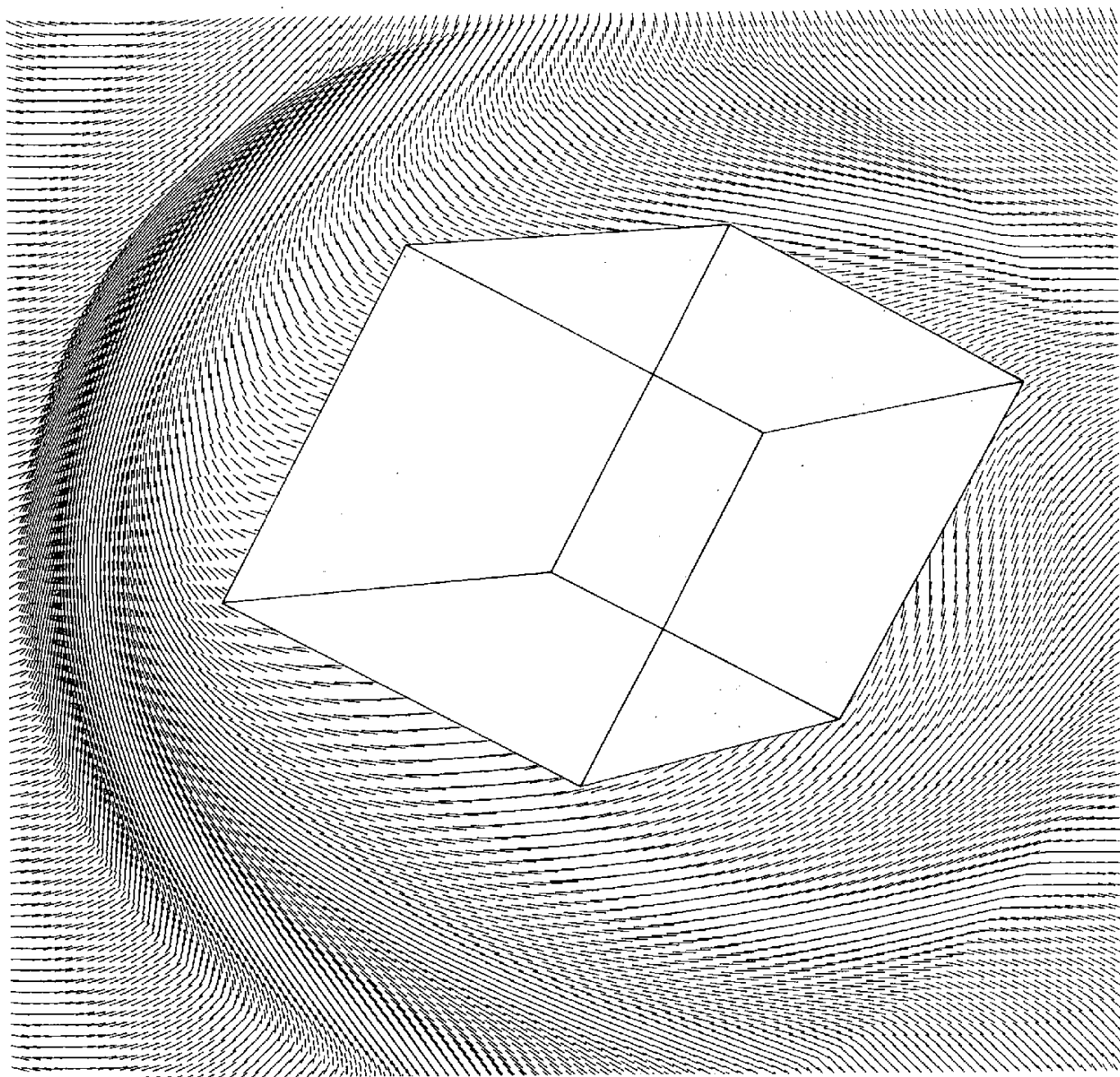


「柔らかな情報処理」と 「光コンピュータ」の実現に向けて

— 計算機科学分科会報告書 —



通 商 産 業 省 編

財団法人 日本情報処理開発協会 発行

「柔らかな情報処理」と 「光コンピュータ」の実現に向けて

— 計算機科学分科会報告書 —

刊行に当たって

過去30年にわたる情報処理技術の進歩には著しいものがあります。それに伴い社会の情報化も急速に進展しており、今やコンピュータはわれわれの社会活動にとって不可欠のものとなっております。特に最近では、その利用範囲の拡大や多様化とともに、情報処理機能の一層の高度化が求められております。このため、現実世界に存在する大量かつ多様な情報を一括して処理するために、数値計算を中心とする従来の情報処理機能から、人間のような柔軟性や学習・適応の能力を持つ新しい情報処理機能への変更が強く期待されるようになっております。

こうした認識に基づき、通商産業省は、平成元年度から「新情報処理技術調査研究委員会」を設け、21世紀に向けてわが国が世界の国々とともに取り組むべき新しい情報処理技術体系について2年間にわたり検討を行ってまいりました。本委員会にはその下部機構として、財団法人日本情報処理開発協会に、基礎研究分科会、計算機科学分科会、社会応用分科会の3つの分科会を設け、それぞれの専門の学識経験者にご参加いただき、新しい情報処理技術に対する社会的ニーズ、技術的シーズの両面から、熱心な議論をいただきました。また、海外の研究動向調査や国際ワークショップ、シンポジウム等の開催を通じて、海外の研究者との意見交換も行い、国際的に開かれた研究体制の構築にも努めてまいりました。

平成3年度から本調査研究の成果をもとに、フィジビリティ調査によって具体的な研究の計画策定を行い、これらを踏まえ、平成4年度から10年間の研究開発として「リアルワールドコンピューティングプログラム」の計画がスタートしたところであります。

この度、3つの分科会における2年間の調査研究の成果が「新情報処理技術調査研究報告書ーリアルワールドコンピューティングの実現に向けてー」として出版されることとなったことは、誠に喜ばしい限りです。情報処理技術の今後の方向を示し、リアルワールドコンピューティングの研究開発計画策定の基盤となった本報告書が、情報処理に直接携わる方々はもちろん、広く関係各位のご参考となれば幸いです。

最後になりましたが、本委員会において熱心な議論を展開していただいた委員各位に対し、改めて深く感謝の意を表します。

平成5年4月

通商産業省機械情報産業局長 坂本 吉弘

「計算機科学分科会」委員名簿

(順不同)

分科会長：	甘利 俊一	東京大学 工学部計数工学科教授
委 員：	有本 卓	東京大学 工学部計数工学科教授
	池上 徹彦	日本電信電話(株) NTT光エレクトロニクス研究所長
	一岡 芳樹	大阪大学 工学部応用物理学科教授
	井上 博允	東京大学 工学部機械工学科教授
	岡部 洋一	東京大学 先端科学技術研究センター教授
	柏木 浩	九州工業大学 情報工学部 生物化学システム工学科教授
	神谷 武志	東京大学 工学部電子工学科教授
	後藤 敏	日本電気(株) C & Cシステム研究所長代理
	佐藤 繁	(株)富士通研究所 取締役
	島田 潤一	工業技術院電子技術総合研究所 光技術部長
	杉本大一郎	東京大学 教養学部教授
	田中 英彦	東京大学 工学部電気工学科教授
	田村浩一郎	工業技術院電子技術総合研究所 情報科学部長
	中野 馨	東京大学 工学部計数工学科助教授
	古川 康一	(財)新世代コンピュータ技術開発機構 研究所次長
	堀越 彌	(株)日立製作所 中央研究所長
	武藤 達也	三菱電機(株) 情報電子研究所 副所長
	弓場 敏嗣	工業技術院電子技術総合研究所 知能システム部長

報告書の構成

第1部 総論

1	計算機科学分科会の調査課題	3
2	新情報処理技術の位置づけ	3
3	研究開発のプログラム	4
4	新情報処理技術プログラムの性格	5
5	新情報処理技術開発の戦略	5

第2部 統合型コンピューティングWG

1	序と概要	13
2	柔らかな情報処理の概念	21
3	柔らかな情報処理の理論基盤	30
4	柔らかな情報処理のもたらす新機能	39
5	柔らかな情報処理のシステム基盤	77

第3部 光コンピュータ・デバイスWG

1	序と概要	133
2	光コンピュータのニーズ	139
3	並列デジタル光コンピュータ	163
4	光ニューロコンピュータ	203
5	光インタコネクション	241
6	あとがき	267

第 1 部

「総 論」

目 次

1	計算機科学分科会の調査課題	3
2	新情報処理技術の位置づけ	3
3	研究開発のプログラム	4
4	新情報処理技術プログラムの性格	5
5	新情報処理技術開発の戦略	5

1. 計算機科学分科会の調査課題

来る21世紀には、情報技術が社会を支える基盤としてきわめて重要なものになると予想される。新情報処理技術調査研究委員会は21世紀に要求される情報処理技術を展望すると共に、20世紀最後の10年間に努力を集中すべき新しい技術課題を調査し、目標を達成するための方策を作成することを任務として設置された。この委員会が昨年度に提出した中間報告は、これから努力を集中すべき新情報処理を特徴づけるキーコンセプトとして、「柔らかな情報処理」と「超並列超分散処理」の2つを提出した。

本年度に新たに設置された計算機科学分科会の任務は、これを受けて2つのコンセプトの内容を明確化し具体化すると共に、来るべき新情報処理技術を体系的に位置づけ、さらに今後努力を集中すべき研究課題を明らかにすることである。本分科会は「統合型コンピューティングWG」および「光コンピュータ・デバイスWG」の2つのワーキンググループを設置しこの作業を遂行すると共に、本分科会で全体の統一を計った。

2. 新情報処理技術の位置づけ

人間はきわめて柔軟で強力な情報処理を行っている。完全な情報はもとよりあいまいな情報、不完全な情報、矛盾した情報をもとに効果的な解決法を見出す一方、記号体系をもとに緻密な論理的推論をも実行できる。多くの異なる情報を効果的に総合し、短時間で有効な解を見出す。また、例題から解法を帰納的に見出し、学習により自己の特性を高め、情報の自己組織化を行う能力をもっている。人間の情報処理の持つこうしたもろもろの特徴を総称して「柔らかな情報処理」と呼ぶ。来るべき情報処理技術は、こうした意味での柔らかさを実現し、より人間に近く、人間と相性の良いものでなくてはならない。

柔らかな情報処理を実現するためには、強力な情報処理のシステム基盤を必要とする。このための有力な手段が「超並列超分散処理」といえる。コンピュータ技術の大勢は、今後超並列超分散処理の方向へ大きく発展していくと思われる。このようなシステム上に柔軟かで強力な情報処理を実現する必要がある。

「統合型コンピューティングWG」は、柔らかな情報処理の基本理念を調査し、論理的記号処理と並列分散学習型情報処理の統合としてこれを位置づけた。さらに、柔らかな情報処理の理論基盤を求め、情報の分散的表現、並列処理、評価と最適化、統合、学習および自己組織化など、関連する情報処理の基本要素について、その研究課題を明らかにした。また、柔らかな情報処理の実現に当たっては、記号情報とパターン情報の統合はもとより、多くのモードを統合する必要がある。こうしてはじめて可能になる新しい知的で総合的な情報処理機能を展望し、現実に関解決すべき実世界の情報処理の課題を明らかにした。

さらに、柔らかな情報処理を実現するためのシステム基盤を調査し、超並列計算モデルとそれを実現する超並列アーキテクチャおよびソフトウェアについて検討した。これに加えてハードウェア技術の現状と将来を展望しつつ超並列システムの研究開発に向けて具体的な方策を提言している。すなわちメモリを持つプロセッサを100万個以上結合する汎用超並列システムの開発である。

柔らかな情報処理の実現に向けて、理論からシステムまでのこうした一貫した検討に加

えて、新情報処理技術として特に注目してみたい2つの視点がある。1つは、人間の脳に学び、ニューラルネットワーク方式の情報処理の原理的可能性を追求する方向である。柔らかな情報処理の理論からシステムによる実現まで、脳の情報処理方式は直接にせよ間接にせよ、今後のシステム開発の上で参考にすべき点が多い。その意味で、これは人間の脳に挑戦するプログラムである。もう1つは、光の持つ原理的な超並列性超高速性に注目し、新情報処理技術のシステム実現にこれを活用する方向である。

「光コンピュータ・デバイスWG」は、光の持つ大きな潜在的可能性を技術として実現する方策を探るべく設置された。ここでは光コンピュータのニーズを展望すると共に、総合的な光コンピュータの技術的可能性と解決すべき技術課題を調査した。さらに、光ニューロコンピュータのイメージとこれを開発するために必要な要素技術を論ずる。また、将来の光情報処理技術の基本基盤となるだけでなく、光情報処理技術の開発・実現への突破口となる光インタコネクション技術を取りあげて、その研究開発戦略を詳細に論じている。

3. 研究開発のプログラム

詳細な研究開発の内容はこれからさらに検討されるべきものであるが、本分科会および2つのワーキンググループの調査研究の要約として、現時点で見えてくるプログラムの骨格は次のようなものである。

1) 「より人間に近い」情報処理技術の研究開発

多種多様かつ不完全性や曖昧さを含む情報を統合的に扱い、現実世界の中で人間と共生し、人間を支援できるような情報処理システムの実現を目指した基礎技術を研究開発する。このための要素技術として、視覚・聴覚を始めとするさまざまなセンサー情報と記号的な知識とを統合して状況を認識理解する技術、設定した目的の実現のために問題解決を行う技術、制御を計画し実行する技術などが必要となる。また、より柔軟に人間を支援するために、人間とコンピュータとの間に幅広いコミュニケーションチャネルを用意するための仮想現実感などの技術、問題解決の支援のためにも役立つ高度なシミュレーション技術なども含まれる。

こうした要素技術を実現するためには、脳の統合型並列分散処理方式が参考になる。また、柔らかな情報処理の基礎的な研究や、計算基盤としての超並列システムの実現も必要である。

2) 超並列システムの研究開発

さまざまな新機能を実現してゆくための計算基盤として、メモリ内蔵のプロセッサを多数結合した、汎用の超並列コンピュータシステムの実現をめざす。それとともに、この際、ニューラルネットワークや光インタコネクションの適用を図ることも重要であろう。

3) 光コンピュータシステムの研究開発

柔らかな情報処理の実現への1つのアプローチとして、光情報処理の要素技術を開発すると共に、光インタコネクションを突破口に、光ニューロコンピュータ、汎用光デジタル

並列コンピュータなどの研究開発を行う。

4) 柔らかな情報処理のための理論基盤の確立

柔らかな情報処理を実現するための理論基盤として、不完全性や曖昧さを含む多種多様な情報を統合的に扱う方式、学習、自己組織化の能力を持つ柔らかな情報処理の原理、および並列分散処理の基礎理論の確立をめざす。これには、神経回路網のダイナミクスの理論、学習および自己組織化の理論、制約充足的な並列処理に関する理論、パターン認識の基礎理論などが含まれるとともに、それらを統合した統一的理論基盤の構築をめざす。

4. 新情報処理技術プログラムの性格

新しいプログラムを開始するに当たって、従来のプロジェクトを越えて特に強調すべき3つの性格を述べておきたい。

1) 先進性

現代テクノロジーの直面する先端的課題のうちで、実現の可能性はあるが、そのままに放置しておいては育ちにくい先進的課題を特に取り上げてこれに挑戦し、技術的实现の鍵を探ること。

2) 基礎性

原理的萌芽的可能性を重要視し、これを技術として結実させるために解決しなければならない課題を基礎から追求すること。

3) 国際性・学際性

基礎的先進的研究を遂行するために、広く国際的な研究協力体制を組むと共に、産官学界の協力により基礎分野から応用分野までこれまでにない強力な学際的協力体制を形成すること。

5. 新情報処理技術開発の戦略

新情報処理技術として先進的・基礎的な課題に取り組むに当たって、従来に増して柔軟な体制を組む必要がある。我々の目標は新しい技術の可能性を追求し、これを実現するために突破すべき基本的課題を解決すると共に、まだ実現には間のある課題のあい路を明らかにすることである。このため、従来のように実現可能な固定課題を達成目標にかかげてこれに向けて努力を集中するプロジェクト方式を取るべきではない。むしろ、多くの峰を目指して登山を開始し、さらにその奥にあるまだ見えない峰を目指して登り続ける方策を取るべきであって、これは富士登山型よりは八ヶ岳登山型にたとえられよう。目標を固定せず、基礎から応用まで柔軟に計画をたてるべきである。

以上のような基本的戦略を明確にして始めて真の国際協力と学際協力とが可能になろう。各国、および各界の研究機関で、それぞれの長所特徴を生かした研究協力ができるように

し、その成果を全体に拡める配慮が必要である。とくに国際協力にあっては、日・米・欧の三極の協力体制を築くと共に、アジア・オセアニア諸国との協力を特に考慮する必要がある。

研究組織として集中的な機構をもうけることは、国際的、学際的な人事交流や研究成果の交流と成果の還元を行う上でも、また研究計画を総合的に立案し研究の発展段階を把握する上でも必要であろう。一方、研究の達成には研究機関の広範なサポートを必要とする。研究を中心機構に集中してここだけで行うのではなく、公開の研究委託制度を広範に取り入れ、各機関内部で自由に行える分散実施体制をも積極的に確保すべきであるとする。

第 2 部

「統合型コンピューティングWG」

「統合型コンピューティングWG」委員名簿

(順不同)

主査:	弓場 敏嗣	工業技術院電子技術総合研究所 知能システム部長
副主査:	岡部 洋一	東京大学 先端科学技術研究センター教授
幹事:	大津 展之	工業技術院電子技術総合研究所 首席研究官
委員:	浅川 和雄	(株)富士通研究所 システム研究部第一研究室長
	石井 光雄	(株)富士通研究所 システム研究部長
	井原 茂男	(株)日立製作所 中央研究所第7部 研究員
	上坂 吉則	東京理科大学 理工学部情報科学科教授
	上田 和紀	(財)新世代コンピュータ技術開発機構 研究部 主任研究員
	小柳 滋	(株)東芝 総合研究所情報システム研究所 主任研究員
	梶原 信樹	日本電気(株) C & Cシステム研究所コンピュータシステム研究部 主任
	金子 克幸	松下電器産業(株) 半導体研究センター 超LSIデバイス研究所 技師
	河原 英紀	日本電信電話(株) NTT基礎研究所情報科学研究部 主幹研究員
	菅 隆志	三菱電機(株) 情報電子研究所 並列処理グループマネージャー
	小池 誠彦	日本電気(株) C & Cシステム研究所コンピュータシステム研究部長
	佐藤 知正	工業技術院電子技術総合研究所 自律システム研究室長
	島田 俊夫	工業技術院電子技術総合研究所 計算機方式研究室長
	清水 雅久	三洋電機(株) 情報通信システム研究所コンピュータ研究部 主任研究員
	下原 勝憲	日本電信電話(株) NTT ヒューマンインターフェイス研究所 主幹研究員
	白井 克彦	早稲田大学 理工学部電気工学科教授
	立石 雅彦	沖電気工業(株) 総合システム研究所 知識情報処理研究部
	田中 厚夫	シャープ(株) 情報システム研究所 部長
	長島 重夫	(株)日立製作所 中央研究所第6部長
	西村 和夫	(株)東芝 システム・ソフトウェア技術研究所研究第2部 主任研究員
	根岸 道郎	三菱電機(株) 情報電子研究所 推論コンピュータグループ 主事
	平井 有三	筑波大学 電子・情報工学系助教授
	廣瀬 通孝	東京大学 工学部産業機械工学科助教授
	松葉 育雄	(株)日立製作所 システム開発研究所 主任研究員
	松本 憲洋	NKKエレクトロニクス研究所 コンピュータシステム研究部長
	村岡 洋一	早稲田大学 理工学部電子通信学科教授
	山田 稔	(株)日立製作所 中央研究所第8部 主任研究員
	山本 和彦	工業技術院電子技術総合研究所 画像研究室長
	吉澤 修治	東京大学 工学部計数工学科助教授
	米澤 明憲	東京大学 理学部情報科学科教授
アドバイザー:	平木 敬	工業技術院電子技術総合研究所 計算機方式研究室主任研究官
	坂井 修一	工業技術院電子技術総合研究所 計算機方式研究室

目次

1 序と概要	13
1.1 背景	13
1.2 内容	13
1.3 調査の経過	14
2 柔らかな情報処理の理念	21
2.1 柔らかな情報処理パラダイム	21
2.1.1 情報処理技術の潮流	21
2.1.2 技術的社会的要請	23
2.1.3 新パラダイムとしての柔らかな情報処理	24
2.2 柔らかな情報処理の技術体系	25
2.2.1 新情報処理技術のキーワード	25
2.2.1.1 柔らかさ	25
2.2.1.2 統合機能	25
2.2.1.3 学習・自己組織化機能	26
2.2.1.4 超並列超分散情報処理	27
2.2.2 技術体系の枠組み	27
2.2.3 研究開発協力の枠組み	28
3 柔らかな情報処理の理論基盤	30
3.1 情報処理の一般的な枠組み	30
3.2 知的情報処理研究の現状と問題点	31
3.3 研究の目標	33
3.4 研究の内容	33
3.4.1 パターン認識の再認識	33
3.4.2 制約充足パラダイム	34
3.4.3 一般理論構築への確率論的アプローチ	34
3.5 研究項目と課題	35
3.5.1 柔らかな情報表現	35
3.5.2 情報の柔らかな処理（統合）	36
3.5.3 情報の柔らかな評価	36
3.5.4 最適化、および学習・自己組織化	37
3.6 研究の進め方	37

4	柔らかな情報処理のもたらす新機能	39
4.1	新機能領域の展望	39
4.2	柔らかな認識・理解	40
4.2.1	画像技術	40
4.2.1.1	現状と問題点	40
4.2.1.2	研究の目標	41
4.2.1.3	研究の内容	42
4.2.1.4	研究課題	44
4.2.1.5	応用のイメージ	44
4.2.2	音声および自然言語技術	45
4.2.2.1	現状と問題点	45
4.2.2.2	研究の目標	45
4.2.2.3	研究の内容	46
4.2.2.4	研究課題	49
4.2.2.5	応用のイメージ	49
4.2.3	メディア統合技術	50
4.2.3.1	研究の現状と目標	50
4.2.3.2	研究課題	51
4.2.3.3	応用のイメージ	52
4.3	柔らかな推論・問題解決	52
4.3.1	推論・問題解決	52
4.3.1.1	現状と問題点	52
4.3.1.2	研究の目標	53
4.3.1.3	研究の内容	53
4.3.1.4	研究課題	54
4.3.1.5	応用のイメージ	55
4.3.2	情報ベース技術	55
4.3.2.1	現状と問題点	55
4.3.2.2	研究の目標	56
4.3.2.3	研究の内容	56
4.3.2.4	研究課題	57
4.3.2.5	応用のイメージ	58
4.4	ヒューマン・インタフェースとシミュレーション	58
4.4.1	ヒューマン・インタフェース	58
4.4.1.1	現状と問題点	58
4.4.1.2	研究の目標	59
4.4.1.3	研究の内容	59
4.4.1.4	研究課題	60
4.4.1.5	応用のイメージ	61
4.4.2	シミュレーション	62
4.4.2.1	現状と問題点	62
4.4.2.2	研究の目標	62
4.4.2.3	研究の内容	62

4.4.2.4	応用のイメージ	66
4.5	柔らかな制御と機能統合化技術	66
4.5.1	柔らかなロボット技術	66
4.5.1.1	現状と問題点	66
4.5.1.2	研究の目標	67
4.5.1.3	実現のためのキーポイント	67
4.5.1.4	研究課題	71
4.5.2	機能統合化システム	72
4.5.2.1	現状と問題点	72
4.5.2.2	研究の目標	72
4.5.2.3	研究の内容	73
4.5.2.4	研究課題	75
5	柔らかな情報処理のシステム基盤	77
5.1	ニューラルシステムからの検討	77
5.1.1	基本的考え方	77
5.1.2	ニューラルネットワークモデル	78
5.1.2.1	ニューラルネットワークの構造	78
5.1.2.2	ニューラルネットワークの学習	83
5.1.3	ニューラルシステム	87
5.1.3.1	ニューラルシステムアーキテクチャ	87
5.1.3.2	ニューラルシステムハードウェア	89
5.1.4	超並列システムとの統合	92
5.1.4.1	統合システムアーキテクチャ	92
5.1.4.2	統合システムへのアプローチ — アクティブコグニションを例として	95
5.2	超並列システムからの検討	99
5.2.1	基本的考え方と概要	99
5.2.2	柔らかな計算モデルとそのアーキテクチャ	102
5.2.2.1	マルチパラダイムモデル	102
5.2.2.2	対象指向型データ駆動モデル	103
5.2.2.3	柔らかな相互結合網	104
5.2.3	柔らかなソフトウェア	106
5.2.3.1	言語の柔らかさ	106
5.2.3.2	OS の柔らかさ	108
5.2.4	超並列システムの実現	110
5.2.4.1	5-10 年後のデバイス技術と実装技術	110
5.2.4.2	相互結合網のトポロジ	113
5.2.4.3	実装可能なシステムのイメージ	115
5.2.4.4	超並列入出力／保守アーキテクチャ	118
5.2.4.5	超並列アーキテクチャ開発支援環境	120
5.2.4.6	超並列オペレーティングシステム	121
5.2.4.7	超並列プログラミング環境	122
5.2.5	超並列システムの開発に向けて	123

5.2.5.1	ゴール、サブゴールの設定	123
5.2.5.2	ソフトウェア開発環境としてのテストベッド	124

第 1 章

序と概要

1.1 背景

21 世紀に向けて高度に情報化された社会を実現するためには、情報技術の観点から克服すべき極めて重要な技術課題が存在する。情報技術の究極の目標は、機械による人間の情報処理機能の代替と拡大にある。人間が日常的に行っている情報処理機能には、論理的情報処理と直観的情報処理の二つの側面がある。コンピュータの誕生以来 50 年の歩みの中で、それまで人間が行ってきた論理的情報処理機能をコンピュータによって代替する営為が行われてきた。コンピュータの高速かつ大規模な論理的情報処理能力は、今日の情報化社会の基盤を支えており、産業的意味のみならず文化的にも社会にとって不可欠の存在となっている。しかしながら、直観的情報処理については、従来コンピュータの苦手とする分野として扱われ、現在に至るまで技術的發展が著しく遅れている。現在のコンピュータは高速計算能力、データの直接的な記憶能力において人間をはるかに超えている。しかし、限られた時間内に、不完全なあるいは曖昧な情報をもとに状況を認識・理解する能力、総合的に判断してそれなりに適切な行動を起こす能力、そして最初は下手でも繰り返しているうちに次第に上手になるという学習能力などの、人間にとっては日常的ないわば「柔らかな情報処理」能力において、コンピュータは著しく人間に劣っている。現在のコンピュータに欠如しているこうした柔らかな情報処理能力の必要性は、パターン情報処理、知識情報処理、知能ロボットなど今日の先端的情報技術のさまざまな分野において共通した要請となっている。

限られた時間内に、限られた物量によって柔らかな情報処理を行なう機能の実現をはかることを考える。その実現環境として、自律協調的あるいは学習的な情報処理機構を付与された、数多くの並列分散的に動作する処理要素からなるシステムが適合している。この意味において、柔らかな情報処理技術のシステム基盤は、「超並列超分散情報処理」という計算の枠組みを反映したシステムによって与えられるといえる。人間の情報処理機構を考えると、柔らかな情報処理機能が脳という超並列超分散情報処理を行うシステムの上に実現されている。柔らかな情報処理と超並列超分散情報処理はいわば究極の情報技術にいたる車の両輪であり、両者の接点を探ることによって新たな情報技術の展開が期待される。そこで得られる知見こそが現在のコンピュータの限界を打ち破るものであり、21 世紀を展望した新しい情報技術の基盤を与えるものである。

1.2 内容

本報告書は、21 世紀を目指した新しい情報処理技術体系の確立を狙いとしている。具体的には、平成元年度にとりまとめた「新情報処理技術調査研究報告書（平成 2 年 3 月）」を踏ま

え、そこで提案されている「柔らかな情報処理パラダイム」を具体化し、その有効性、重要性について吟味することが平成2年度調査内容の主眼である。

本報告書では、まず柔らかな情報処理パラダイムの理念を明らかにする。本提案の思想的基盤を与える基本パラダイムとしての柔らかな情報処理について、情報処理技術の潮流の中でその必然性を位置づける。あわせて柔らかな情報処理の技術体系の枠組みを与える。ついで、柔らかな情報処理の理論基盤とそこでの研究課題、柔らかな情報処理のもたらす新しい情報処理機能について展望する。最後に、それらの機能の実現を支えるシステム基盤についての検討結果を示す。

ここで提案する研究開発計画では、柔らかな情報処理の理論基盤に関する理論研究を含むのみならず、それを基盤とする形でその上に広がる新しい情報処理機能の展開を指向した研究開発を内包する。理論基盤の確立とその適用分野としての新機能の開拓を相互干渉させながら、柔らかな情報処理パラダイムの実現を目指す。具体的な新機能領域としては、次のような分野を提案する。

1. 画像、音声などの各種メディアの柔らかな認識・理解
2. 自然言語、情報ベースなどにおける柔らかな推論・問題解決
3. 人工現実感などの柔らかなヒューマンインタフェース
4. 不完全問題の柔らかなシミュレーション
5. 知能ロボットなどにおける柔らかな制御と統合化

柔らかな情報処理のシステム基盤を与えるものとして、ニューラルシステムと超並列システムについて目指すべきシステムイメージを与える。デバイス技術、実装技術の進歩について検討を行い、10年後に実現可能な具体的なイメージと物量や電力消費量などの技術課題を示す。両者の統合化については、想定されるいくつかのシステムイメージを与える。超並列システムについては、10年間の研究開発期間を想定した場合の中間目標と最終目標、さらには研究開発を進めるうえで必要なシステム環境についての検討結果を示す。

結果として、昨年度報告書と比較して、具体化に向けて3歩ほど進めた内容になっている。時間的な制約から十分な議論が尽くされたとは言いがたいが、今後さらに内容を深めるべく検討すべき研究開発計画の枠組みと方向性を与えている。

1.3 調査の経過

統合型コンピューティングWGにおいては、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ことが必要で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、新機能・理論Sub-WG、ニューラルシステムSub-WG、超並列システムSub-WGの三つのサブグループに分け、調査活動を進めることとした。Sub-WGの主査、幹事からなる幹事会を設置し、サブグループ間の連絡調整を行った。具体的な活動の経過は以下に示す通りである。

統合型コンピューティング WG

第1回 [9/14(金)] 17:30 ~ 20:00

1. 平成2年度調査研究について
2. WGの調査体制および調査研究の進め方について

新機能・理論 Sub-WG

第1回 [9/26(水)] 18:00 ~ 20:00

1. Sub-WGの体制についての説明
2. Sub-WGの今後の運営、狙いについて討議
3. 当面の調査課題の設定
 - ・ 「統合」についてどう考えるか
 - ・ 「柔らかさ」についてどう考えるか
 - ・ 新情報処理技術のポイントとしてどこが重要か

第2回 [10/18(木)] 17:30 ~ 20:15

1. 「統合」、「柔らかさ」などの新情報処理技術のコンセプトについて各委員よりの報告と討論
2. 第1回幹事会提出資料について意見交換

第3回 [11/6(火)] 17:30 ~ 20:30

1. 議論をさらに詰めて行くための検討体制について討議し、運動制御、音声、画像、ヒューマンインターフェイスとシミュレーション、問題解決とデータベースの5つのグループ体制をとることに合意
2. 国際ワークショップ（報告内容、報告者、招聘者等）について検討
3. 第1回幹事会報告
4. ひきつづき「統合」、「柔らかさ」などについて討議

第4回 [11/19(月)] 18:00 ~ 21:00

1. 国際ワークショップにおける報告内容の確認
2. 各検討グループからの報告と討議
 - ・ ブレインマシンを核とした柔らかいシステム
 - ・ ロボット群の安定な動作に必要な機能と理論
 - ・ 音声応用における柔らかな情報処理
 - ・ 制約充足アプローチによる認識・理解
 - ・ 不良設定問題の変分問題への帰着
 - ・ 量子力学計算機
 - ・ 人工現実感と仮想環境
 - ・ 新情報処理における問題解決

第5回〔12/10(月)〕 17:30 ～ 20:00

1. 国際ワークショップの報告
2. 各検討グループからの報告と討議
 - ・ 音声認識理解・中間報告に向けて
 - ・ 柔らかな問題解決のポイント
3. 中間報告のまとめ方および報告書目次案の検討

第6回〔1/11(金)〕 17:30 ～ 20:00

1. 本年度 報告書の取りまとめ

ニューラルシステム Sub-WG

第1回〔10/ 8(月)〕 17:30 ～ 20:00

1. 第4回親委員会、第1回計算機科学分科会の報告
2. 調査の進め方および議論すべき項目についての検討

第2回〔10/18(木)〕 15:00 ～ 17:00

1. ニューラルネットについて報告と討議
 - ・ ニューラルネットの多層化とモジュール化の手法
 - ・ ニューラルネットの多層化、モジュール化、自己組織化
 - ・ ネットワークの多層化と層当たりの多数化
2. 今後の調査方針について検討

第3回〔11/ 8(木)〕 15:00 ～ 17:00

1. 国際ワークショップ（報告内容、報告者、招聘者等）について検討
2. 第1回幹事会報告
3. 統合システムについて報告と討議
 - ・ ニューロモジュールの提案
 - ・ 何ができるとおもしろいか
 - ・ 大容量超並列システム

第4回〔11/19(月)〕 15:00 ～ 17:00

1. 個別検討課題の報告と討議
 - ・ アクティブレコグニションシステム
 - ・ 統合システムについて
2. 国際ワークショップの報告用資料の確認
3. 中間報告書のまとめ方について

第5回〔1/11(金)〕 17:30 ～ 20:00

1. 本年度報告書の取りまとめ

超並列システム Sub-WG

第1回〔9/26(水)〕 17:30 ～ 20:00

1. 第4回親委員会、第1回計算機科学分科会の報告
2. 本年度の調査対象およびまとめ方について

第2回〔10/19(金)〕 15:00 ～ 17:00

1. 調査課題（調査対象、まとめ方の骨子、調査アプローチ、および議論すべきトピックス）の説明と討論
2. 海外調査の概要報告
3. 「超並列システム技術」（電総研）の紹介

第3回〔11/5(月)〕 17:30 ～ 21:00

1. 第2回計算機科学分科会の報告
2. Sub-WG の調査研究課題について
3. 調査研究課題の報告と討議
 - ・ 統合システムのイメージ
 - ・ マルチパラダイム・アーキテクチャ
 - ・ インターフェイスにおける柔軟かさ
 - ・ 将来のデバイス・実装技術
 - ・ システムのロバストネス
 - ・ 超並列言語と計算モデル
4. 国際ワークショップについて

第4回〔11/21(水)〕 17:30 ～ 21:40

1. 国際ワークショップにおける報告内容の検討
2. Sub-WG としての全体的課題の検討
 - ・ 狙うのは Brain-like Computing System か、新概念のコンピュータか？
 - ・ 超並列システムの汎用性と専用性のトレードオフ
 - ・ システムの柔軟さが依拠すべき理論
3. 個別課題の検討
 - ・ 統合システムについて
 - ・ Where is the Bottleneck?
 - ・ 超並列言語、計算モデル、超並列対象指向モデル
 - ・ マルチパラダイムアーキテクチャの具体化
 - ・ 超並列システムの実現イメージ
 - ・ W S I を用いた実装の検討
 - ・ 100 万から 10 億 P E 規模の実現イメージ
 - ・ W S I におけるネットワークの再構成法

第5回〔12/10(月)〕 17:30 ～ 21:00

1. 国際ワークショップの報告
2. Sub-WG としての全体的課題の検討
 - ・ 「柔らかなシステム」パラダイムについて
 - ・ 機能の柔らかさとシステムの柔らかさの関係
3. 個別課題の検討
 - ・ 柔らかなヒューマンインターフェイス
 - ・ 100 万から 10 億 P E の実現イメージの整理
 - ・ 超並列システムの分類（系統樹）
 - ・ 研究拠点を結ぶ超高速光通信網
 - ・ ニューラルシステムとの接点
 - ・ データフローで 100 万から 10 億セルのシステムは可能か？
 - ・ データ駆動オブジェクトモデルの提案
 - ・ 無色透明アーキテクチャについて
 - ・ Brain-like Computing へのこだわり
 - ・ 超並列システムの開発戦略
4. Sub-WG の報告書目次案について

第6回〔12/20(木)〕 15:00 ～ 17:00

1. 第3回計算機科学分科会報告
2. Sub-WG としての全体的課題の検討
 - ・ 今までの議論で欠けていた点について
 - ・ 目標とする超並列システムアーキテクチャの提案
 - ・ 本年度報告書のまとめ方
3. 個別課題の検討
 - ・ 無色透明な汎用超並列計算機
 - ・ 超並列システムの分類系統樹
 - ・ ハードウェアイメージと消費電力の見積
 - ・ 超並列システムの開発戦略
4. 本年度報告書の目次案について

第7回〔1/11(金)〕 17:30 ～ 20:00

1. 本年度報告書の取りまとめ

幹事会

第1回〔10/19(金)〕 17:30 ～ 20:00

1. 海外調査の概要報告
2. 各 Sub-WG の活動報告と意見交換
3. 国際ワークショップの招待者の検討

第2回〔11/26(月)〕 17:30 ～ 20:00

1. 各 Sub-WG の活動報告と意見交換
2. 国際ワークショップのプログラムおよび報告内容の検討

第3回〔12/14(金)〕 15:00 ～ 17:00

1. 中間報告書の目次案についての検討

第4回〔1/25(金)〕 17:30 ～ 20:00

1. 第4回計算機科学分科会の報告
2. 本年度報告書の取りまとめ

第 2 章

柔らかな情報処理の理念

従来の個別逐次的な固い情報処理方式の枠を越えて、21 世紀を目指した新しい情報処理パラダイムとして、柔らかな情報処理（より人間に近い柔軟な知的情報処理）の展開が望まれている。本章では、情報処理技術の歴史的な流れと、現在の技術的社会的要請をふまえながら、「柔らかな情報処理」の理念（why, what, how）について述べる。

2.1 柔らかな情報処理パラダイム

2.1.1 情報処理技術の潮流

そもそも情報処理とは、人間（生体）が環境の中でしなやかに生存していくために、長い進化の過程で形成した脳の機能である。それは、状況を認識し判断し、そして予測し行動を行うといった多面的で階層的かつ統合的な機能であるが、しいて2分化すれば、

A: 論理的情報処理（意識的、分析的、直列集約的、デジタル的）

B: 直観的情報処理（無意識的、総合的、並列分散的、アナログ的）

の2つの側面に分けて考えることができる。

情報処理技術は、本来、そうした脳の情報処理機能を機械化する試みであるが、歴史的には、技術的に実現しやすくまた理論的にも追求しやすい一方の側面 A（論理的情報処理）を、チューリングマシンを基本モデルとするフォン・ノイマン型計算機の上にデジタルな逐次手続的情報処理方式として展開した。そしてそれは、ハードウェア技術の驚異的發展に支えられて飛躍的に発達し、今日の支配的な情報処理パラダイムとなっている。数値計算や人工知能・知識工学における論理を主体とした記号処理はその流れに沿っている。

一方、「面倒、良く分からない」ということで切り捨てられてきた情報処理のもう一つの可能性、B の側面（直観的情報処理）については、認識機械の基本モデルとしてのパーセプトロンの提案以来、パターン認識や学習の分野で、また平行して多変量データ解析の分野において研究されてきた。直観的情報処理は、本来、曖昧で不完全な情報の並列分散的な処理であるが、従来型の逐次手続的情報処理方式の枠内で数値処理として研究されてきた。

しかし近年、記号と論理を主体とする固い情報処理方式、閉じた世界での理詰めの情報処理方式に対する反省から、また発達したハードウェア技術のポテンシャルにも支えられて、並列分散処理としての直観的情報処理の側面をもう一度再検討し、この方向を本格的に追求しようとする機運が興っている。今日のニューロコンピューティング、コネクショニズムのブームがそうであり、新しいパラダイムとしての並列分散学習型情報処理の計算原理の究明、そして柔軟で「より人間的」な情報処理技術の展開を求める新たな流れとなっている（図 2.1 参照）。

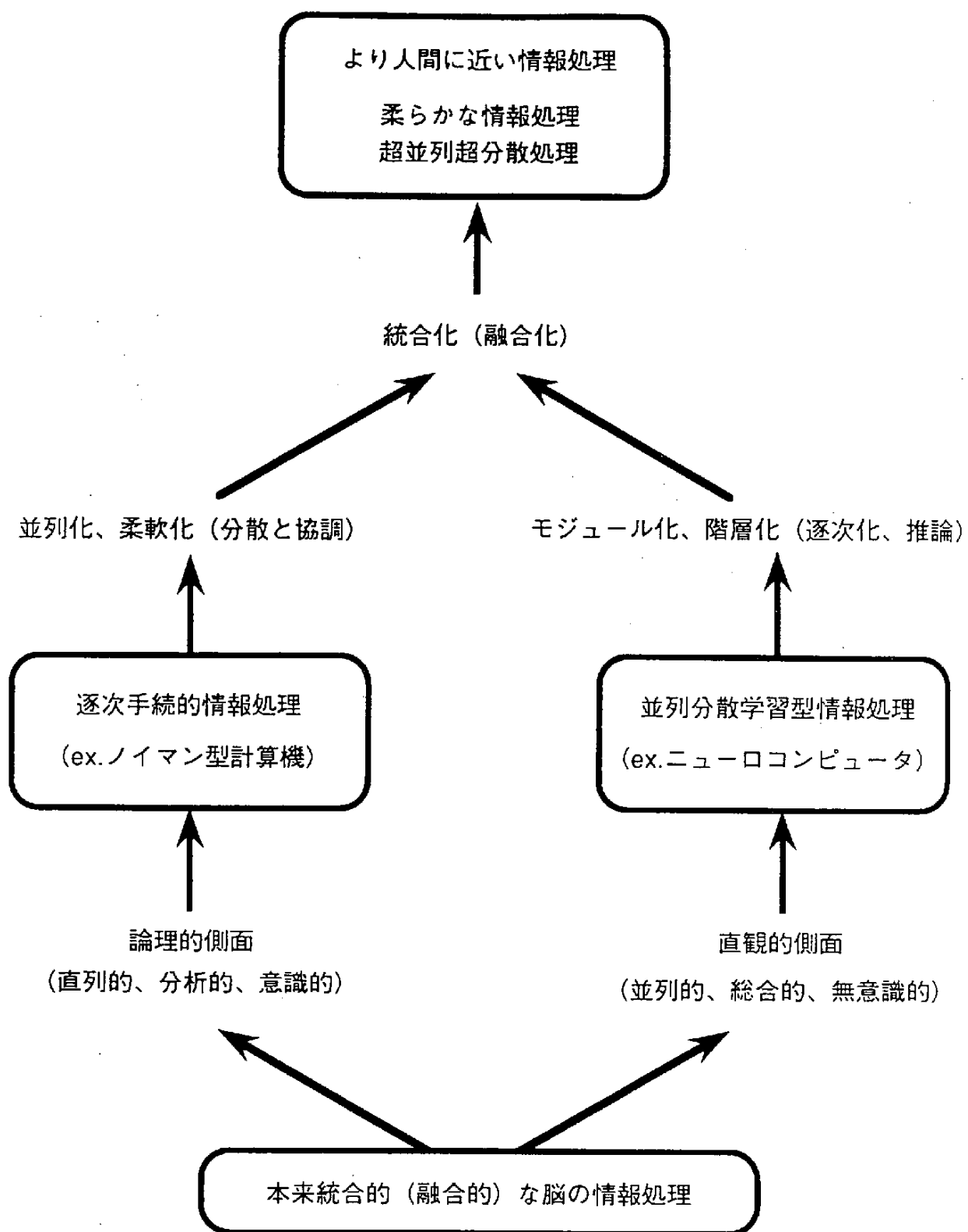


図 2.1: 情報処理技術の分極化と統合

これら2つの情報処理技術の流れは、現在、方法論的にも分極化した2つの立場をなしているが、今後21世紀を目指した新しい情報処理技術の大きな流れとして、統合されて行かねばならない。実際動向として、従来の逐次手続型情報処理の流れは、分散と協調といった並列化の方向に進みつつあり、今後さらに柔軟化の方向を目指すと思われる。一方、並列分散学習型情報処理としてのニューロコンピューティングの研究は、現在の単一な機能から、構造化（モジュール化、階層化）を押し進め、推論機能、問題解決といったより高次の逐次的な機能の実現方向へと向かうと思われる。そして両者の流れは、統合化に向けて近づいて行くであろう。

2.1.2 技術的社会的要請

計算機技術、通信技術、さらには各種センシング技術のめざましい発展に伴い、我々の処理すべき情報の量と取り扱う情報の範囲（種類、質）は急速に増大しつつある。そして情報ネットワークの発達によって、ますます複雑化しつつある。このような情報化社会にあって、従来の情報処理パラダイムは果して十分に対処できるのであろうか。

従来型逐次情報処理方式は、与えられた課題に対して、問題をモデル化し、情報を数値／記号（＝概念）で個別集約的に表現し、それらの関係を決定論的な構造（方程式／論理・知識）として記述し、解法のための逐次手順（アルゴリズム）を陽にプログラムとして与えて行う情報処理方式である。いわば「完全情報の厳密処理」である。原理的には、問題が well-defined（厳密にモデル化でき、情報が完全に与えられ、かつアルゴリズムが存在する）であり、また計算時間を無視すれば（例えば、離散最適化問題の場合の組合せ的爆発）、チューリングの言うようにコンピュータは計算可能で万能であり、答えはいつも正しいであろう。

しかし、情報処理の応用範囲を拡大し、取り扱う情報の質と量、そして「情報処理」そのものの意味を広げて「本来、広く人間の行う情報処理の機械化」と考えるならば、「固い論理」に基づく上記の従来パラダイムの限界は明らかである。それは想定された状況（閉じた世界）での特殊な情報処理方式であり、一見無駄がなく効率的だが、余裕がなく柔軟性に欠ける。そのような逐次処理方式が実際に効率を含めて有効な範囲は意外と狭いことがわかる。事実、記号と論理を主体とし誤りを許さない従来の逐次方式の限界は、巨大ソフトウェア開発の困難さ（ソフトウェア危機）や、固くて狭いマンマシンインタフェースへの不満、そして多機能で融通性を持ったシステムや、人間に近い柔軟な知性を持った情報処理へのニーズ、といった形で現れている。

従来方式の単なる延長と計算パワーの増大では解決困難な情報処理の多くの問題、従って今後の新情報処理の扱うべき問題領域は、

- 問題や情報自身が曖昧性や不完全性を含む
- アルゴリズム（解法）がよく分からない、従って定式化（プログラム）出来ない
- たとえ出来ても、逐次方式では膨大な時間が掛かる（組合せ的爆発）
- 厳密な最適解でなく近似解でよいから高速（実時間）に得たい
- 条件や状況が時間とともに変化し、自律的な適応性が必要
- 不測の事態に対しても、ダウンすることなくそれなりに対処できること

といった性格のものであり、ill-defined な極めて多くの問題領域を含んでいる。

従来方式がこれらに対して抱える基本的な問題点と、認識すべき「現実情報の持つ性質」は、次の3点に要約されよう。

- 曖昧あるいは不完全な情報の表現および処理の欠如 [情報の部分性・不確定性]
- 多数の要因が相互に複雑・ダイナミックに絡み合った問題の記述および処理原理の欠如 [情報の相互関連性・並列性]
- 適応性や汎化性の欠如 [情報の変容性・変動性]

そしてこれらは、実はさまざまなレベルでの情報の評価と近似の概念の欠如に起因している。

一方、人間はそのような状況においても実にうまく情報処理を行っている。全ての情報を一律にまともに処理するのではなく、状況に応じて必要な（重要な）情報とそうでない情報とをすばやく評価し、階層的な知識体系に照らして適当に要約・近似を行い、効率よく（手を抜きながら）柔軟に処理を行っている。

従って、今後ますます情報の溢れる情報化社会においては、そうした情報の評価と適切な要約・近似を積極的に取り入れた柔軟で効率よい情報処理技術を確立することは、必要不可欠で緊急な研究課題となっている。

2.1.3 新パラダイムとしての柔らかな情報処理

以上に述べた情報処理技術の流れと技術的社会的な要請をふまえて、従来の個別逐次的な固い情報処理方式の抱える問題点に対処し、その枠を越えて、21世紀を目指した新しい情報処理パラダイムとしての「柔らかな情報処理」（人間に近い柔軟で高度な知的情報処理）を展開するためには、まず、これまで切り捨てられていたもう一つの情報処理の側面である直観的情報処理を、もう一度基礎に戻ってその原理から研究し、新しい並列分散情報処理技術体系として大きく育てる必要がある。そして従来の論理的情報処理と統合（融合）していかなければならない。

そのためには、現在の分極化した記号処理とパターン処理とのギャップ、および論理的手続的な処理と直観的総合的な処理とのギャップを止揚し、非常に多数の多値（アナログ）量が空間的・時間的に分散的に存在するパターン情報と、集約的表現として論理的な構造を持った記号情報とを統一的・総合的に扱えるような、両者を包含できる情報処理の一般的な枠組みを構築した上で、根底となる論理のレベルから、「柔らかな情報処理」の理論的枠組および理論的基盤を構築する必要がある。

扱う変数が多種多様で数が多いことから、そのような「柔らかな情報処理」に必要な、そしてそれを特徴づけるさまざまな機能が導かれる。まず、ある時点での世界の完全な状態を知ることが実際的には不可能になる。従って、情報の不完全さ、曖昧さは不可避となり、これらを許容する柔軟な枠組みが必要となる。値の決まらないものや確率的にしか決まらないものを含む多くの変数を、従来方式で個別逐次に厳密に処理することは不可能となり、それらを全体として並列的総合的に取り扱う処理方式において情報を統合する機能、またそのような処理手続きを記述することも難しい場合には、問題解決（情報処理）の手続きを明示的に記述せずにすむ学習・適応機能が必要となる。

さらに、そうした処理過程を実時間で実現するためには、計算基盤として現行方式の並列化・分散化の枠を越える新しいパラダイムの「超並列超分散情報処理」が必要である。そこでは、自律・協調的に、あるいは自己組織的に処理過程を実行するメカニズムが必要となろう（「超」の意味はその意味であり、単に大規模というスケールの問題として捉えるべきではない）。「柔らかな情報処理」は、この意味で「超並列超分散情報処理」と密接な関係にあり、前者の処理機能は、その実践に適したアーキテクチャといった後者の処理形態を規定あるいは示唆するであろうし、また前者の実時間での実現と応用は後者の強力な計算基盤を必要とする。

このように、新パラダイムとしての「柔らかな情報処理」とは、従来の確定的な世界での完全情報の逐次厳密な処理の枠を越え、より一般的で統一的な立場に立って、広く実際の情報の持つ曖昧さ・不確かさ・不完全さ、そして変容性・変動性を許容する情報表現と評価・近似の枠組みにおいて、記号やパターンといった多種多様な多数の情報を並列・同時に総合的かつ柔軟に処理し、またその枠組みの上に適応・学習機能を持つといった、人間に近い柔軟性と適応性を持った情報処理をいう。

そのポイントは、現実世界（利用者も含む）の生データから「現実的」な解を求めること、つまり生の情報（部分的な情報、解釈の定まらない曖昧な情報、矛盾を含む情報、不確かな情報）を総合し重要な情報を抽出して、実時間でもっともらしい解を（必要な範囲で近似的に）得ること、そして結果を現実世界に提示することのできる、いわば現実的情報処理といえよう。

2.2 柔らかな情報処理の技術体系

2.2.1 新情報処理技術のキーワード

パラダイムとしての「柔らかな情報処理」を、新しい情報処理技術として展開するうえで、まずそれを特徴づけるいくつかのキーワードの意味と相互の関わりについて、それらを掘り下げて考察しておく必要がある。

2.2.1.1 柔らかさ

「柔らかさ」とは、論理と記号操作を主体とする従来の厳格な逐次情報処理の持つ「固さ」に対比して用いられている。従って、補集合としての多様性があり、そこにはさまざまな意味が込められている（頑健性、信頼性、適応性、汎化性など）。処理機能としての「柔らかさ」は、基本的には以下のようにまとめることができよう。

- 不完全・曖昧・不確かな情報をも許容してそれなりに処理できる柔らかさ
- 相互に関連し合った情報をそのまま統合（総合）して処理できる柔らかさ
- 状況に応じて情報を適切なレベルに要約し近似を行って処理できる柔らかさ
- 一を聞いて十を知るといった融通性（汎化性）を持って処理できる柔らかさ
- 時間や状況とともに変化する情報にも適応してしなやかに処理できる柔らかさ

そして、このような機能としての柔らかさは、処理方式やシステムとしての柔らかさ、さらには外界や人とのインタフェースの柔らかさなど、情報処理の側面や応用の局面において、さまざまな形での「柔らかさ」となって現れるが、それぞれ具体的に追求されねばならない。

これらの「柔らかさ」を支える最も基本となる機能は、先にも述べたように、「情報の統合機能」と「学習・自己組織化機能」である。そしてそれらを支える計算基盤が「超並列超分散情報処理」の枠組みである。従って、パラダイムとしての「柔らかな情報処理」は、より具体的な機能的な側面での言い方をすれば、「統合・学習型情報処理」と言うこともできよう。また、計算レベルでの処理形態的な側面を強調すれば「超並列超分散情報処理」と言うこともできよう。

2.2.1.2 統合機能

ここで、「統合」と言うキーワードも、従来の個別分析的で分極化した情報処理方式やシステムへのアンチテーゼとして、情報処理のさまざまなレベルにおいて多義的に用いられる。

まず、より広い意味でパラダイム的には、

- 分極化・分業化された現在の論理的情報処理と直観的情報処理の統合
- 記号処理とパターン処理の統合
- 計算原理・計算モデルとしての逐次局所処理と並列分散処理の統合（例えば、フォン・ノイマン型コンピュータとニューロコンピュータの統合）

といった形で述べられる。そこでは、単に従来型をハイブリッドにするだけではなく、それらを統合し止揚する意味が込められている。

また、システムレベルでの「統合」としては、

- 要素機能（認識、推論、学習、最適化、行動など）の有機的な統合
- 部分と全体の統合

などが挙げられるが、そこには、単なる部分の組合せでなく、部分要素が他の部分あるいは全体と有機的に相互作用して、全体として統合されて新たな機能を実現することが期待されている。これはさらに、「機械と人との統合」といったヒューマンインタフェースの場面にも展開されよう。

これらの「統合」の意味、そしてそれらを成り立たせる条件を更に突き詰めて考えてみると、より根元的なレベルにおいて、

- 情報階層の統合（記号情報とパターン情報の統合、融合）
- 多数の多形態情報の統合（情報要約、総合判断）

といった、情報の縦の階層レベルあるいは横の空間的な広がりにおける多様な表現形態（モダリティー）を、それらの内包する曖昧さや不確かさを許容しつつ如何に統合的に処理をするかという「情報の統合機能」が中心的な課題であることがわかる。そこでは、上位情報表現形態を如何に作り出すか？（情報要約）、下位レベルでの情報形態と処理内容が上位レベルにおける相互作用の機能とどのように結びついているのか？、さらに記憶・知識がどのような形で関係するのか？、が重要な問題となる。概念形成や学習の問題、認識や推論の問題も、こうした各種の情報モダリティーとそれらの関連（統合過程）の中で考える必要があろう。

2.2.1.3 学習・自己組織化機能

「学習」というキーワードは、古くて新しい概念である。そこにも情報処理の側面とレベルにおいて、

- 外界の情報構造を概念・モデル・知識として形成する機能
- 情報の処理機能・方式を習得する機能
- さらに人間の感性や個人差へのシステムの適応機能

など、「適応化」、「最適化」、「自己組織化」としてのさまざまな意味が含まれる。

新情報処理技術では巨大システムを扱うことになるが、その場合、はじめからシステムの全ての構造を詳細に与えることは殆ど不可能となる。従って、システムの概要をモジュール化し、それぞれの内部構造や処理機能、モジュール間の結合構造に柔軟性（自由度）を持たせ

て、その後の使用状況に応じて最適となるように、学習・自己組織化機能を持ったシステムとして設計しておく必要がある。これによって、環境の違いや経時的な変化に適応する柔軟さや、さらには予期せぬ変化に対処しえる頑健さをシステムに持たせることができる。

このように、学習・自己組織化は、情報処理の枠組みを、評価と最適化そして近似の枠組みにおいて、適応的に最適化するメタな処理過程とみることができ、階層に応じて、また最適化の方式において、さまざまな形での学習・自己組織化が考えられる。

2.2.1.4 超並列超分散情報処理

以上のような「柔らかな情報処理」の実現には、多形態情報を分散的に表現し、並列分散的に実時間で処理することが要求される。現行方式の並列化・分散化の枠を越える新しいパラダイムの「超並列超分散情報処理」が必要である。人間の感覚系、記憶、思考の階層の中では、様々なモジュールが殆どランダム（非同期）に動作し相互作用する中で、ある集団的処理が起こる。この処理は極めて無駄が多い上に、常に完全な論理が展開されるわけでもない。しかしある程度型にはまった処理（統合処理）が独立的に進行し、そのいずれかが選ばれるという「競合と協調」のイメージである。従来の情報処理パラダイムは、曖昧性を排除して効率を図り無駄をなくすことだったが、新情報処理はこの考えを変えるであろう。そこでは、曖昧な対象（情報）を超並列超分散システム内でどうモデル化（表現）するか？、また階層性やモダリティが表現できる（しやすい）こと、が重要な課題となろう。

2.2.2 技術体系の枠組み

「柔らかな情報処理」を新情報処理技術体系として大きく育てるためには、その原理（記述の枠組と処理原理）を究明し新技術の理論的な基盤の確立を目指すとともに、超並列超分散処理のための計算基盤を開発・整備して、その上に新情報処理の基本要素となる新機能を実現し広く実際の応用の展開を図ることが重要である。そしてこれらが新情報処理研究開発の内容となる。応用のための新機能、その理論基盤としての基礎理論、そしてそれらを支えるシステム基盤（計算基盤）、この3層構造が新情報処理研究開発の大枠である。以下、それぞれの概要を示す（図2.2参照）。

(1) 理論基盤（基礎理論）

新情報処理技術の理論的基盤として、多種多様な情報の記述の枠組みと統合処理の原理、さらには認識や学習・自己組織化といった新情報処理の新機能の基礎となる柔らかな情報処理の理論体系の確立を目指す。もちろん、理論の実践に適した計算モデルやアーキテクチャといった計算基盤への示唆を与える理論的研究も重要である。

(2) 新機能・応用

新情報処理技術の応用の基礎となる新機能としては、まず要素となる高次の機能として次の4つを挙げることができる。

- 柔らかな認識・理解機能
- 柔らかな推論・問題解決機能
- 柔らかなヒューマンインタフェースとシミュレーション
- 柔らかな制御機能

そしてこれらを実現するために基本となる機能としては、次の3つが考えられる。

- 多形態情報の統合機能（パターン情報と記号情報の統合も含む）
- 不完全情報処理機能（曖昧情報処理機能、意味情報処理機能も含む）
- 学習・自己組織化機能（適応化、機能分化、階層化も含む）

(3) システム基盤（計算基盤）

新情報処理技術の計算基盤として不可欠な、そして柔らかな情報処理に適した超並列超分散情報処理を行うシステム（ニューラルシステム、超並列システム、およびそれらを統合したシステム）の研究開発を行う。また基礎技術として、それらのシステムのためのアーキテクチャ、ソフトウェアの研究開発も行う。

2.2.3 研究開発協力の枠組み

新情報処理技術の研究開発は、新しい情報処理パラダイムとして「柔らかな情報処理」の実現を目指し、統合・学習機能を備えた並列分散情報処理の原理究明と理論基盤の構築、および計算基盤（超並列超分散処理）の構築の上に、認識・理解・推論・問題解決・制御など、柔軟な知的情報処理の要素となる新機能の実現と広範な応用を目指す総合的かつ構成的（工学的）なプロジェクト（むしろ、より広大なプログラム）として位置づけられる。

従ってそこでは、理論基盤、新機能応用、計算基盤における研究開発の密接な連携が必要であり、学際的、国際的な規模での研究開発協力の枠組みが必要とされる。

特に、理論基盤の役割は、新しいコンピュータのアーキテクチャ、さまざまな新機能応用システムの設計原理・基礎モデルを与え、全体を統合する柱として極めて重要であり、これら計算基盤、応用との密接な連携、他の関連分野の基礎理論との学際的かつ国際的な研究協力が必要である。

より人間に近い情報処理

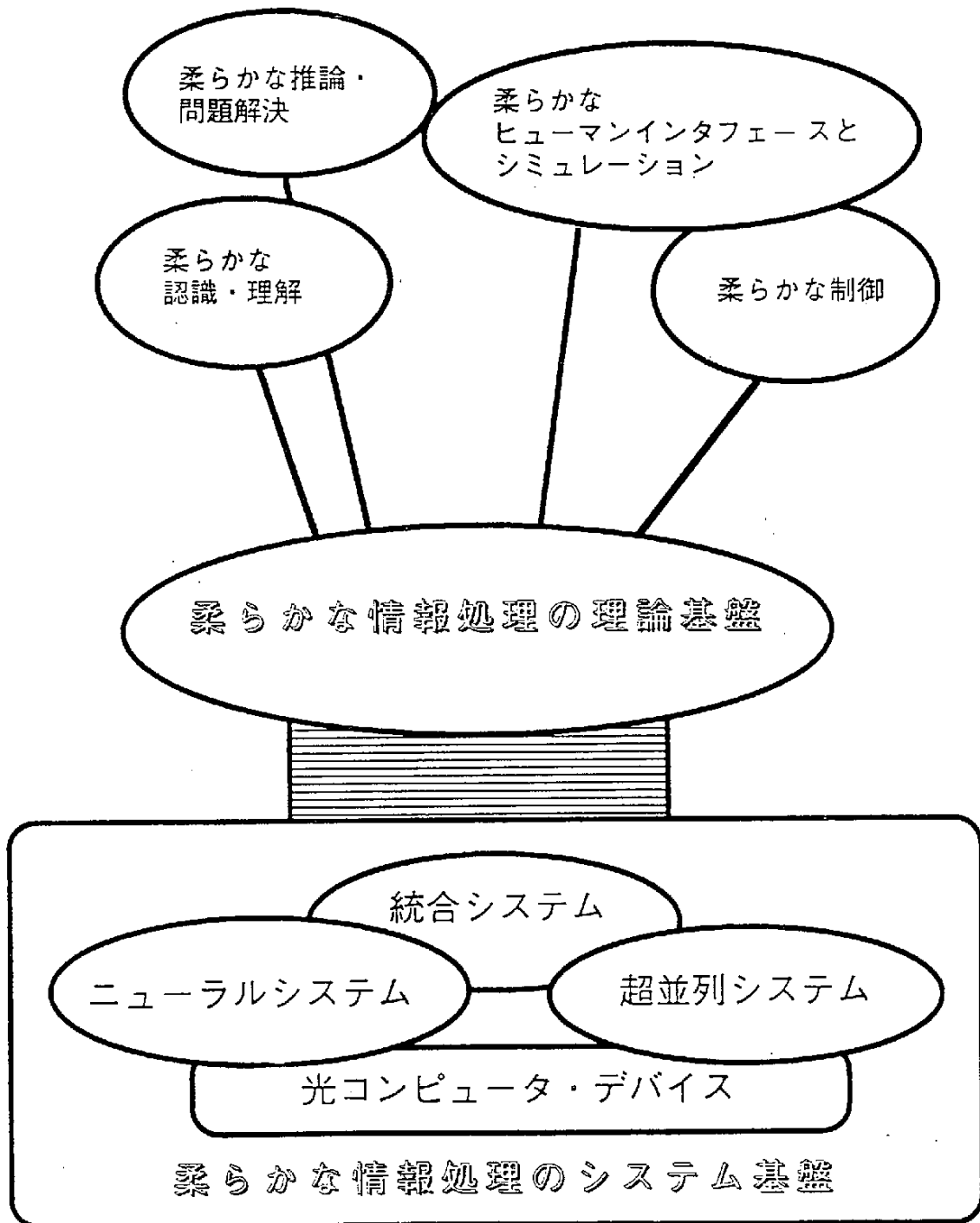


図 2.2: 新情報処理技術の体系

第 3 章

柔らかな情報処理の理論基盤

3.1 情報処理の一般的な枠組み

「柔らかな情報処理」の理論基盤について考察するにあたって、まず、情報処理の一般的な枠組みについて考察する（図 3.1 参照）。

情報処理は、基本的には、入力情報（表現 Π_1 ）を出力情報（表現 Π_2 ）に変換する過程（処理 Ψ ）と考えられる。もちろん、得られる出力は何らかの意味で好ましいものでなければならず、そこには何らかの評価 Γ が存在する。そしてそのような評価に基づき、処理 Ψ は可能なかぎり最適化される（ Ω ）。最適化においては、何らかの知識（ K ）が必要とされる。フィードバックループとしての最適化は、処理に対するメタな処理であり、それは学習・自己組織化として捉えることもできる。その場合、最適化は知識に対しても行われる（アクティブなシステムでは、入力の選択などの最適化もありえる）。

従来の逐次情報処理は、入力から出力への変換過程（処理 Ψ ）をアルゴリズム（プログラム）として厳密に陽に与える方式であり、評価や最適化および知識といったメタな部分は、通常、システムの設計者やプログラマーの頭の中にある。これに対して「柔らかな情報処理」は、前章で見てきたように、図中における情報処理の基本要素である情報の表現・処理・評価・最適化（学習）の枠組みを柔らかなものに拡張し、現在の分極化した情報処理技術を統合して、より柔軟で豊かな情報処理技術を展開しようとするものである。両者を図に照らして対比的に示すと、

従来の逐次手続的情報処理

固い論理に基づく

Π : 個別情報（記号 / 数値情報）

Γ : 真 / 偽が中心 (implicit)

Ψ : 逐次的な個別情報処理（手続き、変換規則）として与えられる (explicit)

Ω : 設計者の頭の中、あるいは試行錯誤的 (implicit)

K : 設計者（エキスパート）の経験 (implicit/explicit)

新情報処理（柔らかな情報処理）

柔らかな論理に基づく（拡張）

Π : 多形態情報（パターン＋記号）（拡張）

Γ : 柔らかな（曖昧さ、不確かさ、不完全さを許容する）評価（拡張）

Ψ : 統合的な処理（可変、評価 Γ に基づき学習 Ω によって習得）(implicit)

Ω : システムに積極的に組み込まれる

K : 例からの学習によって帰納的に形成

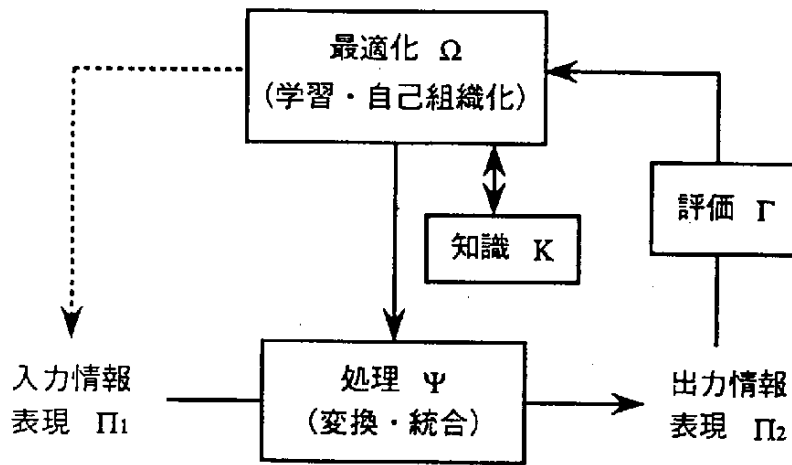


図 3.1: 情報処理の一般的な枠組み

のようになり、「柔らかな情報処理」の枠組みは、従来方式をその特殊な（限定された狭い）場合として含む、より一般化された枠組みとなっていることがわかる。

3.2 知的情報処理研究の現状と問題点

ここで、知能のモデル化とその工学的実現（機械化）を目指す現在の知的情報処理の研究分野について、その現状と課題を概観してみよう。

(1) 人工知能・知識工学

記号表現と形式論理（固い論理）の決定論的な立場から、主に高次の知的推論の機械化の問題を追求してきた。論理の演繹的側面と知識表現に関しては一定の成果が見られるが、その下部を支える曖昧な帰納的側面（知識獲得と学習、いわばパターン認識の問題）の形式化が課題である。最近では、曖昧な命題を操作するファジィ推論（論理）も再考されているが、そこでのメンバーシップ関数や演算は必然性に欠ける嫌いがあり、帰納的側面からの一貫性のある議論は乏しい。その他、「固い論理」の柔軟化の方向としては、様相論理や時制論理などの研究、また並列分散化の傾向としては、並列推論、分散 AI、エージェント指向などの研究があるが、そうした論理と記号処理的な方式の延長だけでは、知能へのアプローチとして記号世界の限界を脱することは困難と思われる。新しいパラダイムの変換が必要と思われる。

(2) パターン認識と学習

確率・統計など非決定論的な立場から、主に低次の認識・学習といった直観的情報処理（主に帰納的側面）の機械化の問題を扱ってきた。特に統計的決定理論の応用（流用）は、初期の理論において、誤り最小識別（ベイズ識別）のための理論として成功したが、本来、推論と

いった論理の演繹的側面の問題意識は少ない。その後、研究は個別専門化して、実際的な手法、特に特徴抽出の技法と実験的な評価が中心となり、パターン認識全体としての理論的枠組みの意識は希薄となっていった。最近では、知識の利用など、高次の人工知能の手法との結合も試みられているが、なかなかしっくりとは行かないでいる。また近年、「ビジョン」に関する理論として、不良設定問題（例えば2次元画像から3次元シーンを理解する問題）を制約付き最適化問題の枠組みで解く正則化理論など、新しいアプローチがあるが、そこでの制約条件（エネルギー関数）の導入は、未だアドホックな感じを免れない。

(3) 多変量データ解析

対象に対して観測された多数の特性値データを個別に解析するのではなく、相互関係（相関）を考慮に入れて同時に統合的に取り扱い、データの持つ情報を効率よく要約し、我々の的確な評価や直観的総合的な判断に有用な形にまとめるデータ解析法である。主に曖昧な対象を扱う人文・社会科学において発達してきたが、柔軟な知的情報処理に積極的な形で組み込んで工学的な応用を図る立場は重要であろう。特に質的（記号的、2値論理的）なデータを量的（数值的、位相的）なデータに変換して取り扱う数量化理論は、質的パターンを量的パターンに還元する過程、また高次の記号レベルでのパターン認識や理解のモデル・手法として利用できよう。しかし、手法の多くは線形モデルでの定式化のため、それが限界ともなり、また手法の相互関係や本質的な意味は明確ではない。

(4) ニューロコンピューティング

近年、ハードウェア技術の飛躍的發展にも支えられ、コネクショニズム、ニューラルネットなど、並列分散情報処理（PDP）の実際的で応用的な研究が盛んである。これは現在のところ、過去のパターン認識、特に学習の研究（パーセプトロン、連想記憶など）の実践レベルでの再燃、また記号論理的な認知研究の限界に対する反動と見るべきであろう。脳の情報処理様式を参考とする並列分散学習型の情報処理の原理的な可能性の追求、そして人間に近い柔軟な情報処理の可能性を示すものとして興味深い。しかし、そこでの並列非線形の相互作用による情報処理は解析が困難であり、結果の解釈や何が本質的であるかの理解を困難としている。またパターン認識理論（特にベイズ推定や多変量データ解析）との関係も、あまり明確にされていない。

このように、知的情報処理研究の現状は、高次の「思考」レベルに関する人工知能や知識工学における質的（記号的、論理的）情報処理と、低次の「認識」レベルに関するパターン認識や多変量データ解析、またニューロコンピューティングにおける量的（数值的、位相的）情報処理とに分極化（分業化）している。そして両者の間には未だ大きなギャップがあり、統合的ではない。これは、前章で指摘した論理的側面と直観的側面との分極化に相当している。

本来トータルで統合的な知能の機能的側面としての「認識」と「思考」、そして「学習」の側面が、分断的にそれぞれの方法論でモデル化されていて、相互の関係があまり意識されていない。そしてそのことが、それぞれの展開の限界と問題点をなすとともに、統合化を困難にしている。

今後、知的情報処理技術の応用範囲の拡大と高度化を図り、より人間に近い「柔らかな情報処理」の研究開発を押し進めるためには、これまでの分極化された質的情報処理の体系と量的情報処理の体系とのギャップを補間し統合するような、統一的な立場からの新しい理論的な基礎付けが望まれている。

3.3 研究の目標

以上に述べた研究の現状と問題点を踏まえて、「柔らかな情報処理」の理論基盤としての研究の目標は、次のように設定されよう。

これまでの個別分極化された関連分野の理論を整理統合して、背後のより本質的な一般理論の構築を目指すとともに、そのような理解に立って、より実的な応用に即した新しい理論を展開する。これによって、新情報処理、すなわち機能としての「柔らかな情報処理」、またその計算方式としての「超並列超分散情報処理」の理論基盤を構築する。

具体的には、多変量データ解析、パターン認識、学習、確率的推論などを統合する「柔らかな論理」とベイズ推定の枠組（正則化理論を含む）を明かにし一般理論の構築を目指すとともに、その実的な意味での近似、および並列分散コンピューティング方式として、ニューロコンピューティング、確率的弛緩法、アニーリング、制約充足・伝播などを包括する統合型コンピューティングの理論を展開する。

3.4 研究の内容

3.4.1 パターン認識の再認識

そのためには、原点に立ち戻って、人間の持つ柔軟な知的情報処理の基礎をなす「認識」の問題を再検討する必要がある。いわば「パターン認識の再認識」（温故知新）が必要である。

パターン認識は、情報処理の入口として重要であるばかりでなく、連続的分散的情報表現（パターン）と離散的局所的情報表現（概念、記号）との接点にあって、本来、並列的な総合判断を特色とする。またパターン情報の持つ曖昧さや不確かさを扱わねばならない。その意味では、「柔らかな情報処理」の基本的な課題を含んでいる。また論理の基本的な側面も含んでいる。帰納的側面としての知識の獲得：事例（データ、経験）から、個々のパターンの特徴と概念との確率統計的な対応関係を学習することと、演繹的側面としての識別：未知パターンに対し、その特徴と知識から概念を推定することである。

従って、単に既存の確率論の応用としてパターン認識を考えるのではなく、パターン認識を特徴抽出を含めたトータルな枠組みにおいて理論的に考察し、背後に内在する「柔らかな論理」の現れとしての確率・統計的な論理構造を考察することが重要である。このような柔らかな論理の構造を明かにすることは、知識の学習形成、認識と推論、並列処理、総合判断といった、柔軟な知的情報処理の統合化の基礎として重要である。

特徴抽出に関する非線形理論の研究によれば、パターン認識や学習の背後の本質的な枠組みとして、ベイズ推定の枠組み、および帰納的確率論理（階層化された確率論理）としての「柔らかな論理」の枠組みが帰結される。そして、その線形近似として多変量データ解析の諸手法が統一的に眺められる。

また、ニューロコンピューティング、特に近年、パターン認識や制御の学習に盛んに応用されている多層アナログパーセプトロンの誤差逆伝播学習は、実は上記のベイズ推定の枠組みを、ネットワークの表し得る非線形変換の範囲で最小2乗近似していることが示される。

また、「柔らかな論理」の枠組みは、従来の確率論を階層的な確率構造の総体を扱えるように拡張したものとなっていて、上位概念（記号）間の関係（位相）が、それらが下位概念に対して持つ確率的対応関係の統計的要約として帰納されることを示唆している。これは、記号論理的な構造体と数値的な情報とを階層的に統合するための理論的な枠組みともなり、確率的な推論（帰納と演繹）や類推といった柔らかな推論方式の基礎となろう。

3.4.2 制約充足パラダイム

このように、不確かな情報を扱う「柔らかな情報処理」を、一般に確率統計的な推定の問題として「ベイズ推定」の枠組みから捉えるパラダイムに対して、もう一つの観点は、いわゆる「制約充足パラダイム」である。これは、情報処理における問題解決を、与えられた制約を満たす解を求める問題として捉える（例えば、連立方程式）。

しかし実世界の多くの問題では制約条件が完全に与えられることは少なく、部分的に与えられるのみである（情報の部分性・不完全性）。従って論理的には、解は一意には決まらない（不良設定問題）。このような場合にも「それなりの妥当な解」を求める「柔らかな情報処理」の立場からすれば、他の何等かの評価規準を主観的な制約条件として付け加えることによって、そのような解を一意に求めることができる。

先に述べた正則化理論は、このような制約充足の考えを条件付き最適化問題として定式化したものであり、そこでは、制約条件は一般にエネルギー関数（物理からのアナロジーであって、いわゆる評価関数と考えてよい）で統一的に表される。そして最小化すべき目的関数は、[客観エネルギー] + [主観エネルギー] で与えられる。一般に、客観エネルギーは「モデルとデータとの誤差」、主観エネルギーは「モデルに関する複雑さなどの評価」であり、ある種の最小2乗モデルフィッティングと考えられる。

ニューロコンピューティングのネットワークとして、エネルギー最小化ダイナミクスによる Hopfield ネットワークや Boltzmann machine に代表される相互結合ネットワークがある。これらは、並列分散処理の新しいパラダイムとして、離散組合せ最適化問題の柔らかな（組合せ的爆発を回避する）解法として応用されている。また視覚情報処理への応用としては、初期視覚のレベルではあるが、画像修復の確率的弛緩法や、その他の不良設定問題の正則化の処理方式として応用されている。これらは、いわゆる制約充足パラダイムを、相互結合ネットワーク上のダイナミクス（並列分散処理の逐次反復計算）として実行していると見なすことが出来る。問題をニューラルネット（一つの並列分散処理モデル）や熱力学的なダイナミクス（確率的弛緩法 + アニーリング）で解くことは、必ずしも問題の本質的な理解にはつながらないが、一つの実践的な（近似）計算方式としては大切である。

理論によれば、大域的な性質（エネルギー、ポテンシャル）が局所的な関係（Markov Random Field: 条件付き確率構造）に等価に対応づけられ、そして前者の最適化問題が統計的推定（ベイズ推定や最尤推定）の枠組みに帰着されることが知られている。このことは、上記のベイズ推定と制約充足のパラダイムが統一的に関連を持つことを示唆している。実際、ベイズ推定での先験確率の主観性は、制約充足の主観エネルギー項に対応している。こうした主観項は、アドホックに流れやすいが、情報処理における主観的な評価や価値の定式化の問題として重要であり、実は情報処理の本質的な部分でもある。

3.4.3 一般理論構築への確率論的アプローチ

以上の考察を踏まえて、一般理論構築への確率論的立場からのアプローチ（戦略）の素描を以下に示す。

- 一般的な情報表現の枠組みとして、確率表現を用いる（時間的な因果関係も条件付き確率として）。
- すべての情報および知識は、その変数空間上の（主観的な、拡張された）確率分布に関する制約であると考え。通常の情報は、ある時点における個々の確率変数（あるいはその

組合せの値)に関する制約、通常の知識は、ある程度の時間範囲において成り立つ確率分布に関する制約(構造)と考える(例えば「柔らかな論理」)。

- このとき、情報処理の問題は、一部の変数についての制約(値や条件)が情報(証拠)として与えられときに、他の変数(仮説)の値を、知識の制約のもとに最尤的に(事後確率最大的に)推定する、一般的な確率的推論(ベイズ推定)の問題として定式化される。
- これを、そのまま逐次弛緩的に最適解探索する立場が制約充足や相互結合ニューラルネットであり、関数(写像)の形で陽に近似する立場が多変量解析や多層ニューラルネットである。
- 制約充足原理や正則化理論におけるエネルギー関数 E は、Gibbs 変換 $P = \exp(-E/T)/Z$ によって事後確率分布 P と対応づけることができ、エネルギー最小化は事後確率最大化、すなわちベイズ推定であると解釈できる。
- 推定を効率的に実現するための唯一の手段は、分布関数を必要な範囲で局所的に、簡単なモデルによって近似することである。近似がうまくいけば、実際のな速度で問題の解を求めることができる。
- こうした広い枠組みにおいて情報処理の問題をとらえることにより、パターン認識・学習や人工知能の問題は、モデルおよび変数値の推定問題として、統一的にとらえられ、これらをベースとして「柔らかな情報処理」の理論的基盤が構築されよう。

以上が統一的な一般理論の構築の概要であるが、実際的には、その近似的な確率計算の手法の研究などが重要である。その際、理論の大枠を、例えば個々の問題の特殊性を考慮して、簡略化し具体化すること、計算メカニズムまで帰着させることが重要である。また、時間的なダイナミックスを含められるような拡張も望まれる。計算基盤の発達は、こうした新しい情報処理パラダイムのリアリティを十分支えるものと思われる。

3.5 研究項目と課題

柔らかな情報処理においては、情報処理の基本要素(情報の表現、処理、評価、学習・自己組織化)の枠組みを柔軟なものに拡張する必要がある。従って、柔らかな情報処理の理論の研究は多岐に渡るが、基本的には次の研究項目に整理される。

- 情報の柔らかな表現
- 情報の柔らかな処理
- 情報の柔らかな評価
- 最適化、および学習・自己組織化

以下、それぞれの項目について、研究すべきより具体的な課題を示す。

3.5.1 柔らかな情報表現

記号処理では、離散的な記号による情報の集約的表現が前提とされ、パターン処理では、連続な数値による情報の分散的な表現(位相的表現)が前提とされている。これらの情報を柔軟かつ統合的に取り扱うためには、両者を包含し不完全性や曖昧性を許容する記述の枠組みとして、柔らかな情報表現の理論をまず構築する必要がある。

- 記号情報とパターン情報を含む多数の多形態情報の統合のための柔らかな表現の枠組
- 多変量データ解析における数量化理論の拡張
- 記号、代数系の理論に位相的表現という視点を導入すること
- 分散的表現と、空間的・位相的な表現の枠組

3.5.2 情報の柔らかな処理（統合）

柔らかな情報表現によって記述された情報を、曖昧性や不完全性を許容しつつ近似的に最適に処理するとともに、それらを統合的に処理することによって、有用な情報を得るための柔らかな処理（統合化）の理論が必要である。また処理過程自体の記述も柔らかな表現として処理の対象にできるような、処理の階層性を保証することが必要である。

- 多形態情報の統合と情報抽出（要約・近似）（認識、総合判断、理解）
- 線形および非線形多変量解析の理論、柔らかな論理の応用
- 最適化や最適解探索
- 非線形最適化による離散問題の近似解法
- 制約充足や正則化による ill-posed 問題（不完全問題、逆問題）の処理（解法）
- 知識とデータの柔らかな統合による柔らかな推論・連想・類推
- implicit な意識下の直観的处理と explicit な意識上の論理的处理との統合
- 処理の階層化

3.5.3 情報の柔らかな評価

上記の情報の近似処理や統合処理を含む柔らかな処理においては、処理結果の評価が重要であり、最適化とも密接に関係する。また処理モデルの選定の評価も、学習・自己組織化と関連して重要である。評価の問題は、理論的にもしっかりと研究整理する必要がある。また応用分野の拡大とともに、そのような評価基準を豊富に拡張することも重要である。

- 柔らかな評価の理論的枠組（近似の良さ、尤らしさの評価、価値や感性も含む）
- 近似誤差の評価
- 結果の確からしさの評価
- 最適解のでる確率的評価
- 価値観や感性を評価に取り込む方法

3.5.4 最適化、および学習・自己組織化

処理結果の評価や問題の特性を利用して、処理過程を近似的に最適化する過程として学習や自己組織化を考えることができる。すなわち、学習・自己組織化とは、処理過程を対象とした処理（メタ処理）である。さらに、こうした学習・自己組織化自体も、より高次の処理の対象となるように処理の階層を構築できる必要がある。その場合、ジェネティックアルゴリズムや発達の概念など、生理学や心理学から示唆される知見を踏まえた研究も重要であろう。また、学習可能性や汎化能力の評価といった基礎的な問題の理論研究も大切である。

- 柔らかな論理に基づく帰納推論としての学習法
- 柔らかな知識の形成法（階層化）
- 機能のモジュール化・構造化・階層化、およびその自己組織化
- 情報処理の階層化による学習・自己組織化の階層化
- 学習可能性や汎化能力の評価の基礎理論

3.6 研究の進め方

前半では、ニューロコンピューティングや多変量解析など、これまでの並列学習型情報処理の理論やモデルを、「柔らかな論理」の観点から理論的に整理するとともに、比較的低次の認識や推論など基本的な新機能の構成理論を展開する。また具体的なインプリメンテーションと検証を通して、問題点や限界を明らかにする。

後半においては、これらの上に、より高次のより複雑な（構造化された）機能実現のための理論・モデルへと、構成的に理論のビルドアップを図り、柔らかな情報処理の理論体系の構築を目指すとともに、システムの応用研究も行う。この段階では、研究実験環境としての超並列システムの開発がなされていて、それらを利用できることが望ましい。

理論の研究においては、理論のための理論研究に陥ることのないように、絶えず他の学問領域（神経科学、認知科学、情報科学）の成果や知見をにらみつつ、応用を目指した方向で研究を進める必要がある。そのためには、他との有機的な連携が重要であり、それを確保するための研究開発体制をしっかりと考えておく必要がある。理論、アーキテクチャ、応用といった従来の線形な展開フェーズではなく、かといってそれぞれが独立平行に進んではならない。理論と他がうまく連携できる新しい強力な仕組みを考えることは、研究開発体制の重要なキーポイントとなろう。

そのような理論と応用の連携の中継点は、基本機能や要素機能のレベルとなろう。このレベルにおいて、理論グループはシードを出し、応用グループはこれらを実際の応用システムに生かす。また逆に、応用グループは具体的な問題をこのレベルに掘り下げて理論グループに提起し、理論グループはこれを受けて、新たな理論・モデルの構築を行い、フィードバックを図る必要がある。

第 4 章

柔らかな情報処理のもたらす新機能

4.1 新機能領域の展望

従来の情報処理方式は、完全に整ったクリーンなデータの入力や、データの発生源についての完全な情報が利用できることを前提としている。このため、利用者は、実現したい機能に応じて情報処理方式が前提とする枠組に適合したクリーンなデータやデータ発生源についての情報を入力／設定することが必要であった。言葉を替えれば、これまでの情報処理システムは、利用者の努力に助けられて受動的に現実世界の把握を行ってきたと言えよう。さらに、これらの把握結果に基づいて外界を制御する場合も、現在の方式では、十分に素性の分かっている対象を管理された環境の下で操作することを前提としている。この場合も、人間による支援があってはじめて、与えられた枠内で外界に関与することが可能であった言えよう。

近年、情報処理の高度化と分野の拡大に伴って、これらの人間の支援を前提とせずに、(人間を含む)外界を理解し直接外界に働きかけることのできる情報システムを実現し、むしろ人間を支援してその問題解決能力を拡大するような方向での技術革新への期待が高まっている。しかし、“確定的な世界での完全な情報の厳密処理”を基本とする従来の情報処理方式では、

- 1) 曖昧あるいは不完全な情報の表現および処理、
- 2) 多数の要因が相互に複雑・ダイナミックに絡み合った問題の扱い、
- 3) 情報システムの環境・状況への適応能力および汎化機能の実現、

等に対する方法論の欠如のため、これらの要求に応えるのは極めて困難であると認識されるに到っている。

「柔らかな論理」を理論基盤とし、広い意味での超並列システムをシステム基盤とする「柔らかな情報処理」の概念は、上記 1)~3) の問題点を解決するための情報表現と処理原理を確立し、上記の期待に応え得る新たな情報処理技術体系を構築しようというものである。これは、基本的には、外界の変容・変動に対して強固(ロバスト)な情報システムを実現することである。応用システムのレベルでは、例えば、人間の支援や協力に頼らずに現実の世の中において機能することのできる情報処理システムの実現や、多数の感覚モダリティーや自然言語等を駆使したインタフェースを介して人間との相互作用のバンド幅を拡大することで経済、環境問題等の複雑で相互に依存する大規模な問題の解決を支援できるシステムの実現である。これらの応用システムを実現するためには、単一のモダリティーのみに依存することなく多数のチャネルを介した外界との相互作用を通じて能動的に外界のモデルを構成していくための方法論と、入手し得る不完全な情報とモデルに基づく総合的な状況判断の結果に応じて柔軟に処理方策を選択し変更できる情報処理の枠組が必要である。

柔らかな情報処理の技術体系の確立には、求められている個別の具体的な応用システムの基本となる“高次の機能”(新機能)を抽出し、前章で述べられている理論基盤を活かしつつ機能領域に固有の制約を取り入れることによって、それらを実現する必要がある。新機能を要素技術のレベルで眺めると、現実の世界における画像や音声のような曖昧で不完全なパターン情報の柔らかな処理であり、膨大な常識に基づく柔らかな推論を必要とする自然言語の処理である。これらの要素技術を現実的な応用に耐えるレベルで実現するための基盤は、超並列超分散型のアーキテクチャに適合した情報表現と処理方式による信号処理から推論、問題解決、シミュレーションに至る各々のレベルにおける高速処理である。さらに、これらの要素技術を用いてより人間に近付いたインタフェースを実現するための複数のメディアの統合機能、ロボットにおける機能の統合化等のよりマクロ的な機能の実現も必要である。また、個々の機能に内在する共通的な基本機能として学習・自己組織化がある。

このように、柔らかな情報処理技術体系の確立には、相互に関連した様々な領域での様々なレベルの高次機能の実現が必要であるが、以下では、これらの新機能領域を

- 1) 柔らかな認識・理解、
- 2) 柔らかな推論・問題解決、
- 3) ヒューマン・インタフェースとシミュレーション、
- 4) 柔らかな制御と統合化技術、

の四つに整理し、それぞれについて「柔らかな情報処理」の立場からの研究の方向を明らかにするとともに、具体的な研究開発課題とその内容を提示する。また、これら新機能の応用イメージにも言及する。

4.2 柔らかな認識・理解

4.2.1 画像技術

4.2.1.1 現状と問題点

画像の認識とは、外界を観測して得られた画像データを入力として、対象を計測、分類あるいは発見することであり、広い意味で入力画像を“解釈”することが基本となる。例えば3次元シーンの画像から物体を認識するためには、画像から手がかりとなる特徴を抽出する一方、コンピュータ内部に持っている対象のモデルから画像に現れる特徴を予測する。そして、入力画像から得られた特徴とモデルから予測された特徴を照合することによってシーンを3次元的に解釈する。この種の問題では、

- 1) 多数の要因(視覚モジュール)が複雑かつダイナミックに絡まっており、問題の全体を明確に定義することが難しい(不整形問題)、
- 2) 問題を分解して部分問題を定式化できたとしても、与えられたデータだけでは情報が不足し、解が一意に決まらなかったり、また逆に、データが誤差を含んでいるために、データと完全に矛盾しない解は存在しなかったりする(不良設定問題)、
- 3) 解釈の可能性をすべて調べて厳密解を求めようとすると計算量の爆発を招く、

といった困難がある。このことは、我々が外界を認識している過程をアルゴリズム化するように求められても、(今のところ)「よく分からない」し、3次元シーンの2次元投影像を3次的に解釈する場合に、解釈の可能性が膨大で一意に定まらないことも多いという経験から容易に想像できよう。

上記の困難に加えて、情報そのものが不完全であるという問題も抱えている。すなわち、

- 4) 対象を完全に観測することは不可能であり(通常の画像は、ある特定の方向から見た対象の情報を限られた空間分解能で取得しているにすぎない)、また、対象の完全なモデル化も一般には不可能である、
- 5) 入力された情報からの特徴抽出も不完全であり(例えば、完全なセグメンテーションは期待できない)、前段での処理の完全性を仮定すると破綻をきたす、

といった問題である。このような困難のため、個別事例的なアドホックなプログラムを書くということになりがちである。このため、従来実現されているシステムでは対象世界あるいは実現する機能を極端に限定せざるを得なかった。例えば、対象について多面体や剛体の仮定をおくことが多く、簡単な分類を行っているにすぎない。

しかし今後、認識対象を人間を含む自然界に拡大しようとするすると複雑に絡みあった動的な軟体をも対象として取り扱う必要がある。また、現実の世界は情報が時空間のパターンとして分布しており分布の形そのものに意味があり、個々の要素を繊細にみるとかえって不明確になるなど、空間における分解不能性、時間における分解不能性がみられる。このことは情報は個々の要素だけでなく要素相互間の関係に有ることを示している。

このような認識・理解に固有の困難を克服するためにはどうすればよいのだろうか。我々人間の視覚センサ部は特別に高精度なものではなく、入力情報は不正確である。このような個々の不正確な情報から、ある特定の解釈が瞬時に導かれるのは何故だろうか。画像理解においては、「そもそも情報が完全に与えられることはなく、不完全なデータと問題の解空間を限定する“部分的な制約＝知識と仮説”しか与えられない」という観点に立つ必要がある。今後は、このような観点から、入力情報の不完全性に対処し、同時に計算量の爆発を回避しながら近似解を高速に得る研究パラダイムの構築が不可欠である。これは「超並列システム」を想定した「柔らかな情報処理」の研究開発に他ならない。

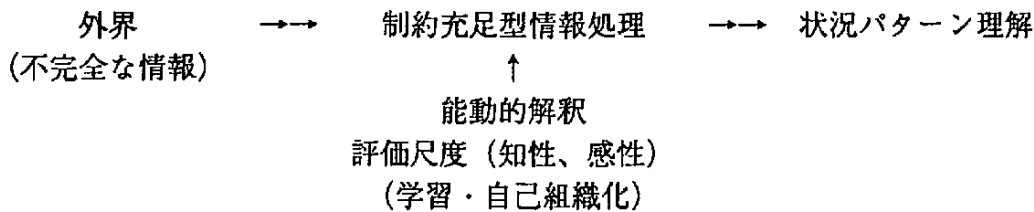
4.2.1.2 研究の目標

人間の持つ環境および状況に対してロバストな認識・理解機能を工学的に実現する。具体的には、外界の情報が不完全で矛盾を含んでいるために数学的に不良設定な認識問題に対して、対象の性質やおかれている状況を制約条件として付加することにより良設定な最適化問題を定式化し、そのための解法について研究開発を行う。また、高速に準最適化を得るために、超並列システムでの実行に適した並列分散処理による近似解法の研究を行う。さらに最終的には、統合認識システムプロトタイプにおいて実現機能を検証する。

(1) 画像理解における最適化問題の定式化

画像理解における上記問題点を克服するために、置かれている状況を把握し、新たな思い込みや、視覚のハードウェア的な制約などの制約条件を導入することによって、制約付き最適化問題として定式化する。すなわち、問題を制約充足問題として捉え、情報の不完全性を許容する形で問題を厳密に定義する。また、このような定式化を明示的に与えることのできない問題

に対しては、事例から問題の定式化そのものを学習するような高度な自己組織化機能も必要となる。



(2) 画像理解のために定式化された問題の解法

制約付き最適化問題として定式化された画像理解の問題を解決するために、多数の変数とモジュールの相互作用による超並列、超分散、協調形の計算を基本として、制約伝搬による制約充足型情報処理手法の研究開発を行う。その場合、厳密解の追求とともに、高速に近似解を得るための近似解法の探求も必要である。

(3) モデルを基礎とした認識

人間は経験を通じて、脳の中に多くのモデルを築いていると考えられる。環境を理解するときに、それらが有機的につながりあわせて使用されるものと考えられる。そこで、人間に近い視覚認識機能を実現するためには、モデルの記憶の形式、モデルの想起・連想法、入力画像から得られる記述とモデルとのマッチングなどについて研究を行うとともに、これらを有機的に結び付ける統一的な枠組を開発する必要がある。また最近、動きに伴って連続的に入力される外界の情報は記号情報だけでなく記号に付随するイメージ情報そのものも記憶されることが考えられて来っており、このようなパノラマ記憶の形式を明らかにし、工学的な実現を図る必要もある。

4.2.1.3 研究の内容

(1) 最適化問題の定式化と目的関数の学習

不良設定問題の解法はパターン認識や学習全般に深く関係しており、これを解くために、通常、目的関数(エネルギー関数とも呼ぶ)を定義し、これの最小値あるいは最大値を探索する最適化問題が定式化される。このエネルギー関数は一般に客観的エネルギーと主観的エネルギーに分解される。ここで、客観的エネルギーは外界から入ってきたデータとモデルとの誤差であるが、この項だけでは上記のような不完全な情報の場合には解けない。そこで、対象の一般的な性質、それが置かれている状況、ものの見え方と認識主体の見方などの制約条件を主観的エネルギー項として表現することによって問題を良設定問題に変換して解こうという枠組である。

このような最適化アプローチにおける重要な課題は、エネルギー関数の中でも主観的エネルギー項をどのような形に定めるかということであり、前もって与えることができないことも多い。このため、多くのデータからデータの背後にある規則を獲得し、エネルギー関数の形を求める学習の問題が重要である。また、最適化手法は個々の視覚モジュールを実現するレベルとともに、モジュールを統合するレベルでも有効であると考えられるが、後者については具体的な研究事例がほとんどなく、最適化原理によるモジュールの協調動作などの有効性の実証は今後の研究開発に負うところが多い。

(2) 最適化問題の解法

上記のように定式化された最適化問題は、一般には線形でなくいくつかの局所的なローカルミニマが存在する。このため、これらの問題の解決には、シミュレーテッドアニーリング (simulated annealing) や遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm) などの大局的最適化手法の利用が考えられる。しかし、これらの手法には、現在のところ逐次的な要素が内在しており、最適解 (あるいは近似的な準最適解) を得るまでには膨大な計算時間を要するという問題がある (収束の遅さ)。高速化を図るために超並列アーキテクチャに適した並列分散最適化アルゴリズムの開発が必要である。また、ここでの最適化アルゴリズムの計算構造がアーキテクチャに指針を与えることになるだろう。

(3) 時空間把握のための柔らかなモデル

従来は、主として単純な形状の剛体を基本要素とし、その論理的な結合を議論する幾何学的な形状モデルが考えられてきた。このままでは、自由形状や成長をともしう対象、あるいは環境の変化によって変形する対象を扱えない。

軟体や連続的に変化する対象を柔軟に表現するために、入力情報と多様に対応づける変形可能な形状モデルの開発を行う。ここで、モデルと画像との照合は、画像特徴からのポテンシャルと“よい連続の法則”からくる対象の連続性や滑らかさなどを制約条件とした最適化問題として捉えることによって柔らかな照合が可能となる。さらに、コンピュータグラフィクス技術との融合の視点から、これらの形状のモデル化手法の開発とともに、モデルからの特徴生成、画像生成機能を合わせもった認識用形状モデルの開発を行う。

(4) モデルと特徴統合

画像理解のきっかけは、対象画像領域の輪郭、濃度変化、テクスチャ変化などであり、これら個々の特徴の統合的処理と情景や対象の空間的配置などから対象物のモデルを想定し、これを用いて対象物を能動的に理解する。そのために画像理解アルゴリズムは、画像の特徴から状況理解の記号による表現にいたる多くの階層に係わる問題をアドホックでない方法で解決することが求められる。

具体的には、空間的に配置された特徴を有機的に統合し、それらを適切な段階の階層に表現するアルゴリズムを発見する研究を行なう。そこでは、入力画像から得られるものと、先見的な知識から得られるものの融合が求められる。また、これらの処理アルゴリズムは画像パターンの持つ局所的で一様である性質を本質的に反映し、かつ全体的には各階層の要素の組合せの爆発を準最適にはあるがさける形で解くものであることが要求される。

(5) ビジョンプログラム合成 — 認識戦略の自己組織化 —

画像認識・理解の要素は、いくつかの機能モジュールで構成される。具体的な応用の側面では、個々の機能の実現や高度化のほかに、各種機能を手軽に利用できるためのソフトウェアのモジュール化や、情報表現の統一などが重要である。さらに、与えられた最終目的からタスク (何をすべきか、どうすべきか) の分析を行って全体のプログラムを生成する段階では、モジュールの選択やパラメータの指定を、サンプルの例示によって自動的に行う自己組織化の能力が要求される。このために、いくつかのモジュール列を発生し、複製をゆるすことによって環境に適応したモジュール列が支配的になるような遺伝的アルゴリズムによるビジョンプログラム合成の研究を行う。

(6) 画像理解システムプロトタイプの開発

超並列システム上に上記の個別基本機能を実現し、機能実現の検証を行う。また、画像認識・理解の典型的な応用例を設定し、超並列システム上での個別機能の統合による画像理解システムプロトタイプを構築し、実際の応用の可能性を示す。

4.2.1.4 研究課題

- 視覚機能の階層とモジュール化
- 複数モジュールの統合メカニズム、モジュールの協調メカニズム
- 制約表現
- 制約充足処理
- モジュールと状況の相互作用
- 分散最適化手法
- 学習、自己組織化
- 画像の世界モデル表現、柔らかな形状モデル
- 理解状況の記述
- 画像理解システムプロトタイプの構築

4.2.1.5 応用のイメージ

1) 高度な映像情報の編集、加工システム

通信手段の発達、データベースの整備などで、21世紀には全世界のデータがいつでも、どこでも利用可能になる。すなわち情報過多になるので、情報を人に見やすく整理する技術が要求される。特に無秩序に入ってくる映像情報を、企業や個人が、分かりやすく、使いやすい情報に変換し、提供するシステムを提供する。

2) 学校教育におけるインテリジェントアシスタント機器や教育の効果の評価

情報処理システムの頂点にある人間の情報処理、情報表現様式に近い方式を用いることで、教育に必要な「直接操作性」「表現の豊かさ」を実現すると共に、体感ゲーム等における面白さをも飛躍的に向上させる（アミューズメントコミュニケーション）。

3) 高齢化社会をむかえ医療福祉や家庭教育のためのデータ入力や表示

障害者・高齢者等の低下した機能の補綴システムとして、高福祉社会の到来にふさわしい誰でもが情報化社会の恩恵に浴せられる為の技術とシステムの提供。

自然な動きをする補助機能、五感の代わりをする高度センサー、動きを認識してコマンドに変換する機器等。

4) 周囲を気使う視覚ロボット

おおまかな作業内容の指示と例示だけで、視覚的に作業内容を把握できるロボット、周囲の安全を確認し人間を気使いながら共同作業のできるロボット。

いずれも人間を含めた自然環境を対象とするため、ゆらぎのある状況に対する柔らかな画像理解技術が必要である。

4.2.2 音声および自然言語技術

4.2.2.1 現状と問題点

音声認識技術は、最近の計算機の能力の急速な向上に支えられて、大規模データベースが可能となり、これらを利用した確率論的な方法である隠れマルコフモデル (HMM: Hidden Markov model) や統計的言語モデル、非線形の識別領域を容易に実現できるニューラルネット等が導入されたことにより、最近、急速に能力を向上させつつある。HMM では、言語学的単位 (音節、単語等) のモデルとして直接観測できない状態間の遷移に音声の物理的特徴の出現確率が付与されたモデルを用い、多量の訓練データからこれらの遷移の事前確率を推定しておくことにより、観測された音声の物理的特徴を生み出す事後確率を最大にするように認識を行うものである。言語モデルにおいても、部分系列の出現確率等の統計量を取り入れることにより、HMM と同様に事後確率を最大にする方策を用いることが行われている。ニューラルネットは、原理的には万能の関数近似機構であり、同様に十分な訓練データが利用できる場合には、異なったカテゴリの間の複雑な識別境界をいくらでも良く近似することが出来る。これらの最近の動向を要約すると、古典的なパターン認識を構成していた各段階が、より精密化された確率論的な枠組の下で統合に向かっていていると言えよう。これらの方法を用いることで、明解に発声された音声については、話者や使用条件が限定されたものであれば、用途によっては既に実用に供することのできるレベルに達している部分もあり、数 10MIPS 程度の DSP を用いたシステム化も行なわれている。しかし、耐雑音性、語彙の大きさ、発話の方法に対する制限などの条件を日常の実際的な利用条件にしたときには、極端に探索空間が拡大することやロバストネスの面など多くの問題があり、超並列超分散的な処理能力と新たな情報処理の枠組が必要となる。

自然言語処理技術を発展させる際に問題になるのは次のような点である。まず、第一に、現在の自然言語処理は、一文ごとの処理が主体になっている。また、その文は文法的に完全な文であって、言いまわしなどを含んだ文を処理するのは、現在の技術ではそれほど容易ではない。第二に、文を超えたレベルの、いわゆる談話処理は、首尾一貫性、代名詞の同定などが一部分研究されているのみである。世界知識 (つまり常識) を用いたり、言い換えに的確に対処するのは現在の研究レベルでは困難である。

また、音声言語を用いた日常のコミュニケーションに認められる不完全性、曖昧性、変形、誤用、話題の転換、非協力的な話者等を許容できる柔軟な自然言語処理技術や、韻律、語り口、間、声色等の音声に付随する非言語的情報を統合して活用/制御する技術は、音声をインタフェースに用いる場合に必須の技術であるが、現在のところ極めて未熟な段階にある。

4.2.2.2 研究の目標

(1) 自然な音声言語による人間と機械のコミュニケーション

情報の発生および相手とのインタラクションの速度の観点から眺めると、音声は人間にとって最も容易で効率の良いコミュニケーションの手段である。音声を用いたコミュニケーションの能力は、幼児期からの長い訓練の末に獲得されるものであるが、成人では殆ど努力を要せずにご利用することができるため、その過程でいかに複雑で困難な情報処理が行われているかについて意識されることはない。さらに、人間は音声言語をもとにして、文字言語を使用するのみでなく、論理的な思考を含めて、言語を思考の道具としても用いている。このことは、音声を機械とのコミュニケーションの手段として用いる場合に、非常に高度な水準が要求されることを意味する。実際、日常的な状況の中で有効なものとして音声が利用されるためには、この高い

要求水準を満たすことが必要である。このようなコミュニケーションを実現するための具体的な目標となるシステムあるいは技術としては次のようなものが考えられる。

- 自発発声音声 (spontaneous speech) の認識理解技術
- 対話音声・言語理解システム
- 騒音環境下における音声の雑音抑圧と音声認識技術
- 自然性の高い音声の規則合成システム (人間の生の声に近い音声)

これらの技術、システムの実現を、精密音声分析モデル、音声特徴抽出モデル、音声対話モデル、超並列超分散アーキテクチャをベースとした柔らかな推論機構、問題解決機構の技術を用いて実現する。

(2) 非言語的な音声の利用

非言語的な機能としては、音声知覚は視覚的に調べることの出来ない機械内部の動作異常や死角からの危険物の接近の検出など、外部状況の把握において視覚を補完する重要な役割を担っている。また、音楽等の例に認められるように、音は感情や情緒に直接的に働きかける特異な性質を有しており、コミュニケーションに豊かさを付与している。これらの利用技術は、現実環境を把握する統合システムの基本技術となる他、合成音声に適切な情緒を付与したり、音声認識において話者の状態を同時に把握するなど、柔軟なヒューマンインタフェースの実現の基本技術となる。

(3) 自然言語処理システム

談話処理や、不完全な文に即応できる自然言語処理システムの構築を目指す。そのために、人間の持つ多量の知識や概念を蓄えた大容量の知識ベースを背景とし、対話の場面に応じてその内容が変化する、すなわち学習機能を有するものを構築する。また、システム自体も、対話や解析の進行状況によって、使用する知識の範囲や領域を変化させる機能を有する。さらに、音声や画像との結合をはかり、それらの前処理や後処理は言うまでもなく、それらの情報と融合した形での有機的な情報処理システムの構築を目指す。

4.2.2.3 研究の内容

人間同士の自然な音声会話を考え、人間と機械の対話においても人間にかなり自由な話し方を許すとすれば、音声言語には、たとえば構文規則の自由度、言いよどみや言い間違い、省略など様々な問題が生ずる。そこでは、従来の音声認識、自然言語処理より広い話者間の協調など双方向的問題がある。

日常生活の場で遭遇する、環境条件、話者、文脈等の影響を受けて高度に変容するとともに周囲の環境音と渾然一体となっているような音声に対しても人間に比肩する能力を実現するためには、入力の不完全性を前提として、単一の方策に頼ることなく音声言語に固有の性質や周囲の状況、文脈等についての部分的な知識を取り入れて音環境の中から目的とする音声を能動的に取り出すとともに視覚や運動等の異質の情報をも統合して不完全な部分を補うことを可能にする柔軟な機構が必要である。

物理的には音声は、声門の開閉によるバズ音や声道の狭窄により発生する乱流雑音や破裂音が、喉頭、咽頭、舌、口蓋、顎、唇、等の調音器官から構成される空洞の伝達特性により変形

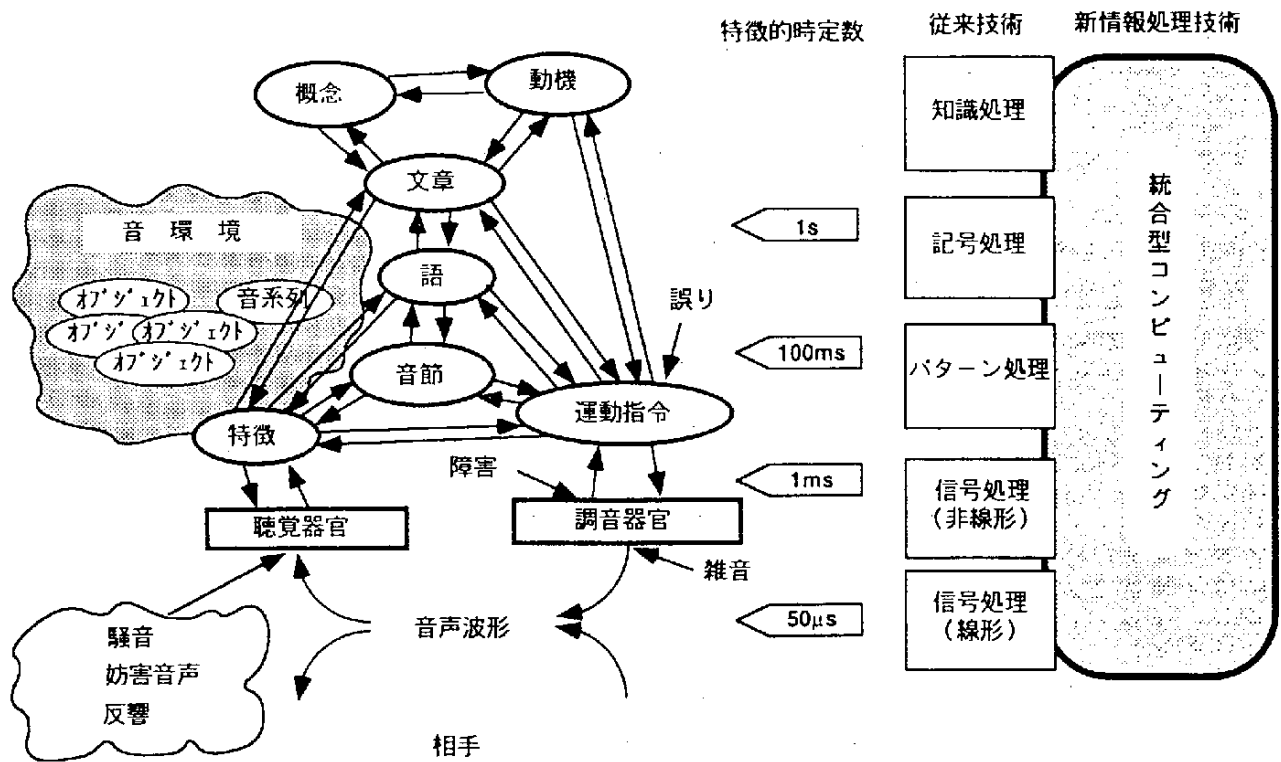


図 4.1: 音声言語によるコミュニケーション過程

を受けて生ずる。言語情報は、調音器官の運動により、物理的には音声波形の物理的性質の時間的变化として顕われる。これらの言語情報の正書法による表現あるいは音声字母による表現と音声波形の間には多段階の変換過程が介在しているために、それらの対応関係は時間的にも物理的にも錯綜したものとなり、必然的にゆらぎや誤り／雑音を含んでいる。

上記のような問題に対処するため具体的には、音環境の把握のための時空間音響信号処理技術、それらの環境をオブジェクトの集まりとして分節化する pre-attentive なレベルでの超並列超分散特徴抽出技術、それらのオブジェクトの中から目的とする音声を抽出する注意機構、話者や状況や文脈に依存する変動を把握しそれらの拘束条件を利用して欠落部分や不足する情報などを補って能動的に言語情報を抽出する技術、および、それらの情報と他の情報源との統合を可能にする情報の表現方式、処理技術が必要である。

また、音声認識技術を人間とのインタフェースの手段として有効に活用するためには、人間の言語行為に対する理解に基づいて、入力曖昧なままでの解析を許容する自然言語処理技術と、解析や対話の生成において必要となる柔軟な検索を可能とする辞書・データベース、推論機構、対話のモデル等が必要である。言語理解では、記号として明確に記述されている入力から解析を開始する場合であっても、意味を表す概念への変換を行うには、不完全で部分的な情報に基づく推論が必要となるが、そのための方法論は、確立されていない。この変換の過程では、文法などの言語学的な情報や言語表現が表している専門的な知識のみではなく、大量の一般的常識などが用いられることが必要である。このような多種多様でかつ多量の知識を駆使して瞬時に意味を理解するためには、超並列協調型の計算を基本にした情報処理システムが有力な手段の一つである。このように、言語理解は、従来型手続的情報処理と新情報処理との接点としての意味が大きい。

現在の自然言語処理システムでは、文が完結した段階で、まず構文解析を行ない、その結果に基づいて意味解析や談話解析を行なっているシステムが多い。人間の場合には、時系列的に、読んだり聞いたりした順に、ある程度の予測を交えながら構文解析と意味解析を同時に行なっていると考えられる。そこで、実時間で構文、意味、談話解析を行なうシステムの開発を行なう。また、予測がはずれたり、文が不完全であっても、解析結果を出せる頑健 (ロバスト) なシステムを目指す。

このような高度な機能がどのように人間において実現されているかは、未だに明かになっていないが、末梢から中枢に至る各レベルにおいて共通に認められるフィードバック結合の存在は、多数の異質の処理モジュール間の相互作用による制約充足型の処理の存在を強く示唆する。また、最近の心理学的実験の結果によれば、人間は状況に応じて柔軟に認識の単位やレベルを変更しており単一の方策には依存していないことが示されており、従来の階層構造よりも様々な異質のモジュールが相互作用を行う散層 (heterarchy) 構造モデルがより適切であることを示唆している。現在の音声認識システムで用いられている音声情報の表現は、このような観点からは、かなり粗い処理レベルのみに対応しており、表現の多様性を欠いている。新機能の実現では多様な処理を可能にするための様々な粒度の情報表現および処理モジュールとそれらを用いた pre-attentive な処理に基づく注意の制御機構が必要である。

これらの新機能を実現する問題の多くは、利用できる不完全で部分的な情報と領域固有の様々な制約条件あるいは主観的な価値判断から構成される制約つき最適化問題として定式化され得る。また、これらの制約条件や適切な情報表現自体を環境との相互作用を通じて形成して行く自己組織化・学習の問題としても定式化される。したがって、これらを包含する柔らかな情報処理の理論は、将来の音声および自然言語技術の研究開発を進めるための重要な基礎を与えるものである。また、柔軟な評価・制御機構も、柔らかな情報処理の理論に基づいて実現される

ものである。

これらを勘案すると、新情報処理技術プログラムにおいては、より広い人工的聴覚系の実現という長期目標を達成する道筋として、音声信号処理、音情景分析、耐環境性の高い音声認識、ユーザインタフェース、自然言語処理等の基本技術および応用システムの研究開発が位置付けられる。

4.2.2.4 研究課題

- 多様な聴覚情報表現
- 音声特徴抽出モデル
- 精密な音声生成過程モデル
- 聴覚機能の散層的モジュール化
- pre-attentive な処理に基づく注意機構
- 情報表現、処理機構の自己組織化、学習
- 言語機能の散層的モジュール化
- 音声処理と言語処理の統合アルゴリズム
- 制約つき最適化問題、確率的問題としての定式化
- 対話モデル
- 不完全情報に基づく自然言語処理方式
- 非言語的音声情報の抽出表現
- 自然で柔軟な音声の規則合成方式
- 音環境の理解
- 知識獲得による自然言語処理
- 協調的対話モデル

4.2.2.5 応用のイメージ

1) 音声信号処理

周波数分解能・時間分解能を実用的に両立させる非定常信号の分析法や局所的な周期性の検出、多数の集音点からの情報の統合処理。

- 信号処理レベルのカクテルパーティー効果
 - ・ 多数の音源の同定と選択的抽出／抑圧、非定常な信号処理
- 音声診断システム
 - ・ 音声障害の発見、診断と治療の評価
 - ・ 音響による装置の異常の早期発見
- 楽器、エフェクターへの応用

2) 音情景分析

新しい音声信号処理方法に基づく、多様な特徴の抽出・様々な処理粒度の実現。音のオブジェクトとしての表現に基づく pre-attentive な処理と選択的注意。聴覚における時間の階層構造の模擬。多種類の音のセマンティックな制御を含む弁別。

- 聴覚障害者の補綴
 - ・聴覚系における情報の自然な表現への変換、音のオブジェクト化と視覚的表示
- カクテルパーティー効果
- 自動採譜

3) 耐環境性の高い音声認識システム

- ロボットへの応用、返事をする機械
- 機械のコントロール

4) ユーザインタフェース

- ポインティングデバイスとの併用による操作性の改善
- 韻律等、非言語情報を利用した感情の通うインタフェース

5) 自然（音声）言語処理

- 知識ベースの作成、検索
- データベース検索、シミュレーション、自動書記
- 自動翻訳、自動通訳

4.2.3 メディア統合技術

4.2.3.1 研究の現状と目標

画像、音声及び自然言語など個別の技術課題については、前節までに述べられてきているようにそれぞれ議論され、柔軟な情報処理の枠組みで解決されていく必要がある。しかしながら、音声認識理解と自然言語処理との融合は、前節にもあるように、取り扱う情報の曖昧さ・不完全さに違いはあるものの、同じく言葉を扱うという点からは本来別々に議論されるものではないと言える。また、人間は人の話す言葉を聞きながら同時に目でも状況を確認しており、音声情報と視覚情報の統合作用により、より確かな情報の抽出を行うことが出来る。人間が行っているあらゆる形での自己表現を、そのままの形でコンピュータが解釈できれば、融通のある形で、より信頼性の高い情報収集が出来ることになり、より感性の高いコンピュータのマンマシンインターフェイスの実現に近付くことができる。

このようにメディアの統合により、各個別の技術課題のみでは得られない機能の実現、より人間の感性に近付いたコンピュータ及び自然なマンマシンインターフェイスの実現の可能性がある。メディア統合には、各技術課題での階層・モジュールを包含した部分的、全体的な融合・統合による、更に高次の制約条件を含むより一層一般的処理枠組みの構築を必要とする。本開発項目は、音声、言語、画像の認識理解それぞれの個別課題についての開発とは別に、各認識理解モダリティー間の相互作用及びその統合を行い、総合的な認識理解の機能を工学的に実現することを目的としている。

4.2.3.2 研究課題

1) 周囲の時空間的に広がった状況パターンの総合理解

音声、言語、画像の各認識理解そのものが不完全な情報に基づいて多くの弱い制約条件下での最適解を求めるプロセスであり、更にマルチメディア統合となれば、一層各メディア間相互のあらゆる状況をあらかじめ想定できなかつたり、そのモデルをインプリメントするのに膨大な作業や時間を必要とする。即ち、各認識モダリティー内部の階層構造や異種モジュールが混在するためこれらがどう関連付けられるかはモデル化しにくい面がある。このため、統合的機構の自己組織化や、動機付け機構など、より高次の制約条件の下に、より一層強力な能動的メカニズムによる総合的な状況理解の機構を開発する。

2) 動機付け機構のモデル化と能動的情報獲得

注意の分散・集中など、単に周囲の状況のみに依存するのではなく、一種の行動原理としての制御戦略を内部にもたせて高次の制約条件として導入し、入手情報の不完全さによるデッドロックなしに処理を継続できる動機付け機構を搭載するとともに、不足している情報を積極的に獲得する能動的処理機構を統合する。これにより、マシンの行動パターンへの傾向を与えるメンタルモデルとして、ある種の個性や価値感をマシンにインプリメント出来ることになる。

3) 情報表現の階層化・モジュール化と、異種モダリティーの統合

情報や行動パターンなどをモジュール化し、それらを関連付けて階層化・構造化する表現方法を探求する。メディア統合は、異種認識モダリティーの内部モジュール間の結合などローカルなモジュール間結合、階層化、異種モダリティー間の結合など多数の処理ユニットの相互作用に基づく制約充足型情報処理、制約付き最適化問題になっており、その処理枠組み（協調メカニズム）を構築する。

4) 統合的認識理解機構の自己組織化

メディア統合など、システムの規模が巨大になり、複雑になると、はじめからすべての情報処理の構造を詳細に与えることは不可能になる。このため、構成要素を併合や拡張・統廃合により拡充・発展させ、状況変化に応じて自己組織的に統合的認識理解機構の洗練・高度化を行う学習・適応機能が不可欠な要素になってくる。ここでは、発達するシステムを構築するための自己組織化方式を開発する。

5) 利用者の状況を把握して応答を変える適応型情報システム

ユーザ自身の考え方、行動、動作、話し方などの個性やユーザの状況を多面的に把握・学習して、その変化に適応し、これに応じて応答の仕方を変え、ユーザとマシンの持つ個性とのバランスをうまくとっていくユーザ適応型情報システムを開発する。これらの判断方法自体も、ユーザとの付き合いを通じてより快適で円滑なものに変化させていく。

上記の技術要素を構築し、多くの知覚チャンネルをうまく使って状況理解を行い、頑健（ロバスト）で融通性・信頼性の高い人間の感性に近付いたコンピュータ、自然なマンマシンインターフェイスを開発し、より一般化された柔軟な理論的処理体系、超並列超分散情報処理アーキテクチャーを想定した超並列システム上で統合型認識理解機能を実現するとともに、そのプロトタイプを開発する。

4.2.3.3 応用のイメージ

文書データを考えた場合、契約書、カタログ、特許、地図、雑誌、新聞、帳票など様々な文書形態があり、メモなどの手書き文字、活字、サイン、印鑑、文字の大きさ、位置、フォントなどを判別する多種多様な認識モジュール群の統合、言語処理、知識処理との融合など文書紙面だけを考えても異種情報が複雑に絡み合う状況があるのが分かる。この場合、文字、図形や画像などの各メディア単体及びその混在を取り扱うことのみならず、表、段組、文書構成といったフォーマットや、テキストチャー、写真、色情報を含めた融合体としてのメディアの統合を取り扱う機能が今後の文書処理機器には必須になっていく。既に現在、オフィスにおける文書処理の発展に伴い、紙面の一括自動符号化という観点から、或いは、入力紙面に限定を加えることなく、より融通性の高いインテリジェントドキュメント処理を行うという観点からも、着実に発展の見られる応用領域となっており、文書紙面のメディア統合技術はそのキーテクノロジーとして期待される。

これらのメディア間の統合は、単に文書紙面に限るまでもなく、広く人間の視覚情報処理において日常的に行われている処理であり、画像の中に現れる文字情報は、単に物体の解釈に役立つ付属情報というにとどまらず、その画像やシーンの解釈、状況の理解に大きな情報を与える場合が多い。

次に、音声と画像の認識理解統合システムを考える。着目している人の音声及び姿を追跡してその人の発話内容をディクテーションしたり、その人の意図に応じるシステムを想定する。人間と同様、両耳効果による音源定位と視覚情報による位置推定により、より正確にその人の位置を特定できる。また、その人の顔の表情、口の動き、仕草、身振り手振り、声の調子などから総合的に解釈して、その人の感情的な側面を推し量ることも考えられる。その結果は人の発話内容の理解に役立つとともに、人間が行っているあらゆる形での自己表現を、そのまま利用できる。即ち、ボディアクションやジェスチャーの解釈はシステムにリアルタイムな反応のチャンネルを広げ、音声とアクションを取り入れたマンマシンインターフェイスの実現につながる。

このようにメディア統合は、音声、言語、画像などを複合的に用いてより信頼性の高い情報を融通のある形で抽出する能力をシステムに与え、多様で柔軟なマンマシンインターフェイスの実現には欠かせないテクノロジーとして期待される。

4.3 柔らかな推論・問題解決

4.3.1 推論・問題解決

4.3.1.1 現状と問題点

従来の人工知能では、人間が行う問題解決という知的操作を、記号表現化された実世界の知識の中での探索問題に変換することにより実現している。このような方法は、限定された問題や厳密に抽象化された問題には有効であるが、現実世界で要求される広い範囲の問題解決に応用するためには多くの問題点がある。

第一に、記号処理の枠組みの中で現実世界の物理的な時空間の問題や多面的かつあいまいな情報を形式化することができるかどうかは疑問である。現在、人間の常識に基づいた推論をシミュレートする手段として、サーカムスクリプションや非単調推論などの推論システム、位置関係などの素朴な知識や概念的実体の知識表現等が検討されている。しかし、複雑な構造を持った実体を記号で表現することが、すでに問題自体を大きく限定している側面を持っている。

次に、探索空間の組み合せの爆発の問題がある。記号による記述では、問題の対象が複雑化

すれば探索空間が増大し、実時間での問題解決は困難になる。現状では探索の枝刈り等の探索の制御戦略や並列探索の研究が行なわれているが、十分な解決が得られているとは言い難い。

第三に、知識獲得ボトルネックの問題がある。従来の記号処理では、人間が知識を抽出して論理的な規則の形に変換しなければならなかったため、問題処理機構の開発や保守に非常に時間がかかっていた。現在ではこのような知識ボトルネックの解消に向けて帰納学習、EBL、バージョン空間法などの研究が進んできてはいるが、このような学習にはやはり時間がかかり、ノイズに弱い。

以上の問題点から、記号を超えた情報表現、超並列処理による問題解決、知識獲得技術の開発が重要であると言える。

4.3.1.2 研究の目標

広い分野にわたって人間の問題解決を支援・代行したり、機械の作業計画の作成や制御を行うシステムの研究開発を行う。この技術は、従来記号処理技術で実現されてきたエキスパートシステム、意思決定支援システム、プランナなどの機能を含むが、次のような意味でより「柔軟な」ものである。

(1) 柔軟な問題解決

目標とする問題解決システムは、様々な分野の人や計算機の知識のない人でも使うことができるものでなければならない。従って、対象となる問題のなかには完全な問題の記述が不可能な問題や、従来の記号処理が不得意とするパターンの処理、直感的処理、大量の常識を必要とする処理、状況・文脈処理、非単調性を必要とする問題も含まれることになる。また、実用的な時間内に妥当な解を求めることのできる能力も必要である。

これらの問題を解決するために、記号とパターンを統合する柔軟な情報表現、確率論やファジィ推論等を統合した柔軟な論理、不良設定問題や暗黙的な多くの仮定を含んだ問題を高速に解くための制約充足機構、などが用いられる。これらの問題解決機構は並列処理を基本とし、超並列・超分散ハードウェアにより高速に実行される。

(2) 柔軟な自動的知識獲得

柔軟な知識獲得は認識、行動サブシステムを通して、実世界とのインタラクションにより自動的に行われる。例えば、専門家がどのような状況においてどのような操作を行い、その結果状況がどう変化するかを学習する。このような学習に含まれるデータは一般的にはパターンデータを含んだ時系列データであり、また部分的であったり、矛盾・誤りを含む、多義的であるといった不完全性を持っている。柔軟な知識獲得はこのような時空的に広がりを持つ不完全なデータから確率的な外界のモデルを生成する。

4.3.1.3 研究の内容

これらの目標を達成するため、柔軟な知識獲得、柔軟な推論・問題解決機構、及び人間の問題解決機構の研究の3つの枠組みを設定して、研究開発を進める。この分野では特に、従来の記号処理による問題解決に比べて何が特色であるのかを念頭において研究開発を行うのが重要である。

(1) 柔軟な知識獲得

外界の確率構造の学習（表象と位相の学習）、行動とそれによる外界の変化の学習（因果モデルの学習）の研究を行う。また、巨大な時空間の広がりやノイズの中から因果率を見つけ出すスポッティングの技術、注意機構、文脈・状況の認識が必要である。また、人間との会話による知識獲得も重要である。要素技術として、モジュール的知識の形成方法、ニューラルネットの中間層に現れる分散表現の解析、リカレントネットワーク、柔らかな論理に基づく知識のATMS (Automatic Truth Maintenance System) も研究対象となる。

(2) 柔らかな推論・問題解決機構

柔らかな推論・問題解決機構は、知識獲得により得られた外界の情報構造をもとに推論、プランニングを行うものである。研究課題としては柔らかな論理の基本原則に基づく確率的推論、制約充足型推論機構、プランニング、複数エージェントによる問題解決を設定する。

確率的推論では確率論、確信度付き推論、様相論理、統計学、多変量解析を統合した「柔らかな論理」に基づき、記号間の位相的関係を反映した推論を実現する。人間とのコミュニケーションのためには、推論の説明機構と逆向き推論の機能も必要である。

制約充足型推論では、推論のための超並列制約充足モデル、文脈・状況の制約による表現を課題とする。また、制約と確率理論（柔らかな論理）との統合も課題となる。

プランニングでは柔らかな論理の基本原則に基づいたプランニングについて研究する。例えば、確率論的モデルを外界の各状態とそれらを遷移させる行動（自然の遷移を含む）からなるネットワークとみると、問題解決は目的状態への最適な経路を見つける問題になる。研究課題としては特に動的プランニング、プランニングと制御の関係、プランの確信度と危険性の算出、線形仮説の成立しない課題に対するプランニングを設定する。

また、問題領域に依存しない柔らかな問題解決機構を目指すとともに、個々の分野の問題解決能力を持つ複数エージェントの協調による問題解決も研究対象となる。複数エージェントによる問題解決では、人間を含めた問題解決エージェント間の協調による問題解決機構とその超並列システムによる実現方式を研究する。

(3) 人間の問題解決過程のモデル化

柔らかな推論・問題解決技術の1つのポイントは、人間が扱う問題を人間と同様に扱い、人間の推論・問題解決をサポートできることである。これを可能にする研究開発として、人間の知識・記憶モデルの研究、人間の問題解決過程のモデル化研究、日常的推論、各種の問題解決過程モデルの計算機インタフェース化に関する研究を推し進める。

4.3.1.4 研究課題

1) 柔らかな知識獲得

- 確率構造の学習、知識のモジュール構造化
- 因果モデルの学習（能動型知識獲得）
- 対話型知識獲得
- 注意機構、スポッティング
- 文脈・状況認識

2) 柔らかな推論・問題解決機構

- 確率構造的知識をもとにした推論・問題解決機構

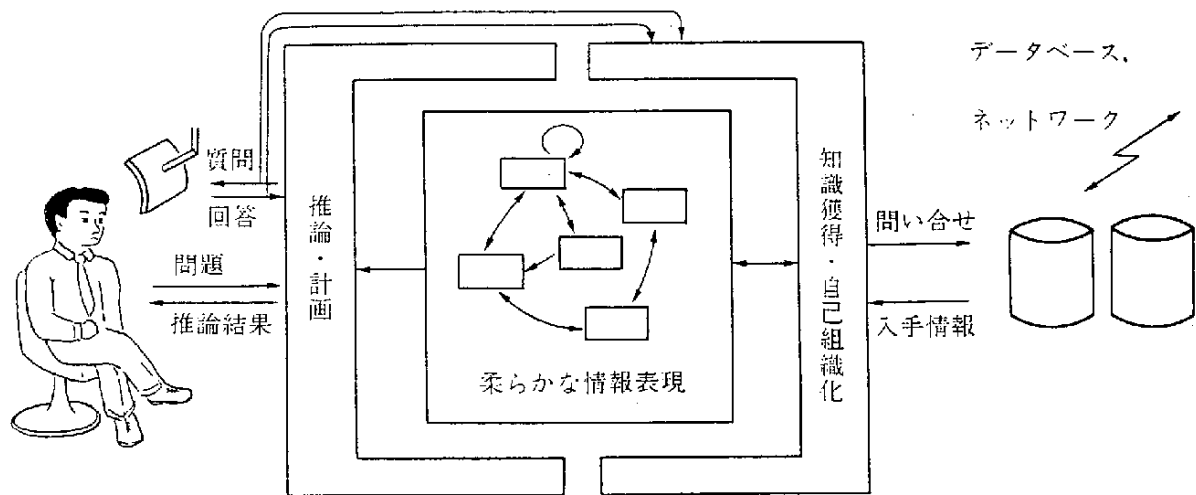


図 4.2: 柔軟な問題解決のシステムイメージ

- 確率構造的知識をもとにした予測・シミュレーション
- ニューラル・ネットワーク（特に隠れノード）、ファジィ論理、記号論理、様相論理、確信度付き推論、制約論理、統計学、多変量解析との理論的関係の研究
- マルチ・エージェントによる推論・問題解決機構

3) 人間の問題解決過程のモデル化

- 人間の知識・記憶・問題解決モデルの研究
- 日常的推論

4.3.1.5 応用のイメージ

まず従来からの人工知能の応用の対象であるエキスパートシステム、ロボットの行動計画、機械翻訳等への応用が可能である。

また、実例から学ぶ能力を生かした法律相談等のコンサルティング、複雑な相互関係をシミュレートする能力を生かした意思決定支援、将来予測、生態系シミュレーション、大胆な類推や予測、低確率での推論（例えばアニーリング温度を上げる）を用いた創造的思考支援などの応用がある。

4.3.2 情報ベース技術

4.3.2.1 現状と問題点

データベースでは、実世界の情報構造を柔軟に内部に表現する技術と、ユーザの意図に対して正確かつ柔軟に対応できる問い合わせ処理を行う技術が特に重要である。データベース技術として現在ではオブジェクト指向データベース、演繹データベース、マルチメディアデータベー

スが活発に研究・応用され、手続き的知識、宣言的知識、マルチメディア情報等の多彩な取り扱いが可能になってきている。

しかし、柔軟な問題解決、認識、行動等の機能をコンピュータ上に実現するためには、情報の記憶手段として、現在のデータベースに残されている課題も多い。

第一は、記号や数値主体の表現形態による実世界の記述の限界の問題がある。実体の持つ多面的な情報を記号のみで表現することは一般的には困難である。一方マルチメディアデータベースではマルチメディア情報とその内容の論理構造の両方を格納するが、マルチメディア情報の内容そのものを手掛かりに検索することは困難で、論理構造は多面的な情報を表現することができない。

第二は、データベース内部の表現を柔軟に拡張する能力が不十分な点である。現在のデータベースでは、部分的な情報や曖昧な情報をそのまま受け入れていくことができない。

第三は、現在のデータ構造と逐次処理による問い合わせ処理能力の限界の問題である。現在のデータベースは、内部的にはポインタを介して線形的にデータを管理している。そのため、逐次的に情報を検索する方法では、情報量が増大するに伴い検索時間が長くなることは避けられない。

以上の議論から、現在のデータベースに不足している技術として、実体の持つ位相性も含めた柔軟な情報表現技術、外部環境からの情報に適応して内部的な情報構造を柔軟に拡張できる自己組織化技術、超並列処理技術による高速検索技術を挙げることができる。

4.3.2.2 研究の目標

新情報処理における情報ベースの研究の目標は、自己組織化／情報獲得／情報提供機能を備えた情報ベースの構築／運用技術の確立である。

情報ベースとは、大量の生データや知識・手続き等を統一的かつ統合的に処理することを可能とするようなシステムである。従来のデータベースのように記号化された情報だけを扱うのではなく、音声・画像などの非記号データをも対象とし、マルチメディアデータの自己組織化と内容の論理構造をもとにした情報処理を行う。情報ベースシステムにおいては、種々雑多なデータが不完全なまま、またデータ間の論理的な整合性もないままに取り込まれ、自己組織化される。

これまでのデータベースと情報ベースとの関係は、倉庫的図書館と活動的情報センターとの関係にたとえられる。すなわち、従来型データベース（倉庫的図書館）では定形的情報（書籍）だけを蓄積し、検索要求に答える（来館者の閲覧）だけであった。これに対し情報ベース（活動的情報センター）では、一定分野に関する生データ（原稿／観察記録）、非定形的情報、知識及び理論等を蓄積する。そして、情報の自己組織化機構（研究部門）を持ち、情報の評価及び情報の概念スキーマの変更（資料の分類方法の変更）を行う。この結果、情報の不足が明らかになった場合には、自律的に活動し得る情報獲得機構（観測隊）を編成・起動する。また、検索の柔軟化（読書相談）、情報提示の多様化（展示の工夫）はもとより、検索以外の情報提供（非来館者を含めた広範囲の利用者への広報活動）も行う。

4.3.2.3 研究の内容

情報ベースの構築／運用技術の確立のためには、自己組織化／情報獲得／情報提供といった各機能に関する研究と実装／統合化に関する研究が必要であるが、実際には各研究のそれぞれの中で、他の機能に関しても研究開発がなされる。

(1) 情報の自己組織化技術

情報ベースの自己組織化の基本的な契機としては、データの入力及び検索要求の2つがある。前者の一部は外部スキーマの変更すなわち情報提供部の問題として扱われる。データの入力は、すでに構築されている情報ベースの各データとの関係、従来の理論／分類体系との関係のテストを促進し、これにより、データの格納法、または理論／分類体系そのものの変更が行なわれる。また、情報の価値の評価を行い、不必要な情報は切り捨て、必要な情報は組織化して取り込む。連想記憶、複合アーキテクチャを持つニューラルネットワークの学習法、特徴抽出、自動インデクシングも研究対象となる。また、時間を取り扱うためのリカレントな結合を持った超分散・超並列システムの研究も必要である。

情報ベースにおける自己組織化は、大規模知識ベースの自己組織化と共通する部分もあるが、知識ベースにおける抽象化された要素に比べ、情報ベースにおいては、生に近いデータを扱うため、定形的でない多くの関連情報が存在し、独自の研究対象となる。

(2) 情報獲得技術

自律的情報獲得の契機となるのは、情報ベースの自己組織化に伴う不足情報の明確化または検索要求であり、何を獲得すべきかは他から指定される。しかしながら、如何にして情報を獲得すべきかまでは指定されない／できないと考えられ、計画を立て、獲得行動の中にある不確定性を考慮して情報を獲得する能動的情報獲得機能は、ひとつの分野として研究されるべき課題である。システムからユーザに対して質問をする行為は、情報提供の中で考えるのが自然である。

(3) 情報提供技術

情報提供技術には、従来の検索－回答のサイクルをより柔軟にする問題と、検索を直接の契機としない「広報活動」の2種の課題があると考えられる。

前者の検索－回答サイクルの柔軟化としては、不完全／曖昧要求の推論／対話による完全化、人間の感覚に整合した形での検索要求の受け付け／情報表示（メディアスーツ：擬似的な人工体験感）、等がある。情報提供は能動的に行なわれる。すなわち、獲得した知識やデータを構成し直したり、様々な仮定によりシミュレーションを行う機能を有している。生のデータをそのまま示すだけではなく、抽象化・要約して提示する能力も必要とされる。

後者の広報活動は、それ自身が自己組織的であるマスマスユーザモデルに基づいてなされるものである。

(4) 実装／統合化技術

オブジェクト指向の特徴であるデータと手続きの一体化、カプセル化、部品化などの概念を考慮した上で、大量の情報を検索する検索能力の飛躍的な増大のために、専用のマシンの研究開発またはソフトウェア技術の開発を行うことが必要である。論理構造の獲得・検索技術は4.3.1 推論・問題解決と共通する部分が多い。また、情報提供技術には4.4 ヒューマン・インタフェースとシミュレーション技術が不可欠である。

4.3.2.4 研究課題

1) 情報の自己組織化技術

- 自動的構造／類似度抽出手法
- 曖昧情報表現法

2) 情報獲得技術

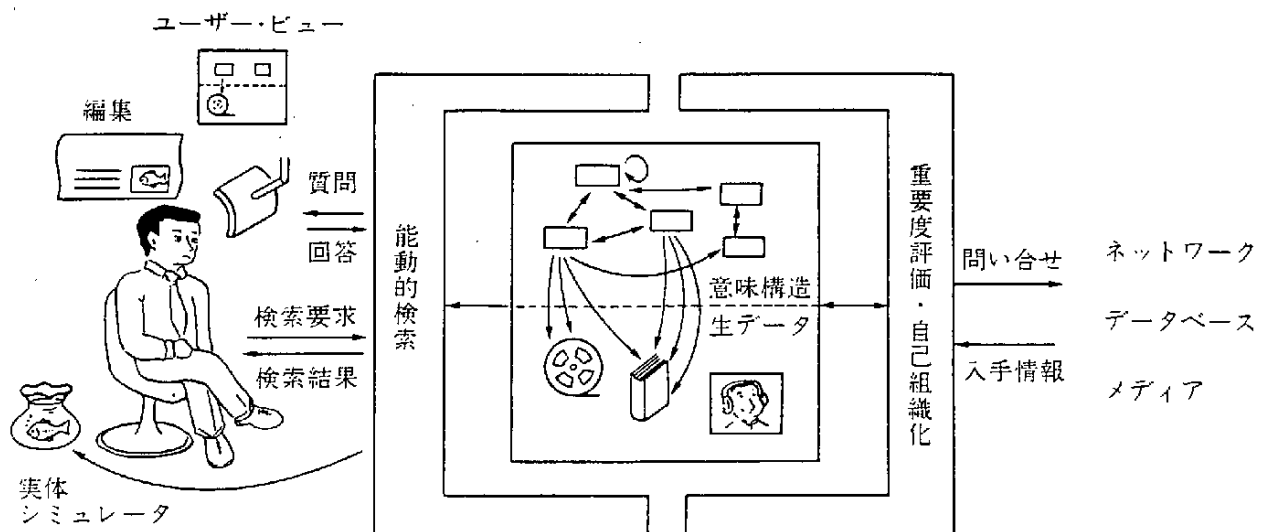


図 4.3: 情報ベースシステムのイメージ

3) 情報提供技術

- 検索応答の高度化
- 能動的広報機能の実現

4) 実装／統合化技術

- 専用マシンの開発
- 情報ベースソフトウェア開発

4.3.2.5 応用のイメージ

情報ベース技術が確立されれば、現在のデータベースに乗りにくい情報の蓄積／利用分野を広く産業界／学会などに提供するとともに、書籍などの現存する膨大な人間向き情報の自動電子化入力システムの開発、宇宙／海洋などの自律的観測システム（観測ロボット）による研究活動（テレサイエンス）等への具体的応用が期待される。

4.4 ヒューマン・インタフェースとシミュレーション

4.4.1 ヒューマン・インタフェース

4.4.1.1 現状と問題点

1990年代の情報処理の特色のひとつは、人間と計算機とが密接に結合した高度な情報処理が全体として論じられるところにあるであろう。これまでの情報処理は、計算機単体としての能力向上を極限まで高めるといふ点に力が注がれてきたように考えられる。その努力の結果、計算機は「人間のパートナーとして作業を分担しうるだけの能力」を身につけることが出来たと言えよう。また一方で、計算機の得意な分野、不得意な分野も技術的に明らかになって来た。

従って、次の目標のひとつは、人間と計算機という2つの異なった性格を有する知的主体を有機的に結合し、最高のパフォーマンスを発揮させることであるに相違ない。“いかに高度な情報処理が計算機の内部で行われようとも、その成果を人間に伝える術無くしては、何の意味ももたない”という哲学は、1980年代の初頭に、ヒューマン・インタフェースという研究分野を確立した。1990年代は、この情報処理における新分野が、計算機科学のより中核部に据えられ、洗練化されていく時代であると考えられよう。

より中核部に据えられるとは、ヒューマン・インタフェースの分野が情報処理研究自体を牽引していく立場におかれるだろうということである。もともとヒューマン・インタフェースは、初心者に対して、計算機科学の成果を享受させるようにという目的で研究が開始された分野である。つまり従来のヒューマン・インタフェースとは、主に、“ユーザ・フレンドリシステム”という方向を向いていたといえよう。マウスとアイコン、マルチ・ウィンドウ・システム、などなど、計算機利用のためのユーザ負担は大幅に軽減されたといえてよい。従って、利用しようという情報処理の技術それ自体はすでに完成したものであって、そこから何か新しいものが得られるという性質のものではなかった。

4.4.1.2 研究の目標

しかしながら、1990年代のヒューマン・インタフェースは、これとは若干性格を異にすることになるかも知れない。初心者に簡単な操作を行わせるのみならず、より高度な成果を得るための技術である。ヒューマン・インタフェースの充実によって、人間は、よりレベルの高い知的作業に集中できることになるであろうし、またそうしなければ巨大化、かつ洗練化されたシステムを開発することは不可能である。そのためには、従来とは比較にならないほどの努力の傾注が必要であり、単に“ヒトに優しい”という形容詞でくれない状況になって来るであろう。

AI (Artificial Intelligence) に対して IA (Intelligence Amplification) という言葉があるが、今後は計算機と人間との間に、いかに大容量のコミュニケーションチャネルを準備し得るかが大きな技術課題となるであろう。そのために先述の80年代のインタフェースを大きく越えるシステムの開発が不可欠である。

4.4.1.3 研究の内容

現時点で、最も注目を集めている技術の一つが、いわゆる「人工現実感」(AR=Artificial Reality) のシステムであろう。これは、計算機によって、視覚、聴覚などの人間の感覚情報を合成してやろうという試みである。言葉を換えれば、人間の周囲に人工的な「空間」を造出しようという訳である。このシステムは、色々な見方をすることが出来るが、まず第一に非常に進歩したヒューマン・インタフェース技術であることは間違いない。たとえば、従来型のヒューマン・インタフェースであるデスクトップメタファーが、“机上”という2次元空間の上に展開しているのに対し、ARのシステムは、3次元空間を対象としたものである。

ARのシステムは、図4.4に示すようにして構築されるのが普通である。まず、人間の周囲にリアリスティックな3次元世界を提示するための各種ディスプレイ群(たとえば、超広画角の3次元映像を供給するHMD (Helmet Mounted Display)、3次元音場をイヤホンを通じて生成するホロフォニクス・システム、etc)、さらに提示された世界に積極的な操作を加えるためのシステム、すなわち人間側の動作をセンシングするシステム(中核となるのは、データグローブのようなジェスチャ入力デバイスや、各種の3次元空間内測定技術など)が必要である。さらに、これらの2システムを結合し、操作と感覚の因果関係のループを閉じるためのシステムが必要である。このシステムはある種のシミュレーションシステムとみなすことも出来る。

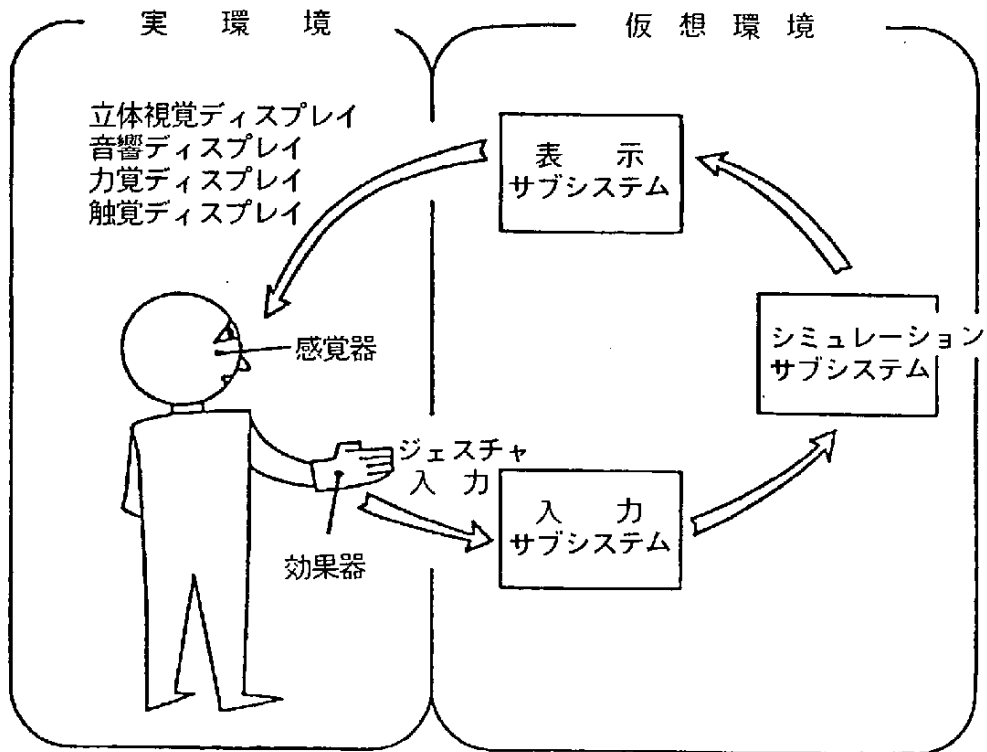


図 4.4: 人工現実感のシステム

このように、AR のシステムは、従来とは比較にならないほどの“表現力”を計算機に与えることになるであろう。原理的には、人間が感覚器によって受容しうる限界までの情報容量を利用することが可能だからである。

4.4.1.4 研究課題

このシステムを具体化する場合の現状の技術課題は以下のようなものが考えられる。

1) 情報提示系

十分な性能を持った情報のディスプレイの開発が必要である。すでに、視覚、聴覚、触覚についてはプロトタイプがいくつかの研究サイトで稼働中である。実用化のためには、これらのプロトタイプの性能を一桁程度向上させる必要がある。これらのディスプレイ・デバイス系の技術は、LCD（液晶ディスプレイ）をはじめとして、我が国が得意とする技術であり、この種の技術開発は、我が国が技術面での貢献を果たす上で、一つの候補となろう。

2) 情報入力系

センシングシステムについても、一層の技術開発が必要であり、特に人間の身体などの柔らかいしかも多自由度の物体を3次元的に測定する技術は、先のディスプレイ系の技術とは対照的に、必ずしも本格的な技術開発が行われていない分野である。

3) 感覚統合の知識

情報をどのような形で仮想世界内に可視化すれば良いかについて、人間の感性的諸側面から研究する必要がある。AI が、認知科学という分野と密接な関係を持つに至ったよう

に、AR もまた感覚系の基礎科学から多くの知識を得ることが必要であり、同時に大きな影響を与えることにもなるであろう。

4) 高性能計算機の開発

高性能な計算機自身も不可欠である。すなわち、AR は、進歩したマン・マシン・インタフェースであると同時に、進歩した体験型シミュレーションとしての性格も有している。つまり、AR を構成するサブシステムとして、リアルタイム・シミュレーション・システムが不可欠である。そのためには、現在ようやく射程内に入って来た、リアルタイムアニメーションの専用ハードウェアを 1,000 ないし 10,000 倍程度高速化する必要がある。単に、立方体や多角形などの単純な図形のアニメーションだけではなく、複雑な形状やテクスチャを持った物体のアニメーションが必要である。今まで、一枚数十分を必要とする描画を 1/30sec 程度で行う必要がある。すなわち約 10,000 倍以上のグラフィック能力が必要である。

従来のシミュレーションは、事象を論理的にシミュレートすることは出来ても、感覚的にシミュレートすることはなかなか難しかったといえよう。感覚的にシミュレートするとは、十分な表現力を用いてしかもリアルタイムで実行しなければならず、そのためには超並列・超分散の極めて高性能な計算機が必要なのは言うまでもない。

単純な AR のシステムを考えても、物体相互の衝突干渉、自由度の拘束などなど、多くの物理的法則を、同時並列的にシミュレートすることが必要である。たとえば、1000 個の物体が相互に干渉するような世界をリアルタイムで忠実にシミュレートするには、1,000,000 ないし 10,000,000MFlops 以上の計算機が必要であると言われている。つまり、AR は、新しいシミュレーション技術の開発を促すニーズとなりうる。

4.4.1.5 応用のイメージ

こうした、新しいパラダイムに基づくインタフェースが開発されれば、以下のような様々な応用を考えることができる。

1) テレロボティクス

- 第二世代スペース・ロボットの制御

2) CAD/CAE

- 従来の 3 面図によらない、より直観的な形状設計システム

3) プレゼンテーション・ビジュアライゼーション

- シミュレーション結果の直観的表示
- 大規模ソフトウェアの可視化

4) コミュニケーション

- 臨場感通信によるリモート・コラボレーションの研究

5) 教育

- AR による物理学教育

6) 医療

- 医師トレーニングシミュレータ

7) アミューズメント

4.4.2 シミュレーション

4.4.2.1 現状と問題点

シミュレーション分野の歴史は極めて長いが、その重要性は、近年に至るもいささかも減少することはない。むしろシミュレーションは、計算機の本質的アプリケーションであり、不可分の関係にあるといえよう。従来のシミュレーションにおいて、問題があるとすれば、まず第一にその表現力の問題であろう。第二には、先述のようにリアルタイム性が追求されるということである。また、第三に、非常に複雑な事象をシミュレートする際に計算容量の点から、様々な制約があるという点である。

4.4.2.2 研究の目標

そこでまず、表現力、訴求力に富んだシミュレーションとは何かを考えてみると、人間の感性に直接的に訴えるシミュレーションということになろう。もともと、シミュレーションは、思考支援ツールであるから、いかに内部で高度なシミュレーションを行なおうとも、それが人間にとって役立てられなければ何の意味もない。つまり、大幅なヒューマン・インタフェースの改善が必要であろう。先述の人工現実感の研究などは、この分野に大いに貢献するに違いない。

また、一方、巨大なシステムのシミュレーションを行うためには、莫大な計算量を克服するための並列計算機技術と不完全な現象モデルや入力データに基づいて、やわらかなシミュレーションを行うための技術が必要である。

4.4.2.3 研究の内容

(1) 体験型シミュレーション

シミュレーションは、基本的には思考支援のツール、すなわち試行錯誤のための道具である。シミュレーションに表現力を付加することは、試行錯誤のサイクルをはやめ、全体として迅速な問題解決を可能にするという効用を持つ。たとえば、図 4.5は、米国 JPL（ジェット推進研究所）による火星表面の景観シミュレーションである。これは、色々な火星探査機から送信された数値計測データをもとに再構成された現実である。（測定計器による惑星表面の高度データをもとに表面の形モデルを作成し、さらに航空写真による表面のテクスチャを、モデル表面にマップしたもの）この場合、トータルな情報量は増大している訳ではないが、収集したデータの活用を図る最良の方法の一つであるには相違ないであろう。

こうした、いわば体験的な方法は、たとえば数式表現のような網羅的な結果整理は不可能な反面、かえって物事の本質的理解に肉迫する可能性を含んでいる。たとえば、相対論の世界を AR でシミュレートし、それを体験する場合、詳細な理解は不可能であるが、この世界が本質的にどんな世界であるかを直観的に理解することは容易である。このような教育・研究体系は、従来の分析中心の体系とは性格を異にするものであり、新しい独創的分野の確立にも役立つことと期待されよう。たとえば、ノースカロライナ大の F.P.Brooks は GROPE と呼ばれる AR を用いた分子構造設計のシミュレータを開発しているが、現実には目にみることすら出来ない分子構造を可視化し、その結合・分離を目前で自分の手によって体験することは、単なる化学式の羅列よりもはるかに教育的効果が大きいことを報告している。

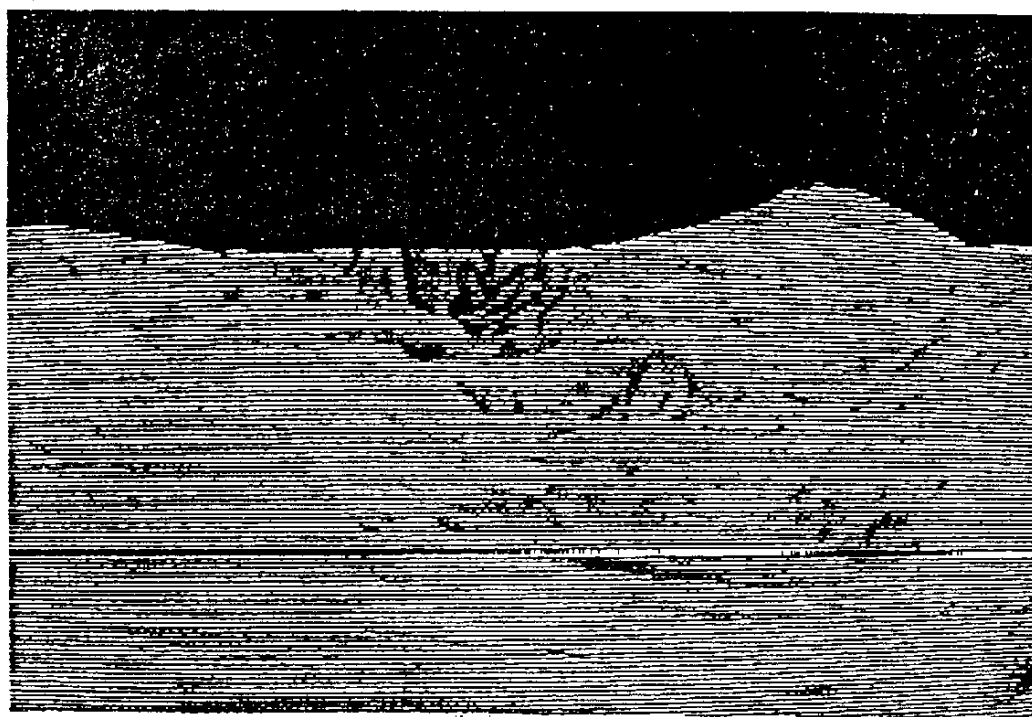


図 4.5: 火星表面の景観のシミュレーション

(2) 予測・解明型シミュレーション

他方、過去に得られた法則（物理法則、経済・環境等の動的システムの法則）から、まだ解明されていない現象を予見したり、未来を予測したりするために使われる一群のシミュレーション技術がある。気象、経済のシミュレーションにみられるように時系列に沿った計算により、任意の時刻における状況を予測したり、事象の因果関係を明確にし状況をコントロールしようとする場合や、原子や電子レベルでの材料設計、ディープサブミクロンの半導体デバイスの設計支援等のように、現象の予測・解明によって、製品の信頼性を向上させる目的で使われるものがある。このようなシミュレーション技術では、大きく分けて2つのアプローチがある。

1) 支配方程式が確立している場合

この場合ミクロな要素の振舞いと要素同士の相互作用を記述した数理モデルを構築し、支配方程式から、人間にとって意味のあるマクロな振舞いを予測・解明することが可能である。しかし方程式が明確であるにもかかわらず、問題が非線形であったり、本質的に多数個の要素間での作用を扱う多体問題であったりするため、問題を解くのは数値計算をもってしても一般に困難である。

最近、従来異なる分野で用いられた手法を取り入れて統合化することにより、従来は困難とされていた分野に新しい発展が見られる。その発展について以下述べる。従来、物理の材料作製や統計力学で用いられていたアニーリングの方法（系を活性化、例えば高温にし、ゆっくりと冷ましていくことによって系の安定状態を求める）をシミュレーションに応用し、並列計算機の負荷分散や回路の配置配線等の最適値問題を解くことが容易になった。

材料のシミュレーションでは、従来独立に発展してきた分子動力学と電子構造計算の手法を統合化することによって新しい地平が開拓された。統合化により、a) 分子動力学（原子の運動

を追跡し、時間平均操作から系の物理量を求める手法）で用いる原子間ポテンシャル（従来は実験値から経験的に求めていた）にバンド計算の手法を取り入れて量子力学的基礎を与えることができるようになった。b) 運動方程式の積分計算で、電子の固有値問題をシミュレーテッド・アニーリングを用いて動的に同時に解く事によって、計算の高速化を行ない、従来のバンド計算ではできなかった大きさの系に対して精密計算ができるようになった。

この場合でも、シミュレーションを実行する際には膨大な計算量が必要になる。例えば電子状態を考慮した分子動力学を行なう場合 100 個程度の原子について数ピコ秒の様子を調べるのに、現在手に入る最高速のベクトル計算機で数十時間、記憶容量は 1G バイト必要である。さらに、ニーズとしては数千個の原子のナノ秒の様の計算が望まれており、単純に推計すると、 3×10^9 時間、30T バイトが必要となる。従って、超高速な計算機は欠かせず、技術的に並列計算機が必要となっている。

このように計算対象ごとの最適手法の選択・統合を容易にするアルゴリズム生成は、数値計算のアルゴリズムの改良だけでなく、さまざまな分野においてブレークスルーをもたらす上で欠かせないアプローチである。一方、解を得るために導入した近似法あるいは入力データの正当性を観測値から吟味することも重要である。

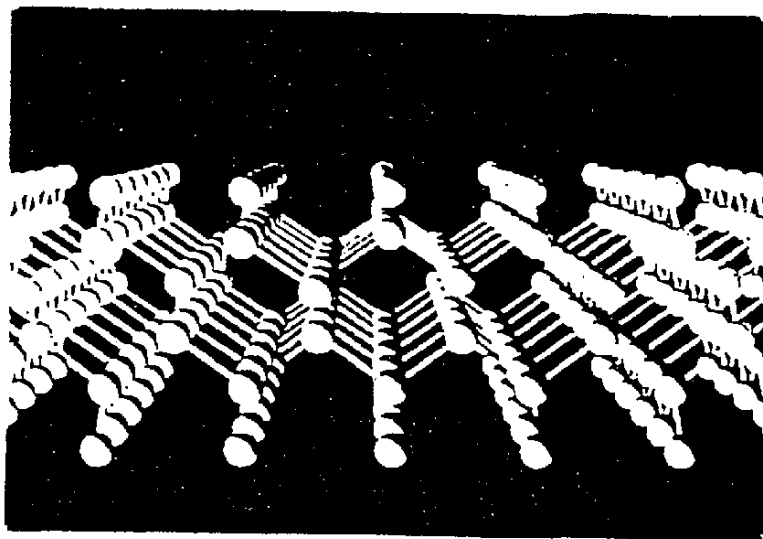
実際のシミュレーションの実行過程においては、計算の収束性にあわせてシミュレーションパラメータを変化させたり、シミュレーション結果から中間的モデルの最適なパラメータを抽出する等が人手によって行なわれているが、本来は計算機によってなされるべき仕事である。これらのことを能率的に行なっていくための機能の柔軟な計算機の出現が待たれている。

2) 支配方程式が決まっていない場合

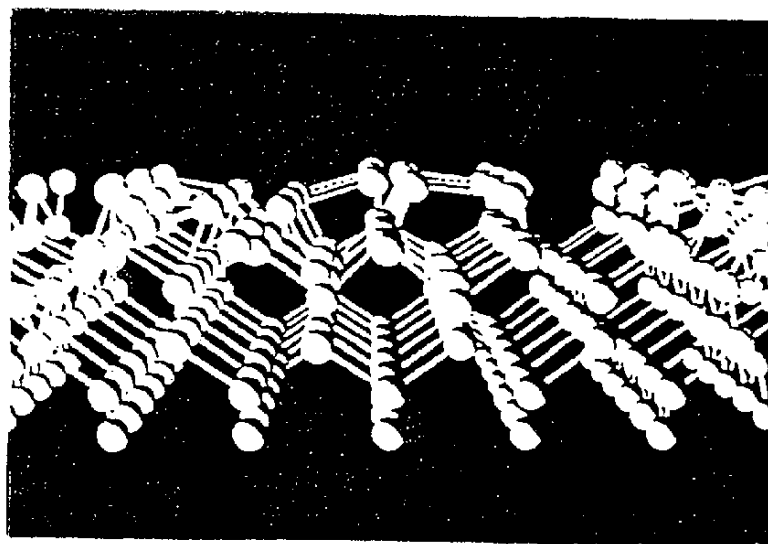
現象が極めて複雑であったり、現在の我々の知識が不完全なため確率論的にしか現象を記述できない場合や、本質的に支配方程式が決まらない場合がある。これらの典型的な例は、計量経済学のマクロ経済予測、意志決定支援による経営予測、国際政治、交通システム等の社会現象である。構成要因である単一要素の果たす役割は平均化して扱うことができるが、その果たす役割の大きさやその変化は確率論的にしか定まらず、時系列的に大きく変化する。そのため数理モデルの構成は困難である。この場合、多くの経験あるいは観測値から現象論的に現象を記述するモデルを推定し、そのモデルに基づいて予測・解明を行なうことになる。このとき観測値を尤もらしく再現するよう逆にモデルを再構成する必要がある。

ある場合には、モデルを階層化したうえで、ミクロモデルの情報を統計的手段により平均化し、その上位レベルのモデルはある支配方程式に従うように中間モデルを構成していくスケールリング、あるいはくりこみといった手法が用いられる。モデルの再構成を可能にするには、観測値の予測平均からの逸脱を考慮してモデルを組直せる柔らかな情報理論に基づく枠組みが必要である。

1)、2) いずれの場合にも入力データ、境界条件等は不完全にしか与えられず、用いられる近似の正当性も明確ではない。そのためモデルおよびその解法アルゴリズムの最適化が必要になってくる。従ってシミュレーションの実行プロセスをシステムとしてみれば、システムは不完全である。不完全にしか与えられない観測値をもとに、ある意味でシミュレーションシステム（入力パラメータ、近似モデル、数値解法、アルゴリズム等）を再導出することが必要になる。すべての方法、全てのパラメータ群についてシミュレーションを行なうことは不可能であり、不完全な情報から最適値を求めなければならない。このような制約のもとで、モデルを導出するには、情報量基準最小化に基づく適用型のモデル化手法が有効である。このアプローチは、実用設計段階で特に重要になる。実際、限られた数の観測値をもとに逆にモデルを推定



(a) 0 [f s]:へき開直後



(b) 160 [f s]:経過後

図 4.6: 分子動力学の計算例

電子構造計算（電子密度汎関数法）を併用した分子
動力学の計算—Siの再構成構造

表面のSi原子はボンドが切れた状態から、2つずつ
ボンドがつながった状態へと変化する、複雑な表面の
再構成構造を形成する。その数分の1ピコ秒での過
程をシミュレーションで捉えることができる。

し、そのモデルから得られる結果を最適なものにするようモデルを変化させ最適モデルを求め、それに対応するデバイスを実際に製造するといったことを設計段階で行なうことが多い。シミュレーションから有効な予言・解明を行なって、実り多い結果を得ようとするとき、不完全な情報しか得られないが、その情報を取捨選択し、対象物の理論的背景が明確でない物に対しても計算できるという柔らかな情報処理論に基づく計算機に対する期待は大きい。

(3) 電子生態系と次世代シミュレーション

シミュレーションとは現実の世界を模倣することである。世界とは、ある意味で因果関係の連鎖である。例えば、“運動する物体は壁面に当たって跳ね返ると同時に壁を倒す。倒れた壁は・・・”式の記述によって世界を規定することが可能である。多くの場合、現実世界の因果関係は、非常に大きなネットワークを形成するのが普通である。しかも世界が世界として安定して存在するためには、丁度生態系がそうであるようにネットワークが安定な閉ループを形成していなければならない。このアナログから、こうした計算機内部の仮想世界を“電子生態系”などと呼ぶことがある。こうしたシステムには生態系がそうであるように、ある範囲までは、安定性が極めて高い。つまり、多少の因果連鎖の欠如やあやまりに対して、それを補償するようなダイナミクスが系として備えられており、その結果、ネットワーク全体は外乱に対して極めてしなやかに対応することが出来る。このような意味で安定なシミュレーションは、大規模な因果連鎖が不可欠であって、それを円滑に実行するためには、超並列超分散の高能力マシンが不可欠なことは言うまでもない。

4.4.2.4 応用のイメージ

体験型シミュレーションのアプリケーションは、さきの新インタフェース(人工現実感)の項目で述べてある。予測・解明型シミュレーションに関するアプリケーションのほんの一部を示したのが、以下の事例である。

- 並列計算機の負荷分散の計画
- 回路の配置配線等の最適化
- 計量経済学のマクロ経済予測
- 国際政治、交通システムなどの社会システムの計画

4.5 柔らかな制御と機能統合化技術

4.5.1 柔らかなロボット技術

4.5.1.1 現状と問題点

従来のロボットは、認識部が外界をセンスして計算機内部にモデルを作り、計画部がモデルに基づいた作業を計画し、動作実行部がそのコマンドを処理するという、直列的で固い構成を取っている。まず、認識部と動作実行部が遠く離れているために、作業を巧みかつ敏捷に実行することが困難である。また、モデル化できる情報は限られているので、それを元に生成されるロボットの動作計画の信頼性は低い。モデルを複雑にすれば、より精密な作業が遂行できると考えられたが、モデルに関する膨大な記憶と計算時間の壁にぶつかっている。モデルが固いために、新しい環境や作業への適応性がなく、学習能力、経験の蓄積も期待できない。また、認識部と動作部は独立に研究されることが多く、両者を統合した能動的なセンシングの研究、たくさんのセンサーの情報を活用した作業実行の研究は、まだ緒についたばかりである。

4.5.1.2 研究の目標

ロボットの柔らかさは、いろいろな次元で考えることができる。ロボットの機構の柔らかさ(いわゆるフレキシブルアーム)、扱う対象物やとりまく環境の柔らかさも考慮されるべきではあるが、それにもまして重要なのは、以下に列挙する作業、情報処理(知能)、ロボットの数、人間との関係、などの柔らかさである。

作業の柔らかさ

- ・ 多種多様な作業がこなせる(汎用性、適応性)
- ・ 器用な(ソフトな、巧みな)操作(拘束に倣った動作、指先での物体操作)
- ・ 移動の柔らかさ(スムーズな移動、狭所移動、悪路移動)
- ・ 認識の柔らかさ(変動する環境への対応、多様な物の認識)
- ・ 失敗の分析と回復(融通性、信頼性)

情報処理の柔らかさ

- ・ 状況の変化の評価と追従(頑健性、信頼性)
- ・ 多種類のセンサ情報の統合的利用
- ・ 最適厳密解よりも準最適解の実時間探索
- ・ 過去の成功、失敗の教訓を活かせる(学習、自己組織化)

ロボットの数、相互関係の柔らかさ

- ・ 複数のロボットのコミュニケーション(ロボット社会)
- ・ 数の変動に対する柔軟性
- ・ 効率化のための分散化と階層化

人間との対話の柔らかさ

- ・ 多様な情報媒体(マルチメディア性)
- ・ 一人の人間対複数のロボットの対話
- ・ 知能的対話(知的遠隔作業ロボット、人間の行動から学ぶ)

4.5.1.3 実現のためのキーポイント

(1) 柔らかな情報処理

ロボットの柔らかさは、以下に述べる理由により、柔らかな論理をその基礎とする柔らかな情報処理によって実現される。柔らかな情報処理には、対象としての情報が柔らかいことと、処理手法が柔らかいという側面がある。

柔らかな情報の処理

ロボットは、実世界の中で動き、環境に何等かの変化を与えつつ情報を収集する。実世界から得られる情報は、以下の理由で柔らかな情報である。

- ・ センサからの情報は必ず誤差を含んでいる(不確定情報)
- ・ 裏側は見えないなどセンサからの情報は不完全である(不完全情報)
- ・ センサ情報はいかようにも解釈できる(曖昧な情報)
- ・ 実世界は多様であり、大量の情報を含んでいる(大量情報)
- ・ センサ情報は様々の物理量に対応し各々は相互に関係する(相互依存情報)

このような柔らかな情報を扱うためには、情報の適切な近似と統合手法が求められる。柔らかな情報処理の理論は、情報の近似と統合の基礎を与えるものであり、これら要求に対する手段を提供する。

情報の柔らかな処理手法

ロボットが活躍する実世界は、空間的に多様であり、時間的に変動する。この多様性と変動性に対処するためには、環境と自分自身に対する評価が重要である。すなわち、環境や対象を評価できれば、それに対する認識手法、作業手順を的確に選択することができる。これは、ロボットの重要な性質である適応性、汎用性を高めることにつながる。ロボットが実行しようとしている作業の意味を理解し、作業の進行状況を大局的に評価することができれば、作業の失敗からの回復を計画することが可能になり、信頼性を高めることができる。さらに長期的に、それまでに行った作業の履歴を解析・評価することができれば、未知の状況に対して最も近い経験を適用して行くことで対象作業を徐々に広げられると期待される。評価はまた、次に述べる群ロボットによる分散センシング、作業の分業化に対しても、重要な判断基準を与える。

一方、ロボットのもう一つの重要な特質に、実時間性がある。いくら最適な歩行パターンが計算されとしても、ロボットが倒れてしまってからでは遅い。従来の固い直列的な手法では、実時間性を高める手段は計算パワーを上げることしかなかった。小型の自律ロボットに搭載可能な限られた計算パワーで、最適でなくともよいから妥当な準最適解を高速で発見する手法が望まれている。

(2) 群知能情報処理

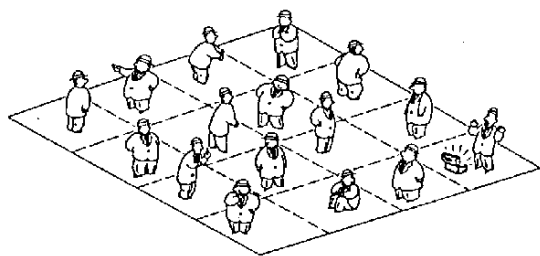
さきに述べた機能拡張や分業という機能は、あらゆる機構や知能を1つの処理主体に埋め込もうとしてもはや限界に達しはじめた今日のロボット技術に対し、自律協調作用を備えたロボットの「群」を用いて目標を達成するという新しいアプローチ「群知能情報処理」によって可能となるものである。

従来の自律機能を実現するための情報処理技法には、直列型計算機上の述語論理、プロダクションシステム、各種発見的方法（ヒューリスティックス）などがある。これらの技法は基本的にしらみつぶし的であるか、その場限りの手法である。そのため複雑な問題には計算量の爆発が起こりやすく、汎用性を欠くために一般の問題に適用することが困難であった。

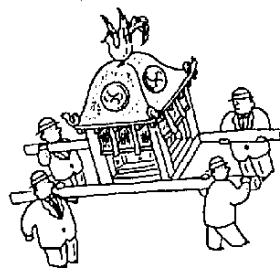
これに対し、群知能情報処理は、機能単位を多数の自律的に活動するモジュールに分散させ、お互いが通信によって情報を交換し、処理結果を評価しあうことで、群として協調的に作業を進めるアプローチである。この処理の単位を、自律性を備えたオブジェクトという意味で、エージェントと呼ぶ。群知能情報処理には、必ずしも最適ではないかもしれないが、合理的な時間内に許容できる計画を見いだし（適応性）、これに従って行動した結果を評価して修正を加えることで目的を達したり（頑健性）、多数の並列的探索の経過を見て有望そうな方向に注意を集中して短時間に解を見つけたり、比較的単純な機構で環境の複雑さに応じて複雑な活動を導出できる（汎用性）、その成功例を後の行動に役立てる（学習）などの効果が期待される。

柔らかなロボットは、多くの自由度、多くのセンサを備えた群知能情報処理を基礎として構成されなければならない。作業を、ただ一つの集中的なエージェント（情報処理主体やロボット）によって実施するのではなく、複数のエージェントが並列に働かせることが重要である。群知能処理に期待される利点として、次の点が挙げられる（図4.7参照）。

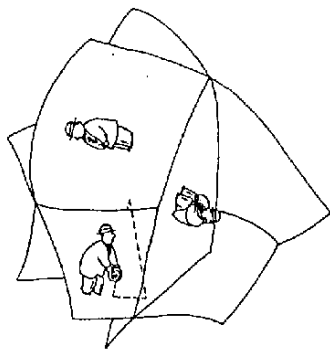
- 1) 宝捜しのように、領域を分担することで短時間に目的を達成できる。



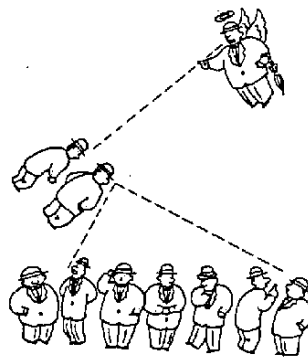
(a) 宝探し (分散探索)



(b) 御輿かつぎ (協調制御)



(c) バケツリレー (拘束処理)



(d) 実行役と目付役 (階層的管理)

図 4.7: 群ロボットによる柔らかな作業分担

- 2) お御輿かつぎのように、能力の限られたエージェントの協力によって、単独では困難な作業を能率良く遂行し、失敗をバックアップする効果が期待できる。
- 3) バケツリレーのように、一人一人の人間は、自分の持ち分の仕事を他とは比較的独立にしか実施しないが、全体として、合目的な作業が効率よく実施される。
- 4) 猿橋（さるはし）のように、ロボット自らが大きな構造物の一部となれば、単体のロボットでは不可能な、大きな作業が実施できるようになる。

(3) 適応、学習、自己修復機能

柔らかなロボットの実現には、情報処理形態において、質（固いアルゴリズムによる最適解）から、量（共同作業による近似・妥当解）への転換が必要である。一つの問題向きに最適化された解法を、人間から一つだけ与えられたロボットというのは、その個別の問題をいかにうまく解くことができたとしても、単機能の要素機械に過ぎない（汎用性がない）。軽微な環境変化にもついてゆけない（適応性がない）。多くの近似解をふまえ、状況によって作業方法を変更しながら作業を遂行する頑健性が必要である。そのためには、評価と過去の履歴を考慮した再計画機能、作業実行の動的な変更を可能にする動作単位、学習機構アーキテクチャが不可欠である。

従来のロボットは、サーボレベルでのみフィードバック系が構成され、上位の計画系は、実行系とは独立に動作している。柔らかなロボットでは、実行系から計画系へのフィードバックがあり、計画系はその情報から、自分の計画を評価することができる。環境と作業の効果との関係の評価することで、ロボットは環境に対する適応性を獲得することができるようになる。一つの最適解を網渡り的に実行するのではなく、多くの近似解を用意し、ある解の実行に失敗しそうになったらいち早くそれを察知し、致命的な状況に陥る前に、別のやり方を見つけだしそれにスムーズに移り、結果として頑健に作業を遂行する。ロボットを構成する要素、機能が多数になり、多くの種類の作業に対する汎用性を高めるにつれ、それらの関係をあらかじめプログラムすることが困難になる。この問題に対処するには、作業・環境のメタモデルと、動作の効果を評価することによる上位レベルでの学習フィードバックが重要になる。

メタモデルは、従来の固い幾何モデルに代わる、柔らかなモデルを提供する。メタモデルは、作業や物体の性質、機能、効果などの属性として記述され、環境が定まり、センサから情報が次第に収集されるにつれて、具体的な（従来型の）モデルを生成することができるような、高次のモデルである。メタモデルは、そのロボット自体の機能やセンサーの特質に関する知識も含んでいる。これらの情報に基づき、状況に応じて、センサー情報の解釈法、行動の予測法、作業の監視法が計画される。

柔らかなモデルの記述から実環境に適応するためのモデルを引き出すには、かなりの計算量を必要とする。また、作業を評価しつつ、環境の変化に応じて計画を作り直すには、いわゆるオンサイト・プランニングの技術が必要になる。両方にとって、超並列計算による実時間計算と、分散システムのスケジューリングは、重要な鍵となる。

高度に組織化された複雑なロボット群が安定に機能するためには、各ロボットおよびロボットの各器官が自律的局所的にその機能・形態を保持することが重要である。定常的に部品を交代する新陳代謝機能と、臨時的（大規模）な自己修復機能とを実現することが重要である。この場合にも、柔らかな評価機能がその基礎を与える。すなわち、各部分は局所的な情報交換を通じて全体の構造の情報を確保できるような機能を持たなければならない。

柔らかなロボットをハードウェア的に実現する手段として、自己組織を含む集団化の力学を利用する方向がある。つまり、情報処理機能としての柔らかさとともに、ハードウェアとしての柔らかさとして、たとえば、ロボット全体を一体として設計、実現するのではなく、ある意

味で汎用的な部品ロボット（例えばセルラオートマトン：機能単位としての汎用性ではなく必要に応じて材料から機能単位を構成できる情報と素材をもつ単位素子）の集団化を利用する方向である。

この個体の安定性に対して、ロボット群に集団として適応性、発展性を持たせるために、個体ロボットを越えた情報の伝達、変更の手段として「若返り」の機構を取り入れることも有用であろう。これによって遺伝的進化の仕組みを具体化できれば発展性が期待できる。

(4) 統合化手法

多様な環境で多様な作業を実施する柔らかなロボットを実現するためには、情報形態にしても、情報の入力方法（センサなど）、情報処理方式、計算モデルなどにしても、単一のものでことたりることはない。複数のものの統合が重要な技術となる。以下にその具体例を述べる。

感覚系と行動系の統合

実世界の情報はパターン情報として得られることが多く、作業目標は記号情報で与えられる。この意味で、行動システムは必然的にパターン情報と記号情報の統合機能を備えねばならない（統合処理）。記号情報（作業命令、作業知識）とパターン情報（視覚、力覚、触覚、すべり覚、音声信号）の統合、効率の良い記号学習と、並列処理が得意とするパターン学習（記憶）の統合などが求められる。また、実環境から情報を得るために能動的に環境に働きかけるアクティブセンシングの実現にもこの統合が必要である。

感覚器の統合（センサー融合）

同一あるいは異なる種類のセンサーを多数用いることで、効率、雑音、精度、曖昧さ、不完全さなど、単独のセンサーに頼ることの問題を克服し、信頼性の高いセンシングを実現する。また、内部のモデルを活用してセンサの振舞いを予測することで、特定の信号に対する感度を鋭敏にしたり、状況に応じてセンサーの優先度を評価し、矛盾する情報の統合を図る。

4.5.1.4 研究課題

以下に、柔らかなロボット実現のための具体的研究課題を列举する。

1) 柔らかなモデリング手法とモデル獲得技術

環境、作業、ロボットに関するメタモデルから状況に応じたモデルのインスタンスを生成する技術。そのためには、まず、さまざまな作業のモデルの記述法を個別に分析し、それらを生成するためのパラメータとプリミティブを定める。つぎに、個々のモデルを合成するのに必要な機能的（意味的）なモデルの記述法を研究する。

2) オンサイト・プランニング技術

実行系・感覚系から計画系に至るフィードバックを形成し、環境に応じて実時間で作業を計画する技術。計画には、センサーの利用法、監視の方法等も含まれる。作業が失敗すれば、ただちに失敗の原因を評価し、新たな計画を作成する。

3) 群知能探索手法（分散協調探索手法）

探索空間を多数のエージェントで手分けして探索したり、探索経過を評価して有望な方向を見つけたらその方向により多くのエージェントを投入したり、全エージェントの動作状況からエージェントの役割を分化させたりする手法などをベースに作業目標の達成を計画する技術を研究する。

4) 能動 / 分散センシング技術、分散解釈技術

利用するセンサの配置や種類、センシング処理法などを状況に応じてシステムが自分自身で能動的に変化させる能動的センシング技術、空間的に分散した多種類多数の（必要ならは移動可能な）センサ群や、時間的に異なる複数の情報を協調的に利用する分散センシング技術などを研究する。また、センシングされた多様な情報を分散的に解釈し、総合的に物体理解を進める分散解釈技術を確立する。

5) 高度物体操作技術

センサで結果を常に監視しながら物体操作作業を遂行する技術を基礎に、作業の解析とモデル化、そのマルチエージェントによる実現と体系化、その階層的構成の研究を行う。また、このような物体操作ソフトウェアを最も効果的に実施するハードウェアを製作し、マニピュレータや多指による高度物体操作技術を確立する。

6) 群の協調管理技術

知能システムの情動的マルチエージェント構成法とその多層的エージェント管理技術、及び、その動的役割配分を含む群知能システムの協調作業を研究する。

7) 知的対話技術

多様な情報を処理する群知能情報処理のための対話技術を研究する。また、人間と群知能システムとの意志疎通技術、つまり、複数の知能処理単位や知能システムに、重要な情報のみを効率よく報告させる機能や、群知能システムと人間とが共同して作業を実施する機能のための対話技術を核とするインタラクティブロボティクス技術を確立する。さらに、人間を教師とした学習機能を研究する。

8) システム統合技術

以上の技術を統合し、超並列超分散計算機上に統合群知能システムを構築する技術を開発する。さらに、統合群知能システムによって、作業の状況に動的にシステム構造を変化させ、要素システムを協調させることでロバストな作業が実施できることを実証する。

4.5.2 機能統合化システム

4.5.2.1 現状と問題点

柔らかな情報処理によって実現されるであろう認識・理解、推論・問題解決（計画）、制御などの要素機能を統合した機能統合化システムはどのようなものであろうか？

従来の制御システムは静的なシステムをその基本にしていた。問題解決の枠組は最初に与えられ固定される。新たな知識が増えることがあってもアルゴリズムが変更されることはない。適応的といってもたかだか数個の変数を決めたアルゴリズムにしたがって変更するぐらいである。しかしこれでは我々が目標とする動的に変化する外界に対応した柔らかな制御は不可能である。

4.5.2.2 研究の目標

我々が目標とする統合化システムは、動的でしかも確率的な時空構造を持つ外界に対応する必要がある。そして外界とのアクティブな「Interaction」があって始めてそのシステムに本当に必要な処理の枠組や知識の自律的な学習が可能である。

そのような柔軟な制御を実現するためには、履歴を持ち確率的な動作を基本とする動的な要素からなる部分を、外界との「Interaction」によって自律的に階層的、モジュール的に統合していくシステムが必要となる。

そのようなシステムのモデルが図 4.8 である。図からは動的な動作は読み取れないが、各要素は履歴を持ちながら確率的に動作する。このモデルはブレイン・マシン、ブレイン・マシンのためのセンサ群、機械群 + センサ群、HI (Human Interface) 群 + センサ群そしてそれらを取りまく人間を含んだ環境からなる。すべての部分は互いにやりとりしながら自律的に動作する。システムは、モジュール化、階層化により外界の確率的構造を内部に局所的かつ階層的にモデル化する。この統合化システムを実現するためには各部分は未熟でも最初から完全に外界と自律的にインタラクト (interact) するシステムを作ることが重要であると考えている。

モデルの各モジュールおよび各階層は基本的には同じ動作原理に基づいて動く。その動作原理を作り出すべき基本概念を認識の相対性、「Interaction」、現実の複雑性を中心に述べ、研究の方向づけを述べる。

4.5.2.3 研究の内容

今までの研究についての認識あるいは概念は、絶対的な視点から語られたものが多い。「ここにある車を計算機に認識させるにはどうするか」といった具合である。そして「車」の概念を用意し、入力とその概念を認識によって結び付けることに力を注ぐ。すなわち認識システム(人間や計算機)とは独立に絶対的な概念が存在し、認識システムはその絶対的な概念をいかに認識するかが問題であるといった立場である。概念の完全な定義が可能な対象に対してなら絶対的な概念も存在し得るが、どんな対象でも完全に定義することは非常に難しい。その難しさは対象の概念の境界の空間的、時間的曖昧さによっており、対象の完全な定義は本質的に不可能である。

こういった概念定義の不完全性にも関わらず人間が対象をほとんど確実に認識してしまうのはなぜであろうか。人間の認識は確率的なものでしかないが、たとえ一つの対象の各部分の認識は低い確率でなされても、各部分の認識を階層的、モジュール的に積み上げる中で認識の確率をほとんど 1 にするからであると考ええる。

概念の完全な定義が不可能であることから、機能統合化システムにおける認識は各認識システムを構成する場合には、外界とのインターアクションも含めて各要素認識システムのセンサーで認識されたことをとりあえず信じるべき情報とする「認識の相対性」を基本とすべきであろう。

「認識の相対性」を基本にすえても、各認識システムは概念を全く任意に定義できるわけではない。確率的な構造をもつ外界との「Interaction」とシステムに内在する評価によって自分自身にとって意味のある外界の構造を反映した概念と認識過程を作り上げていく。それが「Interaction」の重要性の理由である。

システムが時空に渡って外界に及ぼしたと認識しているものと、その外界からの結果とそれによるシステムの内部状態の変化の認識をもとにしてシステムは自分自身の評価基準にしたがってシステムの状態を変化させる。その結果としてシステムの内部に階層的かつ構造的に外界の確率的構造を反映させ、外界の対象の概念を作る。

認識は絶対的ではなくいつでも新たに認識され得るものが存在する。新たに認識された問題に対して最初の枠組が十分である保証はない。統合化システムに必要なのは、それまでの枠組で解けないような問題に対しては新たな枠組を取り入れて解決してしまうようなシステムである。学習、自律を実現することにおいて生物は決して最初からいろいろな枠組を用意していた

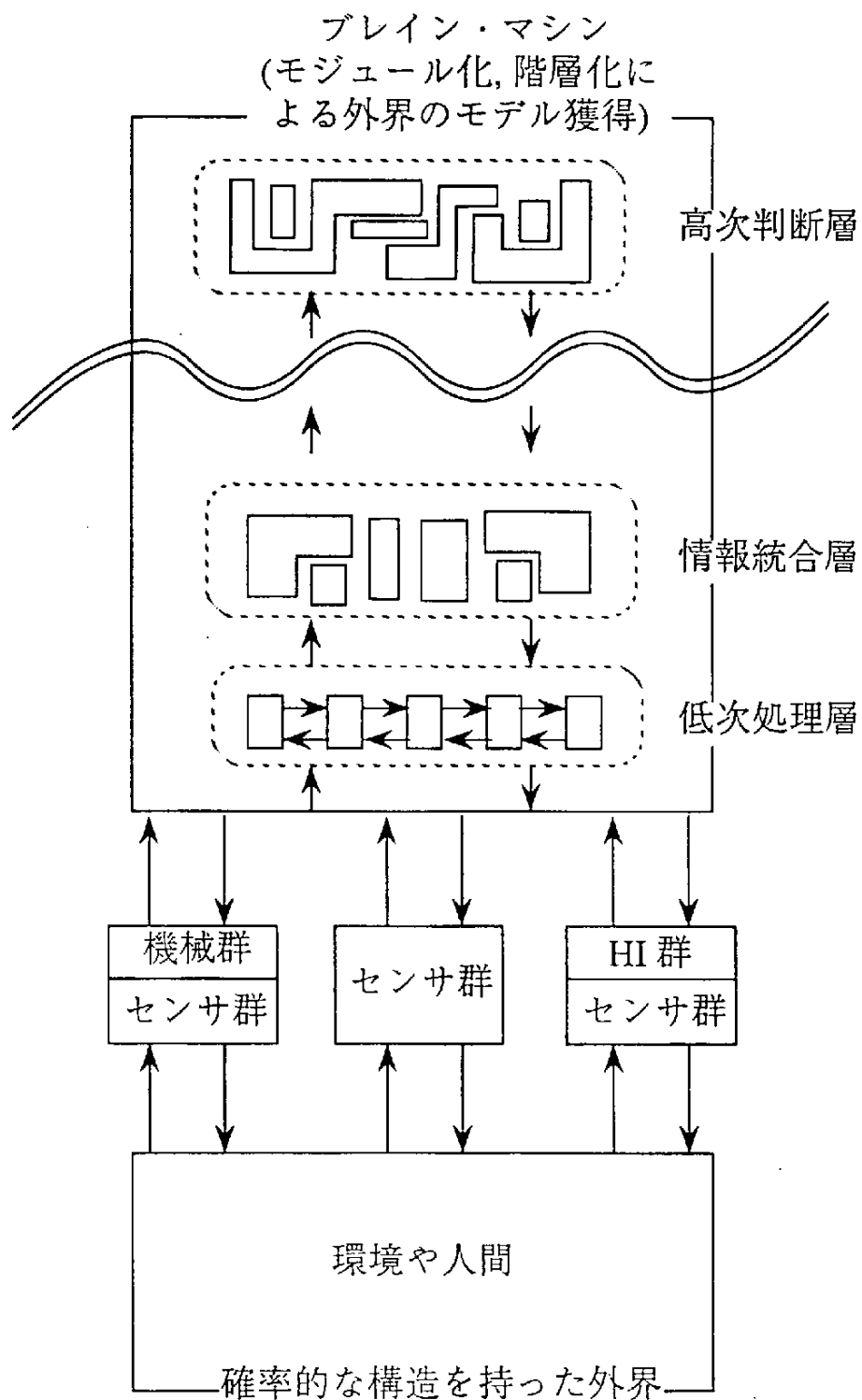


図 4.8: 統合化システムのイメージ

わけではない。むしろ偶然に現実における制約条件を学習、自律を実現するのに使えるのを発見し、それをシステムの中に採り入れていった。

現実の「もの」は時空に渡る広がりを持ち、最初の段階ではほとんど意識されない実に多様かつ複雑な制約条件を持ち得る。統合化システムには必ずしも現実の「もの」を使う必要はないが、たとえソフトウェアでシステムを作る場合でも現実が持つような多様かつ複雑な制約条件を持つ要素からなるシステムが必要である。システム内に多様かつ複雑な制約条件を持つことはそれだけ多様かつ複雑なやり方で行動の全体の空間に確率分布を与えられ、新たな状況や問題に対しても有効な確率分布を与えられる。

4.5.2.4 研究課題

以上の考えを元に機能統合化システムを実現するために必要となる研究は、それぞれの部分が不均一でそれらが空間的にも時間的にも多様な関係を持ち得るシステムの時空における状態およびその変化をとらえる研究である。特に「Interaction」を基本にするシステムにおいて連続的な時間方向の解析なくしては本当の状態をとらえられない。システムの状態をとらえる研究の道具として数学の確率論、特に確率過程を用いることにより、確率的にシステムの評価が可能になると考えている。

機能統合化システムの具体的な動作原理は次のようなものを考えている。システムは行動の全体がなす空間に対する確率分布を持っており、その確率分布に従って行動を出力する。その行動の結果を評価し、行動の全体がなす空間に対する確率分布を変えることが学習に相当する。ここでシステムがいかに多様かつ複雑な制約条件を持ち得るかが学習の可能性、効率を決定する。また分散表現の情報と記号表現の情報の統合は、確率的な構造を持つ外界の分散表現をシステムの階層化、モジュール化を通して確率 1 に近づけることにより実現される。

最適化問題に対するシミュレーテッドアニーリングは確率とダイナミクスを持ったシステムを扱っているという意味で目標とする統合化システムに近く、これからの研究に最も関連する研究分野であると考えている。最適化問題の解空間を適当なシステムの状態、解の最適性をシステムのエネルギーの最小値で表現する。確率分布のパラメータとなっている温度を下げながらエネルギーと温度で決定される確率にしたがってシステムの状態を変化させ解空間の探索を行なう。統合化システムの研究からみたこのシミュレーテッドアニーリングの問題点とどういった解決法があるかを指摘する。

一つはシミュレーテッドアニーリングが複雑な構造を持つシステムに対して適応されていないことである。これは与えられた問題に対して複雑な制約条件を人間が直接与えることが難しいからである。これを克服するには互いにいろいろな関係を持ちそれらが多様かつ複雑な制約条件を持つ要素からなるシステムの自律的に構造を獲得する手段が必要である。

もう一つは最適化問題が時間を持たない対象であることである。シミュレーテッドアニーリングは時間に関係で静的な関係を徐々にシステムを硬直化することにより実現するといえる。しかし統合化システムの対象は、時系列に対するエネルギーの最小化を必要としたり、最小化すべきエネルギーが明確にならなかつたり、あるいは最小化の対象が時間によって変わっていく。こういった対象に対しては必ずしもその時点の空間的に最適の状態ではないが柔軟性とダイナミクスを残したまま動かすのが有効な手段だと考える。

第 5 章

柔らかな情報処理のシステム基盤

5.1 ニューラルシステムからの検討

5.1.1 基本的考え方

柔らかな情報処理というと、人間の情報処理にあって、コンピュータの情報処理にないものを期待することが多い。人間の情報処理は神経つまりニューロンで構成される回路網でなされているので、ニューラルシステムは明かに柔らかな情報処理の大きなモデルとなる。

ニューラルシステムの柔らかさの一つは学習可能性である。つまり、システムの応答が環境に即して徐々に変化し、画一的な応答ではなく可変である点である。もう一つは汎化機能である。ある入力に対しある出力がでるようになると、それに近い入力に対しても同様な出力が期待できるといった機能である。これは実際のニューロンがアナログ素子であるからである。つまり、とんでもない応答が発生しにくいことが暗に期待できる。こういった柔らかさの機能は、現在のコンピュータでもプログラム次第で実現することができる。しかし、例えば学習させるとき、どの様な場合に応答をどちらの方向に変化させるべきか、また、こういった規則で変化させると能率良く変化していくか、といったことについては殆ど解っていない。また、汎化機能についても、これをディジタルシステムで実現するとしたら、どの程度の近傍性を持たせたらよいのかも良く解っていない。

では、ニューラルシステムは、すでにこうしたことに解答を用意しているのかといえ、それは否である。現状の研究対象となっているニューラルシステムは、規模からいっても内容からいっても現実の脳神経系からは程遠い。これをなるべく近付けることが、ニューラルシステムに関する研究の重要な課題といえよう。このように述べると、最終目標は脳そのものを金物で構成することと思われがちであるが、必ずしもそうではない。こうした研究のプロセスで、脳の動作原理を把握し、よい機能をピックアップし利用していくといった工学的な研究を行うことが肝要であろう。

現在のニューラルシステムに関する研究の中でもっとも大きな潮流は、昨年度の報告書からも解るように、誤差逆伝播法と呼ばれるシステム学習アルゴリズムである。この方法はまず基本的には、入力から出力に向かって信号が一方的に流れるフィードフォワード型回路を対象としている。外部に教師がいて、その出力が期待とどのくらい異なるかを教えてくれる。この教師情報を利用して回路構成を変更していく。この潮流から考えて、本研究計画の進むべき方向は大きく二分できよう。まず、先に述べた潮流にのって、さらに高速化、大規模化を進めるテーマが考えられよう。例えば、ニューラルシステムを構成する回路をどのように巨大化し、機能分化させるかといったテーマである。第二は潮流から逸脱するテーマである。例えば、回路内にフィードバックのある場合の回路の動作、および学習ルールの研究、さらには環境から

教師なしで学習情報を得ていくシステムの研究といったテーマである。

前者はどちらかというと開発的なプロジェクト型研究指向であり、後者はどちらかというと基礎的な探索型研究指向である。この両輪があいまって研究開発を展開することが肝要であろう。研究のツールとしては、対象とするシステムの巨大化、複雑化に合わせ、研究用のニューラルシステムを構築する必要があるだろう。しかし、学習ルールなどまだ未知の部分が多いことから、専用ニューラルマシンと、高い可搬性を持つ制御部分とを必要とする。このあたりで超並列システムとの統合概念が生まれることが期待される。

このような観点から、本節ではまずニューラルネットワークモデルについて議論する。ニューラルネットワークで柔らかな情報処理を実現するためには、回路の大規模化と機能分化が必須である。しかし大規模な回路の構成法や学習の方法はまだ充分研究されておらず、モデルレベルでの研究が非常に重要である。ここではまずモジュール化・階層化の方法について述べ、次に新しいモデルや学習法について論じる。次に、大規模なニューラルネットワーク回路を実現する方法について述べる。まずスケーラブルなアーキテクチャの重要性とその構成法を論じ、ついで具体的な実現手段としてウェハスケールインテグレーション技術を用いて100万ニューロンを実現するハードウェアについて述べる。最後に、コンピュータとニューラルシステムを統合したシステムのイメージを与え、アクティブコグニションを一つの応用例として統合システムに向けてのアプローチについて述べる。

5.1.2 ニューラルネットワークモデル

5.1.2.1 ニューラルネットワークの構造

(1) モジュール化

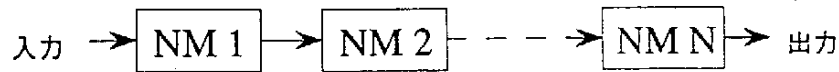
ニューラルネットワークアプリケーションの多くは、現時点では試作レベルにあり、ネットワークの規模も小規模であるが、今後は実用システムの実現に向けてネットワークの大規模化が進むと考えられる。しかし単純に規模を拡大しても、ニューラルネットワークの持つ以下のような欠点が表面化し、所望の性能が得られない。

- 学習の収束性が悪くなる
- 学習時間が増大する
- 汎化能力が低下する

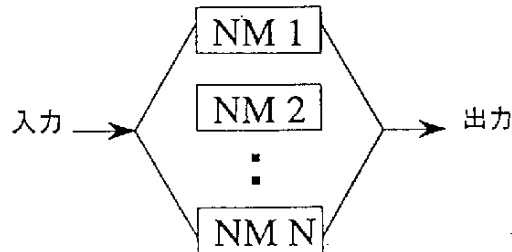
現在の技術で大規模ネットワークを構築するには、システム全体をいくつかのレベルの機能に分割し、各機能をそれぞれ独立したニューラルネットワークで実現する、いわゆるモジュール化を導入するのが現実的である。各レベルのニューラルネット・モジュール(NM)は個別に学習させることができ、規模が小さいので収束も速い。結果的には、大規模ネットワーク一つを学習させるよりも短い時間で学習が完了する。また、明示的な知識をネットワークの構造やデータ表現に組み込むことにより、白紙の状態から学習させたネットワークよりも優れた性能が得られる。NMの結合方法は、逐次モジュール化、並列モジュール化、階層モジュール化の3方式がある(図5.1)。

1) 逐次モジュール化

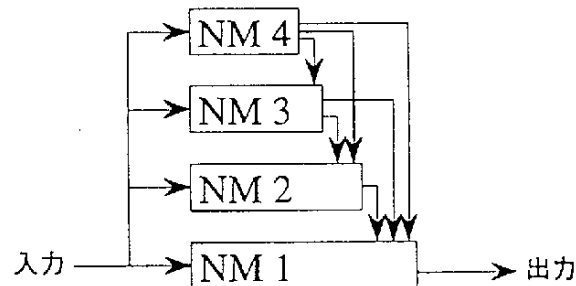
逐次モジュール化は、入力から出力までの間に情報の適当な中間表現を設定し、まず各NMに中間表現 k から $k+1$ へのマッピングを学習させる。次にサブネットを結合し、必要なら再度



(1) 逐次モジュール化
Sequential modularization



(2) 並列モジュール化
Parallel modularization



(3) 階層モジュール化
Hierarchical modularization

図 5.1: モジュール化の 3 方式

学習を行って全体の整合をとる。各サブネットは出力段に近づくにつれて高次の処理を行う (図 5.2)。逐次モジュール化は明示的な知識やノウハウを組み込みやすく、各ユニットの役割が明確であるという長所があるが、従来のエキスパートシステムと同様に知識獲得の工数がかかり、機械的な学習が難しい。

2) 並列モジュール化

並列モジュール化には統合型と選択型の 2 つの方式がある (図 5.3)。統合型は入力信号を全 NM に入力し、その出力を統合して最終的な出力とする。各サブネットが入力パターンの様々な特徴を評価し、その評価結果を用いて多角的な判断をするため、信頼性のある結果が得られる。反面、全 NM に計算を行わせるため、計算量が膨大になるという欠点がある。実用化のためには各 NM の計算を並列に実行する機構が必要になる。選択型は入力信号の性質にしたがって NM を適宜選択し、その出力を最終的な出力とする。全 NM を励起する必要がないので統合型に比べ計算の負荷が軽い。しかし適切な NM の選択に失敗すると以後の処理が正しく行われない等の欠点がある。この欠点に対処するため、ただ 1 つのサブネットを選択するのではな

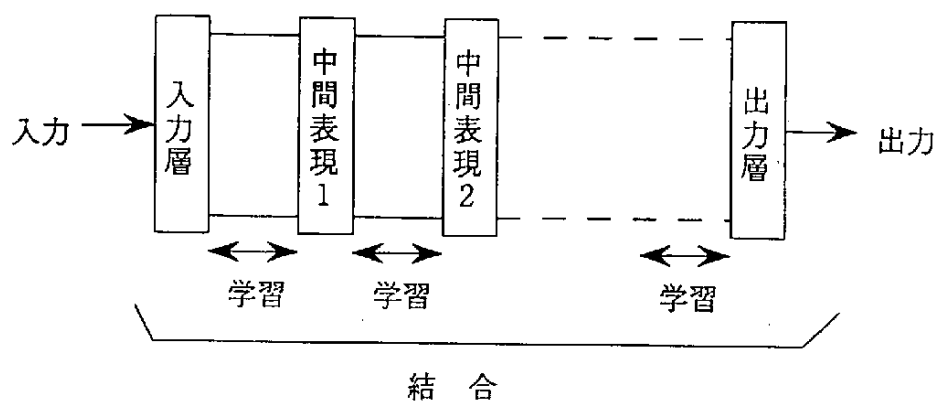
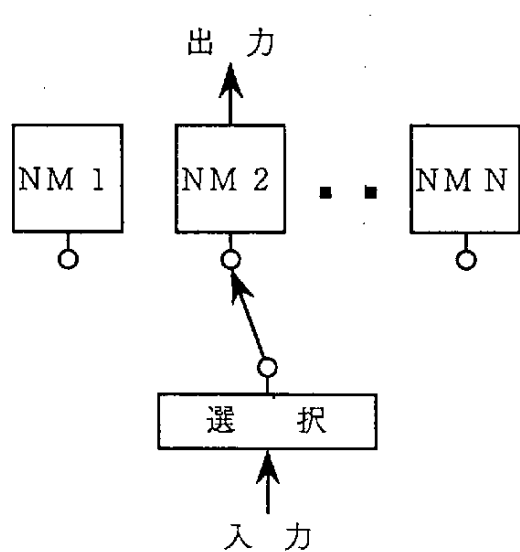
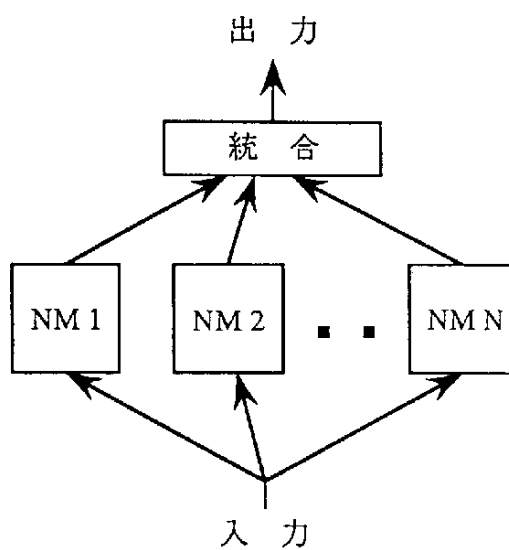


図 5.2: 逐次モジュール化



選択型モジュール化
Selective modularization



統合型モジュール化
Integrative modularization

図 5.3: 並列モジュール化

く、複数の NM を選択して結果を比較する方法をとることもある。この場合はむしろ統合型に近い計算アプローチとなる。

並列モジュール化は、パターン認識の分野で、認識対象を拡張するために用いた例（文字認識において、認識字種を増やす等）が多い。また、画像処理・画像認識では、局所的な部分画像に対するローカルな処理を並列に行い、次に統合化するのが一般的であるが、このような処理にも並列モジュール化は適用できる。

3) 階層モジュール化

階層モジュール化は、NM を縦方向に積み上げた構成をとり、各 NM の出力はシナプス結合を通じて、自分より下位の NM 全てに伝達される。このような結合は脊椎における神経系において観察することができる。学習は下の NM から順に行なわれ、上位の NM は下位の NM に対する機能追加モジュールとして働く。現在のところ、階層モジュール化に関する研究は行なわれていないようであるが、生理学的知見との整合性が高いという点で非常に興味深い。また、階層モジュール化の導入により、再学習なしの知識追加等の新たな可能性が開けると考えられる。

(2) リカレント・システム

1) 構成

ニューラルネットをモジュール（基本単位）として複数のニューラルネット・モジュール（NM）とそれらの結合から成る系構成において、入出力関係（情報の流れ）や処理の流れにフィードバックがある系、即ち、NM 間に相互作用がある系をここではリカレント・システムと呼ぶこととする（図 5.4）。図 5.5 は並列度、モダリティ、処理の深さの 3 軸で表わしたリカレント・システムのイメージである。並列度の軸は同種データを同一時刻に処理する NM を、モダリティの軸はシステムで扱うデータ種別ごとの NM を、処理の深さは情報や処理の流れに対応する NM を表わしている。リカレント・システムは、NM 間の情報あるいは処理の流れにフィードバックや循環があるのが特徴である。情報の流れや処理にフィードバックを導入することにより、機能的には内部状態を有し、その内部状態に基づく処理や NM の相互作用により、ある機能や情報処理を実現することができる。NM は、記憶機能のないフィードフォワード型のものから記憶機能を有するものやユニット間結合に相互結合やフィードバックを有する、いわゆるリカレント型のものまで各種のニューラルネットで構成されるものとする。

複数のモジュールとそれらの相互関係で構成されるシステムと言う意味では従来システムとの差はないが、モジュールをニューラルネットで構成することによって柔らかな情報処理を実現できる可能性やモジュールの役割やモジュール間の相互関係を学習によって適応的に形成できる可能性が高いことがリカレント・システムの大きな特徴である。また、そのような可能性を追及するのが研究の目指すべきものである。したがって、システムの構成（NM とそれらの相互関係）によってどのような情報処理、どれくらい柔らかな情報処理が可能となるのか、あるいは逆に、どのような学習手続きによってそのような NM と NM 間の相互関係を形成できるのか課題となる。

2) 学習制御レベル

リカレント・システムで実現される情報処理の柔らかさはシステムを構成する NM の役割と NM 間の相互関係の柔らかさに依存する。システムに要求される柔らかさ、即ち、NM の役割とそれらの相互関係の柔らかさ、さらに学習制御系の構成に応じて、学習制御にもいくつかのレベルがある（表 5.1）。ここで、学習制御系の構成とは、学習制御の有無とその形態を意味し、制御がない場合と、制御有りの場合はシステム全体あるいはある塊ごとに制御主体があり

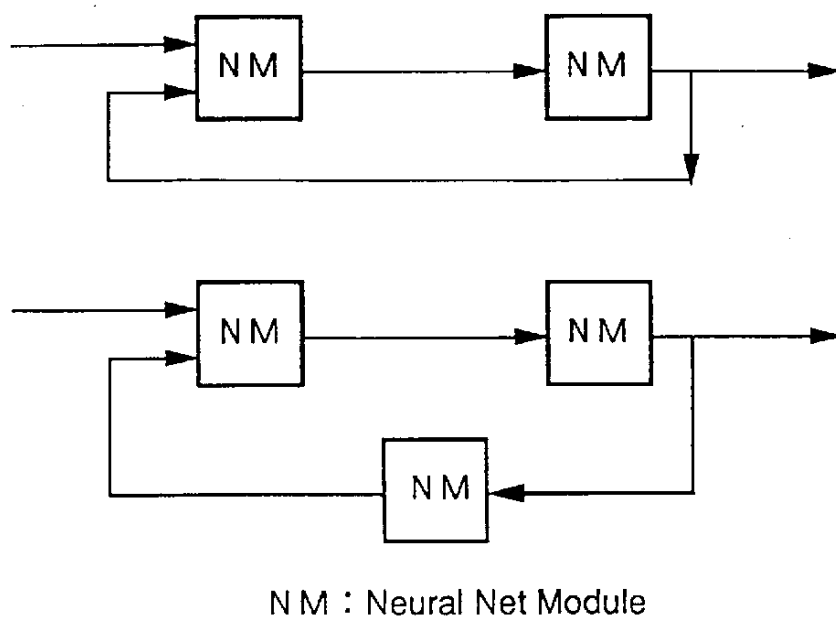


図 5.4: リカレント・システム

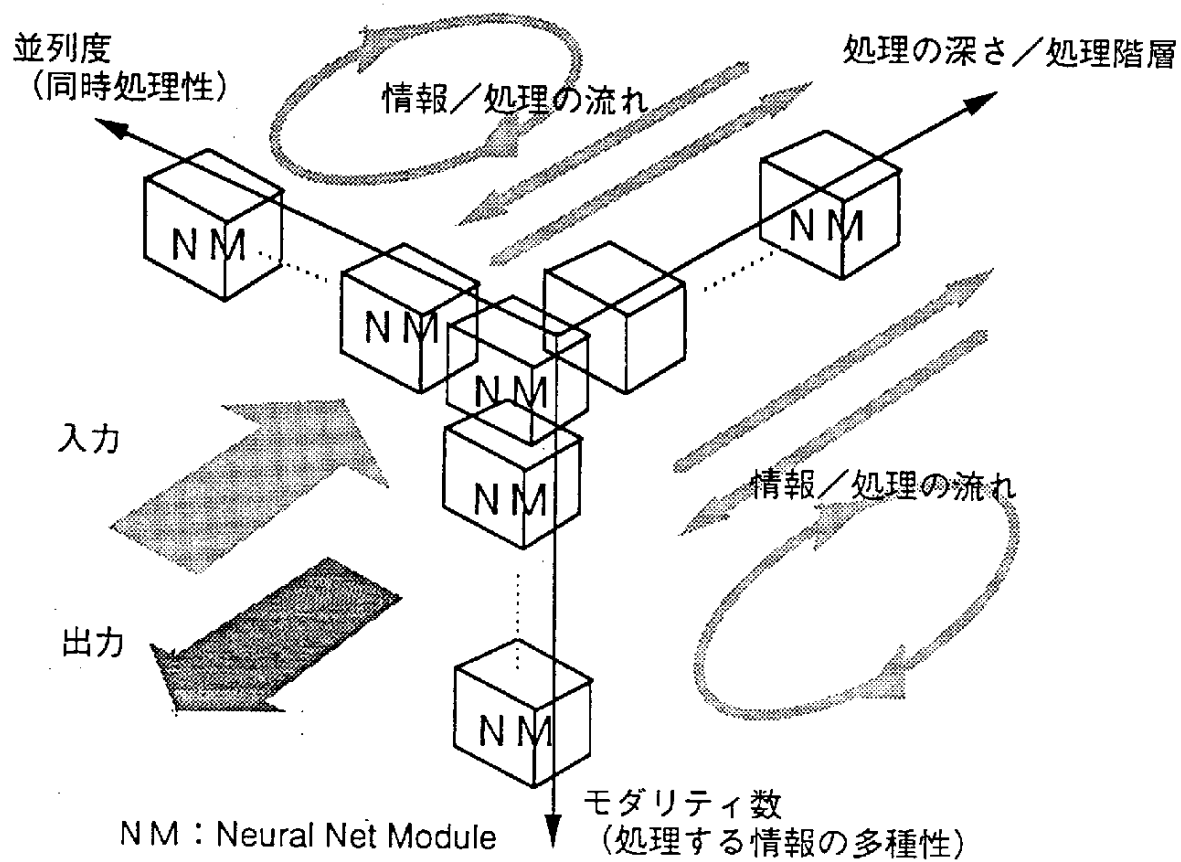


図 5.5: 並列度、モダリティ、処理の深さの3軸で表したリカレント・システム

表 5.1: 学習制御のレベル

学習制御系の構成	NMの役割	NM間の結合関係／結合度	学習制御レベル
学習制御なし	固定	固定	0
集中制御	固定	可変	1
	可変	可変	2
分散制御	固定	可変	3
	可変	可変	4

学習制御を集中して行う集中制御の場合と制御主体がなく各 NM が学習制御を行う分散制御の場合とがある。

レベル 0 はモジュールベースの系構成法の最も単純な場合に相当し、NM の役割も相互関係も固定で、各 NM の入出力条件に合わせて NM 間結合を構成するので学習制御は不要である。レベル 1 は NM の役割は固定であるが NM 間の結合関係が可変の場合であり、例えば、制御主体が NM 間の結合関係や結合度を調整することにより系全体の学習を司るような場合である。次のレベルは集中制御型の学習制御で NM の役割および結合関係とも可変の場合で、NM 間の結合関係や結合度の調整に加えて NM 内での処理や機能を制御するような学習制御法である。外部からの制御で NM の処理や機能を変化させるためには、コンテキスト情報のための入力を持つニューラルネットや記憶機能を持つユニットへ外部からの書込ができるニューラルネットやユニット間の結合荷重を外部から修飾できるニューラルネットなど、入力と出力のみの 2 端子だけではなく外部からの制御端子を設けた 3 端子型のニューラルネットの研究も必要となる。

分散制御型の学習制御では、各 NM が他との協調のなかで分散制御を行うわけで、システム全体のパフォーマンスを表わす何らかの評価関数を各 NM が共有して自らの役割と他との相互関係を調整するような高度な自律分散の学習制御である。NM の役割が固定／可変の 2 つの場合が考えられるが、各 NM の自律性を保存しつつ相互関係を自己組織的に学習できる学習方式／機構の創出が大きな課題である。

5.1.2.2 ニューラルネットワークの学習

(1) 教師あり学習と教師なし学習

ニューラルネットワークの学習方法は、教師あり学習と教師なし学習に大別される。教師あり学習とは、ある入力値に対するネットワークの出力と教示データとに隔たりがあった場合に、ネットワークの重み係数を変更する学習法である。教師なし学習とは、入力値に対して、ネットワーク自身があるルールにしたがって自ら重み係数を変更する学習方法である。教師あり学習、特にバックプロパゲーションについては、学習の高速化など多くの改良がなされ、応用事例も多く出ている。これに対して、教師なし学習に関してはあまり研究されていないのが

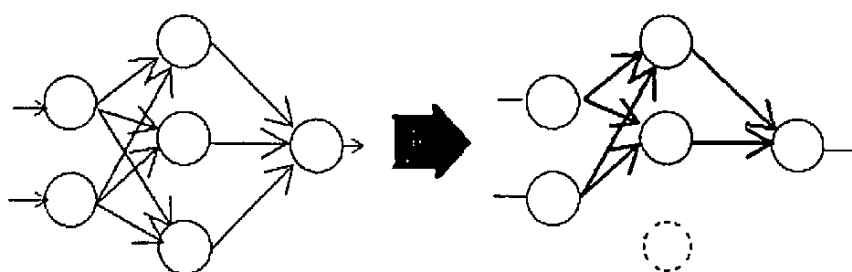


図 5.6: 構造簡素化のイメージ

現状である。しかし、先に述べたリカレント・システムなどでは、モジュール間の関係などをすべて与えることは困難である。教師なし学習を適用すれば、自らの学習則にしたがってモジュール間の関係をも生成してくれる可能性がある。以上のような観点から、今後教師あり学習のみならず、教師なし学習の研究にも注力すべきだと考える。

(2) 構造学習

1) 応用の観点から見た問題点と現状技術

ニューラルネットワークを実際の問題に応用する時に検討すべき項目の一つに、どのような構造を採用すべきかという問題がある。具体的には、中間層の数、各中間層のニューロン数を幾らにすれば、適切な精度で対象問題が取り扱えるニューラルネットワークが実現できるかという問題である。4層のネットワークであれば、任意の精度で近似できるニューラルネットワークが構築できることは、理論的に証明されている。しかし、実際には対象問題の性質によってネットワークの構造が左右され、また、教示データの精度や質によって学習後の性能が左右される。いうまでもなくほとんどの場合、与えられた例や対象問題の性質を解析し、予め構造を決めるのは不可能なことである。そこで、重要になってくるのが、ネットワークの構造も学習の過程で決めていくような学習法である。現在のところ、以下のようなアプローチがある。

1. 予め十分複雑な構造を用意しておいて、学習の過程で簡素化していく方法（図 5.6）。
2. 非常に簡単な構造から学習を始めて、必要に応じて複雑化していく方法（図 5.7）。

1. の例として、Rumelhart が提案した学習の評価関数にニューロン数からなるペナルティ項を導入する方法がある。これは、できるだけ簡単な構造が得られるようにして、汎化能力を評価しようとするものである。2. の例として Cooper らの RCE（Restricted Coulomb Energy）ネットワークモデルがある。これは、入力層のみからスタートして、中間層のニューロンを作っていく方法である。

2) 今後の課題

新情報処理技術のコンセプトである柔らかな情報処理を実現するには、オフラインで学習しその結果を使うといった静的な学習だけではなく、時々刻々状況に適用できるいわゆる動的な学習方法を確立することが不可欠である。これを実現するには、どのように学習を行ったらいいかを処理する仕組み、いわゆるメタ情報処理を実行する仕組みが必要となる（図 5.8）。このために、汎化能力も含めて、学習状態の評価法を確立することが第一歩だと考える。

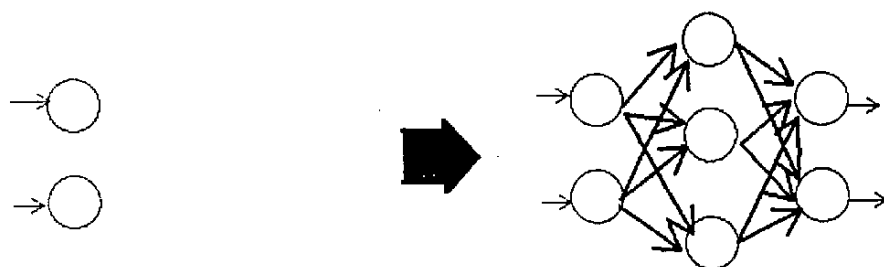


図 5.7: 構造複雑化のイメージ

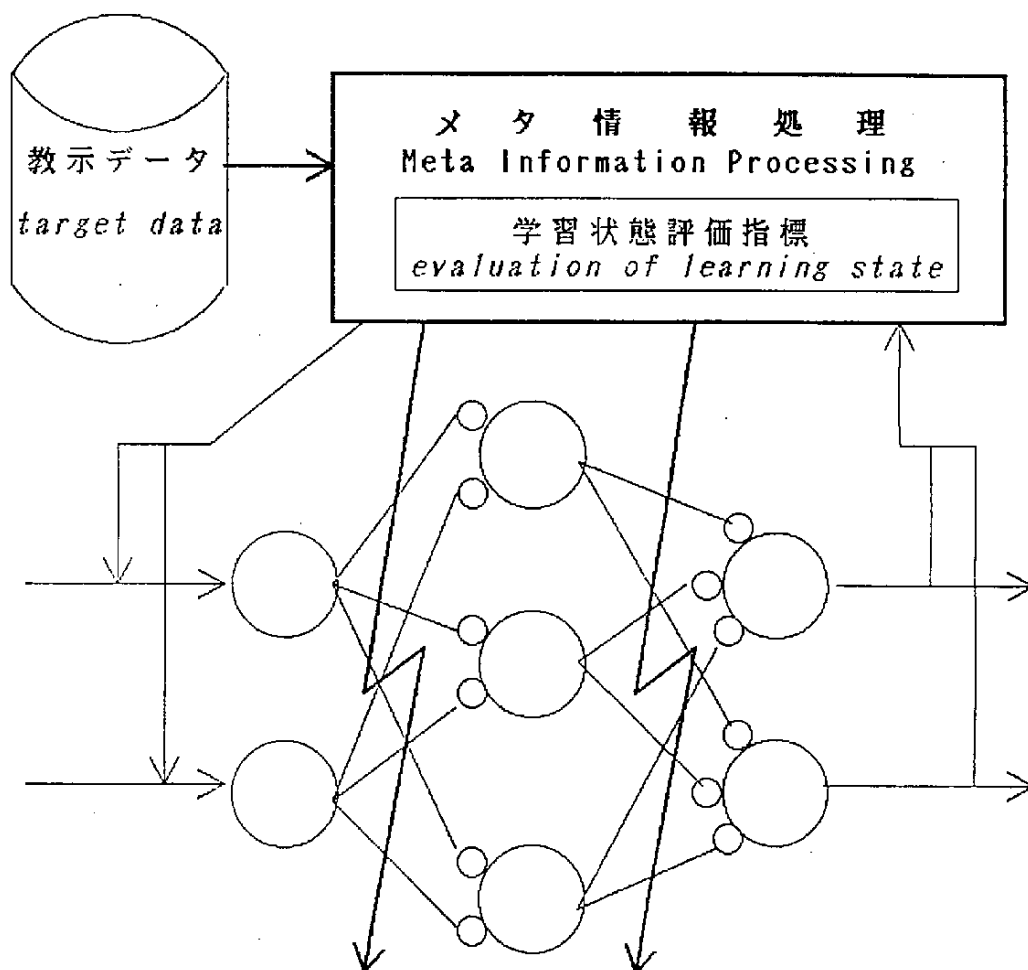


図 5.8: メタ情報処理

(3) 進化による学習

学習や自己組織化の研究には生物における発生と進化のアルゴリズムが重要と考えられる。この領域の研究は現在でも十分になされているとは言えず、ただちに大規模ニューラルネットの構築に適用できる実用的アルゴリズムは存在しないが、カオスとジェネティック・アルゴリズムに関する研究が自己組織化の研究に大きな示唆を与えているように思える。しいて分類すれば、前者は発生に、後者は進化に関係していると言えよう。

1) カオス

比較的単純な規則に基づく非線形のシステムが、ほとんど予測不可能なほど複雑な振舞いをすることがある、ということが、近年、コンピュータ・シミュレーション技術などの進歩により明らかにされた。そうした現象はカオス（Chaos：混沌）と呼ばれて、現在、主に数理的な観点から精力的に研究されている。

脳の情報処理についても、非線形な特性を持つニューロンの相互作用により、神経回路網がカオス的な振舞いをしている可能性は高く、そうした振舞いを、人間の記憶や、推論の機能と関連づけようという研究も行なわれている。

たとえば、生物は試行錯誤で学んでいるが、この試行錯誤の生成にそれはカオスからの情報発生が寄与しているのではないかといわれている。このように、脳をカオス的なシステムと考えることによって、脳内の情報処理を情報の発生そのものにまでさかのぼって研究することも可能になるかもしれない。

2) ジェネティック・アルゴリズム

ジェネティック・アルゴリズムは生物の進化の過程を模擬することによって、最適解などを探索する、確率的な最適探索手法の一種と言える。従って、この手法をニューラルネットワークに関する最適化の問題に適用しようという発想は自然である。

例えば、バックプロパゲーションの学習パラメータの最適化への適用、パターン情報処理において着目すべき特徴量の選択と生成への適用、ネットワーク構造の最適化への適用、などが試みられ、それぞれ、よい結果も得られつつあるが、全体的に見ると試行的検討の域を出ていない。

親染色体	1 1 1 1 1 1 1	子孫染色体	1 1 0 0 0 1 1
親染色体	0 0 0 0 0 0 0	子孫染色体	0 0 1 1 1 0 0

図 5.9: 染色体のクロスオーバー

ジェネティック・アルゴリズムでは、まず、着目するパラメータを「染色体」に対応するビット列で表現する。幾つかのパラメータによる試行の結果、評価点の高いものが選ばれ、これらのパラメータを親の染色体として子孫の染色体に対応するパラメータを生成する。これを繰り返して行くと、何世代後には先祖の良い所のみを受け継いだ優秀な子孫の染色体（すなわち最適パラメータ）ができることが期待される。

親の染色体から子孫の染色体を生成する方法としては、図 5.9のように染色体の一部を切断交換するクロスオーバーや、一部を任意に書き換えるミューテーションなどがあるが、これらの操

作が必ず良い子孫を生み出すという保証はなく、適切な世代交代アルゴリズムの研究が必要である。また、パラメータの染色体への対応づけも確立した手法があるわけではなく、これが不適切であれば良い結果は得られない。これらの点については、今後一層の検討が必要であろう。

5.1.3 ニューラルシステム

5.1.3.1 ニューラルシステムアーキテクチャ

(1) スケーラブルアーキテクチャ

ニューラルネットワークによる情報処理の最大の特徴は、多数の処理要素が密に情報交換を行ないながら「協調と競合」の原理に基づいて問題を解くことにある。パターン認識、自然言語理解、意味ネットワークによる推論・質問応答、組合せ最適化問題の求解などをニューラルネットワークで実現するときの、基本原理である。これらの問題を実時間で実行可能なシステムを構成するためには、その処理アルゴリズムを明らかにしていくことはもちろんのこと、アルゴリズムを実行するためのニューラルネットワークのハードウェア化が必須の要件である。

実時間処理に必要な真の大規模並列性と、階層型やリカレント型あるいはそれらの混在型など多岐にわたるニューラルネットワークの構造を実現する汎用的なハードウェアを構成するためには、次の二つの実現が不可欠である。

1. 少なくとも数千ニューロン規模まで完全結合型のニューラルネットワーク
2. それらをモジュールとして任意のニューラルネットワーク構造

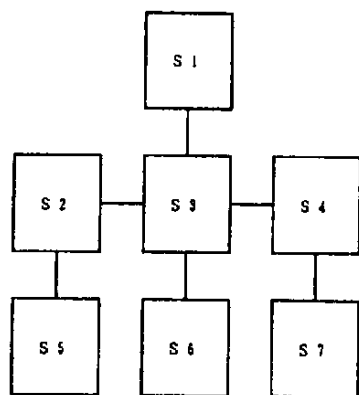
完全結合型であれば階層型やリカレント型など任意の回路構造を実現できる。またそれらをモジュールとしてさらに大規模なリカレント型や、多数の並列モジュールを統合する並列モジュール統合型などのニューラルネットワークを構成することができる。そのためには、ハードウェア的にスケラブルなアーキテクチャでなければならない。

このような要請を満たすハードウェア方式としては、現在までのところパルス密度方式のデジタルニューラルネットワークが最適と考えられる。その特長は以下の通りである。

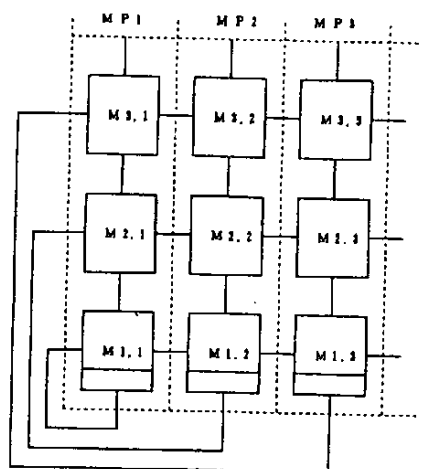
1. デジタル非同期回路方式
2. 実際の神経と同様にパルス密度を信号伝達に使用しているので、ノイズに強く配線量の少ないハードウェア構成が可能
3. ニューロチップあるいはモジュールを単に接続していくだけで、いくらでも大規模な任意のニューラルネットワーク構造が実現可能
4. センサやモータ系など外部環境とコミュニケーションするために必要な機器を直接接続可能
5. ニューラルネットワークのダイナミクスが表現可能

システム構成の一例を図 5.10 に示した。チップレベルでは、チップ内のニューロンを完全結合することも、外部入力を受けるようにもできる。ユニットレベルでは、チップ内のシナプスのみを使用する機能を用いて一つのニューロンのシナプス数を拡張し、ユニット内で完全結合型ニューラルネットワークを構成するか、あるいはサブシステムレベルでのシナプス拡張用ユニットとして使用する。図の例では最下段のチップをニューロンとして使用し、それ以外のチップはシナプス拡張用として使用している。サブシステムレベルでは、最下段のユニットのみニューロ

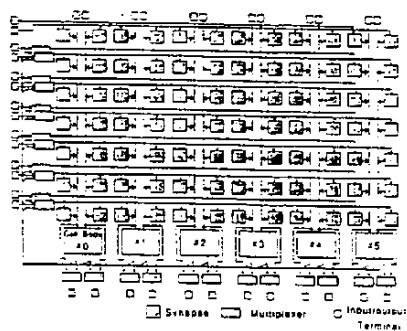
システムレベル



サブシステムレベル



チップレベル



ユニットレベル

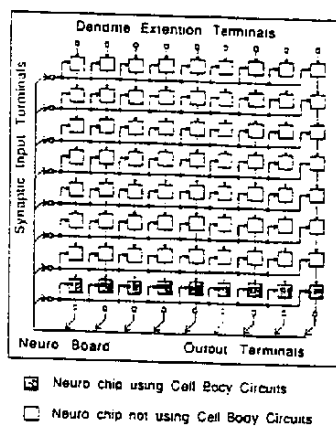


図 5.10: スケーラブルなニューラルネットワークアーキテクチャ

ンとして使用し、その他はシナプス拡張用に使用している。すなわち、ユニットレベルのチップの役割を、サブシステムレベルではユニットが果たしていることになる。システムレベルでは、サブシステムレベル（モジュール）を組み合わせて任意の構造を実現することになる。

このようなニューラルネットワークのアーキテクチャは、超並列システムとも非常に相性がよい。モジュール、あるいはモジュールを複数のブロックに分割し、それらを超並列システムの一つの処理要素（図の例ではサブシステムレベルにMP1などで示されている）で管理することにより、従来のコンピュータとニューラルネットワークとの統合を図ることができる。超並列システムの結合トポロジは4隣接近傍やN-cubeが主体であり、長い路長の結合が必要なニューラルネットワークの応用ではコミュニケーションボトルネックが問題となる。長い路長の結合をニューラルネット側で供給することにより、以下のような特徴を有する統合型アーキテクチャを提供することもできよう。

1. 各モジュールのニューラルネットワークは、それを管理している処理要素のメモリに見える。
2. ニューラルネットワークは、処理要素のメモリ空間にマッピングされる。
3. ニューラルネットワークを分割して、マルチタスクの並列実行が可能である。
4. どのようなニューラルネットワークも実現可能である。

VLSI技術の動向を見ると、 10^7 ゲート／チップ程度のものが近い将来実現可能と思われる。それを用いれば、約1,000 ニューロン／チップ、10,000 ニューロン／モジュール規模のニューラルネットワークが実現可能である。

(2) 通信方式

スケーラブルなアーキテクチャであるとはいえ、大規模なニューラルネットワークを構成するためには解決しなければならない技術課題もある。多数のニューロン間の配線・通信方式の問題や、ハードウェアのサイズよりも大きなニューラルネットワークを動作させるための仮想化技術などがそのような技術課題としてあげられる。

配線の問題については、LEDアレイ、光ファイババンドル、フォトダイオードアレイを利用し、周波数多重化、時間多重化などの通信方式を使用すれば、モジュール間の配線は楽になる。光インタコネクション技術の利用は、配線量を減らすのに有効である。とくに、WSIなどをスタックして高密度実装するとき、有効な手法となるであろう。しかしながら、パルス密度方式では、システム全体で同期をとる必要がない、モジュールをただつなぐだけでよい、という特長があるので、高密度コネクタなどにより力づくで配線することも不可能ではない。

仮想化は、ハードウェアのサイズよりも大きなニューラルネットワークを動作させるため、ニューラルネットワークを空間分割し、分割されたサブネットワークをハードウェアマップして時分割実行することによりニューラルネットワーク全体が表現している問題の解を得ようとするものである。したがって、ニューラルネットワークの空間分割手法の確立と、サブネットワークの結合係数や中間結果の高速な保存と入れ替えがその実現にとって必要な技術課題となる。

5.1.3.2 ニューラルシステムハードウェア

大規模なニューラルネットワークの実現可能性を探るために、ケーススタディを行なう。100万ニューロンのネットワークを例題として取り上げる。学習機能の高速化が必須と考え、学

習回路を組み込む。今、直ちにこのようなシステムを開発できたとしても、明確な応用イメージを描くことは困難である。かえって、このような大規模なネットワークをどのように構成し、学習させ、組織化していくかという利用技術の面でブレークスルーが必要とされ、そのための基礎研究が行なわれようとしている段階である。そこで、ネットワーク構成とハードウェア（量）との関係を具体的な形で示すことにより、利用技術研究の1つのベースを与え、さらにその留意点を明らかにすること、また、超高速な学習機能を持つニューラルシステムを、利用技術研究の有力なツールとして役立てるという問題意識のもとにケーススタディを行なう。

(1) 選択したアプローチ

100万ニューロンシステムを実現するためには、様々なアプローチがある。ここで、選択したアプローチについて簡単に述べる。選択に当たっては、5～10年後をめどに、少なくとも研究室で、現状技術の延長線上に見える技術を考えて。また、最適な設計を行なうことよりも、実現可能性を探るということに重点を置いているので、ここでの記述は各アプローチを厳密に比較した結果とはなっていない。

1) 電子回路技術

光技術の適用は検討していない。特に、配線量の爆発を解決するものとして、光技術は将来有力な技術であるが、別に光コンピュータ・デバイスWG から詳細な報告がなされるからである。

2) デジタル回路

アナログ回路は演算回路を簡単に（少ないハードウェア量で）実現できるので、大規模なネットワークを実現するためには魅力的である。しかし、学習機能をハードウェア化するためには、シナプス荷重値を記憶するためのメモリが必要となり、そのためのハードウェア量が支配的となるので、アナログ回路の利点が薄れる。デジタル回路は耐ノイズ性の点で、アナログ回路に比べ本質的に有利で、大規模なシステムを安定に動作させるのに適している。実際にも、大型コンピュータ、スーパーコンピュータ等で実績のあるデジタル回路を選択した。

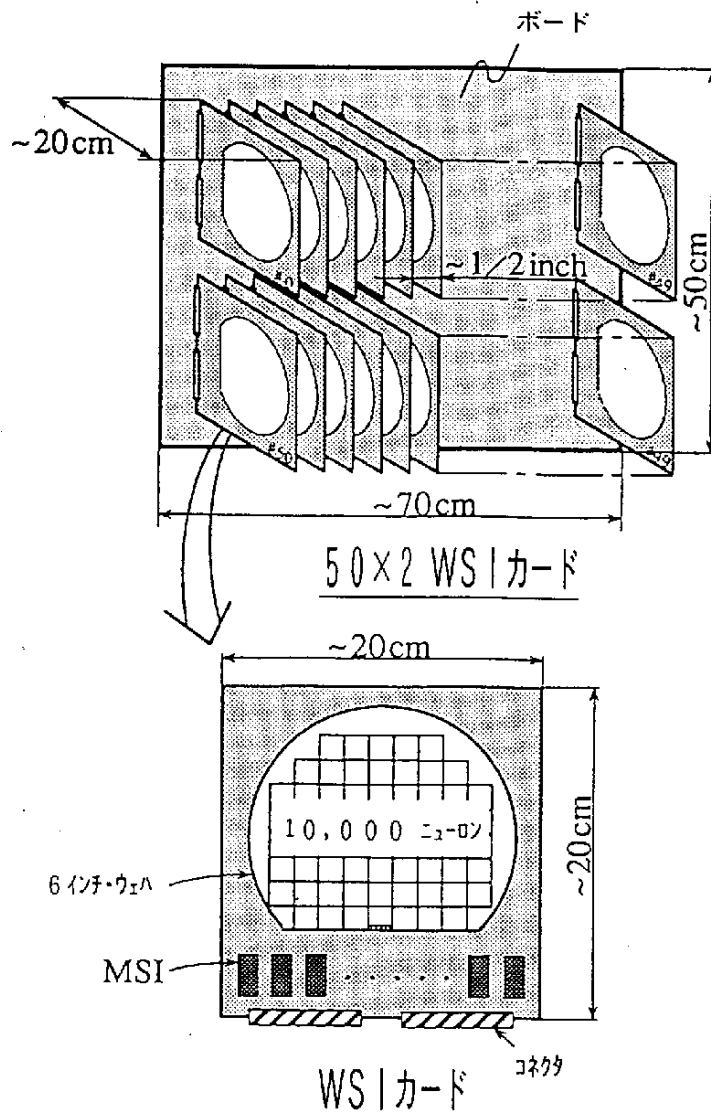
3) WSI 技術

ニューラルネットワークにおける超並列超分散情報処理の計算原理を生かすためには、なるべく多くのニューロンをハードウェアで実現し、それらを並列に動作させることが望ましい。そのための有力な技術として WSI（Wafer Scale Integration）技術がある。WSI は大規模なハードウェアをコンパクトに高信頼度で実現する可能性を秘める技術と考えられてきたが、歩留りの壁に阻まれてきた。この点で、ニューラルネットワークの耐欠陥性はこの問題を解決する根拠を与えると考えられる。大規模ニューラルネットワークと WSI 技術は相互に補完し合うものと考え採用した。

(2) ハードウェアイメージ

ハードウェアイメージの一例を図 5.11 に示す。半導体技術としては $0.2\ \mu\text{m}$ の CMOS 技術を仮定した。ニューロンは完全デジタル回路で構成し、各ニューロンは時分割のデジタルバスで結合している。学習アルゴリズムとしてはバックプロパゲーション法を想定している。そのための学習回路を各ニューロンに組み込み、並列に動作できるようにしている。

1,000 のニューロンを完全結合したものをサブネットワークとし、サブネットワーク間は粗結合させるという大きな仮定をおいている。完全結合させた場合、シナプス荷重値用のメモリはニューロン数の 2 乗に比例して増え、そのためのハードウェア量が支配的である。総ニュー



システム

- ・ 100万 ニューロン
- ・ 2 tera connection updates per second
- ・ 完全結合 1,000 ニューロン / サブネットワーク
- ・ 疎結合 1,000 サブネットワーク / システム

テクノロジー

- ・ 2×10^7 トランジスタ / チップ (A.C. ~1995)
- ・ 60 チップ / 6インチ・ウェハ

ニューロン回路

- ・ 完全デジタル回路
- ・ 学習回路内蔵 (誤差逆伝播アルゴリズム)
- ・ 8ビット インพุット / アウトプット
- ・ 8ビット シグナル荷重
- ・ 1.2×10^5 トランジスタ / ニューロン

図 5.11: 100 万ニューロンシステムのハードウェアイメージ

ロン数を100万に固定しても、サブネットワークのニューロン数を増やすとそれに比例してハードウェア量が増える。ハードウェア化の観点からもネットワークのモジュール化が是非必要と考えられ、1モジュールの規模は、この例では1万ニューロン程度に押さえることが望ましい。この例では、100万ニューロンシステムを100枚のウエハーで70cm×50cm×20cm程度のサイズに構成し、学習速度は1TCUPS (Tera Connection Updates Per Second) を越えることも期待できる。超高速の学習機能を持った100万ニューロン規模のニューラルネットワークハードウェアの実現という課題は実現不可能なものではない。

(3) 開発課題

前節の結論は、もちろん、机上検討の結果であり、現実のものとしていくためには多くの技術課題が存在する。1万ニューロンを集積したWSIを実現するためには、0.2 μ m程度の微細デバイス技術はもちろんのこと、フォールトトレランス設計技術の革新が必要である。WSIの実装技術に関しても、ウエハー間の信号伝送技術、電源供給、冷却が大きな技術課題となるであろう。さらに、大規模なシステムに向けてはWSIの3次元スタック実装技術が必要となる。利用技術の進展と同期をとって、これらの技術開発を進めることが必要と考える。

5.1.4 超並列システムとの統合

5.1.4.1 統合システムアーキテクチャ

(1) 統合アーキテクチャの必要性

ニューラルシステムと非ニューラルシステム（汎用の超並列システム）を組み合わせた統合システムは、以下のような理由で必要と考えられる。

1) 誤差対策

しらみつぶし探索を基本とする問題（NP ハードな問題）では、実用的な問題を解こうとすると計算量の爆発が生じまっとうな手法ではどうしても解けなくなる。そのような問題の近似解をニューラルシステムで求めることはおおいに意味がある。また、バックプロパゲーションネットワーク等の汎化機能を利用することも、アルゴリズム的に分類が難しい問題には、力を発揮しそうである。ここで、状況を数値解析と比べると以下ようになる。

- 数値解析

Δt や Δx を十分に小さくしていけば、必ず正解に近づくことは保証されている。また、どれだけ小さくするべきかという条件も分かっている。しかし、実用的な計算時間内に解を求めるには、 Δt や Δx を大きくせざるを得ない。そのときに生じる誤差については、あらかじめ予測可能である。

- ニューラルシステム

現在のところ、正解を保証することはできない。したがって、誤りがあることを甘受せざるを得ない。だからといって、誤差について無知でいい訳ではない。ニューラルシステムを実用的に駆使するには、誤差解析の手法の確立が不可欠である。このような誤差を小さくしたり、ある安全範囲に納めるためには、ニューラルシステムの外部から各ニューロンの値を制御することが必要かつ有用になろう。

2) フェールセーフないし分散協調技術の確立

生物の脳においても組み合わせ問題を解くことが主要課題であり、かつ上述のように誤りがあり得るものとする。このような誤りがあっても、生物においては、自己保存ないし種の保存が（多分、進化という長い歴史を経て）可能になっている。このためには、例えば次のような仕組みがあることが予想される。

- フェールセーフ機能の組み込み

細部は別にしても、大筋では誤らないようなフェールセーフ機能が組み込まれている。

- 分散・協調機能の組み込み

ひとつの問題をいくつかのより正解の得やすい部分問題に分けて並列に解いたり、またはいくつかの異なる方法で解いて（同じレベルで並列に解いたり、または記号処理などの高次レベルと協調・競合処理する）、照合チェックする分散・協調機能が組み込まれている。

一番単純な例として文字認識を見ると、そこでは記号処理による認識を意味処理による誤り修正で補完しており、両者の協調作業が行われている。このように、ニューラルシステムにおける処理と記号処理とが行ったりきたりして協調作業を行うのに加えて、複数のニューラルシステム間での協調作業も当然ながら考えられる。なお、この協調作業のためには、例えば適当な満足度でもってお互いに協力する等の、新しい協調のメカニズムを考えることも必要になろう。

3) 記号処理との協調

ニューラルシステムの学習は、 n 次元空間に分布したデータ間に定義された距離により、補間によってデータのクラスタリングを行うことと位置づけることもできる。こうした観点に立てば、その学習および汎化の能力は、パターン情報のように n 次元空間で連続的にデータが分布しているような対象へは適用が容易であるが、言語（記号）情報のように、意味を単語等の間の距離で表わすことが困難な場合には、むずかしいと思われる。

この問題の解決のためには、理論基盤のところで述べたように、数量化の理論などを用いて、言語（記号）情報をその意味を考慮しつつパターン的に表現しなおすという方法も考えられるが、もう一つの方法として、ニューラルシステムの計算パラダイムと、記号処理の計算パラダイムの統合を考えることも必要であろう。

(2) 統合システムのイメージ

前節の議論から、統合システムアーキテクチャへの要求を次のようにまとめる。

- 複数のニューラルネットワーク間で、分散・協調できること。
- ニューラルネットワークと記号処理間で、分散・協調できること。
- ニューラルネットワークの入出力層のニューロンのみならず、中間層等の隠れた層のニューロンにもアクセスできること。

これを実現する統合システムのイメージを以下に述べる（図 5.12）。

1. 記号処理／協調処理等のためのプロセッサ層とニューラルシステムのためのニューロン層からなる。いずれの層もそれぞれにおいて超並列構成をとる。各層はそれぞれにおいて、独立な超並列システムとしても動作できるように構成する。各層内の接続は、格子、ハイパーキューブなど、適切な相互結合方式を選択できるようにする。

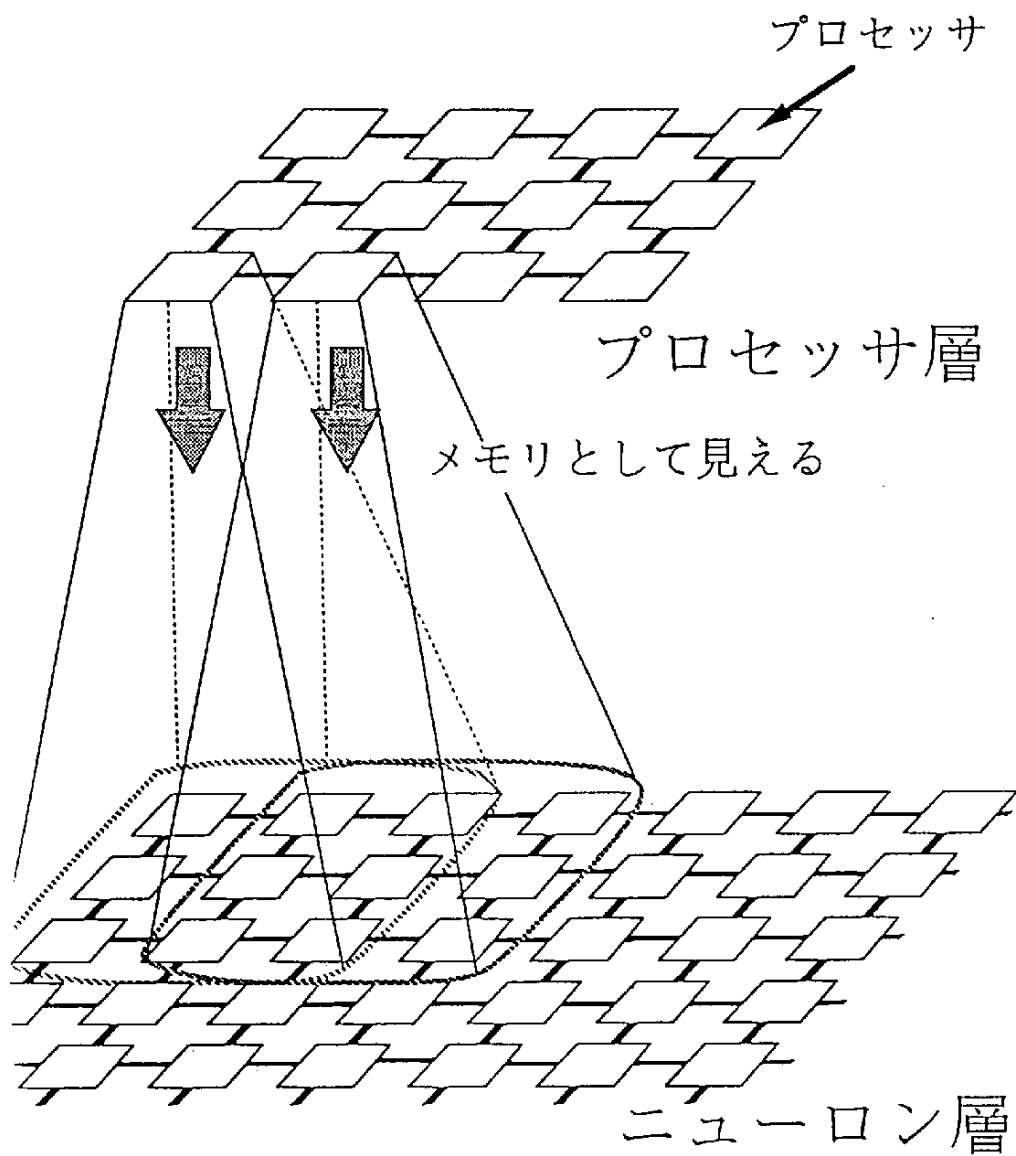


図 5.12: 統合システムのイメージ

2. プロセッサからニューロンの情報にアクセスするために、それぞれのプロセッサから複数ニューロンをメモリ語として「眺めて」いる。これにより、プロセッサは各ニューロンをメモリのセルのようにアクセス（アドレス）可能となる。超並列方式であることを考えると、それぞれのプロセッサから全ニューロンにアクセス可能とするのは、理想ではあるが現実的ではない。そのため、それぞれのプロセッサはニューロンの部分集合にのみアクセス可能とする。各プロセッサがアクセスするニューロンの部分集合を、プロセッサ間でオーバーラップさせる。
3. 記号処理とニューラルシステムの分散協調は、プロセッサからニューロンへアクセスすることによって行う。複数ニューラルシステムモジュール間の分散協調は、プロセッサを介して実現する。

なお、開発過程においては、各層はお互いに独立に実現することができる。超並列システムは超並列システムとして、またニューラルシステムはニューラルシステムとして、それぞれを独立に開発してこれを後で接続して統合システムとすることができる。具体的な構成例は図 5.13 のようであり、複数のニューラルシステムが分散協調して処理を進めるとともに、記号処理部とも分散協調処理する。また、外部環境との協調のために、画像処理・音声処理等の各種の専用プロセッサも用意する。

(3) 統合システムの応用（図 5.14）

- 高度パターン認識

ニューラルシステムに前処理を、記号処理に高度な意味処理をそれぞれ分担させることにより、例えば、立体視を含むシーン認識、連続音声認識等の高度なパターン認識を実現する。

- 高度 AI

高次の知識処理において、組み合わせ探索の高速化にニューラルシステムをバックエンドで利用し、高度な推論過程を記号処理で行う。

- 柔らかなロボット

環境に応じて、人間のように柔軟に対応できる知的なロボットの実現を図る。運動の制御にニューラルシステムを利用し、プランニングを記号処理で行う。

- 柔らかな情報ベース

人間と同じように話し言葉はもとより身振り、手振りを含む非言語対話を理解し、希望する情報を教えてくれるデータベースを実現する。あいまいな情報の処理にニューラルシステムを利用し、推論過程に記号処理を用いる。

5.1.4.2 統合システムへのアプローチ — アクティブコグニションを例として

(1) 認識と行動の統合システム

自律的なシステムでは、環境の認識とシステムの行動は密接に結び付いている。システムはある目的・目標を持って行動しているが、その目的を遂行するうえで重要となる特徴に選択的に注意を向けて環境を認識する必要がある。図 5.15 は認識と行動の統合システムの構成例である。環境の中で適応行動するためには、環境のモデル化が必要である。システムはセンサからの情報、また外界に対して行った操作情報（モータコマンド）を使って、この環境モデルを更新

Massively Parallel-based Organizing System

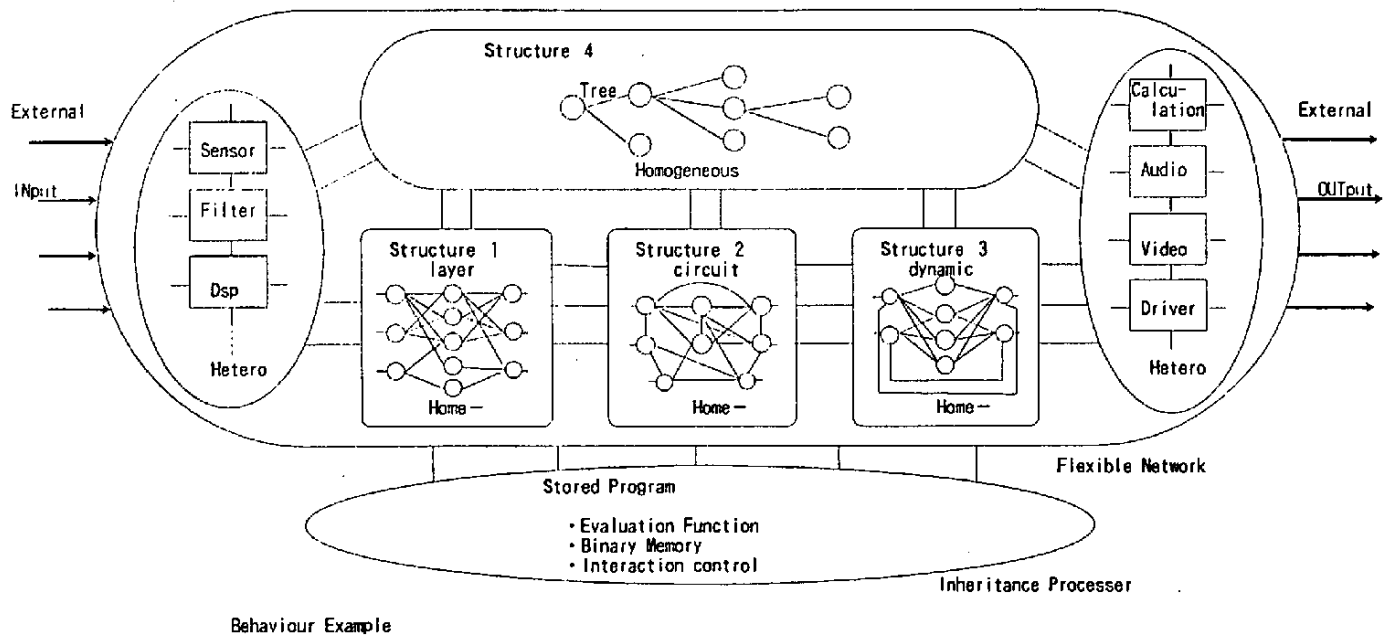


図 5.13: 統合システムの構成

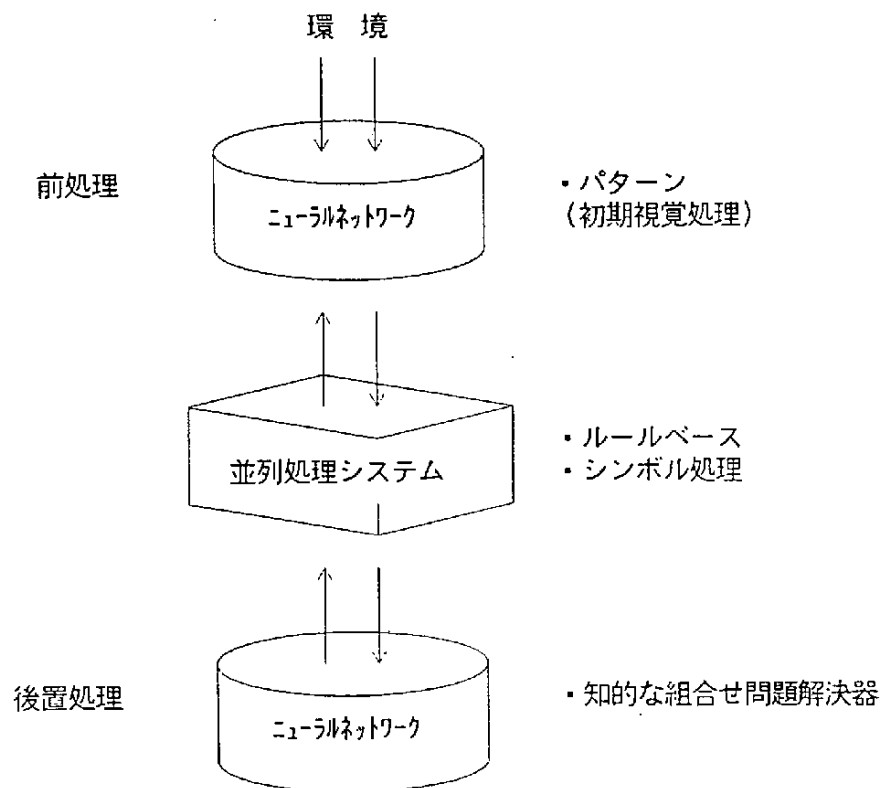


図 5.14: 統合システムの応用

する。計画ユニットは、この環境モデルを使って行動を計画しモータコマンドを生成する。また、計画ユニットは環境のモデルに仮想的な操作を行ないその効果を予測することができる。計画に必要な情報が不足している場合はその情報を収集することをサブ目標とし、情報収集のためのモータコマンドを生成する。

認識と行動の統合システムでは、認識ユニット、環境モデル、計画ユニット、制御ユニットがお互いに相互に情報をやりとりしあえるように、リカレントな情報の経路を有するシステムとなる。環境モデルはシステムの動作する環境のダイナミクスをうまくシミュレーションできなければならない。したがって環境モデルのような機能モジュールは、入力のみ依存して出力が決まる関数的な動作だけではなく、内部状態を持ち、過去の履歴にも依存して出力が変わるようなリカレントな構造が必要となる。

認識と行動の統合システムは認識ユニット、計画ユニット、制御ユニット、環境モデル等、多数の機能モジュールから構成される。また各機能モジュール自身も多数のサブ機能モジュールから構成される。最初は図 5.15 のような大まかな機能分化で、後に学習によって必要な機能モジュールが自己組織化されるということが理想的であるが、現在知られている学習アルゴリズムでは不可能である。構造の変化も伴う学習アルゴリズムの開発が必要である。

また、時々刻々と状態を変える実世界の中で、実時間で動作するシステムでは、学習と実行は分離できない。学習時には学習だけ、実行時は学習はせずに実行だけ行なうのではなく、実行時においても学習が進まなければならない。これによりシステムは環境の変化に柔軟に対応できるようになる。このため学習と実行が分離していないインクリメンタルな学習アルゴリズムの研究が必要である。システムの動作を評価する評価系は、単純なシステムであれば、外界の物理量と目標値との誤差等の単純なもので良いが、一般的には評価系自体が複雑な認識系となる。学習アルゴリズムとともにシステムの目標の表現法、評価系の構成法が重要である。

(2) 機能統合化のレベル

図 5.16 では、システムは数個の機能モジュールから構成されており、機能モジュール間の情報の伝達を 1 本の線で表現しているが、実際には各々の機能モジュールは分離している訳ではない。図 5.16 に複数の個別機能が疎に結合したシステムから各々の機能モジュールが統合された細粒度並列協調システムに至るイメージを示した。現在は機能モジュール (個別機能) が独立に研究されており、1 つのシステムとして統合されていないか、機能モジュールが疎に接続されたシステムしかない。機能モジュール間の情報の伝達経路を太くし 1 つのシステムに統合するための研究が必要である。各機能モジュールはその内部に並列に動作するサブモジュール、サブサブモジュールを持つ。情報の伝達は、機能モジュール間のレベルのみで行なわれるのではなく、サブサブモジュールのレベルにおいても多くの伝達経路を持つネットワークを構成し、情報の抽象度のあらゆるレベルにおいて相互作用できるような、分散オブジェクト、細粒度並列協調システムへ向けた研究が必要である。

機能モジュールによっては、例えば計画モジュールは、ニューラルネットワークで実現するより、従来の AI 手法等で実現した方が容易なものもあり、全ての機能をニューラルシステムと学習のみで実現するのは得策ではない。複数の計算モデルの統合やパターンと記号の統合が必要で、パターン処理を担当するニューラルネットワーク層と従来処理、記号処理を担当するプロセッサ層から構成されるような統合システムの研究が必要である。

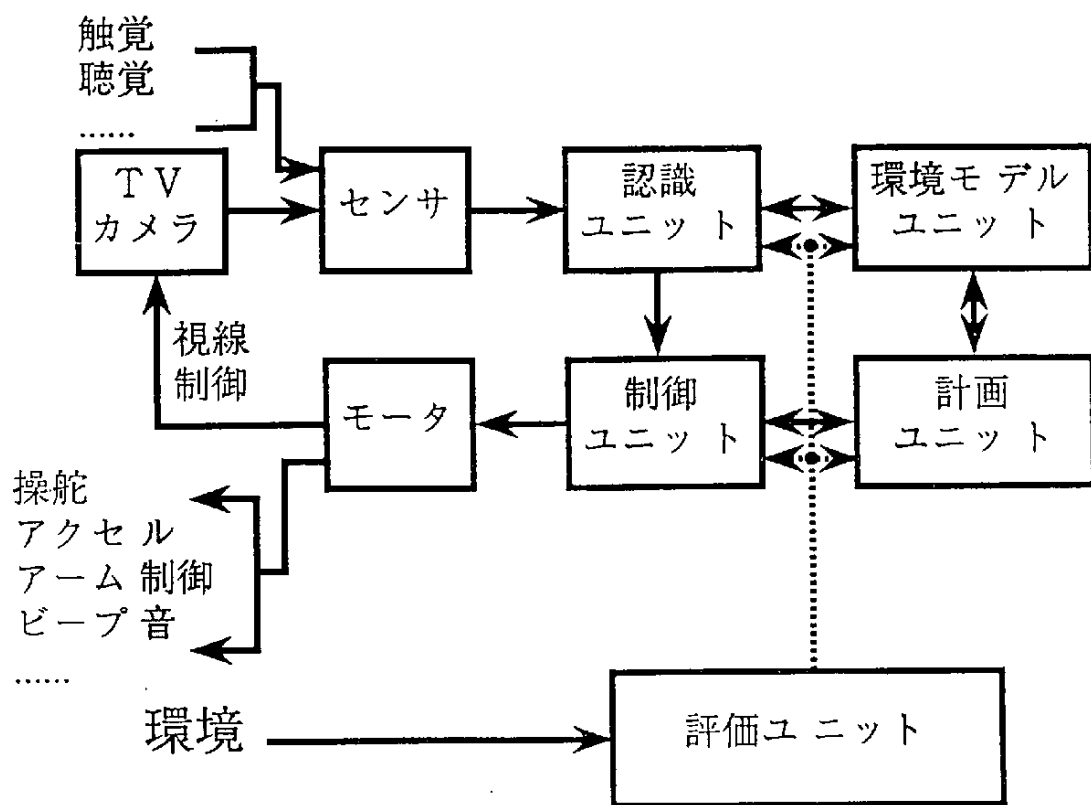


図 5.15: 認識と行動の統合システム

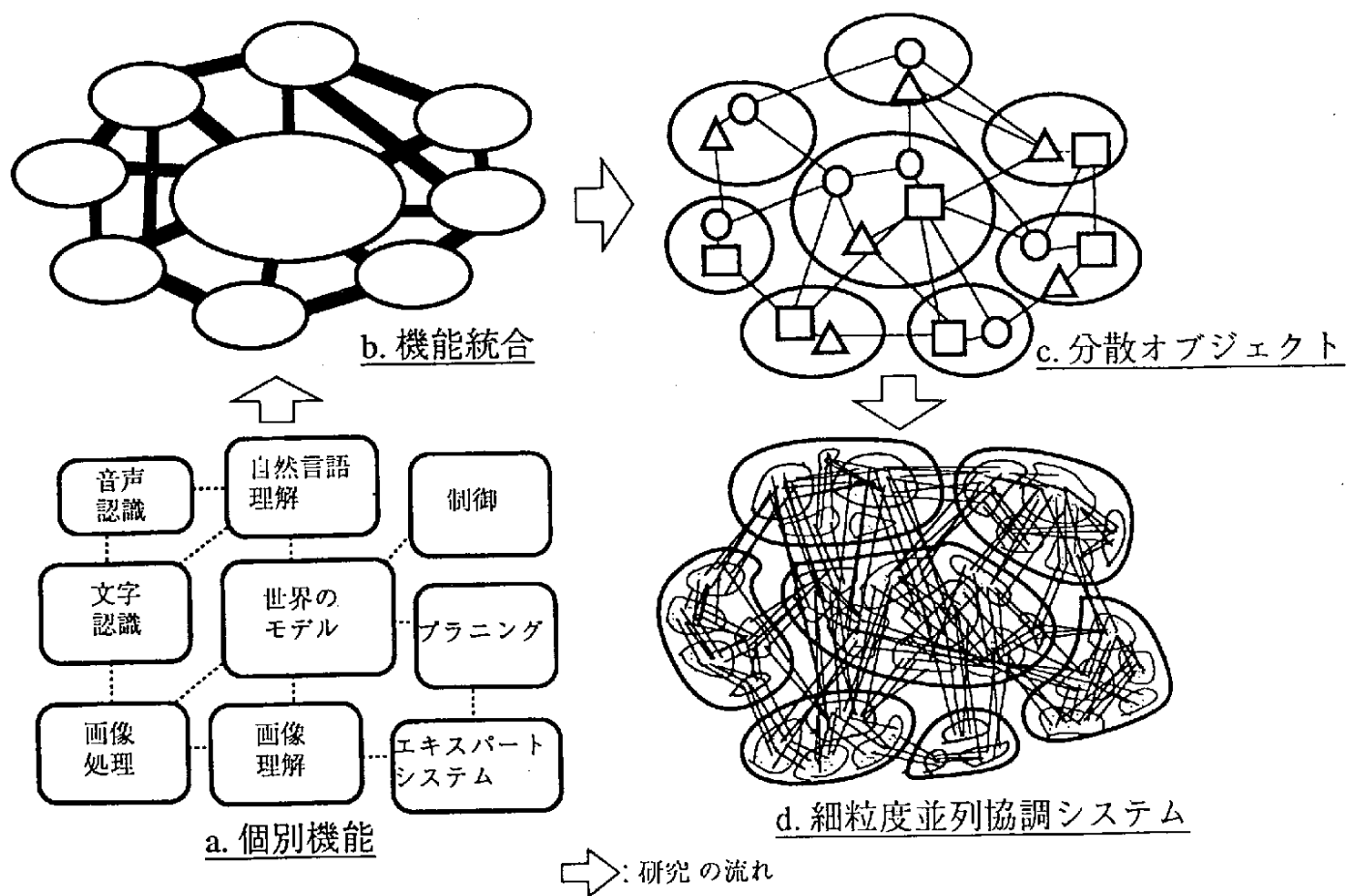


図 5.16: 統合システムの機能統合化

5.2 超並列システムからの検討

5.2.1 基本的考え方と概要

柔らかな情報処理においては、多種多様な情報を総合的かつ柔軟に処理する計算の枠組みが必要であり、同時にこれらを超並列超分散情報処理的に統合するシステムが必要である。ここでは、柔らかな情報処理機能を実現するためのシステム基盤としての超並列システムの位置づけを行う。

柔らかな情報処理の応用領域としては、既に見てきたように画像や音声などの認識・理解、推論・問題解決、情報ベース、ロボット制御、ヒューマンインタフェースとシミュレーションなど種々の場面が考えられる。これらの応用においては、システム全体が多数のモジュールから構成され、モジュール間の相互作用をとまなう処理や、モジュール内の分散表現されたデータに対する処理のように各種のレベルで並列分散情報処理が可能である。また、柔らかな情報処理機能を実現する応用においては、一般に膨大な計算量を必要とする。このため、超並列システム上での実現が本質的であり、また自然であると考えられる。

一方、コンピュータアーキテクチャの立場から考察すると、素子速度の限界を打ち破る技術として並列処理技術が注目されている。今後の情報処理技術の進展を支えるシステム基盤として、本格的な超並列システムの研究開発は極めて重要な課題である。

以上の2つの観点を結ぶコンセプトとして、「システムとしての柔らかさ」を提案する。システムとしての柔らかさは、柔らかな情報処理機能を実現するためにシステムが備えるべき要件であると共に、超並列マシンが幅広い分野に適用され、本格的なアーキテクチャ技術として成長するための要件でもある。システムとしての柔らかさには、ハード的側面とソフト的側面がある。ハード的側面としては、システムがロバストであり信頼性が高いことが要求される。特に、超並列システムにおいては、一部に故障が発生する確率は高くなるため、これによりシステム全体が稼働しなくなるといった状況をできる限り抑えることが不可欠である。このため自己診断、自己修復機能を備えたフェイルセーフシステムであることが要求される。一方、ソフト的側面としては、適応性、学習性、可変性、自律性、自己組織化、最適化のような機能を具備することを意味する。このような機能を応用レベルで実現すると共に、システム自体の基本機能として実現することが必要である。すなわち、システムが利用環境に合わせて自律的に自分自身を適応させ、最適な状態を実現する能力を持つ必要がある。現在の並列マシンは、極めて限られた利用環境しか提供しておらず、その結果ユーザに多大の負担を強いている。システムとしての柔らかさを実現することにより、超並列マシンの能力をユーザの少ない負担で最大限に生かすことが可能となる。

本報告書では、システムとしての柔らかさを備えた超並列システムの実現を提案する。検討のアプローチとして、トップダウンとボトムアップの二つをとる。トップダウンアプローチでは、モデル、アーキテクチャ、ソフトウェアの各レベルから、システムとしての柔らかさをパラダイムとして実現するための基本技術について考察する。一方、ボトムアップアプローチでは、超並列システムの実現可能性を検討するという立場から超並列システムアーキテクチャについて考察する。この両者のアプローチを融合することにより、実現可能な柔らかな超並列システムの具体的なイメージを構築し、その研究開発へ向けての方策を示すことを目標とする。トップダウンアプローチに関する具体的な議論は5.2.2と5.2.3で展開し、ボトムアップアプローチに関しては5.2.4で論じる。また、超並列システムの開発に向けての考察を5.2.5で論じる。ここではその導入として検討結果の概要を示す。

(1) トップダウンアプローチ

柔らかな情報処理機能を超並列システム上で実現するためには、問題の表現や実行の基盤とすべきパラダイムについての考察が重要である。現在のところ、超並列に適したパラダイムとして、ニューロコンピューティング、オブジェクト指向、データ駆動、データ並列、シストリック、確率的情報処理などが提案されている。一般に柔らかな情報処理を実現するシステムは分散的、統合的な情報処理が必要とされ、これらのパラダイムを複数用いて実現される。例えば、画像・音声の高度認識理解システムにおいては、信号レベル、記号レベル、及びこれらを統合したレベルでの情報の表現が必要となり、それぞれのレベルに応じたパラダイムにより記述されるのが適切である。従って、超並列システムとしては、これらの複数のパラダイムを同時に効率よく実現するシステムであること、すなわちマルチパラダイムシステムであることが要求される。マルチパラダイムシステムにおいては、異なるパラダイム間のインタフェースをどう設定するか、またパラダイムをどう統合するかが重要な問題となる。

また、単に複数のパラダイムを組み合わせてだけでなく、システム全体を統一的に取り扱うための理論的な枠組みが必要である。これを実現するために、現在最も有望な手法としてオブジェクト指向をベースとし、それを発展させたモデルが考えられる。すなわち、他のパラダイムを内部構造として取り込むこと、多数のオブジェクト間の相互作用をより柔軟に表現するための制約機能や、環境への適応性を実現するための自己反映機能（reflection）を導入するなどの機能拡張を行なった記述モデルとして、超並列対象指向モデルを具体化することが重要である。さらに、これをアーキテクチャ的に効率よく実現するための計算モデルとして、対象指向型データ駆動モデルの検討が不可欠である。

一方、アーキテクチャの柔軟かさとしては、モデルやパラダイムの柔軟さを効率よく反映するとともに、システムとしての柔軟かさ、すなわちロバストであり、かつ適応性、自律性を持つことをアーキテクチャ的に支えることが要求される。超並列アーキテクチャとして特に重要なポイントは相互結合網である。相互結合網の設計は従来は性能やハードウェア規模において議論されてきたが、柔らかなシステムを実現するためには耐故障性や負荷分散等の機能を相互結合網に内蔵することが重要となる。このための効率的なメカニズム、及びその実現法が研究課題となる。

ソフトウェアの柔軟かさとしては OS、及び言語処理系の 2 つの面から考える必要がある。OS においては、資源管理や負荷分散、高信頼化管理などシステム全体を柔軟に管理運営する機能が要求される。また、これらを効率よく実行するためのアーキテクチャのサポートも当然必要となるであろう。言語処理系においては超並列対象指向モデルに基づいた言語設計や、見込み計算のような新しい並列処理メカニズムを積極的に取り込んだ処理系の実現が、柔軟かさを実現する上で重要な課題である。このように、システムの柔軟かさには各種の側面があり、各側面においてそれぞれ克服すべき研究課題があると共に、システム全体として一貫した検討が必要である。

(2) ボトムアップアプローチ

図 5.17 に並列マシンの歴史的な発展の系統樹を示す。図に示すように、並列マシンの研究開発はすでに 30 年近くの歴史を持つ。この間、種々の方式が提案され、種々の応用を指向した並列マシンが開発されてきた。また、最近では LSI 技術の進歩を受けて要素プロセッサ数が 1 万を超える超並列マシンの開発も行われている。現在までに提案されている並列マシンを処理方式により分類すると、単一命令流複数データ流（SIMD）、複数命令流複数データ流（MIMD）、シストリックアレイ、データフローに大別することができる。一方、並列マシンを用途別に、数値処理、信号処理、記号処理、ニューラルシステム、CAD などに分類することができる。このように、並列マシンのアーキテクチャや用途は多様化している。この原因と

して、並列マシンの研究が当面の課題を克服するため主として応用主導型で行われてきたこと、並列処理を有効に行うためには用途を専用化せざるを得なかったことが考えられる。21世紀を目指した超並列システムは、超並列マシンの主流をなすものでなくてはならない。ここでは汎用性のある柔らかな超並列システムを構築するために、アーキテクチャの見地から重要と考えられる今後の課題について議論する。

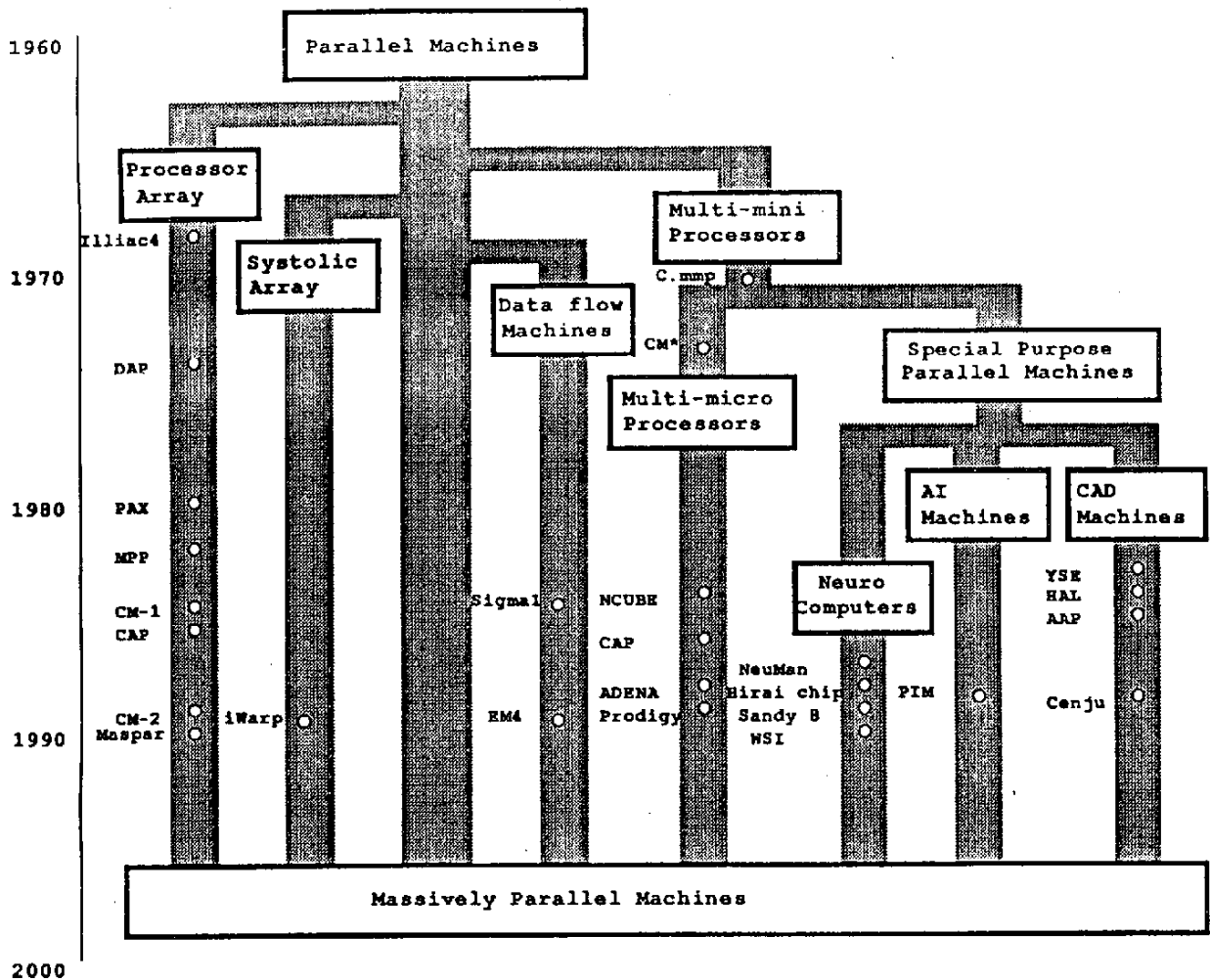


図 5.17: 並列マシンの系統図

超並列アーキテクチャにおいては、各種のパラダイムの実現が効率よく行えることが必須となる。そのアプローチとして、アーキテクチャの無色透明化と融合化の二つが考えられる。無色透明化は、応用を意識することなく、並列処理の本質に根ざしてアーキテクチャを設計する立場である。また、融合化とは各パラダイムに適した複数の並列処理方式を融合したアーキテクチャを目指す立場である。その一例として、汎用プロセッサ群とニューラルシステム専用ハードウェアとを共有記憶水準で密結合した方式が考えられる。

いずれのアプローチにおいても、将来のデバイス技術、実装技術の動向を適切に反映することが不可欠である。LSI 技術の進歩は今後 10 年間は着実に期待できる見込みであり、プロセッサの処理速度、メモリ容量、通信速度のバランスを考慮した上で実現可能なシステム規模とアーキテクチャを設定しなければならない。特に、WSI や 3 次元実装、光インタコネクションなどの新しい技術についてアーキテクチャの観点からの検討が重要である。なお、大規模な超並列マシンでは、消費電力が膨大となるため、低消費電力化、及び冷却方式が深刻な問題とな

ることが予想され、この対処が重要な課題である。これらの検討を踏まえて全体システムのアーキテクチャを設計する際には、システムの保守やハードウェア／ソフトウェアの開発支援環境に対する十分な考慮が必要である。

また、ソフトウェアの観点からは、オペレーティングシステム (OS) や言語によってサポートされるシステムのロバスト性、適応性などの実現がはからねばならない。超並列システムの性能を生かすためには、システムのネットワークトポロジなどの物理的特性を考慮したプログラミングが必要とされる。これを支援するためのプログラミング環境の整備なども重要な課題である。

5.2.2 柔らかな計算モデルとそのアーキテクチャ

5.2.2.1 マルチパラダイムモデル

将来のコンピュータにおいて、解くべき問題はいかに記述されいかに実行されるべきであろうか。問題記述のためのパラダイムは、対象とする問題にもっとも自然に適合する必要がある。単一のパラダイムですべての問題を網羅的に記述することは、問題と記述の間にギャップを生むことになる。すなわち、問題の記述に無駄な労力が必要になる、不自然な記述によって問題の本質がユーザから見えにくくなる、場合によっては正しい記述が困難になる、などの致命的な欠点をもつ。

例として、単純な四則演算が中心の計算を考えてみよう。論理型の関係記述パラダイム（たとえば *prolog*）で記述した整数の加算は、次のようになる。

$$\begin{aligned} &add(0, Y, Y). \\ &add(s(X), Y, s(Z)) : -add(X, Y, Z). \end{aligned}$$

この記述は、論理的に完全で正しいにもかかわらず、「足し算」を熟知しているはずのユーザの直感に訴えない。このような計算においては、加法の厳密な定義よりも、*FORTRAN*などで使われている、一般的で誤解の少ない次のような記述がまさっている。

$$z = x + y;$$

反対に、次例（三段論法の記述）のような場合には、論理型の関係記述パラダイムが優れているであろう。

$$\begin{aligned} &mortal(X) : -man(X). \\ &man(socrates). \end{aligned}$$

(a) 論理型の関係記述

$$\begin{aligned} &\text{if } (x.man == true) \ x.mortal = true; \\ &\text{else } x.mortal = false; \\ &man.name = "socrates"; \end{aligned}$$

(b) 手続き型の関係記述

上記は一例にすぎないが、より一般に現実の問題を記述する際に、それぞれに最適なパラダイムが存在することを、我々は当然のこととして理解している。すなわち、コンピュータはマルチパラダイムに基づくべきであり、各パラダイムを支援する記述モデルが必要である。記述モデルのレベルは問題に応じて様々であるべきであり、あるものは問題の直接的な記述がもっとも有利であろうし、あるものは問題をあらかじめ定式化しておいて記述したほうが有利であろう。このような記述モデルとしては、ユーザの直感に訴えやすいインタフェースをもつこと、ユーザの不完全情報を自動的にいしインタラクティブに補完する柔軟性をもつこと、計算の対象を正確かつ簡潔に記述できること、などの要件がある。

各パラダイムはそれぞれの得意とする対象の性質をもっとも適切に表現することを主眼として立てられており、物理的な制約を大きく受けている超並列システムとの間にはギャップがある。このギャップを最適に吸収するものとして、言語によるプログラムがある。言語によるプログラムは、ユーザのレベルから見れば、記述の詳細化・厳密化であり、ハードウェアから見れば計算の理想化・抽象化であると言える。システム内には複数の言語があり、それぞれ前記パラダイムに応じて選択される。一つの言語のカバーする範囲には幅があるために、一つの言語で複数のパラダイムを支える場合もあるし、一つのパラダイム専用の言語も存在するであろう。

言語の根拠となるモデルは、言語モデルと呼ばれる。オブジェクト指向言語の基礎となるアクタモデル、並列 FORTRAN などの基礎となる並列手続き型モデル、Id などの基礎となる宣言型モデルなどがある。記述モデルのレベルにばらつきがあったように、言語モデルのレベルにもばらつきがある。手続き型モデルは、ハードウェアと密接な関係を保ちつつ発達した経緯から、他のモデルより低いレベルの言語モデルと考えられるが、先に述べたような四則演算が中心の計算環境においては、きわめて有効なモデルである。逆に関係データベース検索のような応用に対しては、宣言型モデルの有効な場合がある。複数の記述モデルに対応して複数の言語モデルが存在したが、実際の超並列ハードウェアのアーキテクチャが単一（ないし極めて少数）であると想定されることから、単一の計算モデルが、言語モデルとハードウェアの落差を埋めるために必要となる。本プロジェクトにおける超並列システムの計算モデルとして、対象指向型データ駆動モデルの適用を検討すべきであろう。

以上から現実の超並列システムの抽象的システム構成は、図 5.18 のようになると考えられる。

5.2.2.2 対象指向型データ駆動モデル

前項で示したように、言語モデルと超並列アーキテクチャの間には、両者の落差を吸収するための単一の計算モデルが必要である。計算モデルとして適切なものはどのようなものであろうか。チューリング・モデルは一般的で強力な計算モデルであるが、並列システムを記述したり、並列プログラミングの基礎とするには、複数アクティビティの自律協調という視点が陽にあらわれないため適当ではない。アクタモデルは並列分散情報処理事象を論理的に記述するのに強力だが、現実の並列システムを特定したり記述したりするには、一般的すぎるであろう。データフローモデルは関数性の保持される問題の記述とこれを実行するシステムの記述のためには強力であるが、関数性という限定された局面でしか有効性を発揮しない。

計算モデルとしては、アクタモデルなどよりも具体的で、データフローモデルよりも強力で、なおかつ並列マシンのアーキテクチャと言語システムの双方にできるだけ直接的な対応がつくものが望ましい。すなわち、並列マシンからはアーキテクチャに密着したものとして見え、言語システムからは言語モデルと整合性がよいものとして見え、しかも必要かつ十分な一般性を保持した計算モデルが望ましい。特定の応用や特定の言語に特化したものではなく、無

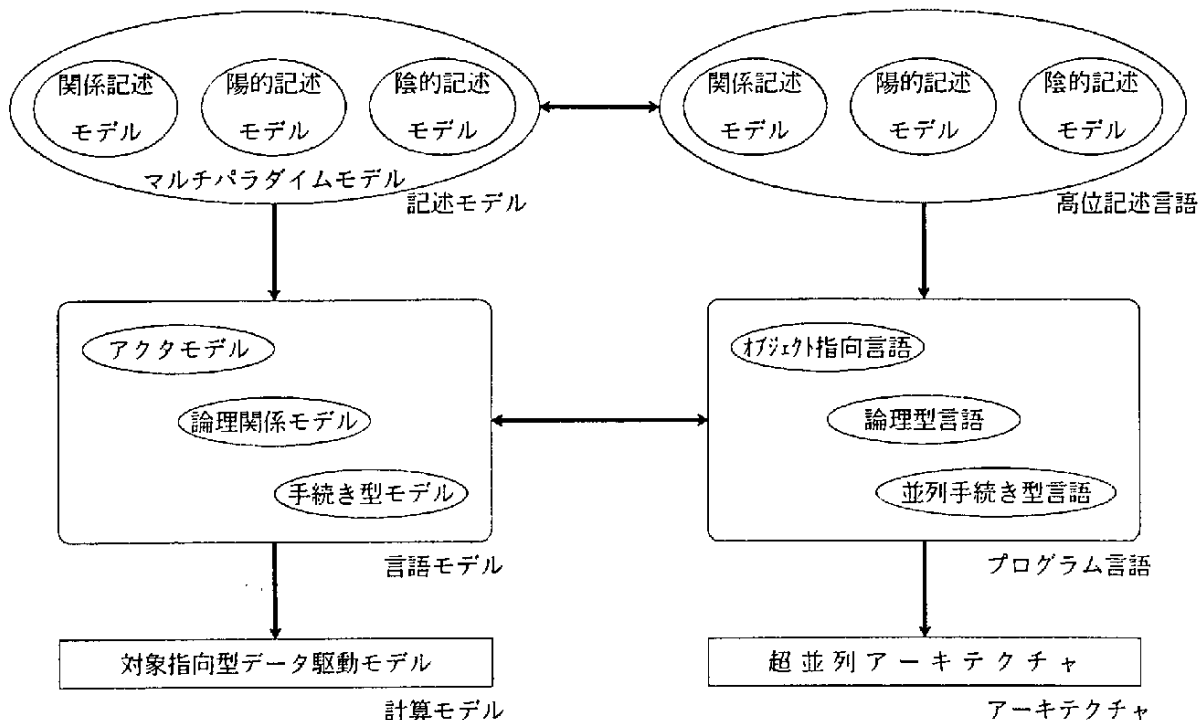


図 5.18: 超並列システムの抽象的システム構成

色透明で単純な汎用アーキテクチャをもつ超並列システムの計算メカニズムを想定しなくてはならない。また、言語システムは、最初から特定のものを想定するのではなく、前節で述べたようにマルチパラダイムを支援するのに有用な種々の言語モデルを想定すべきであろう。計算モデルは、無色透明な計算メカニズムの基盤を与え、かつ複数の言語モデルの基盤を与えるのに必要かつ十分なプリミティブをまとめよく備えたものである。以上の性質をもつモデルとして対象指向型データ駆動モデルの具体化を検討すべきである。

対象指向型データ駆動モデルにおいては、操作対象はオブジェクトであり、オブジェクトはデータ構造と操作からなる。操作はメッセージによって局所的かつデータ駆動的に起動される手続きである。対象指向型データ駆動モデルは単純化されたモデルであると同時に、言語システム、計算メカニズムの双方の構築にあたって実際的で強力な計算モデルであると考えられる。また、対象指向型データ駆動モデルの内部では、アルゴリズム、データ形式、負荷分散などの動的な変更を自律的に行えるような機構が実現され、システムの柔軟性が保証される。

5.2.2.3 柔らかな相互結合網

柔らかな計算モデル論と関連して抽象化した相互結合網、および、そこでの結合網の柔らかさについて考察する。並列システムにおいて、相互結合網は常に必要悪であった。プログラムを並列システムで実行するためには要素プロセッサ間の通信を実現する相互結合網は不可欠である。しかしながら、並列システムで実行する際に発生する性能低下は何らかの形で相互結合網と関連している。例えば、並列数の小さな今日の並列システムにおいても、相互結合網における通信遅延、通信の衝突に起因する通信容量の低下、相互結合網の予測不可能な動的振るまいなどは実用的な並列システム構築の主要な障害である。つまり、相互結合網こそが並列システ

ム硬直化の元凶と考えられている。それでは、硬直化している今日の相互結合網と対置する柔らかな相互結合網とはどのようなものであろうか。また、柔らかな相互結合網なしでは、超並列システム構築は不可能であろうか。

相互結合網の柔らかさは、具体的には次の三つの属性として求められる。これらの属性を備えた相互結合網、すなわち柔らかな相互結合網を用いることにより、従来の相互結合網を用いては不可能であった超並列システムの現実的構築が可能となると予測される。

(1) 物理的インプリメンテーションに関する柔らかさ

超並列システムでは、相互結合網は接続される要素プロセッサの集合体に匹敵する複雑さを持つ。このような環境では、要素（プロセッサおよび相互結合網）は常に誤動作・故障を起こすことを前提にしなければならない。従って、相互結合網は結合網自身の誤動作・故障に対して柔軟に振る舞うと同時に、接続されるプロセッサの誤動作・故障に対しても柔軟に対処して、処理の続行を図れる能力を持つ必要がある。勿論、誤動作・故障に対する柔らかさは、単に相互結合網だけで解決できるものではなく、計算モデルおよび後に述べる保守アーキテクチャと協調して実現される。

(2) 計算モデルに対する柔らかさ

超並列システムが基づく計算モデルは、直接的にも間接的にも相互結合網とその柔らかさの実現に影響を持つ。例えば、近傍相互作用による問題記述を行う計算モデルでは、近隣処理装置が相互に結合する相互結合網、例えばハイパキューブネットワークが有効である。しかしながら、近隣結合の相互結合網では、大域的な通信を要求する計算モデル（例えば共有記憶モデル）に基づく問題記述がなされている場合には大きな非効率が発生する。逆に、共有メモリモデル実現のためにしばしば用いられるオメガ網で近傍相互作用により記述された問題を実行すると、全プロセッサによる同一近隣方向へのアクセスが多くの衝突を発生させ、著しい性能低下が生じる。

並列システムがマルチパラダイムであるとは、システムが数多くの計算パラダイム、すなわち問題を記述する計算モデルを準最適に解釈実行することである。したがって、計算モデル上の仮想的計算機を自然に実際の要素処理装置にマッピングできる柔軟な相互結合網が要求される。超並列計算モデルとしての対象指向型データ駆動モデルは、その万能性により、問題記述モデルの持つ相互結合網に対する特性を歪曲することなく変換する無色透明な媒体であると、相互結合網の立場からは規定できる。相互結合網内部での閉塞の減少、スループットの増大、網遅延時間の減少などの点は相互結合網に対して常に求められる項目であり、柔軟性すなわち能力の余裕という古来からの真理を示したものと考えられる。

(3) 機能的な柔らかさ

柔らかな相互結合網に対するもう一つのアプローチは、結合網が単に情報を伝達するだけでなく、より能動的に実行に介入する、いわゆる機能付加型相互結合網である。並列システムでは、プロセッサは多くの状態を保持し、演算を高速実現することに適した構成をとっているが、多くのプロセッサにまたがる大局的状態に関する処理は多くの相互結合網による通信を伴い、効率的とはいえない。一方、相互結合網では、その大局的結合状況から、大域的情報を収集することに有利な立場にあるが、多くの状態を保持することは適当でない。従って、相互結合網に大域的情報を処理する機能を付加することにより、処理装置における処理形態の柔軟化を図ることが可能となる。

付加する機能としては、要素プロセッサ間の負荷分散機能、大域同期機構、大域的優先度制御機構、階層記憶におけるコヒーレンス維持機構、並列度制御機構などが候補である。これらの機能は、すべて論理的には集中して管理することが要求されるが、要素処理装置上のソフトウェアにより実際に集中管理を行った場合にはオーバーヘッドが著しく現実的でないものである。従って、相互結合網に機能を付加することにより、従来の相互結合網では不可能であったシステム全体の柔軟な制御が可能となる。

5.2.3 柔らかなソフトウェア

5.2.3.1 言語の柔らかさ

(1) 超並列対象指向モデルと記述言語

100 万以上の要素プロセッサ数よりなる超並列システムのアーキテクチャと親和性がよく、様々な応用プログラムが書き易い一般性のあるプログラム言語の設計は、超並列システムを構築するうえで最も重要な課題の一つである。柔らかな計算モデルとそのアーキテクチャの節で述べられている対象指向型データ駆動モデルと基本的な枠組が極めて近く、高い拡張性をもった現在最も良く研究されている計算モデルは、並列対象指向（並列オブジェクト指向）モデルであろう。しかし、このモデル及びこのモデルに基づいた記述言語は並列オブジェクト数を数千から数万と想定して考えられたものであるため、目的とする超並列システムの規模を考慮すると、種々の拡張や再検討が必要となるであろう。さらに、そうして設計された記述系の処理系の実現、およびそのような記述系によるプログラミングのための支援系の構築も不可欠なものである。また、次に述べる拡張された並列オブジェクトに基づく記述言語のほかに、限定された応用分野のみに使われる専用言語の開発も重要になる。

並列対象指向モデルにおいては、局所的な記憶と独立した計算・処理能力を持つ並列オブジェクトと呼ばれる多数の情報処理モジュールとそれらの間での、並行的なメッセージのやりとりによって計算／情報処理が進行する。並列オブジェクトは、問題領域を構成する各構成要素、例えば、質点、粒子、剛体、空間領域、ニューロン、データ構造、基本演算、関数／手続き、計算機、人間、等の機能やそれらが持つ知識をモデル化し記述したものであり、並列オブジェクト間のメッセージのやりとりは、そのような構成要素の相互作用をモデル化したものである。並列対象指向モデルに基づいた記述言語から出発して、超並列システムを駆使するためのソフトウェアを構成記述する言語を考える場合、次のような点を考慮すべきであろう。

1) 並列オブジェクトのグループ化の記述方式

莫大な数の並列オブジェクトのグループ分けを指定する記述機構は、様々な理由から不可欠である。たとえば、問題領域の存在する構成要素の自然な分割を、素直に並列オブジェクトのグループとして表現記述するための機構、個別の並列オブジェクトを指定するためにグループ名を導入するための機構、計算資源を共有する並列オブジェクトの集まりを指定する機構、などがそれである。また並列オブジェクトのグループ同士の関係の記述なども必要になる。

2) 並列オブジェクト同士の相互作用および同期の方式

メッセージのやりとりを従来の拠点对拠点で結ぶ方式に限らず、より多様な方式に拡張することが重要である。並列オブジェクト同士の同期は、従来はメッセージの伝達によってのみ実現していたが、同期的な通信機能の拡大、並列オブジェクトグループ内での SIMD 的な実行機構の導入、バリア同期方式の導入などの検討も必要であろう。

3) 並列オブジェクトの挙動の適応化

並列オブジェクト同士の計算資源の公平性・効率性を高めるためや、協調的動作を支援するために、また並列オブジェクトの耐故障性を高めるために、並列オブジェクトの挙動を動的に変化・進化させ、計算環境に動的に適応させることは、超並列システムの構築上極めて重要である。このために、高水準言語の枠組のなかでプログラムモジュール自身について記述をすることを可能にする、自己反映機能をもつ言語が必要になる。

4) 並列オブジェクト同士の制約記述

並列オブジェクト同士の間で成立する関係や制約を宣言的に記述することは、問題領域のモデル化及びそのシミュレーションの記述を簡便にする上で不可欠である。

以上のような言語・記述系で書かれたプログラムを、実際の超並列アーキテクチャの上で効率よく実行されるコードに変換するための処理系実現は、言語・記述系の考案と同等に重要である。良い処理系の実現のためには、並列オブジェクト間の依存関係の解析、データ/メッセージ・フローの解析、並列オブジェクトの型解析、同期情報の抽出、並列オブジェクトの負荷解析、並列オブジェクトのプロセッサへの割り付け方式、等の手法の総合的な開発が前提となる。また、プログラムの効率良い実行の基礎となる実行環境およびプログラム開発のためには開発支援系が必要になることはいうまでもない。特に、プログラムの実行を監視するためのモニタリングやプログラム開発時のデバグのためなどに、視覚化による新しい方式が必要になると思われる。

(2) 柔らかさ付与の記述法

ソフトウェアの柔らかさを実現するためには、プログラムの構築法が第一義的に重要であるので、まずそれについて考察する。次に、そのようなプログラムの記述をサポートするためには、プログラミング言語の機能として何が必要かについて検討する。超並列システムの目標は、高い計算性能によってより高度で柔軟な機能を実現することにある。超並列システムでは、各要素プロセッサの計算能力が総和としては十二分にある。しかしプロセッサ間の(大域的)通信能力は、計算能力との比で考えると低並列システムよりも劣ることにならざるをえない。このようなシステムでは、何を尺度としてプログラムの性能を考えるべきであろうか。低並列システムでは、しばしば台数効果が、並列処理の有効性の尺度とみなされてきた。しかし、台数効果があがることは、(超)並列プログラムにとって必要条件でも十分条件でもない。そもそも、相対的に劣る通信性能の下で、台数効果を上げることは非常に困難であるし、台数効果を上げるために計算複雑度の劣ったアルゴリズムを採用するのは本末顛倒である。

超並列システムに限らず、システムの性能として第一義的に考慮すべき点は、外界との間の通信の質である(ここで質というのは、通信内容の質や通信路の信頼性のことではなく、スループット(バンド幅)とレスポンスのことである)。システムをブラックボックスとして考える立場からは、超並列性は、この通信の質を向上させるためのものでなければならない。もちろん通信内容の質も重要で、豊富な計算能力はその向上にも役立つが、通信内容と速度(特にレスポンス)とはトレードオフの関係にあるので、両者は一元化して考えることができる。

外界との通信の質を向上させるには、スループットを上げ、レスポンスを改善すればよい。前者の例としては、マルチメディア通信の採用などが考えられ、ここにも非常に大きな計算能力の必要性が見出せる。以下では、レスポンスを改善するための一つの方法として、見込み計算(投機的計算、speculative computation)の概念を使う可能性について検討する。この方法が、柔軟なソフトウェアの構築法に大きく関係すると考えられるからである。

1) 見込み計算

見込み計算とは、後で必要となるかも知れない計算（ここでいう計算には、狭義の、つまり演算の意味での計算も、プロセッサ内やプロセッサ間の通信もふくむ）を予測して、あらかじめそれを行うことである。見込みであるから無駄になる危険もあるが、平均的に効率改善に役に立てばよい。従来の逐次型コンピュータでは、低いレベルの処理ではしばしば見込み計算が利用されてきた。たとえばハードウェアレベルでは、命令の先読みや分岐予測がその例である。これは、プロセッサメモリ間の通信オーバーヘッドによる性能低下をできるだけ防ぐ工夫である。オペレーティングシステムのレベルでは、入出力データのバッファリングが見込み計算の例である。これも、高い入出力オーバーヘッドを見かけ上低くするための技術である。

通常のソフトウェアにおいて見込み計算が意識されるようになったのは、並列システムが普及してきた比較的最近のことである。ソフトウェアのレベルにおける見込み計算としては、人工知能分野において研究されている並列限界分枝法、組み合わせ爆発アルゴリズム、並列繰り返し深化法などのアルゴリズムに、その例を見ることができる。これらはいずれも探索問題の並列実行の制御手法であり、問題の性質から見込み計算が本質的に重要であるために技術が発展してきた。しかし、探索問題以外にも見込み計算の利用価値は大きい。上記のバッファリングもその一例である。

最も高レベルの見込み計算は、外界からの要求を見込んで計算を行なうものであろう。たとえば、気のきいた会話的なプログラムを作るには、外界からの入力待ちの時間をうまく利用して、次の入力に対する応答を用意したり、自己の知識ベースを整理したりする技術を開発する必要がある。このような手法の応用範囲は、会話的なプログラムに限られない。同様の手法が(超)並列システムの内部のプロセッサ間通信にも適用できる。つまり、あるプロセッサから来る要求を見込んで他プロセッサが計算を行なうことが考えられる。

2) 柔らかさの記述のための言語機能

上に説明したような柔らかさ、特に見込み計算を実現するための言語機能としては、並列計算の制御が重要である。並列プログラミング言語における制御には、プログラムの正しさのための制御と、効率のための制御とがある。前者は、並行処理 (concurrency) における概念であるのに対し、後者は並列処理における概念で、並列計算の物理資源 (時間、空間) へのマッピングを扱うものである。正しさのための制御機能がインプリメンテーションに独立であるのに対し、効率のための制御機能はインプリメンテーションの物理的特性に依存する。したがって、この分離は概念整理の点からも重要である。

効率のための制御、すなわちマッピング機能は、抽象化と汎用性の観点からは、適度に機械独立でなければならない。そこで、言語機能の設計のためにはまず、超並列計算の、ある程度抽象的なモデルを構築しなければならない。このモデルは、計算の手間を評価する枠組を提供するという意味でも重要である。もちろん、高度なアプリケーションから見れば、上にとりあげた言語機能は低レベルのものである。しかし、システムの物理的特性を扱うレベルの言語機能をきちんと設計することは、超並列システムの効率を活かすために欠かすことができない。

5.2.3.2 OS の柔らかさ

オペレーティングシステム (OS) の基本目的は、計算機資源をプロセスに有効に割り付けること、ハードウェアの詳細を隠した使いやすいソフトウェア環境を構築することの二つである。機能的な柔らかさを追及する超並列システムでも基本は変わらないが、その実現方式は従来の並列処理と大きく異なる。しかし、ここで注意すべきことは、一つのプロセスを超高速に処理するデータ並列の超並列システムを目指すのか、様々なプロセスが同時に動作するシステ

ム全体のスループット向上を目指すのかによって超並列 OS の課題は大きく異なる。以下では、主に後者を前提に検討を行う。

(1) 階層的管理モデル

100 万台以上の要素プロセッサを独立に動作させ、全体としてある目的を達成するためには完全な集中管理は不可能で、会社や社会組織に相当するような機能分散でかつ階層的な管理構造が必要となる。このような管理構造を実現するためには、現在の OS の延長では実現が難しく、OS の階層化、機能分散化などが必要となる。また、このような超並列管理モデル構築のアプローチとしては、従来の並列対象指向モデルの拡張だけでなく、あいまいさを許容している人間社会の管理システムからの類推的なアプローチも重要になるとみられる。

(2) 柔らかなネットワーク管理

超並列では共有メモリ方式の集中管理は不可能であり、現在の電話通信網やコンピュータネットワークに相当するようなネットワーク管理機能がシステム内部にも必要になる。すなわち、通常の通信システムが持つ高度なルーティング、フロー制御、アドレッシング、故障回避、ケーパビリティなどの機能が OS のネットワーク管理機能に要求される。また、分散管理でありながらシステム全体のスループットを向上し、カタストロフィ現象を回避するためのネットワーク管理手法が必要であり、このために、学習による適応型の経路選択などの機能が要求される。

(3) 柔らかな資源管理と負荷分散

プロセス管理の面では、同期のためのオーバヘッドの解消が最大の問題で、これを最小限に抑え、かつデッドロックを回避する機構が必要である。特に、超並列処理のスケジューリングでは、並列処理の粒度とオーバヘッドの関係の他、時間的並列処理と空間的並列処理の関係なども重要な決定要素となる。このように従来の並列処理以上に多くの要因をもとにグローバルにスケジューリングし、かつそのオーバヘッドを最小に抑えなくてはならない。このためには、コンパイラ側に静的なスケジューリングとともに OS の動的なスケジューリングに必要な情報を渡す必要があり、従来以上にコンパイラと密接な関係が必要となる。記憶管理という面では、局所性を活用する管理手法やキャッシュの概念は超並列システムでも重要な高速化手段である。特に、超並列処理で最大の問題となる記憶へのアクセス競合や通信オーバヘッドの解消には、従来の仮想記憶だけでなく、階層を飛び越したり、キメ細かな学習機能を持つ置換アルゴリズムの適用が必要となる。超並列 OS では以上のような複雑な機能が必要になると見られるが、その一方で、ハードウェアの詳細を隠した使いやすいソフトウェア環境を構築することも必要で、そのためには資源の仮想化が重要であり、これも超並列 OS の大きな課題である。

(4) 柔らかな高信頼化技術

超並列処理では、必ず高い確率で故障が起きるという前提で資源管理を行なう必要がある。このため、従来の高信頼化技術をさらに発展させるアプローチとともに、故障回避のプロセスを通常の処理として扱い、緊急度に合わせた多系統（時間的／空間的）の高信頼化処理が必要である。

(5) 自律／適応機能

現在の OS でも、状況に合わせた自己チューニングやスケジューリング機能を持つものは多い。超並列システムの場合は、そのためのオーバーヘッドが膨大になり、分散的な自律機能が要求される。このためには、各モジュール毎の統計管理手法や学習機能が有効と見られる。また、これらの目的のために、管理情報を集めたり、OS 自らがシミュレーションして環境をユーザにあわせたりする機能が望まれる。

(6) マルチパラダイムのための OS

マルチパラダイムの導入にあたっては、様々なパラダイムを OS がサポートしなくてはならない。このためには、仮想マシンによる複数 OS のサポートが有効な場合が考えられる。すなわち、各パラダイム共通の機能は共通カーネルが制御するが、各パラダイム固有の機能はサーバレベルの機能として実現され、さらに幾つかのパラダイムで共通の部分は幾つかのレベルで仮想 OS 化されうるメカニズムが検討される必要がある。

5.2.4 超並列システムの実現

5.2.4.1 5-10 年後のデバイス技術と実装技術

(1) VLSI 技術のトレンド

Intel 社のレポート (IEEE SPECTRUM、Oct.1989、及び日経データプロ、32 ビットマイクロプロセッサ、1990) をもとに、1995 年および 2000 年におけるコマーシャルレベルでの最も高度な LSI 技術 (以下、LSI1995、LSI2000 と呼ぶ) と超並列システムへの適用形態を検討する。図 5.19 によると LSI1995、LSI2000 の主要諸元は表 5.2 のようになると予測される。

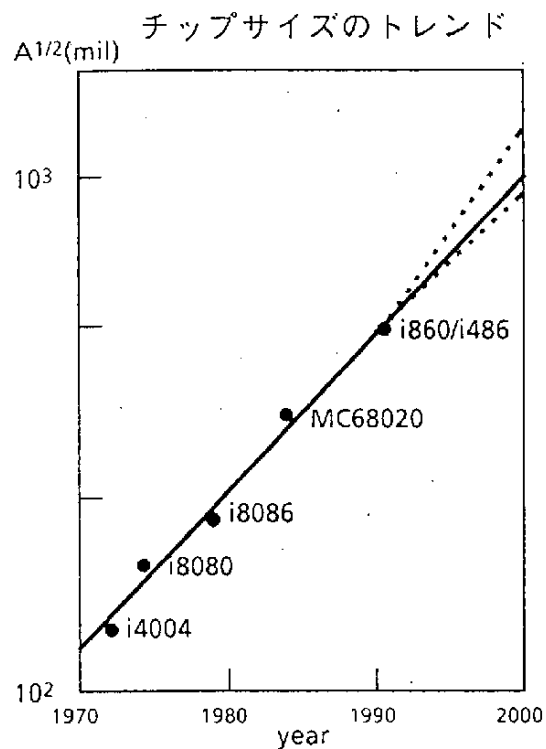
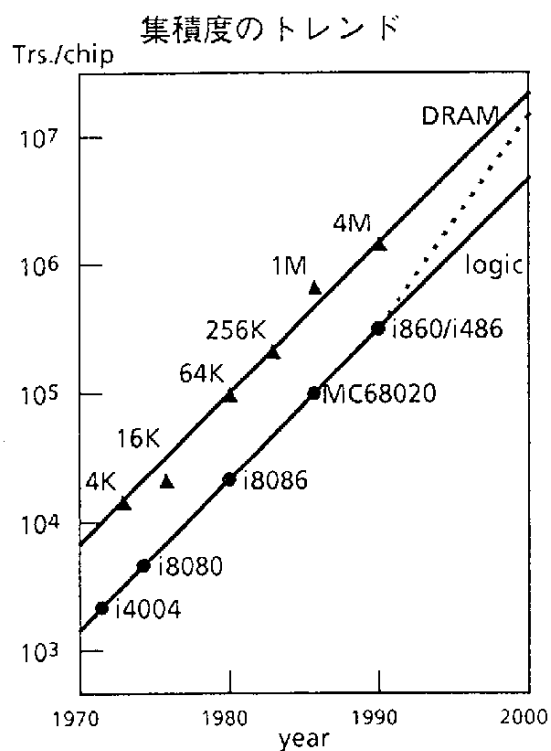
表 5.2: LSI 技術の進展

	チップサイズ	トランジスタ数	クロック	デザインルール
LSI1995:	20mm × 20mm	5×10^6	100MHz	0.4 μ CMOS
LSI2000:	25mm × 25mm	2×10^7	200MHz	0.25 μ CMOS

超並列システムを構成する要素プロセッサのデータバス幅は 8、16、32 ビットの 3 通りが考えられる。各要素プロセッサが 2k 語 (staticRAM) 程度のメモリと 10k-20k トランジスタ程度のネットワークハードウェアを持つものと想定すると、各プロセッサのハードウェア量は 8 ビットプロセッサで 120k トランジスタ、16 ビットプロセッサで 250k トランジスタ、32 ビットプロセッサで 500k トランジスタ程度となる。デジタル方式のニューロセルは 8 ビットプロセッサと同程度の規模 (信学技報、vol.89、no.312、ICD89-151、1989) と考えられる。1 チップ LSI に含まれる要素プロセッサ数、及び仮に 100 万プロセッサからなる超並列システムを構成した場合に必要なチップ数は表 5.3 のようになる。

(2) 消費電力と性能の予測

消費電力は、デバイス特性面では単位演算の実行に必要なエネルギー量に比例する量である power-delay (pd) 積のスケージング則、実性能面では MIPS 値及び電源電圧と強い関係がある。pd 積は、スケージング係数を s とすると概ね s の -1.5 乗で減少する。また、LSI1995 の電源電圧は 3.3V (速度 2/3、電力 1/2)、LSI2000 では 2.5V (速度 1/2、電力 1/4) と仮定



資料: (1)Gelsinger et.al.,IEEE SPECTRUM,pp.43-47,Oct,1989.
(2)日経データプロ,"32ビットマイクロプロセッサ",pp267-274,1990.

図 5.19: LSI 技術の進歩

表 5.3: LSI の内部構成と必要なチップ数

	ビット幅	PE 数 / チップ	総トランジスタ数	チップ数
LSI1995	8	40	4.8×10^6	2.5 万
	16	20	5.0×10^6	5.0 万
	32	10	5.0×10^6	10.0 万
LSI2000	8	160	1.9×10^7	0.6 万
	16	80	2.0×10^7	1.3 万
	32	40	2.0×10^7	2.5 万

する。1 μ CMOSによる32ビットCPUの性能-消費電力比は33MIPS/W程度であるため、LSI1995、LSI2000のMIPS-消費電力比は各々140MIPS/W、600MIPS/Wと推測される。以上から、32ビットプロセッサを採用した場合のチップの諸元をまとめると表5.4のようになる。(16、8ビットプロセッサ及びニューロセルの場合にはセル数が各々2、4、4倍になる。)

表 5.4: チップの諸元

	チップサイズ	トランジスタ数	クロック	MIPS(PE数)	Vdd	電力
LSI1995	20mm $\times$ 20mm	5×10^6	67MHz	550 (8)	3.3V	4.0W
LSI2000	25mm $\times$ 25mm	2×10^7	100MHz	4000(32)	2.5V	6.7W

これらの数値は主にスケーリング則に従って導出したが、この規則以外にI/O数、各I/Oが駆動する負荷、論理振幅、設計技術の進歩による速度や電力の最適化等の影響を考慮する必要がある。上記した数値によると、LSI2000を用いた100万プロセッサシステムの性能と消費電力は各々、125TIPS(Tera Instructions Per Second)、210kwとなり、電源供給や冷却技術が大きな課題となることが予想される。また、10億プロセッサシステムで予想される電力消費は210Mwとなり、この点からみる限りその実現可能性は著しく低いと考えられる。

(3) 実装技術のトレンド

超並列システムに必要とされるチップ数は数千から数十万と予想され、これらの実装には新しい高密度実装方式の想定が不可欠である。主要な候補としてはWSI(Wafer Scale Integration)とベアチップによるMCM(Multi-Chip Module)及びこれらのスタック実装化技術が挙げられる。

- WSI: チップの歩留りがある程度高ければ、平面的な実装密度は最も高くでき、動作チップの選択方法も種々の方法が可能である。一方、歩留りが低い場合、実装密度は低下し、動作チップの選択方法は高度かつ困難になる。また、高歩留りを期待するためにはチップサイズを小さくする必要があり、チップ外のネットワーク規模が増大するというトレードオフがある。ウエハーレベルで一定の歩留りが要求されるため、ウエハーの生産コストは高いが、逆に実装コストは小さい。
- MCM: 動作チップを選別して実装でき、不良チップのリプレイスも比較的容易であるので、ロバスト性、保守性への対応を一番単純な形で実現できる。現状で1000パッド/チップ程度の接続数と、50層/枚程度の配線が可能である。WSIとは逆にチップの生産コストは歩留りによるが実装コストはかなり高い。異種チップの混載(メモリとプロセッサ、プロセッサとネットワークコントローラ等)が容易である。

これらの技術に対して実装量の予測を行う。WSIで使用するウエハーは、1995年で8インチ、2000年で10インチ、MCMの実装基板の大きさは同時期のウエハー表面積の2倍程度であり、またWSIでのチップ歩留りは70%程度、MCMにおける実装密度は基板表面に対して50%程度と仮定する。表5.5に示したように、100万プロセッサ(32ビット)システムはLSI2000レベルの技術で約500枚の基板によって構成され得る。これは十分実現可能なレベルと考えられる。

表 5.5: 予想される実装量

	技術	面積 (cm^2)	有効面積 (cm^2)	動作チップ数	動作 PE 数	電力 (W/board)
LSI1995	WSI	320	225	56	450	225
	MCM	630	320	80	640	320
LSI2000	WSI	490	340	55	1800	370
	MCM	980	490	78	2500	530

(4) モジュールレベル実装

モジュール内の接続としては、電気的接続と光学的接続、及びマザーボード(カードオンボード)方式とスタック方式の組合せが考えられる。光技術は有力な候補となる可能性があるが、送受光技術、変復調技術、シリコン技術との親和性、実装技術との親和性等の課題解決が必要である。光技術の応用形態としては、光マザーボードモジュール、シリコンと親和性の良い送受光素子やオンチップ光導波路の形成によるチップ間光通信、更に WSI の直接スタックが実現する可能性がある。これらのイメージを図 5.20 に示す。

モジュール化技術、接続技術の他に、ネットワークトポロジと実装上の物理的な構造(チップ、基板、モジュールの各レベル)とのマッチング、実装密度やテクノロジーレベルと製造、検査、保守面での容易さとのマッチング、ロバスト性や冗長構成実現方式と実装形態とのマッチング、電源供給や冷却技術、外部との接続方式などについても十分な検討がなされねばならない。

5.2.4.2 相互結合網のトポロジ

100 万から 10 億ものプロセッサ数からなる超並列システムを目指した相互結合網を考える場合、結合のためのハードウェア量が最も重要となる。もちろん、結合網の幾何学的形状(トポロジ)は問題の適合性の面からできるだけ均質、等距離、高スループットのものが望ましいが超並列システムとなると、それらの要求を全て満たす相互結合網の実現は困難と言える。これまで多くの並列マシンで見られる、密結合共有記憶型のシステムはハードウェアの制約から先ず除外され、分散記憶型を前提としたアーキテクチャを考える必要がある。

表 5.6 にこれまで提案されたネットワークについての比較を示した。ハードウェアの面ではプロセッサ台数に対し $O(n)$ のネットワークが望ましいと言える。この条件を満たすものはバス、メッシュ、CCC 型(超立方体環型)、リング型などが考えられるが、ファンアウト、及び配線の複雑さの制約からメッシュ型が現実的な候補となりうる。ここで、現在の技術で先の超並列システムを実現する場合のハードウェアを見積ると以下の表 5.7 となる。この表からもわかる通り、百万から 10 億プロセッサもの超並列システムを現実的なハード規模で実現するためには複数のプロセッサと接続ネットワークを同一チップ内におさめた高密度な ULSI/WSI 技術が必要となる。また相互結合網を考える場合、その実装が、LSI 内部、基板内、基板間かによっても異なってくる。

超並列マシンを実現するために、プロセッサの集積方法を考えると、1 チップに複数台のプロセッサを格納する必要がある。この場合、単純に境界のプロセッサから信号線を出すと、LSI のピン数の制約が深刻となる。プロセッサ台数を m とすると、2 次元メッシュで $4m^{1/2}$, 3 次元メッシュで $6m^{2/3}$ となり、特に、チップ内で 3 次元実装は困難となるので、何らかの束線手段や時分割多重方式の採用が必要となる。また、チップ内は 2 次元で、またチップ間は 3 次元や

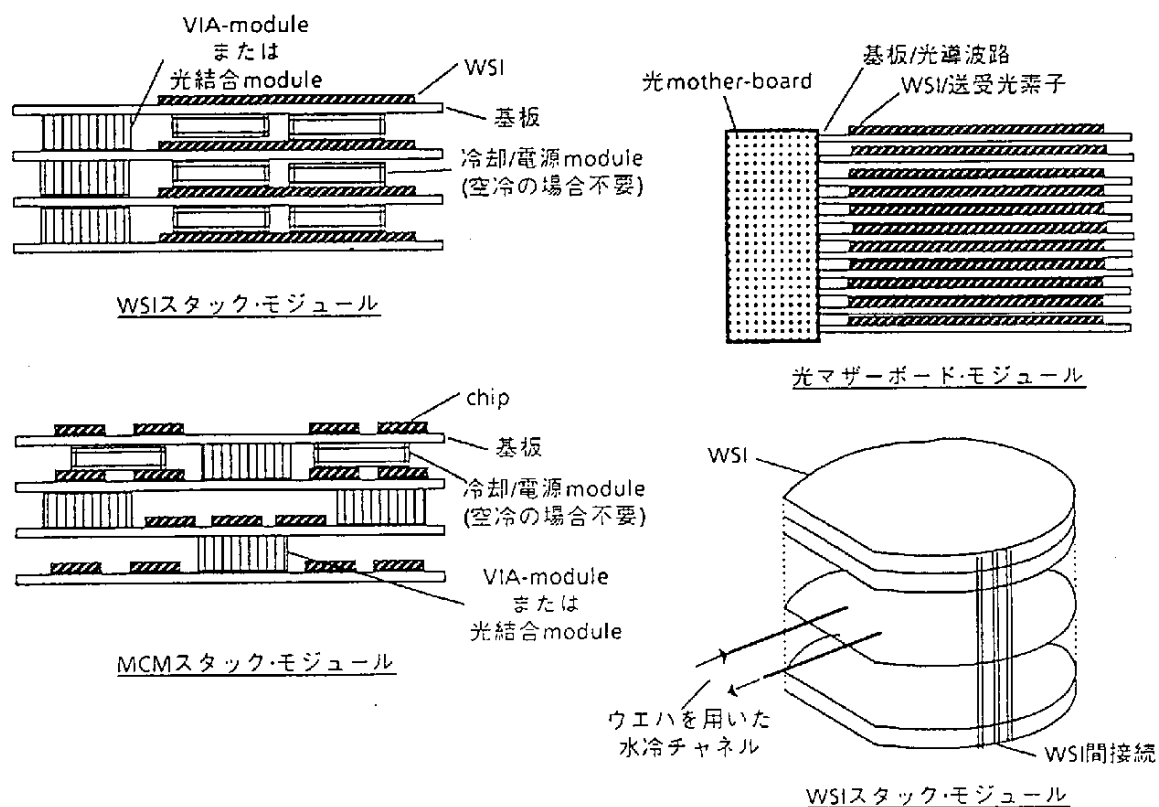


図 5.20: モジュールレベル実装

表 5.6: 相互結合網の比較

名称	ハード量	ファンアウト	通信長	配線の複雑さ
キューブ型	$N \log N$	$\log N$	$\log N$ 以内	×
2次元メッシュ	N	4	$N^{1/2}$	○
3次元メッシュ	N	6	$N^{1/3}$	○
リング	N	2	N 以内	◎
巡回多段	N	4	$2 \log N$ 以内	△
クロスバ	N^2	N	1	××
多段型	$N \log N$	1	$\log N$	×
CCC	N	1	$2/3 \log N$ 以内	×

表 5.7: 相互結合網のハードウェア量

	100 万プロセッサ	10 億プロセッサ
相互結合網	接続線数	接続線数
2D メッシュ	1000 × 1000	32000 × 32000
3D メッシュ	100 × 100 × 100	1000 × 1000 × 1000

キューブと言った階層方式の導入も必要となろう。これまでの実装方式をとる場合、LSI、基板のピン数の制約が大きくなり、そこでトポロジの制約を受ける。この制約を克服するために、光時分割多重やチップ間を直接光で結合する光接続などの技術も期待される。

超並列システムを目指す場合、これまでに見たように接続するためのコストが高く、通信遅延が本質的に存在する。また、故障の確率が無視できなくなるので、フォールトトレラント性の考慮もハードウェア面（代換経路への変更、故障モジュールの退避 / 縮退再構成など）と、計算モデル / ソフト面（障害が存在しても、正しい計算が可能な耐故障計算モデルなど）の双方での考慮が必要となる。

5.2.4.3 実装可能なシステムのイメージ

超並列システムを適当な規模の筐体内に実装することを考えるとき、電力供給や冷却技術のほかに相互結合網の実装技術が重要な技術課題となる。超並列システムの使用形態としては、大規模な論理的相互結合網に接続された大量の仮想プロセッサからなる系を物理的結合網に接続された実プロセッサにマッピングするような形態が予想される。従って物理的結合網には、実装可能性と同時に、種々の論理的相互結合網に適合できる汎用性が要求される。ハードウェア量が比較的少なく、なおかつプロセッサ間の平均距離が比較的短いプロセッサ結合型オメガ網を例にとり実装可能なシステムイメージについて考察する。

(1) 要素プロセッサとマルチチップモジュール

要素プロセッサを、浮動小数点演算回路を内蔵した 32 ビットプロセッサ部、相互結合網の基本要素である 2 入力 2 出力のルータ部、プログラムやデータを格納する局所記憶などから構成すると仮定する。2 K 語程度の記憶を搭載することを仮定すると、回路規模はおよそ 60 万トランジスタ程度になると考えられる。

次にチップイメージを考察する。VLSI 製造の制約条件としては、半導体の集積技術と組立て技術が考えられる。半導体の集積技術については先に述べたように、1995 年には 20mm 角に 500 万トランジスタを集積することが可能となろう。これは上記の要素プロセッサであれば 8 個程度が 1 チップ化できる集積度である。組立て技術はピン数の制限に大きな影響を与えるが、パッドに対するボンディングピッチは 80 μ m、TAB (tape automated bonding) 技術を用いれば端子ピッチは 0.15 ~ 0.2mm となることが予想される。従ってベアチップで 1,000 ピン、TAB で 600 ~ 800 ピン程度の端子の LSI の実装が可能になる。この条件のもとで 1 チップに格納する要素プロセッサの個数を考える。相互結合網のための入出力ポートのビット幅を 32 ビットとした場合、保守回路等のための制御信号や電源ピンを含めて考えると 16 ~ 18 ポートが TAB 技術の許容範囲である。一方、プロセッサ結合型オメガネットワークを意識したチップ構成を考えると、8 プロセッサを 1 チップに集積した場合の入出力ポート数が 18 となり、上記の許容範囲に収まる。以上のように、集積技術と組立て技術を考慮すると 1 チップに

32 ビットプロセッサを 8 個程度集積したマルチチップモジュールの実現は十分に可能であると考えられる。この場合のプロセッサイメージとチップイメージを図 5.21 に示す。

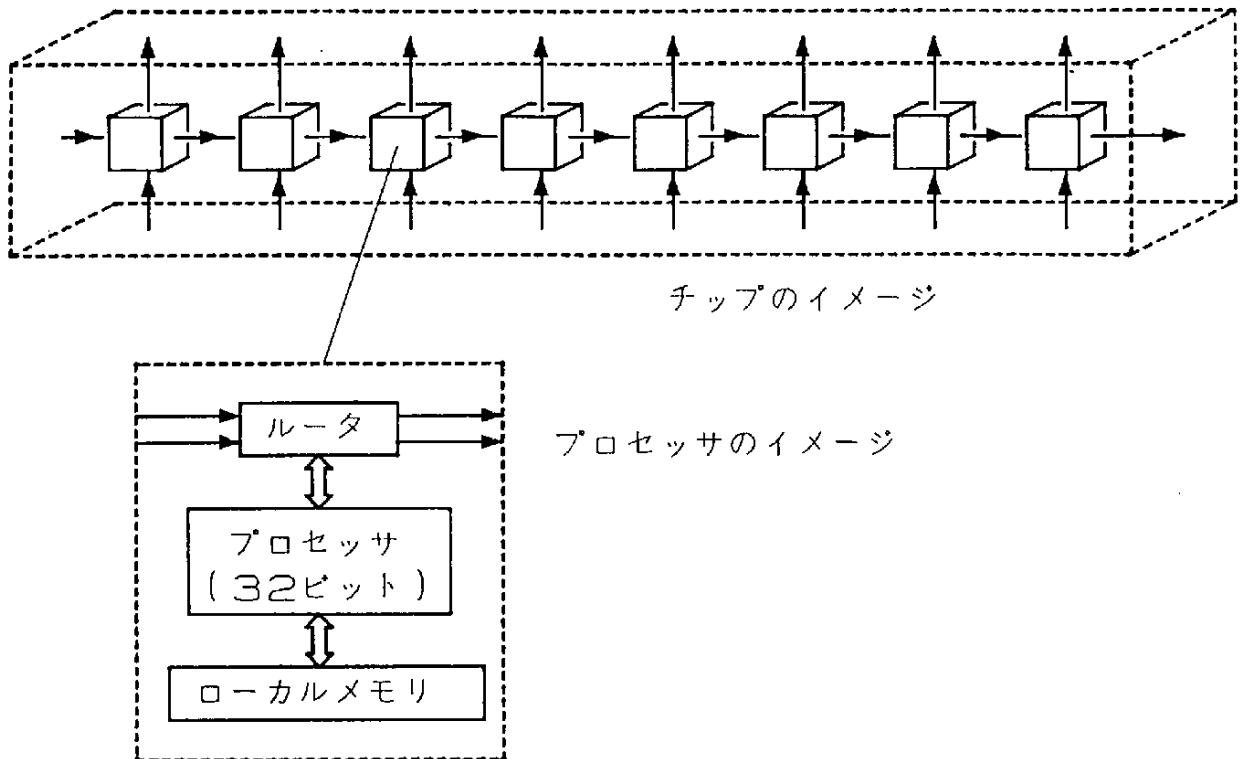


図 5.21: プロセッサイメージとチップイメージ

(2) 1K プロセッサモジュール

上述のチップを 1 枚の基板に実装することを考える。8 プロセッサを内蔵したチップを 128 個に、モジュール間接続インタフェース、2 次記憶装置とのインタフェース、保守用ハードウェアなどを加え 1 枚の多層基板に両面実装することで、1,024 プロセッサのモジュール（1K プロセッサモジュール）が実現できる。基板サイズは 40cm 角程度となろう。図 5.22 に 1K プロセッサモジュールのイメージを示す。図では複雑さを避けるために、プロセッサとモジュール間接続インタフェースのみ示した。1995 年に予想される半導体テクノロジーでは、この 1K プロセッサモジュールの性能は 70GIPS (Giga Instruction Per Second)、消費電力は 500W 程度になることが見込まれる。相互結合網の経路長は、閉塞の無い状態では平均経路長が 9.5、最大経路長が 14 となる。このモジュールの実装に際しては、基板上の高密度配線が課題となることが予想される。

(3) 百万プロセッサシステム

さらにこの 1K プロセッサモジュール千台を相互に接続すれば百万プロセッサシステムが実現できる。モジュール間結合をモジュール内結合と同じくプロセッサ結合型オメガ網と

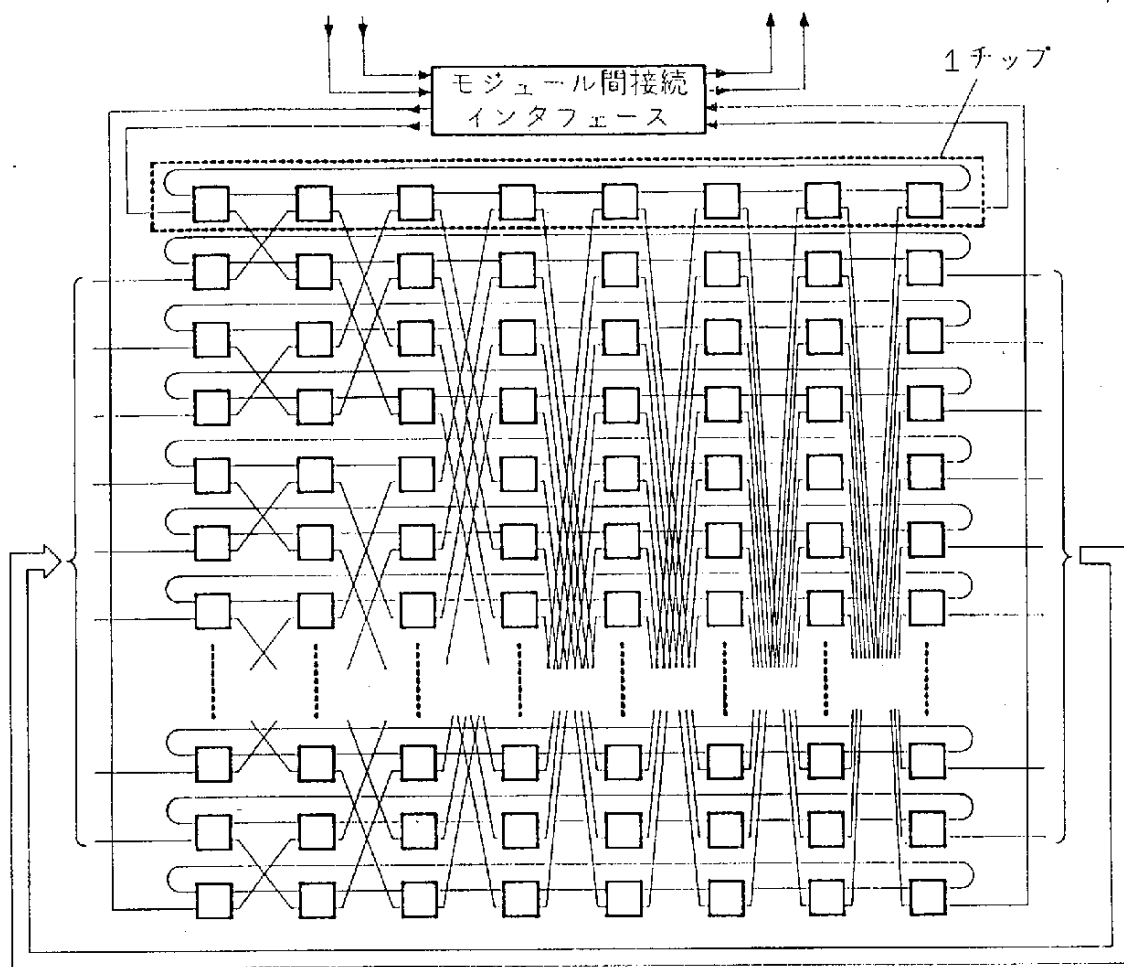


図 5.22: 1K プロセッサモジュールのイメージ

した場合のシステムイメージを図 5.23 に示す。この百万プロセッサシステムの最高性能は 125TIPS(Tera Instruction Per Second)、全回路は $1\text{m} \times 0.8\text{m} \times 2\text{m}$ 程度の筐体 8 台程度に納めることができる。ただしこの場合、消費電力が 210KW 程度になることが予想され、電力供給とともに強力な冷却技術の開発が重要な課題となろう。

モジュール間の結合網に関しては上記のオメガ網以外にもハイパキューブや CCC(Cube Connected Circle) などの選択枝も考えられる。しかしいずれの場合でも、モジュール間の通信量が大量になれば結合網に閉塞が生じ、システムの性能が著しく低下することになる。この事態を避けるためには結合網の通信路容量を上げることが必要であり、大容量で高速な通信手段としての光技術に期待が寄せられる。

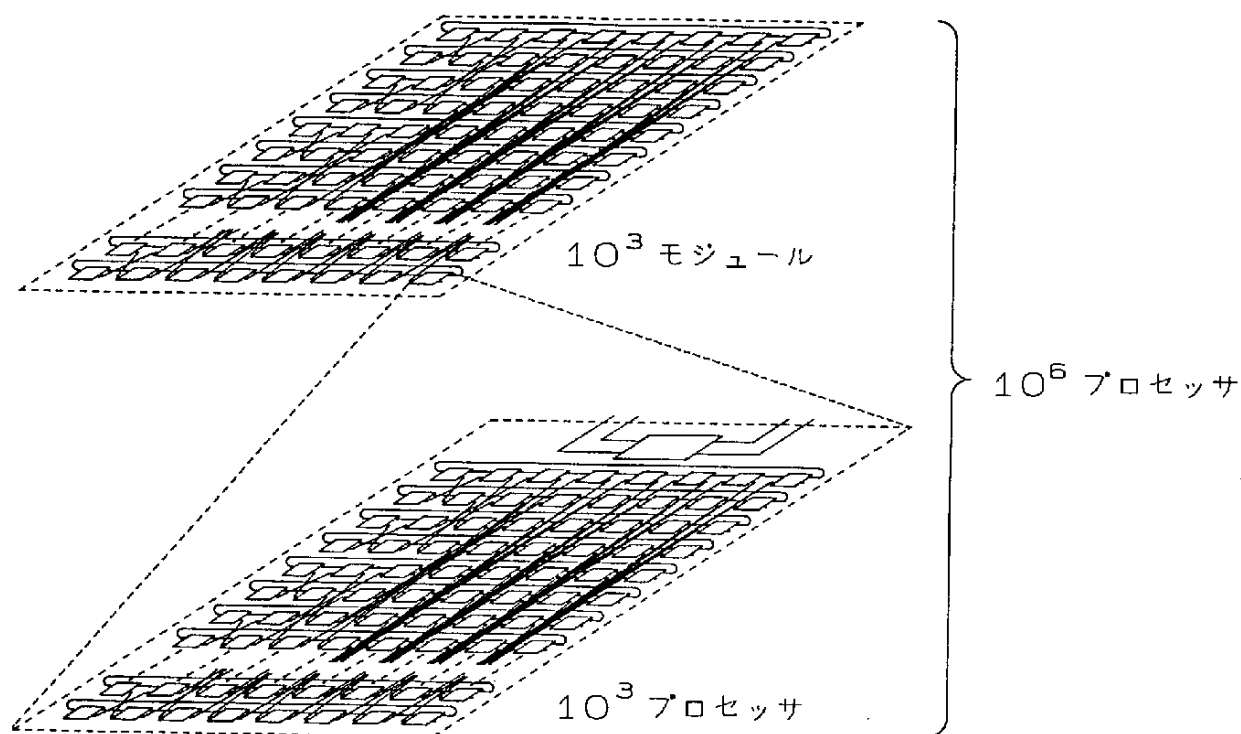


図 5.23: 百万プロセッサシステムのイメージ

5.2.4.4 超並列入出力／保守アーキテクチャ

超並列システムにおける計算モデル、アーキテクチャは主にプログラムの論理的実行を規定するものであり、システムと外界の相互作用については規定したものではなかった。このため、超並列システムを現実の世界で用いるためには、外界との相互作用を担当する部分に、論理的実行部分に見合う能力を持たせ、論理的実行部分の能力を妨げないようにする必要がある。システムと外界との相互作用は、境界を厳密にひくことは困難であるが、入出力操作と保

守操作に分類される。システム内でこれらの操作を実現する部分を入出力アーキテクチャおよび保守アーキテクチャと呼ぶ。

(1) 入出力アーキテクチャ

入出力アーキテクチャは超並列システムと外界、特に二次記憶、入出力センサ・アクチュエータ、ヒューマンインターフェイス機器（グラフィックスを含む）を結合するものである。従来より、入出力に要請される能力は、システムの計算能力に比例することが広く知られていた。しかしながら、入出力における能力とは、単にチャンネルのスループットで代表される転送能力だけでなく、必要な情報が得られるまでの遅延時間等を含めて考える必要がある。従って、超並列システムにおいては、要素プロセッサ数に比例する数の入出力チャンネルとデバイスを接続するだけでは、入出力能力の問題は解決しない。入出力アーキテクチャの持つもう一つの問題は同期問題である。多くの入出力機器においては、情報は最終的には逐次的な関係を持つ直列な形態で扱われる。そこでは情報間の大域的順序関係を保存して処理を続行する必要がある。

上記二つの要請から、入出力アーキテクチャをプログラムを実行するアーキテクチャでそのまま実現することには多くの困難がある。従って、より入出力に特化した独立の入出力アーキテクチャが要請される。超並列システムのための入出力アーキテクチャについては、これまで殆んど検討が行なわれていなかったため不明の点が多いが、少なくとも以下のことが要求される。

1) プロセッサ数と比較して超線形な速度向上

プロセッサ数に比例した入出力転送速度では、入出力動作が常に全入出力装置との間で行われる場合のみ入出力能力と演算処理能力のバランスが逐次計算機の場合と同一になる。しかし、一般にはプロセッサ数より少数の入出力装置が処理に参加する。従って、逐次計算機の場合と同一の入出力能力を与えるためには、プロセッサ数比例を超える入出力速度が要求される。更に、超並列システムでは、プロセッサ1台あたりの入出力アクセス回数に対する入出力転送情報量が減少するため、並列度の増加に見合うアクセス時間の短縮（アクセスに伴うオーバーヘッドの減少）が必要である。

2) クラスタ化した入出力管理／同期機構

個々の入出力機器は、多くの場合ディスクヘッドの位置決め、表示器の走査速度など物理的動作を含み、入出力速度には自ずから限界がある。従って、入出力機器のクラスタ化した動作は不可欠である。クラスタ化した入出力の管理には、入出力機器の同期管理と共に処理装置間の大域的同期動作が要求される。

(2) 保守アーキテクチャ

超並列システムでは、前記のようにプログラム実行中においてもプロセッサまたは相互結合網に故障が発生することを前提とする必要がある。このため、処理装置自身を用いて自己診断を行うことでは保守の目的を達成し得ない。更に、相互結合網の診断、状態の記憶を行うためには、プロセッサ数に比例するかそれ以上の複雑さをもった診断処理が必要である。従って、適当な時間内に診断と保守操作を実現するため専用の保守アーキテクチャが必要である。更に、動的な保守動作とプログラム実行中の再構成を実現するために、診断と保守動作に大域的な同期を実現することが必要である。

上記の考察において、入出力アーキテクチャと保守アーキテクチャの類似性を見ることが出来る。これは、外界とインターフェイスするという両アーキテクチャの本質に基づくものと考えられ、これらを統合したアーキテクチャで実現可能であることを示唆する。更に、保守機能

には、大量データの入出力と、グラフィック機能を持ったヒューマンインターフェイスが必要なことも、これら両者の統合を必然化する。結果として、超並列システムは、要素プロセッサ、相互結合網および入出力／保守アーキテクチャで構成される。

5.2.4.5 超並列アーキテクチャ開発支援環境

柔らかな情報処理機能の実現を可能とするシステム基盤としての超並列システムでは、複数のパラダイムが反映可能な柔らかな計算モデルが効率よく実行できることが要求される。このような計算モデルとして先に対象指向型データ駆動モデルが提案されている。しかしこのモデルを効率よく実行するためには、従来のフォンノイマン方式を超える柔らかなプロセッサアーキテクチャと大規模な並列処理を効率よく実行できる柔らかな相互結合網の開発が不可欠である。これらの要求を満たす超並列アーキテクチャを開発するためには、従来の計算機システム開発支援環境とは異なった新たなシステム開発環境が必要となる。超並列アーキテクチャの開発支援環境には以下のような機能が要求される。

(1) 相互結合網の開発支援

超並列アーキテクチャにおいては、100万個～10億個にのぼる要素プロセッサを接続する相互結合網は最も重要な技術である。相互結合網には、様々な選択枝が存在する。また機能的には、ロバスト性、動的な負荷分散機能、大域的な同期機能などの「柔軟かさ」の一助となる種々の機能が要求される。相互結合網の開発とは、実装技術の制約の中でこれらの要求を最大限に満たす解を見いだすことである。相互結合網を開発するためには、上記の要求項目や制約項目をあらゆる角度から検討することが必要であり、開発支援環境としては構想にのぼった種々の結合網の総合的な機能／性能をシステムレベルでのシミュレーションにより事前に評価できなければならない。しかし超並列システムの相互結合網は極めて大規模であることから、相互結合網全体を事前に妥当な時間内で評価するためには高速な処理機構が必要である。

この開発支援環境を、従来の単一プロセッサからなるシステムに求めるのは処理速度の点に無理があり、スーパーコンピュータでは柔軟性の点で問題がある。もし可能ならば、想定されるいくつかの相互結合網のトポロジを内包した適度な規模の並列マシンが望ましい。

(2) 要素プロセッサアーキテクチャの開発支援

超並列システムにおける要素プロセッサはマルチパラダイムを受容する最下層の構成要素であり、データ駆動モデル、対象指向モデル、ニューラルモデルなど各種の計算モデルに対する効率の良い処理系を実現するものでなければならない。このことは要素プロセッサ単体での高機能性を要求するものではなく、複数個の要素プロセッサの総体としての高機能性・柔軟性を要求するものである。従って要素プロセッサのアーキテクチャ開発に際しては、相互結合網を含めたサブシステムとしての機能評価を行うことによって要素プロセッサに必要な基本機能のセットを絞り込むようなアプローチが望ましい。

要素プロセッサのアーキテクチャ開発支援環境としては、上に述べたような開発手法を支援するものでなければならない。すなわち、データ駆動モデルをはじめとする各種の計算モデルが比較的容易に評価でき、なおかつ負荷分散の単位に見合った個数のプロセッサ群としての機能を評価できることが必要である。

(3) ソフトウェア開発環境との整合性

超並列システムにおいては、自己組織化、最適化、学習といった柔らかな機能やマルチパラダイムはソフトウェアによって記述されるものであり、アーキテクチャはこれらのソフトウェアを効率良く実行する言わば柔らかな情報処理の基盤を与えるものである。従ってソフトウェアを効率の面から評価するためにはアーキテクチャを仮定することが必要である。またアーキテクチャの前提なしには言語処理系ソフトウェアの開発もまた有り得ない。しかし超並列システムの開発段階においては、これらのソフトウェアを評価するターゲットマシンがまだ存在しない。超並列システムのプロトタイプの開発まではこれらのソフトウェアの評価はアーキテクチャ開発支援環境に委ねざるを得ない。逆に、アーキテクチャの評価のためには、アーキテクチャ開発支援環境のもとで柔らかなソフトウェアを実行させることが必要である。これらのことから、アーキテクチャ開発支援環境とソフトウェア開発環境とは相互利用ができることが望ましく、両者の間には強い親和性が必要である。

このように考えると、開発の初期段階においてアーキテクチャ開発支援環境は極めて重要な役割を果たすものであり、開発目標である超並列システムに少なからざる影響を与えることが予想される。従ってアーキテクチャ開発支援環境としては、目標とする超並列システムが果たすべき機能や特性のサブセットをある程度具備したものが必要である。

5.2.4.6 超並列オペレーティングシステム

先に述べたように、オペレーティングシステム (OS) の基本目的は、計算機資源をプロセスに有効に割り付けることと、ハードウェアの詳細を隠し使いやすいソフトウェア環境を構築することであり、超並列システムでもこの目的は変わらないが、その実現方式は従来の並列処理と超並列処理では大きく異なる。

(1) 並列性の制御

並列 OS で最も重要な基本技術は資源の競合を防ぐための相互排除であり、このためにセマフォア、モニタなどの同期制御技術が開発されてきた。これらは、基本的にはアクセス競合が起こっては矛盾を生じる資源（クリティカルセクション）にロックをかけ、逐次化することにより実現される。また、資源の競合を防ぐ相互排除のメカニズムだけではデッドロックを生じるため、これを防ぐ様々なメカニズムが必要となる。従来の並列処理の制御では、並列度が低かったため、このクリティカルセクションを見つけだし、デッドロックの生じない相互排除メカニズムを実現することが大きな課題であった。

しかし、並列度を上げるためにはクリティカルセクションの粒度を細分化する必要があるが、細分化するほどこれを制御するオーバーヘッドが増加するという相反する問題が生じ並列処理の性能を著しく悪くする。この問題は、超並列 OS では特に重要な課題であり、このためには、制御のオーバーヘッドを最小限に留めるアプローチと、クリティカルセクションを削減するアプローチのトレードオフを探らなくてはならない。

(2) 制御オーバーヘッドの削減

超並列処理では、非常に多くのプロセスが同時に走るため、相互排除の高速化には、各プロセスの生成／スイッチング処理を軽減し、スイッチング時間を高速化することが重要である。このためには、OS がよりきめ細かな高速処理を施すアプローチと OS からこの制御を見えなくするアプローチがある。前者のアプローチの例としては、カーネルのオーバーヘッドを軽減するためスケジューラやプロセス間通信などの最小限の機能だけにとどめて他の機能をサーバ化

したり、マイクロプロセス導入による並列処理の階層化を実現したり、 ケーバビリティベースの対象指向の概念を導入するなどのアプローチが必要となる。

また、後者では、並列処理のアプリケーションが OS から見えないようにし、アプリケーションレベルで OS の助けを借りずに並列実行をするアプローチである。OS からは単にひとつのアプリケーションとしか見えず、すべての並列制御がアプリケーション内で実行されるため、OS のオーバーヘッドはほとんどない。この場合は、言語により並列処理を記述する必要があり、強力な並列記述言語やコンパイラが必須であり、並列処理の範囲はアプリケーション単位に限られる。

もちろん、この二つの組み合わせも有効であり、超並列システムではこの組み合わせが必要になると考えられる。この場合、コンパイラによる静的なスケジューリングと OS の動的なスケジューリングを最大限に活用することが必要である。

(3) クリティカルセクションの削減

超並列処理では、上記の制御オーバーヘッドの削減と共に、そもそものボトルネックとなるクリティカルパスをなくすアプローチも必要となる。このための手段としては、 ケーバビリティベースの対象指向の概念を導入してクリティカルセクションを明確化する手法やアクセス権を明確化して相互排除の箇所を少なくする手法がある。以下にこれらの例を述べる。

前者のアプローチでは、従来の OS に見られるような複雑に絡み合ったプログラムからクリティカルセクションを見つけだしてゆくの比べ、オブジェクト単位にクリティカルセクションを設定できるため、数の上で組み合わせ的に減少することが期待できる。また、クリティカルセクションの設定では、通常、大きなモジュール単位にロックをかけ、制御オーバーヘッドに見合った大きさに徐々に細分化するが、この場合にもこのアプローチが適している。後者のアプローチでは、一般化されているデータアクセスの中から相互排除が必要ないケースをみつける手法をとる。例えば、ほとんどのデータアクセスが参照だけであることが事前に分かっているか、そのことが統計情報から確率的に明白な場合には、データ参照をデータ修飾より優先させる手段をとることにより、データの一意性は保たれ相互排除の必要はなくなる。ただし、この場合には、複数のプロセッサが同時に参照する機能や大域同期機構などが必要となる。

(4) その他の課題

以上は、比較的現在の並列処理の問題の延長上にあるものだが、その他にも超並列 OS 固有の多くの課題がある。特に超並列システムは共有記憶方式だけでは実現が不可能であり、メッセージ通信方式の採用は不可欠である。この場合、大規模なメッセージ通信網の高速制御と共に、プロセスの負荷分散、データのマッピング、メッセージによる並列処理制御、静的／動的スケジューリング、など多くの困難な課題がでてくる。これらの課題の困難さは、効率向上のために、処理やデータの局所性を静的／動的、時間的／空間的、かつ、ミクロ的／マクロ的視点から眺めなくてはならないことに起因する。

5.2.4.7 超並列プログラミング環境

超並列プログラミングのためのプログラミング環境としては、「正しい」プログラムを書くという側面の支援については、従来のプログラミング環境と大きく変わるところはないと考えられる。そこで、ここでは、超並列であるが故に重要となってくるであろう点について考察する。なお、ここで考えるのは、超並列性を意識してプログラムを書く人のための環境である。

超並列プログラミングで特に重要となるのは、システムの物理的特性、とりわけプロセッサ内およびプロセッサ間の通信コストの特性を、今まで以上に考慮しなければならないことである。これは、今までよりも、アーキテクチャとアプリケーションとの間のセマンティックギャップが拡大するということである。これは必ずしも悲観すべきことではない。プログラムが指示する計算が物理的にどういう特性をもつかを理解することは、超並列システムの性能を活かすために非常に重要である。超並列システムの意義は、よく考えてプログラムやアルゴリズムを設計する必要性を軽減することにあるのではない。そのような用途にも使えるかも知れないが、優れたプログラムを書き、超並列システムでなければ出せない性能を出すことの方がはるかに重要である。もちろん、超並列プログラミングの経験が蓄積されるにつれて、一般プログラマがあまり細かいことまで考える必要がなくなるのが望ましいことではある。だが少なくとも当面は、そのような蓄積を促進するための支援を考えなければならない。

よいプログラミング環境は、プログラミング言語、プログラミング・パラダイムなどと共に、このようなセマンティックギャップを橋渡しするために不可欠である。超並列システムのためのプログラミング環境としては、上の考察からわかるように、負荷のバランスや通信の特性等をモニタしたり解析したりする機能が最も重要になると考えられる。これらを効率よく実現するには、ハードウェア的支援が必要となるので、超並列システムのハードウェアの設計段階から、機能についてよく考えなければならない。

この種のパフォーマンス・モニタリングやパフォーマンス・デバッグの仕事は、従来はオペレーティングシステム開発者のようなシステムプログラマの仕事であった。しかし、超並列システムを効率よく動かすためには、より一般のプログラマもこの種の作業を行わなければならないであろう。そこで、提供する環境は、気の利いたものにしなければならない。また、並列実行方式、つまり「効率のための制御」に関するノウハウを、ライブラリの形で蓄積してゆくことも必要である。これも、プログラミング環境が提供すべき重要な機能のひとつであろう。

5.2.5 超並列システムの開発に向けて

5.2.5.1 ゴール、サブゴールの設定

超並列システムの開発計画を検討するに際して、考慮しなければならないことは次の2点である。

- 1) 最終システムとしてどのような規模のマシンを開発するのか
- 2) 開発ステップはどうするのか（1回で最終システムを開発するのか、プロトタイプを作るのか、プロトタイプを作るとすればその規模は、等）

まず、これまでのコンピュータ関連プロジェクトでの開発ステップを見てみる。平成元年度に終了したスーパーコンピュータプロジェクト、および平成3年度に終了予定の第5世代コンピュータプロジェクトにおける最終システムの開発ステップは図5.24に示す通りである。スーパーコンピュータプロジェクトは実質8年間のプロジェクトであり、前半でアーキテクチャを検討、後半で4台の高速演算処理装置を主体とする最終システムを開発している。その間、プロトタイプは開発していない。一方、第5世代コンピュータプロジェクトは10年の開発期間で、前期3年間で逐次推論マシンPSIを、中期4年間の開発ではPSIを並列化したMultiPSIの開発を主体としている。そして最終目標である並列推論マシンは256～512プロセッサ規模のサブシステムからなる分散システムとして、中期から後期にかけて開発を進めている。

本報告書では最終システムは $10^6 \sim 10^9$ の要素プロセッサを結合した超並列システムを想定している（ただし、 10^9 レベルのシステムは消費電力や実装規模の点からみて実現に困難が予想される）。この規模は現在実現されているシステムと対比すると、 $10^3 \sim 10^6$ 倍であり、このような規模を机上検討のみで一気の開発することは多大の危険性をはらむと予想される。したがって、プロトタイプシステムの開発は必須である。プロトタイプシステムの位置づけは、アーキテクチャ、ハードウェアから見たシステムの実現の実証と最終システムへ向けてのソフトウェアの開発環境である。そこで用いる開発技術は、現在のシステム技術と最終システムで要求されるシステム技術の中間に設定する必要がある。また、それを実現するための半導体テクノロジーの進展を睨む必要もある。

プロトタイプシステム PS と最終システム FS の開発イメージとスケジュールの一案を表 5.8 と図 5.25 に示す。PS は次世代ないし次々世代の半導体テクノロジーを利用し、 $10^4 \sim 10^6$ のプロセッサから構成される。この数は現状技術の $10^2 \sim 10^3$ 倍である。実装方式は現在と同じ個別実装が中心となろう。開発時期は（10 年を仮定）プロジェクト開始後、6 年後を想定している。FS は PS の 1 世代先の半導体テクノロジーを利用し、 $10^6 \sim 10^9$ のプロセッサを有する。これは PS の $10^2 \sim 10^3$ 倍の規模である。このような規模では実装方式は WSI ないしモジュール実装の採用が必須となろう。

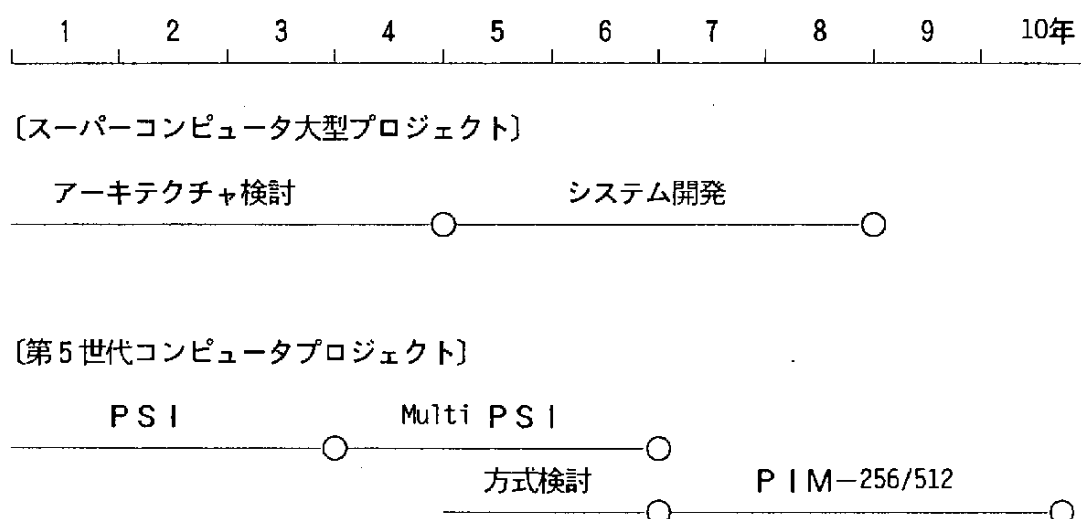


図 5.24: これまでのプロジェクトの開発経過

5.2.5.2 ソフトウェア開発環境としてのテストベッド

超並列システムの研究開発の初期段階では利用可能なマシンが存在しないため、アーキテクチャや新アプリケーション開拓の基礎検討に際して、何らかの形でソフトウェア開発環境を整える必要がある。また、プロトタイプマシン用のソフトウェアの開発にもソフトウェア開発環境の整備が必須である。これらの開発環境に利用されるマシンがテストベッドとして利用され得るために備えていなければならない条件として、次の点が考えられる。

- 1) 最終システムとマシンアーキテクチャの距離がそれほど遠くないこと

表 5.8: プロトタイプシステムと最終システムのイメージ案

項目	PS (Prototype System)	FS (Final System)
システム名称	統合プロセッサプロトタイプ	統合プロセッサ実証機
開発目的	ソフトウェア開発、システム検証用	実用向け
テクノロジー	0.5 ~ 0.3 μ m	0.3 ~ 0.2 μ m
プロセッサ数	$10^4 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^9$

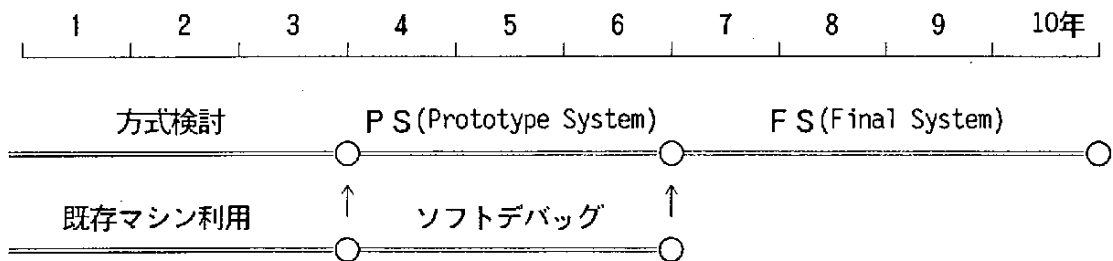


図 5.25: 超並列システムの開発スケジュール案

現在、最終的なシステムイメージの詳細が明確になっているわけではないが、概略は超並列システムとニューラルシステムを疎結合あるいは密結合させた統合型を目指している。したがって、このようなシステムのソフトウェアの開発が、規模の大小は別として実現できる必要がある。かつ、マシンのアーキテクチャは最終システムのアーキテクチャに相当の影響を及ぼすと思われるので、できる限り汎用型であって、特定のアプリケーションに専用の色彩が薄いことが望ましい。

- 2) 多数の研究者が利用できるマシンであること。したがって高価格ではなく、海外でもできる限り調達可能であること。

本研究開発には、国内のみならず海外の研究者が何カ所かに集中して研究に従事するとともに、多数の各研究拠点が分散形式で参画することが想定される。したがって、利用するマシンは各研究機関にそれぞれ設置できるように適正な価格であり、海外でもできる限り調達可能であることが望ましい。また、利用時における保守は必須であり、この点からは市販されているシステムを利用する方が簡便である。

- 3) 現在利用されているシステム環境との整合性がとれていること。

現在利用されているシステム環境は、ワークステーションを中心とした分散システム環境が中心となっている。今後構築するシステムはこのようなシステム環境と調和して稼動するシステムである必要がある。したがって、UNIX 環境、分散コンピューティングシステム環境、標準的なユーザインタフェースなどが備わっていることが望ましい。また、これらを備えたシステムであれば、各研究機関がそれぞれの研究テーマに適合した特長あるマシンを導入し、相互を高速ネットワークで接続して利用しあう形態が可能となる。

これらの条件を勘案し、超並列システム研究用テストベッドとして考えられるマシンを以下に検討する。

(1) スーパーコンピュータ利用

スーパーコンピュータの利用により、各種のアーキテクチャ上で大規模な並列処理のシミュレーションの構築が可能である。また、最終システムのアプリケーションの候補の一つとしてあげられている数値シミュレーションのテスト用には必須であろう。さらに、スーパーコンピュータの利用環境はワークステーションを中心とする分散システム環境になりつつあり、利用環境の点からもとくに問題はない。しかし、高性能のスーパーコンピュータは高価であり、多数の研究者が同時に利用できる環境を構築しにくいという問題がある。ネットワークシステムの中に1～数システムを設置し、必要に応じてネットワーク経由で利用するのがよいと思われる。

(2) ワークステーションおよびその分散処理利用

ここ数年のワークステーションの進展を考えると今後も高性能化はますます進展し、ここ2～3年で100MIPS以上の処理性能を有するワークステーションが登場すると予想される。しかしながら大規模な並列処理をワークステーション上で実現するにはこの程度ではパワー不足である。また、複数のワークステーションによる分散処理により総合的な性能向上が実現できたとしても、それは並列処理でなく分散処理であるので、本来の並列処理のテスト用に利用することは困難である。したがって、ワークステーションのみでテストベッドを構築することは現実的ではない。ただこれまでのように研究者の一人一人が、小規模処理や大規模システムとのインタフェースのマシンとして利用することはいうまでもない。

(3) 並列コンピュータ

並列コンピュータは国内外で現在盛んに研究開発が進められており、また、商用化されている並列マシンも相当数存在する。商用化されたマシンでは、米国のベンチャ企業の製品が多い。各種の超並列処理を研究対象として並列コンピュータを利用するためには、並列コンピュータは少なくとも128プロセッサ以上を有するマシンであること、かつ、特定のアプリケーション専用でないことが必要である。このような視点から商用並列マシンとこれまでの試作のマシンも含めて選択の対象となり得るマシンをリストアップすると、現状では十数システムが存在する。この中には、要素プロセッサ数が数百～数万（ただし、理論的な上限と実際に利用可能な上限を区別して考える必要がある）、並列方式としてMIMD、SIMD、データフローなど、さらに相互結合網方式としてハイパキューブ、クロスバー、格子、トーラスなど、さまざまなマシンがある。

上記に述べたマシンが備えるべき条件からみると、1)の条件からは、並列方式はMIMDかデータフローが望ましいであろう。SIMDはアプリケーションを限定する恐れがある。結合網についてもアプリケーションとの関連が強いので、最終システムでの結合網トポロジを見通してテストベッドのマシンを選択する必要がある。2)の条件は現状ではなかなか困難である。プロセッサ数を最大構成にしようとするとう価格は数億円以上となり、とても安価とはいえない。ただし、プロセッサ数によって価格は大幅に変化するので、利用形態に応じてシステム構成と価格を適合させることが可能である。3)の条件については、現状のシステムでもワークステーション環境との融合については十分配慮されており、とくに問題はない。ただし、並列処理を引き出すようなソフトウェアは用意されていないのが普通であり、これらは自ら開発する必要がある。

以上、テストベッドとして利用可能なマシンについて検討したが、まとめると、各研究者には高性能ワークステーション、各分散研究機関に中～大規模の並列コンピュータを配置し、また、集中研究機関には大規模の並列コンピュータを複数台設置して、それらを高速ネットワーク

で接続したシステムがよいと思われる。各マシンはどこにあるのかをできる限り意識しないで利用できるシステムを構築することが望ましい。どのタイプの並列コンピュータを選択するかについては、先に述べたように最終システムのアーキテクチャに影響すると考えられるので、今後さらに慎重な検討が必要である。商用システムの中から採用するか、これまでの試作開発システムを商用化してそれを採用するか、初期の段階で早期に決定する必要がある。いずれにせよ、幅広く超並列処理の可能性と実現方式が探索できるようなシステムを選択する配慮が望まれる。

第 3 部

「光コンピュータ・デバイスWG」

「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) 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	133
1.1	序文	133
1.2	概要	134
1.3	調査の経過	136
2	光コンピュータのニーズ	139
2.1	まえがき	139
2.2	21世紀社会における光コンピュータへの期待	139
2.2.1	21世紀社会の展望	139
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	140
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—	146
2.2.4	光コンピュータへの期待	150
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	153
2.3.1	3次元情報処理における光技術の役割	153
	—前年度調査研究から—	
2.3.2	新情報処理と光技術の役割	157
2.4	光コンピュータの応用	159
2.4.1	光並列コンピュータ	159
2.4.2	光ニューロコンピュータ	160
2.4.3	光インタコネクション	160
2.5	あとがき	161
3	並列デジタル光コンピュータ	163
3.1	はじめに —なぜ並列デジタル光コンピュータか—	163
3.1.1	並列光コンピュータとは	163
3.1.2	並列デジタル光コンピュータの必要性	163
3.2	並列デジタル光コンピュータの現状	165
3.2.1	基本的な並列光演算原理	165
3.2.2	並列光アレイロジックシステム (OPALS)	168
3.3	並列デジタル光コンピュータの実現を目指して	176
3.3.1	並列デジタル光コンピュータのアーキテクチャ	176

3.3.2	並列光コンピュータ用の演算原理	178
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	179
3.4	むすび	200
4	光ニューロコンピュータ	203
4.1	ニューロコンピュータと光技術	203
4.1.1	ニューラルネットワークの原理	203
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	205
4.1.3	専用ハードウェアの必要性和展望	207
4.1.4	光技術の優位性	209
4.2	光ニューロコンピュータの現状	210
4.2.1	光ニューロモデルの現状と課題	210
4.2.2	光ニューロデバイスの現状と課題	214
4.2.3	光ニューロシステムの現状と課題	218
4.3	光ニューロデバイス・システムの今後と要素技術	222
4.3.1	光ニューロコンピュータの将来像	222
4.3.2	光技術に適したニューロモデル	224
4.3.3	光ニューロデバイスと要素技術	225
4.3.4	光ニューロシステム技術	235
4.4	実証システムのイメージ	237
4.4.1	光ニューロデバイス	237
4.4.2	光ニューロシステム	238
5	光インタコネクション	241
5.1	まえがき	241
5.1.1	光インタコネクションの必要性和特徴	241
5.1.2	光インタコネクションの要件と分類	242
5.2	多重化光インタコネクション	244
5.2.1	多重化方式	244
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	246
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	248
5.3	柔軟接続光インタコネクション	250
5.3.1	光インタコネクションにおける柔軟性	250
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	251
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	254
5.4	光インタコネクションの将来	263
5.4.1	将来研究の方向	263
5.4.2	将来技術	264
6	あとがき	267

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”をパラダイムとして、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ダイムの実現に必要なツールを提供することにある。

光技術は、エレクトロニクスがベースの情報処理技術が将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が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が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バ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ダイムとしての“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ジ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・デバ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ズ

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べる。

第3章 並列デジ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、デバイス等の開発シナリオを論ずる。

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 あとがき

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 (5×10^{-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来た。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「柔軟いコンピュータ」が実現されることが期待されている。

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、という質問になるが、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+光ガイド、無誘導性、光配線、などがあげられる。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が、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ジタル回路において有望とする考えが強まってきている。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ビームであるから電子ビームと比べると物質との相互作用は穏やかであり、したがって静電誘導による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が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が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がある。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が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がある。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)の重要性が認識されているが、これは1本のファイバ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が可能と予想できる。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が必要と考える。

(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が強いが、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が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が同時に重荷となる可能性があるからである。

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ばれているが、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が大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)をとることが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が予想される。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、デジ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(金)] 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ズ

2.1 まえがき

光コンピュータに何が求められているか？ 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でき上がっているわけではない。したがって、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が、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っ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、および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が言える。

(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、バイオなどの先端技術が期待ど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じて、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、社会のすみず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世紀を特徴づける高度情報化社会の到来は、全国すみず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が、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が、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

生活のベ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できない、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が現在行われている。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 さらなる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、コンピュータがかなり身近なものとなったが、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、ちょうど水道をひねると水がで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が、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ド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ができよう。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、光のままで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ベースの実現　－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、画像の検索などが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が、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が元の情報のマクロ的な意味をなすことが望まれる。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が、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が、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たり前ものとなり、自動車やビデオのように非専門家が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はなく、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、電子親方とでも言うべき物であるが、エキスパートシステムの高度に発展したものと考えることができる。

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ジ、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、現在の電氣的なシ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、スピードの面で限界を生じ、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。もっとスピードをあげ、大量のデータを扱う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。すべてのものがどこにでも存在し、どこからでも何にでもアクセスできるようになる。いわば仮想的なものが現実にとって変わるようなシ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、次のようなものが考えられる。

(1) シミュレーション機能

一人が一台コンピュータを持ち、それが記号・文書・図形情報を取り扱うことができ、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が可能となる。

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シ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。従来シミュレーションは主としてサイエンスやエンジニアリングで用いられてきたが、オフィスをはじ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、影響を与えるだろう。しかしシ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がまず必要である。そして、モデルが精密であればあるほど非常に大きな計算能力が必要となる。現在のスーパーコンピュータは 350MIPS 位の速度であるが、シ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、どれだけの利益が見込めるか、顧客の流れはどう変わるか、商品の構成はどうしたら良いか等、いろいろなことが仮想的に、精密にそして事前に実験できるようになる。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シミュレータにより系統の運用が的確になる。

(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が、この「仮想」的なものがより多くなり、普通になっていくだろう。通貨が金から紙幣、紙幣からクレジ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が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が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しながら末端の無人遠隔設備を仮想的に呼び出し、監視、操作ができるようになる（保守を行うにはロボットが必要）。この時、単なる計器情報だけでなく、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が望まれる。これはMITで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、しかし現時点での実際の設備を100%反映した、無人遠隔設備で的確な対応がとれるようになるだろう。設備、工場の無人化には、ロボット化といわゆるテレエクジスタンスとでもいうべき技術が必要である。在宅勤務、サテライト・オフィスといったものもこれが実現されるとごく普通のものとなるはずである。ベースには光の高速性、大容量性に基づいたコンピュータが不可欠であろう。

(3) 3次元情報技術

ここでは、上に述べたような言わば3次元情報処理技術で必要となる要素技術について簡単に述べる。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がおこなわれているので、その概要を、節を改め、2.3節で紹介する。

(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）へと発展してきたが、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での通信が必要である。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ずの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べている。これは現在のコンピュータの構造にもとづ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コマごとに対処処理できることが必要である。入力の時点から基本的な素子レベルで並列性を確保できる可能性がある。

ステレオカメラ等を用いて2次元情報からの3次元情報の抽出が行われているが、ホログラフィの応用により、より直接的に3次元情報の入力が可能となって欲しい。これらの入力装置にもとづいて、認識能力も高めて欲しい。見たいものだけをはっきり見ることができる、知的なフォーカシング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、光学系の処理装置が本質的には向いているのではないか。

(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。最もミクロな情報が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

ビル、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が、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、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が、高速演算・大容量データ処理が可能なハードウェアがまず必要となろう。

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、したがっ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、要員の削減をはじめ、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バ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が予想される。

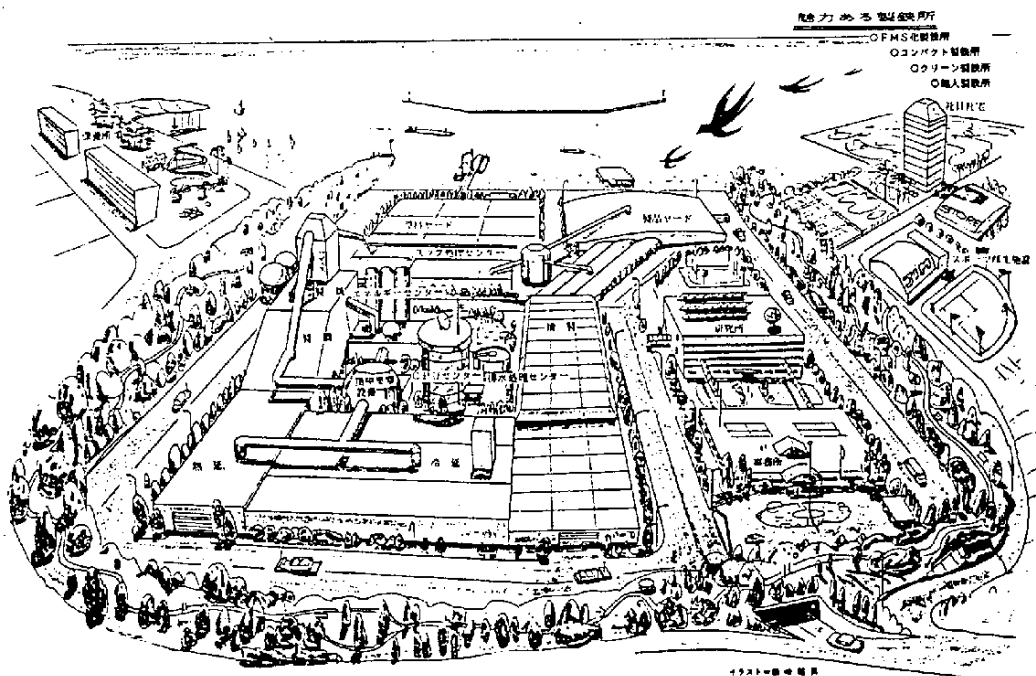


図2.1：製鉄所の未来像〔鉄鋼業AI時代巻頭折込より〕

（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じ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、バ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が一変するとは考えられないが、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・鋳造、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ドな製鉄所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、この中で中核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ビスという視点から社会システム、都市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。

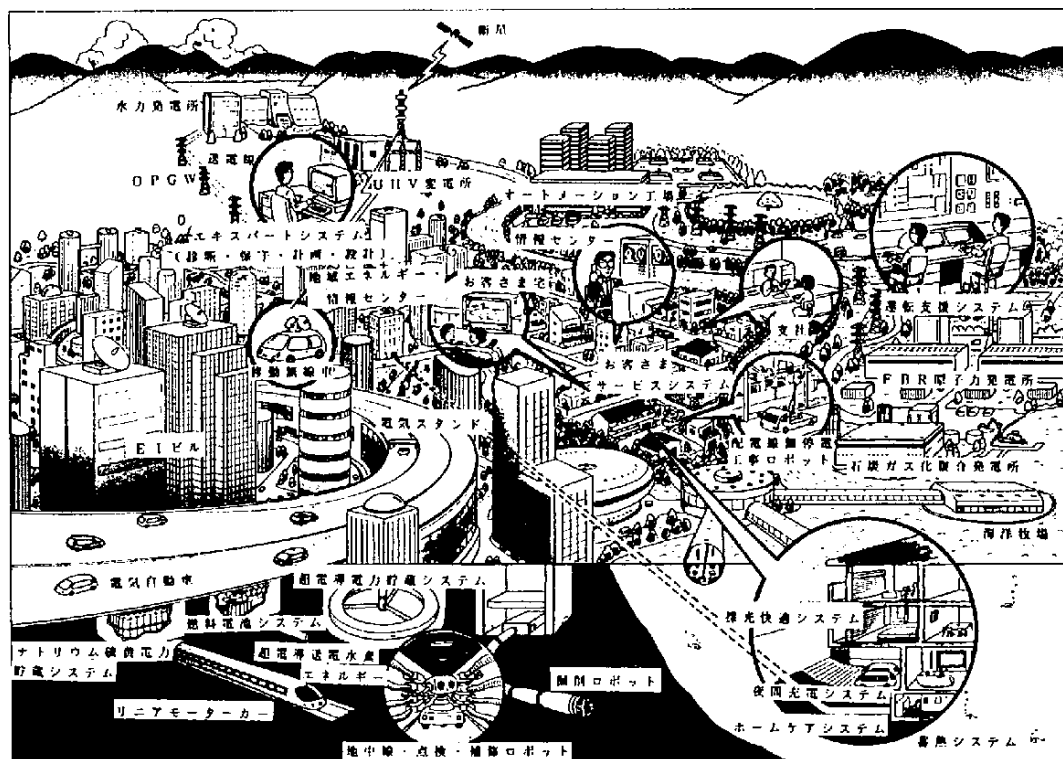


図2.2：電力供給の将来像

(1) 都市システムのバックボーンとして

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「電気スタンド」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じて地域ネットワークと結ばれることになるが、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、運転支援などがあげられる。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が、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げられる。

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つ

たロードマネジメントシステムや、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・文書のインテリジェントデータベース、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だすであろう。

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どまらず、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、機能と対比しながら、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 ①-2：光-光増幅器、分岐器、分波器等の高速光通信部品 ①-3：ネットワーク管理技術 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、非同期式光信号交換等の大容量・高速の光伝送／交換技術 ②-2：大容量情報の圧縮技術 ②-3：画像情報処理技術 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 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） 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 ③-2：光メモリ等の高密度／大容量の記憶装置 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 ③-4：ダイジェストを自動生成する情報セクレタリ技術 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 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シミュレーション、さらには大気／水質等の大規模環境シミュレーション	④-1：上記③-1～6のデータベース技術 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 ④-3：数理的または試行錯誤による最適解の探索技術 ④-4：光CPU等のシミュレーション用超高速CPU ④-5：波長多重、面発光レーザなど用いた大容量メモリ／大容量マストレージ 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 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 ⑤-2 : 精細画像の高速撮像 ⑤-3 : 物体の認識技術 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 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 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 (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 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 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 ⑥-4 : 超小型高速CPU ⑥-5 : 数理的または試行錯誤による最適ルートの探索 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 (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 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 : システム要件記述用高級言語 ⑧-2 : リポジトリ (ソフトウェアツール) 体系の規格化・モデル化 ⑧-3 : 上記③-1～6のデータベース技術 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・テクノロジー研究会.
- [3] 石原 聰: 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世紀ビジョン検討委員会: 電気事業の21世紀ビジ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、このような機能の特徴づける1つのキーワードとして3次元情報処理があがり、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できるが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。

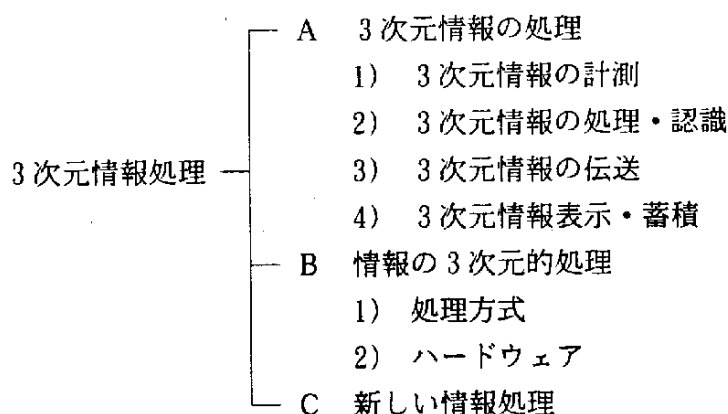


図2.3：3次元情報処理技術の体系

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：両眼視、三眼視、一眼＋拘束条件 運動立体視：オプティカルフロー、移動ステレオ法、球面写像法 光投影法：スポット光、スリット光、マルチスリット光、符号化並列光、グリッド光、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シング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が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が、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ができ、これと高い親和性を持つハード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が最近注目され、研究されている。これはニューロコンピューティングが要請する大規模並列性を光演算が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／レイトレーシングなどの立体像の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ゴリズムが含まれる。さらに、情報の3次元処理という概念もこの中に含めることができる。

立体図形や3次元空間の認識等の研究はロボ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が課題である。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ゴリズムにおけるブレークスルーが強く求められる。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が有効と考えられる。

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、セグメンテーション／スライシングなどの面的連続処理、光連想メモリなどが関連項目として考えられた。また、3次元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で、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次元デバイス（3次元IC、3次元OEIC）／面的光デバイス／空間光変調素子／マイクロオプティックス／3次元ホログラム／3次元実装などの3次元情報処理デバイス技術、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が関連すると考えられた。

この新しい概念は、まだ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2.4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げられる。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ができる反面、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、この問題を解決しうる希望がでてきた。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が大きい。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、今後が注目される。

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う知的処理、モデルベース符号化などがある。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が期待できる。

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次元情報記録がその対象になる。

表2.3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、光技術が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があり何度もブームがあった。最近再び光技術および電子技術、デバイス技術の進歩に支えられて産業用（CG、測量、医学、航空管制等）、娯楽用（万博パビリオン、ビデオゲーム等）などへの応用開発が活発になっている。また、最近ではダ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で処理された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 眼 式 3 次 元 映 像	非コヒーレント光	・裸眼 ・鏡（1枚ないしは2枚使用） ・プリズム ・レンズ ・パララックスステレオグラム ・2眼式レンティキュラ ・2色眼鏡式 ・偏光板眼鏡式
多 眼 連 続 式 3 次 元 映 像	非コヒーレント光	・レンティキュラ ・投写式 ・IP（Integral Photography） ・固体中の発光現象方式 ・煙などへの投影方式
	コヒーレント光	・ホログラフィ
	混合光	・ホログラフィックステレオ ・白色光再生ホログラフィ
切断面再生		・バリフォーカルミラー方式
その他		・ワイドスクリーン方式

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	・距離、方位、空間位置の光学的測定 ・形状、パターン、立体映像の入力、測定 ・変位、振動の光学的計測 ・光CT ・ホログラフィ	・速度、精度、感度、ダイナミックレンジの向上 ・センサと処理の結合（センサの知能化） ・光コンピューティング技術 ・アクティブセンシング技術 ・並列光センシング素子
3次元情報の処理・認識	・光による処理方式のハードインプリメンテーション ・光インタコネクション ・パターン処理	・光演算、処理アルゴリズム ・3次元情報処理光デバイス ・3次元モデリング、データ構造の最適化 ・センサ融合
3次元情報の伝送	・光通信 ・イメージ伝送 ・光インタコネクション ・光信号処理	・超大容量光伝送技術 ・群ファイバによる超並列伝送 ・光演算、処理デバイス ・面型光デバイス
3次元情報の表示・蓄積	・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） ・ホログラム ・3次元光メモリ	・眼鏡等の不要な3次元ディスプレイ技術 ・実時間ホログラフィ ・パルク型光メモリ

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、計算处理的側面を表わし、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が、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が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、新情報処理がシステム・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

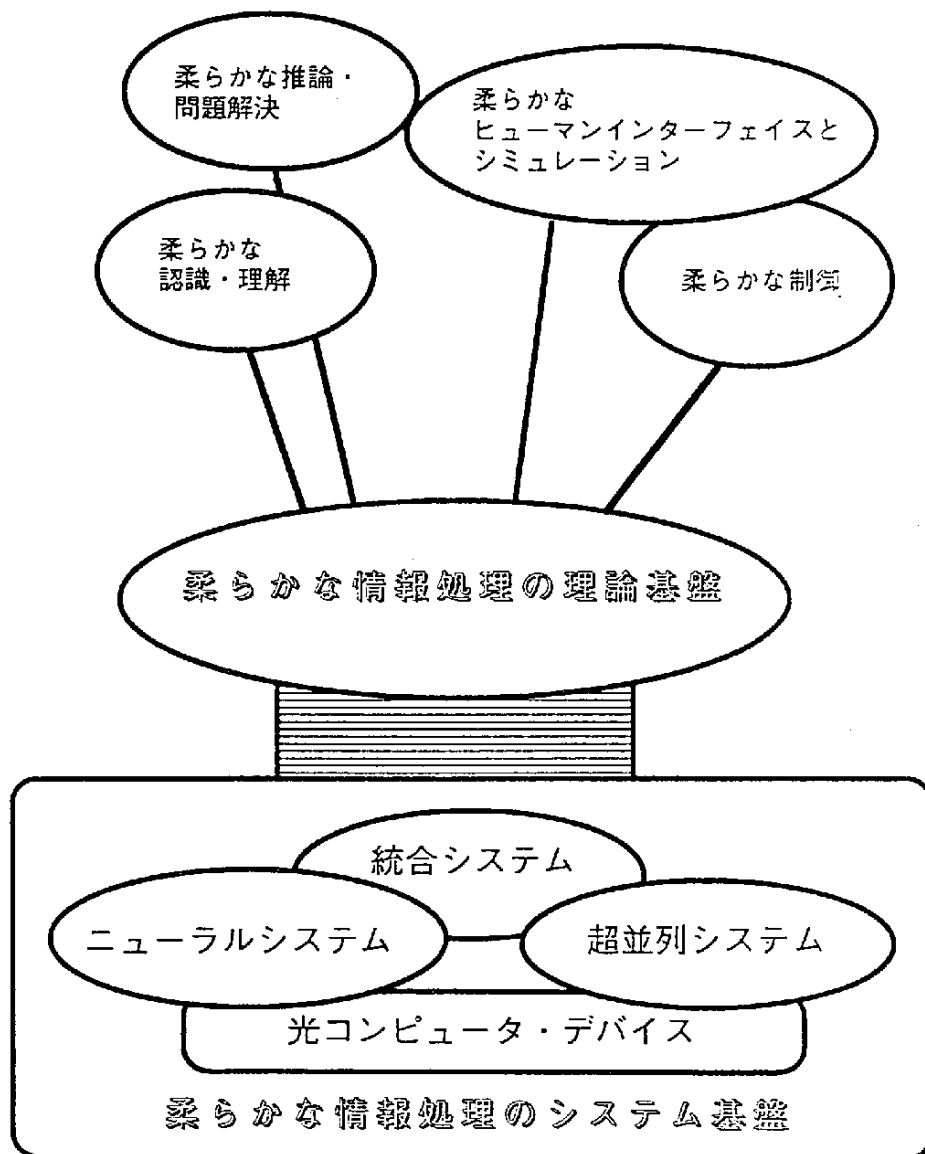


図2.4：新情報処理技術の体系

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づけられる。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・ノイマンボトルネックと情報媒体容量・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、新情報処理が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。

デジタル演算は、演算精度を満足しながら汎用的な論理処理を実行するものである。ここでは、デジタ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。光による情報のデジタル表現には、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。デジタ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、 1000×1000 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ドをはるかに越える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、ビ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出力素子がシ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ドは鈍りつつあり、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度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が考えられ

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が、21世紀の高度情報ネットワーク社会における代表的な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、それが何に、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

3.1 はじめに —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対比される。

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、驚威的な進歩をとげてきた。そして、それを支えてきたのが、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えない。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が予想されている。このような情報伝送ネックを光で解決しようとするのが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が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が、光ニューロコンピュータであり、並列デジ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分類

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

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づ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こえてくる。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が予想され、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) データが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。

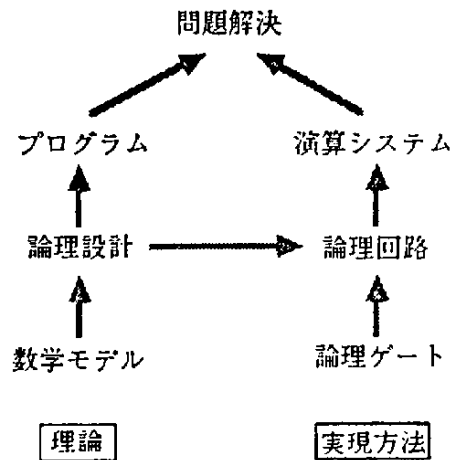


図 3.1 : デジタル処理系の階層構造

(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バルブ[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、などがあげられる。

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バリエント接続と異なった接続パターンを持つスペースバリエント接続に分類できる。スペースインバリエ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、スペースバリエ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じである。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、処理を簡単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。“計算おりがみ”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ベル研)[18]、POEM(Programmable Opto-Electronic Multi-processor:カリフォルニア大学)[19]、OCLIPS(Optical-Cellular Logic Image Processor:エリオットワット大)[20]、DOCLIP(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ジ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、接続光学系としてトワイマン-グ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 foot^2 であったが、現在小型化を進めており 1 inch^2 のモジュールを作製中である。S-SEEDアレイは、現在、 64×32 素子のものができている。

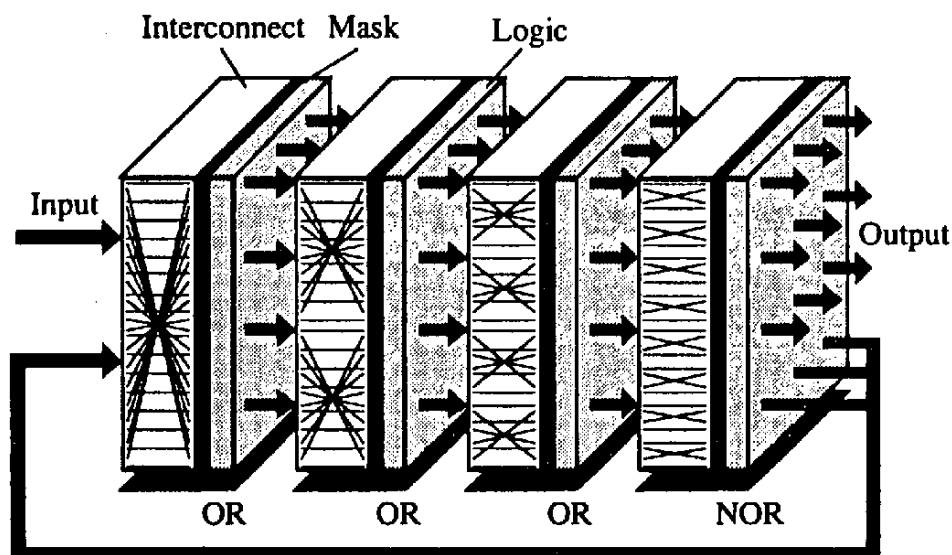


図3.2：規則的接続を利用するシステム[18]

単純並列光接続にもとづく演算システムとしては、VLSIベ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ができる。

DOCIPはBIAをもとに、スペースバリエ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。

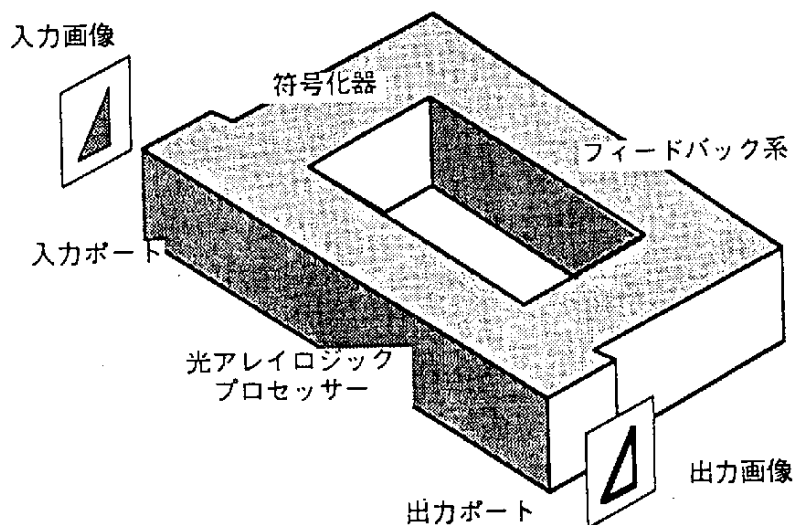


図3.3 : OPALSの概念図

3.2.2.2 光アレイロジック

光アレイロジックは、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に光アレイロジ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。

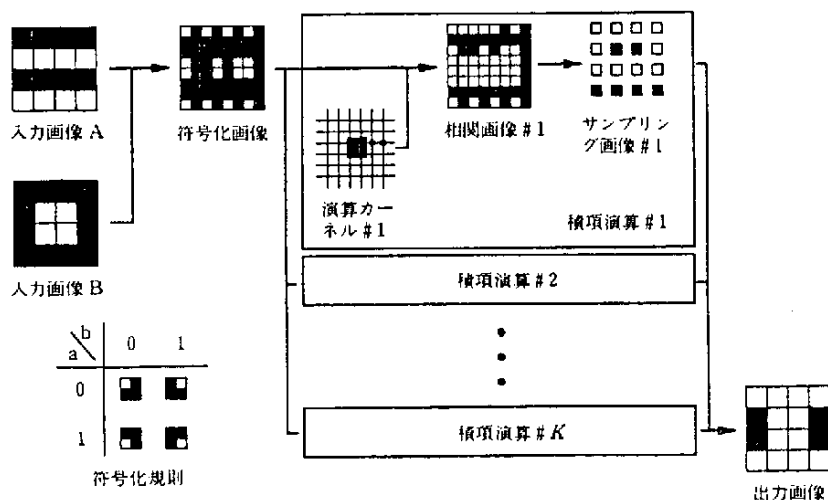


図3.4 : 光アレイロジックの処理手順。2枚の入力画像に対する符号化、相関演算、サンプリング、論理和演算により、任意の近傍画素間論理演算を実現する。

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ビフィードバック系を利用した並列度 20×20 の光・電子複合型OPALSの実験システムが試作されている[21]。

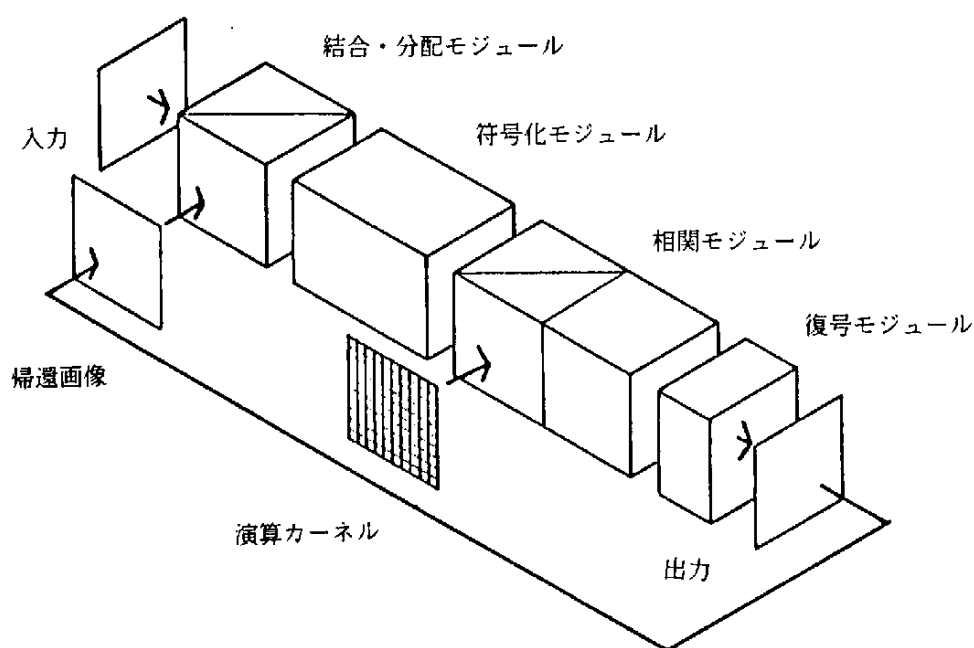


図3.5：機能モジュール型OPALS

3.2.2.4 光アレイロジックプログラム

光アレイロジックの処理内容は、演算カーネル列により記述することができる。可読性・実用性の理由により、プログラムには各画素ご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で、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。

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



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、並列シストリック行列ベクトル演算、並列チューリングマシンのエミュレーション、並列データフロー演算、並列ホップフィールドモデル型ニューラルネットワークのシミュレーションなどが試みられている。

Program Addition;

```

var      i, 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文は光アレイロジ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。△は標準テレビレートの2次元CCDカメラ、液晶テレビジ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1,000²、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。

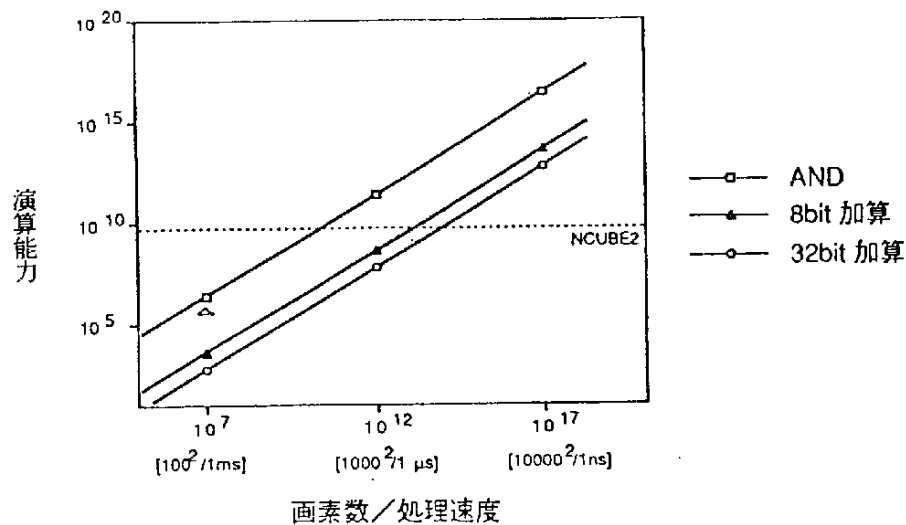


図3.8 : OPALSの演算能力

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、OPALS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OPALS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 (μs)	サイズ cm^2	
LEDアレイ LDアレイ	アレイ光源	$50 \times 50 >$	$10 <$	1	なし 並列アクセス不可
並列受光素子アレイ	受光, 増幅	$500 \times 500 >$	$10 <$	1	16×16 並列アクセス可
並列ラッチアレイ 並列光メモリ	情報の一旦記憶 情報記憶	$50 \times 50 >$	$10 <$	1	なし
並列2ビットデコード アレイ	受光, 増幅, 論理 演算, 発光	$50 \times 50 >$	$10 <$	1	なし
空間光変調素子	変調, 記憶, 論理 演算, ラッチ, データ入出力	250lp/mm	$100 <$	3	250lp/mm , $200 \mu\text{s}$ a-Si:H/FLC-SLM
並列シャッター	並列光接続制御	$50 \times 50 >$	$10 <$	3	16×16 まで
マイクロレンズアレイ	多重相関, 並列光接続	$50 \times 50 >$		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 形状大
複屈折結晶板	並列論理演算	250lp/mm			あり
結合・分配モジュール					あり
並列複合光機能素子 アレイ	受光, 増幅, しき い値処理, 論理, メモリ, 発光	$50 \times 50 >$	$1 \mu\text{s}$	1	基礎研究段階 VSTEP, S-SEED 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。システム側が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、 α -Si光導電体を利用した強誘電性液晶空間光変調素子が、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。並列光シャッタは並列クロスバスイッチ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バイスは、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で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。

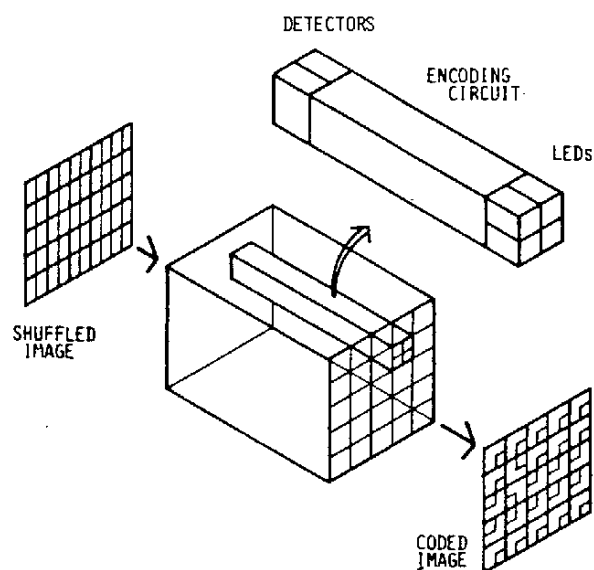


図3.9：並列2ビットデコーダアレイの概念図

[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 Burmawi, 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., Snowden, 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、並列レジスタ、並列メモリ、並列クロスバ接続装置、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。

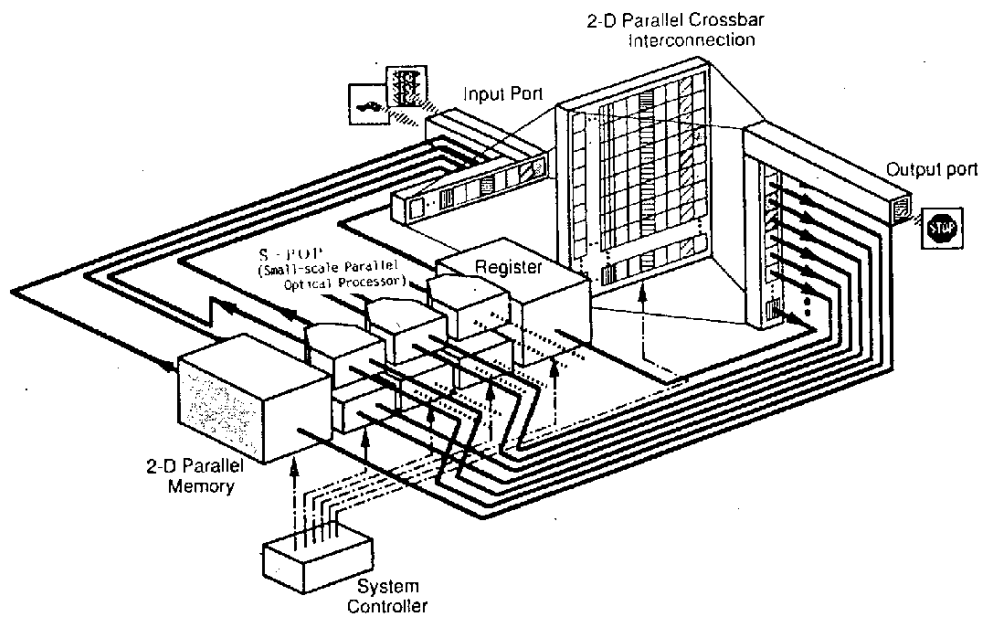


図 3.10: 小規模並列光プロセッサ集積にもとづく並列光コンピュータの構成例

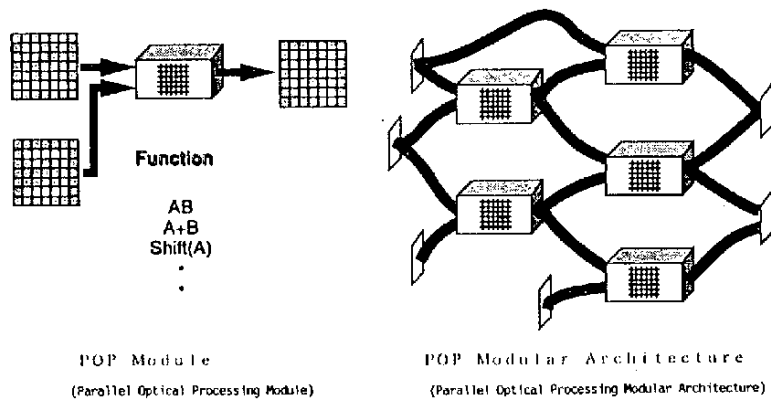


図 3.11: 並列演算モジュールアーキテクチャの概念図

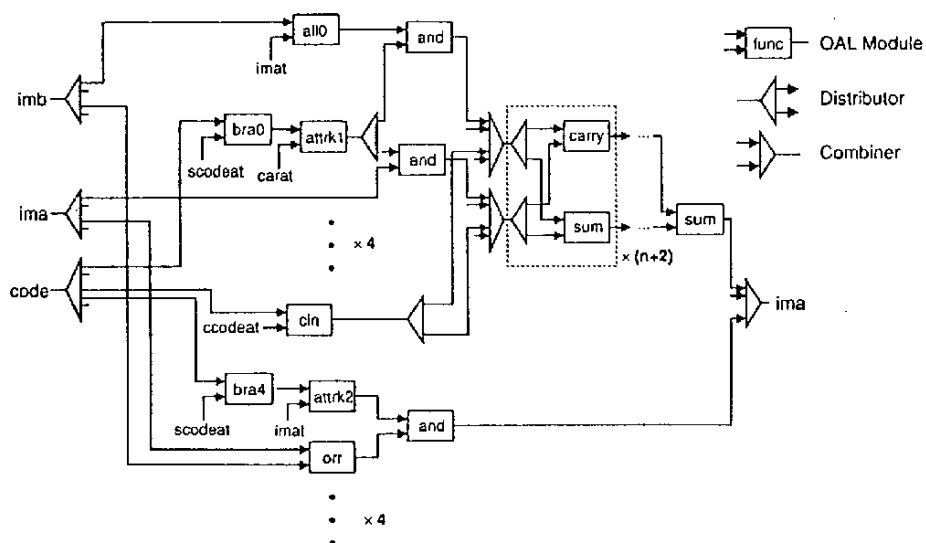


図 3.12: 並列演算モジュールによる算術演算回路の設計例

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、柔軟い処理をはじ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じめ、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が期待される。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が重要である。また、光メモリの大規模並列アクセスの可能性と柔軟い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、側視レーダ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がらなかった理由は、(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い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) 超並列モルフォロジ

などの研究もさらに進める必要がある。

従来のアルゴ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、柔軟い光接続と呼んでも良いであろう。柔軟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が、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ばかりでなく、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も、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） 電気－光変換効率の増大
	受光	LED PD	電気－光変換効率、速度 発光素子に対応したPDの開発、高効率化
	光変調 機能デバイス	MQW 面型光変調素子	変調効率、高コントラスト比
	発光、 スイッチ、 メモリなど	面型光電融合／ 集積素子	低消費化、低スイッチングエネルギー
波長	波長可変	双安定半導体レーザ SEED	低消費化、小型・集積化、安定性 高コントラスト比、低スイッチングエネルギー
	波長変換	偏光、偏向素子 光ビーム収差・発散	ビーム偏光角の増大、屈折率制御技術 波面制御技術（位相共役効果など）
時間	超高速 発・受光 超高速変調	超短光パルス 発生素子など 進行波型光変調素子 非線形光学素子	小型・集積化 低電力化、小型・集積化 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、光ビ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が、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比べた場合、素子サイズが数 μm ϕ 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ー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台で発振するものがここ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、 $7\mu\text{m}$ ϕ の素子において室温連続動作で閾値電流 2.5mA 、微分量子効率 10% 以上、また光出力は 6mA 通電時で約 0.3mW という値が実現されている。また、高速特性に関しては緩和振動周波数 $\sim 6\text{GHz}$ 、 3dB ダウン周波数 $\sim 8\text{GHz}$ という値が実現され、また利得スイッチング法で 30ps 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 0.7mA というデータも報告されている[UCSB, 3]。また、 32×32 の面発光レーザー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ーの基本的な課題は、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がどの位まで低減できるかという問題がある。理論的には $1\mu\text{m}$ ϕ の径の素子で、数 μA ぐらいに閾値電流はできるはずであるが、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が必要である。2)に関しては内部抵抗の低減が必要である。

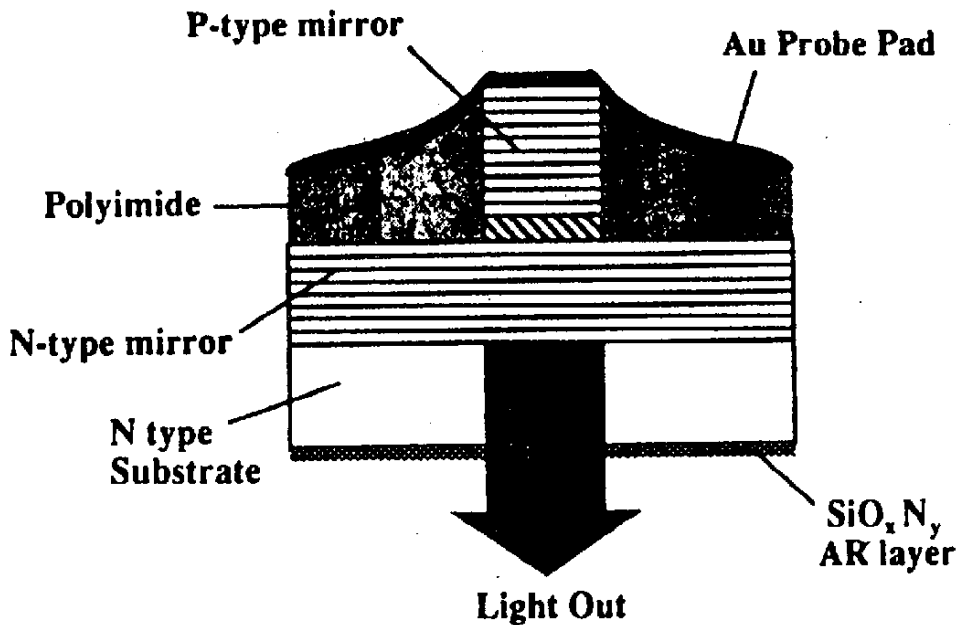


図3.13：垂直共振器型面発光レーザーの構造

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が代表的である。印加電圧の大小によってMQW中の励起子準位によって生じた急峻なバンド端がシフトし、それによって光の透過特性や反射特性が変化する。

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が検討

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

ただし、共振特性を使うことで印加電圧や膜厚に対する設計トレランスは小さくなる。したがって、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が鍵となる。

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系で報告されている。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）が報告されている。この素子ではさらに、ON状態での発光をLEDモードからレーザーモードにした、垂直共振器型pnpn-VSTEPが報告されている[日本電気, 5]。InGaAs歪量子井戸活性層をpnpn構造の中に形成し、上下にレーザー発振用のAlAs/GaAs多層膜反射鏡が設けられた構造となっている。素子サイズが $10\mu\text{m}^2$ のもので発振閾値電流は2.5mA（室温パルス）であり、発振波長は955nmである。

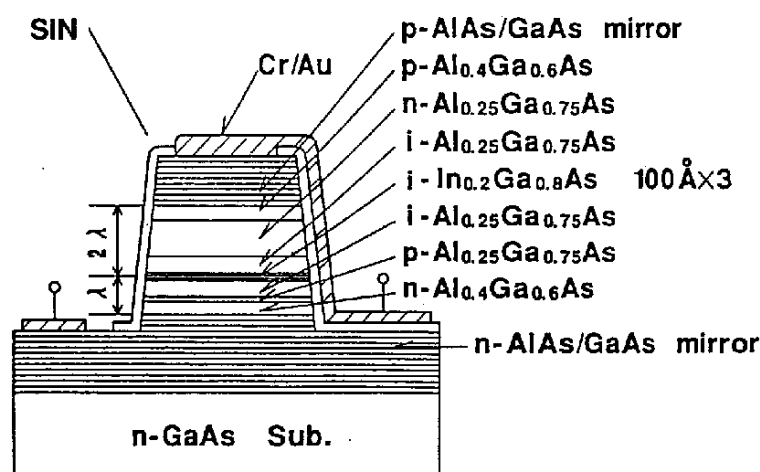


図3.14：レーザ型pnpn-VSTEPの構造

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次元光シフトのほかに2次元光シフト機能を有する3×3集積素子が報告されている。発光はLEDモードである[日本板硝子, 6]。GaInAsP/InP系ではLEDとヘテロ接合フォトトランジスタを積層した構造の素子が研究されている。光メモリ動作が得られるが、同素子に並列にヘテロ接合フォトトランジスタを1個、設けた構造を基本セルとして光セットだけでなく光リセットできるものが作られている。そして、この素子を10×10集積化したデバイスが報告されている[松下, 7]。

双安定半導体レーザ

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ザは現状では光通信や光交換への応用を目的に研究されている。双安定半導体レーザを小型で2次元並列化できるような構造とすることは必ずしも容易ではない。このタイプの素子は通常のエッ

ジェミッティングの半導体レーザのように横方向から光が入って反対の端面から出力光が出ていく構造をしているが、活性領域と可飽和吸収領域を設けるだけでなく、さらにDBR領域と位相シフト領域を設けることによって1Gb/sの波長変換動作などが得られている[富士通, 8]。

SEED (表3.4)

AT&T Bell 研が進めているSEEDは、MQW中の励起子準位のQCSE効果を用い、外部電子回路の帰還効果によって光吸収を変化させ、光双安定特性を得るものである。各種の基本構成が発表されているが、素子間の特性のばらつきに対するトレランスが広がり、抵抗を別個に形成して集積する必要がないなどの利点を有したS-SEEDが中心になっている(図3.15)。

S-SEEDの高速スイッチング動作に関しては、バリア層の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 $4 \pm 1 \text{ pJ}$) という値が実現されている。また集積度に関しては62×32というアレイが報告されている。

16×8個から成る2次元のS-SEEDアレイ3段が光クロスオーバー接続された系が、6日間にわたって無調整で安定に動作したことが報告されている。クロスオーバー光接続はミラーとプリズムグレーティングを使った系で実現される。S-SEEDへの最終的な入力光強度は200nWであり、これによって動作速度(31kps)が決定されている[9]。

また、最近では量子井戸pinフォトダイオード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)。入力が光で電気のNMOSに似た構成と、入出力共に光のCMOSに似た2つの構成を発表されている。S-SEEDの特徴と同じように、バイアス条件が微妙でない、従続接続が容易になる、入出力間のアイソレーションが良くなるなどの利点を有している。

表 3. 4 : 各種SEEDの構造、特徴

分 類	基 本 構 造	特 徴
SEED (Self-Electro-Optic-Effect Device)	MQW-pin + 抵抗	光メモリ、スイッチ
D-SEED (Diode-biased SEED)	MQW-pin	光アドレスが可能
S-SEED (Symmetric SEED)	2 個のMQW-pin を直列に接続	動作条件の緩和のセット、 リセット動作
F-SEED (Field-effect transistor SEED)	MQW-pin+FET	電子素子を取り込み、機能拡張 3 端子光増幅器
L-SEED	何個かのMQW-pin	光論理動作の拡張

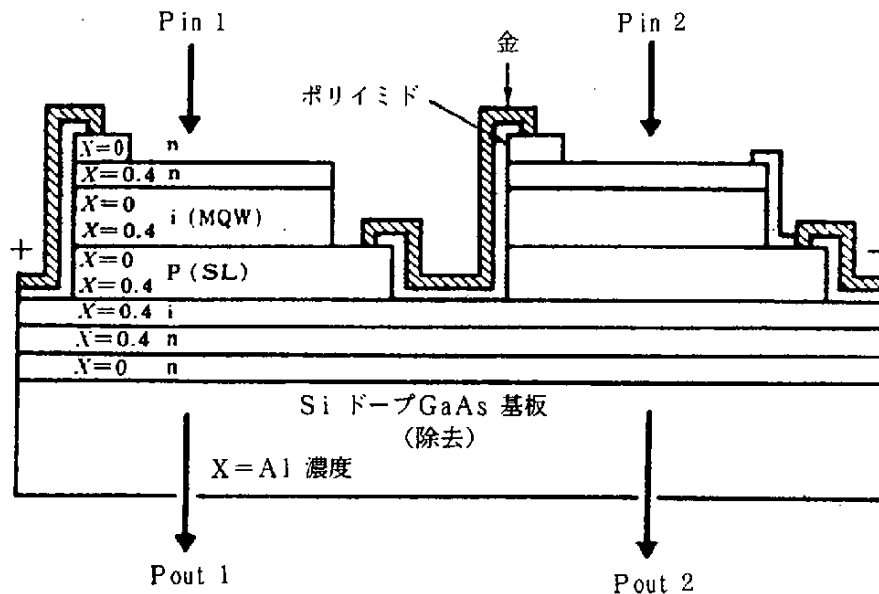


図3.15: S-SEEDの構造

光ビーム制御素子

ビーム偏向ツイinstライプレーザと回折格子型素子が報告されている。ビーム偏向ツイinstライプレーザ[電総研, 10]は光ビームの偏向が連続的に±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]。いずれにしても、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できるかどうか鍵となる。

(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ズ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、さらにはブロード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ブロード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中で、製作に関する主要テーマは以下のようなものが考えられる。

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で、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ができるが、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）の研究が行われているが、成長速度が遅く、数 μm 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Siデバイスなどとの融合を図るべく、化合物半導体(GaAs/InP系) on Si、Sim/Gen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 Si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が、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が、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ぐ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 : 半導体デバイスの開発目標

機 能	発光・受光素子アレイ、光変調素子アレイ 光機能素子アレイ (光伝達、閾値、スイッチ、メモリ、光増幅) SLM、並列処理用OEIC 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	$10^3 \sim 10^6$ bit
開発すべき技術	設計技術 製作技術――高膜厚制御、大面積結晶成長技術 異種材料・結晶成長技術 高精細な立体微細素子加工技術 実装技術 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、光アド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1~2 μm 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200lp/mm(1mm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70~500 μs 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 μs 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100ns以下でよいという報告もある。これは、レーザ走査で1ビットず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100ms以下で書き込めることを意味している。この方法は、部分消去やビ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100Hz~2kHzで記録することができている。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]。

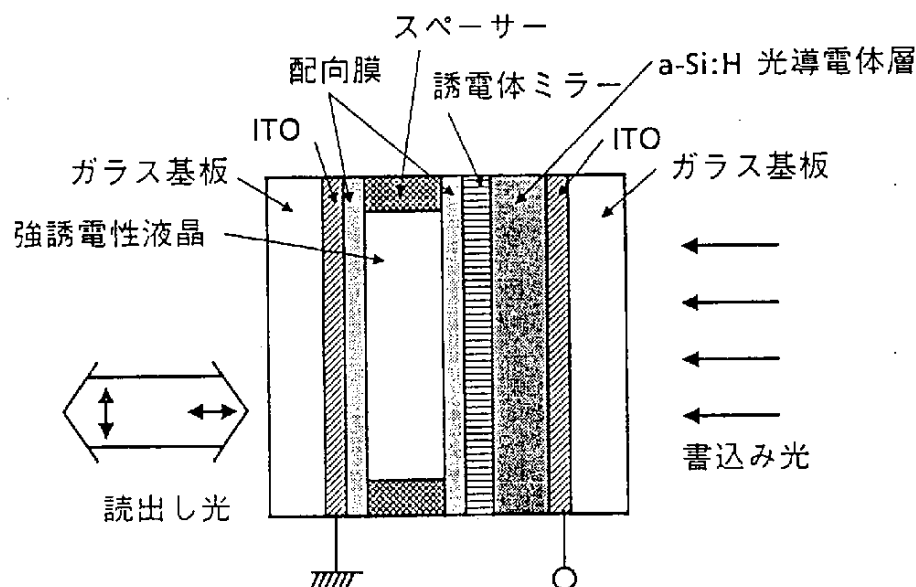


図3.16: FLC-SLMの構造

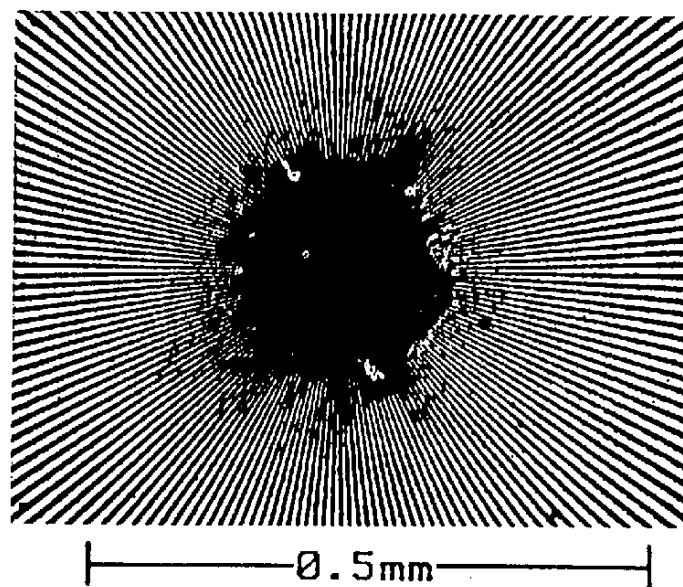


図3.17：FLC-SLMに書き込まれたジメンス・スターのイメージ
中心近傍の解像度は200lp/mm。

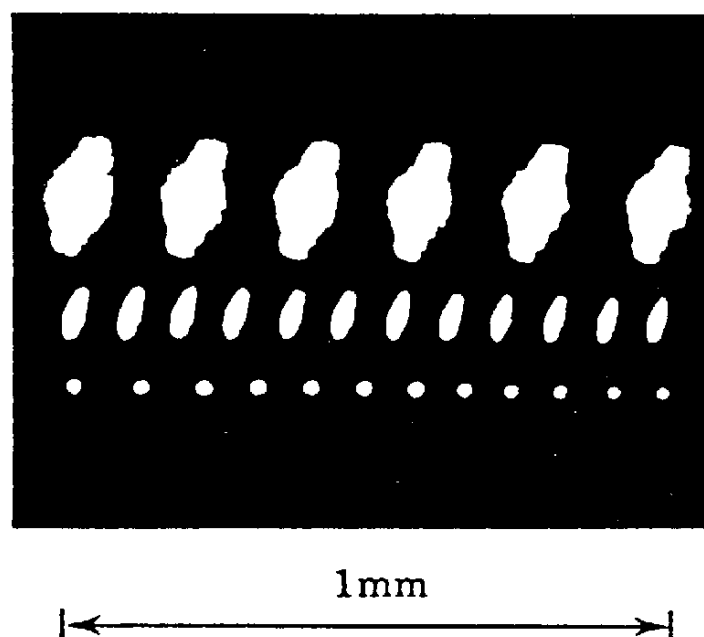
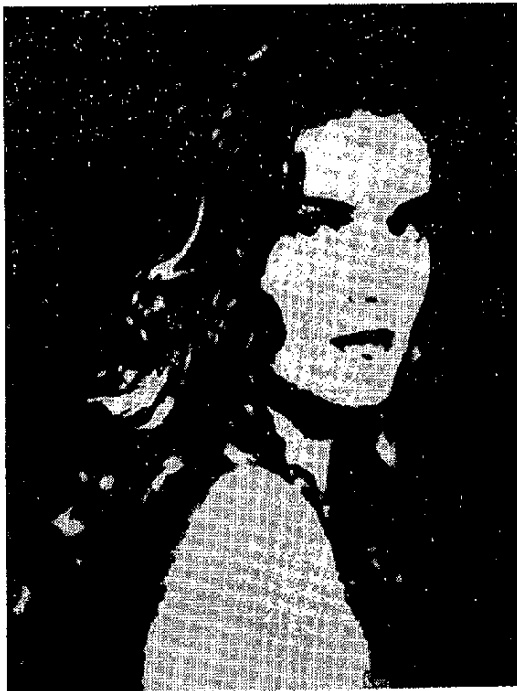


図3.18：FLC-SLMに書き込まれたレーザ走査によるドットイメージ
レーザ照射時間は、上段10 μ sec、中段1 μ sec、下段100nsecである。



(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 (サイズ) (mm)	解像度 50%MTF (lp/mm)	応答速度 (ms)	光感度 (pJ)
強誘電性液晶	a-Si/FLC ⁴⁾	40.00	28.00	0.500	0.20
	a-Si:H/FLC ²⁾	10.0	60.00	0.070	0.11
	a-Si:H/FLC ¹⁾	(25×30)	>100	0.500	0.03
	TFT-LCLV ⁵⁾	(40×40)	330μm□	0.290	200μJ/cm ²
	FLC-SLM ⁶⁾	20	>20	>0.1	6.25
	BSO-SSFLC ⁷⁾	—	—	>0.1	0.008
TN液晶	Hughes LCLV ⁸⁾	25.00	16.00	100.000	50.00
	Hoechst Celanese ⁹⁾	40.00	38.00	25.000	36.00
	a-Si:H/nematic ¹⁰⁾	38.00	>35.00	100.000	2.00
	a-Si/nematic ¹¹⁾	>35.00	5.00	1.400	2.50
その他	PROM ¹²⁾	(15×15)	15	5	5μJ/cm ²
	MSLM ¹³⁾	15	15	30	5 pJ/cm ²
	Thermoplastics ¹²⁾	(30×30)	1000	5×10 ³	10μJ/cm ²

(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 220×300 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、画素数ともにまだ不十分であると言わざるを得ない。

液晶テレビは、現在、ビデオレートである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、並列デジタ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。

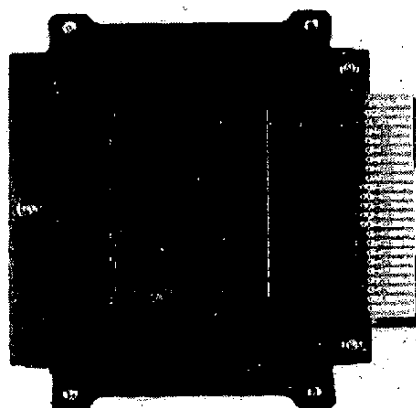


図3.20：液晶プロジェクタ用の高解像度小型液晶テレビ

(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ができることが特徴である。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。

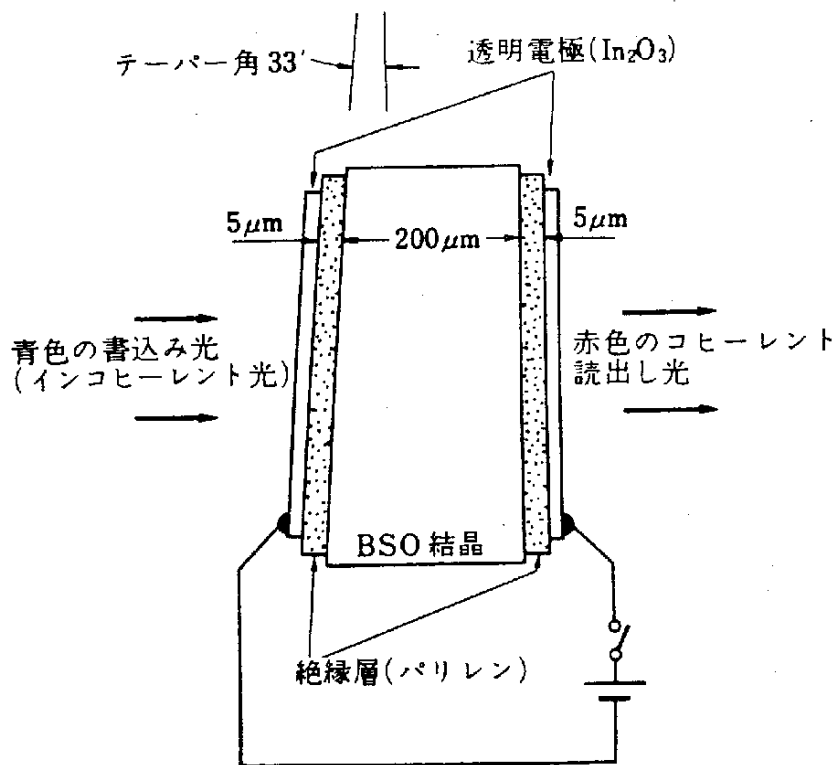


図3.21 : PROMの構造

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、電子ビームアドレス方式のものと光アドレス方式のものがある。図3.22に光アドレス方式の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ができる。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。

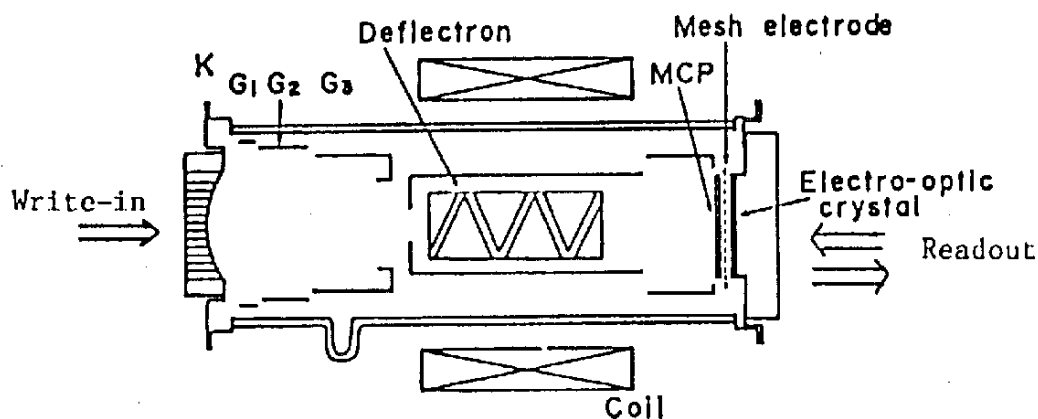


図3.22 : 光アドレス方式MSLMの構造

(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：400×640～10,000×10,000 以上
- ② 解像度：50～1,000Lp/mm
- ③ 動作速度：20msec～1nsec/frames
- ④ コントラスト比：1,000～10,000：1
- ⑤ 階調：16階調
- ⑥ 書き込み感度：0.1 μ W/bits
- ⑦ 寸法：1～2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1～2 μ 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が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 $\pm 0.05 \mu$ 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ができるラングミュアブロッジェット法[19]による配向膜形成技術の基礎研究が重要である。また、-20～60℃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 (PROM) やマイクロチャンネルプレート空間光変調器 (MSLM) は、100～1,000：1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が、解像度が15Lp/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が必要である。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 μ mの厚みであったBSO結晶を10～15 μ mと薄くすることができるようになった。また、絶縁膜の代わりに20 μ 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、PROM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ができるようになった。これらの結果、PROMの解像度は25～36Lp/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ができています[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っ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 μ 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ボルト程度に低下させることができ、1 μ 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ジタ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ジ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シリコンプロセスをベースにした技術展開が必要であり、シ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が望ましい。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ができれば、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ジタル光演算システムを構築することができるであろう。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 μsec の速さで動作させるために、100 psec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ができるシリコンプロセスあるいはマイクロマシンの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がある。

空間光変調素子とシ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ッ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シ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、あるいは単結晶シ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、シ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。

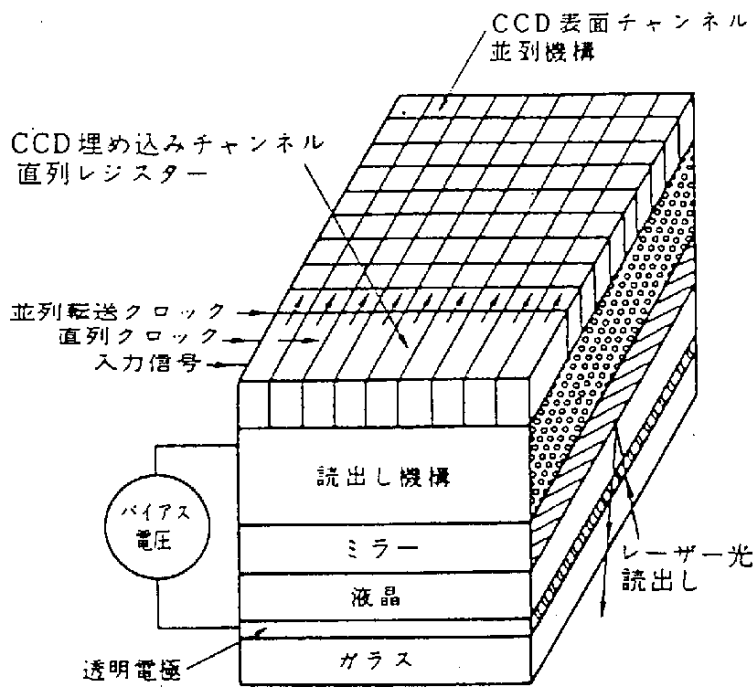


図3.23 : C C D / 液晶空間光変調素子の構造

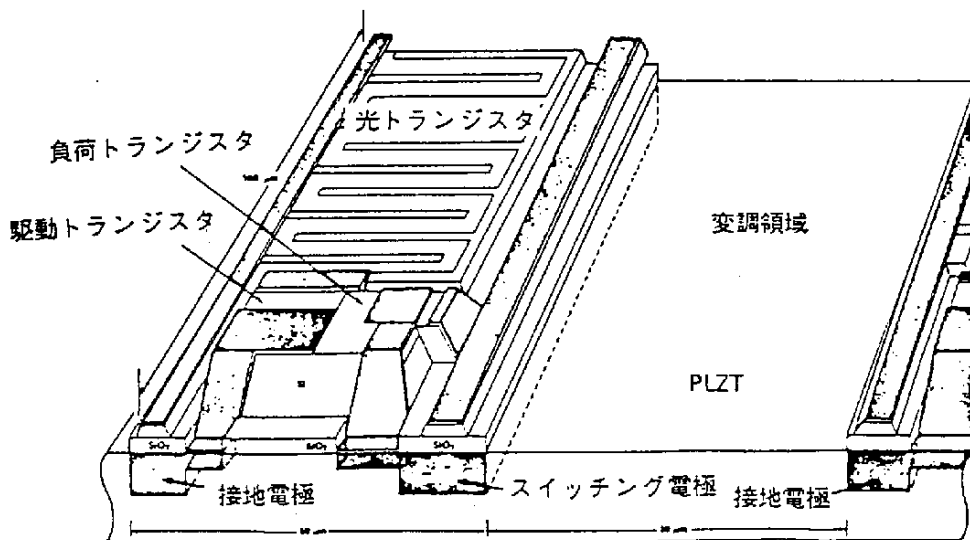


図3.24 : S i / P L Z T 空間光変調素子の構造

[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] 松尾慎治 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] 池野英徳 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がある。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 μm 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、ロッド型セルフフォーカスレンズ、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、分波、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。レーザスキャナや光

ピック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が、従来は回折効率が必ずしも高くなかったので、利用分野が限られていた。しかし、格子形状のブレース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%の回折効率のものが得られるようになった。マイクロレーザアレイ用のコリメータ、光インタコネクション用のビーム分割器、空間周波数フィルタなどでの利用が検討されている。

c. 結像レンズ、フーリエ変換レンズ

光演算における、結像光学系あるいはフーリエ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 の結像点のものがある。また、フーリエ変換レンズに関しても、この目的で多数のレンズが開発されている。しかし、いずれの光学系も実用システム用としては、サイズが大きく、小型化軽量化が今後の課題である。

d. 平面光学素子

従来の光学系は、各光学素子の光軸が直線的に配置された共軸光学系が大部分であった。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があった。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、光軸は基盤ガラスをジグザグに進む。このような光学系では、各平面光学素子が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が容易で、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

光演算システムのゲート間あるいはデバ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、などを含めたシュミレータもしくはCADが開発される必要がある。上記の受動素子の性能向上があっても、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、レンズの小型化が必要である。システムのロバスト性を高めるためには、(1)ズーム化、(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 $10^4 \times 10^4$ 、デバイスサイズを $100 \times 100 \text{ mm}^2$ を想定しよう。この場合、1チャンネル当たり $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}^2$ が必要である。したがって、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、 $1 \text{ } \mu\text{m}$ 程度の精度で各デバイスの位置決めがで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

なども開発されねばならない。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バイスとしては、

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

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ができる。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ど遠いのが現状である。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が予想される。これが、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。したがって、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が、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がある。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、屈折率変化を通じて実効的アライメントずれを生じさせる可能性があり、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 μ 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、基板上のPMMAにSOR放射光を照射して、深さ300 μ 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、ビームスプリッタを形成した実装基板を用いる。この提案の方式では、まだ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 μ 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 μ 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次元アレイのエレメント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ができる。

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くだらう。しかし、通常のバ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次元プロセッサエレメントを、その2次元的な大きさに見合う間隔で配置することが必要である。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が難しいだらう。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が難しく、システムのアライメント安定性も悪くなってしまう。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が望まれる。

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、これでプロセッサアレイを挟み込むような構造のシステムが、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、グ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発展が、実装技術の基礎となると考えられる。パーフェクトシャッフ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 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エレメントと、他方のプロセッサアレイの反対側の端部のプロセッサエレメントを光接続しようとするれば、偏向角は約 85° 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ドに組み合わせて行くだけでなく、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、薄膜積層構造が、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が数多くあるものの、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ジタ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。

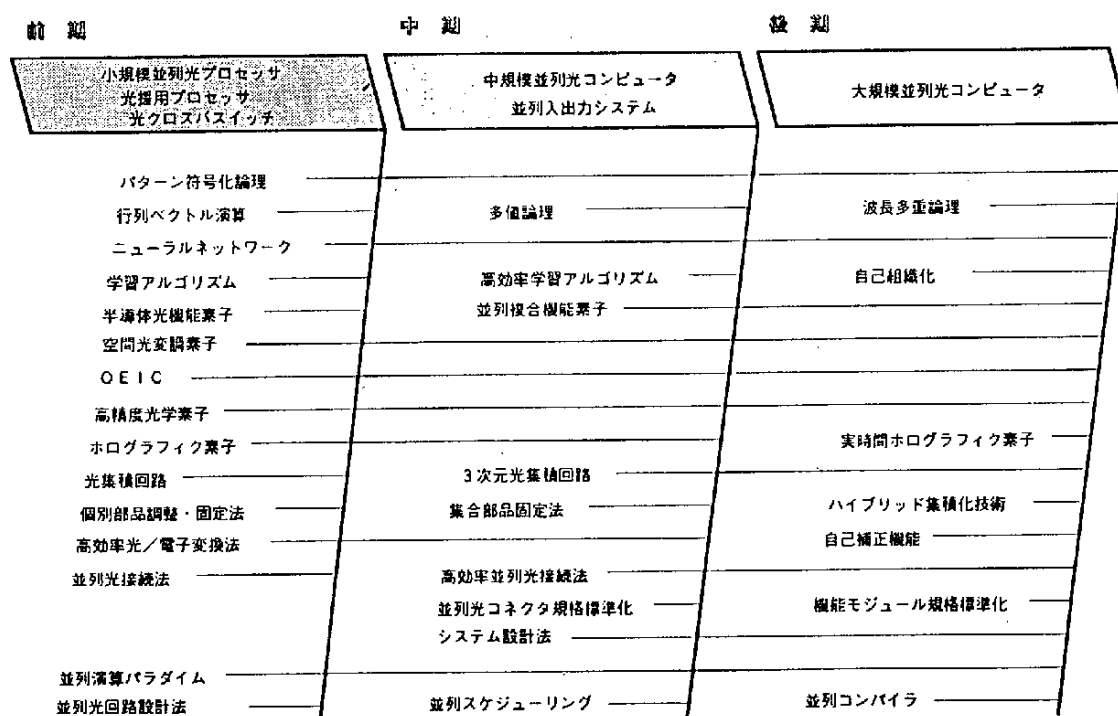


図3.25：並列デジタル光コンピュータの開発フローチャート

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、並列メモリアドレスシグナリングなど並列デジタ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 $50 \times 50 \sim 100 \times 100$ 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－ベクトル光演算器、行列－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－ベ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。

光クロスバスイッチは、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、光デバ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ジタル光演算システムのプロトタイプの実現に挑戦する。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 500×500 、フレームレート1,000Fr/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1,000Fr/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1,000Fr/sの性能をもつ入力装置の開発はそれほど困難でなかろう。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バ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 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が、並列度1,000 $\times$ 1,000、処理速度1 μ 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} IPS(100TIPS)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 μ 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みえる。したがって、並列演算能力の限界はほとんど無限に近くすることができる。

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ができる。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ダ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、まさにそのパラダ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がない。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。それにはグローバ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が考えられる。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がミソである。

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に値する。

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。Si-LSIと光素子とのハイブリッド化も短期的には大きなメリットがあろう。

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、それらを結合するシナプ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シナプス荷重と呼ぶ。シナプス荷重には正（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シナプス荷重をつけて加重加算され、非線型入出力特性にしたがって自分の興奮状態（出力）が決まる。

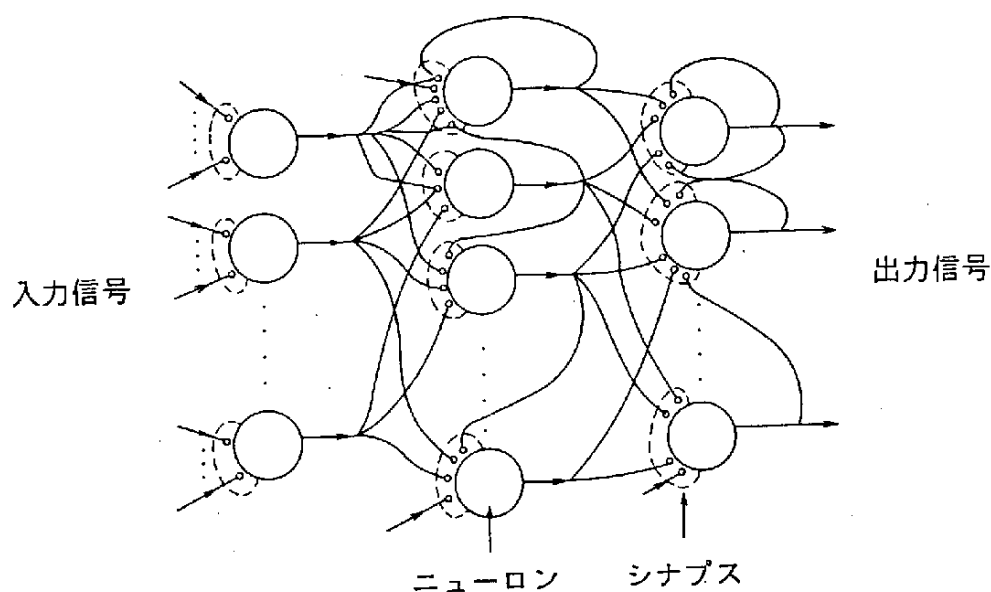
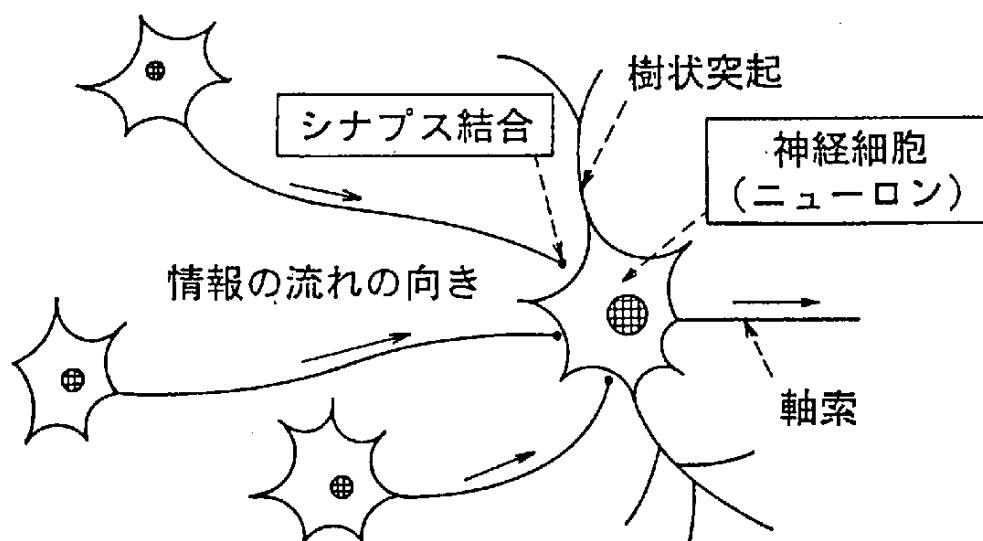
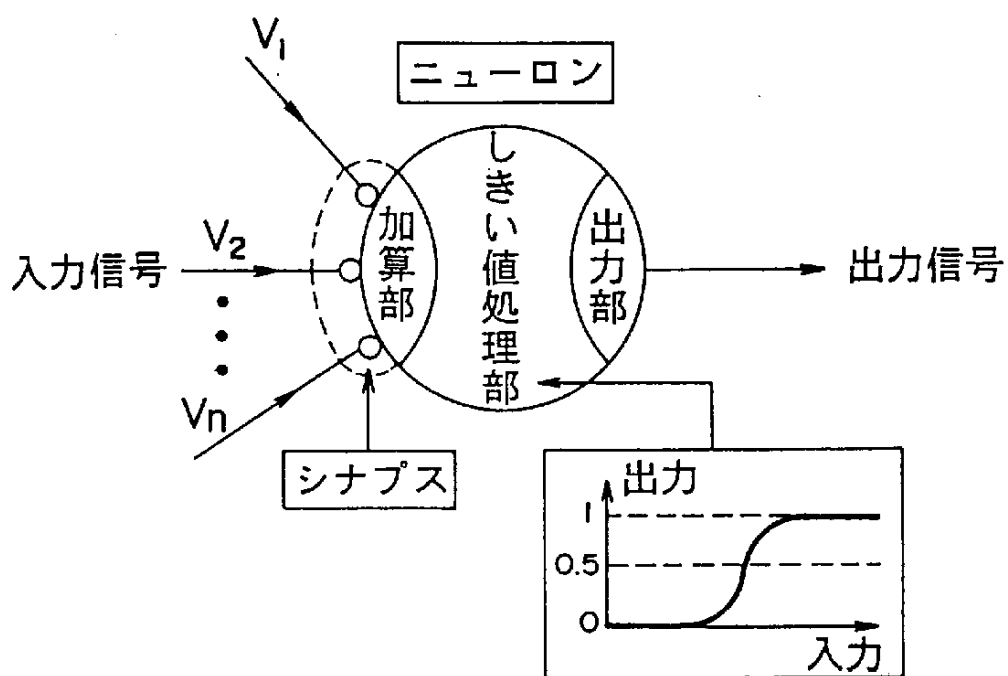


図4.1：ニューラルネットワークの基本構造

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般化性に優れている。つまり、入力が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が出るようになると、その近傍の入力に対しても大体同じ出力が得られることが保証される。

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が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す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が構築されることが期待される。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が著しく高く、プログラムの作成が不可能か、あるいは可能であっても現実的な長さで書き下すことが困難な問題（認識、制御、予測など）に適用できる。一方、②の機能は、取り扱うデータ量が膨大で場合の数の極端な増大が発生し、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プ

	ニューロン数					
	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	・	・
予 測 問 題	診断	小規模プラントの診断			大規模プラントの診断	
	経済	電力需要短期		短期株価	短期経済	電力需要長期
	自然現象				局地的天気	地震 大局的天気
		環境モデルの作成				
パ ー ン 認 識	音声	母音	不特定話者26語		特定話者語彙 音声認識	
	文字	手書き数字 アルファベット	かな漢字変換 手書き漢字 300文字	印刷漢字4000文字		
	画像	簡単な雑音除去	2次元オプティカルフロー		医用画像	
			物体の形状認識	自動目標認識 半導体検査装置	概念形成	
制 御		特徴抽出	立体視		画像復元	画像理解
		逆キネマティクス 逆ダイナミクス	センサフュージョン マニピュレータの 軌道計画		自律移動車	
問 題 解 決		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
	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	・	・

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、オプティカルフロー、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、実時間制御がで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が困難である。また、予測ができて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が多い。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、人間には発見が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ッチコッ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ぶ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がかかる。フィードバックモデルやボルツマンマシ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、組合せの数が要素数のべき乗でおさまることが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と、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 > 多くの企業が開発・市販している < 汎用並列マシン > Connectionマシン, 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 > 各種モデル実現、センサの知能化 < 光技術の利用 > 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シングエレメント（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シンプルなプロセッシングエレメントをいかに数多く並列化できるかが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が、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、アド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ができるため汎用性の高い回路が容易に実現可能であるが、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。
インタコネクション	大規模並列化が可能。 空間的高密度。	平面的低密度。 容量負荷等に弱い。
データ表現	高速で信頼性が高い。 2次元並列。 画像の直接処理が可能。	完全並列に難点。 直列表現向き。
高 速 性	原理的に速い。 高速動作の実証が課題。	現実的に速いが、限界に近い。
柔 軟 性	柔軟な演算が課題。 大容量に対応可能。	汎用性が高い。 プログラムの記述が難。

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、空間的な並列性ばかりで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ができる。

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、デバイス面ばかりでなく、3次元配線を可能とすることからプロセッシングエレメン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げられる。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げられる。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。まだ、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が、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]とバックプロパゲーションモデル[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	ボタン認識	G. Carpenter (North-Eastern U.) S. Grossberg (Boston U.)	
BP (Back Propagation)	連続	連続	2値 連続	2以上	Sigmoid 双曲線正接	一般化デルタ則	ボタン認識、音声合成 ロボット制御 株価予測	D. Rumelhart (Stanford U.) 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 連続	連続	2値	2以上	不定	Boltzmann	ボタン認識	J. Hinton (U. of Toronto), T. Sejnowsky (Johns Hopkins U.) H. Szu (Naval Res. Lab.)	○
BSB (Brain State in a Box)	2値	多値	2値	1	Signum 線形	Hebb 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 Sigmoid	Widrow-Hoff Kohonen	画像圧縮	R. H. Nielsen (HNC)	
Hopfield	2値 2値	連続	2値	1	Sigmoid Step	Hopfield (Hebb)	画像修復 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 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、

$$W V_j = \left(\sum_i V_i V_i^T \right) V_j$$

$$= \sum_{i,j} V_{ij} V_i V_j + V_j^* V_i V_j \quad (3)$$

が得られる。 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、収束過程でアニーリング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) バックプロパゲーションモデル

バ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、入力層と中間層の間のニューロン、中間層間のニューロン、中間層と出力層の間のニューロンは、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 ε 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、

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

で与えられ、これより各層の w_{ij}^k の変化量は、

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

で表わされる。ただし、 α 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、誤差信号が、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れば、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、

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

で表わされる。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、

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

で表わされる。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 とのコンボ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が、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、光デバイス技術はゲートレベルのデバ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。

光デバ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デバイスに比べて悪い。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、光はブロードキャストに伝播する特性を有するが、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 Colective 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 光ニューロデバイスの現状と課題

光ニューロデバイスを開発する目的は大規模で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

ードウェアを実現することである。

光ニューロデバイスは、①電子技術が不得手とするニューロン間のシナプス結合網（アナログの重み付配線網）のみを光デバイスで置き換え、ニューロンの非線型処理は電子デバイスで行う光電子方式と、②ニューロン素子、シナプス素子とも光デバ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の光ニューロデバ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シ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、固定シナプス型で90ニューロン、処理速度～1 GCPS を有する英アルファベット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シナプス型の（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、Si不揮発性メモリをシ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光デバイス(VSTEP)を用いるチップの提案[4]もある。高速にシナプス荷重の書換えが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。

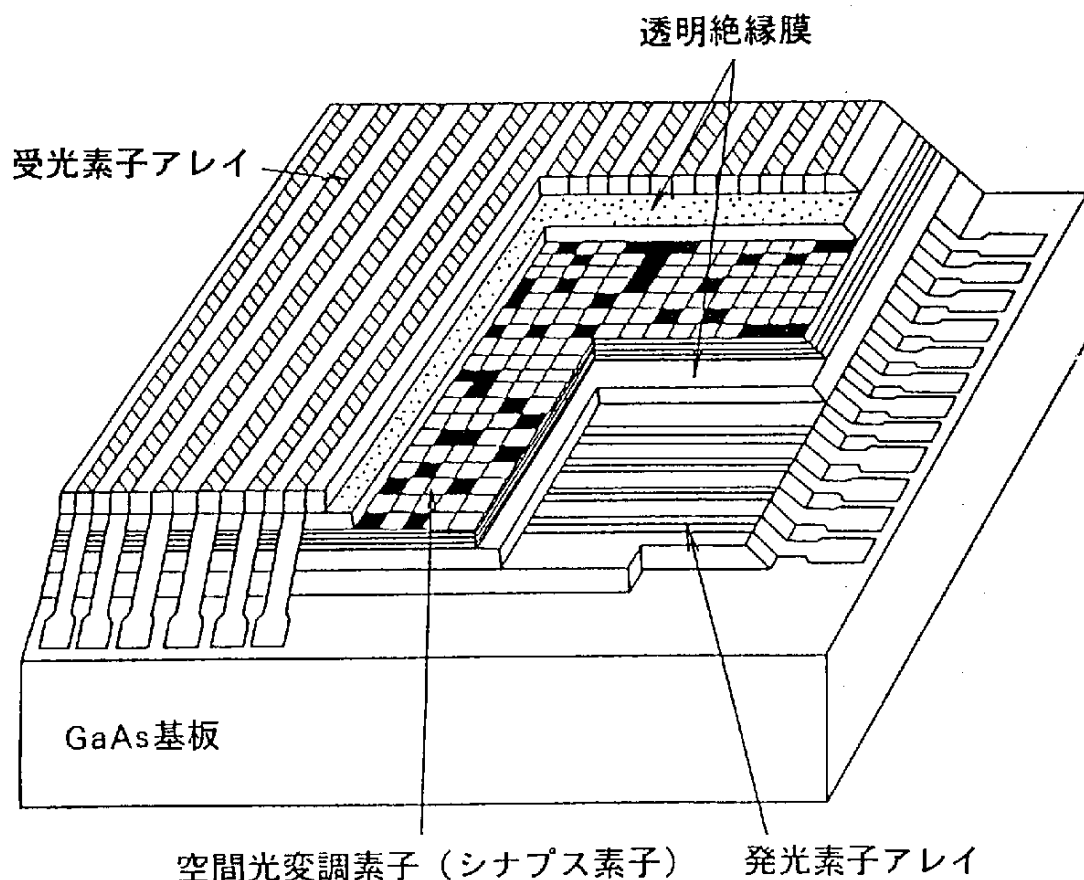


図4.3 : GaAs光ニューロチップの構造図

図4.4はCCD(Charge Coupled Device)をシ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シナプス荷重を与える光アドレス方式のチップである。ベ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、電気アドレスによる予備実験がなされ、処理速度 $\sim 0.5\text{GCPs}$ を得ている。この他、CCDの代わりに $\alpha\text{-Si}$ の光導電性を用いたチップやフォトランジ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ド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。

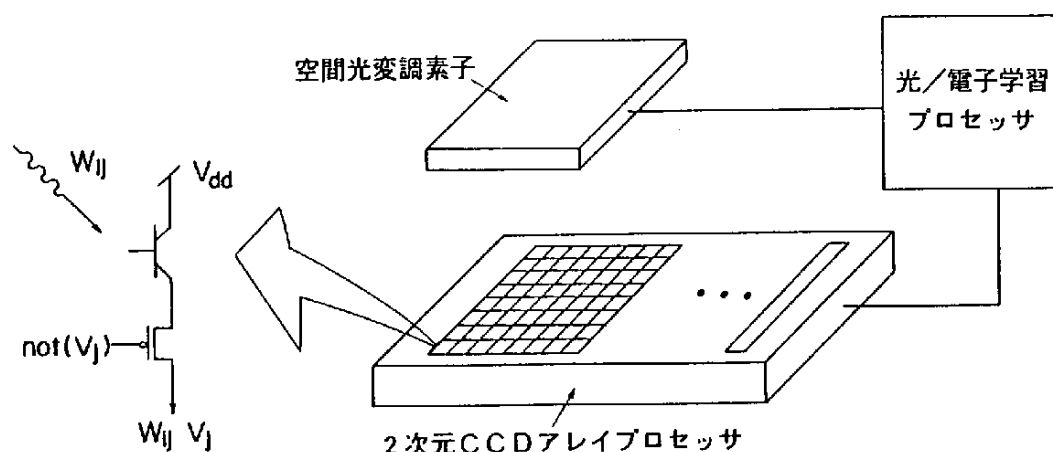


図4.4：CCDを用いた光ニューロチップの構造図

4.2.2.2 全光方式

2種類のドーパントをもつ電子捕獲材料(CdS)をシ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のドーパント(Sm)の基底準位に捕獲(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のドーパントの基底準位に捕獲されていた電子は、第2のドーパント(Eu)の基底準位に遷移する。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、シ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、全光学的にシナプスの学習、自己組織化が可能である。またベクトルに対応する空間パターンの赤外光を照射すれば、ベクトル/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バ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。

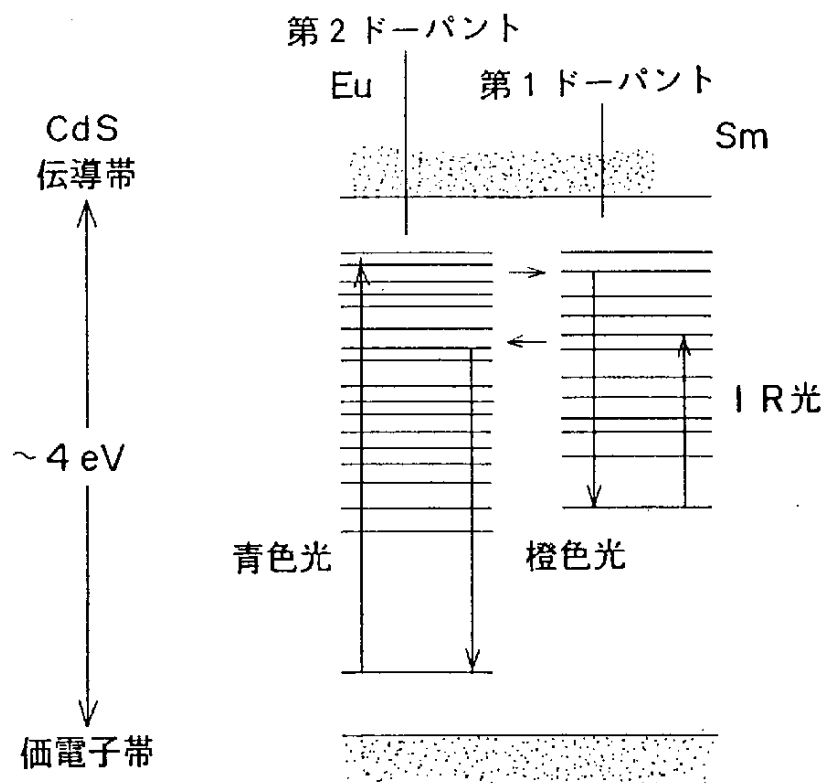


図4.5：電子捕獲材料のエネルギーバンド図

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の実証されつつある。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ドレス方式の空間光変調素子を集積化した可変シ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, : フィードフォワード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-2D-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が、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、光学的ベクトル－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。

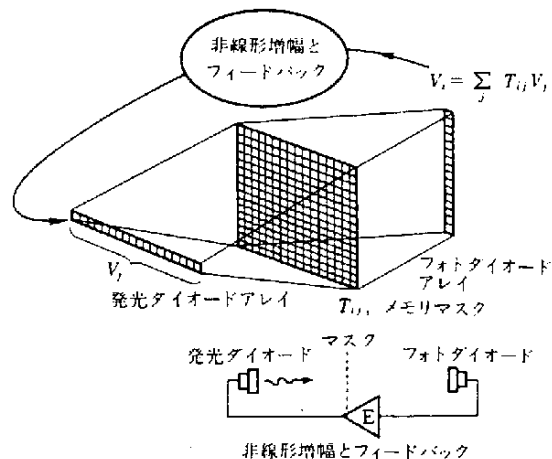


図4.6 : Hopfield型連想メモリの光による実現の概念図[1]

(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、まだ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

課題は多いが、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。

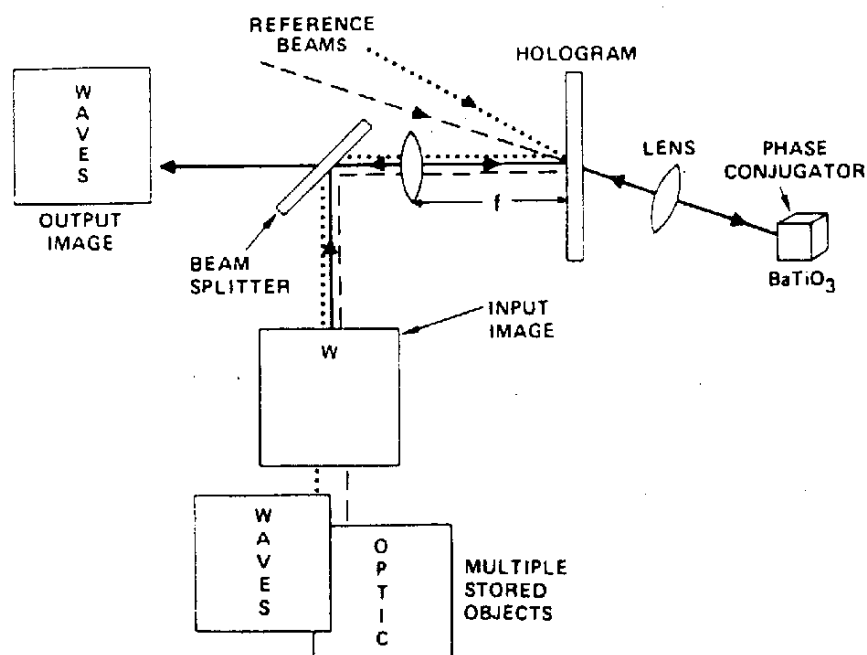


図4.7：ホログラフィック光連想メモリ[4]

(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が課題である。

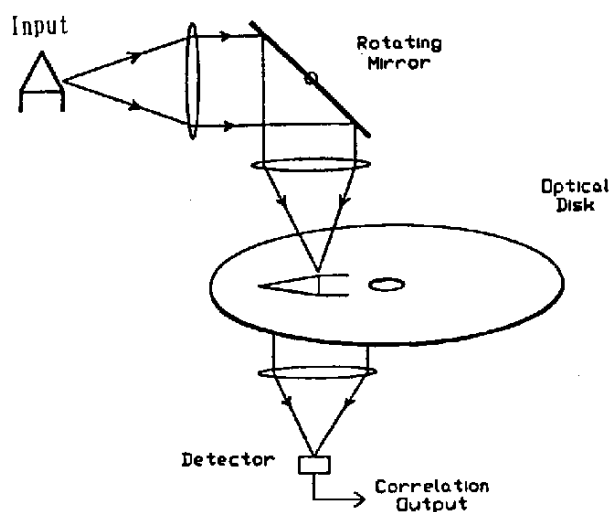
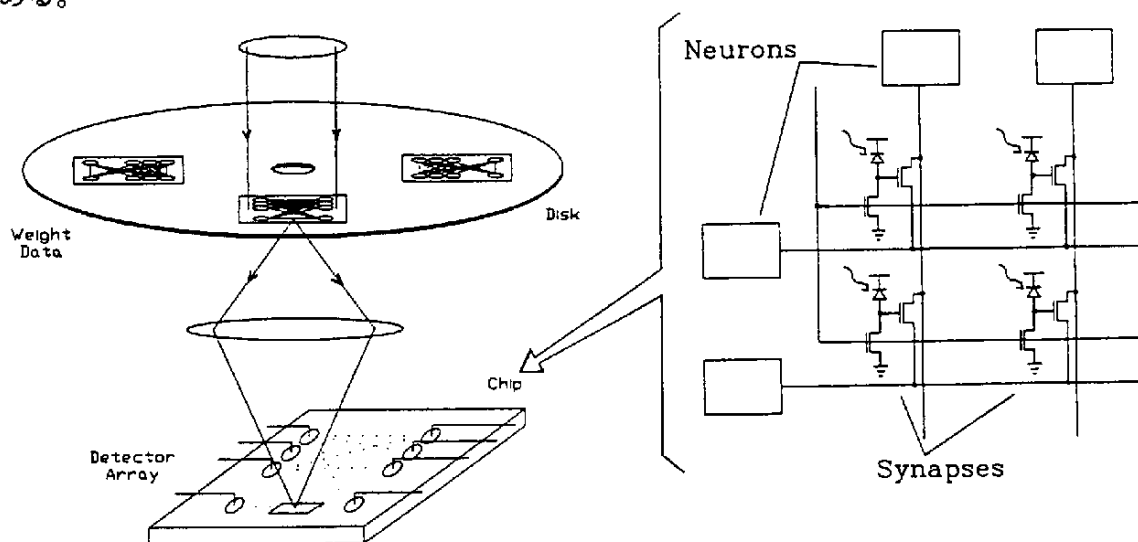


図4.8：光ディスクを用いた画像検索[5]

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ダ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ワーク[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）。

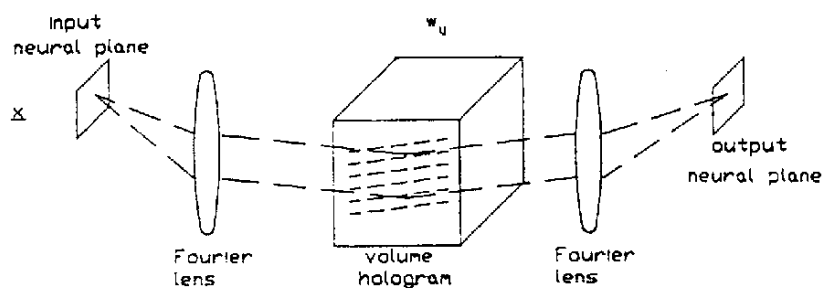


図 4.10 : ニューロチップの光配線 [6]

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 光ニューロデバイス・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が、21世紀に向けて盛んに研究されている。しかし、これらの技術が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がない。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、入力情報が曖昧であっても正しい結果が得られる、誰にでも利用できる「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が、そのほとんどは光を介した視覚画像情報である。したがっ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バイスの開発が必要である。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が困難な画像（映像）処理と高速情報処理が得意なことである。

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ベース、高速学習機能を持ち画像の認識・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が期待される。また、論理処理が得意なデジ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が期待される。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。

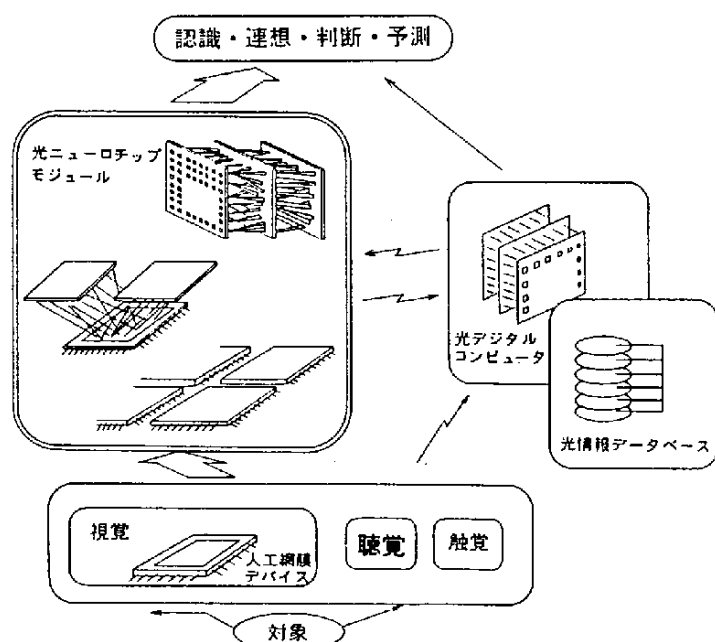


図4.11：柔軟な情報処理機能をもつ光ニューロコンピュータの将来像

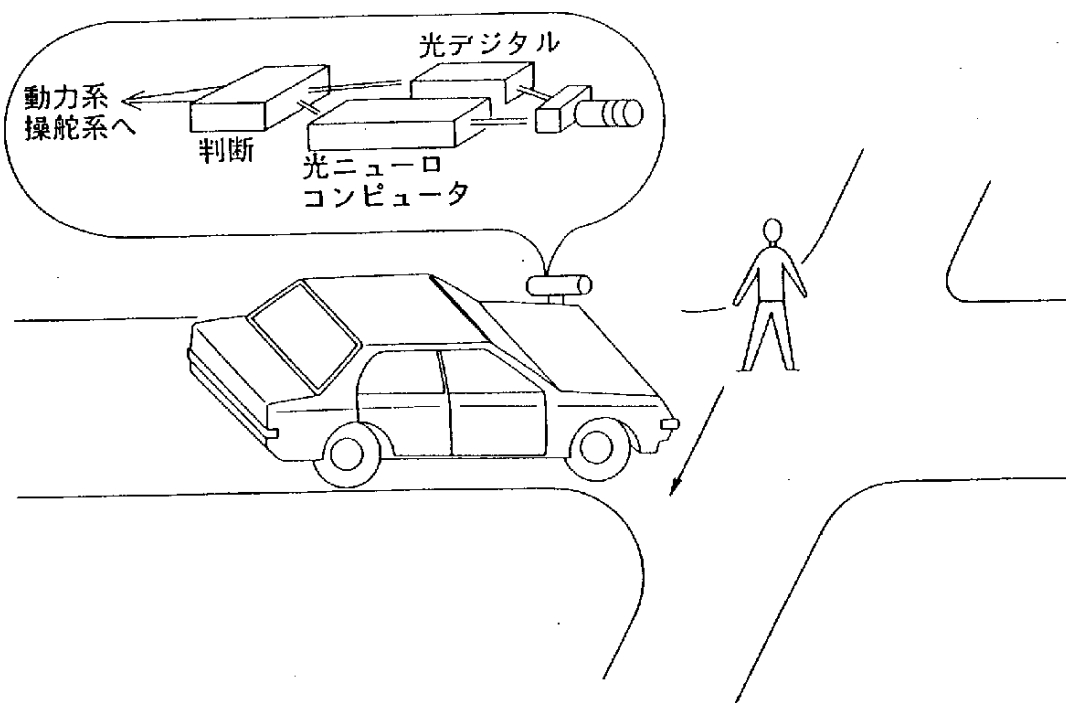


図4.12：光ニューロコンピュータを用いた自動車の自動走行システムの将来像

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が期待される。

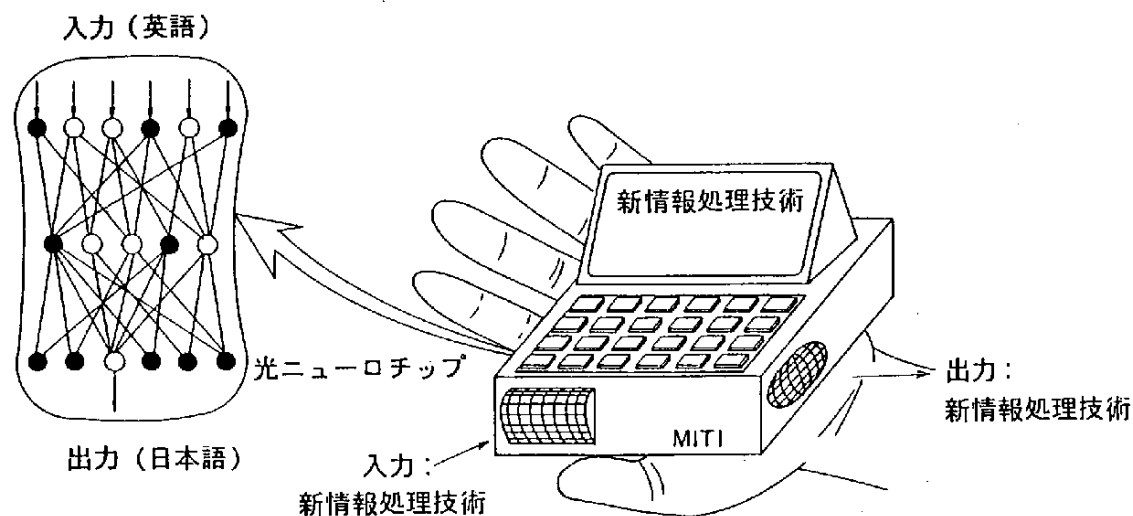


図4.13：光ニューロコンピュータを用いた自動通訳機械の将来像

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、まだ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デジ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ができる。

ようなモデルが望ましいことを示した。また、光を用いれば、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ができる。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が実現されれば、光技術に適したモデルの1つと考えることができる。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ができる。以上のことを考慮すると、たとえば、ネオコグニトロン[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つであると考えることができる。

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が得られるように、逆に、学習アルゴリズム、積和演算メカニズム、閾値処理などが、複雑になっている。一方、光を用いれば、光の並列性、ブロードキャスト性などの特長を用いて、個別のニューロンやシ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、レーザー共振、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ができるようなモデルが、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、モデルの選択が、デバ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、デバイスやシステムサイドにトップダウン的に示し、逆に、それらのサイドからのフィードバックによって、モデルを改良するようなループ的な研究が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 光ニューロデバイスと要素技術

4.3.3.1 光ニューロデバイス技術

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、光ニューロデバイスの研究開発はまだ緒についたばかりである。

ここでは、光ニューロデバ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・高速光ニューロデバイス

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デバ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シナプス素子として極めて重要な素子である。

図4.14に光アド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、シ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、更新したシ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バ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。

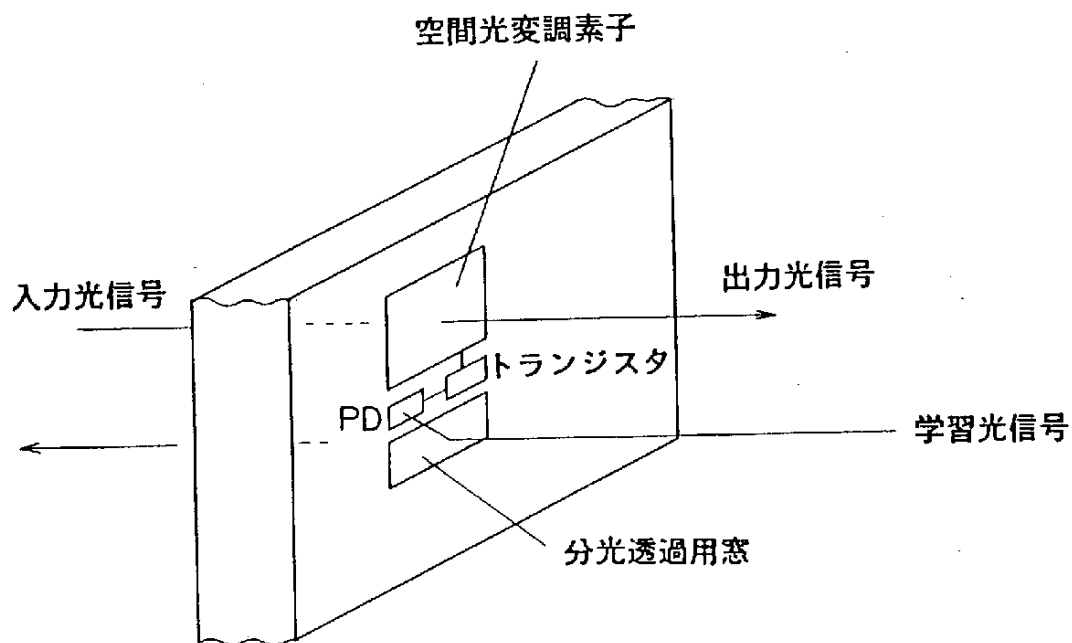


図4.14：光アドレス方式空間光変調素子の構成例

図4.15、図4.16に別の光ニューロデバイスの例として、ニューロンの興奮状態とシ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、それぞれシ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（電気または光アドレス方式の）空間光変調素子、発光素子（発光素子アレイまたはビーム偏向半導体レーザ）、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

でもデジ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 ($> 1 \text{ TCPS}$) が期待されるが、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、デジ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が、光デジタルメモリや光スイッチング素子などのデジ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ンプルでコンパクトな光ニューロチップが実現できる。

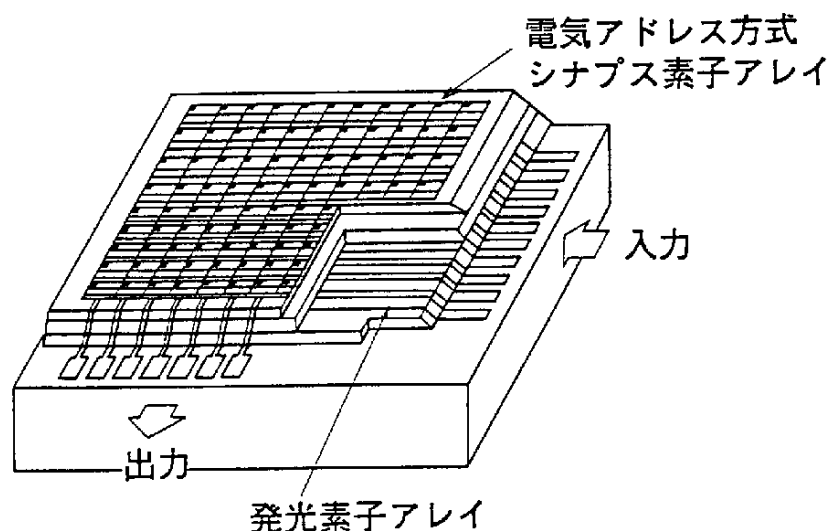


図4.15：電気アドレス方式光ニューロチップ構成例

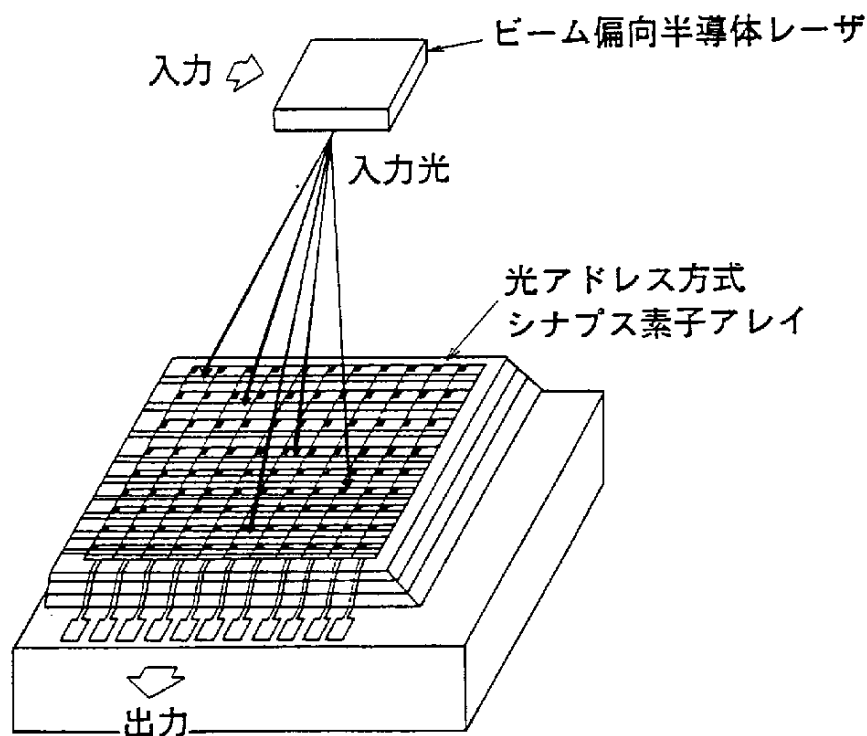


図4.16：光アドレス方式光ニューロチップ構成例

(2) 画像処理用光ニューロデバイス（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バ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バイスの概念図を図4.17に示す。ビーム偏向機能、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次元のシ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バイスも考えられる。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バ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。

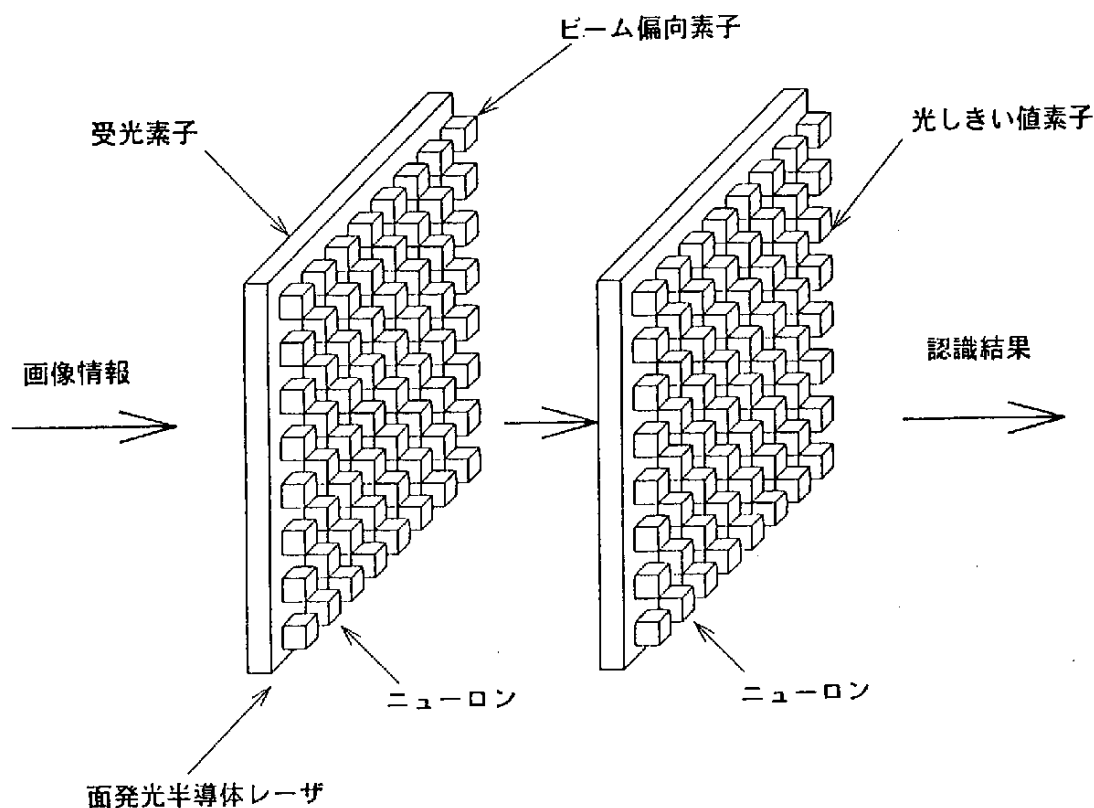


図4.17：画像処理用光ニューロデバイスの概念図

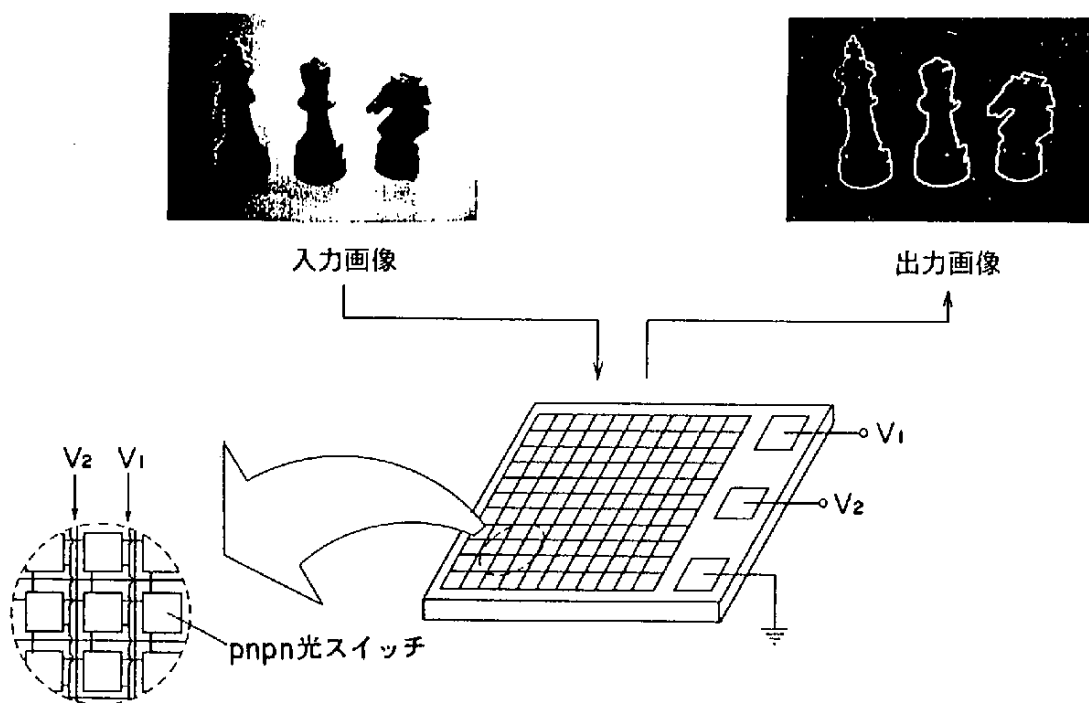


図4.18：輪郭抽出機能をもつ視覚情報処理素子（人工網膜）の構成例

（3）光ニューロデバイスの要素技術

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バイスを構築するには、様々な要素技術（光デバイス技術とその基盤技術）の開発が必要である。

光デバイス技術では、発光・受光素子アレイ、ビーム偏向レーザ、空間光変調素子などの基本デバイス、SEED、pnpn光デバイス、（実時間）ホログラム素子などの光機能デバイスなどがあげられる。光ニューロデバイスの集積度としては、デバイスの機能や応用に依存するが、 $100 \times 100 \sim 1,000 \times 1,000$ 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シャル結晶成長技術があげられる。2次元アレイ光デバ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電子デバ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シャル技術を見直す必要がある。また原子層エピタキシャル技術は新機能デバ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。ドライプロセス技術や微細加工技術の他、光デバイスの3次元集積化技術は特に重要である。また、光集積デバイスのアッセンブル技術、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、光集積デバイスあるいは光電子集積デバイス(OEIC)の設計技術として、デバイスシミュレーション技術とプロセスシ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, array, 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バ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。またバンドギ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バイスが実現されている。

しかしながら光ニューロデバイスにおいては、多くの素子を同一基板上に集積した大規模・高速の光集積デバイス、あるいは光双安定性などの新しい機能を持つ光デバイスが必要となり、それらの実現にはデバイスのみならず、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。

新しい光デバ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シャ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ド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、従来のバ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バルク結晶では得ることのできない優れた電気的、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バ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 μ 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、バ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(量子シュタルク効果)。その結果、実効的なバンドギ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ができる。外部電界に代えて光電場で誘起した光シュ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バ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が、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ができる。このような構造を実現するための研究はまだ端著についたばかりであるが、量子効果が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バ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が、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、分子線エピタキシャル(MBE)

法および有機金属気相成長(MOVPE)などの高精度エピタキシャル成長技術である。これらの新しい成長技術は、従来の液層エピタキシャル成長法に比べ、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が、今後、光ニューロデバ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シャル(ALB)技術などをはじめとする、新しい結晶成長技術の開発が必要と思われる。ALB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、サイドウォールエピタキシャル成長が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。

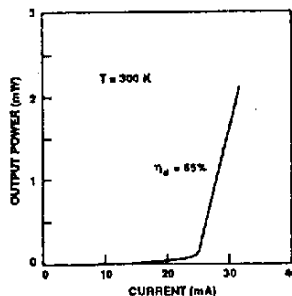
ALB技術の研究は、大規模集積光デバイスおよび新機能材料、新機能デバイス研究の基盤技術として、今後の取組みが重要である。

(2) ヘテロエピタキシャル成長技術

Si基板上にGaAsあるいはInP結晶をエピタキシャル成長させる技術は、集積度の極めて高いSi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がってきており、現在は $3 \sim 5 \times 10^5/\text{cm}^2$ の値が得られている。またSi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にヘテロエピタキシャル技術の研究の現状を示す。Si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シャ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シャ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、歪超格子などがど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シャル成長技術の現状

	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 2) GaAs/SL/GaAs*/Si (* 2 段階成長)	1) InP/GaAs/GaP/Si 2) InP/SL/InP/GaAs/Si
低欠陥成長結晶技術	1) 2 段階成長 2) SL buffer層の導入 3) 高温アニール 4) 不純物ドーピング (成長法: MOCVD, MBE, MEE)	同左 (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: I _{th} =25mA (J _{th} =350A/cm) ^{**} MESFET LED  (^{**} H.K.Choi and C.A.Wang J.Appl. Phys.,68,1916(1990))	LD: I _{th} =45mA
技術課題	欠陥数低減 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バ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。これまで報告されているフォトリフラクティブ結晶は、LiNbO₃やBaTiO₃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、フォトリフラクティブ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。フォトリフラクティブ効果に寄与するドナー（あるいはアクセプター）とキャリアの同定の問題、複数のフォトリフラクティブ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

ド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が使われているが、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だ実現されていない。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せられるため、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：光デバ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 デ バ イ 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 フォトダイオード	モンテカルロ法によるイオン 化率比計算
	光導波路型デバイス	ビーム伝搬法（BPM）による2－3次 元導波路解析
電子デバイス		ドリフト拡散モデル、モンテカルロ法 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 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ーに対して、光系と電気系の基本式をセルフコンシステントに2次元解析するデバ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、電子デバイスに対しては、拡散・ドリフトモデルによる2次元解析が中心で、相互コンダクタンスやゲ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ビ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。

デバイス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、量子井戸レーザー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シュタルク効果

(QCSE)などを考慮したデバイスシミュレーションはまだ手が付けられていない。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、複数のデバ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次元シミュレータあるいは2次元過渡解析シミュレータも開発されているが、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。したがって、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バ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]

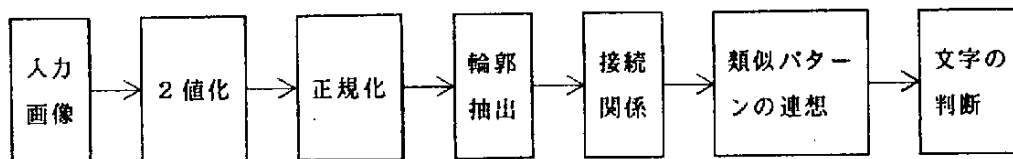
- [1] 江崎玲於奈, 榑博之: 超格子ヘテロ構造デバイス, 工業調査会, 1988年9月
- [2] Choi, H. K. et al.: Room-temperature continuous operation of GaAs/AlGaAs lasers grown on Si by organometallic vapor-phase epitaxy, J. Appl. Phys. Vol. 68, No. 4, pp. 1916-1918 (1990).
- [3] 富田康生: Photorefractive効果とその非線形光学への応用, 応用物理, Vol. 59, No. 9,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

4.3.4 光ニューロシステム技術

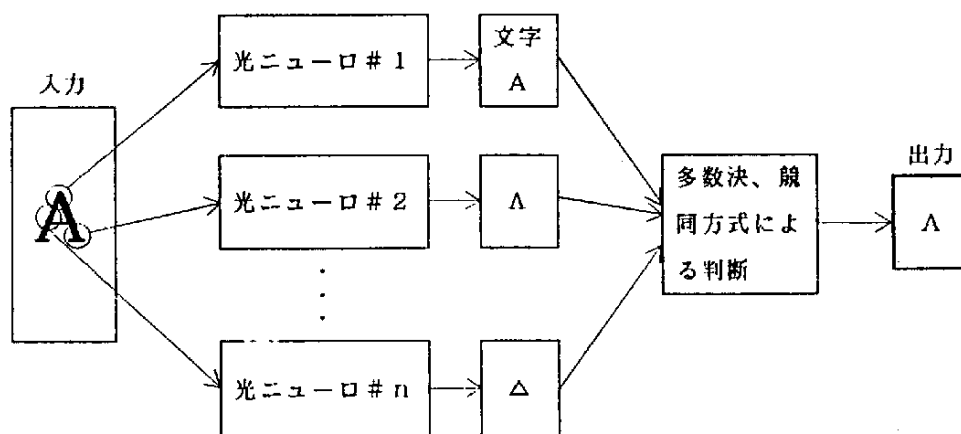
ニューロシステムは、まだ小規模システムの実験段階であり、光がその特徴を発揮する大規模並列システムの実現はこれからであり、設計手法、学習手法等に多くの課題が残っている。

(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ろう。
- 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シナプス結合の重みを変更するが、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・フレンドリー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が、入力情報を直接処理するのが望ましい。
- 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が、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：データベースの検索はキーワードにより行われるのが一般的であるが、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が、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 of 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が望ましい。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ることなく、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・オプティックス、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。

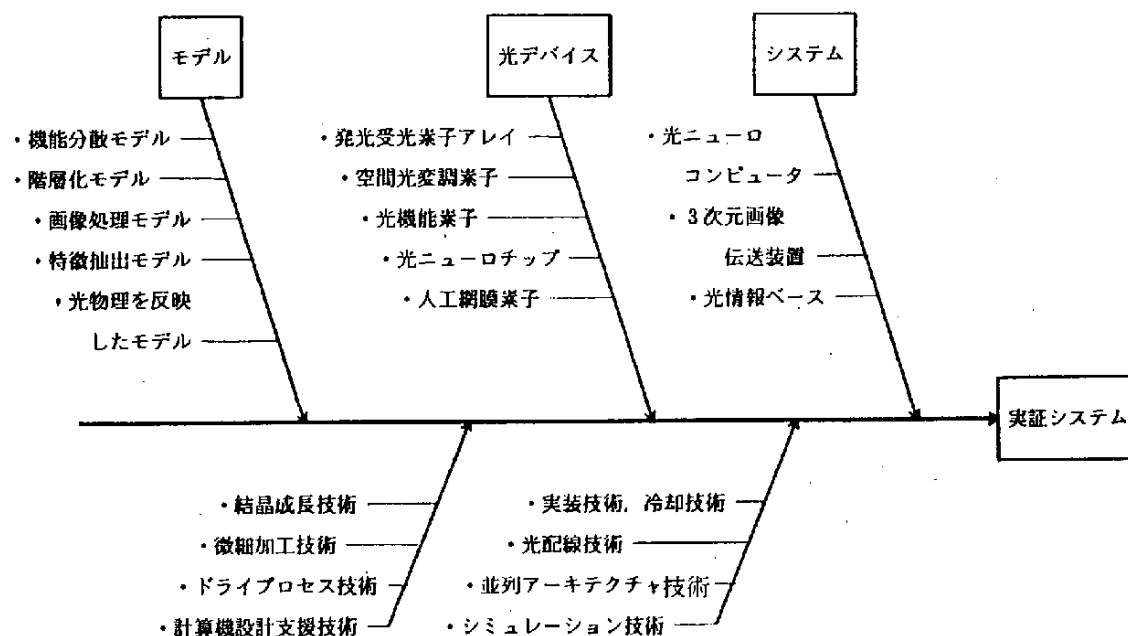


図4.20: 実証システム開発のフローチャート

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ッセンブル技術、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(~ 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、光ニューロデバ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バイスと生物の脳の機能を模倣した光ニューロデバイスを融合した光ニューロコンピュータを実証する。

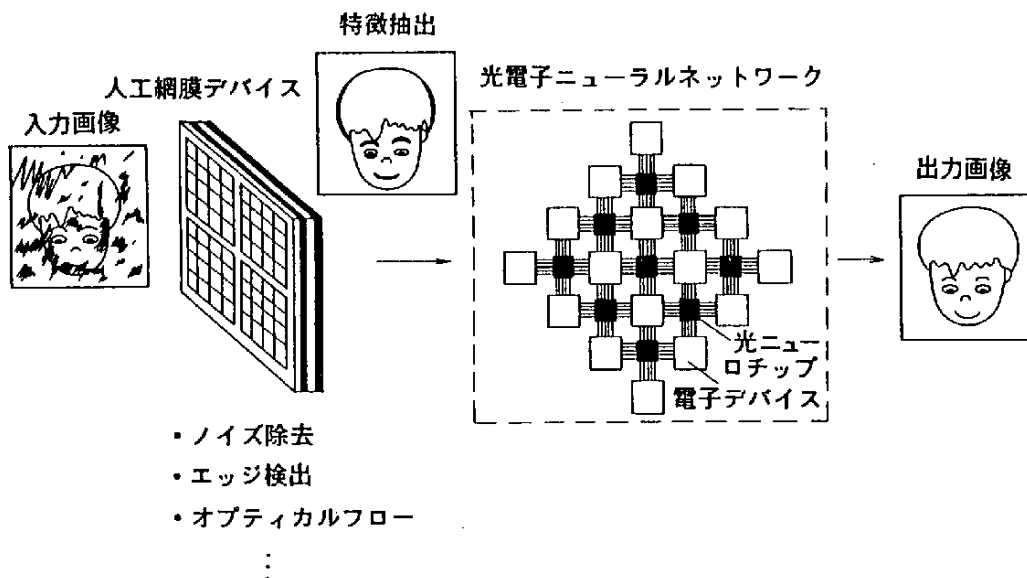


図4.21: 実証システムの例：人工網膜素子とニューロチップを融合した光ニューロコンピュータ

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ベ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ベ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ベ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ベースを融合した知的な画像伝送システムを実証する。

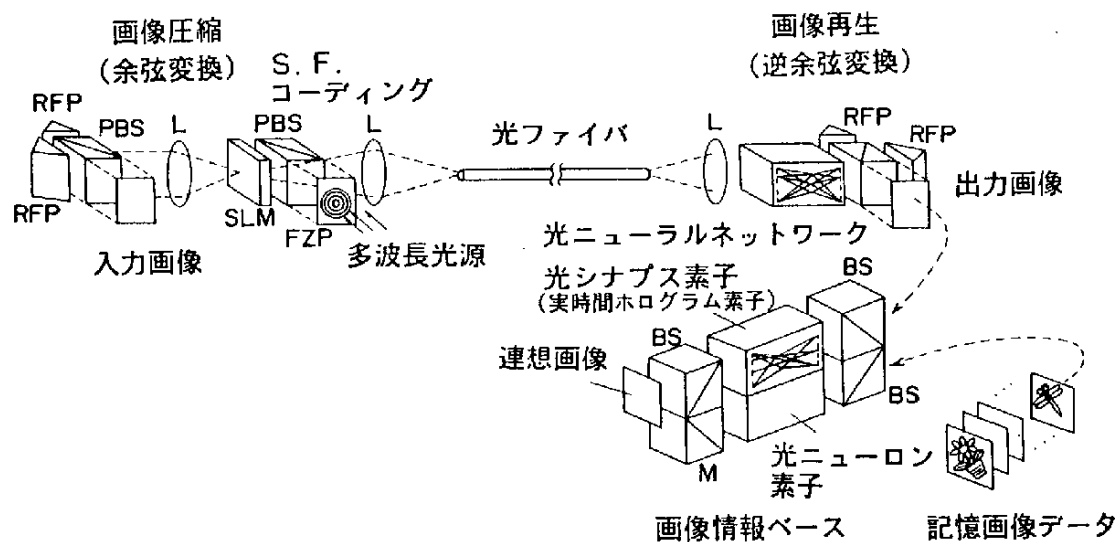


図4. 22: 実証システムの例：光画像情報ベースと光通信システムを融合した知的画像伝送システム

第5章

光インタコネクション

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もが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、コネクションマシ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 波長多重性 偏光等の利用 超並列性
光波特性の利用	
インピーダンス整合・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 高接続自由度 高機能性 (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桁に及ぶが、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ができる。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・柔軟性が実現できる。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どまらず、データ処理の中核を担うものとして将来における意義は極めて大きい。

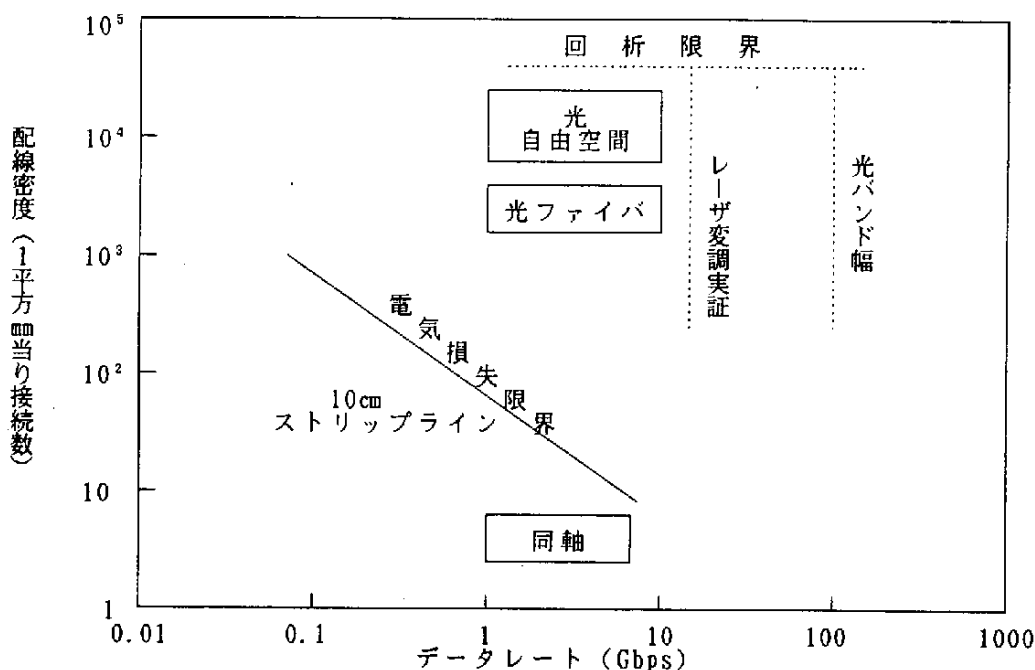


図5.1：電気および光インタコネクションの性能限界の比較

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ができる。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がある。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。

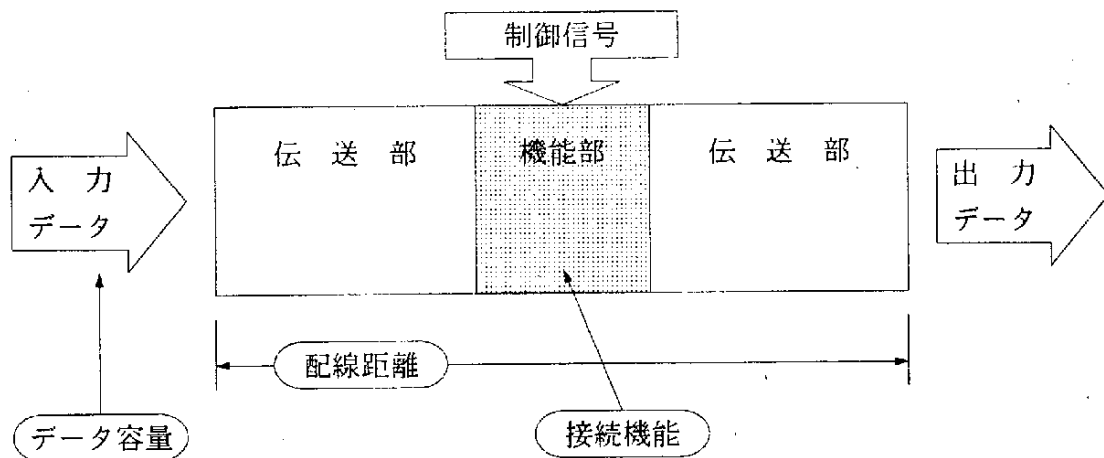


図5.2：光インタコネクションの構成

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。

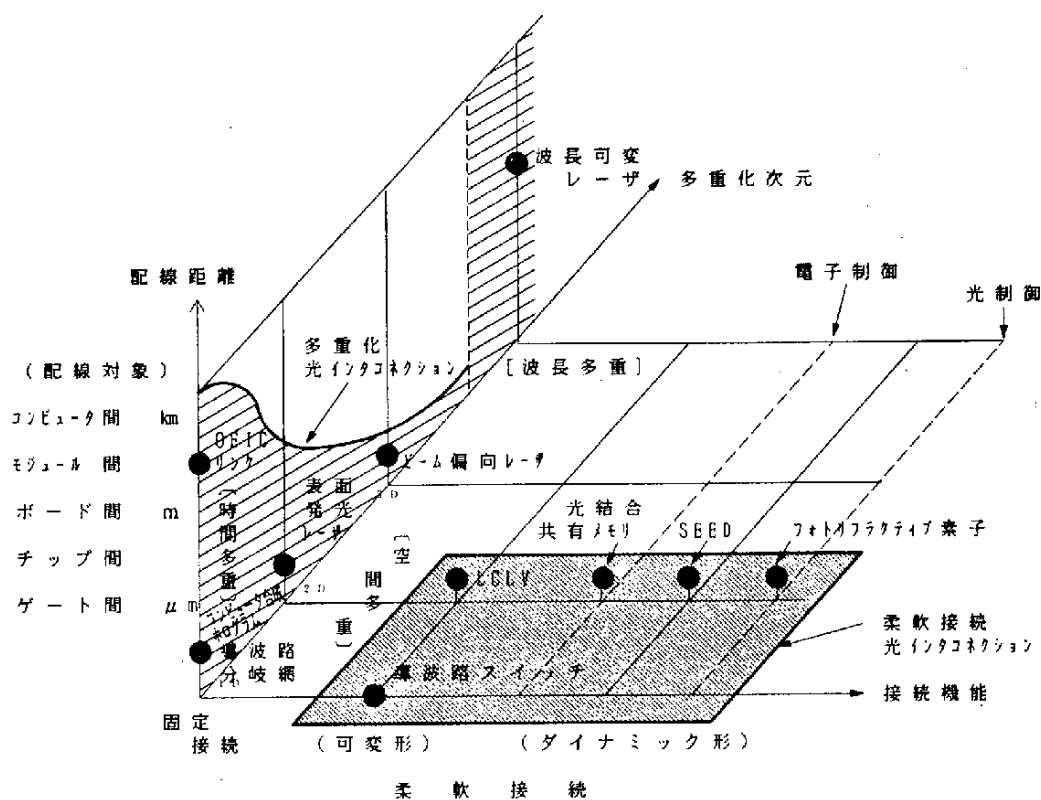


図5.3：光インタコネクションの分類図

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次元空間および光ビ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、並列性を確保しながら接続を制御して柔軟な接続を指向する領域との2つを考えることができる。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：ディジタル光情報処理，「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、多重化することで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が、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 （アレイ）	特 徴	・構成はシンプル ・素子数を増やすだけで多重度が増大（1次元から2次元への拡張）	・非接触で光導波路が不要 ・3次元接続が可 ・多分岐接続が容易 ・柔軟接続への拡張性大 ・高精度の位置合わせ技術要（高精度光学技術） ・回折、反射などによるクロストーク対処要
	限 界	・光電変換の消費電力 ・光素子の信頼性	
時間多重 （TDM）	特 徴	・光通信技術の延長線上にあり技術が安定 ・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 （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 ・固定接続から自由接続への拡張性	
	限 界	・波長多重ではファイバの帯域幅（～数nm） ・周波数多重では波長掃引量（～数10nm）	

空間多重は構成がシンプ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ずるならば非接触で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で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が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。レシーバは1個のOEICチップとなっており、4個のMSM(Metal Semiconductor Metal) - PDアレイが8,000個のMESFETからなる増幅器やデジ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ジ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LiNbO₃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が利点と考えられ、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じ込めシ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]。

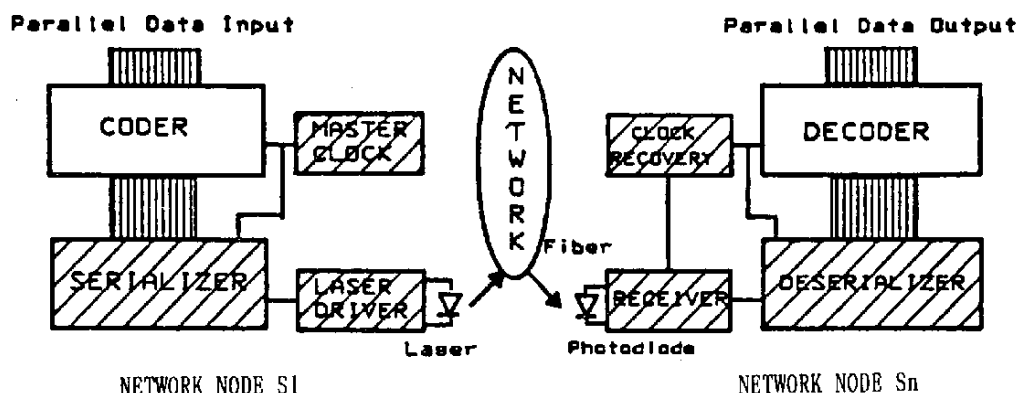


図5.4: OEICチップを用いたコンピュータ間

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交換機などで必要な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ができる。1チャンネル100Mb/sの信号4チャンネルにガード時間を付加して時間多重し、さらに波長間隔0.8Åで8波多重することができる。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。

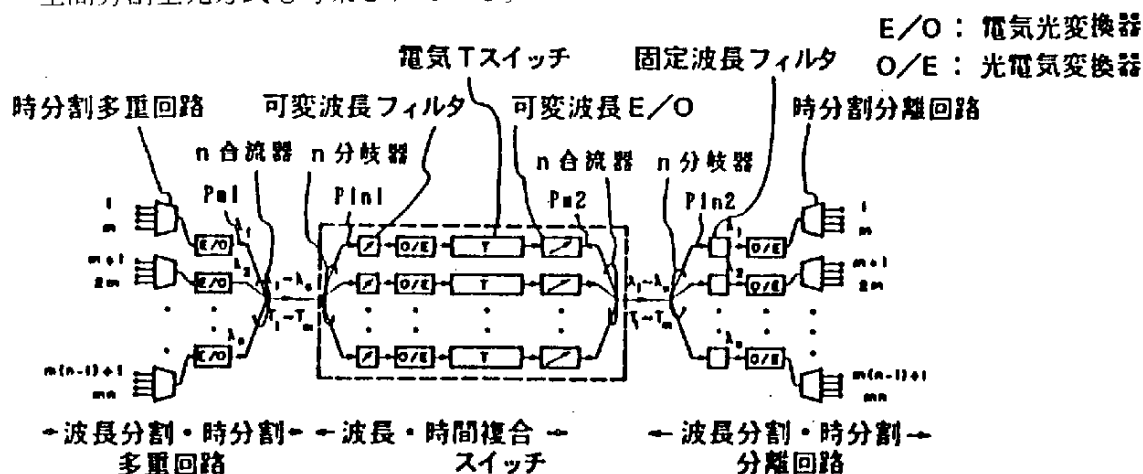


図5.5：波長分割・時分割複合光通路路[4]

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げた。

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 (1次元TDM)	・4CHアレイ化OEIC 信号速度 1 Gbps/CH 送信側 GaAs 40W-LD 7V_f 受信側 GaAs 4MSM-PD, 8000MESFET ・4CH OEICチップ 信号速度 0.6 Gbps/CH	・低しきい値化 (マテリアルLDの開発、1μA～100μA) ・高密度OEIC技術 (ヘテロ、アレイ化、大面積均一化・・・) ・アレイ化光実装技術
(光導波路)	・8x8 LiNbO₃スイッチ	・プレーナネットワーク形成技術 (分岐、交差、折り曲げ)
時間多重 (TDM)	・外部変調器、光スイッチとして開発 LiNbO₃ 進行波増幅型(～20GHz) 半導体導波路スイッチ 量子井戸型方向性結合器	・スイッチの低消費電力化 ・高密度OEIC技術 ・超高速ロジック開発
波長多重 (WDM)	・光交換技術として開発 波長時分割多重方式 波長多重度8, 時多重度4(100Mbps/CH) 波長空間分割多重方式	・波長制御関連デバイスの開発 (波長スリット, 可変波長フィルタ, 波長変換LD等) ・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發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だ開発課題が多い。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シャッ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。

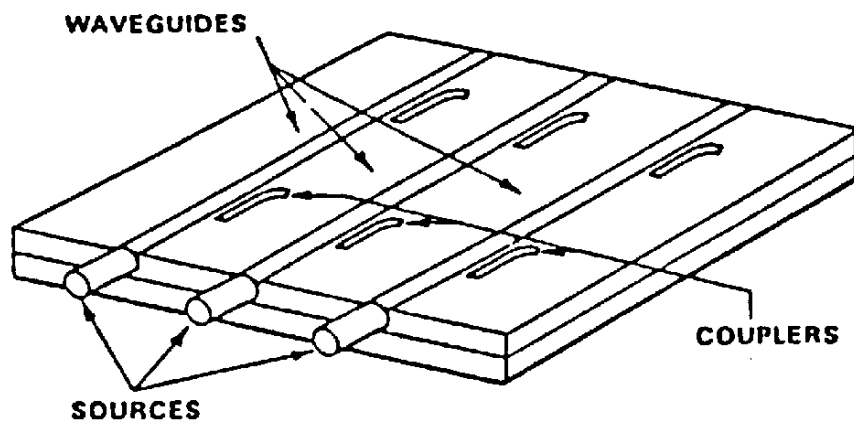


図5.6：集積化光導波路を用いたクロック分配の概念図[5]

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ダプティブな光接続ができるからである。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。面発光レーザを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が、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 μm 径のLDを160個集積した2次元面発光レーザアレイの例では、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ダメージの低下等、微細加工技術の開発によって、超低しきい値レーザが実現できる。

面発光レーザを含む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。

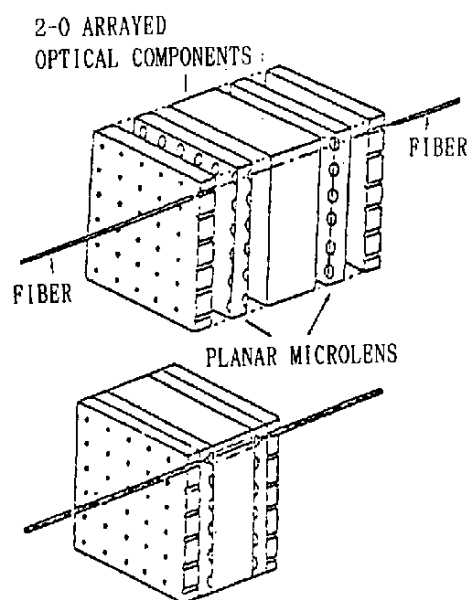


図5.7：面発光レーザによる2次元アレイ化光部品とマイクロレンズ板などを用いた光インタコネクションの構成[8]

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が、レーザ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、ロジッ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が多い。

[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が将来の「配線ネック」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が図 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じめられるようになった。そのひとつが「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せているが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バイスの研究がある。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ができる。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が提案されている。また、このような配線方法は、並列処理のハード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がカバーするものである。この観点から、光・電子融合型の配線が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が考えられる。

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が、アーキテクチャ、デバイスとも研究の第一歩を歩み始めたばかりであり、このような技術が将来どのような配線に活用されるべきかの見通しと要素技術の開発課題を明らかにして、総合的な開発体制が形成されるべきと思われる。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バ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点間を光ガイドで結合し、レーザ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、現在の高速バイポーラ回路の長距離配線遅延が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次元化が計られる。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が可能になる(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ドウェアを提供できる。以下では、固定結合なが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。

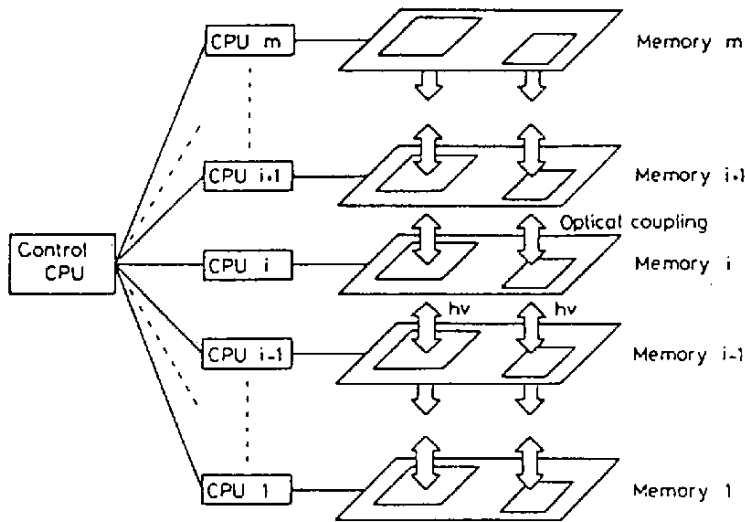


図 5. 8 : 3 次元光結合共有メモリをもつ並列プロセッサシステム

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 ボード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ができる。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 $n = m 2^{m-1}$ で与えられ、 $m = 3, 4, 5, 6, 7, 8,$ でそれぞれ $n = 12, 32, 80, 192, 448, 1024$ 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] 。

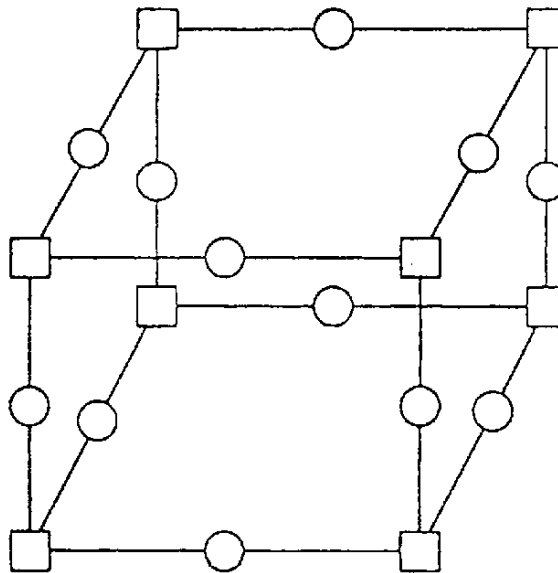


図 5. 9 : 頂点に共有メモリを置くハイパーキューブ並列プロセッサの例
(四角が共有メモリ、丸がプロセッサを表す)
(After T. Ae)

- 253 -

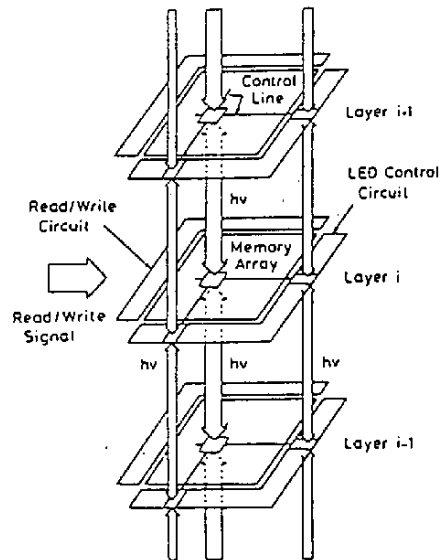


図5.11：3次元光結合共有メモリの構造

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、多層レーザ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ガイド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が必要となる。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んで、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ボード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-pin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。計算に用いたデバイ

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が、プロセッサが256以上での電気配線では急激に遅延が生じることが示されている。この結果は、光配線が生かさ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。

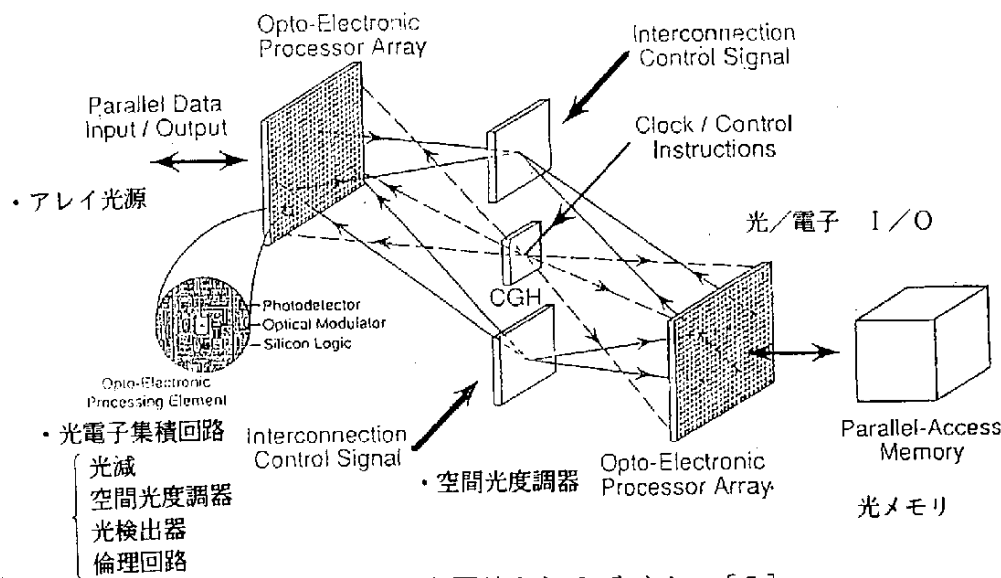


図5.12：POEMと要請されるデバイス [5]

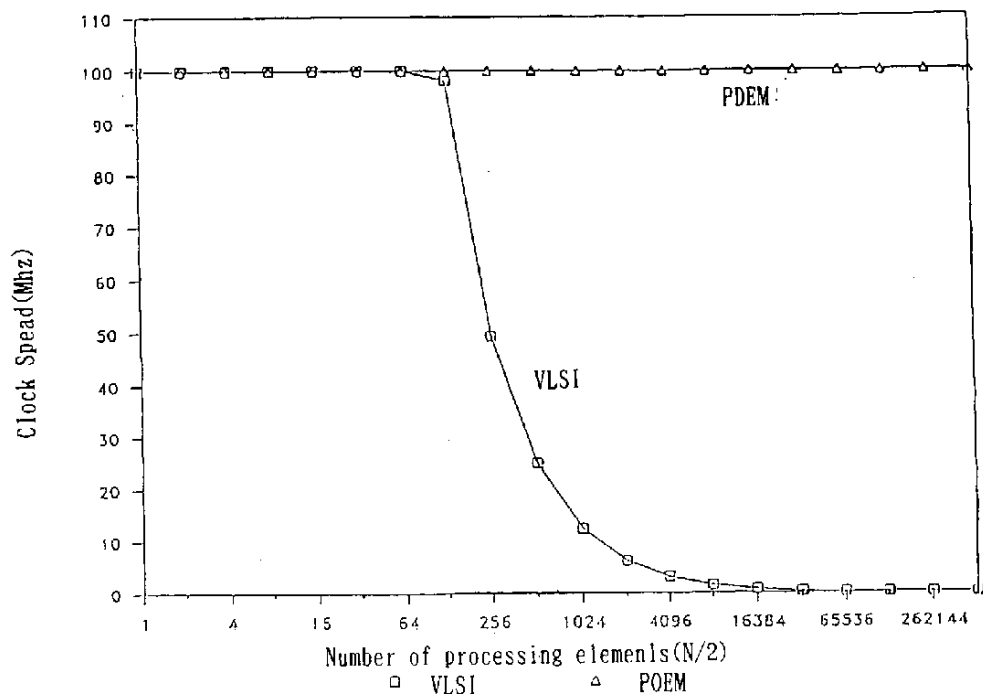


図5.13：クロックスピードの比較

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 μ m Double-metal
Supply Voltage	5 Volt
PE Size	200 μ m $\times$ 100 μ m
PE Power Dissipation	1 mW @ 100 MHz
Transistors per PE	100
Wire Pitch	4 μ m
Wire Capacitance	2 pF/cm
Wire Resistance	300 Ω /cm
Gate Capacitance	8 fF
Gate Resistance	8000 Ω
Max. PE Speed	100 MHz

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

System	
Min. Footprint of Package	0.18 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 μ m
Laser Efficiency	10%
Clock Embedded in Optical Power Supply	

図 5. 14 : P O E M 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で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が、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がホログラムによる回折現象であり、それが光学的に励起されることが用いられる。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ビ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ビ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。

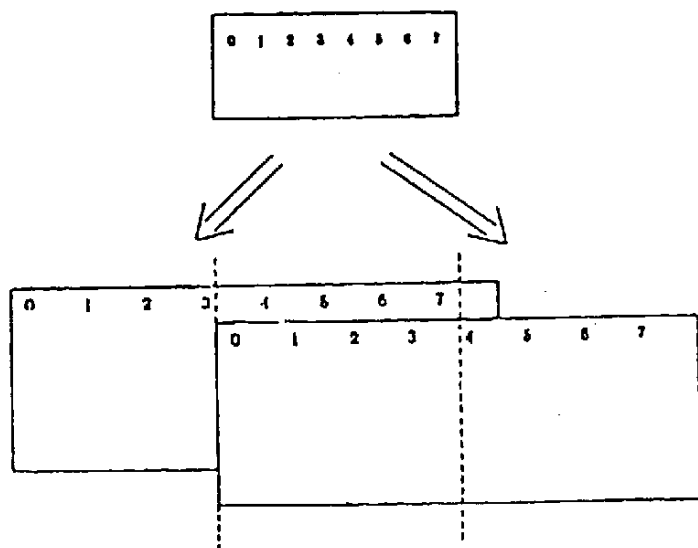


図5.15：(a) 光学的パーフェクトシャフルの原理[7]

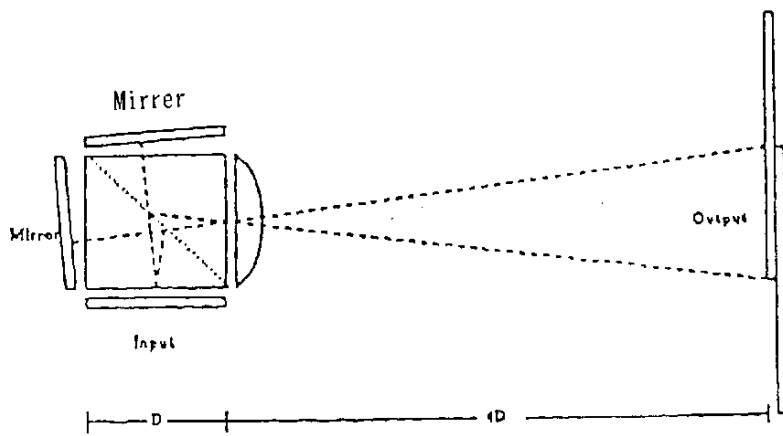


図5.15：(b) 光学的パーフェクトシャフルの配置[7]

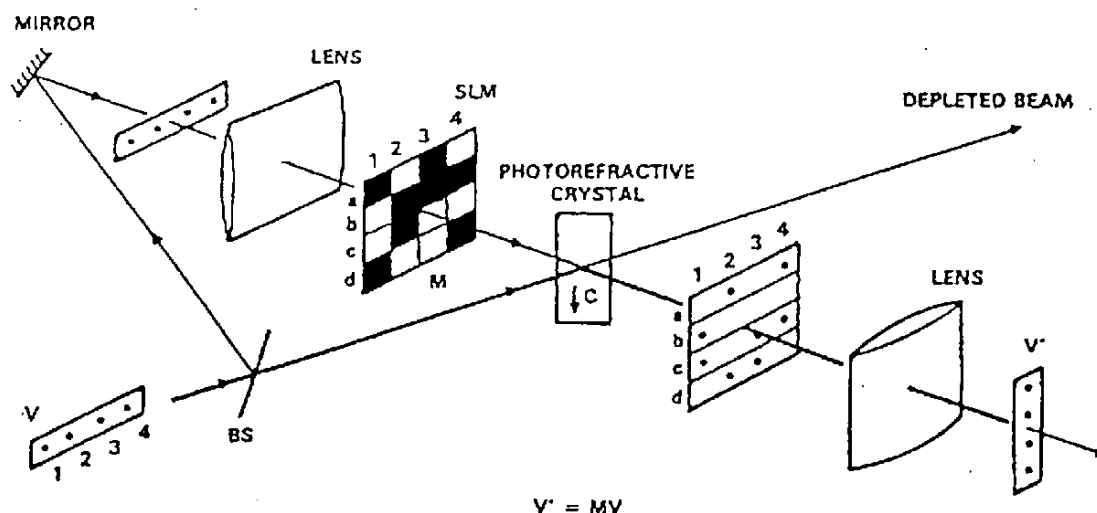


図5.16：フォトリフラクティブ結晶ダイナミックホログラムを空間変調器とした再構成型光配線の概念[8]

以上のべたように、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は機能とデバ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
SEL array	CGH	Micro lens array	OEIC
High Power LD (+Optics)	Photorefractives Ferroelectrics Semiconductors *Two wave coupling *Volume hologram *Phase Conjugation	Grating Mirror Optical fiber	PD array
LED array	Bistable Devices S-SEED LCLV PNPN Devices		
	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。ファイバ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、デバイスとも光ファイバ通信の延長にあり、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、特に小型のレーザー光源が必要になる。このような光源アレイを得る方法として次の2つがある。

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。スポットの強度ばらつきは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、グ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が要請される。またアレイ規模の向上は照射するレーザー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) 面発光レーザーアレイ

面発光レーザーアレイは各々のスポットを電氣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ー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 μm 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が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が必要である。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がない。この問題は、システム構成にど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が、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 μA 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]であるが、半導体レーザー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、面発光レーザーの機能面の充実という観点から、超

短パルス発生、多波長発振などが検討されている。これらの機能を活かせば、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。

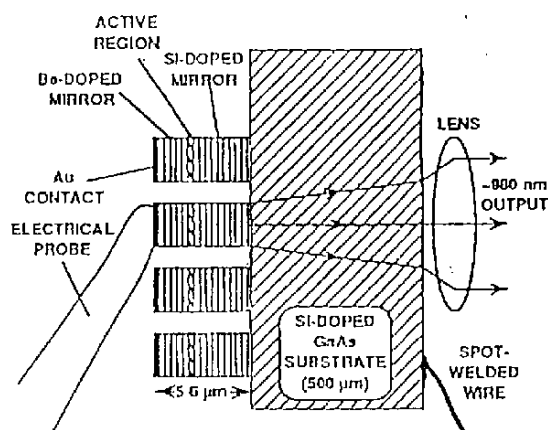


図5.17: InGaAs/GaAs 歪み量子井戸活性層面発光レーザの素子構造と基板面光取出し [11]

(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」を利用したものと「光吸収」を利用したものとに分けられる。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バンド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、Si/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。

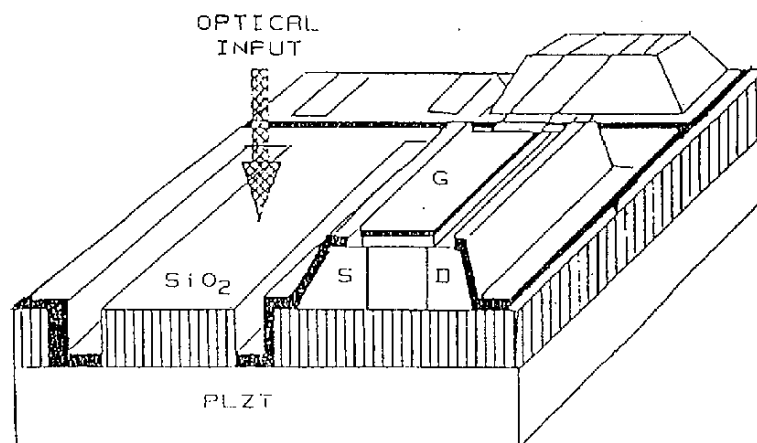


図5.18: Si I CとPLZT- SLMをモノシリック集積したSi/PLZT空間光変調素子 (SLM) [14]

Si I C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が達成されている。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、Siあるいは化合物半導体のI C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Siをレーザアニール法でエピタキシするという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が必要になる。それは、ハイブリッド実装、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シ技術、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が、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が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シュタルク効果(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ダイオード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次元光クロスオーバー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念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、ビームスプリッタ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)電子ビ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ができない。

ホログラムを光ディスク上に形成し、メカニカルにアド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ビ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が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結晶の探索が、VLSIプロセッサの配線を指向した実用的なダ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が、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。

前節までで述べたように、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がみられる。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できることが望ましい。

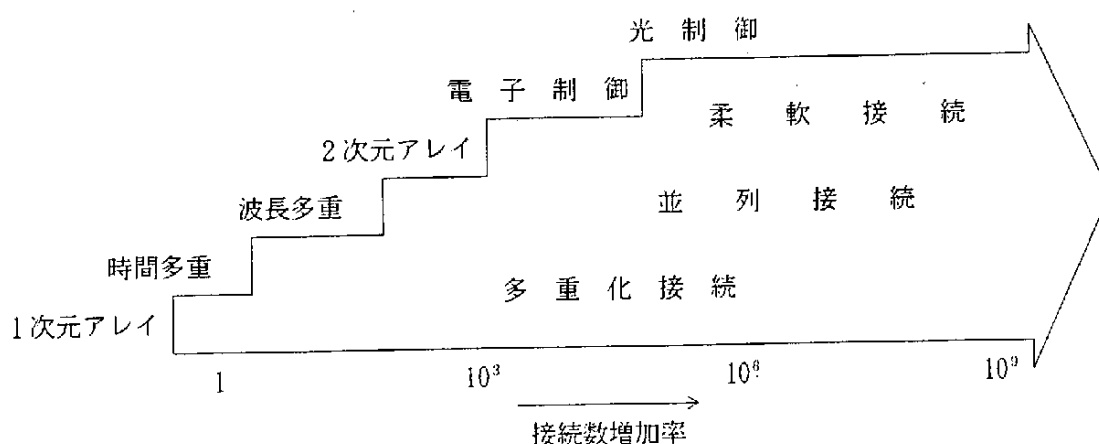


図5.19: 光インタコネクション開発の流れ

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が重要と考えられる。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が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が考えられる。さらにこの技術为基础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が極めて重要である。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が鍵となる。さらに、将来の光制御を用いる柔軟光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が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が望まれる。

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が必要であり、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が特徴的なものを表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が必要となるが、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が必要である。

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が必要である。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、光電子実装技術が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が、その研究はまだ緒に付いたばかりであり、今後様々な技術的観点からアイデアが創り出されることが肝要である。

さらに、光制御を用いた柔軟接続に向けては、光機能材料の開発がまず重要であり、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が進むことが望まれる。

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、成果が期待しにくい。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が十分行われ、相乗効果が現れる研究方法が採られることが重要である。

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	・超高速低消費電力光素子 ・7V化光素子 ・波長可変光源 ・超高速電子回路	・低消費電力2次元アレイ光素子 ・マイクロ光学素子 (レンズ, ミラー, ホログラム等)	・空間変調素子 ・チップ内OEIC	・光制御機能素子 ・マイクロ光学合波・分波素子 ・多波長光源
材料・プロセス技術	・ヘテロエピ ・量子井戸材料 ・非線形光学材料 ・集積 ・OEIC ・光機能素子 ・導波路集積	・高均一光 ・複合材料 ・微細加工	・電子材料 ・ヘテロエピ ・高性能液晶 ・非線形光学材料 ・OEIC ・光機能素子 ・導波路集積	・光機能材料・フォトフラクティブ材料 ・複合材料 ・微細加工
実装技術	・7V化光実装 ・超高速電子実装 ・高密度	・2次元アレイ光電子実装 ・高信頼性光電子実装	・多層ウェハ集積	・3次元光実装

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”が目指すものは“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。

並列デジタル光コンピュータが目指すものは、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広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が目指すものは、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広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が実現できる可能性がある。この点、逐次処理が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ドッキングさせることにより、さらなる情報処理技術の展開を図ろうとしている。並列デジ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、光が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が求められる。

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だ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が、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ジスタとで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、統合型コンピューティングが呈示する情報パラダイムの実現に寄与することもできない。

本報告書では、並列デジ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がりつつあるが、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い、後期において新情報処理が掲げるパラダイムのニーズに応じたシステムの実現を考えるのが妥当であろう。

JIPDEC