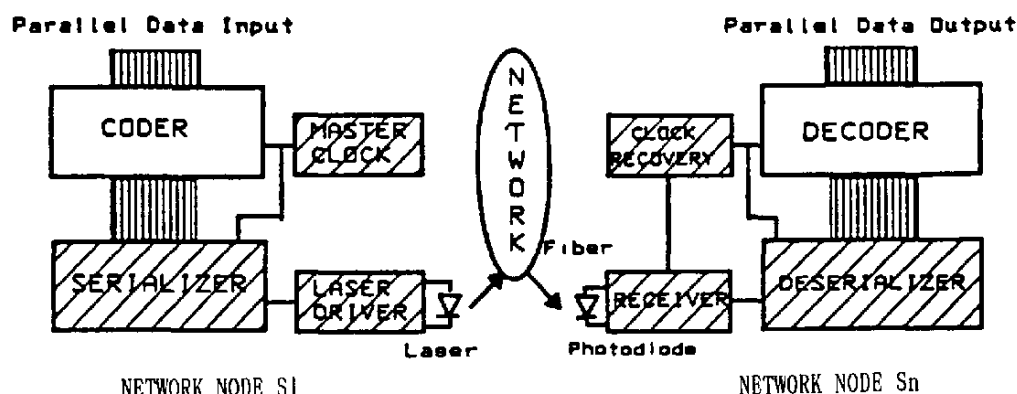


図5 4 OEICチップを用いたコンピュータ間

光ネットワークのブロック構成[1]

波長を有効に利用しようとする努力は、光交換技術の分野でも盛んである。たとえばATM交換機など必要な155あるいは620Mb/sの高速信号の交換には、配線リミットを含めたIC化技術の限界がある。図5 5は日本電気の西尾等により発表された波長・時分割複合光交換方式の構成例である[4]。光信号の波長とタイムスロットを任意に入れ換えることかできる。1チャンネル100Mb/sの信号4チャンネルにカート時間を付加して時間多重し、さらに波長間隔0.8Åで8波多重することかできる。波長可変光源の性能によって

高速性、多重性に限界が現れるから、適用分野を選択することが必要である。その他波長・空間分割型光方式も考案されている。

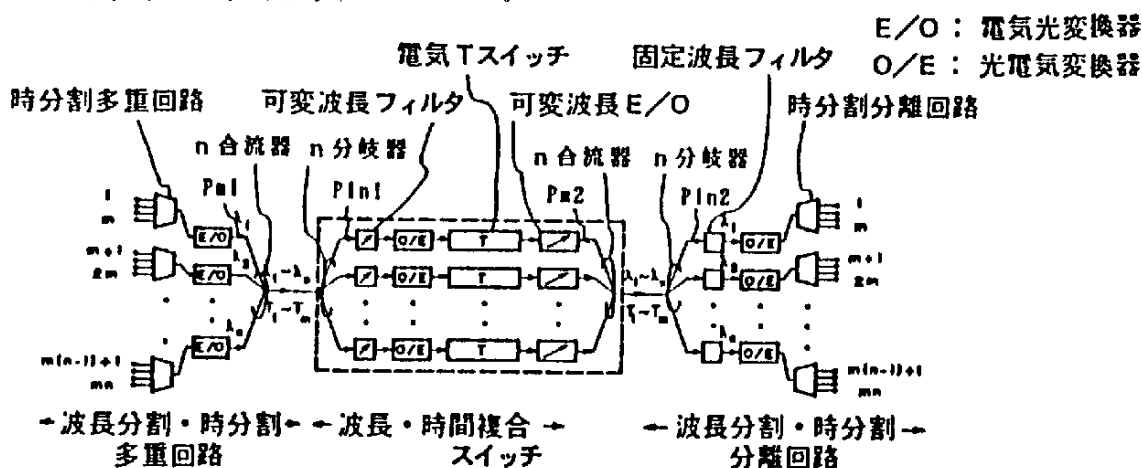


図5.5 波長分割・時分割複合光通話路[4]

表5.3には上記した光ファイバ結合を用いた多重化光インタコネクションの現状と今後の主要開発技術課題をまとめた。主要開発課題については、光インタコネクションとして現在の電子コンピュータで実現困難なテラビット以上の転送速度を達成するために重要なものをあけた。

表5.3 光ファイバ結合を用いた多重化光インタコネクションの現状と今後の主要開発技術課題

| 多重化             | 現状                                                                                                                    | 主要開発技術課題                                                                                                       |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 空間多重<br>(1次元7V) | 4CHアレイ化OEIC<br>信号速度 1 Gbps/CH<br>送信側 GaAs 4QW-LD 7V<br>受信側 GaAs 4MSM-PD 8000MESFET<br>4CH OEICチップ<br>信号速度 0.6 Gbps/CH | 低しきい値化<br>( $\lambda$ LDの開発、1 $\mu$ A ~ 100 $\mu$ A)<br>高密度OEIC技術<br>( $\lambda$ LD、フレット化、大面積均一化)<br>アレイ化光実装技術 |
| (光導波路)          | 8x8 L NiO-スイッチ                                                                                                        | フレーナネットワーク形成技術<br>(分岐、交差、折り曲げ)                                                                                 |
| 時間多重<br>(TDM)   | 外部変調器、光スイッチとして開発<br>1 NiO<br>進行波増幅型 (~20GHz)<br>半導体導波路スイッチ<br>量子井戸型方向性結合器                                             | スイッチの低消費電力化<br>高密度OEIC技術<br>超高速ロジック開発                                                                          |
| 波長多重<br>(WDM)   | 光交換技術として開発<br>波長時分割多重方式<br>波長多重度8 時多重度4 (100Mbps/CH)<br>波長空間分割多重方式                                                    | 波長制御関連デバイス開発<br>(波長変換 可変波長フィルタ 波長変換LD等)<br>光実装技術                                                               |

空間多重ではそれぞれがGb/sの容量を持つLDが1,000個程度アレイ化されることを考慮すると、チップの放熱限界から1個あたりのLDが消費する電力はmW程度となり、必然的にLDのしきい値はサブmAが要請され、共振器の長さを通常のLDよりも短くしたマイクロLDが極めて重要となる。

時間多重ではLDの動作速度限界からそれ単独ではテラビット動作はなし得ない。空間、波長多重との複合が必然であり、Gb/sで動作、処理できる超高速ロジックの開発との相補性が必要となる。波長多重では高精度波長制御関連デバイスと光実装技術の開発がポイントである。

全体的にみて光インタコネクションを実現させるには、これらの技術が低コストでしかも高い信頼性を持って構築される必要があり、光・電子の相補性を確保できる高密度OEICの開発、新しい多重化光デバイスに対応できる光実装技術の高度化が重要である。特にOEICについてはSI技術とのOEICとしてのヘテロエピタキシャル技術や光素子のプレーナ化、また異種デバイス間での作製プロセスの整合なども必須と思われる。

光導波路を自由自在に使う光インタコネクションには分岐、交差、曲げが自由にできることや、僅かな段差上でも同等な機能が発揮されることが必要であり、モード変換や反射、そして漏れが生ずる現在の光導波路技術にはまた開発課題が多い。しかしスタンフォード大のGoodman等が発表した、図5-6に示すようなICでのクロック分配[5]では、光・電子コンピュータに向けて導波路を駆使した光インタコネクションは必須技術であると考えられる。また表面音響波による偏向を利用してファンフル配線を行うなど、柔軟接続光インタコネクションへの展開可能性を有しており、今後の開発が期待される。

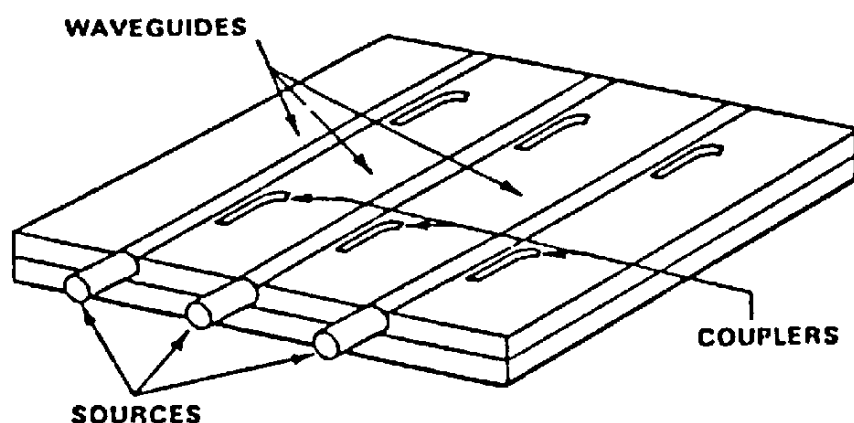


図5-6 集積化光導波路を用いたクロック分配の概念図[5]

### 5.2.3 自由空間結合を用いた多重化光インタコネクション

2次元アレイによる光インタコネクションは光コンピュータで最も期待される技術とされている。これは2次元アレイの大容量、並列性に加え光インタコネクション内部に空間変調器を入れアタプティブな光接続がてきるからである。これらの詳細については後節で再度触れることとし、ここでは固定接続応用の基礎となるデバイスについて述べる。

2次元アレイ化に必須と考えられる面発光レーザと2次元マイクロレンズの開発が既に



行われている。面発光レーサを2次元に配列するだけで容易にテラビットの伝送容量を確保できるか、集積数の増大に応じてLDの消費電力の低減を計る必要がある。

現在、単素子でしきい値電流が1mAを切るものも出ている[6]。1.3  $\mu\text{m}$  径のLDを160個集積した2次元面発光レーサアレイの例では、160個のLDが位相同期して動作し、しきい値が45mAであったことが報告されている[7]。集束イオンビームによるタメーンの低下等、微細加工技術の開発によって、超低しきい値レーサが実現できる。

面発光レーサを含む2次元アレイ化光部品とマイクロレンズ板および光ファイバを用いた光インタコネクションの構成が東工大の伊賀等により提案されている(図5.7)[8]。2次元アレイ化は画像情報等に対する光インタコネクションとして威力がある。さらに光ニューロコンピュータや超並列コンピュータに向けての光インタコネクションの基本技術である。

自由空間結合を用いる光インタコネクションは構成が簡素であることから速度の向上が計られ、1GHzのクロックレートを実現した例がある[9]。また、光ビームの偏向機能を持つ素子により等価的に3次元空間結合を実現することや、偏光の利用によってさらなる多重度の増大を計ることが可能となる。このような展開に向けては、集積エレクトロニクスを中心とした新しい光機能素子の技術開発が鍵を握っている。

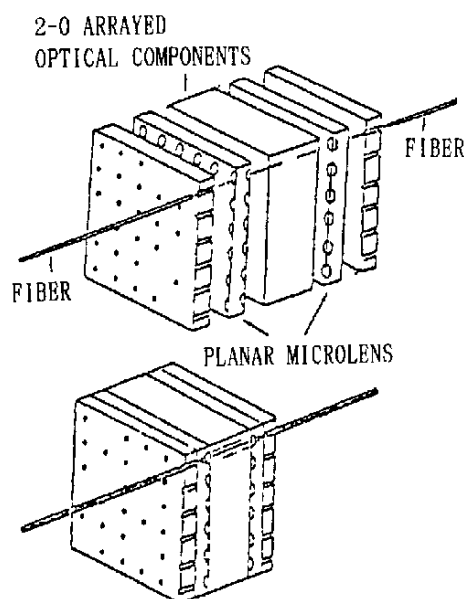


図5.7 面発光レーサによる2次元アレイ化光部品とマイクロレンズ板などを用いた光インタコネクションの構成[8]

自由空間結合を用いた多重化光インタコネクションでの必要技術課題は先の光ファイバを用いた光インタコネクションでのそれと大差ない。しかし、たとえば光実装技術において、2次元素子に対する新しい技術の立ち上げが必須である。2次元素子の並列性をコンパクトな光実装で確保しつつ、外部電子システムと整合する電気実装を行う必要がある。またデバイスに関しては多重数が増加するほど、低消費電力化の要求が強くなる。LDに関してはマイクロLDの構想によってしきい値や動作電流をmA程度にすることは可能とされるか、レシーバ側にも注意を払う必要がある。すなわち、受光素子はmA程度で十分動作

するとしても、ロノクに信号を渡す場合には V 程度の電圧信号に変換しなければならない。したがって、 $k\Omega$  程度の電流・電圧変換増幅器が付加されることになる。現状技術ではこの増幅器を広帯域で構成することにむしろ大きな電力を必要とする。ここでも電子ノシステムとの相補性を考慮した集積エレクトロニクスの技術開発に待つところか大きい。

#### [参考文献]

- [1] Crow, J D , et al A GaAs MESFET IC for Optical Multiprocessor Network, IEEE Trans Electron Devices, ED-36, pp 263-268 (1989)
- [2] Erasme, D et al Design and Performance of Phase Reversal Traveling Wave Modulators, J Lightwave Technol , 6, pp 933-936 (1988)
- [3] Zucker, J E et al Compact Directional Coupler Switches Using Quantum Well Electro Refraction, Appl Phys Lett , 55, pp 2280-2282 (1989)
- [4] 西尾 他 波長分割・時分割複合光交換の実験, 信学技報, SSE88-189, pp 1-6 (1989)
- [5] Goodman, J W et al Optical Interconnections for VLSI Systems, Proc IEEE, 72, pp 850-866 (1984)
- [6] Jewell, J L et al Surface Emitting Quantum Well Lasers, CLEO' 90, paper CFF1
- [7] Yoo, H et al Fabrication of a Two-dimensional Phased Array of Vertical-cavity Surface-emitting Lasers, Appl Phys Lett., 56, pp 1198-1200 (1990)
- [8] Iga, K Surface Operating Electrooptic Devices and Their Application to Array Parallel Signal Processing, ECOC' 90, pp 895-931
- [9] Tsang, D Z One-gigabit per Second Free-space Optical Interconnection, Appl Opt , 29, pp 2034-2037 (1990)

## 5 3 柔軟接続光インタコネクション

### 5 3 1 光インタコネクションにおける柔軟性

光技術の利点のひとつである空間並列性を積極的に光配線に取り入れて、配線の高度化を図ることか将来の「配線ネットワーク」の解決法として期待されている。それは、「自由空間光配線」とよばれるこの配線方法か図5-1に示されるように高速かつ高密度な配線の領域をカバーし、電気配線はもとよりファイバ・導波路光学系を用いた配線の限界を越えるからである。自由空間光配線は、光ファイバ、光導波路素子を用いた光配線に比較して、1) 交差配線が容易である。2) 2、3次元空間並列性を期待できる。3) 配線の接続に要する実装が単純で配線密度が高い、などの幾何学的配置の利点に加えて、外部信号により空間変調などダイナミックな制御によりprogrammableあるいはreconfigurationableと表現される柔軟な配線が実現できるからである。本節は、このような空間的な配置構成と変調

を積極的に展開した配線方法について述べる。

VLSIへの3次元配線方法としての研究が最近はしめられるようになった。そのひとつは「3次元光結合共有メモリ」である。この配線では、積層したLSIウェハの面間を光接続しようとするものである。ここでは、配線は隣接するセルに固定した接続をされているか3次元空間に配置された構成とVLSIによる配線信号制御ゆえに魅力ある並列プロセッサとして機能できる。さらに、3次元空間並列性を活かした配線アーキテクチャとデハイスの研究がある。それは、ウェハ集積 (Wafer Scale Integration WSI) のように将来想定される大規模なLSIにおいて、配線遅延なくクロック信号を分割したり、データを転送することへの対処ととらえることかできる。そのために、チップ間を空間的にかつ柔軟に配線することか提案されている。また、このような配線方法は、並列処理のハートウェアを単純な構成で実現できる可能性からも注目される。いずれにしても、将来のコンピュータの配線技術は、電気配線の限界を光配線かカハするものである。この観点から、光・電子融合型の配線か将来像として重要となる。VLSI配線を3次元空間の光接続で達成しようとする試みの進化の過程は、空間的に固定であるものの電氣的なアクセスで機能性をもつ配線方式、次に電氣的に空間変調を機能する方式、そしてこれらに光学的に活性な空間光配線という道程か考えられる。

外部信号により空間変調可能な3次元自由空間光配線は、将来のコンピュータ内の配線方式として必要不可欠と考えられるか、アーキテクチャ、デハイスとも研究の第一歩を歩み始めたばかりであり、このような技術か将来とどのような配線に活用されるへきかの見通しと要素技術の開発課題を明らかにして、総合的な開発体制か形成されるへきと思われる。以下に、この領域の配線方式と開発課題について述べる。

### 5 3 2 層間光結合を用いた柔軟接続光インタコネクション

#### 5 3 2 1 光・電子共存システム

コンピュータの信号処理能力は、シリコンULSI技術の進歩とともに急速に向上している。これは、主としてULSI論理ゲート及びメモリの超高速化によるものである。しかしながら、ULSIチップサイズの増大とデハイスの超微細化による配線抵抗の増大のために、チップ内配線遅延は増加傾向にあり、ゲート遅延に対して次第に無視できなくなってきている。チップ間、ボード間の通信についても同様の問題がある。これに対処するために、ULSI上の2点間を光カイトで結合し、レーサダイオードとフォトディテクタで結ぶと、オーバーオール遅延は100ps程に収まる[1]。これは、現在の高速ハイポラ回路の長距離配線遅延か1nsec程度であることを考えると十分に魅力的である。

このような面内光配線に対して、ULSI上に発光・受光素子を集積化し、化合物半導体光集積回路チップを集層することにより上下方向の光通信を可能にすれば、光信号伝達の3次元化か計られる。さらに、ULSIメモリをウェハはり合わせ実装技術により3次元的に積層し、層間の光通信を可能にするよう各層のULSIに光素子を集積化すると、各層の同じ位置 (アドレス) にあるメモリのデータを同一に保つことか可能になる (図5 8) [2]。このような3次元光結合共有メモリは、並列プロセッサを構築する上で強力なハートウェアを提供できる。以下では、固定結合なからも光と電子の共存によって

柔軟な接続を実現するものとして、光結合共有メモリ(Optically-Coupled Common Memory OCCM)を採り上げる。

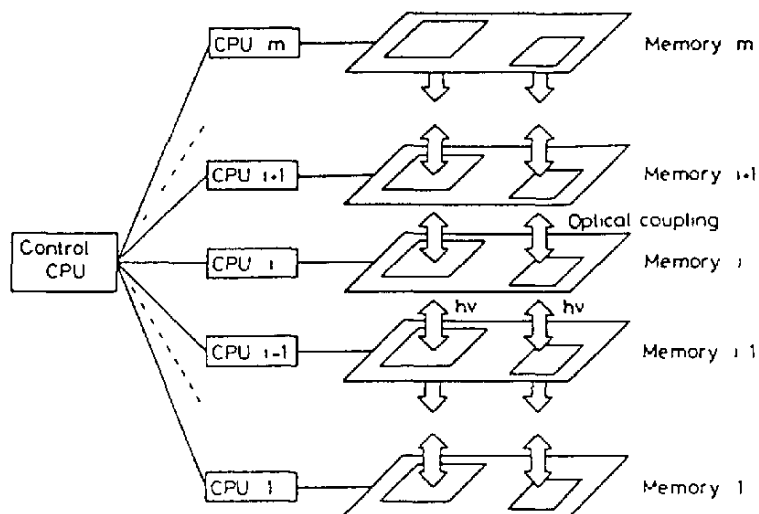


図5 8 3次元光結合共有メモリをもつ並列プロセッサシステム

### 5 3 2 2 3次元光結合共有メモリ(3D-OCCM)

3次元光結合共有メモリの層数  $m$  ( $m$ ホート共有メモリと考えてよい) は、現実的に可能な値として、当面  $m = 3 \sim 8$  くらいを考えることかてきる。この場合、図5 9に示すようなハイパーキューブ結合の頂点に共有メモリを配置し、各辺にプロセッサを配置する方式が有効である。並列プロセッサ数は  $n = m2^{m-1}$  で与えられ、 $m = 3, 4, 5, 6, 7, 8$ , てそれぞれ  $n = 12, 32, 80, 192, 448, 1024$  となり  $10^3$ プロセッサをもつ共有メモリ結合のハイパーキューブ並列プロセッサが可能となる[3]。

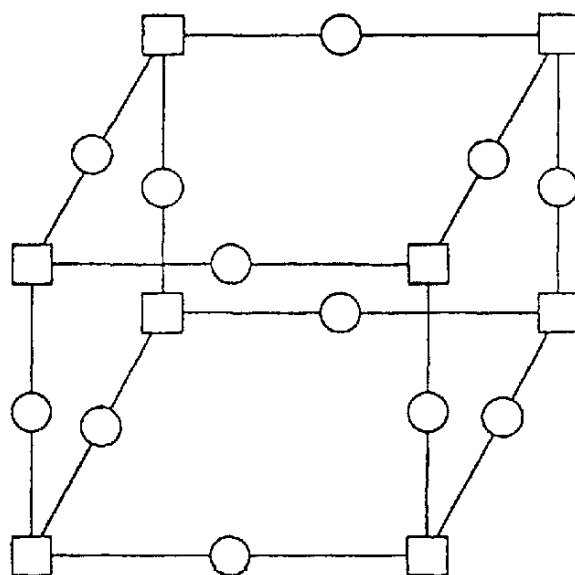


図5 9 頂点に共有メモリを置くハイパーキューブ並列プロセッサの例  
(四角が共有メモリ、丸がプロセッサを表す)  
(After T Ae)

3次元光結合共有メモリ(3D-OCCM)のSRAMセル回路と積層構造の一例がそれぞれ図5 10(a), (b) に示されている。受光素子は SRAMの負荷抵抗となっており、光伝導性をもつため、図5 10(a) におけるPC1 へ下(又は上)の層から光信号が入射すると、ノードN<sub>1</sub>がハイレベルとなり、Tr5がオンとなって、LED1が発光する。この光信号は、上(又は下)の層へ転送される。こうして、次々と、光信号が隣接するSRAMセルへ送られるので、各アドレスのデータは全ての層で共通となる。図5 11のように、データの光信号転送のためには、各層のSRAM制御用回路も光結合されている必要がある[4]。このようなシステムで4 Kbit×4 層の場合のデータ転送速度をSPICEを用いたdynamic simulationにより評価すると512 ヒットの並列転送を行ったときデータ転送速度 128Gbit/sec/layerが得られる。ただし、シミュレーションでは、発光素子は高速LED(応答速度3 nsec)を想定した。面発光型マイクロレーサを使うことかてきれば更に高速化できる[1]。

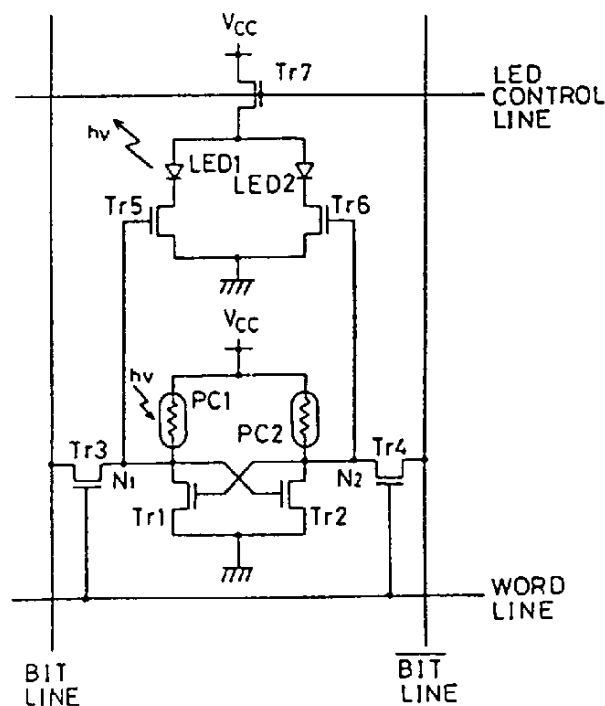


図5 10 (a) メモリセル回路

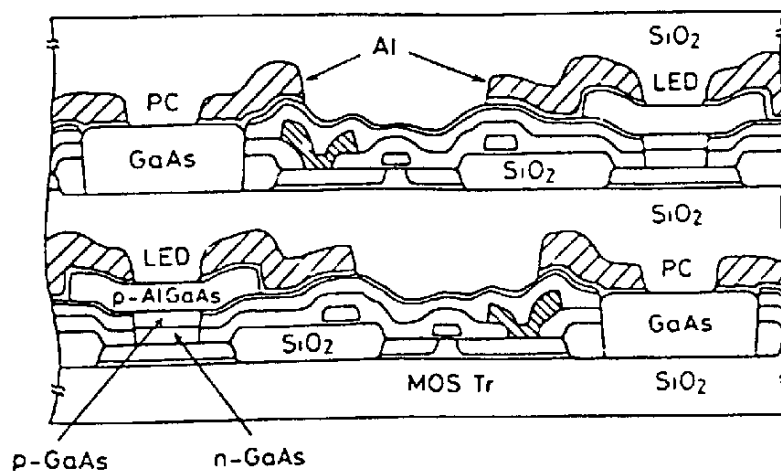


図5 10 (b) メモリセルの断面図

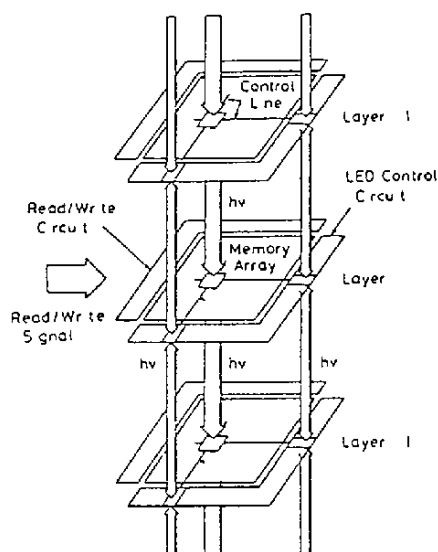


図5 11 3次元光結合共有メモリの構造

### 5 3 2 3 材料・デバイス技術

3D-OCCMの実現には2つの壁がある。第1は、400℃以下で高品質のGaAs系結晶をSi上に選択成長する技術。第2は、寸法 $1\mu\text{m}^2$ 駆動電流0.1mA以下の面発光マイクロレーザの実現である。最近の半導体ヘテロエピ成長や面発光レーザの進展は著しく、今後の開発によってこれらの壁は取り除かれるものと考えられる。これらの基本技術の上に立って、多層構造を構成していく段階では別の課題がある。ULSI表面の凸凹はなるべく抑えたいから、多層レーサミラーの厚さをなるべく薄くする必要があり、材料の選択について検討が必要である。LEDを使う場合は、上下の層の受光素子への入力光強度を確保すると共に、光信号のクロストークを抑えるため層間絶縁膜に光カイト特性を持たせるかマイクロフレネルレンズを埋め込むことか必要となる。すなわち、適切な材料と集積光エレクトロニクス技術の開発にならなくて、光と電子の相補的効果を発揮させられる、新しい光電子実装技術の領域の開拓が極めて重要となる。

### 5 3 3 自由空間結合を用いた柔軟接続光インタコネクション

#### 5 3 3 1 自由空間結合光インタコネクションの方式

3次元自由空間光配線を用いてVLSI-chipを集積化したウェハあるいはホートを接続する考え方として、ホログラムを配線素子として用いた方式が提案されてきた。最近この方式を実現するためのアーキテクチャが提案され、そこに用いられるデバイスなどの開発課題が明らかになってきた。WSIウェハ間を配線した3次元のマルチプロセッサシステムを構築するためのアーキテクチャが提案されている[5]。Programmable Opto-Electronic Multiprocessor(POEM)(図5 12)と名づけられたこのシステムでは、光電子集積素子のアレイである2枚のWSIウェハは互いに計算機ホログラム(CGH)を介して自由空間光配線でプロセッサ間を配線されており、外部のメモリと接続されている。プロセッサをSi-CMOS論理回路、MQW光変調器、Si-p-i-n光検出器などを仮定して、クロック信号速度に対して電気配線と比較した結果が図5 13である。計算に用いたデハイ

スの性能条件を表5 4に示した。光配線は光源の変調周波数のみで信号スピードが決定されるため、一定の信号スピードが維持されるか、プロセッサが256以上の電気配線では急激に遅延が生ずることか示されている。この結果は、光配線が用いられる領域が仮定されたハードウェアの条件で決定されることを示しており、ここではプロセッサ数256以上でこのような配線システムが活用できることになる。そして、デバイス技術を中心とするハードウェアの発展と3次元自由空間配線の配線規模、応用分野との整合性を図っていくことが光配線の活用にとって重要であるといえる。図5 12中に必要となるデバイスを記した。また、実装技術はコストを決定する重要な要因であるとともにI/Oを実用的なものとするために重要な技術である。現在、POEMを実現するための技術として図5 14示すような微小光学技術が提案されている。

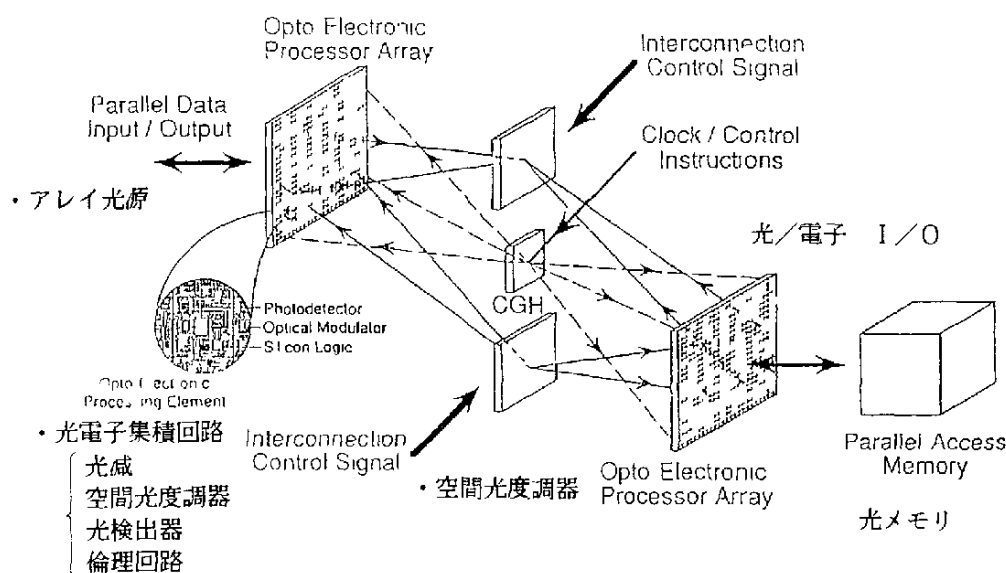


図5 12 POEMと要請されるデバイス [5]

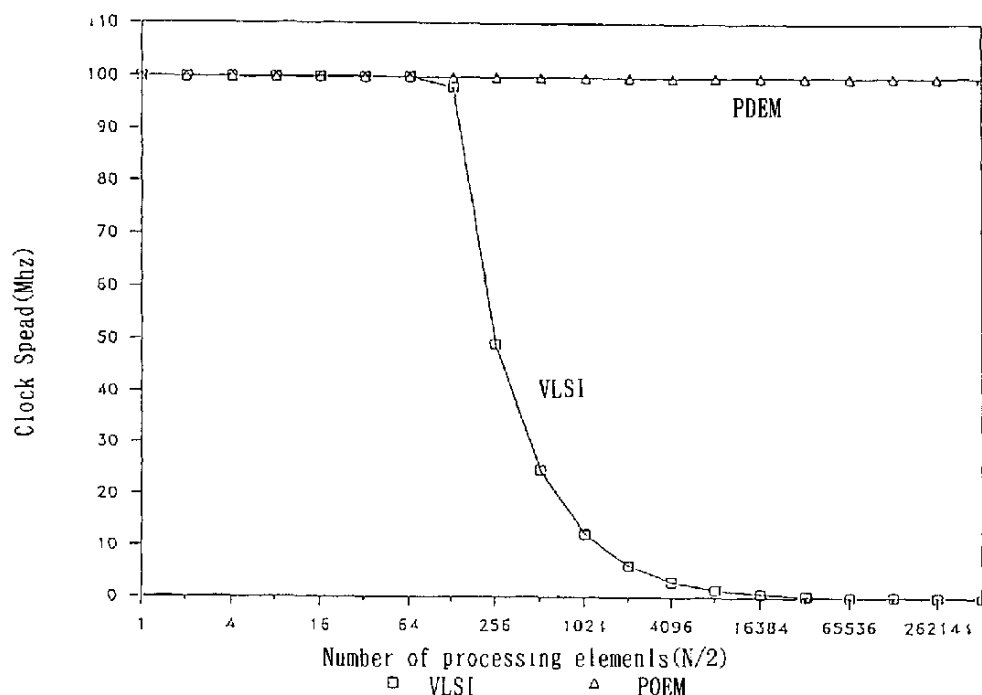


図5 13 クロックスピードの比較

表 5. 4 : システム性能比較に用いたデバイス・システム性能

| VLSI Technology      |                                              |
|----------------------|----------------------------------------------|
| Process Technology   | 1.2 $\mu\text{m}$ Double metal               |
| Supply Voltage       | 5 Volt                                       |
| PE Size              | 200 $\mu\text{m}$ $\times$ 100 $\mu\text{m}$ |
| PE Power Dissipation | 1 mW @ 100 MHz                               |
| Transistors per PE   | 100                                          |
| Wire Pitch           | 4 $\mu\text{m}$                              |
| Wire Capacitance     | 2 pF/cm                                      |
| Wire Resistance      | 300 $\Omega/\text{cm}$                       |
| Gate Capacitance     | 8 fF                                         |
| Gate Resistance      | 8000 $\Omega$                                |
| Max. PL Speed        | 100 MHz                                      |

| SLM Technology      |                                                                                |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Process Technology  | Transmission Mode MQW Integrated with 1.2 $\mu\text{m}$ CMOS SOS (See Table 1) |
| CMOS Technology     |                                                                                |
| MQW Modulator Size  | 10 $\mu\text{m}$ $\times$ 10 $\mu\text{m}$ $\times$ 1 $\mu\text{m}$            |
| MQW Drive Voltage   | 5 volts                                                                        |
| MQW Capacitance     | 12 fF                                                                          |
| MQW Efficiency      | 40%                                                                            |
| Detector Size       | 20 $\mu\text{m}$ $\times$ 20 $\mu\text{m}$ Si Pin Diode                        |
| Detector Efficiency | 80%                                                                            |
| Min. Detector Power | 40 $\mu\text{W}$ @ 100 MHz                                                     |
| PE Size             | 200 $\mu\text{m}$ $\times$ 100 $\mu\text{m}$                                   |

| System                                 |                                   |
|----------------------------------------|-----------------------------------|
| Min. Footprint of Package              | 0.18 $\text{cm}^2$                |
| CGH Technology                         | E Beam Fabricated CGH             |
| # of CGH Phase Levels                  | 16 Phase Levels for 98% Diff. eff |
| Interconnect Efficiency                | 49%                               |
| Optical Wavelength                     | 0.85 $\mu\text{m}$                |
| Laser Efficiency                       | 10%                               |
| Clock Embedded in Optical Power Supply |                                   |

図 5.14 : POEM のプレーナ実装法

従来電気配線で実現してきた配線アーキテクチャを光配線で構成することで単純化、大規模化することができる。並列処理の基本的アーキテクチャの1つであるPerfect Shuffle[6]の実現は並列処理を指向するうえで重要となる。光学的Perfect Shuffleは図5.15に示すような光学素子のみで構成することができる[7]。この方法は、自由空間における交差配線の利点を活かしたものであり、入力を空間光変調器アドレスすることで高速



処理が可能である。また“exchange box”と呼ばれる2値交換素子として光双安定素子を配線に付加することにより高速フーリエ変換などの応用が可能になる。今後はこのような配線を如何に実現するか、デバイス、実装技術の開発が待たれる。

以上は、配線パターンは3次元空間的に配置されているものの、固定されたパターンのもとの構成方法であった。しかし、フレキシブルに空間変調できる自由空間光配線は、今後の光ニューラルネットをはじめとする光配線応用において強い要請として現われてくると考えられている。特に、光学的に励起された空間変調は、強度変調としてのパターン変調と光路の空間変調が考えられるか、応用面からは後者がより重要と思われる。この手法の基本となるのかホログラムによる回折現象であり、それか光学的に励起されることか用いられる。このようなダイナミックホログラムを用いたアーキテクチャが検討されている。図5 16はその一例である[8]。光源を2ヒームに分けて信号光と参照光とし前者は空間光変調器の空間情報を得てPhotorefractive(PR)結晶内にホログラムを形成し、参照光はホログラムで回折してアレイ光検出器でとらえられる。PR結晶では2ヒーム結合で位相クロストークを排除して再生できる利点がある。しかし、ホログラムの書き込み時間の低減、書き込み、読み出しに要するエネルギー効率の向上が今後の課題として残っている。また、集積化の観点からは、最近研究の進んでいる半導体PR結晶の活用が重要である。

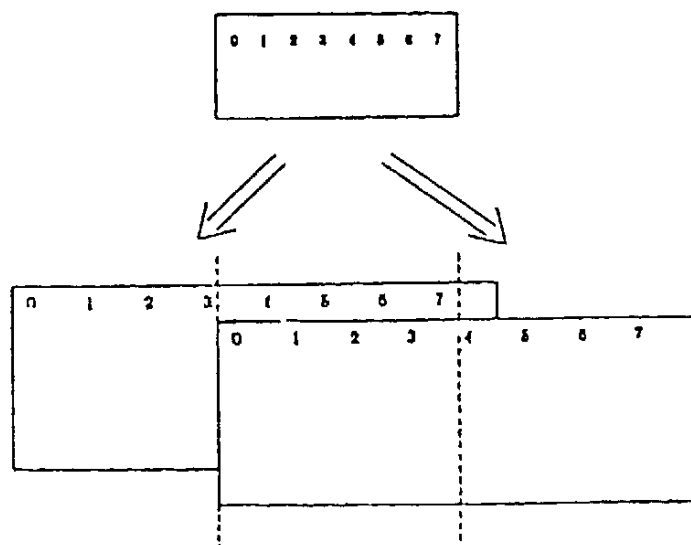


図5 15 (a) 光学的パーフェクトシャフルの原理[7]

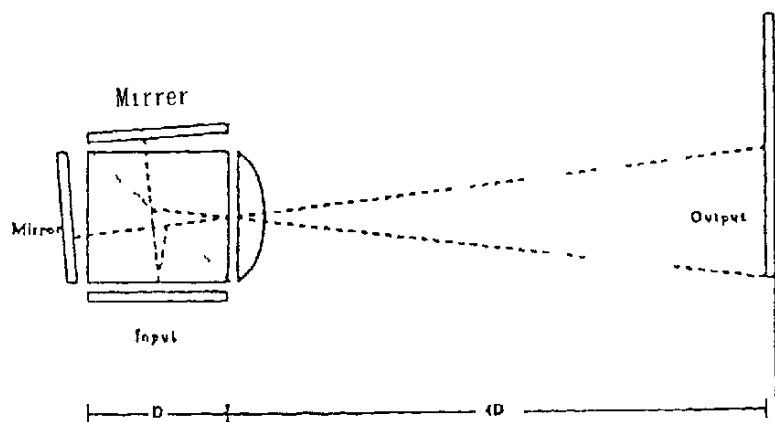


図5 15 (b) 光学的パーフェクトシャフルの配置[7]

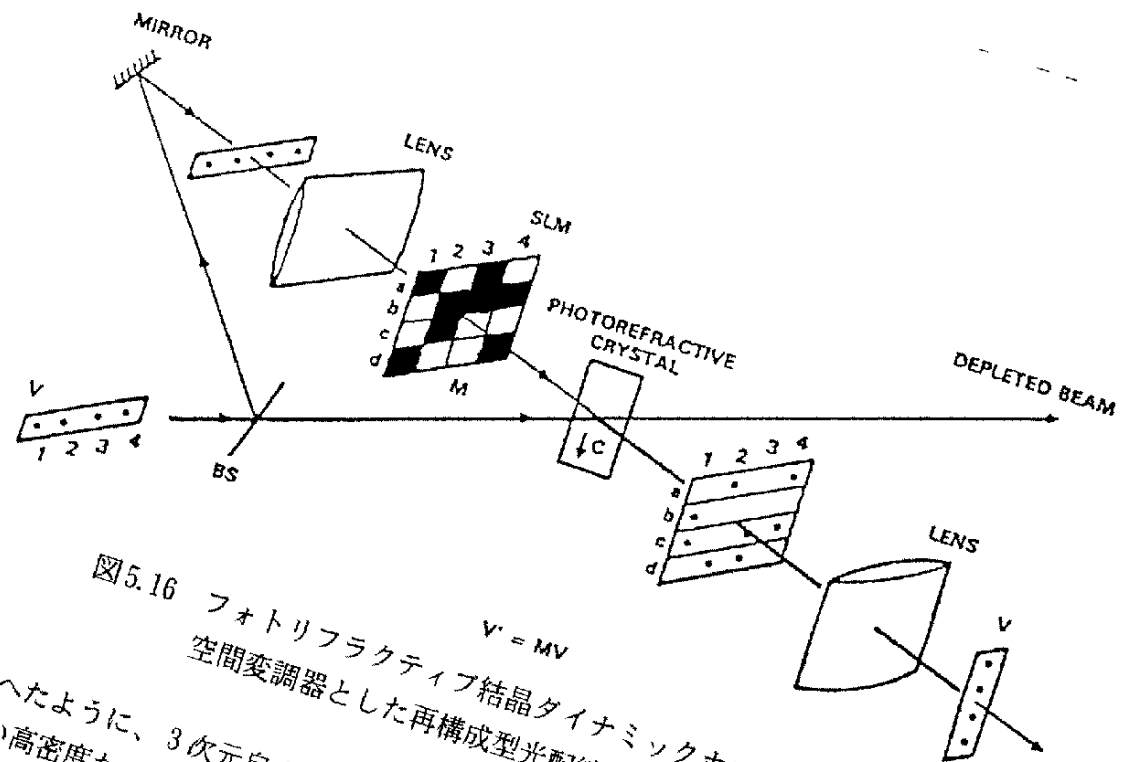


図5.16 フォトリフレクティブ結晶ダイナミックホログラムを空間変調器とした再構成型光配線の概念[8]

以上のへたように、3次元自由空間光配線は電気配線、あるいは光ファイバ結合では実現できない高密度かつ大規模な配線に用いられるべきものである。この配線方式を実現するためには、これを満足するデバイスと実装技術の開発が必要となる。表5.5は機能とデハイスをまとめている。次項では、これらデバイスの開発状況と課題について述べる。

表5.5 光配線デバイス

| Light Source            | Spatial Light Modulator                                                                                              | Optics           |         | Detector |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------|----------|
|                         |                                                                                                                      | Micro lens array | Grating |          |
| SELD array              | CGH                                                                                                                  |                  |         | OEIC     |
| High Power LD (+Optics) | Photorefractives<br>Ferroelectrics<br>Semiconductors<br>*Two wave coupling<br>*Volume hologram<br>*Phase Conjugation | Mirror           |         | PD array |
| LED array               | Bistable Devices<br>S-SEED LCLV<br>PNPN Devices                                                                      | Optical fiber    |         |          |
|                         | Beam steering LD                                                                                                     |                  |         |          |

### 5.3.3.2 自由空間結合光インタコネクションデバイス

前項に述べた自由空間光配線を構築するために様々なデバイスの開発が必要である。フアイハオプティクスを基盤とした光配線システムではアーキテクチャ、デバイスとも光フアイハ通信の延長にあり、主として実装技術が研究課題となる。しかし、真に空間並列性を活用しようとする自由空間光配線では空間並列性を達成するための新たなデバイスの開発が要請される。表5.5に従い以下に開発課題を述べる。

## (1) アレイ光源

空間並列性を生かしたシステムの構築には、空間的に配列された光源、特に小型のレーザ光源が必要になる。このような光源アレイを得る方法として次の2つかある。

### 1) 光回折型

現在、Damman Gratingを用いたスポットアレイの発生が報告されている[9]。40×40のスポットアレイ石英基板上に形成されたDamman Gratingで作製されている。スポットの強度はらつきは10%、回折効率75%が得られている。この性能を決めているのは、クレーティング形成のための石英ガラスのエッチングとAl蒸着膜の厚さ均一性である。さらに大規模なアレイの作製とスポット形状、強度の均一性を向上させるにはこれらの作製プロセスを開発することか要請される。またアレイ規模の向上は照射するレーザ光源の高出力化が必要になる。応用面に際しては、スポットを独立に変調できないという欠点が残る。

### 2) 面発光レーザアレイ

面発光レーザアレイは各々のスポットを電気的に変調できるコヒーレント光源アレイであるので、今後のスポットアレイ発生素子として最も期待されている。現在、数種類の面発光レーザの素子構造が提案されている[10]。自由空間光配線の要請する高密度化を達成するためには、次のような要件を満足する素子を開発しなくてはならない。

a) スポット間隔を小さくした高密度構造

b) 実装が簡単なプレーナ構造

c) パワー消費の低い低しきい値発振と高効率動作

などである。a) に対しては、現在垂直共振器型構造で素子の直径が4  $\mu\text{m}$  の素子で発振が得られている[11]。しかし、アレイとしての均一な発振は達成されていない。その原因の多くは、素子形状作製時のエッチングプロセスによる結晶学的な損傷とそれか引き起こす性能低下と理解される。また、b) の案件への対応は、図5-17に示すような基板側からの光取り出しである[11]。GaAs基板を用いた素子ではGaAsが発振光の吸収体として働くのでInGaAs/GaAs 歪超格子を活性層として用いることか必要である。歪超格子は次に述べるしきい値電流の低減にも効果があり1つの解決策として評価できる。一方、InP系素子ではInP基板が発振光に対して透過なので材料上のリスクかない。この問題は、システム構成にとの波長域を採用するかの問題とも密接にかかわる。c) に指摘される性能向上として量子井戸構造活性層の採用が積極的に行なわれている。これにより60%のしきい値電流の低減が理論的に可能であるか、大規模なアレイを作製しようとすると全体のパワー消費の低減と熱発生による性能低下を防ぐために $\mu\text{A}$ 領域のしきい値電流が求められる。その解決策としては、マイクロキャビティ構造が期待されている[12]。この発想は、キャビティQEDの概念に基づく自然放出光の抑制効果[13]であるか、半導体レーザで実現できる検証は今後の研究にかかっており、原理、構造の両面からの基礎的研究アプローチが求められる。以上述べたように、システム構築に満足できる素子の開発には、

a) レーザ発振原理による性能向上

b) 高密度化と実装の簡略化に対応できる素子構造の開発

c) 作製プロセス技術の開発

が研究課題として指摘される。そして、面発光レーザの機能面の充実という観点から、超

短パルス発生、多波長発振などか検討されている。これらの機能を活かせるは、空間変調機能を備えることに相当し、システムの簡略化が図れる。

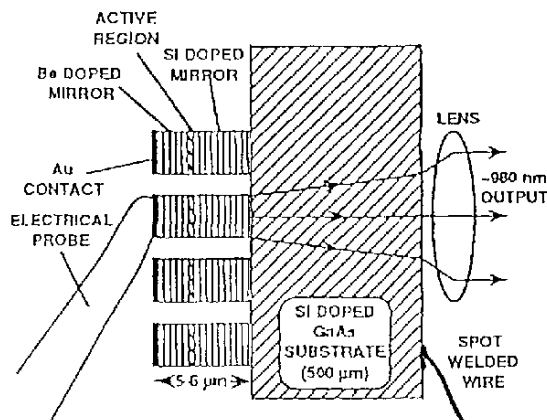


図5 17 InGaAs/GaAs 歪み量子井戸活性層面発光レーサの素子構造と基板面光取出し [11]

## (2) 空間光変調器

2次元化された光情報の空間的強度分布や光の伝搬方向を変調する素子が空間変調器であり、光配線の機能化に欠かすことのできない素子である。

強度を変調する素子を大別すると光学効果の観点から「複屈折」を利用したもの、「光吸収」を利用したものに分けられる。前者は電気光学効果にもとづく偏向面の回転、散乱により変調し、後者は主として半導体のハント間吸収過程の電気的変調を用いている。電気光学効果を用いる素子として、S<sub>1</sub>/PLZT空間光変調器(図5 18)が開発されている [14]。この素子はPOEMの光電子集積素子アレイを想定して開発されている。

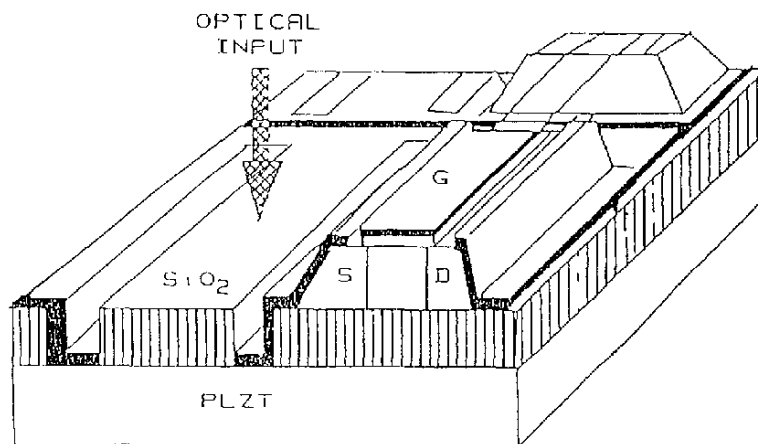


図5 18 S<sub>1</sub> ICとPLZT- SLMをモノリシック集積したS<sub>1</sub>/PLZT空間光変調素子 (S L M) [14]

S<sub>1</sub> ICに装備された光検出器の信号を増幅してPLZT変調器の駆動電圧として光変調する動作を行なう。現状では、変調周波数100MHz、変調のコントラスト35か達成されている。この素子のように空間光変調器を光源の変調に用いる場合、S<sub>1</sub>あるいは化合物半導体のICとモノリシック集積化されることが求められる。この素子の場合、PLZT基

板上にS<sub>1</sub>をレーサアニール法でエピタキソするというSOIの先端プロセスを採用している。誘電体材料を用いて空間変調器を作製しようとする場合、半導体ICとの集積化技術の問題を克服することか必要になる。それは、ハイブリット実装、モノリシック化プロセス技術開発のタスクとしてとらえられる。具体的には、プレーナ化技術、異種基板上エピタキソ技術、基板の位置合わせ・固定技術などである。これらの問題は、同様な動作原理の液晶素子にもいえる。現在、液晶／CCD集積素子が提案され集積化の可能性が指摘できるか、ほかの素子と比較して集積密度の向上は困難といえる。半導体ICとの集積化の観点からは、半導体空間光変調器が有望である。最も簡単な構造をもつのか半導体エタロンである。この素子は、光の入射により生じるキャリアの遮蔽効果で励起子吸収の飽和現象を利用したものである。しかし、励起エネルギーが高く、今後の改良が必要である。半導体空間光変調素子で、特に注目されるのは量子井戸の光吸収の電界依存性である量子閉じこめニュタルク効果(QCSE)を利用した素子で、変調速度100psの潜在能力をもつので今後の発展が期待される。QCSEを利用したデバイスとしてSelf-Electro-Optic-Effect Device(SEED)[15]がある。SEEDは入射光により生じるpin タイオートの光伝導で光吸収と印加電圧との間の正帰還効果で光吸収の双安定性を実現している。最近では、機能を付加した各種のSEEDが考案されている。なかでもS-SEED[16]は直列に接続された2つのSEEDから構成され、制御光と信号光でそれぞれセット・リセットできる。これを利用して、3次元光クロスオーハネネットワークが実現されている[17]。S-SEEDアレイは既に商用化の段階にあり、これを用いた光配線の研究が今後展開されると思われる。

光機能素子として最近光pnpnサイリスタが注目されている[18]。この素子は、サイリスタの電圧-電流特性と光変調で光書き込み、記憶保持、光読み出し、消去の機能が実現できることが確認されており、S-SEED同様に、光配線のシステム実験に用いられると考えられる。

3次元自由空間光配線においては、空間光変調器も高密度化のため半導体論理回路ICと集積化される光電子素子に一体化される。そのための集積化を含頭においた研究の推進が必要であり、光電子集積回路(OEIC)化の観点からは半導体空間光変調器と集積化技術の開発が重要な開発課題といえる。

光の伝搬方向を変調する素子としてはレンズ、ミラー、ヒームスプリングなどの光学部品が受動部品としてポピュラーである。しかし、配線密度の高い領域で自由空間光配線が活用されることを考えると、微小光学技術による微小化が重要となる。そのような考えから、ホログラムによる回折型（あるいは反射型）光学部品が注目されている。ホログラムによる空間配線は従来から提案され、代表的な空間光変調器といえる。特に、CGH[19]は任意の回折(反射)パターンが得られることから幅広い応用が期待できる。CGHは、通常1) CADによる設計、2) 電子ヒーム描画によるホログラムパターン書き込み、3) エッチングによるパターン形成である。これらの技術の開発がCGHの利用に欠かすことかできない。

ホログラムを光ディスク上に形成し、メカニカルにアトレスしたダイナミックな空間配線の試みもある。さらに、ダイナミックな空間変調によるPR結晶にリアルタイムにホログラムを書き込む手法である。PR結晶では、図5-16に示すようなアーキテクチャに応え

るものである。PR結晶は、2ヒーム結合による増幅機能、4波混合による位相共役鏡の発生などの空間変調機能が実現できる。しかし、書き込み時間、書き込みエネルギー、読み取り効率、ホログラムの記録安定性などが十分満足されるものはない。材料の開発、改良が実用化に向けて不可欠な研究課題となる。さらに、これらの機能をデバイスとしてどのように活用していくのか今後の課題といえる。また、集積化の面からは現在研究の盛んな強誘電体結晶にかわる半導体PR結晶の探索か、VLSIプロセッサの配線を指向した実用的なタイナミック自由空間光配線実現のための重要な課題といえる。

以上柔軟性を持つ自由空間光配線のデバイスについて述べた。この他にも光検出器など多くのデバイスが必要とされる。この分野の配線に用いられるデバイスは冒頭に述べたように、高密度集積、高速動作が要求される。現在個別デバイス、部品を用いた原理実験が行われているか、今後上記の条件を満足するためにはデバイスの集積化が必須である。そのためには、半導体をベースとしたOEIC（光電子集積回路）化とそれらと微小光学部品を用いたハイブリッド実装がますます重要となる。

#### [参考文献]

- [1] Hayashi, I Future OEICs, to be published.
- [2] Koyanagi, M, Takata, H, Maemoto, T and Hirose, M. Optoelectronics, Vol. 3, No 1 pp 83-98 (1988)
- [3] Ae, T Private Communication.
- [4] Koyanagi, M, Takata, H, Mori, H and Iba, J Solid-State Circuits, IEEE J., Vol. 25, No 1 pp 109-116 (1990)
- [5] Kiamilev, F, Esener, S, Paturi, R, Fainman, Y., Guest, C and Lee, S H Opt Eng. 28, 396 (1989)
- [6] Stone, H S IEEE Trans Compt C-20, 153 (1971)
- [7] Brenner, K-H and Huang, A Appl Opt 25, (1988)
- [8] Chiou, A E and Yeh, P Appl Opt 29, 1111 (1990)
- [9] Jahns, J, Downs, M M., Prise, M E., Streible, N. and Walker, S J. Opt. Eng. 28, 1267 (1989)
- [10] 伊賀, 小山 応用物理, 60, 2 (1991)
- [11] Jewell, J L "Digital Optical Computing" (SPIE Optical Engineering Press) p 44 (1990)
- [12] Yablonovitch, E Phys Rev Lett 58, 583 (1987).
- [13] Kleppner, D Phys Rev Lett 47, 233 (1981).
- [14] Lin, T-H., Ersen, A., Wang, J H, Dasgupta, S, Esener, S. and Lee, S H Appl Opt. 29 15 95 (1990)
- [15] Miller, D A B, Chemla, D S, Damen, T C., Gossard, A C, Wiegmann, W, Wood, T H and Burrus, C A Appl. Phys Lett 45, 13 (1984).
- [16] Lentine, A L, Hinton, H S., Miller, D A B, Henry, J E, Cunningham, J. E. and Chrovsky, L M F Appl Phys. Lett. 52, 1419 (1988).

- [17] McCormick, F B , Tooley, F A P , Cloonan, T J , Brubaker, J L , Lentine, A L ,  
Hinton, S H and Herron, M J CLEO PDP CPDP 1, Anaheim (1990)
- [18] 笠原健一 光学 18, 330 (1989)
- [19] Feldman, M R and Clark, C C Opt Eng 28, 915 (1989)

## 5 4 光インタコネクションの将来

### 5 4 1 将来研究の方向

現在の電子コンピュータの性能向上を阻む「配線ネック」を解決するという現実的な目的と、21世紀に向けての超並列コンピュータやニューロコンピュータに必須となる高度な配線技術を与えるという将来の目的とに対して、光インタコネクションの開発は不可欠である。

前節まで述へたように、多重化による大容量性・並列性の実現と、電気または光制御による柔軟接続の実現とに向けて新技術の萌芽かみられる。このうち前者は光通信で培われた技術が基盤となるため現実的な検討が行いやすいのに対し、柔軟接続の方向へ向けてはアーキテクチャ、デバイス共に未開拓の領域であり基礎的な検討がまず必要である。光の特徴を多面的に利用していくためには、たとえば図5 19に示すような多重化から柔軟接続、さらには光制御柔軟接続へと向かう研究方向の流れがてきることか望ましい。

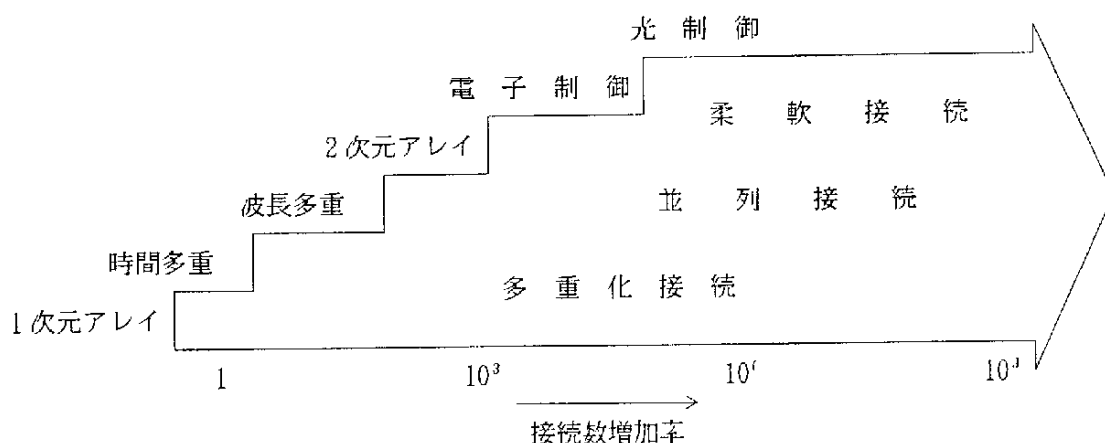


図5 19 光インタコネクション開発の流れ

まず電子システムの中に光インタコネクションを導入していくという立場に立ち、光通信技術を発展させた多重化により大容量・高並列化を指向する研究で技術基盤を固めることか重要と考えられる。多重化方式の複合により今の光通信技術に比較し、 $10^2 \sim 10^3$ 倍のデータ量に対応できる光インタコネクションの実現性はあるものと考えられる。

次のフェーズとして、光の並列性を発揮させるものとしての2次元アレイ化空間接続光インタコネクションか最も魅力ある領域である。目標としては、たとえば、原理的限界に

は余裕のある $10^4 \sim 10^6$ 接続を現実的サイズで実証することか考えられる。さらにこの技術を基礎として柔軟光接続インタコネクションは、接続制御の可能性を具現していかなければならない。

システム性能を達成するためには、目標に応じたアーキテクチャの開発に並んで、周辺の電子システムとの整合性の高い光インタコネクションを開発することか極めて重要である。すなわち光電子共存形光インタコネクション技術の展開か鍵となる。さらに、将来の光制御を用いる柔軟接続光インタコネクションに向けては、システム性能向上をもたらすアーキテクチャと、デバイス材料の探究か始められなければならない。このように光インタコネクションは、多重化、2次元並列化、柔軟接続化の流れ(図5-19)に沿いつつ、アーキテクチャ・デバイスの両面から強力な開発が行われることか望まれる。

#### 5.4.2 将来技術

高度の多重化や柔軟接続を指向した光インタコネクションの開発におけるアーキテクチャの重要性は論を待たない。コンピュータの応用に即し、かつ光インタコネクションに適合するアーキテクチャ技術をデバイス開発の位相に合わせて開発していくことか必要であり、将来技術としても極めて重要な部分である。光並列コンピュータや光ニューロコンピュータ等の応用に適合するアーキテクチャ開発については他章で述べられている。

一方、デバイス技術においては、目標の接続機能によって必要開発技術は異なるか特徴的なものを表5-6に示した。

多重化技術では多重化方式特有のデバイスか必要となるか、光通信技術を基盤として、半導体を中心とする材料物性の向上と集積光エレクトロニクス技術、および高密度・高信頼性光電子実装技術の確立か必要である。

2次元並列固定接続から電子制御柔軟接続に向けては、高均一材料技術に加え面発光レーザに代表される2次元光デバイスの集積化、さらに光電子共存システムに適合する高度な素子製作および実装技術か必要である。ここでは半導体材料および他材料との複合材料を用いた集積光エレクトロニクス技術と、光電子実装技術か基本となるものと考えられる。この技術領域は、光の超並列性と高機能性・柔軟性を効果的に使うことのできる魅力多い領域であるか、その研究はまた緒に付いたばかりであり、今後様々な技術的角度からアイデアか創り出されることか肝要である。

さらに、光制御を用いた柔軟接続に向けては、光機能材料の開発かまず重要であり、これに並行して適合するアーキテクチャと3次元光実装技術の研究か進むことか望まれる。

以上述べたように、光インタコネクションの開発は、従来の単一デバイスの性能向上に依存した直線的開発では、成果か期待しにくい。光の優位性を真に発現させるためには、材料から実装にいたる製作技術とシステムおよびアーキテクチャ技術との各々の専門家による相互乗り入れか十分行われ、相乗効果か現れる研究方法か採られることか重要である。



表5 6 光インタコネクションのための開発技術

|           | 固 定 接 続                                                                                                                                                 |                                                                                                            | 柔 軟 接 続                                                                                                                                                  |                                                                                                    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | 多 重 化                                                                                                                                                   | 2次元並列                                                                                                      | 電子制御                                                                                                                                                     | 光 制 御                                                                                              |
| 主要デバイス    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・超高速低消費電力光素子</li> <li>・アレイ化光素子</li> <li>・波長可変光源</li> <li>・超高速電子回路</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・低消費電力2次元アレイ光素子</li> <li>・マイクロ光学素子 (レンズ, ミラー, フォトリソグラフ等)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・空間変調素子</li> <li>・チップ内OEIC</li> </ul>                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・光制御機能素子</li> <li>・マイクロ光学合波・分波素子</li> <li>・多波長光源</li> </ul> |
| 材料・プロセス技術 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ヘテロエピ</li> <li>・量子井戸材料</li> <li>・非線形光学材料</li> <li>・集積</li> <li>・OEIC</li> <li>・光機能素子</li> <li>・導波路集積</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・高均一光</li> <li>・複合材料</li> <li>・微細加工</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・電子材料</li> <li>・ヘテロエピ</li> <li>・高性能液晶</li> <li>・非線形光学材料</li> <li>・OEIC</li> <li>・光機能素子</li> <li>・導波路集積</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・光機能材料・フォトリソグラフィ材料</li> <li>・複合材料</li> <li>・微細加工</li> </ul> |
| 実装技術      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・アレイ化光実装</li> <li>・超高速電子実装</li> <li>・高密度</li> </ul>                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>・2次元アレイ光電子実装</li> <li>・多層回路集積</li> <li>・高信頼性光電子実装</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・3次元光実装</li> </ul>                                                                                                |                                                                                                    |



## 第 6 章

あ と か き



## 第6章

### あとがき

本年度の新情報処理技術に関する総合調査は、統合型コンピューティングWGと光コンピュータ・デバイスWGに分かれて調査を行なってきた。

統合型コンピューティングWGでは、“柔らかな情報処理”に必要なアルゴリズム、あるいはソフトウェアの観点から新情報処理技術実現の方策を模索している。

これに対し、光コンピュータ・デバイスWGの立場は、光という情報媒体の特徴を用いて、どのように“柔らかな情報処理”の実現に貢献するかを考えることにある。

“柔らかな情報処理”か目指すものは“分散と協調”あるいは“並列と柔軟”という言葉に代表される。そして光はこのような情報処理を実現するにふさわしい情報媒体である。情報処理応用における光技術の特徴は、光の持つ膨大な情報伝送容量と、それに供なう超並列性である。そして、この超並列性が光独自の伝搬形態と相まって柔軟な情報処理の形態を実現する。

並列デナタル光コンピュータか目指すものは、これまでの論理演算原理を基本として、光の並列性を活かしながら、画像情報に代表される一定の拡がりを持つ空間情報や、あるいは波長情報を処理することである。

光ニューロコンピュータか目指すものは、ニューラルネットワークを基本として、ニューロン間の膨大な結線を光で実現したり、光独自の物理特性を利用することにより、画像情報に代表される一定の拡がりを持つ空間情報や、あるいは波長情報の学習や連想処理を行なうことである。

これらのシステムは、光の持つ並列性により拡張性に富み、原則的に取り扱う情報量の大きさの如何にかかわらず、情報処理時間が一定のシステムか実現できる可能性がある。この点、逐次処理か基本の電子計算機では配線リミットから並列性の拡張に限界がある。

光インタコネクションはこのような電子計算機の情報伝達ネットワークを解消したいという発想から出発している。そこでは、VLSIに代表される高度なエレクトロニクス技術と光通信技術をトランクさせることにより、さらなる情報処理技術の展開を図ろうとしている。並列デナタル光コンピュータ、光ニューロコンピュータから光インタコネクションまで一貫して言えることは、光か情報の流れを担当するということである。

光技術は、情報ネットワークから情報処理まで、21世紀へ向けた高度情報化社会を支えるインフラストラクチャとして期待され、そのバランスのとれた発展か求められる。

光インタコネクションを広義に解釈すると、光通信ネットワークから光コンピュータという情報処理システムまでを包括する“技術コンセプト”と考えることもできる。

光技術の課題は、情報媒体としての光の潜在的な可能性に対して、それを実現するため

のハードウェア技術がまた完全に自立できずにいることである。光通信では幹線系については光化が実現したか、加入者系についてはこれからである。光コンピュータについてはそれに必要な光トランススタとも言うべき各種基本要素技術の開発が急務である。ハードウェアの裏付けなしには光コンピュータは絵に描いた餅にすぎず、統合型コンピュータが呈示する情報パラタイムの実現に寄与することもできない。

本報告書では、並列テンタル光コンピュータ、光ニューロコンピュータ、光インタコネクションというシステムの立場から光情報処理を論じてきた。このため、それぞれの分野において要素技術が重複して記述される結果となった。光技術としては、それぞれのシステムに専用の要素技術も立上かりつつあるか、情報媒体としての光の流れを制御する要素技術自体は、それぞれのシステムに共通の要素であることもまた事実である。

新情報処理技術における光技術としては、前期は要素技術開発を中心に研究開発を行ない、後期において新情報処理が掲げるパラタイムのニーズに応じたシステムの実現を考えるのか妥当であろう。

—— 禁 無 断 転 載 ——

平成 3 年 3 月発行

発行所 財団法人 日本情報処理開発協会  
東京都港区芝公園 3 丁目 5 番 8 号  
機 械 振 興 会 館 内  
TEL (3432) 5405 (代表)

印刷所 山陽株式会社  
東京都港区虎ノ門 1 丁目 9 番 5 号  
TEL (3591) 0240 (代表)







