

MASTER

脳機能情報処理の先導研究

平成 9 年 3 月

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED
FOREIGN SALES PROHIBITED
NT

新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先 財団法人 新機能素子研究開発協会

脳機能情報処理の先導研究
財団法人 新機能素子研究開発協会
平成9年3月

184頁

調査目的

脳機能情報処理の先導研究は、人間の脳が行っている学習、記憶、連想、直感、価値 判断、意欲等に根ざした情報処理の工学的実現を目指すものである。この目的を達成するために、新たに開発する脳・生体機能観察測定技術を利用し、脳、神経情報、分子機能等を計測することによって、脳や生体に内在する情報処理機能の基本原理を明らかにする。得られた基本原理を基に脳機能デバイス、バイオコンパチブル素子や新しい知見によるアーキテクチャを半導体集積回路デバイス等で実現し、それらを融合することによって、直感・連想判断や情動・意欲等を人間に馴染み易い形で処理できる統合システム開発の基盤技術を確立する。

DISCLAIMER

**Portions of this document may be illegible
electronic image products. Images are
produced from the best available original
document.**

脳機能情報処理の先導研究

平成9年3月

新エナルギー・産業技術総合開発機構

委託先 財団法人 新機能素子研究開発協会

目 次

まえがき	(iii)
実施責任者（委員名簿）	(iv)
概要	(vii)
Abstract	(ix)
第1章 研究開発の概要	1
1. 1 脳機能情報処理の概念・目的	3
1. 2 研究開発の意義	4
第2章 脳型コンピュータの研究開発	7
2. 1 序 脳型コンピュータそのコンセプト	9
2. 2 脳の情報処理獲得の戦略（ブレインウェア）	19
2. 2. 1 脳の発生分化機構からみたブレインウェア	19
(1) 脳神経系発生分化の細胞・分子機構	19
(2) 神経回路の冗長性と可塑性	27
2. 2. 2 脳活性の制御機構と制御物質	33
(1) 視床下部ペプチドPACAP-38による海馬シナプス伝達の制御	33
(2) MAJOR BRAIN REGULATOR・生体アミンによる脳内シナプス数の調節機構	41
(3) 睡眠の制御機構と制御物質	48
(4) 大脳基底核と運動パターンの切り替え・保持	53
2. 2. 3 脳の振動現象— γ 振動のモデルとコーディングスキーム—	59
2. 3 脳型コンピュータその実現イメージ	68
2. 3. 1 神経細胞と人工神経素子モデル	68
(1) 神経細胞と人工神経素子モデル	68
(2) 神経素子モデルと学習則	75
2. 3. 2 大規模ニューラルネット・チップ	81
(1) 脳型コンピュータ用プロセッサ・チップ	81

(2) 7ビット 100万シナプスで完全結合した1000ニューロンシステム	93
2. 3. 3 情報工学における脳型コンピュータの位置づけとその役割	99
(1) 脳型コンピュータに何を期待するか	99
(2) 情報工学関連分野からみた脳型コンピュータ	101
2. 4 第2世代脳型コンピュータ	106
2. 4. 1 非平衡系としての立場からの情報科学	106
2. 4. 2 メモリベース・アーキテクチャの第2世代脳型コンピュータ	110
[附 1] 高次脳機能計測の現状と展望 (対談)	
ー機能的磁気共鳴描画(fMRI)を中心としてー	116
第3章 研究体制	127
第4章 むすび	131
Appendix	135
A. 1 先導研究 委員会	137
A. 2 「脳機能情報処理国際ワークショップ」開催報告	151
A. 3 海外技術動向調査報告	167
(1) センサーフュージョンと知能システムマイクロ技術	167
(2) ニューラルネットワークとイメージ処理および生成	177

まえがき

長い進化の過程のなかで、人間の脳が創造されてきた様子をたどると、脳の構造と働きの大きな枠組みを見て取ることができる。下等脊椎動物の脊髄と脳幹に、反射、複合運動、生得的行動の3種の機能系が生まれ、これを脳幹の一部、小脳、大脳基底核、大脳辺縁系の4者が調節し、統合するという図式ができあがった。

哺乳類になるとこれに加えて、大脳に新皮質が発達し、大脳感覚運動機能系が生まれた。さらに、霊長類になると大脳皮質に連合野が発達し、連合機能系が生まれた。こうして5つの機能系と4つの調節系の組み合わせによって人を含む高等動物の中樞神経系が組み立てられている。

これらの脳の各部分には多数のニューロンがつながり合った精緻な神経回路網がある。この神経回路網の構造と働きを調べ、モデル化する試みは反射系、複合運動系、小脳の適応制御装置としての働きについては成功しているが、他の構造についてはまだ十分ではない。ここに脳科学の大きな当面の課題がある。なかでも、安定装置と目される大脳基底核、生得的行動の目的性を評価して正負の強化を加える大脳辺縁系、思考の産としての連合野については、脳内の神経回路網の構造の詳細なデータをもとにモデル化する努力が求められている。

神経回路網にシナプス可塑性と多重構造を導入することにより、自己組織化し学習する能力を付与することができる。これがパーセプトロンやニューロンコンピュータの原理であり、小脳、大脳基底核、大脳辺縁核、大脳皮質の働きはそのような自己組織機能をもつ多層神経回路網の働きとして理解される。しかし、脳のすべての働きが同じように理解されるか否かは疑問である。特に、意識や創発の問題を考えるとときには、まだ未知の要素が脳の神経回路網のなかに隠されている可能性が高いと思わなければならない。

脳をモデル化して人工的な脳を創り出そうとする試みは、現在知られている回路網の構造、機能原理をもとにその働きの再現を図る方向と同様に、まだ知られざる構造、機能原理の発見に向けての努力が必要である。

(理化学研究所 伊藤正男)

「脳機能情報処理の先導研究」企画委員会

委員名簿

委員長	伊藤 正男	理化学研究所	国際フロンティア研究システム長
委員	田村 浩一郎	電子技術総合研究所	所長
	松本 元	電子技術総合研究所	首席研究官
	守谷 哲郎	電子技術総合研究所	超分子部長
	富塚 登	生命工学工業技術研究所	生体情報部長
	所 真理雄	慶應義塾大学	教授
	三浦 宏文	東京大学	教授
	相澤 益男	東京工業大学	教授
	阿江 忠	広島大学	教授
	浅井 彰次郎	日立製作所	基礎研究所 所長
	覧貝 博義	日本電気	基礎研究所 所長
	石川 元	富士通	基盤技術研究所 所長
	新田 恒治	松下電器	研究本部長
	前川 稠	三洋電機	筑波研究所 所長
	北村 幸造	シャープ	情報技術研究所 所長
	小林 利克	三菱化学	生命科学研究所 副所長

オブザーバー

中山 亨	機械情報産業局電子機器課	課長補佐
黒田 哲平	工業技術院産業科学技術研究開発室	研究開発官
尾沢 潤一	新エネルギー・産業技術総合開発機構	
	産業技術研究開発部	研究開発課長

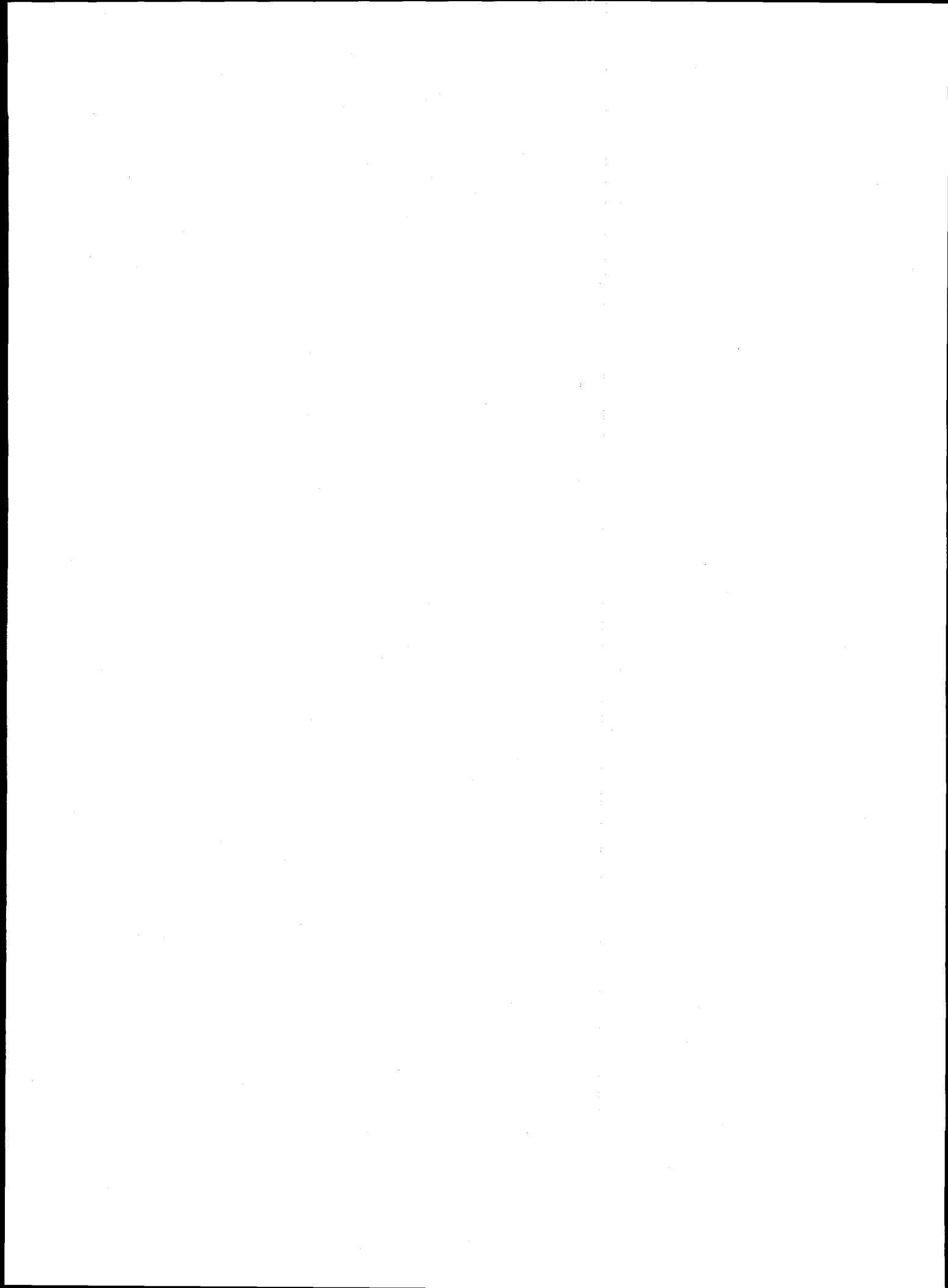
事務局

前田 祝	(財)新機能素子研究開発協会	専務理事
杉山 佳延	(財)新機能素子研究開発協会	研究開発部長
篠原 宏爾	(財)新機能素子研究開発協会	企画調査部長

「脳機能情報処理の先導研究」技術委員会

委員名簿

委員長	松本 元	電子技術総合研究所	首席研究官
委員	守谷 哲郎	電子技術総合研究所	超分子部長
	河野 憲二	電子技術総合研究所	首席研究官
	赤松 幹之	生命工学工業技術研究所	生体情報部 室長
	飯島 敏夫	電子技術総合研究所	超分子部 室長
	樋口 哲也	電子技術総合研究所	情報アーキテクチャ部 室長
	重松 征史	電子技術総合研究所	超分子部 主任研究官
	市川 道教	電子技術総合研究所	超分子部 主任研究官
	國吉 康夫	電子技術総合研究所	知能システム部 主任研究官
	相澤 益男	東京工業大学	教授
	大森 隆司	東京農工大学	助教授
	阿江 忠	広島大学	教授
	平井 有三	筑波大学	教授
	小泉 英明	日立製作所 中央研究所	主管研究員
	福西 宏有	日立製作所 基礎研究所	主管研究員
	岡島 健治	日本電気 基礎研究所	主管研究員
	山崎 敏正	日本電気 情報メディア研究所	研究専門課長
	川上 進	富士通 ペリフェラルシステム研究所	主管研究員
	竹谷 誠	松下電器 研究本部	主席研究員
	関口 達彦	三洋電機 筑波研究所	室長
	宮本 雅之	シャープ 情報技術研究所	主任研究員
	高橋 正身	三菱化学 生命科学研究所	主任研究員
	橋本 勇一	本田技研 和光基礎技術研究センター	室長
	杉山 佳延	(財)新機能素子研究開発協会	研究開発部長
	篠原 宏爾	(財)新機能素子研究開発協会	企画調査部長
オブザーバー			
	山名 早人	機械情報産業局電子機器課	通商産業技官
	小竹 幸浩	工業技術院産業科学技術研究開発室	研究開発専門職
	太田 秀幸	新エネルギー・産業技術総合開発機構	産業技術研究開発部 研究開発課長代理
	大屋 朝夫	新エネルギー・産業技術総合開発機構	応用技術開発室 主査
事務局			
	吉田 幸市	(財)新機能素子研究開発協会	研究開発部 調査役
	河野 永治	(財)新機能素子研究開発協会	企画開発部 主任研究員



概 要

21世紀に本格的に到来する高度情報化社会に対応するには、高精細動画通信システム超高速マイクロコンピュータ、柔軟な情報処理などハードウェアからソフトウェアに亘る高度で多様な研究開発が必要であるといわれている。

マルチメディア化された巨大な情報源から、インターネットなどを通して発信される情報の海の中であって、ユーザとしては真に必要な情報を抽出し、日常の生活やビジネスに活かす環境を求めている。このため、革新的な情報処理技術の開発が必要であり、特に、人とパソコンなど情報処理機器との間をつなぐマンマシンインタフェース、さらに、システムインタフェースなどの新たな観点からの研究開発が重要である。

こうした時代の要請に応えた新技術開発のブレークスルーを得る突破口として、この先導研究では人の脳機能や感覚・知覚機能に関する研究分野を取り上げ、これまでと全く異なったアーキテクチャを持つ情報処理デバイスの概念を探索し、システムに組み上げる基盤技術の研究開発を目指している。

これは、脳が本来行っている記憶、学習、連想、知覚、直感、価値判断など人間指向の情報処理メカニズムを工学的に実現しようというもので、具体的には脳機能情報処理の基本素子の概念設計と情報処理システムの開発指針を探っている。

・基本素子の研究：脳はアルゴリズムの自動獲得システムであり、これを素子レベルにブレークダウンして眺めると、神経細胞のもつ特有な性質、すなわち、超並列性と学習蓄積性を基本とした素子を工学的に実現しようとする研究。

現在、神経回路を模倣したプロトタイプ素子（1000細胞を完全接続し神経回路を1チップ化し100万接続の等価的計算をリアルタイムに実行する情報処理回路）を試作した段階で、1000細胞相当を並列接続した超高速の神経回路システムの動作を検証しようとするものである。

これは従来のコンピュータの性能指数に換算すると200MIPSに相当する。また、これを効率よく動かすソフトウェアの研究も検討している。

・脳の特有なシステム構築の研究：脳は学習によって、その環境に適応する行動を起こすための情報処理アルゴリズムを自動的に獲得する。言い換えれば、脳の神経回路網はアルゴリズムを記憶するメモリであり、脳はある種のメモリアーキテクチャ型コンピュータといえる。経験によって蓄積された膨大な情報量の中から最適な出力応答を素早く読み出すアーキテクチャが脳の情報処理の本質である。

この機構として、入力のおおざっぱに概念化し、仮説を立ててトップダウン的に立証する情報処理が巧みに融合し、必要な情報を早く取り出すという優れた出力応答性を併せもつ全く新しいアーキテクチャが考えられる。また、記憶を形成する機構は、マルチモーダルな感覚情報をいかに統合し、短期記憶が長期記憶に変換されるかを明らかにすることが重要である。

このような機構の解明には、最新鋭の光生理学や機能的磁気共鳴描画（fMRI）などの手法が開発され、使われては始めている。更に、感覚・知覚などで生じる多様な入出力情報のコーディングとデコーディングを明らかにし、脳内の情報表現に迫るとともに、脳機能によく対応できるインタフェース設計の指針を探っている。

本先導研究調査報告では、こうした新たな技術動向を踏まえ、脳機能情報処理の最終ターゲットと目すべき「脳型コンピュータ」を先取りする形で、この概念を提示し、研究開発の方向付けをした。

すなわち、実験的脳研究から生理学モデル、工学的モデルに導く方策として「脳の発生分化機構から見た脳機能情報処理（ブレインウェア）」、「脳活性の制御機構や制御物質」と脳研究での測定から得られた知見によりモデル化し、さらに計算論的神経科学により「脳の振動現象」を理解するため現実的なニューロンモデルからなる大脳皮質神経回路網のモデルを提案している。

また、これまで開発された大規模ニューラルネットチップ・システムの評価により学習性や処理の高速性が確認されているが、これら第1世代脳型コンピュータというべきシステムの更なる大規模化により、新しい情報処理システムの構築を示唆している。

次世代脳型コンピュータを創出するためには、いくつかの新しい発想に基づくアーキテクチャやそれを実現する素子・システムなどの研究開発が求められているが、情報工学での位置づけや実現像を描くことを試みている。

国際ワークショップ(International Workshop on Brainware)では「脳の情報処理(1)」「脳の情報処理(2)」「脳機能計測」「デバイス/システム」「脳型コンピュータ」「パネルディスカッション」及び「ポスター」7セッションで国内外の専門家による、この分野の最近の技術動向の講演があり、活発な討論があった。

海外技術動向はセンサフュージョン、知能システムマイクロ化技術、イメージ処理・生成等関連技術等について、専門家を米国に派遣し調査を行った。

脳機能情報処理の研究開発が目指す新しい情報システムは、基本的にニーズが極めて高く、期待もされているが、具体的な開発戦略が見えないかに考えられている。

しかし、この報告に掲げた成果をさらに積み上げ、工学的な応用を実現する事によって一気に進展が図れるに違いない。

本調査研究は国立研究所、大学、企業に属する研究者等で構成する「先導研究・脳機能情報処理」企画・技術両委員会で方針が審議され、外部の専門家の協力を得て実施した。

Abstract

In order to cope successfully with the highly integrated information society at the 21st century, it is said that excellent and various R&D, which themes range from hardware to software, such as high-definition television communication system, super high speed microcomputer, human friendly information processing, is required.

In the middle of the ocean of the information from the multi-mediated huge intelligence fountainhead through, for example, *internet*, users have been requiring the environment in which they could obtain their truly crucial information and utilize it to their daily life or business. So it is necessary to develop a new information processing technique, especially R&D of man-machine interface, which connects the human and the information processing device such as personal computers, and more over, system interface, must be executed from a new standpoint.

As one of the breakthrough to the new R&D which meet the requirements of the times, this Leading Research Committee (sendo kenkyu) focuses on the field of the function of the human brain, sense and perception, searches a new concept of information processing device which has a thoroughly different architecture from the one so far developed, aims R&D of basic techniques to build the new system.

This is an endeavor to realize industrially the human-like information processing technology such as memorization, learning, association, perception, intuition and value judgment, all of which were primarily performed in the actual brain. To be concrete, a conceptual design concerning the basic element of information processing peculiar to brain function, and a principle of development of the new information processing system, are investigated.

Study of the basic element: The brain is a system which gains the algorithm automatically. Breaking down it into the elemental level, the basic element, which has unique traits of neuron, i.e., super parallel processing characteristics and knowledge accumulating characteristics, is attempted to be realized industrially.

For now, a prototype element which imitates the neural networks is experimentally manufactured. A thousand neurons are completely connected and made the neural networks into 1 chip. The chip simulates a information processing network system of a million connections with real-time execution. It tries to test the performance of super high speed neural network systems which connects the 1000 neurons parallel with each other.

This deserves 200MIPS of the performance quotient of conventional computers. Software which efficiently arranges it is also investigated.

Study of building a unique system of the brain: The brain is said to obtain information processing algorithm automatically for well-adapted behavior to its environment. In other words, the neural networks in the brain are memory buffers to store the algorithm, and brain is a sort of the memory architecture type computer. The essence of information processing in the brain is architecture which read out quickly the best output from huge amount of information stored through experience.

A totally new mechanism is conceivably possible to perform it, that is, an architecture which have not only rough conceptualization of input information, skillful fusion of the information processes which test their hypothesis with top-down processing, but also excellent output

response which extracts required information quickly. Moreover, as for a mechanism of memory formation, it is important to make clear how it integrate the multi-modal sensory information, how the short term memory is converted to the long term memory. To investigate these, the newest technologies of optical imaging and / or functional magnetic resonance imaging (fMRI) are to be developed and applied. Further, encoding and decoding of various sensory and perceptual input and output are investigated to approach to the information representation in the brain, and a principle of interface designing fully corresponding to brain function is explored.

This report of the Leading Research Committee has taken into consideration these technological movements, presenting the concept which takes in advance in "Brain Computer", which is the final target of brain function oriented information processing, and making direction of R&D.

That is, for formation of biological and industrial models from experimental brain studies, the strategies of learning and learning control for the brain to acquire the algorithm automatically (Brainware) are studied based on knowledge from measurements of brain activities which enable to make such models. Furthermore, computational neuroscience proposes neocortical neural network models which construct realistic neuron models to understand oscillation phenomena in the brain.

Besides, evaluation of large scale neural net chip system so far developed confirms its ability to learn and process at high speed. Further enlargement of the scale of the Brain Computer as the first generation suggests construction of a new information processing system.

To yield next generation of the Brain Computer, it is required to research and develop architectures founded on some new concepts, or elements and systems which realize them. Positioning the issues in information engineering field, and drawing their realizable images, are tried.

At the International Workshop on Brainware, there were lectures on recent technological movements in this field by Japanese or foreign specialists in 7 sessions, namely, "Information Processing in the Brain (1)", "Information Processing in the Brain (2)", "Measurement of Brain Activities", "Devices and Systems", "Brain Computing", "Panel Discussion" and "Poster Session", and active discussions were brought about.

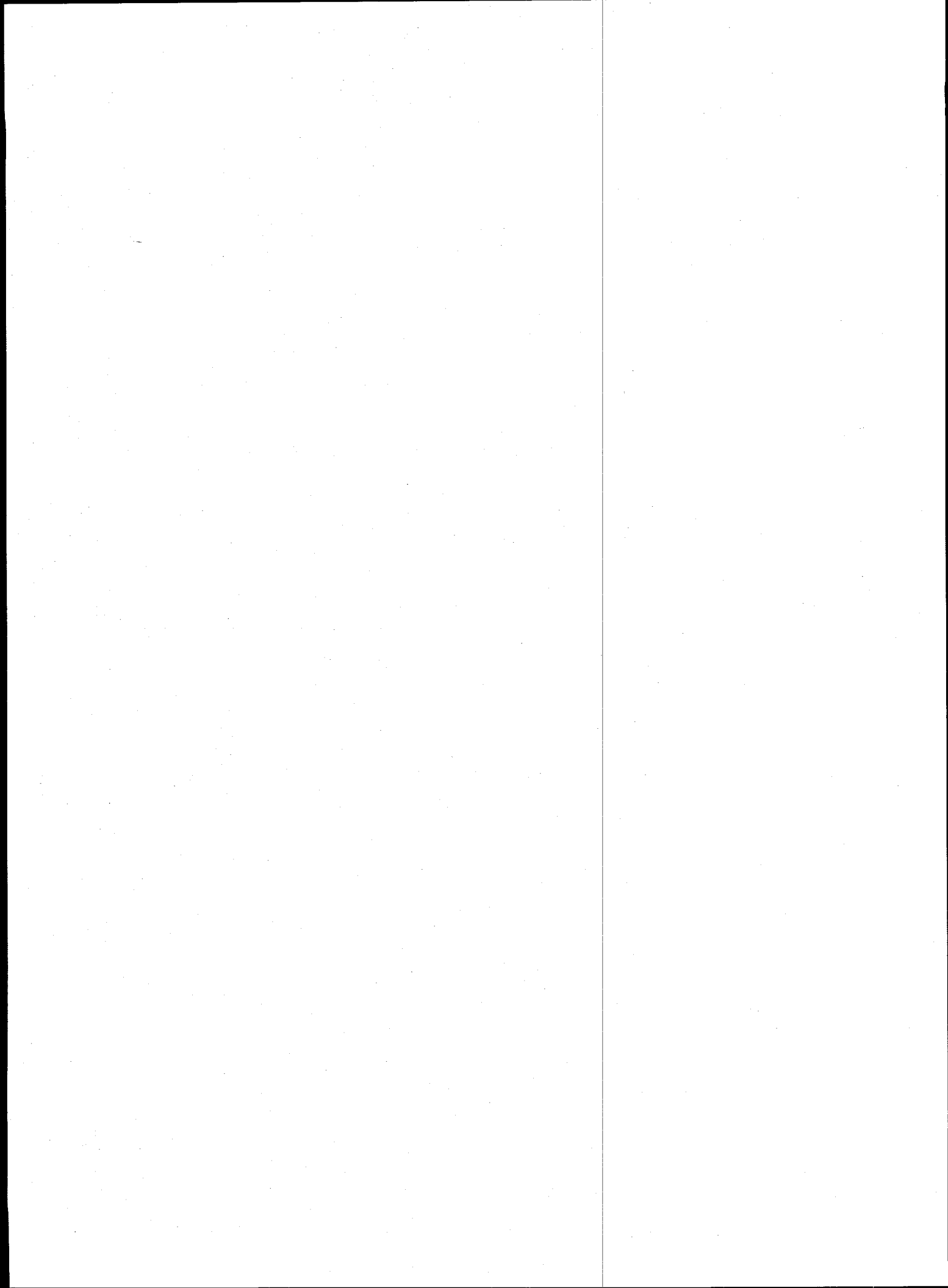
Foreign technological movements about sensor fusion, micro-technology of intelligence system, image processing and generating, was investigated by dispatching specialists to US.

A new information system at which the objective of the R&D for brain function oriented information processing is desired basically very highly and anticipated enthusiastically, yet thought to be lacked a concrete developmental strategy.

However, it must produce rapid progress to stack more of the outcomes reported here and to realize engineering application of them.

This research has been deliberated its line by planning and technological committees of Leading Research Committee - Strategies for Automatic Algorithm Acquisition in the Brain (Brainware) - consisted of researchers at national research institutes, universities or companies, and partly performed by the agency of cooperation with outside specialists.

第1章 研究開発の概要



第1章 研究開発の概要

1.1 脳機能情報処理の概念・目的

現代は情報の時代であり、良質の情報無しに我々は生きることができない。人にとって真の情報とは脳の活性化に関係する事柄なので、とりもなおさず脳と情報の係わりを明らかにする事が第一に必要なとされる時代でもあり、脳が本来行っている記憶、学習、連想、直感、価値判断、意欲等の人間指向の情報処理技術を具体化することが不可欠となる。

近年のマルチメディア等の加速的な発展に代表される高度情報化は、産業、経済だけでなく、さまざまな形で複雑に生活、社会に影響をおよぼしている。したがって、21世紀に本格的に到来するすることが予想されている高度情報化社会においては、複雑で超多角的かつ膨大な情報の洪水をいかに人類にとって快適で役立つ情報として利用できるかが重要な課題となる。これを解決するためには、新しい情報処理技術の確立が不可欠であり、人間の脳が本来行っている記憶、学習、連想、直感、価値判断、意欲等と云った意識等に根ざした情報処理を工学的に実現する新しい情報処理技術、すなわち本研究開発課題である脳機能情報処理技術（ブレインウェア）の確立が不可欠である。この脳機能情報処理は、脳科学、生物・遺伝子工学、情報科学、デバイス・物質工学等の広範囲の学際分野との融合とそれによるシナジー効果によって情報処理技術の新天地を拓くことである。

したがって、脳機能情報処理技術（ブレインウェア）の研究開発では、脳が得意とする記憶、学習、パターン認識、連想、直感による判断等の高次の脳機能を先端的手法（脳神経活動の計測技術等）によってメカニズムを解明すると共に、脳生理学、物質工学、およびバイオ素子研究開発プロジェクト等の研究成果に基づいた工学的モデル化及びデバイス・システムアーキテクチャを創出し、情報処理アルゴリズムを自動獲得することの特徴とする脳型コンピュータに代表される全く新しいシステムや人間との高度なインターフェイスを容易にする知覚・感覚入出力制御等の関連のデバイスおよびシステムを実現することによって、クオリティーライフの向上に役立つ新しい情報処理技術を確立することを目的とする。

1.2 研究開発の意義

本研究開発によって産業面および学術研究面に多大な意義がある。

(1) 産業上の意義

産業上の意義として、脳機能デバイスおよび関連システムの研究開発は、人に馴染みの良い「脳型コンピュータ」の研究開発を通し、大規模問題に対しても対処でき、かつ柔軟な情報処理システムの開発が可能になる。これらは、従来のノイマン型コンピュータの不得意な情報処理を補い、これまでの情報化社会の問題点であったいわゆる「無機化」に歯止めをかけ、「第二情報革命」として重要な役割を果たすと予想され、エレクトロニクス技術と人間環境技術との融合化に大きく寄与する電子・情報・通信産業部門や医療福祉産業部門における新産業の創出を促す。

具体的には、近年の情報処理量の爆発的な巨大化は、半導体集積回路の高集積化、メモリの大容量化、高速化等に支えられたハードウェア処理能力の向上に依存し、結果としてそれに呼応してソフトウェアの巨大化を招いていることから生じる技術的障壁を打開する。また、ハードウェアを構成する集積回路でも、高集積化、高速化に伴う発熱量の増大、微細化に伴う配線、トランジスタの容量や結線数の増大による遅延等の問題による技術的限界がその高性能化を阻害する要因となりつつあることに対しても大いに貢献しうる。

さらに、現在の情報処理機器は、その中核をなすMPU、DSP、メモリ等の高性能化が図られて、計算処理能力は時代と共に飛躍的に向上したにもかかわらず、人間が行っている視覚、聴覚、臭覚、触覚、味覚等の知覚・感覚情報を統合した記憶、学習、パターン認識、連想、直感、判断等に対応するための根本的な展開が図られていない。このような状況のもとに、人間、生体が行っている情報処理を工学的に利用する新たな情報処理技術の創出が各方面から切望されている。脳機能情報処理技術（ブレインウェア）はこれに応える研究開発である。本研究開発では、高次脳機能の解明・モデル化によるアーキテクチャ技術、デバイス・システム化技術、半導体技術ばかりでなく広く物質工学等に基盤を置く人間とのインターフェイスに心が配られたデバイス化・システム化関連技術等の確立が大きな目標となる。

さらに、高次脳機能の解明・モデル化によるアーキテクチャ技術、デバイス・システム化技術の研究開発は、脳型コンピュータに代表される情報処理システムの革新的分野を切り開くことが期待されるが、これは人間とのインターフェイスが容易な関連デバイスおよびシステムの研究開発、即ち、半導体、有機分子等の広範囲な材料工学を基礎とした、知覚・感覚入出力デバイスおよびシステム等関連技術の革新と緊密に連携している。

現在、デバイス技術の中核をなす半導体素子製造分野にあっては、新たなアーキテクチャの設計・開発技術はわが国が米国に比べ、特殊な分野を除いて立ち後れが指摘されている。今後、脳機能情報処理の研究開発による新たな研究成果は、デバイス設計・開発分野で独創的な技術

開発を生みだし、新規産業の創出に繋がることが期待されるため、わが国の独創的かつ世界的規模で影響力を持つデバイスの優位性を確保する上でも重要である。また、脳、生体系の機能解明から生み出されたアーキテクチャ、モデル化は、従来のシリコン技術の中核とした半導体ばかりでなく、誘電体、分子機能材料等をベースとした様々な分野で利用可能なデバイスおよびシステム関連技術の開拓を促進することが期待される。さらに、知覚・感覚デバイス、運動制御デバイス・システム等の関連技術開発は、現在、未開拓な大きな分野であり、家電機器の改革、生産技術の変革、食品産業等、広範囲の分野に波及することが期待される。脳機能情報処理技術（ブレインウェア）の変革は、人類にとって快適で真に役立つ新しいマルチメディア等の情報処理技術の変革をもたらし、新規産業創出、雇用の促進をもたらすことが可能となる。

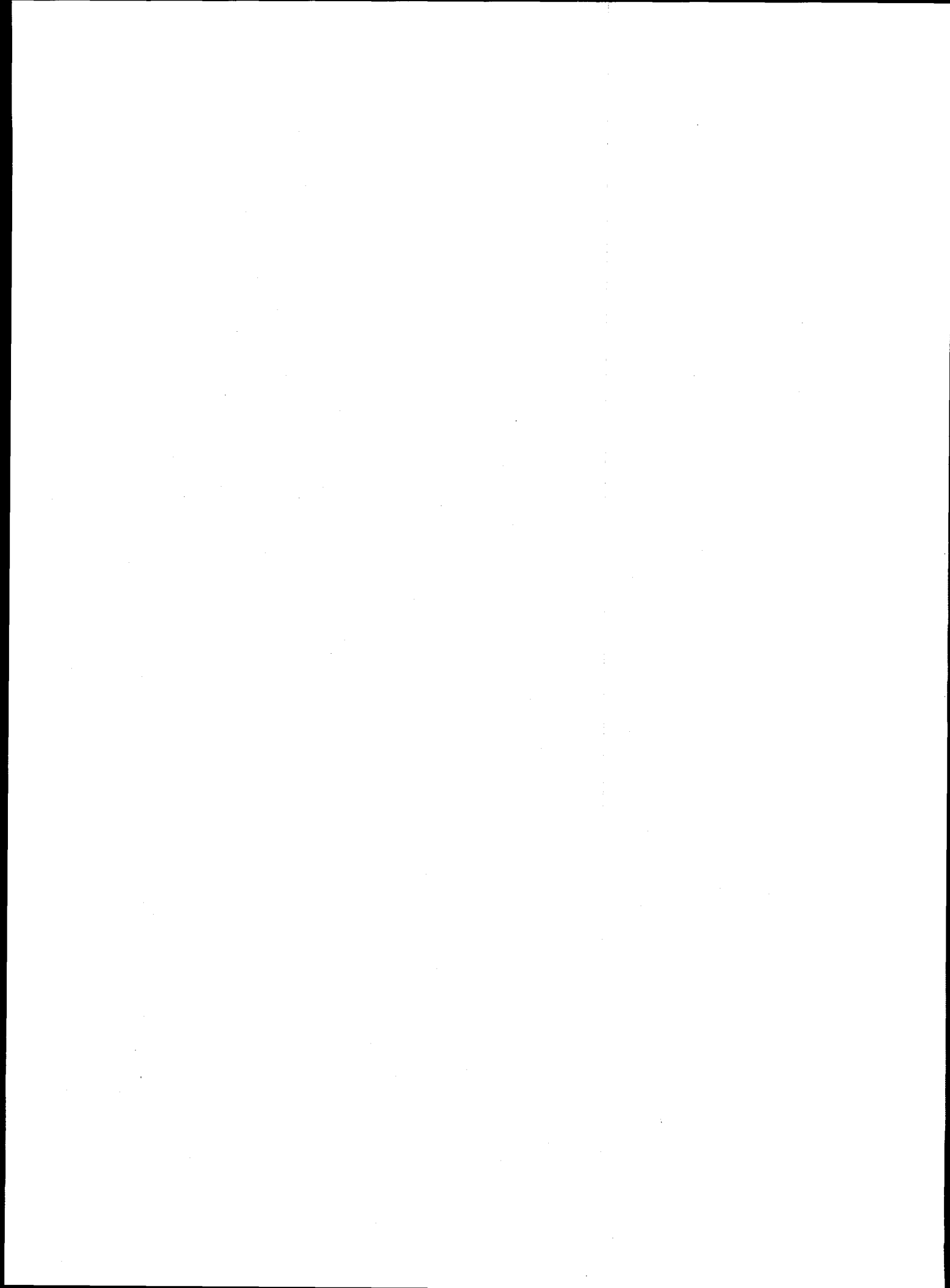
このような脳機能情報処理に根ざした新たな情報処理アーキテクチャの創出とデバイス・システム等の技術革新をはかることによって、脳機能情報処理技術（ブレインウェア）は、マルチメディア等の情報処理機器ばかりでなく、エレクトロニクス関連機器から家電・健康・医療診断機器等の広範囲の技術分野へ波及、実用化が図られ、次世紀の社会生活の向上に多大な貢献を果たすことが期待される。

（２）学術研究上の意義

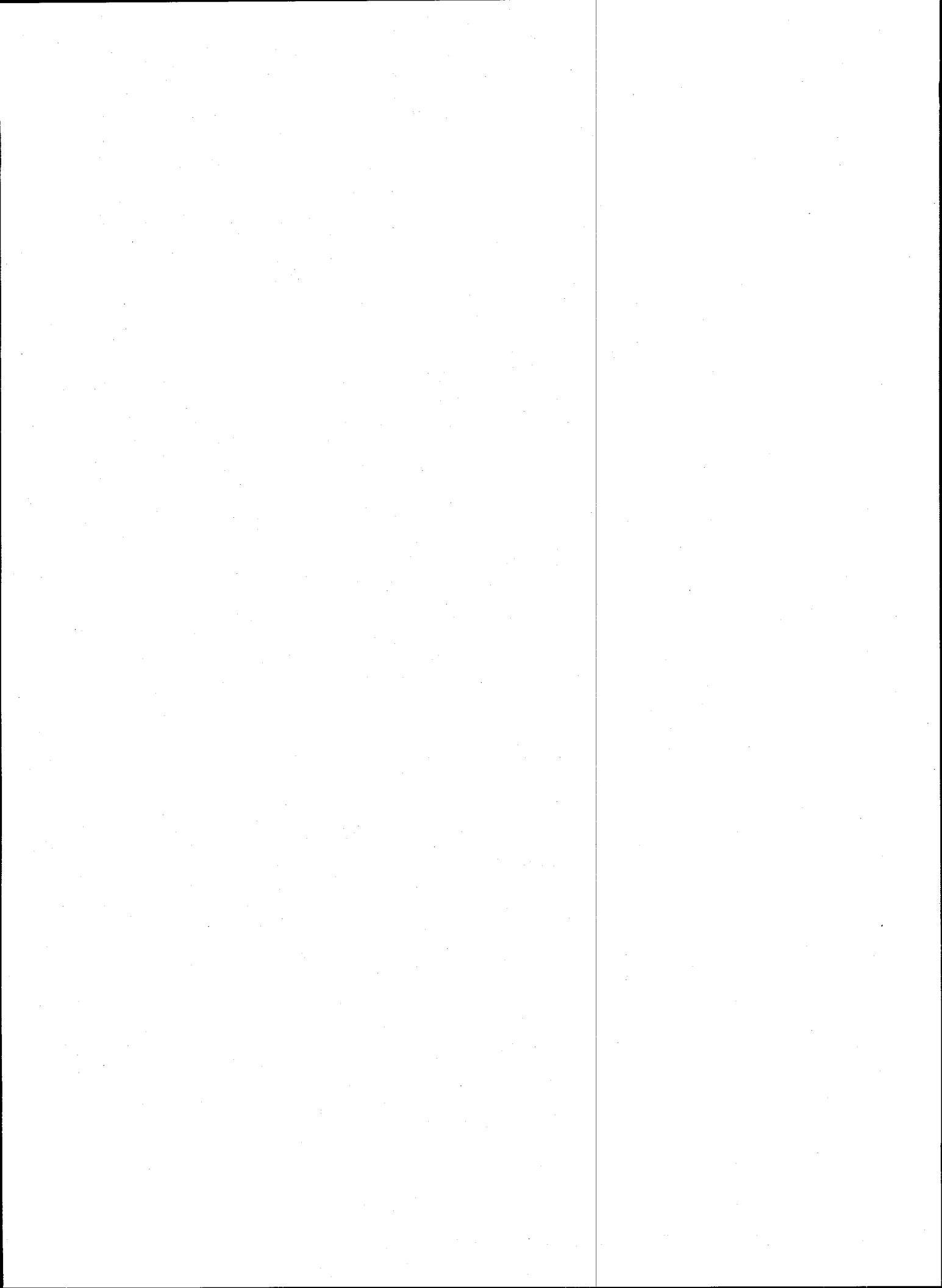
脳機能を工学的創意を加え再構築し、脳型コンピュータの開発を行うことは、逆に脳を機能面から理解することになり、脳の科学研究に多大な貢献をし得る。この事は鳥に対する学術研究と飛行機開発との関係を考えると良く理解できる。我々は空を飛ぶ工学産物としての飛行機を開発することによって空を飛ぶことの原理として揚力と推進力が必要であることを明らかにできた。飛ぶための原理の解明は決して鳥の研究からだけで得られた訳ではないのである。従って、脳機能の工学的再構成物としての「脳型コンピュータ」の開発によって脳の情報処理の原理を明らかにすることができ、脳の工学的アプローチは脳の学術研究に多大な貢献をする。

さらに、脳型コンピュータは脳としシステムが同型であることが予想されるので、脳研究から得られる多大な科学・学術データから有効情報を抽出、分析、統合するためのツールとして極めて有効に使われる。生物研究の進歩は測定手段の進歩・向上に支えられてきた。脳のような巨大システムの科学的理解には、脳という巨大情報系を扱えるに相応しいシミュレータとしてのコンピュータが必須であり、脳型コンピュータはこのための道具となり得て、脳の学術研究の進展に多大な貢献をもたらすだろう。

（電子技術総合研究所、松本 元）



第2章 脳型コンピュータの研究開発



第2章 脳型コンピュータの研究開発

2.1 序 脳型コンピュータそのコンセプト

脳は情報処理の仕方（アルゴリズム）を自動獲得するシステムで、工学的にはメモリーベースアーキテクチャの非フォンノイマン型コンピュータである。脳型コンピュータがアルゴリズムを自動獲得する基本素子プロタイプは、学習性と超並列性を兼ね備えたシリコン半導体LSIチップとして現在工学実現されつつある。さらに、将来は、脳型コンピュータは、従来のプロセッサ・ベース・アーキテクチャのフォンノイマン型コンピュータと同様に計算汎用性を持ちながら、柔軟な情報処理を行うことができるようになるなど、従来のコンピュータと相補的に新しい情報世界を拓くだろう。

ここでは、脳型コンピュータがアルゴリズムを自動獲得し、その獲得するアルゴリズムの目的・評価も自動決定できる戦略（ブレインウェア）を脳そのものの研究によっても明らかにすることにより、実用システムとしての脳型コンピュータを研究開発する努力とその過程について紹介する。

（1）“脳の理解”への2つのアプローチ

脳は情報処理のアルゴリズムを自動獲得するシステムである。このため、脳が獲得したアルゴリズムを分析的に研究し、そのアルゴリズムを解明することで“脳を理解する”というアプローチがある。脳の高次機能の研究に代表され、また現在の脳神経科学の生理研究の大部分で採られているアプローチである。このアプローチの流れによる“脳を創る”工学努力を脳の計算理論¹⁾が支援する。この工学努力によって創られる脳の実体は、現在の（プロセッサベースアーキテクチャのノイマン型）コンピュータそのものであるが、このコンピュータのソフトウェアを作るとき脳の分析研究が解明したアルゴリズムがモデル化されソフトウェア化のために大いに活用されるのである²⁾。

これに対し、脳の情報処理のアルゴリズム自動獲得の戦略（この戦略のアルゴリズムは遺伝情報が獲得したもので、これをブレインウェアと呼ぼう）を解明し、このブレインウェアをもとにアルゴリズム自動獲得の工学システム（この工学システムを脳型コンピュータと呼ぶ）を再構成することによって、“脳を理解する”という脳の構成的研究アプローチがある。この研究アプローチは、鳥が空を飛ぶことができるという機能に着目し、空を飛ぶことの工学産物としての飛行機の研究開発と比べることができよう。この研究開発から、空を飛ぶための原理として揚力と推進力が必要であることが判り、この原理を知ることによって、鳥そのものの研究が明らかにした構造や機能に関する分析研究がさらに深められる。脳型コンピュータは、脳をまさに

工学的に再構成するので、これによって、例えば顔パターン認識が行えるコンピュータが開発されたとしても、なぜ認識できるのかのアルゴリズムはすぐさ判らない。脳もそうだからで
ある。しかし、脳型コンピュータ開発することによって、脳型ンピュータが獲得したアルゴ
リズムを分析すれば、脳が獲得するアルゴリズムの理解に大い設立つことになるので、脳の
分析研究に資することができる。さらに、脳の構成的研究は脳という情報処理システムの発
現の特異性を明らかにするので、脳の情報処理システムとしての特異性の現象的顕れである
“心”について、脳の立場から理解する道を拓くことになるう³⁾。

(2) 脳型コンピュータ：脳とはどういうコンピュータか

脳のコンピュータイメージは次のようなものとする^{3, 4)}：脳は学習によって情報処理のアルゴリズムを自動獲得する。すなわち、脳という表引きテーブルに答をあらかじめ用意する。入力情報は、脳にある答（脳があらかじめ用意したアルゴリズム）の中からどれを選択するかを検索する情報として用いられる。脳はこの検索のために、入力情報の粗い意味概念を把握し、その結果に基づき、入力情報を評価し、出力することが必要とあれば出力する。出力すると学習効果が生じ、アルゴリズム（答）の変更が起こり得る。

脳のこのコンピュータイメージは、脳はメモリベースアーキテクチャの非フォンノイマン型コンピュータである（第2.1-1図）、ということである。これに対し、現在商用のすべてのコンピュータはプロセッサベースアーキテクチャのフォンノイマン型コンピュータである。後者は、人がコンピュータにプログラムを与えることによって、情報処理のアルゴリズムが与えられ、その命令に忠実に従って情報処理を行うシステムである。プログラムに書いてあることはその通りに実行するが、プログラムに書いていないことには全く対応できない、という意味で“固い情報処理システム”である。このコンピュータはチューリングマシンであり、計算汎用性が保証されているが、このために必要なことはプログラムという形でマニュアルを完備することである。このため、曖昧で不完全な情報をもとに情報処理を行うことの多い実社会への対応や不測の事態に対する危機管理などを現在のコンピュータで行うことは極めて難しい。人工知能が実現しない由縁である。これに対し、前者はいわばプログラムやデータを自動獲得するので、プログラムを与えなくとも動くことからチューリング機械を超えている。さらに、入力情報から出力することが必要と判断すれば、何らかの答を選択し外部状況に適宜に対応するので、“柔軟い情報処理システム”である。脳型コンピュータは、従って、脳と同じように高度な知能も獲得でき、曖昧で不完全な情報に対する実社会や不測の事態への対応が行える。脳型コンピュータの情報処理に要する時間は、答の検索に要する時間で決まる。このことが、数10ミリ秒の神経細胞という素子を用いながら、脳での高次機能情報処理（例えばパターン認識など）が数10ミリ秒まで高速に行い得る由縁である。ここで注意しなくてはならないのは、

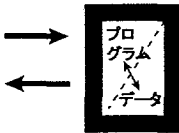
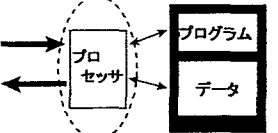
脳がメモリベースアーキテクチャである、という時のメモリは、アルゴリズムの形成・保持という意味で、しかもこのアルゴリズムは出力され使われると変更することができる能動的なものであることである。これに対し、従来のコンピュータのメモリはデータの貯蔵であり、受動的なものである。

脳型コンピュータは柔軟な情報処理が本格的に行える初めての工学システムであるのみならず、次の特徴を持つ：（１）基本的にはプログラムは自動形成されるのでプログラム作成に対する負担が著しく軽減される、（２）答を検索して出力するだけなので、極めて超高速情報処理が行える、（３）ハードウェア開発としては全く同じ基本素子を開発し、大量に接続すればよいので極めて日本的産業に適合し、これによってプロセッサの開発で従来米国などから遅れを一挙に回復し、凌駕でき、さらに（４）大規模で複雑な問題に対しても階層化で積み上げてゆくことができるので、ソフトウェア危機を解消できる。脳型コンピュータの開発は本格的な人工知能の出現を可能にし、実世界対応の情報処理が本質的に可能となる世界初のコンピュータとなろう。

（３）ブレインウェア：アルゴリズム自動獲得のアルゴリズム

脳の情報処理のアルゴリズム自動獲得の戦略（アルゴリズム）としてのブレインウェアは、学習性と学習制御性である。学習性は神経細胞の基本的性質として備えられており^{4, 5)}、学習制御性は脳の二重構造として表現されている^{4, 6)}。共に遺伝情報が獲得したアルゴリズムである。この意味で、ブレインウェアは遺伝情報が自動獲得したアルゴリズムである、といえる。遺伝情報のアルゴリズム自動獲得のアルゴリズム（ゲノウェアとも名付けるべきもの）を考えるには、従って生物が非線形非平衡系（開放系）であるという立場からの考察が重要であろう³⁾。

脳：メモリベース・アーキテクチャ 非フォンノイマン型コンピュータ

脳：メモリベースアーキテクチャ	プロセッサベースアーキテクチャ (フォンノイマン型コンピュータ)
 メモリ(能動的)	 メモリ(受動的)
プログラム・データの自動獲得	情報処理の目的と手続きを 人がプログラムとして与える
メモリの検索時間＝出力時間	逐次処理： 演算時間＝素子の速度×ステップ数
柔軟な情報処理 入力情報に対し出力する事が 必要とあれば適宜に対応できる 計算汎用性があると思われる 脳が第1次的に価値あると判断 する事柄に対する完全な処理シ ステムを作る	固い情報処理 プログラムに書いてあることしか 反応しない 計算汎用性が保証されているが そのためにマニュアルを完備する ことが必要とされる
大規模問題 メモリを階層構造化し追加学習 能で対処	大規模問題 ソフトウェア開発に対する負担増 (ソフトウェアクライシス)
ハードウェア：単一の基本素子だけ で	ハードウェア：各種プロセッサとメモリ
低消費エネルギー：脳の必要な 領域だけ活性化させるだけ	消費エネルギーの増大：プロセッサ の高速化に伴って付随する問題点

第2.1-1図

① 学習性

学習効果とは神経細胞間での情報伝達効率の変化であり、変化の方向は強化または減弱のいづれかである。学習効果は、神経細胞から出力するなどの強い活動が生じた場合に生じる。神経細胞が入力を得たにも拘わらず強い活動を生じるに至らなかったとき、入力を得たシナプス部位には入力を得た痕跡が、時間と共に減衰するが、ある特定の時間保持される。その後、この細胞が強い入力刺激を得て細胞にインパルスが発生したとすると、このインパルスは樹状突起や細胞体へ能動的に逆行的あるいは順行的に伝播することがあるので、このインパルスが伝播した部位にあるシナプスに残留する痕跡値がある閾値(h_1)を超えているとき、このシナプスは強化され、痕跡値が h_1 以下でもう1つの閾値(h_2)を超えているとき、そのシナプスは減弱される、と考える⁶⁾ (第2.1-2図)。

神経回路は入力信号により情報処理をすると同時に、回路の機能自体を学習により更新し、結合係数の関係の中に経験として記憶する。したがって、神経回路の学習・記憶とは、入力信号により神経細胞が活動応答をしたとき結合係数をどのように更新するかという学習則に依存しているともいえる。

従来、ニューラルネットワークで一般的に用いられたバックプロパゲーションなどの学習則は、必ずしも生理的な知見から導かれたものではない。そのため脳型情報処理のシステムを新しく構築しようとするとき、もっと神経生理的な仕組みから導かれる実際に近い新しい学習則が必要となる。それをもとに神経ネットワークを自己構築する道が開けることになる。

一方、時間・空間情報が神経系にどのような形態で記憶されているかと考えたとき、三次元の空間座標ともう一つの次元として時間座標(時刻)の情報を脳神経回路にそのまま記憶する事は出来ない。したがって、脳神経系は時空間情報を自らの回路の中に取り込める学習則を用いて、内部表現に変換し記憶を形成していると考えられる。そこで時間の概念を日常生活の中でどのように記憶し再起しているかを考えると、物事発生の時刻を直ぐに想起する事は非常に難しいことが分かる。例えば、朝起きてからの出来事を発生順序に想起できても、それぞれの発生時刻を正確に想起する事は出来ない。ただ、時計という計測手段を持っていて物事と時刻を関連付けて記憶したとき初めて出来事発生の時刻を想起できる。したがって、物理的な時間の概念とは異なる時間の概念が脳内表現として取り入れられなければならない。

脳神経系の情報処理を考えると、同時に起こる空間的な相互の情報処理にもまして、物事の起こった時間の順序関係が、非常に重要であることが分かる。例えば、条件学習のように、ある刺激CS(音や光)が入力したあと、次の刺激UCS(エサや電気ショック)が入力する学習をすると、その後では、音刺激CSのみでエサ刺激UCSを予想した行動を起こすようになる。したがって、脳神経系の時間の脳内表現においても、物事の発生の順序関係を記憶として蓄積するものとの概念が採用されるのが自然であろう。

最近の神経生理によると、学習・記憶に関する神経細胞レベルの実験成果から、入力刺激によ

って細胞間の結合係数の変化が長期的に増強(LTP)されたり抑圧(LTD)されたりすることが、学習の重要な役割を担っていることが分かってきた。この生理的結果と上記の時空間情報の脳内表現を考慮した神経回路素子の学習則を次に述べる。

生理学的に無理なく考えられる学習則には、有名なHebbの学習則がある[11]。それによると入力と出力が同時に発火したときに結合係数 W が増加するという法則である。 j からの入力を $X_j(t)$ 、 i の応答を $Y_i(t)$ とすると、次のように表わされる。

$$\Delta W_{ji} = c \cdot X_j(t) Y_i(t) \quad \dots\dots (4)$$

ここで c は学習速度である。ただし、これらの学習が意味を持つのは、入出力が同時刻に生じるかどうかであり、前後関係の時系列を学習するためには工夫が必要である。

生理的な実験から、入力信号による活動電位が集積してシナプス部をある程度脱分極することでNMDA受容体のチャンネルが開き内部 Ca イオンの濃度を高めることが、結合の長期変化に影響をあたえるものと考えられている。この入力の影響が Ca イオン濃度としてシナプス刺部分にしばらく残ることを学習則に取り入れ、入力を時間的に集積し漏洩する要素を入力履歴値 $H(t)$ として、次のように定める。

$$H_{ji}(t) = X_j(t) + qH_{ji}(t-1) \quad \dots\dots (6)$$

ただし、 q ($0 < q < 1$)は履歴の減衰定数である。この入力信号の時間的な履歴値が各シナプスでしばらく保持されていると仮定することによって、時間要素を考慮する学習則へと発展できる。

入力履歴値を用いてHebb学習則を修正すると、入力依存性と出力依存性の二つの学習則が考えられる。入力履歴値が有るとき入力があると結合の強化が起こる入力依存型学習則は、時間順序の正しい学習ができず、出力依存型学習則がモデルとして好ましいことが分かった。我々の提案する出力依存型学習則とは、第2図に示すように、入力の履歴値が各シナプスに保持されていて、次の入力で細胞が発火するとその出力発火信号が細胞内を逆方向にシナプスにも伝わり、出力に依存した結合係数の増強が起こるという解釈である。これを式で表わすと次式になる。

$$\Delta W_{jh} = c \cdot H_{jh}(t) Y_h(t) \quad \dots\dots (8)$$

この方法により、出来事間の関係を先に発火した細胞から後に発火した細胞への結合を強化するように学習できる。したがって、時間順序を非対称な結合係数の形で記憶して、先の入力から次の出来事を予測する再起読み出しが可能となる。この時系列学習法から時間情報の内部表現は、結合係数が非対称な形で時間順序が保たれた記憶回路を構築と解釈できる。

これを生理的な表現にすると、入力信号の履歴が各シナプスに Ca イオン濃度のような形で保持されていて、そこに強い刺激で細胞が発火するとその発火の信号が樹状突起を逆伝搬して

各シナプスに伝わり、時間相関的な履歴値に応じて結合係数を変化すると解釈する。さらにCaイオン濃度がある値より低いと、結合の強化でなく逆に減衰を起こす事も生理的に確かめられている。このことから学習の閾値を設け、入力履歴値の大きさにより減衰も考慮した学習則が導かれる。

発火したi細胞での学習は、次式のように示され、

$$\Delta W_{ji} = c_{ji} \cdot (H_{ji}(t) - s_1) Y_i(t) \quad \dots\dots (9)$$

ただし、s1は学習の増強／減衰の閾値である。また、変化しない第二の学習の閾値s2(s1>s2>0)も考る。履歴値に対して結合係数がどう変化するかは、履歴値Hが、s1以上では時間相関が強く増強となり、s1と学習抑圧閾値s2(s1>s2>0)間のとき時間相関が曖昧として、結合係数の減衰として働くこととする。履歴値がs2以下の場合は、ほとんど相関が無かったとしてWjiは変化しなく元の値を保つように学習する。以上が、新しい時系列学習則である。

この学習則により、時空間情報がどのように内部表現された連想記憶の神経回路が構築されるのであろうか。そこでは、空間情報は双方向で対照的に結合が強化され、時間情報は時間順序に従った非対称な結合の強化として回路に記憶されることになり、神経細胞素子間の結合係数の中に時空間の記憶が保存されることになる。

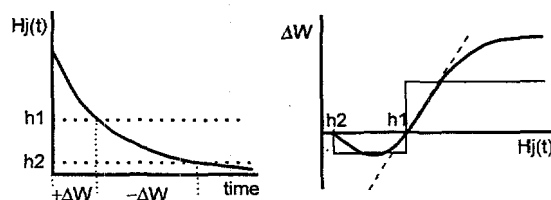
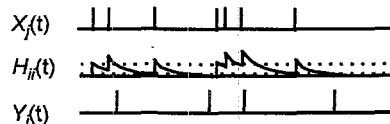
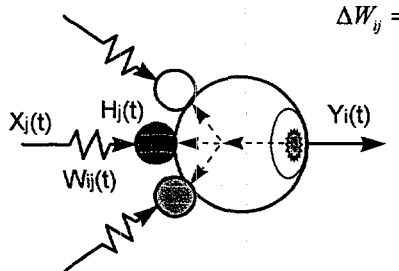
② 学習制御性

脳は、どのような情報についてのアルゴリズムを自動獲得するのだろうか。脳は、自動獲得するアルゴリズムに対する情報についても自動選択するシステムである。これは脳の二重構構性が基調になっている、と思われる^{4, 6)}。脳は視床で入力情報の粗い意味を把握し、その結果に基づいて入力情報を評価し、第1次の行動出力を出す。この評価がポジティブ（入力情報が価値ある）と判定すると、モノアミン系の伝達物質などによって脳活性が高まり、このため学習効果が向上するので、脳は自らが価値があると認めた情報に対するアルゴリズムを獲得する。脳が視床－扁桃体で価値の即断が行われたとき、未だ新皮質では情報

学習則

$$H_{ij}(t) = q \cdot H_{ij}(t-1) + X_j(t)$$

$$\Delta W_{ij} = c \cdot (H_{ij}(t) - h1) \cdot Y_i(t)$$



第2.1-2図

処理が行われているからである（第2.1-3図）。

さらに、視床－扁桃体での粗い意味情報は新皮質の答の領野を粗く指定するトップダウン処理のための仮説として使われ、脳のメモリベースアーキテクチャとしての検索を行う⁶⁾。この意味で、脳の情報処理は仮説立証主義である、^{3, 6)}といえる（第2.1-3図）。

このような脳の二重構造性を取り入れた脳型コンピュータの研究開発は、未だ端緒についたばかりである。

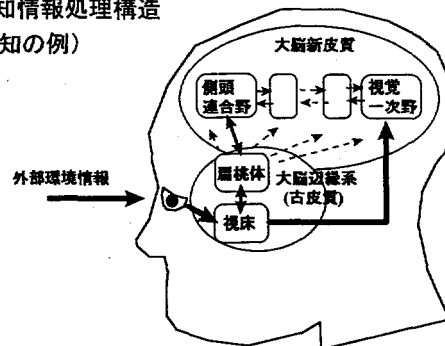
（4）シミュレーション・システム

これらのアイデアを検証するにはコンピュータを用いたシミュレーションがおそらく最適な方法だろう。だが、大きなシミュレーションのため、実行時間の点で問題がある。そのため、原理シミュレーションと並行して、アイデアを回路図にする努力に集中し、専用プロセッサという形でエミュレーションを実現した（第2.1-4図）。

神経細胞をハードで実現する場合、神経細胞をどのレベルまでハード化にして、どのレベルからソフト的にするかということが問題になる。われわれが選んだのは、接続の計算と細胞の計算、学習の計算をハード・レベルで実現して、相互接続と各種設定をソフト・レベルで実現するという方法である。できるだけ柔軟にするため、計算のパラメータを代入可能なレジスタに置き、細胞の計算を要素に分解したインストラクションに従って逐次演算するプロセッサにした。いわば、通常のプログラムで1個のサブルーチンで実行する内容を1個の命令に置き換えたようなものである。細胞計算に必要な固定タスクは、演算の性質に従って専用の並列演算器で実行し、全体的にはパイプラインで処理される。従って、通常のCPUにくらべ圧倒的に速くタスクを完了できる。実際、このプロセッサが主演算中の2クロックで実行する内容は、主なものだけで、4ビットの加算4回、4ビットの積算2回、32ビットの加算2回、16ビットのメモリの読み出し3回、書き込み1回、比較4回、ビットシフト2回、間接アドレスのポインタ更新2回、乱数発生3回である。つまり、通常のCPUでの数十クロック相当の内容を2クロックで処理しているのである。

学習制御性の為の脳の二重構造

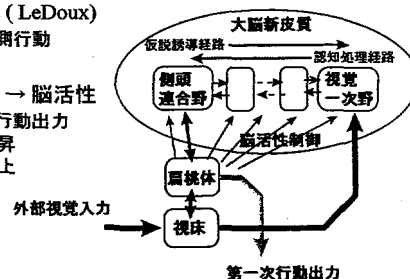
1. 脳の認知情報処理構造 (視覚認知の例)



2. 一次価値判断回路の脳情報処理に対する意味

(1) 生物学的意味 (LeDoux)
危険回避、予測行動

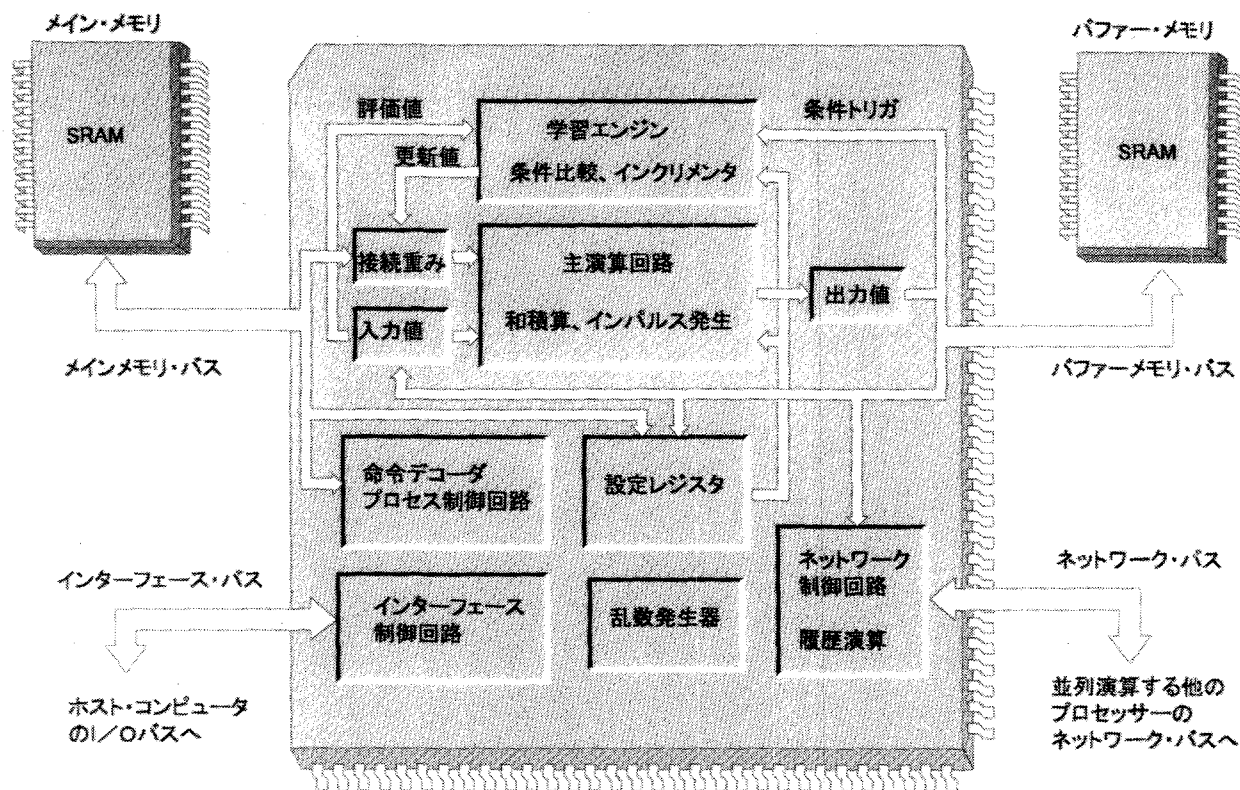
(2) 一次価値判断 → 脳活性
制御と無意識性行動出力
快 → 脳活性上昇
→ 学習性向上



3. 脳の仮説立証方式：脳の情報検索の手法

粗い意味情報をもとに活性化すべき領域を選択する
→ 行動出力のための価値情報

第2.1-3図



第2.1-4図 プロセッサの内部ブロック図

主演算部は2個の積算器と加算器、アキュムレータ、比較器からなる。これらは全く並列に動作し、パイプラインで演算を高速実行する。学習演算部は比較判定論理と履歴計算、インクリメンタなどの回路で構成されていて、主演算と並列に動作する。そのため、このプロセッサでは学習のための実行時間は見かけ上ゼロある。設定レジスタは14本あり、細胞や接続の特性、学習パラメータなどをプログラムから設定する。メモリは2系統あり、一方をメイン、他方をバッファと呼ぶ。メイン・メモリはプログラム・コード（インストラクションのリスト）と接続情報（重みの値と更新に必要な情報）を格納し、バッファ・メモリは各細胞の活動を履歴を含めて保持する。2系統にした理由は、主演算が接続情報と入力の細胞活動の両方を同時に必要のため、メモリ・アクセス時間を短縮するための工夫である。将来、オンチップ・キャッシュにすれば、メモリは1系統でよい。乱数発生回路は3種のm系列乱数を発生し、学習パラメータを分散させ、学習が画一的になるのを防いでいる。命令デコーダは命令数が少ないので非常に簡単であり、プロセス制御も簡単なステート・マシンとカウンタで実現されている。ネットワーク制御回路はバッファ・メモリのアクセスとネットワーク・バスを介してのリード・ライト制御が主たる役割である。また、間接アドレッシング用のテーブルメモリを内蔵し、定型的なパターンのアクセスを高速化している。



第2.1-5図 ASICで実現された脳型コンピュータ・チップ

プロセッサのコア論理回路は約35Kゲートである。25MHzで動作するこのプロセッサは200MHzのペンティアムより高速に神経回路の計算を実行する。しかも、200プロセッサ程度の並列動作が可能で、20-50万個の細胞を概ねリアルタイムに仮想実現することができる。プロセッサのコアを実現したASICはCMOS 0.8 μ m技術のシーオプゲート・ゲートアレイである。パッケージは160ピンの標準QFP（第3.1-5図）で、4個の1Mビット高速SRAMを接続することで、1個プロセッサを構成する。現在運用中の試験用のシステムは、16個のプロセッサを並列に使用しており、500以上の結合を持つ約2万個の神経細胞を約20msecで計算する能力を有している。試作プロセッサはSRAMが外付けとなっているが、次期バージョンでは内部にキャッシュを内蔵しDRAM化する予定である。さらに、実用段階ではDRAMも内蔵して（チップ面積からいえば、DRAMにプロセッサを同居させてというべきだろう）、32ピンのSOJパッケージに収められよう。

この外見はメモリと同等のチップを20-30個実装したカードをパソコンのスロットにいれるような形でアプリケーションを実行する姿が数年先のイメージである。

（5）結 び

現代は情報の時代であり、インターネットを介し頻繁に事実（データ）や考えが世界的規模に行き交う時代である。しかし、情報とは人（脳）に影響を与える事柄であるとする、人（脳）との関係において、情報を捉えることが必要である。人（脳）はプログラムのようにマニュアルや規則に従って動かされるのではないので、現在のマニュアル（プログラム）駆動型コンピュータは人や社会の情報の介在物としてそもそも馴染まない。

現代が人や社会の情報化時代に変容するためには、人（脳）に馴染みの良い情報介在物を研究開発すべきで、この中で現在最も有望と思われ、さらに現実的に実現でき且つ日本独自の発案であるものが脳型コンピュータであろう。そして、脳型コンピュータは現在のプロセッサベースアーキテクチャのコンピュータの持つ本質的問題点・障害をすべて克服できる。従って、脳型コンピュータの産業・社会に及ぼす効果ははかりしれず、何10-何100兆円産業を生み出すことができる。さらに産業政策上においても、コンピュータの原理が初めてフォンノイマン型から非フォンノイマン型に抜本的に日本が提案し変革すること、それによって基礎研究から、世界規模のしかも時代が最も必要とする情報産業を生み出すことになるので、米国をはじめ世界的な視野においても、かつて科学技術研究開発上にその例をみない程の貢献を日本が果たすことになり、その意義は極めて大である。

（電子技術総合研究所 松本 元）

参考文献

- 1) Marr, D: Vision: A computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information. Freeman and Company, New York, 1982
乾 敏郎、安藤広志 (訳) : 「ビジョンー視覚の計算理論と脳内表現」, 産業図書, 東京, 1987
- 2) 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書, 東京, 1996
- 3) 松本元: 愛は脳を活性化する, 岩波科学ライブラリー42, 岩波書店, 東京, 1996
- 4) Shigematsu Y, Ichikawa M, Matsumoto G: Reconstitution Studies on Brain Computing with the Neural Network Engineering. Ono T, McNaughton BL, Molotchnikoff S et al (eds), Perception, Memory and Emotion: Frontiers in Neuroscience, pp581-599, Elsevier Science, Ltd, Oxford, NY, Tokyo, 1996
- 5) 松本元、市川道教: 脳におけるデータ処理とエレクトロニクス, 電子情報通信学会誌79: 1060-1065, 1996
- 6) Koerner E, Koerner U, Matsumoto G: Top-down Selforganization of Semantic Constraints for Knowledge Representation in Autonomous Systems: A Model on the Role of an Emotional System in Brains. Bulletin of the Electrotechnical Laboratory 60: 405-409, 1996

2.2 脳の情報処理獲得の戦略（ブレインウェア）

2.2.1 脳の発生分化機構からみたブレインウェア

（1）脳神経系発生分化の細胞・分子機構

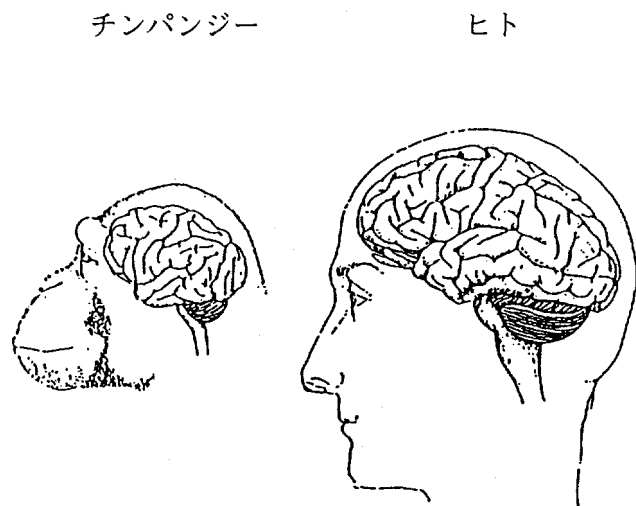
a. はじめに

脳神経系の働きには、特に人間のそれに代表されるように目覚ましいものがあり、個体発生の中でこの系がどのように構築されてくるのか、またその結果としてどのような仕組みにより高度な機能を発揮するのか、古くから多くの人々の興味を惹きつけてきた。

第2.2.1(1)-1図にチンパンジーと人間の脳の外観を比較してあるが、その大きさを除いてよく似ている（ほぼ相似）ことがわかる。またその中身を比べてみても、人間にのみあってチンパンジーにはないというような組織構造は存在しないし、さらに細かく見て人間に特有な神経細胞といったものも見当たらず、個々の神経細胞の形態学的、電気生理学的特徴は両者でよく似通っている。結局唯一の大きな違いはそのサイズで、それも第2.2.2(1)-1図の一次元で見て約2倍、容量、従って神経細胞の数で見て、約 $2^3 = 8$ 倍の差があるに過ぎない。一方人間とチンパンジーの高次機能の間には言語、記憶、学習等いずれの脳（能）力についても大きな差があることは言うまでもない。一体どのような情報処理の体系であれば素子（神経細胞）の数を約1桁増大させただけでその機能が飛躍的に増大しうするのか、現行のコンピューターシステムの作動原理の枠内では解決できない問題のように思われる。

脳神経系のような複雑な仕組みを明らかにするには、むしろ、先ずこの系が生体の中でどのように発生、構築されてくるのか、比較的単純な出発点から順を追って理解することが重要と思われる。その中で例えば、神経細胞の数が決定される機構が明らかにされれば、逆にある動物の神経細胞の数を増減させて、その高次機能への影響をみるといったアプローチも可能になるのではないだろうか。

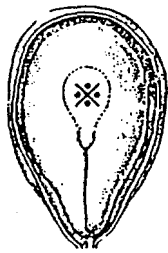
脊椎動物の脳神経系には、ヒトとチンパンジーの間に限らず種によっ



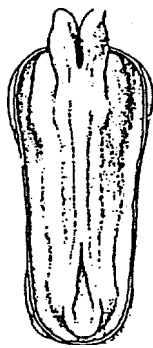
第2.2.1(1)-1図 チンパンジーと

ヒトの脳の外観の比較

て、器官としての大きさ、或いは機能に一見大きな差がある。しかしその発生経過をマクロ或はミクロの形態的レベルで追ってみると、個々の素子（神経細胞）の性質の場合と同様、本質的な差は少ない。脊椎動物における脳神経系発生の主要な経過を要約すれば以下のようなう（第2.2.1(1)-2図）。



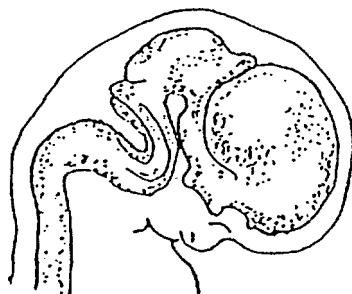
(1) 神経板（次項参照）の外胚葉からの誘導



(2) 神経板内における部域特異的な細胞増殖パターン

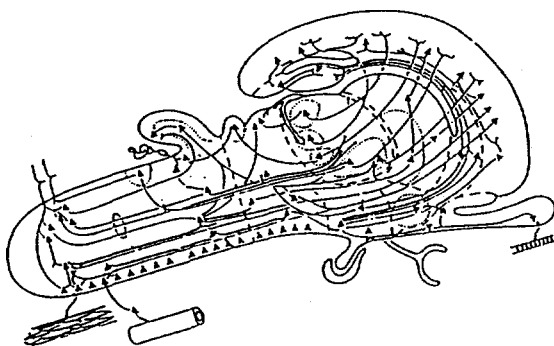
その結果として形態的に識別できる各種脳領域の形成

高次機能の発現に密接に関連すると考えられる神経細胞の数は、この時点でほぼ決定されてしまう。



(3) 各部域における神経細胞の多様な分化パターン

増殖を終えた未分化神経細胞の各種脳領域に特異的かつ多様な成熟の開始



(4) 各種神経細胞間における特異的シナプス結合の形成

(5) いくつかの神経細胞の選択的なプログラム死

(6) いったん形成されたシナプス結合の安定化或は除去

第2.2.1(1)-2図

いずれも興味深い過程であるが、その細胞・分子レベルでの理解は残念ながら殆ど進んでいないのが現状である。

b. 脳神経系発生分化の細胞機構

神経板というのは脊椎動物における脳神経系の原基ともいうべきもので、形態的に囊胚期の外胚葉の一部に識別できるようになる。囊胚期は受精に始まる胚発生の経過中、卵割期、胞胚期に続く比較的早期の発生段階で、その初期に開始される形態形成運動の結果、外、中、内、三胚葉の体制が確立されることにより特徴付けられる。神経板はこの囊胚期に、三胚葉のうち最外層に位置する外胚葉の一部（将来胚の背方にあたる部域）から形成されるわけであるが、面白いことに、心臓あるいは肝臓など、中胚葉あるいは内胚葉に由来する他の主要臓器の原基は、この時期にはまだ識別できない。個体発生の中で脳神経系の発生がいち早く開始されるということは、この器官の一見高級なイメージからすると奇異な印象を与える。しかしこのことは、肝臓、心臓に相当する器官はなくても神経系の発達した、いわゆる下等動物が数多く存在することからして、進化的にみれば神経系はむしろ原始的な器官であることを意味するものと考えればよい。他方、人間の新生児を例にとると、肝臓、心臓など主要諸器官はこの発生段階で既に、成人に比して機能的にもほぼ完成しているのに対し、脳神経系の発達はかなり未熟であって（我が子と最初に病院で対面した時の何とも頼りなげな印象を思い出しましょう）、出生後も長期間にわたり主として第2.2.1(1)-2図、(4)(5)(6)の発生過程が進むことにより完成に向かうものと考えられる。つまり進化の歴史のなかで新しい動物種（ここでは人間）では、神経系の完成に他の主要臓器に比べてより多くの時間が費やされるということが出来る。こうしてみると神経系は動物進化の上で、原始的であるとともに、これまで多くの変異—淘汰の修羅場をくぐりぬけ、おそらく将来にわたっても大きな変異を許容しうる”未完の大器”といえるのではないだろうか。

囊胚期以降、神経板は活発な細胞増殖を伴いつつ全体としては、その中央部が神経管へ、周縁部が神経冠へと形態形成を遂げてゆく（第2.2.1(1)-2図、(2)の発生過程）。その間、前者においては胚の前後軸（将来の頭尾軸）に沿った神経管局所の部域化が次第に顕著になって、マクロのレベルでは各種脳領域の形成が、又ミクロのレベルでは多様な神経細胞の分化が開始される。一方後者では、細胞移動の傾向が強まって神経冠細胞は胚体内中に散開する。こうして最終的に神経管系統からは中枢神経系が、また神経冠系統からは最終到着部位に応じて末梢性の神経節や色素細胞が分化してくる（第2.2.1(1)-2図、(3)の発生過程）。なお外胚葉のうちで神経板に含まれない側方ないし腹方部域からは表皮が分化する。

神経板発生の引き金となるのが、背方外胚葉に対して、隣接する背方中胚葉から発せられる“神経誘導”作用であることを最初に示したのは、1924年に発表されたSpemannとMangoldによるイモリ胚葉片の移植実験である（1）。彼らはイモリ囊胚から背方中胚葉（オーガナイザーと名付けられた）をとってこれを同じ発生段階にある別の宿主胚の腹側外胚葉に移植すると、宿主胚自身の背方外胚葉からとは別個に腹側外胚葉部域から神経板が誘導され、これよりほぼ完全な頭尾軸を伴う2つ目の神経系が分化してくることを見出した。背方外胚葉部域を背方中

胚葉と接触する前に胚から分離して培養すると、側、腹方外胚葉部域の場合と同様表皮に分化する事から、外胚葉一般は自律的には、即ちそれ自身に内在する発生制御機構のみの働きによれば、表皮系への発生系統をたどると思われる。しかしそこに背方中胚葉から何らかの働きかけがあると、外胚葉における自律的な表皮系統発生は抑制され、かわりに神経管或いは神経冠系統の発生が促進されるわけである。

c. 脳神経系初期発生の分子機序

Spemann等によるオーガナイザーによる神経誘導過程の発見に続いて、オーガナイザーを加熱、乾燥、アルコール処理して細胞を殺しても神経誘導活性が残ることから(2)、オーガナイザーの誘導作用は何らかの化学的物質により伝達されるであろうと推定されその本体の探索が始まった。また特に中枢神経系で顕著となる形態形成、即ち前脳、中脳、後脳から脊髄にいたる頭尾軸に沿った部域特殊化もオーガナイザーから神経誘導因子に続いて局所差次的に発せられる形態形成因子の作用に基づくこととされ(3)、この因子の同定も急がれた。

Spemannは1935年その「動物の胚の成長における誘導作用の発見」によりノーベル賞を授与され、誘導物質の発見及びこれを突破口とした発生生物学分野の飛躍的發展が期待されたが、その後半世紀以上にわたる多くの科学者の懸命な努力にもかかわらず神経誘導物質、形態形成物質同定の問題は今日に至るまで未解決のまま残ってしまった。

1987年、FGFファミリーやTGFファミリーに属する各種成長因子がアフリカツメガエルの初期発生に重要な役割を果たすことを示唆する知見が発表された(4, 5)。即ちこれら成長因子を胞胚期(囊胚期一步手前の発生段階で外、中、内胚葉のうち特に中胚葉はまだ確立していない)から切り出された予定外胚葉に作用させると、背索、筋肉等の、中胚葉に由来する組織が誘導されることが見出された(中胚葉誘導とよばれる)。

1993年になって、我々により、ツメガエル囊胚細胞の初代マイクロ培養系において(6, 7)、bFGFが生理的濃度でオーガナイザー細胞の神経誘導作用を代行して、未分化外胚葉細胞から直接、中枢神経系細胞、或いは末梢性神経冠系統の色素細胞を誘導分化させることが示された(8)。この時中胚葉性の細胞が誘導されることはなく、又bFGFにより、より初期の囊胚外胚葉細胞からは中枢神経系細胞が、より後期の囊胚外胚葉細胞からは末梢性の色素細胞が誘導されることも示され、外胚葉細胞は発生のタイムテーブルに従って FGFに対する反応性を時々刻々変化させていくことが明らかとなった。

また同1993年、Harland等によりそれまで中胚葉誘導に関わるとされてきた分子の一つ noggin が非生理的高濃度ではあったが、囊胚から切り出された外胚葉片に作用して神経系の分化マーカーを誘導することが報告された(9)。さらに翌1994年、Hemmati-Brivanlon等により follistatin (TGFファミリーに属する activin に結合してその作用を抑制する分子) にも神経誘導作用のあることが報告された(10)。こうしてごく最近になり、にわかに神経誘導の分子機序に再び注目が集まることになった。

1995年、我々はさらにbFGFがその濃度勾配 (0.1-5.0ng/ml: 5-250pM)によりオーガナイザー細胞の形態形成作用をも代行して神経系頭尾軸部域化をも誘導しうることを明らかにした(11)。即ちこの実験で申請者等は初期囊胚の外胚葉細胞を様々な濃度のbFGF存在下で培養した後、RNAを抽出し、ツメガエル幼生の中樞神経系頭尾軸に沿って局所差次的に発現する4種のhomeobox遺伝子(XeNK-2, En-2, XlHbox1, XlHbox6)の転写発現をRT-PCR法で定量的に解析した。その結果、0.2ng/ml (10pM)以下の低濃度のbFGFでは、頭部マーカーのXeNK-2、En-2の発現が誘導されたが、bFGF濃度を上昇させるとこれらの発現は抑制され、代わって尾部マーカーのXlHbox1、XlHbox6の発現が漸次誘導されることが明らかとなった。誘導されるマーカーの生体内での発現部域と、各マーカーを最大に誘導するbFGF濃度はよく相関し、低濃度ほど頭部、高濃度ほど尾部のマーカーが誘導された。他方、神経誘導作用があるとされた前述のnogginやfollistatinにはXlHbox1やXlHbox6等尾部マーカーを誘導する能力はないとされていたが(9,10)、最近Harland等はFGFのみ、あるいはFGFとnogginの協調作用により尾部マーカーが誘導されることを報告している(12)。また神経系の頭部域となるべき領域の神経板の細胞がFGFにより、尾部神経系の細胞に転換することも示された(13)。

最近我々が、ツメガエル囊胚cDNAライブラリーのスクリーニングを行ったところ、まだ報告のない2種を含め計4種のFGFレセプターが転写発現していることが明らかになり、各FGF受容体cDNAをクローニングすることが出来た(それぞれXL-1~4と命名した)。各々の全長の塩基配列を決定した結果、細胞外領域に相違性が高いことから、基質特異性或いは親和性の異なる独立の分子であることが示唆された(14)。一方、ツメガエル囊胚の中胚葉細胞にbFGFをはじめとするFGFファミリーのメンバーが数種存在することは既に報告がある(15,16,17,)。

一方、Wilson等はbone morphogenesis protein 4 (Bmp-4)が、外胚葉細胞の表皮細胞への分化を促進することにより、その神経細胞への分化を抑制することを見出した(18)。この点に関連して既に鈴木、上野等により、Bmp-4に対する受容体の機能をdominant negative 変異型受容体により阻害すると、外胚葉の神経化が促されることが示されていた(19)。さらに笹井等によりchordinと呼ばれる、オーガナイザーに特異的に発現するタンパク分子がBmp-4の作用に拮抗して、外胚葉の神経化を促すことも示された(20)。

以上の知見からオーガナイザーによる神経誘導の分子機構として以下の図式が浮かび上がってくる(21)。即ち囊胚外胚葉はそれ自身だけでは、Bmp-4の作用により表皮に分化する。しかし囊胚初期にオーガナイザーから分泌されるFGF、noggin、chordin、follistatin等の分子がBmp-4の表皮化作用に拮抗して、隣接する背方外胚葉を全体として頭部神経系に分化するよう誘導する。オーガナイザーからは引き続きFGFが分泌され、FGFの濃度勾配に依存して、よりオーガナイザーに近い背方外胚葉部域がより尾部の神経系として特殊化される。

d. 今後の課題

今後は、bFGFあるいはその相同分子が実際にin vivo 正常発生過程において神経誘導、形態形成物質として働いていることを確証していかなければならない。そのためには例えばFGF受容体のdominant negative 変異体を初期胚に導入してFGF受容体の機能を種々の程度に阻害した時、それに応じて神経系の誘導、形態形成が抑制、変形されるか検証しなければならないだろう。

さらに、はじめに述べたように神経板内では部域に特異的な細胞増殖パターンが見られるが(第2.2.1(1)-1図、(2))特に頭尾軸に沿った増殖パターンは頭尾軸部域化のマーカーに用いた上述の各種homeobox遺伝子(XeNK-2等)の支配下にあると考えられ、これらhomeobox遺伝子による細胞増殖制御の問題もこれから明らかにされねばならない重要な課題であろう。

“はじめに”で述べたように人間とチンパンジーの脳のほとんど唯一の大きな違いは神経細胞の数、それもたかだか一桁の差にすぎない。従って脳神経系における細胞増殖制御の機構が明らかにされれば、トランスジェニックマウス等の技術を利用して神経細胞の数を増減させ高次機能との関係を解析することが可能となるだろう。こうして脳神経系の基礎的理解が進めば可塑的情報処理・計算システムに関する新しい原理の発見が期待される一方、工学的、臨床的応用も計り知れない。

(生命工学工業技術研究所 岡 本 治 正)

参考文献

- 1) Spemann, H. and Mangold, H : Uber Induction von Embryonalanlagen durch Implantation artfremder Organisation. Arch. mikrosk. Anat. EntwMech. 100: 599-638, 1924
- 2) Holtfreter, J : Der Einfluss thermischer, mechnischer und chemischer Eingriffe aufdie Induzierfahigkeit von Triton-Keimteilen. Wilhelm Roux Arch. EntwMech. Org. 132 : 225-306, 1934
- 3) Niukoop, PD : Activation and organization of the central nervous system in amphibians. J. Exp. Biol. 120: 1-108, 1952
- 4) Slack, JMW, Darlington, BG, Heath, JK and Godsave, SF : Mesoderm induction by early Xenopus embryos by heparin-binding growth factors. Nature 326: 197-200, 1987
- 5) Kimelman, D and Kirschner, M : Synergistic induction of mesoderm by FGF and TGF- β and the identification of an mRNA coding for FGF in early Xenopus embryo. Cell 51: 869-877, 1987
- 6) Mitani, S. and Okamoto, H : Embryonic development of Xenopus studied in a cell culture system with tissue-specific monoclonal antibodies. Development 105: 53-

- 7) Mitani, S. and Okamoto, H : Inductive differentiation of two neural lineages reconstituted in a microculture system from *Xenopus* early gastrula cells. *Development* 112: 21-31, 1991
- 8) Kengaku, M and Okamoto, H : Basic fibroblast growth factor induces differentiation of neural tube and neural crest lineages of cultured ectoderm cells from *Xenopus* gastrula. *Development* 119: 1067-1078, 1993
- 9) Lamb, T. M., Knecht, A. K., Smith, W. C., Stachel, S. E., Economides, A. N., Stahl, N., Yancopoulos, GD and Harland, RM : Neural induction by the secreted polypeptide noggin. *Science* 262: 713-718, 1993
- 10) Hemmati-Brivanlou, A, Kelly, OG and Melton, DA : Follistatin, an antagonist of activin, is expressed in the Spemann organizer and displays direct neuralizing activity. *Cell* 77: 283-295, 1994
- 11) Kengaku, M and Okamoto, H : bFGF as a possible morphogen for the anteroposterior axis of the central nervous system in *Xenopus*. *Development* 121: 3121-3130, 1995
- 12) Lamb, T. M. and Harland, R. M. : Fibroblast growth factor is a direct neural inducer, which combined with noggin generates anterior-posterior neural pattern. *Development* 121: 3627-3636, 1995
- 13) Cox, Wm. G. and Hemmati-Brivanlou, A. : Caudalization of neural fate by tissue recombination and bFGF. *Development* 121: 4349-4358, 1995
- 14) Hongo, I, Muhamad, MA, Sugaya, M, Kengaku, M and Okamoto, H : Identification of the *Xenopus* FGFR subtype(s) involved in neural induction. *Neurosci. Res.*, Suppl. 19, S116, 1994
- 15) Godsave, S. F. and Shiurba, R. A. (1992). *Xenopus* blastulae show regional differences in competence for mesoderm induction; correlation with endogenous basic fibroblast growth factor levels. *Dev Biol.* 151, 506-515.
- 16) Isaacs, HV, Tannahill, D and Slack, JMW : Expression of a novel FGF in *Xenopus* embryo. A new candidate inducing factor for mesoderm formation and anteroposterior specification. *Development* 114: 711-720, 1992
- 17) Tannahill, D., Isaacs, H. V., Close, M. J. Peters, G. and Slack, J. M. W. (1992) Developmental expression of the *Xenopus* int-2 (FGF-3) gene: activation by mesodermal and neural induction.
- 18) Wilson, P. A., and Hemmati-Brivanlou, A. : Induction of epidermis and inhibition of neural fate by Bmp-4. *Nature* 376: 331-333, 1995

- 19) Suzuki, A., Thies, RS., Yamaji, N., Sang, JJ., Wozney, JM., Murakami, K. and Ueno, N. : A truncated lone morphogenetic protein receptor affects dorsulventral patterning in the early *Xenopus* embryo. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 91: , 1994
- 20) Sasai, Y., Lu, B., Steinbeisser, H. and Robertis, EMD. : Regulation of neural induction by the Chd and Bmp-4 antagonistic patterning signals in *Xenopus*. *Nature* 376: 333-336, 1995
- 21) Doniach, T. : Basic FGF as an inducer of anteroposterior neural pattern. *Cell* 83 : 1067-1070, 1995

(2) 神経回路の冗長性と可塑性

成人の脳には数百億個以上の神経細胞があり、各細胞は数千あるいはそれ以上のシナプスで他の細胞とつながっている。したがって、脳内の神経回路はとてつもなく複雑なもののようにみえる。しかし、この複雑きわまりない回路はランダムにでき上がっているわけではなく、特定の入力細胞群が遠隔の一定の細胞群につながるという整然とした回路網を形成する。

このように想像を絶するほど複雑かつ精巧な回路はそのすべてが遺伝子に組み込まれた設計図に基づいてでき上がってくるわけではない。最近の神経科学研究は、むしろ、遺伝子は冗長で大まかな神経回路をつくることによって生後の環境に適応できるような脳、あるいは入力による調整の容易な脳をつくり上げることを明らかにした。すなわち、発達脳は遺伝情報だけでなく、個体のおかれた生後の環境からも影響を受けて変化するという可塑性をもつことが明らかとなった。さらに、生後の入力や神経細胞活動が神経回路の構造と機能を変えるメカニズムもある程度明らかになりつつある。

a. 神経細胞の過剰発生と異所性投射

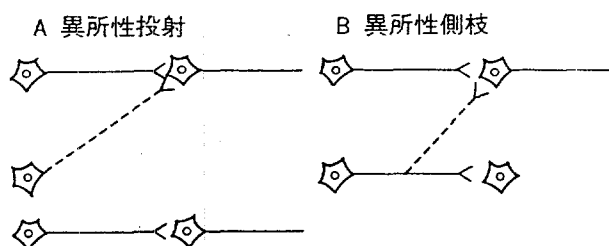
出生時の脳重量は平均で約400 gであるが、生後6ヶ月までは急速に、その後は緩やかに増加し、4～6歳で成人の脳重量の95%に達する。この生後の脳重量の増加は神経細胞数の増加によるのではなく、その突起の伸展やグリア細胞の増加によることは以前から知られていたが、最近、この時期にはかえって過剰神経細胞の死や過剰シナプスの退行が起こることが明らかとなった。

発達脳における神経細胞の過剰発生とそれに引き続く細胞死はニワトリの三叉神経中脳核で最初に報告された¹⁾。それによると、受精後6日から9日目で神経細胞数は4,000～5,000に達する。ところが、13日目を過ぎると約1,000に減ってしまう。この数はその後、孵化18日目のヒヨコになってもほとんど変わらない。つまり、受精後11日から13日にかけて約75%の細胞が消失したことになる。実際に、この時期には多くの変性しつつある細胞が見つかるので、この細胞数の減少はおそらく大量の神経細胞死によって起こると考えられる。このような細胞死は哺乳類の脳内でも普遍的に起きることがその後明らかとなっている¹⁾。

さらに哺乳類の新生仔期あるいは胎仔期では、過剰な神経細胞の存在に加えて、成熟脳ではみられない投射—異所性投射—が存在することも明らかとなった(第2.2.1(2)-1図A)。この異所性投射の中でよくみられるパターンは、本来限局した投射がその境界をこえて、成熟脳よりもはるかに広く投射しているというものである。たとえば、軸索を染め出すトレーサーをラットの眼球に注入して、網膜節細胞の軸索(視神経)の広がりを調べた研究によると、成熟ラットの同側上丘への投射は、上丘前部に限局しているのに、出生直後ではそれが上丘後部にも及んでいるという¹⁾。このように、本来は限局すべきものが新生仔期には異常に広がった投射を形成することはめずらしいことではない。この場合、成熟していくにつれ、投射域が狭く

限局していくことになる。この過程をソーティングとよんでいる（第2.2.1(2)-2図参照）。

上述した異所性投射は、本来の投射よりは広がった投射であり驚くべき異常な投射ではないが、成熟脳ではまったく予想のつかない投射が新生仔期にみられることがある。たとえば、ネコ新生仔の脳皮質において、少数ではあるが聴覚野から同側および対側半球の視覚野へ直接投射がある。この成熟脳では考えられない投射は、生後38



第2.2.1(2)-1図 発達期の脳にみられる異所性投射 (A)と異所性側枝 (A)。Aでは点線で示した突起をもつ神経細胞が消失する。Bでは点数の部分の側枝だけが消失する。

日までに消失してしまうという¹⁾。長期に細胞に留まる色素を使った実験から、これらの異所性投射は一過性の軸索側枝である可能性が高いことが判明した（第2.2.1(2)-1図）。また最近、サルで脳梁線維が発達につれて劇的に減少することが報告されている²⁾。すなわち、出生時に平均1億8,800万本あった脳梁線維が、生後3週間に約8千万本も少なくなり、さらにその後3ヶ月間に約5千万本減少するという。

このような投射線維の減少は、新生仔期に異常な投射をした起始細胞が細胞死を起こしたことによる場合と、異所性軸索側枝の退行による場合がある（第2.2.1(2)-1図B）。

b. シナプスの過剰新生

シナプスの発生・発達において注目すべきことは、シナプス密度は胎生期には非常に低く、また徐々にしか増加しないのに対して、生後の一定の時期に達すると爆発的に増加するということである。例えば、ヒト大脳皮質1次視覚野（17野）のシナプス密度を定量的に調べた研究によると、28週目の胎児期より出生時にかけてはあまり増加しないのに、生後2ヶ月から8ヶ月までに急激に増加し、成熟値よりもはるかに多くなる。その後、17野の体積はほぼ一定であるのにシナプス密度はかえって減少していく¹⁾。

このように、生後一定の時期に達して初めてシナプスが急増し、成熟値よりも多くなる現象が、視覚野に限らず大脳皮質のいろいろな領野で広くみられる。

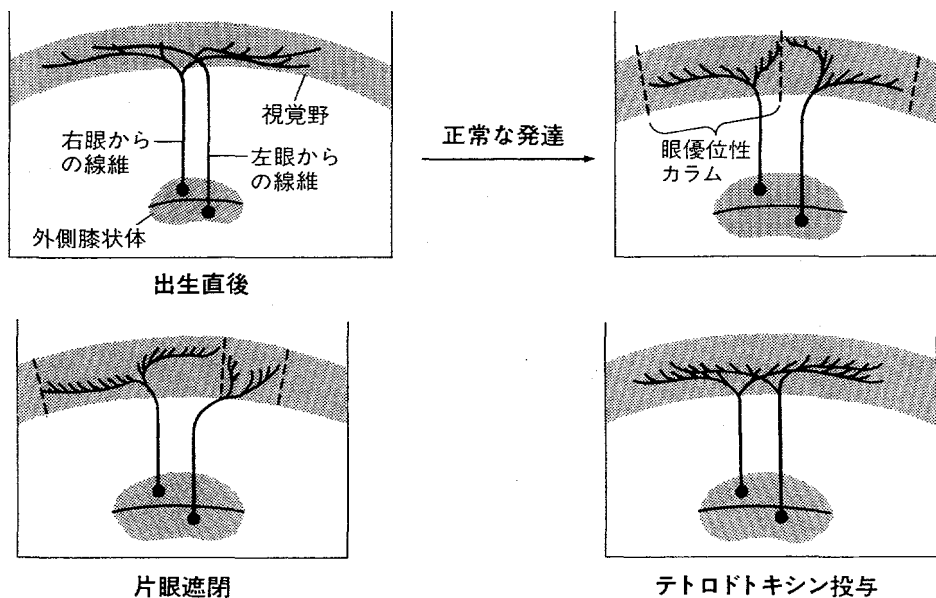
c. 過剰投射のソーティングと神経活動

上述したように、発達脳における神経回路網の形成は、単純化すれば最初に、おもに遺伝情報にもとづいて過剰投射や異所性投射を含んだ非常に大まかな回路網を形成し、次にその中から異常な投射を退行させ、正常な回路を強化することによって正確な回路網をつくり上げると考えることができる。この後者の過程にはシナプス入力や神経細胞の活動が関与することが視覚野における研究から明らかとなってきた。

出生直後のネコやサルの皮質視覚野では両眼からの求心線維は一樣に視覚野へ投射している

(第2.2.1(2)-2図左上)³⁾。ところが、発達につれて過剰な側枝が退行し、その結果それぞれの眼からの求心線維がソーティングされいわゆる眼球優位円柱状の構造をつくり上げる(第2.2.1(2)-2図右上)。このソーティングが、シナプス後ニューロンの活動に依存することがフグ毒(テトロドキシン)を使って示された。テトロドキシンは電位依存性のナトリウムチャンネルを塞いでしまうので神経細胞は入力が入ってきても神経信号を発生できなくなってしまう。このように反応性をなくしてしまうとソーティングが起らない(第2.2.1(2)-2図右下)。

最近、このソーティングにグルタミン酸受容体の一亜型であるN-methyl-D-aspartate(NMDA)型のシナプス受容体の活動が重要であることが示唆された⁴⁾。NMDA受容体に内蔵されているチャンネルは普段はマグネシウムによってブロックされておりシナプス後細胞がある程度以上興奮しないと開かないのでその十分な賦活には同期した複数の入力あるいは高頻度入力が必要といわれている(第2.2.1(2)-3図参照)。したがって、発達脳で活動性、同期性の高い投射線維が残存し、そうでない異所性投射線維が退行するというソーティングの過程は、前者では同期した入力にNMDA受容体を賦活するほど強い興奮を起こせるのに、後者ではそれができないためであると考えられる。つまり、NMDA受容体は入力活動によりその回路が固定するか、あるいは退行するかを決めるゲートの役割を担っているシナプス受容体であると考えられる。



第2.2.1(2)-2図 視覚野における過剰入力線維のソーティング。

ネコにおける実験結果の模式図(Shatz³⁾ 1992より改変)

d. シナプス競合とシナプス長期増強/長期抑圧

過剰軸索や過剰シナプスのソーティングにシナプス入力が必要な役割を果たすことは仔ネコを使った実験で1960年代に示唆された¹⁾。たとえば、仔ネコの片眼を一時的に閉じ正常な視覚入力を遮断すると、皮質ニューロンはその眼に対する光反応性を永続的に失ってしまう。とこ

ろが、両眼遮閉の場合はかえって光反応性喪失が起らないという実験事実などから、片眼遮閉による変化は、両眼から外側膝状体を経由して皮質ニューロンへ収束する求心性シナプス間の競合によると考えられた。つまり、皮質ニューロンへ収束する求心線維間には入力活動に依存した競合があり、入力の少ないシナプスは脱落し、多いシナプスは残存すると考える仮説が提唱された(第2.2.1(2)-2図左下)。この入力に依存したシナプス競合仮説は、その後、多数の実験によって確認され広く認められるようになった。

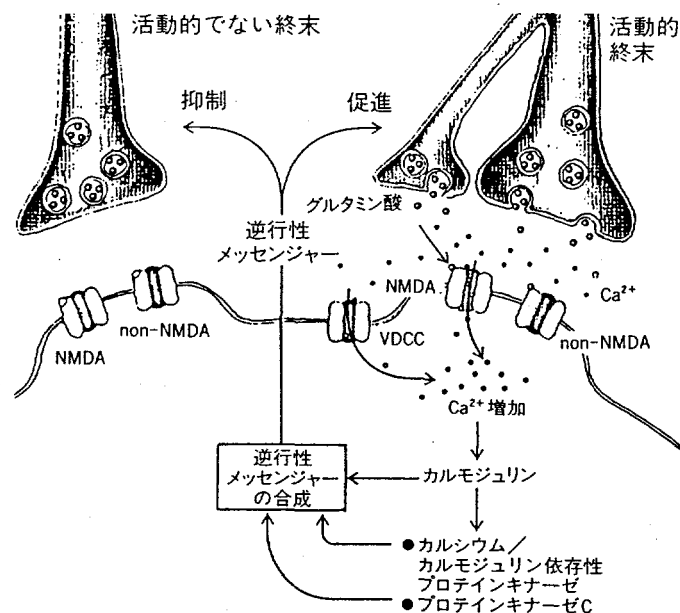
このシナプス競合の最初のステップとして入力の多い側は伝達効率が良くなり、弱い側は悪くなる変化が生じ、それが長く続くと退行が起きると考えられるが、実際に発達脳視覚野にそのようなシナプスが存在することは1970年代末に筆者らによって実験的に示された⁵⁾。さらに、その後筆者らは、幼若ラット視覚野の切片標本においてII/III層ニューロンのシナプス電位を直接細胞内記録し、入力線維を5 Hzで30秒～1分間連続刺激すると、シナプス伝達の長期増強が起きることを見出した。また、IV層を1 Hzの低頻度で15分間連続的に刺激すると同シナプス性長期抑圧が起きることも見出した⁶⁾。

このようなシナプス伝達の長期増強や長期抑圧が、片眼遮閉などの実験でみられた皮質ニューロン光反応性の変化と完全に同一のメカニズムで起きているのかどうかは未だ不明である。ただ、長期増強の起こりやすい時期あるいは高度の長期増強が誘発される時期は片眼遮閉実験で明らかとなった臨界期とほぼ一致することが最近報告された⁷⁾。また、長期抑圧も臨界期に起こりやすいことが古くより指摘されている⁵⁾。したがって、連続入力後に生じるシナプス長期増強や長期抑圧は、視覚野ニューロンがその光反応性を変える最初のステップであると考えることができる。

e. カルシウムと逆行性メッセンジャー

NMDA受容体は、一定閾値以上に強い興奮が続くとはじめて賦活されカルシウムを流入させることが知られている(第2.2.1(2)-3図)。このカルシウムがカルモデュリンと結合し第2.2.1(2)-3図で示す種々の生化学的過程のトリガーとなる仮説(カルシウムトリガー仮説)が提唱されている⁸⁾。このカルシウムによって賦活される物質の中でもとくに、カルシウム・カルモデュリン依存性蛋白質キナーゼIIは一過性のカルシウム増加によって自己リン酸化が起こり、カルシウム濃度が元に戻ってもリン酸化活性が長期にわたり持続するので長期増強の担い手として注目を浴びている。それでは、両眼性シナプス競合のように入力の多いシナプスが強化され入力の少ないシナプスが弱体化、さらには脱落するのは何故であろうか？ 最近、Kandelらは海馬や小脳で提唱された一酸化窒素(NO)がシナプス逆行性メッセンジャーとしてそのシナプス競合の過程に関与しているとしている⁹⁾。

一方、アラキドン酸代謝産物が海馬で長期増強誘発時に増加することやその阻害薬が長期増強を阻止することからアラキドン酸が逆行性メッセンジャーとして働いているとする仮説も提唱されている⁶⁾。また、最近シナプス可塑性への関与が明らかとなってきた神経栄養因子がそ



第2.2. 1(2)-3図 入力が多いシナプスの強化と入力が少ないシナプスの退行を説明する仮説

右の求心線維より高頻度入力が入るとNMDA受容体が賦活されてシナプス後部にカルシウムが流入する。電位依存性カルシウムチャネル(VDCC)から流入する可能性もある。シナプス後部で増加したカルシウムはカルシウム・カルモジュリン依存性蛋白質キナーゼIIや蛋白質キナーゼCなどを賦活しシナプス後部での長期増強プロセスの引き金を引くとともに逆行性メッセンジャーの生成にも関与する。

の役割を担っている可能性もある。たとえば、筆者らは神経栄養因子の一つである脳由来神経栄養因子brain-derived neurotrophic factorがおそらくシナプス前部に作用し発達脳視覚野のシナプス長期増強の維持に関与するとともに長期抑圧を阻止することを見出した⁹⁾。ただし、これら逆行性メッセンジャーに関する主張はすべて現段階ではまったくの仮説であり、今後の実験的検証が必要と思われる。

f. 発達脳の冗長性

上述してきたように、発達期の脳には過剰神経細胞、異所性投射線維および過剰シナプスが存在する。このことは、脳の神経回路網形成に関する遺伝情報がそれほど厳密で固定的なものではないことを思わせる。むしろ発達途中における細胞死あるいは軸索側枝の退行は、正確な回路網をつくるにあたって、生体がとる巧妙な戦略であるようにみえる。しかも、この細胞死や軸索退行のプロセスはシナプス入力やシナプス後細胞の活動によって調整を受けるようになっている。このような方法をとることによって、想像を絶するほど複雑な神経回路網の詳細な設計図をすべて遺伝子に組み込んでおく必要がなくなるであろう。このことは、もちろん細胞死や軸索側枝の退行が遺伝子の支配を受けていないということではない。過剰細胞に死をもたらす異所性投射を退行させる過程は、おそらく遺伝的支配を受けて進行する過程であろう。しかし、上述したようにこの冗長な過剰細胞、過剰投射と伝達効率を変える可塑性シナプスの存在こそ、生後環境からの入力や神経細胞活動が脳内の神経回路網を変えることのできる基盤であることもまた事実である。

(大阪大学 津 本 忠 治)

参考文献

- 1) 津本忠治：脳と発達－環境と脳の可塑性。朝倉書店、東京、1987
- 2) LaMantia A-S, Rakic P: Axon overproduction and elimination in the corpus callosum of the developing rhesus monkey. *J Neurosci* 10: 2156-2175, 1990.
- 3) Shatz CJ: 脳の発達過程. *日経サイエンス* 11: 26-36, 1992
- 4) Tsumoto T, Hagihara K, Sato H, et al: NMDA receptors in the visual cortex of young kittens are more effective than those of adult cats. *Nature* 327: 513-514, 1987
- 5) Tsumoto T, Suda K: Cross-depression: An electrophysiological manifestation of binocular competition in the developing visual cortex. *Brain Res* 168: 190-194, 1979
- 6) Tsumoto T: Long-term potentiation and long-term depression in the neocortex. *Prog Neurobiol* 39: 209-228, 1992
- 7) Kirkwood A, Lee H-K, Bear MF: Co-regulation of long-term potentiation and experience-dependent synaptic plasticity in visual cortex by age and experience. *Nature* 375:328-331, 1995
- 8) Kandel ER, O'Dell TJ: Are adult learning mechanisms also used for development? *Science* 258: 243-245, 1992
- 9) Akaneya Y, Tsumoto T, Hatanaka H: Long-term depression blocked by brain derived neurotrophic factor in rat visual cortex. *J Neurophysiol* 76: 4198-4201, 1996

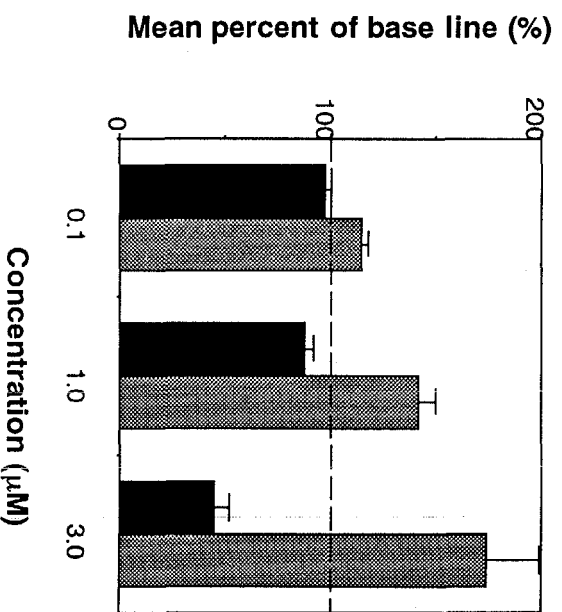
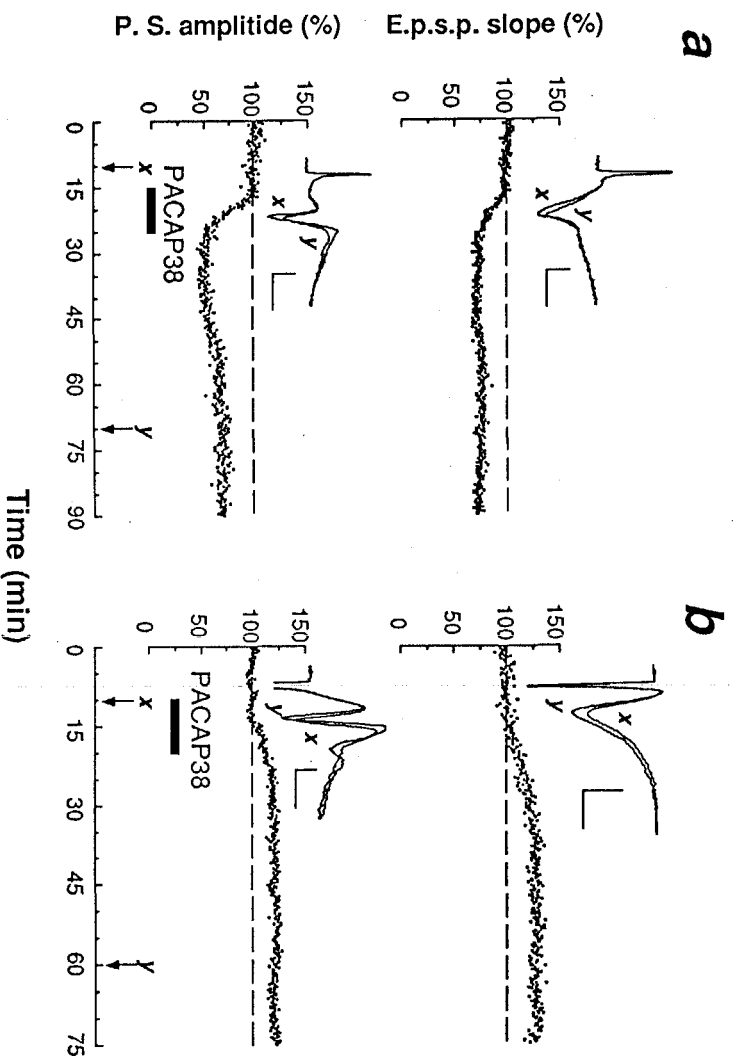
2.2.2 脳活性の制御機構と制御物質

(1) 視床下部ペプチドPACAP-38による海馬シナプス伝達の制御

大脳辺縁系と視床下部の機能的結合は、ホメオスタシスや情動のみならず、記憶・学習にも重要な役割を果たすことが最近の研究からわかってきている。視床下部ペプチドの一つである Pituitary adenylate cyclase activating polypeptide (PACAP-38) は、元来、下垂体後葉からのホルモン分泌を制御する脳ペプチドとして知られていたが(1)、PACAP受容体が下垂体だけでなく脳内の他の部位、とくに海馬において顕著に発現していることが報告され(11, 12, 15, 18)、PACAP-38の海馬における生理作用の解明に関心が高まった。PACAP-38そのものが海馬内で生合成されるかどうかについてはまだ明らかにされていないが、最近、海馬でのPACAP-38の生理作用を示す例はいくつか報告されている。たとえば、PACAP-38は血液脳関門を通過することができるが、虚血処理をしたラットにPACAP-38を静注すると、海馬CA1領域の錐体細胞の細胞死が抑制された(2)。覚醒ラットの海馬にPACAP-38をマイクロインジェクションすると、海馬からのアセチルコリンの自発放出が増加した(14)。また、海馬初代培養系では、PACAP-38を培養液に加えると細胞内のカルシウム濃度を上昇させた(19)。細胞内カルシウム濃度の変動は長期増強や長期抑制などのシナプス可塑性に関わる重要な要因である。そこで本研究では、海馬の神経活動に対するPACAP-38の機能を検討するために、ラット海馬スライスを用いてPACAP-38のシナプス伝達に与える影響を調べた。

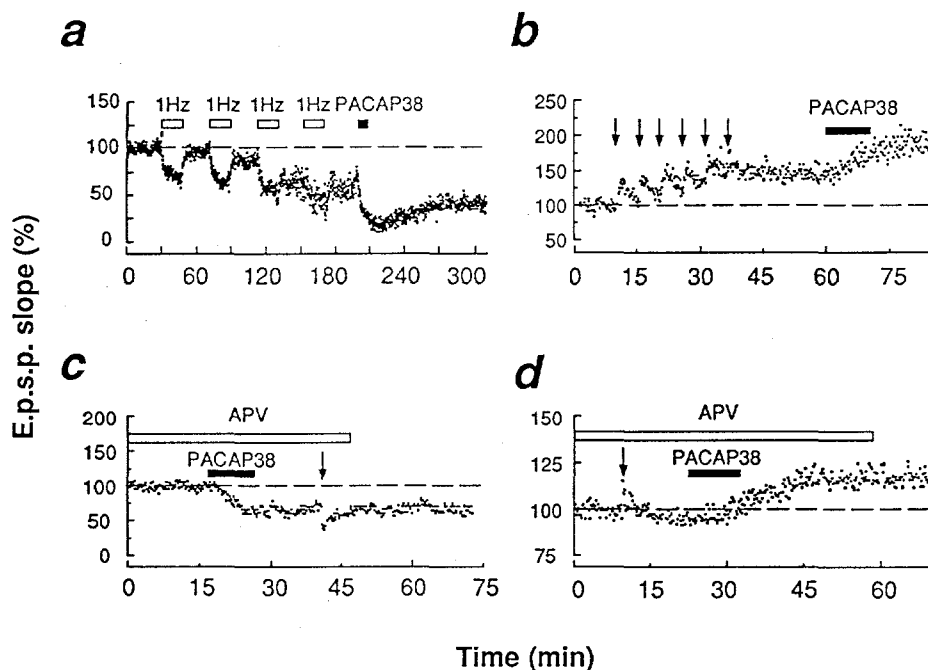
PACAP-38を海馬スライスの灌流液に加えると(1 μ M、10 min)、コンディショニング刺激をしなくても、Schaffer collateral-CA1シナプスの集合epspの傾き及び集合活動電位の振幅は減少し長時間続いた(第2.2.2(1)-1図a 上、mean percent of control: e. p. s. p., $87.6 \pm 2.3\%$, mean $\pm$ S. E. M., $n = 24$, $p < 0.005$; 第2.2.2(1)-1図a 下、population spike, $88.6 \pm 3.6\%$, $n = 15$, $p < 0.01$)。また、それとは対照的に、貫通繊維-歯状回シナプスでは、同じ濃度のPACAP-38を与えると集合epspの傾き及び集合活動電位の振幅は増加した(第2.2.2(1)-1図b 上、e. p. s. p., $120.1 \pm 3.5\%$, $n = 10$, $p < 0.005$; 第2.2.2(1)-1図b 下、population spike, $142.3 \pm 7.4\%$, $n = 8$, $p < 0.005$)。10分間の投与後、PACAP-38を洗い流した後も、どちらの効果も5時間以上続いた。すなわち、PACAP-38は、同じ濃度で(1 μ M)、CA1では長期抑制様の現象を、歯状回では長期増強様の現象を誘導した。

また、この効果は濃度依存的であり、CA1、歯状回いずれも、効果が現われる最低濃度は100nMであった(第2.2.2(1)-1図c)。



第2.2.2 (1)-1図 海馬スライスシナプス伝達に対するPACAP-38の効果
 a : CA1、b : 齒状回、black barはPACAP-38の投与を示す。それぞれ、PACAP-38投与前と後の波形を重ね合わせて示した。scale barは、a, 2 mV/5 ms (上)、2 mV/5 ms (下); b, 0.5 mV/5 ms (上)、1 mV/5 ms (下)。c : 濃度依存性。Black column : CA1、Gray column : 齒状回。

このPACAP-38によるシナプス抑制および増強のメカニズムを明らかにする第一歩として、活動度依存的な長期抑制 (LTD) および長期増強 (LTP) との加算性を検討した。CA1 の LTD は、Schaffer collateral を低頻度刺激 (1 Hz、15 分) すると誘導されることが知られている (7、9)。まず、Schaffer collateral に何度も低頻度刺激を与えて (1 Hz、15 分を 1 セットとして、4 セット)、活動度依存的な長期抑制 (LTD) を飽和させておいてから PACAP-38 (1 μ M) を与えると、同じシナプスでさらに長期抑制様の現象が誘導された (第 2.2.2 (1)-2 図 a、 $64.4 \pm 9.7\%$, $n=3$)。また、歯状回でも同様な実験を行った。貫通線維に何度も高頻度刺激を与えて (100 Hz、1 秒を 1 セットとして、6 セット)、活動度依存的な長期増強 (LTP) を飽和させておいてから PACAP-38 (1 μ M) を与えても、同じシナプスでさらに長期増強様の現象が誘導された (第 2.2.2 (1)-2 図 b、 $119.7 \pm 4.9\%$, $n=3$)。すなわち PACAP-38 によるシナプス抑制および増強は、活動度依存的な LTD や LTP と明確な加算性を示した。CA1 の LTD および歯状回の LTP の誘導は、NMDA 型グルタミン酸受容体のブロッカーを投与することにより阻害される (3、7、9、16、17)。PACAP-38 による効果における NMDA 型グルタミン酸受容体の関与を検討するために、D, L-($\pm$)-amino-phosphonovalerate (APV) 存在下 (50 μ M) で PACAP-38 をスライスに与えたところ、CA1、歯状回いずれも、APV を与えない場合と同様な現象が見られた (第 2.2.2 (1)-2 図 c、CA1、 $81.7 \pm 6.1\%$, $n=5$, $P < 0.05$; 第 2.2.2 (1)-2 図 d、dentate gyrus、 $117.8 \pm 1.8\%$, $n=6$, $P < 0.001$)。これらの結果は、PACAP-38 による長期シナプス抑制および増強が、



第 2.2.2 (1)-2 図 PACAP-38 の効果の LTP、LTD に対する加算性と APV の効果

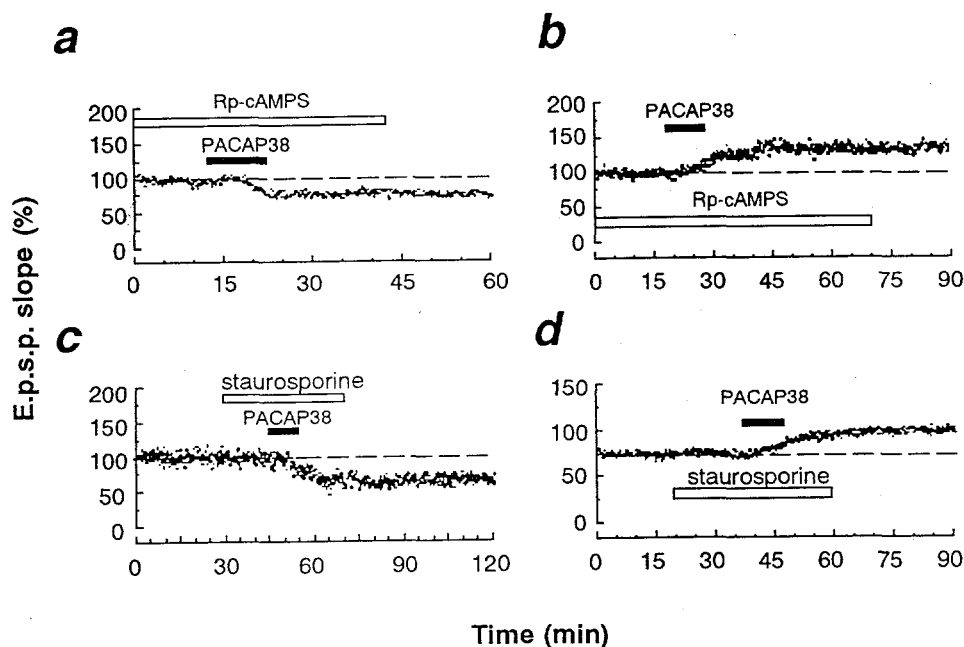
a : CA1 での飽和 LTD に対する加算性。b : 歯状回での飽和 LTP に対する加算性。c : CA1 での APV (50 μ M) 存在下での PACAP-38 の効果。d : 歯状回での APV (50 μ M) 存在下での PACAP-38 の効果。矢印はテタヌス刺激。

活動度依存的な LTD および LTP と異なるメカニズムで誘導されることを示唆する。

それでは、どのようなメカニズムで、そしてなぜCA1と歯状回で反対の効果が現われるのであろうか。PACAP受容体は、現在のところ、少なくとも二つのサブタイプ (Type IとType II) が存在することが報告されている。Type I受容体は、アデニル酸シクラーゼとホスホリパーゼC (PLC)両方に共役しており、Type II受容体は、アデニル酸シクラーゼのみに共役している (11、12、18)。海馬では、Type I受容体mRNAは歯状回顆粒細胞にのみ発現しており、一方Type II受容体mRNAは、CA1錐体細胞と歯状回顆粒細胞両方に発現している (11、12、18)。したがって、恐らく錐体細胞と顆粒細胞のPACAP受容体下流のシグナル伝達様式が異なっていて、それがCA1と歯状回での効果の違いに反映されているのではないかと考えた。

そこでまず、アデニル酸シクラーゼ活性化に続くcAMP生成の下流に位置すると考えられるAキナーゼ (PKA)の関与を調べるために、PKAの選択的阻害剤であるRp-cyclic adenosine 3', 5'-monophosphorothioate (Rp-cyclic adenosine 3', 5'-monophosphorothioate (Rp-cAMPS) (8)を用いて、PACAP-38の効果に対する影響を検討した。あらかじめ100 μ MのRp-cAMPSで1時間以上インキュベートしておいた海馬スライスを、同じ濃度のRp-cAMPSを含んだ灌流液で満たしたチェンバーに移し、モニター刺激に対する反応が安定していることを確認後、PACAP-38 (1 μ M)を灌流液に加えた。結果は、CA1、歯状回どちらのシナプスでもRp-cAMPSを加えない時と同様な効果が現われた (第2.2.2(1)-3図a、b、CA1, $82.9 \pm 2.1\%$, $n = 10$, $P < 0.001$; dentate gyrus, $122.1 \pm 1.4\%$, $n = 6$, $P < 0.001$)。すなわち、PACAP-38によるシナプス伝達の制御には、CA1、歯状回どちらもPKAの活性化は必要ないということを示唆する。海馬初代培養系やNB-OK-1細胞でPACAP-38は細胞内カルシウム濃度を上昇させるが、この現象もPKAの活性化を必要としないことが報告されており (6、19)、上述した結果と考えあわせると興味深い。

Type I受容体の下流では、cAMPの他に、イノシトール3リン酸の生成に続く細胞内カルシウム濃度の上昇とカルシウム依存性蛋白質キナーゼの活性化が考えられる。カルシウム依存性蛋白質キナーゼの関与を検討するために、インヒビターであるカルホスチンC、ポリミキシンB、スタウロスポリンの効果を調べた。カルホスチンC (2 μ M)とポリミキシンB (10 μ M)は、プロテインキナーゼC (PKC)の特異的阻害剤であり、高頻度刺激によるLTPの誘導を阻害する (5、13、20)。また、スタウロスポリン (1 μ M)はその阻害効果の選択範囲が広く、カルシウム/カルモデュリン依存性蛋白質リン酸化酵素II (CaMKII)、PKA、PKCなどの活性化を阻害することが報告されている (4、10、22)。しかし、これらの阻害剤はすべて、CA1、歯状回どちらの領域においてもPACAP-38の効果を阻害しなかった (図2.2.2(1)-3図c、d、表1)。すなわち、PACAP-38によって誘導されるCA1、歯状回のシナプス可塑性は、PKA、カルシウム依存性蛋白質リン酸化酵素どちらの活性化も必要としない可能性が高いと考えられた。



第2.2.2(1)-3図 Rp-cAMPS、スタウロスポリン存在下でのPACAP-38の効果

a、c: CA1、b、d: 歯状回。

現在のところ、PACAP-38によるこれらの効果のメカニズムは明らかになっていない。CA1ではTypeII受容体（アデニル酸シクラーゼと共役）のみが発現しているが、上述した結果から、PACAP-38によって細胞内cAMP濃度の上昇は起きるがPKAの活性化には依存しないような系が存在する可能性が推測できる。最近、直接PACAP-38には関係ないが、興味深い報告がなされている。CA1では、代謝依存型グルタミン酸受容体（mGluRs）と β アドレナリン受容体の両方の活性化によって一過性のシナプス抑制が起きるが、これは細胞内cAMP濃度の上昇には依存するが蛋白質リン酸化酵素（特にPKA）の活性化に依存しない経路、すなわち増加したcAMPが代謝されてアデノシンが生成され、それが細胞外に出てシナプス前のアデノシン受容体に結合することによって伝達物質放出の一過性の減少に至る経路が提案されている（10）。PACAP-38によるCA1のシナプス抑制の場合もこれと似たメカニズムが考えられるかもしれない。

最近、ショウジョウバエにもPACAP-38の抗体に反応する伝達物質様のものが存在することが報じられた。ショウジョウバエの神経筋接合部にPACAP-38を数 μ Mの濃度で与えると、ある種のカリウム電流が増大する。そしてそれは細胞内cAMP濃度の上昇とRas/Raf経路の活性化両方が必要とされている（23、24）。

Table 1.

	CA1	dentate gyrus
control	87.6 ± 2.3 % (n = 24, p < 0.005)	120.1 ± 3.5 % (n = 10, p < 0.005)
Rp-cAMPS (100 μM)	82.9 ± 2.1 % (n = 10, p < 0.001)	122.1 ± 1.4 % (n = 6, p < 0.001)
calphostin C (2 μM)	90.6 ± 2.2 % (n = 8, p < 0.01)	117.2 ± 1.6 % (n = 8, p < 0.001)
polymyxin B (10 μM)	82.6 ± 1.8 % (n = 14, p < 0.001)	122.6 ± 1.9 % (n = 6, p < 0.001)
staurosporine (1 μM)	82.2 ± 3.3 % (n = 4, p < 0.05)	119.7 ± 1.8 % (n = 4, p < 0.005)

この報告では、PACAP-38が海馬神経回路内で、領域特異的に異なったシナプス可塑性を引き起こすことを示した。では、その生理的意義はどのようなことが考えられるのだろうか。大脳皮質連合野や皮質下からの情報は主に貫通線維を介して海馬へ入力される。海馬からの出力経路は、1) CA1錐体細胞から海馬台、嗅内皮質、中隔野に投射する経路と、2) CA3錐体細胞から直接海馬采を経て主に中隔野に投射する経路がある(21)。もしPACAP-38が例えばホルモン様に海馬神経回路内全体に分泌され、歯状回で長期増強を、CA1で長期抑制を同時に誘導すれば、海馬からの情報はCA1からよりもCA3から直接海馬采を経て出力される割合が相対的に多くなるかもしれない。つまり、PACAP-38によって海馬神経回路の入力/出力特性が変化することが考えられる。しかし、このような生理作用を議論するには、まだ検討を要する部分が多い。in vivoでのPACAP-38の海馬への分泌経路や範囲、そして海馬CA1からとCA3-海馬采からの出力強度がPACAP-38によってほんとうに変化しているのかなど、今後の研究に期待したい。

謝辞：本文に示した実験結果は電子技術総合研究所の富永貴志氏（現ハワイ大）、市川道教氏、飯島敏夫氏の協力により得られたものが多い。また、本研究に対する貴重な御助言と執筆の機会を与えてくださった電子技術総合研究所の松本元・主席研究官に深謝したい。

（電子技術総合研究所 近 藤 哲 朗）

参考文献

- 1) Arimura, A. (1992). Pituitary adenylate cyclase activating polypeptide (PACAP): discovery and current status of research. *Regul. Pept.* 37, 287-303.
- 2) Arimura, A., Uchida, D., Somogyvari-Vigh, A., Shuto, S., Shioda, S., & Banks, W. (1995). In vivo cytoprotective action of PACAP38 in neuronal cell death in the brain. 2nd International symposium on VIP, PACAP, & related peptides, Abstracts 70-71.
- 3) Burgard, E. C., Decker, G., & Sarvey, J. M. (1989). NMDA receptor antagonists block norepinephrine-induced long-lasting potentiation and long-term

- potentiation in rat dentate gyrus. *Brain Res.* 482, 351-355.
- 4) Calabresi, P., Pisani, A., Mercuri, N. B., & Bernardi, G. (1994). Post-receptor mechanisms underlying striatal long-term depression. *J. Neurosci.* 14, 4871-4881.
 - 5) Cheng, G., Rong, X. W., & Feng, T. P. (1994). Block of induction and maintenance of calcium-induced LTP by inhibition of protein kinase C in postsynaptic neuron in hippocampal CA1 region. *Brain Res.* 646, 230-234.
 - 6) Delporte, C., Van-Praet, A., Herchuelz, A., Winand, J., & Christophe, J. (1993). Contrasting effects of PACAP and carbachol on $[Ca^{2+}]_i$ and inositol phosphates in human neuroblastoma NB-OK-1 cells. *Peptides* 14, 1111-1118.
 - 7) Dudek, S. M., & Bear, M. F. (1992). Homosynaptic long-term depression in area CA1 of hippocampus and effects of N-methyl-D-aspartate receptor blockade. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 89, 4363-4367.
 - 8) Frey, U., Huang, Y. Y., & Kandel, E. R. (1993). Effects of cAMP simulate a late stage of LTP in hippocampal CA1 neurons. *Science*, 260, 1661-1664.
 - 9) Fujii, S., Saito, K., Miyakawa, H., Ito, K., & Kato, H. (1991). Reversal of long-term potentiation (depotential) induced by tetanus stimulation of the input to CA1 neurons of guinea pig hippocampal slices. *Brain Res.* 555, 112-122.
 - 10) Gereau IV, R., W., & Conn, P., Jeffrey (1994). Potentiation of cAMP responses by metabotropic glutamate receptors depresses excitatory synaptic transmission by a kinase-independent mechanism. *Neuron* 12, 1121-1129.
 - 11) Hashimoto, H., Ishihara, T., Shigemoto, R., Mori, K., & Nagata, S. (1993). Molecular cloning and tissue distribution of a receptor for pituitary adenylate cyclase-activating polypeptide. *Neuron* 11, 333-344.
 - 12) Ishihara, T., Shigemoto, R., Mori, K., Takahashi, K., & Nagata, S. (1992). Functional expression and tissue distribution of a novel receptor for vasoactive intestinal polypeptide. *Neuron* 8, 811-819.
 - 13) Lopez-Molina, L., Boddeke, H., & Muller, D. (1993). Blockade of long-term potentiation and of NMDA receptors by the protein kinase C antagonist calphostin C. *Naunyn-Schmiedeberg's Arch. Pharmacol.* 348, 1-6.
 - 14) Masuo, Y., Matsumoto, Y., Tokito, F., Tsuda, M., & Fujino, M. (1993). Effects of vasoactive intestinal polypeptide (VIP) and pituitary adenylate cyclase activating polypeptide (PACAP) on the spontaneous release of acetylcholine from the rat hippocampus by brain microdialysis. *Brain Res.* 611, 207-211.
 - 15) Masuo, Y., Ohtaki, T., Masuda, Y., Tsuda, M., & Fujino, M. (1992). Binding

- sites for pituitary adenylate cyclase activating polypeptide (PACAP): comparison with vasoactive intestinal polypeptide (VIP) binding site localization in rat brain sections. *Brain Res.* 575, 113-122.
- 16) Mulkey, R. M., & Malenka, R. C. (1992). Mechanisms underlying induction of homosynaptic long-term depression in area CA1 of the hippocampus. *Neuron* 9, 967-977.
 - 17) Sarvey, J. M., Burgard, E. C., & Decker, G. (1989). Long-term potentiation: studies in the hippocampal slice. *J. Neurosci. Methods* 28, 109-122.
 - 18) Spengler, D., Waeber, C., Pantaloni, C., Holsboer, F., Bockaert, J., Seeburg, P. H., & Journot, L. (1993). Differential signal transduction by five splice variants of the PACAP receptor. *Nature* 365, 170-175.
 - 19) Tatsuno, I., Yada, T., Vigh, S., Hidaka, H., & Arimura, A. (1992). Pituitary adenylate cyclase activating polypeptide and vasoactive intestinal peptide increase cytosolic free calcium concentration in cultured rat hippocampal neurons. *Endocrinol.* 131, 73-81.
 - 20) Wang, J. H., & Feng, D. P. (1992). Postsynaptic protein kinase C essential to induction and maintenance of long-term potentiation in the hippocampal CA1 region. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89, 2576-2580.
 - 21) Witter, M. P., Groenewegen, H. J., & Silva, L. d. (1989). Functional organization of the extrinsic and intrinsic circuitry of the parahippocampal region. *Prog. Neurobiol.* 33, 161-253.
 - 22) Yanagihara, N., Tachikawa, E., Izumi, F., Yasugawa, S., Yamamoto, H., & Miyamoto, E. (1991). Staurosporine: an effective inhibitor for Ca^{2+} /calmodulin-dependent protein kinase II. *J. Neurochem.* 56, 294-298.
 - 23) Zhong, Y. (1995). Mediation of PACAP-like neuropeptide transmission by coactivation of Ras/Raf and cAMP signal transduction pathways in *Drosophila*. *Nature* 375, 588-592.
 - 24) Zhong, Y., & Pena, L. A. (1995). A novel synaptic transmission mediated by a PACAP-like Neuropeptide in *Drosophila*. *Neuron*, 14, 527-536.

(2) MAJOR BRAIN REGULATOR・生体アミンによる脳内シナプス数の調節機構

a. 脳にしかない回路・広範投射系の機能

脳とコンピューターの回路からみた違いはどこにあるのだろうか。どちらもブロック線図で書かれるような点对点型の回路を持っている。この回路では神経細胞から神経細胞への信号の受け渡しは、シナプスとよばれる部位で化学的な過程を経て行われる。すなわち、電気的な信号がシナプスに届くと、直径40ナノメートルほどのシナプス小胞（矢印）に含まれている神経伝達物質が隣接する神経細胞との狭い間隙（矢尻）にはきだされ、信号が伝えられる神経細胞側にある受容体に神経伝達物質が捉えられ信号が伝えられる。シナプスは神経細胞と神経細胞のつなぎ目である。140億の神経細胞があるヒトの脳でも、一つ一つの神経細胞が10の4乗とも5乗とも言われる数のシナプスから入力を受けていると考えられる。更に最近ではシナプスは単なるつなぎ目としてだけではなく、シナプス自体にマイクロプロセッサのような機能があるとも考えられている。

脳にしかない回路としては広範（拡散型）投射系がある。比較的少数の脳幹にある神経細胞からの突起がおびただしく分岐を繰り返して、脳の広い範囲に高密度に分布している。こんな回路は計算とか論理回路には向いていないことは容易に想像できる。それでは広範投射系は何をしているのだろうか。広範型投射系には生体アミンとよばれる物質が含まれている。これらはどれも精神状態や知的機能と深く関わる物質であることが知られている。例えば老人性痴呆では脳内アセチルコリンが減少する。鬱病や攻撃性、不安、拒食症、自閉症などはモノアミンのうちのセロトニンが大きな役割を担っていると考えられている。また精神分裂病の治療薬はドーパミンやセロトニンの働きを抑える薬物である。

広範投射系の線維にはコブ状の一見シナプスのようなものがあるが、それらの多くはシナプスではない。生体アミンを含有する神経系にも点对点型のシナプスもあるが、特定のシナプス後構造が見いだせないことが多い。極端な例としては脳脊髄液中にモノアミンを放出する神経細胞もある。下等な動物だけではなく高等脊椎動物や哺乳類でもかなり多く存在している。そのような形態からしても生体アミンが神経伝達以外の役割を担っているのではないかと考え、研究を行った。その結果、生体アミンは点对点型投射系のシナプス数の調節を行い、脳活性の制御物質として、いわばMAJOR BRAIN REGULATORとしての役割を果たしていることが、最近の我々の一連の研究によって明らかになった。

b. 可塑性制御物質としての生体アミン：発達脳と成熟脳の可塑性とシナプスのダイナミズム

発生とか発達に伴う変化は右上がりの、物が多くなったり大きくなるだけではない。発達の過程で一時的に増加し、その後発達とともに減少して成体の状態になるものや、または発生の途中で一時的に出現して、発達とともになくなるものもある。

ニワトリの脊髄の5-HT線維密度は16日胚以降急に増え、孵化後1週でピークとなり、その後

減少する¹。一時的に増加する5-HTを数種類の作用の異なる薬物で孵化後1週間減少させると、どの薬物によっても最大で70%シナプス数が低下する²。5-HT陽性のシナプスは全体の0.5%以下であるので、減少したシナプスのほとんどは一般的な普通のシナプスと考えられる。すなわち、一時的に増加する5-HTは発達中の脳でシナプスの過形成を促していたのである。ヒトの場合、視覚領野では生後8カ月³、前頭葉では5歳⁴をピークとしてシナプスが過剰に形成される。そのことによって発達過程の脳に可塑性がもたらされると考えられてきた。しかし、シナプスを過形成させる”可塑性物質”はここで述べる5-HT以外には、これまで明らかにされていない。

成熟した脳で5-HTはシナプスにどんな影響を与えているのか、この問に答えるために生後6カ月のニワトリの5-HTを1週間減らしてみた²。するとシナプス密度は最大で60%減少した。またその減少の度合いは5-HT線維の分布密度の高いところほど大きく、5-HT線維がないところではシナプス密度に変化がなかった。次ぎに孵化後2年の老齢(?)ニワトリに同様の実験を行った⁵。その結果、主に感覚入力を受ける後角ではシナプス密度は18%減少するが、主に運動に関わる前角では全く変化がなかった。老齢ニワトリの後角では5-HT線維の分布密度も形態も、またシナプス密度も若いニワトリと同じである。しかし前角ではシナプス密度は低下し、5-HT線維の数も少なく、個々の5-HT線維には膨れた変性像様の構造が多く見られた。

5-HTは成体でもシナプスの維持に必要ならしい。シナプスは一度作られると変化しないものではなく、常に作り替えられる動的な構造であり、作り替えに必要なシナプス形成を5-HTが促進しているのではないかと考えている。即ち、成熟脳ではシナプスの作り替えを促進することにより、5-HTは脳に可塑性をもたらしているのではないだろうか。脊髓前角では加齢に伴い5-HT線維も少なくなり、5-HTによるシナプスの作り替え率が低下し、可塑性がなくなるのであろう。

シナプスが動的な構造であることに疑問を持たれるかもしれない。しかしニワトリヒナでは回避学習後1時間で学習中枢である右側の hyperstriatumのシナプス密度が77%増加し、24時間後にはもとの値に戻ってしまう⁶。またシベリア地リスが冬眠からさめると2時間で海馬CA3のシナプスが46%も増加することが報告されている⁷。脳の可塑的な部位では刻々とシナプスが作られ、数が変化しているらしい。

c. 5-HT受容体の同定、高次機能と5-HT_{2A}受容体

5-HTによるシナプスの形成維持機能にどの受容体サブタイプが介在しているのか調べた。血液脳関門がなく、投与した薬物が極めて効率よく吸収されるニワトリ胚に孵卵開始後11日から17日まで受容体サブタイプの働きを抑える拮抗薬と反対に高める相働薬を投与し、18日胚でシナプス密度を定量化した。その結果、5-HT_{2A}受容体がシナプス形成に関わっていることが明らかになった。5-HT_{2A}受容体の拮抗薬ケタンセリンと相働薬DOIにより生体内のシナプス数を人工的に変化させることが出来た⁸。

5-HT_{2A}受容体は15種類ある5-HT受容体サブタイプのうち高次機能との関連が示唆される最も

重要な受容体と考えられてきた。ヒトの脳皮質では 5HT_{2A}受容体は加齢に伴い減少し、更にアルツハイマーでは激減することが知られていた⁹。しかし 5HT_{2A}受容体がどんな機能を果たしているのか明らかでなかった。5HT_{2A}受容体がヒトの脳皮質でもシナプスの形成維持作用を介在している可能性がある。5HT_{2A}受容体の減少によりシナプスの作り替え率が低下し、シナプス数が減少したり、また長期記憶を作る過程に必要なシナプス形成ができなくなることが考えられる。

5HT_{2A}受容体はこれまでのオートラジオグラフィーやin situ hybridizationによる研究でも脳皮質に多く分布することが報告されている。しかし従来の研究方法では5HT_{2A}受容体の細胞レベルでの局在は解析できない。そこで5HT_{2A}受容体に対する抗体を作成して、研究を行った。5HT_{2A}受容体は7回膜貫通型でホスファチジルイノシトール反応を介してG蛋白に共役する。N末のペプチドを合成し、またC末の融合蛋白を作り、これらを抗原として抗体を作成した。抗体作成にはニワトリを使い、卵黄から抗体を分離精製する方法が優れた結果をもたらした。抗体の特異性は現在考えられる全ての方法で確認された。

抗体による5HT_{2A}受容体のラット脳皮質でのおおまかな分布パターンは従来の方法による結果と一致した。しかし抗体を使って得た新知見は5HT_{2A}受容体の高次機能との関連を強く示唆した。すなわち、5HT_{2A}受容体は脳皮質の神経細胞のほとんど全てが持っており、錐体細胞では先端樹状突起の先端にまで分布していた。電子顕微鏡による観察では、5HT_{2A}受容体は非対称性シナプスのシナプス後膜に局在することが確かめられた。Aghajanianは5HT_{2A}受容体相働薬によりラット脳皮質のほぼ全ての細胞が持続性に興奮することを見いだしており（私信）、5HT_{2A}受容体は神経伝達に関しても脳皮質の機能を考える上で重要な意味を持っていることが示唆された。

d. シナプス形成維持機構の種差、部位差

これまでに5HT以外の成体アミンであるノルアドレナリン (NA)、ドーパミン (DA)、アセチルコリン (Ach)もシナプスの形成維持を促進することが確かめられている。それぞれの生体アミンが色々な組み合わせでシナプスの形成維持に働いていると考えている。

5HTとNA線維の分布はラットとニワトリで大きく異なる。ニワトリ脊髄IX層には5HTが高密度に分布するがNA線維は少なく、5HT線維は運動ニューロンの胞体周囲に多い。ラットでは5HTとNA線維がほぼ同程度分布しており、5HT線維は運動ニューロンの胞体間に多い。5HTを除去するとニワトリ脊髄でシナプス数が大きく減少することを述べたが、同じ様な実験をラットで行ってみると、シナプスの減少率はせいぜい十数パーセントにすぎない。

脳皮質でのモノアミンの分布にも大きな種差がある。ラット新皮質でDA線維はわずかな領域である前頭前野に分布するだけであるが、ヒトやサルでは脳皮質全体に高密度に分布している。DA系が原因すると考えられる精神分裂病の基礎研究を行うためには、サルを使う実験が必須である。

生後1-2週の間5-HTとNAをそれぞれ単独で、または同時に除去しても常に低下率は変わらず、ラット視覚領野で30-50%のシナプス密度の低下がおこる。しかし5-6週で5-HTをなくすとII層のみで、NAの除去ではI層のみで約20%シナプス密度が低下する。IV層では5-HTとNAの両方をなくしたときのみ約25%のシナプス密度の低下が認められた。頭頂葉では5-6週でも5-HTの除去により全層で20-40%シナプス密度が低下した¹⁰。一方、5-6週の間5-HTを除去しても前頭前野ではシナプス密度に全く変化がないが、DA受容体拮抗薬の投与では20%前後のシナプス密度の低下が確認された。モノアミンによるシナプス形成維持促進作用は脳皮質の領野や層、また発達時期により大きく異なることが示唆されている。モノアミンの脳皮質での分布に関する種差はそれぞれのモノアミンによって形成維持されるシナプスのサブセットの差を反映しているのではないだろうかと考えている。

e. 新しい研究方法：長期増強によらない学習記憶の形成

生体アミンがシナプスの形成維持に促進的に働いていることを利用すると、これまでになかった新しい方法による研究が可能になる。薬物により5-HTとAChを単独に、または両方ともなくすことで海馬のシナプス数を変化させることができる。ラットに5-HTとAChの除去薬を1週間にわたり投与すると、特にCA3でシナプスの減少率が大きく、次いで歯状回、CA1の順であった。海馬内の主要回路がシナプス結合する部位でシナプス密度は大きく低下し、それ以外の部位ではシナプス密度に変化はなかった。シナプスの減少率は5-HTとAChを同時に減少させた時はそれぞれ単独に減少させた時の減少率の和となり、CA3では最大で50%あまりシナプス密度が低下した。

水迷路による位置学習を調べると、5-HTとAChの単独除去群ではともに同程度に学習が遅延した。両方の除去では学習遅延の程度は単独除去の和となり、ステージにたどり着くまで生食投与例の3倍の時間を要した。5-HTとAChの両方の除去によりシナプス数が減少したラットの学習は遅延したが、学習は明らかに成立した。しかし、Schaffer側枝を頻回刺激してCA1で長期増強(LTP)を調べると、如何に条件を変化させてもLTPは出現しなかった。LTPがなくても学習記憶が成立することが示された。予備学習をすればLTPがなくても学習が成立するとの報告もあり^{11, 12}、LTPが学習の基礎機構であるとする従来からの考え方に疑問が生ずる。

f. 学習障害・知的障害発症メカニズムへの新しいアプローチ

妊娠中、特に妊娠後期に精神的なストレスをうけた母親から生まれた子供には精神遅滞や行動異常が通常の2倍発生することが知られている¹³。妊娠ラットへのストレス¹⁴や新生仔ラットへのストレス¹⁵で5-HT系は大きな影響を受ける。5-HTがシナプス数を調節する因子であるのだから、ストレスにより5-HT系だけではなくシナプス構造も変化する可能性が考えられる。

handlingという新生仔ラットへのストレスとして有名な方法がある。生後21日間、離乳するまで一日一回、15-30分間、仔を母親から離すことによりストレスを与える。このhandlingによって仔は成熟してもストレスの指標とされる糖質コルチコイドの受容体密度が海馬内で高く

なっていることが知られている。さらに最近の報告によれば、海馬の5HT_{2A}受容体密度はストレスが加えられなかった対照群ラットの1/3に低下することが明らかにされた¹⁵。ストレスを受けたラットで海馬のシナプス数は減るのだろうか。handlingした後、生後3週と6週にラット海馬のCA1とCA3でのシナプス密度の変化を調べた。結果は予想とは逆で、3週では両方の部位で十数パーセントhandling群でシナプス密度が高かった。6週のCA1ではhandling群と対照群に差はなかったが、CA3ではhandling群が対照群に比べ四十数パーセントもシナプス密度が高かった。また行動にも差違が見られた。マウスをラットのケージに入れると、handlingを受けたラットはより頻繁にマウスの臭いをかいだり、軽く噛んだり、執拗にマウスを追跡した。またマウス側の反応としては、対照群ではほとんど鳴くことはないが、handlingを受けたラットと一緒にいるとほとんど全ての例で鳴いた。この実験によって環境要因（ストレス）がシナプス構造と行動を永続的に変化させることが示された。

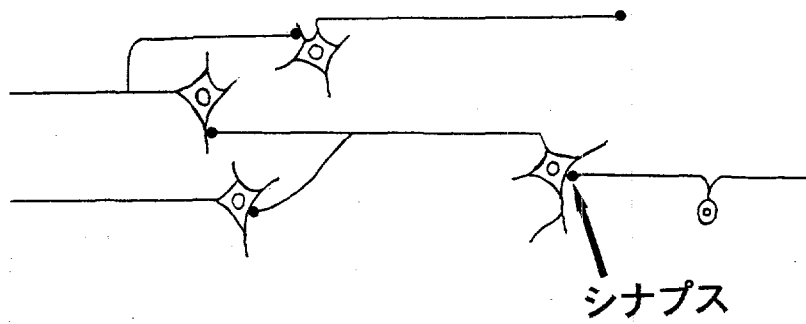
生体アミンがシナプス形成維持を促進する作用を持つとする新しい概念が明らかになり、従来解らなかつた病態生理の理解が可能になる。例えば、フェニールケトン尿症（PKU）であるが、未治療患者ではモノアミンの脳内濃度が正常の1/2から1/3になる¹⁶。生後シナプスが過形成され最も可塑性に富んだ脳にならなければいけない時期にシナプスが作られない。その結果、未治療のPKU患者は一歳までに精神遅滞になってしまう可能性が考えられる。実際PKUモデルラットではヒトのPKUと同じようにモノアミン脳内濃度が低下し、そのうえ大脳皮質のシナプス数が激減することが確かめられている¹⁷。現在PKUミュータントマウスでこの仮説を確かめる実験を行っている。モノアミン前駆体などを使用することにより精神遅滞を防げれば、新しい治療法が可能になる。またPKU以外の知的障害を伴う疾患でモノアミン濃度の低下または上昇することが知られており、それらの疾患でも新しい治療法の適応が可能であろう。

g. まとめ

脳に特徴的な回路、広汎投射系がもつ生体アミンが脳全体の点对点型回路のシナプス数の調節を行っていることが強く示唆される。まさにMAJOR BRAIN REGULATORとして脳活性を制御しているのであろう。この考え方は更に慎重に検証しなければならないが、精神神経疾患や小児神経発達障害の研究にブレイクスルーをもたらす可能性は大きい。また環境要因は発達や加齢の過程でEPIGENETICな要素として個体におおきな影響を及ぼし、行動異常や学習障害を誘引する可能性が考えられるが、生体アミンはその機構を解くカギである。

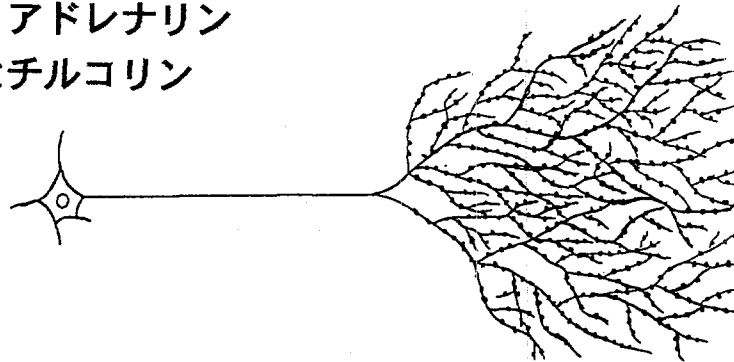
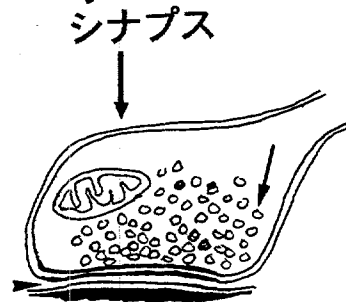
（筑波大学 岡 戸 信 男）

点对点型投射（回路）



広範型投射（回路）

モノアミン
セロトニン
カテコールアミン
ノルアドレナリン
ドーパミン
アドレナリン
アセチルコリン



第2.2. 2(2)-1図

参考文献

- 1) Okado N et al: Dev Brain Res 50:217-222, 1988,
- 2) Okado N et al: J Neurobiol 24:687-698, 1993,
- 3) Huttenlocher PR et al: Neurosci Lett 33:247-252, 1982,
- 4) Huttenlocher PR: Brain Res 163:195-205, 1979,
- 5) Chen L et al: J Neur Transplan Plast 6:41-48, 1997,
- 6) Doubell TP, Stewart MG: J Neurosci 13:2230-2238, 1993,
- 7) Popov VI, Bocharova LS: Neuroscience 48:52-62, 1992,
- 8) Niitsu Y et al: Neurosci Lett 195:159-162, 1995,
- 9) Blin J et al: Brain 116:497-510, 1993,
- 10) Chen L et al: Neurosci Res 19:111-115, 1994
- 11) Bannerman DM et al: Nature 378:182-186, 1995,
- 12) Saucier D, Cain DP: Nature 378:186-189, 1995,
- 13) Stott DH: Develop Med Child Neurol 15:770-787, 1973,
- 14) Peters DAV: Pharmacol Biochem Behav 31:839-843, 1988,
- 15) Smythe JW et al: Dev Brain Res 80:183-189, 1994,
- 16) McKean CM: Brain Res 47:469-476, 1972,
- 17) Nigam MP, Labar DR: Brain Res 179:195-198, 1979

(3) 睡眠の制御機構と制御物質

a. 睡眠の役割

睡眠は脳をもつ生命体に特有の生理機能であり、生存戦略である。睡眠のもついろいろな目的のうち、大脳を規則的に休息させることが最も重要である。脳はコンピューターのようにいつも同じレベルの活動をつづけることはできない。質のよい睡眠があってはじめて、脳は高次の情報処理能力を発揮できる。したがって、発達した大脳をもつ高等動物ほど睡眠の役割は大きい。

b. 睡眠制御の概要

睡眠にはノンレム睡眠とレム睡眠という異なる状態が分化している。それぞれの役割をひとくちで言えば、ノンレム睡眠は大脳を休ませ回復させる眠り、レム睡眠は大脳を活性化させる眠りである。これら2種類の睡眠は脳が脳自身を合目的的に休ませるために開発した適応技術である。

これら2種類の睡眠を制御する脳部位（睡眠中枢）は、前脳基底部から脳幹にかけて分化している。そこではニューロン活動にもとづく神経機構と、各種の睡眠物質（睡眠物質）にもとづく液性機構の2種類の制御機構があって、両者の相補的な相互作用のもとに睡眠覚醒状態が動的にコントロールされている。

神経機構は、2種類の睡眠のそれぞれに対して複雑な階層性の神経回路を構成している。しかし、その分化の程度はあまり特殊化したものでなく、広範囲な構造の中に散在している。ノンレム睡眠の調節にかかわるのは間脳を中心とする構造で、とくに視床下部を含む前脳基底部が重要なはたらきをしている。一方、レム睡眠の調節にかかわるのはより下位の中脳、橋、延髄を含む脳幹と呼ばれる構造である。

睡眠物質は睡眠欲求の高い状態で脳内あるいは体液内に出現して睡眠の誘発や維持にかかわる物質の総称である。睡眠物質は脳脊髄液を介して脳全域に伝えられ、神経機構のニューロン活動や神経伝達物質のレセプターの感受性を広域的に修飾することによって睡眠制御にかかわっている。

睡眠制御の様式には2つの基本法則がある。第1の法則は、睡眠は1日を単位とするリズム現象であり、脳内に存在する生物時計に管理されているというものである。第2の法則は、睡眠はホメオスタシス現象であり、先行する断眠時間の長さなど脳内の生理的現状によって睡眠の質と量が一定の範囲内に収まるよう管理されているというものである。

このように、第1の法則には体外環境の安定した未来を当て込んで、前向きにプログラムが設定されている。また、第2の法則には体内環境の変動した過去を振り返り、後向きに補償できるようにになっている。この2つの法則はたがいに協調しており、相補的な関係にあるが、ほんらい生体が進化の過程で別々に獲得したものとみなされ、それぞれ独立に作用を発現するこ

とができる。そして、後者のほうがより新しい高度の技術であり、より適応性に富んでいると考えられる。この高度技術を支えているのが、多種類の睡眠物質であると理解できる（井上、1997）。

c. 睡眠の制御物質（睡眠物質）

睡眠中あるいは断眠直後の脳組織や体液から睡眠物質を直接抽出しようとする研究が1960～70年代にヨーロッパ、アメリカ、日本の3チームによって試みられ、いずれのチームも異なる物質を発見することに成功した。それぞれ、デルタ睡眠誘発ペプチド、ムラミルペプチド、ウリジンと酸化型グルタチオン（GSSG）であった。このような成功をきっかけに体内物質を介する睡眠制御のしくみを分析しようとする研究が急激に活気づき、その成果は1980年代後半から多くの専門家に注目されるようになった。同時に、既知物質のなかからもプロスタグランジンや各種ペプチドホルモンなど、多数の化合物が睡眠物質候補として登場した。厳密な基準を適用しないかぎり、睡眠物質の候補は現在では数十にもものぼる（Inoué, 1989; 1995a; 1995b）。

これら多種多様の体内物質が、なぜ睡眠制御にかかわっていて、どのような特異作用および相互作用によって、睡眠を発現させ、維持させ、変化させ、終結させているかを解明しようとする研究が、いま全世界でさかんである。そして、神経機構のニューロン活動や神経伝達物質のレセプターとの関連のもとに多角的に推進されている。1990年代に入ると、睡眠物質それぞれの生合成部位や動態、他物質との相互関係、神経機構への修飾様式、分子レベルでの作用機構などが、多角的に探究されるようになっていく。

睡眠物質の役割を要約すれば、次のようになる。睡眠は個体全体の適応行動であるゆえに、生体内外の環境変化に関するさまざまな情報を統合して発現させる必要がある。こうした睡眠中枢への情報を伝達するメッセンジャーの役割が睡眠物質の一次的な役割である。それゆえ、睡眠物質の多様性を特色づける第一の点は、種類の多さである。生体はホルモンや免疫関連物質、異物や毒物、さらには代謝産物までも含む多種類の睡眠物質を活用して、巧妙に眠りを制御している。多彩な生理機能のそれぞれに対応する化学的なメッセンジャーが多かれ少なかれ睡眠を修飾しているわけである。

睡眠物質はさらに、神経機構のニューロン活動を修飾して、睡眠・覚醒状態を移行させたり維持させたりする役割を演じている。したがって、その作用は一面では特異的であるが、他面では非特異的である。それゆえ、睡眠物質の多様性を特色づける第二の点は、関連する機能の多さである。睡眠そのものの機能は依然として完全には解明されないままであるが、多数あると考えられている。生きていること自体がさまざまな機能をもっており、眠ることは生きていることの一つの状態であるから、それぞれに対応する多様な機能が睡眠物質によって担われているのは当然であるといえよう。睡眠物質の多様性と、この10年間に集積された知見は膨大である（井上、1997）。

このように複雑な睡眠の制御機構が高等動物に発現したのは、地表のバイオスフェアという

外界環境に適応した休息（身体の不動化）だけでは不備となるほど、高等動物では体内環境が整備されて脳が発達したため、この特殊な器官を合目的性の高い様式で休息させ、また活性化することが必須になったからであろう。つまり、脳が脳自身を休ませるために開発した高度の生存戦略として出現したのである。

d. ウリジンとグルタチオン

筆者らは1974年に断眠ラットの脳幹から「睡眠促進物質 (SPS)」を抽出し、1983年と1990年にウリジンと GSSG をそれぞれ SPSの有効成分として同定した (Inoué, 1993)。ウリジンと GSSG の睡眠促進にかかわる役割は、たいへん対照的であり相補的である。行動レベルの睡眠が分子レベルで発揮する役割の一部は、次のように推理されている (第2.2.2(3)-1図)。

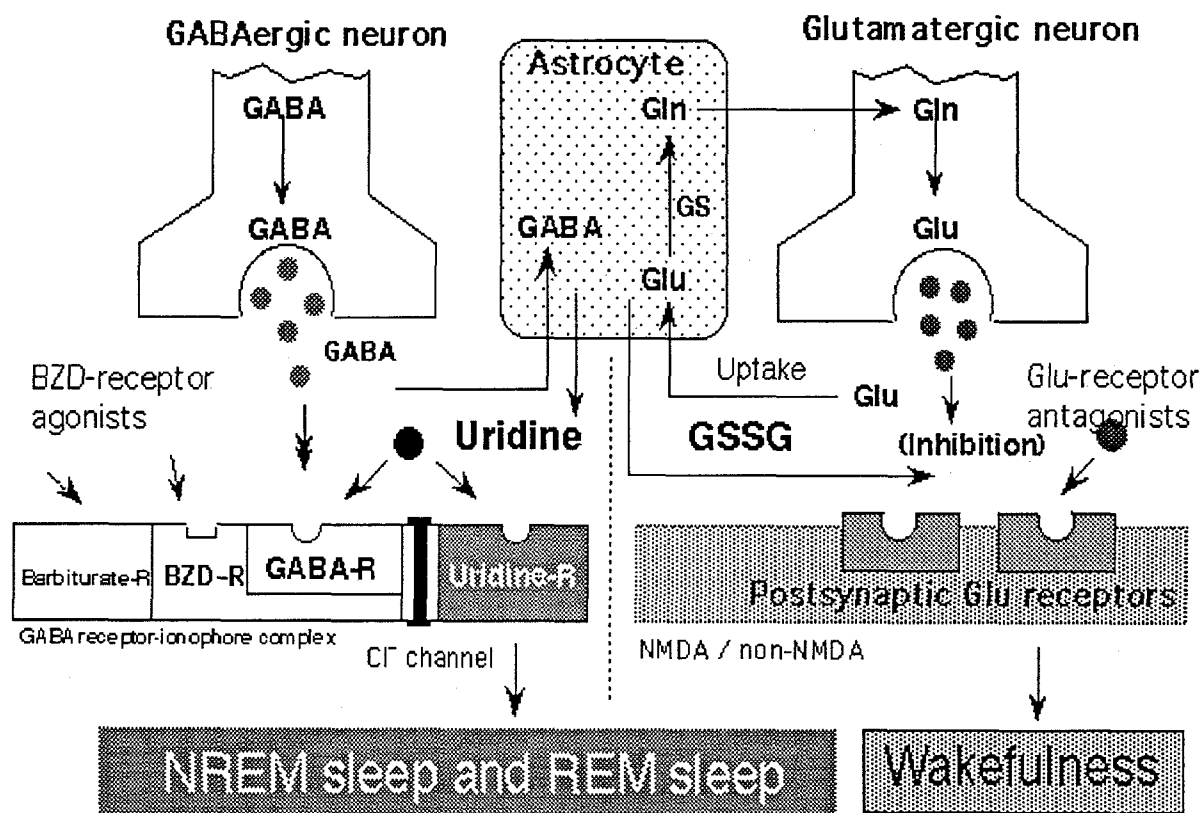
ウリジンは抑制性神経系のガンマアミノ酪酸 (GABA_A) 作動性ニューロンの伝達活動をシナプスレベルで促進するようにはたらく。つまり、GABA_A レセプター複合体（この中にはウリジン固有のレセプターが含まれる）の神経伝達を増強する。ちなみに、ウリジンと類似した化学構造と睡眠促進作用をもつアデノシンは、コリン作動性ニューロンの伝達活動をシナプスレベルで抑制すると考えられている。

いっぽう、GSSGは興奮性神経系のグルタメート作動性ニューロンの伝達活動をシナプスレベルで抑制するようにはたらく。つまり、N-メチル-D-アスパラギン酸 (NMDA) レセプターあるいは非 NMDA レセプターの神経伝達を阻害する。

このようにして、ウリジンと GSSG は中枢神経系の中で最大の抑制系と興奮系のそれぞれに分別的に作用し、結果としてともに睡眠を促進する。これらの SPS成分はさらに、上のような分子機構を介して、高次の脳機能の修飾に参加していると考えられる。つまり、ウリジンはニューロン機能の回復ないし新生や新規情報の消去に貢献しているらしい。また、GSSGは還元型グルタチオンから生合成される過程で、ニューロンの過活動によって生じる細胞毒の解毒作用や学習および記憶の抑制に貢献しているらしい (Inoué, 1995c; Inoué et al, 1997)。

ウリジンの脳内作用部位に関しては、視床下部視束前野がノンレム睡眠の誘発に必須である。しかし、この部位が破壊されていてもウリジン投与によりレム睡眠を増加させることができるから、レム睡眠は別部位で制御されていることになる。また、ウリジンは他の睡眠物質と複雑な相互作用を示す。GSSG は視床下部視束前野および視交叉上核ニューロンの発火活動を修飾する作用がある。

(東京医科歯科大学 井 上 昌次郎)



Complimentary, reciprocal sleep-modulatory actions of uridine and oxidized glutathione (GSSG) at the synaptic neurotransmission sites in the brain. Uridine facilitates γ -aminobutyric acid (GABA)-mediated neurotransmission by binding the postsynaptic GABA receptor (GABA-R) as well as the uridine receptor in the GABAergic neuronal system. Similar actions can be induced by several benzodiazepine (BDZ)-receptor agonists at the same receptor complex. Astrocytes may contribute to the turnover of GABA. In contrast, GSSG inhibits the binding of glutamate (Glu) at the postsynaptic Glu receptor which belongs to the receptor complex of excitatory amino acids like *N*-methyl-D-aspartate (NMDA). Similar actions can be induced by several Glu-receptor antagonists at the same receptor complex. Astrocytes may contribute to the supply of GSSG and GSH as well as the turnover of Glu to glutamine (Gln) by glutamine synthase (GS). Glu is biosynthesized by glutaminase (GT) from Gln. The NMDA and/or non-NMDA receptor-mediated enhancement of neuronal activity causes an elevation of vigilance level, i.e. wakefulness. Either the activation of the GABAergic neuronal system or the inhibition of the Glu-ergic neuronal system eventually induces natural sleep, both non-rapid-eye-movement (NREM) sleep and REM sleep. Modified after Inoué (1993).

第2.2. 2(3)-1図

参考文献

- 1) Inoué S. Biology of Sleep Substances. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1989.
- 2) Inoué S. Sleep-promoting substance (SPS) and physiological sleep regulation. Zool Sci 10: 557-576, 1993.
- 3) 井上昌次郎. 液性情報による睡眠調節. 神経研究の進歩 39: 57-68, 1995.
- 4) Inoué S. Pharmacology of the CNS Peptides. In: Handbook of Pharmacology: Pharmacology of Sleep, ed Kales A, Springer-Verlag, New York, 243-277, 1995a.
- 5) Inoué S. Challenges to the ancient concept of humoral sleep regulation. In: Sleep - Ancient and Modern, ed Liu SY, Inoué S, Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, Shanghai / Asian Sleep Research Society, Tokyo, 55-88, 1995b.
- 6) Inoué S, Honda K, Komoda Y. Sleep as neuronal detoxification and restitution. Behav Brain Res 69: 91-96, 1995c.
- 7) 井上昌次郎. 睡眠物質の多様性. 睡眠のメカニズム、井上昌次郎、山本郁男編、朝倉書店、東京、22-51、1997.
- 8) Inoué S, Honda K, Kimura M, Okano Y, Sun J, Ikeda M, Sagara M, Azuma S, Kodama T, Saha U, Musha T: A Function of Sleep: Neuronal Detoxification in the Brain? In: Sleep and Sleep Disorders: From Molecule to Behavior, eds Hayaishi, Inoué S, Academic Press, New York, in press, 1997.

(4) 大脳基底核と運動パターンの切り替え・保持

人間を含めて動物は、生得的あるいは学習・経験により獲得したさまざまなパターンの運動のレパートリーの中から、その時の状況に応じた適当なパターンを選び出し、不適当なパターンの運動の発現を抑えて一定の運動を行っている。その運動の結果を自分の価値体系に照らして評価し、良好な結果が得られたと判定されればそのパターンの運動を続行し、良好な結果が得られなかったと判定されればそのパターンの運動を抑えて別のパターンの運動を選択してそれに切り替える。このような運動パターンの切り替えの過程に大脳基底核（以後、基底核）が関与していると考えられる。基底核は、終脳から中脳に分布する一連の核群の総称で、線条体（尾状核と被殻）、淡蒼球（外節と内節）、視床下核および黒質（網様部と緻密部）が含まれる。基底核を構成するこれらの核が傷害を受けると、それぞれに特徴的な運動障害が出現する。たとえば、黒質緻密部のドパミンを含んだ黒質-線条体投射ニューロンが変性脱落するパーキンソン病では、運動そのものが非常に起こりにくく、動作が小さく、筋の緊張が亢進し、静止時振戦が起こる。一方、線条体ニューロンが変性脱落するハンチントン舞踏病では、運動過多で動作が非常に大きくなって、筋緊張は低下し、不随意運動が起こる。そのため、基底核は、筋の緊張度の調節や随意運動の発現・制御に深く関与してといる考えられてきた。しかし、近年、基底核が運動において果たす役割について、要素的な運動のパラメーターの制御という側面とは別に、認知機能に関わる側面が注目されている。

基底核は大脳皮質の広い領域から情報を受け取り情報処理の結果を主として前頭葉皮質（補足運動野等）に送り出している。一方、小脳も運動の制御に深く関わっているが、小脳での情報処理の結果も前頭葉の運動関連領野（運動野、運動前野等）に送られる。しかし、ある運動への基底核系と小脳系の関与の仕方はその運動が行われる状況に依存する。たとえば、動き自体はまったく同じであっても、小脳出力ニューロンや運動前野のニューロンでは視覚的手掛かりに誘導されて運動する時に活動が亢進し、基底核出力ニューロンや補足運動野のニューロンでは記憶を頼りに運動する時に活動が亢進する^{11), 14)}。したがって、基底核系は記憶等の内部の手掛かりにしたがって運動を行うことに関係していると考えられる。さらに、状況の判断、結果の評価といった内部情報に基づいた運動（行動）パターンの選択・切り替えにも基底核は関係していると考えられている。基底核を破壊した動物や基底核疾患の患者ではこれに関係した症状が見られる。

a. 基底核傷害における認知機能障害の一側面

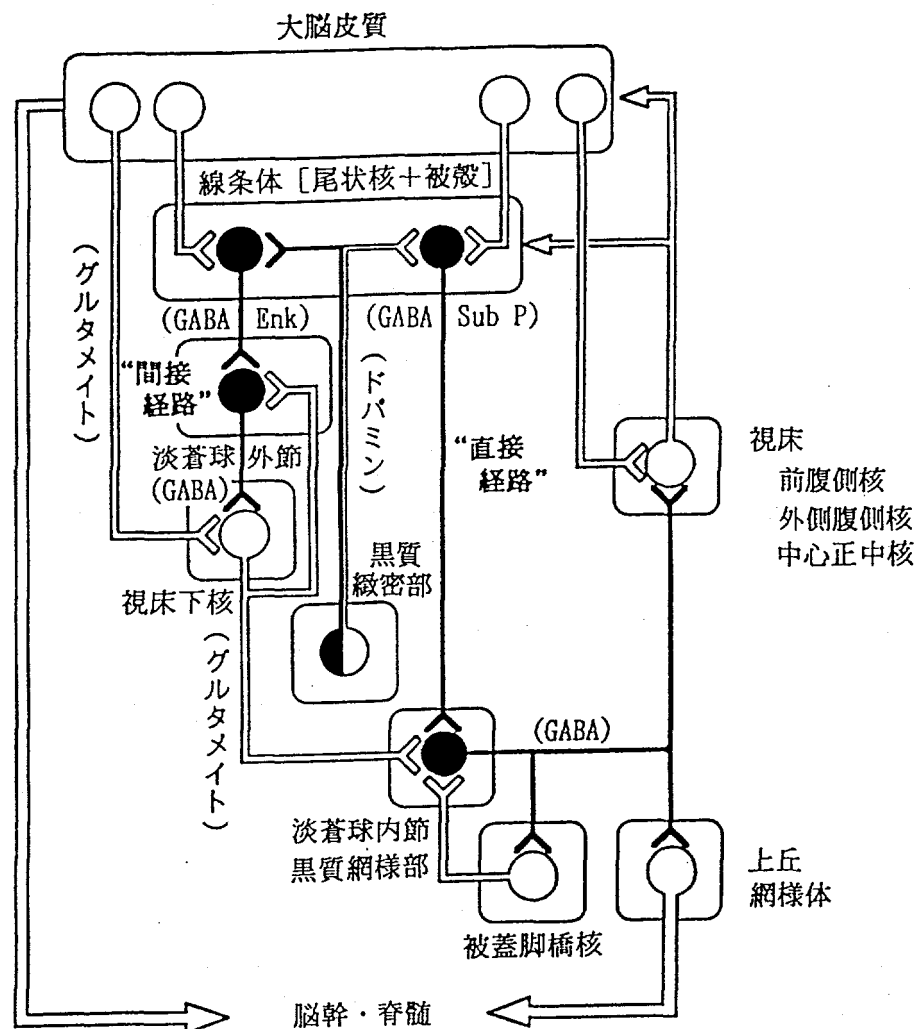
両側の尾状核を破壊したネコは外部の手掛かりに頼った動きをして目につくものの後を追いか、自発的にはまったく動かないにもかかわらず顕著な刺激物があると自動機械のようにそれにつられて歩いた。サルで両側の尾状核を破壊するとやはり大きな動くものにいきることなく飛び掛かったり強迫的に何かを探すような動きをした⁶⁾。淡蒼球を一時的に冷却してその

機能を停止したサルでは自発的に肘の屈伸を行うことが困難になった³⁾。このことは、線条体、淡蒼球の機能が障害された結果、状況に応じた適切な行動（運動）を自発的に開始できなくなったことを示している。さらに、両側の尾状核を破壊したネコでは、あるやり方で行動をして報酬が得られると、別のもっと効率よいやり方を以前経験していても、それに切り替えることができず、始めてしまったやり方をし続けるという保続傾向が認められた⁶⁾。これは、経験によって得たいくつかの行動パターンのレパートリーの中から適当なものを選び出してそれに切り替えることが困難になったことを示している。

パーキンソン病患者では、動きそのものが起こり難くなっていて、歩き始めるのに長い時間がかかることがあるが、一旦歩き出すとそれを止めることが難しい。すなわち、「歩く」という運動パターンと「止まる」という運動パターンの切り替えがうまくいかないのである。また、予測に基づいて運動パターンを変えたり、状況に応じて複数の運動のレパートリーの中から適切な運動パターンを選び出すことが不可能になるようである。さらに、パーキンソン病患者では、思考の柔軟性が低下し、思考が滞り、概念の切り替えが困難になると言われる。ウィスコンシン・カード・ソーティング・テストでは、課題解決のために自分の判断に基づいてひとつの方策から別の方策に切り替えることが必要であるが、その遂行が障害される⁹⁾。すなわち、一度採用した方策を変更しなければならない時にも、それが継続されてしまう。パーキンソン病等の基底核疾患に伴って、強迫神経症の症状が出現することがある¹²⁾。強迫神経症は、無意味で不合理な観念が自分の意志に反して出現したり、それに伴う不安を取り除くために無意味な行動をし続けるような状態である。ドパミンやセロトニンの関与が示唆されている。ここでも、自分の判断に基づいてその状況に相応しい観念や行動を選択できなくなっている。正常の動物では、同じパターンの運動が繰り返されてその運動に習熟してくるにつれて、運動は自動的になり、「習慣化」されてくる。この過程にも基底核は関係していると考えられる¹⁰⁾。このように、基底核の機能の一側面としては、状況に応じて運動パターンの選択し、状況が変化しないかぎりそのパターンを継続し、状況が変化すればその個体の価値体系に照らして新しい運動パターンを選び直して、それまでの運動パターンを破棄する（抑制する）ことに関与した働きが考えられる。我々は、その基礎となるニューロン機構を実験的に解析するために、状況に応じた運動パターンの選択・切り替えあるいは保持をしなければならない行動課題をネコに課し、この課題と基底核の構成要素である尾状核のニューロン活動との関係を調べ始めたところである。まず、その背景となるニューロン回路構成について概説する（図参照）。

b. 基底核の入出力関係およびニューロン回路

基底核への最も大きな入力は大脳皮質からのものである。一次運動野・感覚野、前頭連合野、頭頂連合野を含む広い領域から線条体と視床下核にグルタメイト作動性・興奮性入力が入る。脳幹の縫線核からのセロトニン含有線維も線条体に投射する。基底核の出力はGABA作動性・抑制性で、淡蒼球内節と黒質網様部から視床の中継核へ投射するものと、黒質網様部から上丘や



Alexander and Crutcher (1990)1) より改変

第2.2.2(4)-1図

脳幹網様体に投射するものがある。基底核出力を受ける視床の中継核は、運動野、運動前野、補足運動野、前補足運動野等の運動関連領野および前頭連合野、辺縁皮質に投射する。このように、基底核と前頭葉皮質は緊密に結ばれている¹⁾。大脳皮質入力を受ける線条体から基底核の出力核である淡蒼球内節・黒質網様部に情報が伝えられる経路として、直接経路および間接経路の2つの経路がある¹⁾。線条体の出力ニューロンはGABA作動性であるが、出力ニューロンの軸索が直接淡蒼球内節・黒質網様部に投射する経路が直接経路である。間接経路は、線条体から淡蒼球外節（GABA作動性）、視床下核（グルタメイト作動性）を経由して淡蒼球内節・黒質網様部に投射する経路がである。そのため、大脳皮質から線条体に入ってくる興奮性の信号は、直接経路を介しては基底核の出力核に抑制性の効果（視床-皮質系には興奮性の効果）をおよぼすが、間接経路を介しては、基底核の出力核（そして視床-皮質系）に直接経路とは逆の効果をおよぼすことになる。黒質-線条体線維の伝達物質であるドパミンは、線条体出力ニューロンのうち、直接経路の起始ニューロンには興奮性に、間接経路の起始ニューロンには抑制性に作用する。それ故、ドパミンの効果は、直接経路を介しても間接経路を介しても、淡蒼

球内節・黒質網様部の活動を抑制し、視床-皮質系の活動性を高めることになる。

一方、線条体は組織学的に均一ではない。組織化学的にアセチルコリン・エステラーゼ染色では染まりにくく、エンケファリン受容体が豊富なストリオゾームとそれ以外のマトリックスが区別され⁴⁾、それぞれの入力源・出力先が異なることが示されている。大脳皮質入力、ストリオゾームでは前頭前野や扁桃体などの辺縁系から、マトリックスでは感覚運動皮質や帯状回からである。出力は、ストリオゾームからは黒質緻密部のドパミン含有ニューロンへ、マトリックスからは淡蒼球内節・黒質網様部の基底核出力ニューロンに投射する⁵⁾。線条体に辺縁系からの入力があり、この入力系が行動（運動）が起こるべき状況やその結果の正否を判定して次の行動（運動）パターンを選択するのに重要な感情的評価の信号をもたらしている可能性がある⁷⁾。また、ストリオゾームから黒質緻密部への投射があることは、辺縁系からの情報に基づいてドパミン含有ニューロンの活動に影響がおよぶ可能性を示している⁷⁾。ドパミンは大脳基底核による運動学習に重要な働きをしていて、黒質-線条体投射ニューロンが線条体内でドパミンを放出するか否かは運動の結果を予知できるような指標が現れるか否かに依存することや¹³⁾、線条体内でドパミンが放出された部位のニューロンでは可塑的な活動の変化が見られること²⁾が示されている。それ故、線条体のストリオゾームとドパミンが介在する経路は状況に応じた運動パターンの切り替え・保持に関わっている可能性が示唆される。さらに、線条体から淡蒼球内節・黒質網様部へ投射する2つの経路の作用が拮抗的であることは、これらの経路が、あるパターンの運動を選択してそれに切り替え、それまでのパターンの運動を抑える機序に関係している可能性が考えられる。これら2つの経路の空間的構成や時間的活動パターンの詳細な解析が待たれる。

c. ネコにおける選択眼球運動課題の習得と尾状核ニューロンの活動

我々はネコで選択眼球運動課題を用いて実験を行っているが、その理由は次のようなことである。そのひとつは、刺激実験の結果、ネコでも尾状核と眼球運動との間の密接な関係が明らかになっていることである⁸⁾。さらに、ネコは、サルに比べて学習・記憶能力が劣るので、課題に習熟するには長いトレーニング期間を必要とし、その間のニューロン活動の推移を検討できるからである。

現在行っている実験では、ネコが前回の試行の結果を基に次の試行で視線をを向けるべき標的を予測（判定）して眼球運動の方向を選択しなければ報酬が与えられないような課題を設定した。覚醒状態のネコを視野の中心およびその左右7.5度のところに計3個のLEDを設置したパネルに対面させて、その頭部を固定した状態で実験を行っている。課題は中央のLEDが点灯することで始まり、ネコがこれを注視するとすぐにこれを消灯する。300ミリ秒後に左右のLEDを同時に点灯させるが、一方は正解の（正しい）標的であり、他方は不正解の（誤りの）標的である。正しい標的に視線を向けると報酬が与えられてその試行が終了する。誤りの標的に視線を向けると（正しい標的に視線を向けない場合には）報酬が与えられず、エラーを示す

LEDを一瞬点灯してその試行を終了する。標的の正誤関係は、ネコが一定回数（3～5回）連続して成功するまで固定しておき、その基準に達した次の試行から正誤関係を入れ換えて再度一定回数連続して成功するまで固定する。この「正誤関係の切り替え — 連続成功」を繰り返し行わせる。この課題では、ネコは、標的の正誤を、選択した運動の結果（報酬の有無）から予測しなければならない。一方の標的に視線を向けて報酬が得られた状況では、同じ向き（パターン）の眼球運動を続け、報酬が得られなくなった状況では、正解が切り替わったことに気づいて眼球運動の向き（パターン）を他方に切り替えなければ報酬は得られない。この課題は、パーキンソン病の患者で障害が見られる概念の切り替えや行動パターンの切り替え・保持に対応するものと考えられる。

トレーニングの初期には正誤関係の入れ替え後一定回数連続して成功するまでに多数回の試行を要するが、トレーニングが進行するにつれて連続して成功するまでに要する試行の回数が減少し、ネコはこの課題を学習できることがわかった。現在、尾状核ニューロンはこの課題にどのように関係しているのかを解析しているところであるが、連続して成功するにつれて活動の大きさを変化させるニューロンがあった。この研究を発展させて基底核が行動の切り替えと保持およびこのような行動の手続きの学習にどのように関わっているかを明らかにしたいと考えている。

（筑波大学 大野 忠雄）

参考文献

- 1) Alexander, G. E. and Crutcher, M. D.: Functional architecture of basal ganglia circuit: neuronal substrates of parallel processing. *TINS* 13, 266-271 (1990).
- 2) Aosaki, T., Graybiel, A. M. and Kimura, M.: Effect of the nigrostriatal dopamine system on acquired neuronal responses in the striatum of behaving monkeys. *Science* 265, 412-415 (1996).
- 3) Hore, J., Meyer-Lohmann, J. and Brooks, V. B.: Basal ganglia cooling disables learned arm movements of monkey in the absence of visual guidance. *Science* 195, 584 -586 (1977).
- 4) Gerfen, C. R.: The neostriatal mosaic: multiple levels of compartmental organization. *TINS* 15, 133 - 139 (1992).
- 5) Jimenez-Castellanos, J. and Graybiel A. M.: Compartmental origins of striatal efferent projections in the cat. *Neurosci.* 32, 297 - 321 (1989).
- 6) 彦坂興秀: 大脳基底核の機能。科学 55, 680 - 689 (1985).
- 7) Kimura, M. and Graybiel, A. M.: Role of basal ganglia in sensory motor association learning. In M. Kimura and A. M. Graybiel (eds.) *Functions of the Cortico-*

- Basal Ganglia Loop, Springer, Tokyo, pp 2 - 17 (1995).
- 8) Kitama, T., Ohno, T., Tanaka, M., Tsubokawa, H. and Yoshida, K.: Stimulation of the caudate nucleus induces contraversive saccadic eye movements as well as headturning in the cat. *Neurosci. Res.*, 12 287 -292 (1991).
 - 9) Lees, A. J. and Smith, E.: Cognitive deficits in the early stages of Parkinson's disease. *Brain*, 106 252 -270 (1983).
 - 10) Mishikin, M. and Appenzeller, T.: The anatomy of memory. *Scientific American* 256, 62 - 71 (1987).
 - 11) Mushiake, H., Inase, M. and Tanji, J.: Neuronal activity in the primate premotor, supplementary and precentral motor cortex during visually guided and internally determined sequential movements. *J. Neurophysiol.* 66, 705 - 718 (1991).
 - 12) Rapoport, J. L.: The biology of obsessions and compulsions. *Scientific American* 260, 82 - 89 (1989).
 - 13) Schultz, W., Apicella, P. and Ljungberg, T.: Responses of monkey dopamine neurons to reward and conditioned stimuli during successive steps of learning a delayed response task. *J. Neurosci.* 13, 900 - 913 (1993).
 - 14) Strick, P. L., Hoover, J. E. and Mushiake, H.: Evidence for "output channels" in the basal ganglia and cerebellum. In N. Mano, I. Hamada and M. R. DeLong (eds.) *Roll of the Cerebellum and Basal Ganglia in Voluntary Movement.*, Excerpta Medica, Amsterdam, pp 171 - 180 (1993).

2.2.3 脳の振動現象

— γ 振動のモデルとコーディングスキーム —

脳波測定、埋め込み微小電極、脳磁気測定 (MEG) 等の手法により、様々なタイプの振動的現象が脳内の各所で観測されている。しかし、どのような振動のクラスにどのような機能的意味があるのかは、未だ十分明確になっているとは言えない。これは、単に測定精度やデータ分析能力の不足によるものではなく、適切で見通しのよい記述のための切り口が存在しないことにも原因があると思われる。

(1) 動的システムとしての脳

刻々と変化する環境に対応すべく情報処理を遂行するために、脳が動的システムでなくてはならないのは自明だが、実際に脳内で起こっている過程は、その要請を上回り、はるかに動的に見える。

例えばEscandarらによる、遅延見本合わせ／非合わせ課題を遂行するサルの大脳電気生理実験がある。一定の時間感覚をあけて提示される二つの図形が同じかどうかを答えさせる課題が、サルに与えられる。下側頭葉皮質は、色・肌理及び形状による視覚的物体認識を遂行する経路の最上位にあると考えられている。課題遂行中のサルの、複数の下側頭葉ニューロンから得られた、視覚刺激に応答した活動の時間変化の分析の結果、最初に見せられた図形（想起図形）、2番目に見せられる図形（参照図形）、見本合わせか非合わせか（コンテキスト）の各々に、相関を持った成分が確認された。また、VaadiaらによりGO／NO-GO課題を遂行するサルの前頭前野ニューロンが調べられた。同時記録された二つのニューロンの発火は、個々ではGO／NO-GOどちらでも似たようなパターンだが、スパイクの相対的なタイミングは大きく異なっていた。これらの実験を含み、単なる「特異パターン入力→平均発火頻度の上昇」以上の情報量が、神経活動の時間パターン上にエンコードされていることを示唆する研究結果は数多く得られている。

(2) 振動現象

脳活動のダイナミクスのうち、特に θ 波（約7 Hz）及び γ 波（約40 Hz）のレンジに相当する振動現象については、多くの実験によってその存在が確認されている。また、脳内情報表現や処理プロセスに本質的に関わっているとする仮説が多く提唱されている。

θ ：中隔、海馬、嗅内野、側頭極皮質等で観測される。

O'Keefeらにより、ラット海馬に場所に依存して発火する細胞の存在が報告された。実験条件下で海馬活動は集団的な θ リズムを示すが、ある場所依存細胞のスパイクのタイミングと、この θ リズムの位相との関係が、これからその場所に接近しつつあるのか遠ざかりつつあるのか

を表現しているようになる。また、Nakamura等によって、サルの側頭極皮質の視覚刺激応答性のニューロンのなかに、馴れ親しんだ刺激に対してのみ、応答が振動的になるものが発見された。

γ : 視床、新皮質全域で観測される。

Gray、Singerおよび、Eckhorn らにより、猫の視覚野において刺激依存性の振動活動が観測された。引き続き一連の実験により、同期の範囲が領野内近接、領野内遠距離、領野間、半球間と、拡大され、サルでの実験も行われた。また、同期／非同期の条件も、認識的統合の脳内表現との解釈が煮詰まる方向に検証が進んだ。ただし、多くの実験が行われていながら、未だに振動及び同期の判定基準は明確に共有化されていない。

新皮質における分散情報処理の同期活動による統合という仮説の検証は視覚認識にとどまらず、Murthyらによって、サルの感覚運動皮質において、知覚と運動の統合を要する場面で同期振動をするニューロンの組が見つかった。

また、MEGの発達は、それまでの微小電極による手法では極めて困難だった、空間的な拡がりを伴う活動パターンの観測を可能にした。Llinas等の実験によると、 γ 振動は新皮質全体に一般的に見られる現象で、ことにREM睡眠時には前頭部から後頭部へ向かう揃った進行波が見られ、覚醒時には入力刺激ごとにそれがリセットされることが認められた。

(3) 新皮質 γ 振動の生成及び同期機構

認識的統合に重要な役割を果たしていると考えられるこの γ 振動の生理学的な生成の仕組みは、十分に明確になっていない。Amitai等の実験によれば、大脳皮質は単独で γ 振動を生成する機構を持つ。また、Whittington らによれば、皮質の抑制性ニューロン同士のネットワークで γ 振動が生成され、その抑制を受けて興奮性ニューロンが振動していることも考えられる。一方で、皮質の γ 振動は視床の振動活動が投射された結果であるとする実験結果も、多く存在する。

同期振動の機構に関するモデルは数多く提案されている。それらのなかには二つの大きなカテゴリーがある。一つは、リミットサイクルオシレータ間の相互作用によるもので、von der Malsburg、Singer、Sompolinsky らが拠り所とする安定性はSchuster、Okuda等によって論じられている。ただし、この機構はアナログ量の通信を原理的に必要とする。そのために大量、あるいは極めて高頻度発火をするニューロン及び、莫大な数の神経繊維を必要とし、結合の時間遅れも全て揃っていないといけない。また、収束に要する時間も少なくとも10周期程度必要であり、生理・心理学的な知見と整合しない。もう一つのカテゴリーは、トリガーで結合されたインターバルタイマーによるモデルで、Kuramoto等により提案され、いくつかのバリエーションが存在する。このモデルは、ユニットの設計が現実のスパイクングニューロンと良く整合し、また2～3周期で完全な同期を得られると言う優れた面を持つが、個々のニューロンの

スパイク発生のリズムが同期集団の振動と完全に一致する必要があるために生理学的な解釈が困難となっている。結合の時間遅れに対しても、前者同様極めて敏感で、現実的でない。

以上の理由により、極めて近接したニューロン間の同期の場合を除いて、振動ユニット同士の間相互作用による同期よりも視床のリズム活動の投射の結果であると考えほうが妥当と思われる。Llinasらによれば、視床の髄板内核がこのリズム生成機構としてもっともらしいと考えられる。髄板内核には他の視床核のような感覚特異性の求心繊維の投射はなく、そのかわり新皮質との間に整然としたトポロジーを保った双方向の投射が存在する。感覚刺激を受けて増大した皮質活動によりトリガーされた髄板内核の振動が、該当する皮質部位にフィードバックされて皮質活動を変調することによって γ 振動の同期がもたらされると考えるならば、前述の、皮質ニューロン間の距離に依存した信号伝搬遅れのばらつきに起因する相互引き込みの困難も、解消する。

(4) 新皮質 γ 振動の機能的解釈

いま仮に、皮質に「赤」「緑」「青」「マル」「バツ」「三角」をコードするニューロンがあったとする。この認識システムに赤いマルと緑のバツからなる図形を呈示したら、その応答は赤いバツと緑のマルに対する応答と区別がつかなくなってしまう。実際の人間のもつカテゴリーはこのように単純なものばかりでなく、数も莫大なものになる（組み合わせの爆発）。したがって、それらの全ての組み合わせが分別可能になるように専門のニューロンを用意していたら、非現実的な数が必要となる。この問題を解消するために、同期活動による結合表現が von der Malsburg により提唱された。現在ではより一般的に、新皮質上に分散した情報表現の統合プロセスの現れと考えられている。

数多く提案されている同期による統合表現の機能モデルは、大きく2つのカテゴリーに分類される。一つは、von der Malsburg に始まる能動的結合モデルで、振動子間の相互引き込みによって結合を形成する。このモデルには、本来の目的であった組み合わせの爆発を原理的に解消し得ないという、本質的な欠点がある。可能な結合パターンが自己相関記憶と同等に実装されるため、可能な組み合わせの全てがネットワークの結合行列上に埋め込まれていなければならない。高速可塑性シナプス等の技法は考えられているが、満足の行く結果は得られていない。

今一つのカテゴリーは、Crick らの提唱する「注意の、視床によるサーチライト仮説」に端を発するもので、Niebur、Koch らによるモデル研究がある。新皮質上に分散した活動のうち、視床の活動と相関を持つもののみが、認識過程における注意のもとにあるとする仮説で、結合の柔軟性は、局所的に矛盾しないいかなる組み合わせも可能になるほど大きい。しかし、いかにして適切に注意の対象を選択するかについての明確な議論がなされていない。また、パターン認識の大きな特徴の一つでもある、典型例からのずれの表現が全く考えられていない。

(5) 新仮説

新皮質の γ 振動の機能的解釈にあたって、視床髄板内核を γ 振動の発生源とし、そのモジュレーションによって生じるとして、なお残された問題をまとめると、1) いかにして適切な組み合わせを迅速に選択するか、2) 典型例からのずれ等の、アナログ表現はいかにして行なわれているか、ということになる。これらに対して、以下の仮説を提案したい。

1) 個々のニューロンは鋭敏な同時性検出器として働く。各ニューロンは、入力パターンが自分の特異パターンに極めてよく一致した場合にのみ、非常に短い潜時でスパイクを出力し、それらのみがより上位の処理階層へ送られる。これにより、各階層で瞬時に信頼度の高い情報のみによる初期的な仮説が形成される。実際、ニューロンがそのように鋭敏な同時性検出器として働いている見込みは、十分にある。これら信頼度の高い信号のみによって、各階層の対応する髄板内核の γ 振動をトリガーするために、適切な組み合わせの形成される見込みが大きくなる。

2) 皮質の活動によりトリガーされた髄板内核 γ 振動のフィードバックで、対応する皮質部位が活性化される。これにより、入力刺激との一致度の低かったニューロンも、 γ 振動の1周期内に一致度に応じた時間遅れでスパイクを出力する。すなわち、アナログ量がスパイクの時間遅れによってコードされる。皮質の顆粒上層には、このスパイクシーケンスをデコードする回路があると考えられる。(図参照)

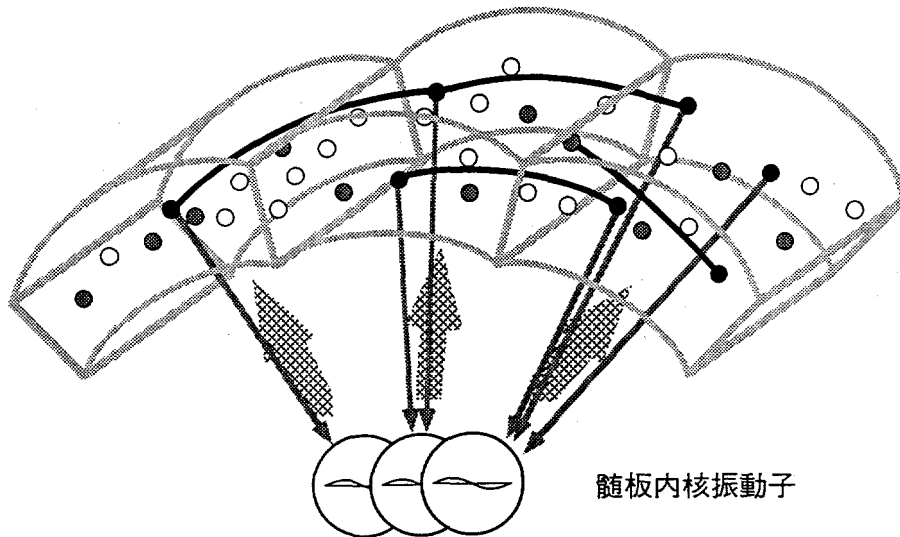
(6) まとめ

新皮質内で、遠方まで十分な強度・信頼度・密度で信号を送れるニューロンは錐体細胞であり、スパイクングニューロンだということを忘れてはならない。スパイクを特徴付けるパラメタは、有無、及び時刻であり、情報表現はこれにコードされ则认为することは、全く適切に思われる。時刻が意味を持つためには時計の共有が必要であり、時計の共有される範囲内においてのみ、コーディングが共有され得る。脳機能のにわかに理解しがたい程の柔軟さは、皮質各所に高度に分散した処理と、それらを首尾一貫した意思決定と行動のために随時統合する機構の絶妙な連携から来ていると考えられる。振動現象は、この首尾一貫性を形成するための柔軟な拘束条件の現れであると考えることにより、これまでの知見を踏まえた見通しのよい脳機構の見取り図が得られる。

(本田技術研究所 Edgar Koerner)

新スキーム

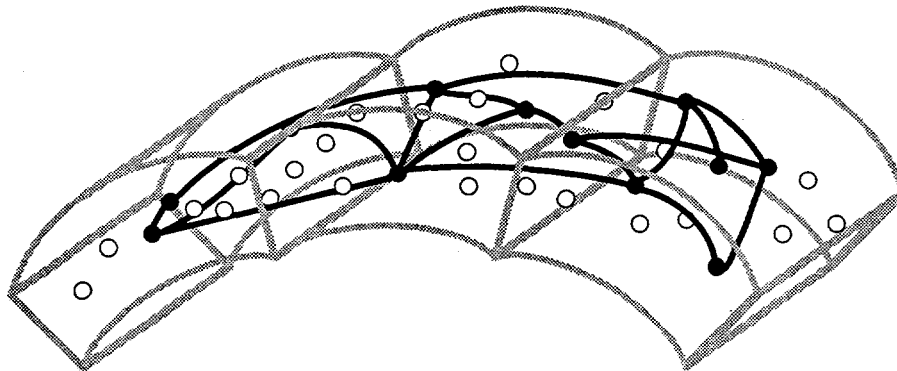
大脳皮質



- 良く一致したニューロン。随板内核振動子をトリガーし、上位領野へ信号を送る
- 中程度に一致したニューロン。随板内核振動のフィードバックにより一致度にしたがって遅れて発火する。

直接結合は疎であり、表現には第2第3候補との一致度（時間遅れ）の情報が含まれる。

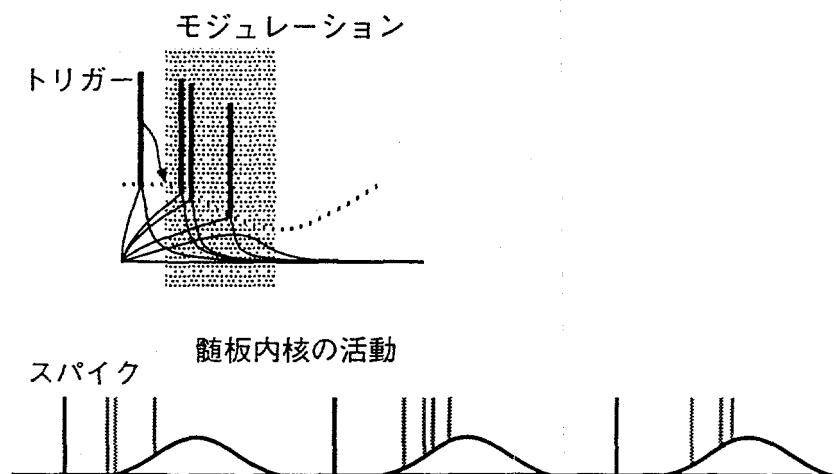
アクティブバインディングモデル



高頻度スパイクと密な結合が必要であり、アナログ情報は含まれない

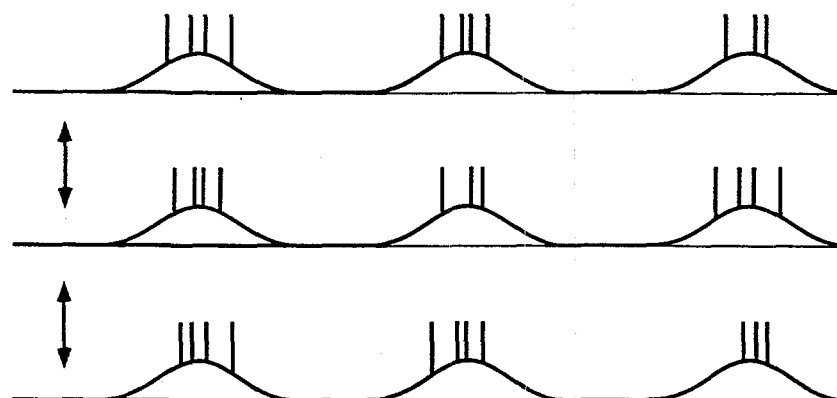
第2.2.3-1図

新スキーム



高信頼度のスパイクによるモジュレーション振動のトリガー
モジュレーションによる下位候補の順位付き拾い出し

アクティブバインディング



スパイク密度によるリミットサイクル振動子
の直接結合による相互位相引き込み

第2.2.3 - 2 図

参考文献

- Emad N. Eskandar, Barry J. Richmond, Lance M. Optican (1992) Role of Inferior Temporal Neurons in Visual Memory I. Temporal Encoding of Information About Visual Images, Recalled Images, and Behavioral Context. *Journal of Neurophysiology* 68-4: 1277-1295
- E. Vaadia, I. Haalman, M. Abeles, H. Bergman, Y. Prut, H. Slovin, A. Aertsen (1995) Dynamics of neuronal interactions in monkey cortex in relation to behavioural events. *NATURE* 373-9: 515-518
- O'Keefe, J. & Nadel, L. (1978) *The hippocampus as a cognitive map*. New York: Oxford
- Katsuki Nakamura, Akichika Mikami, Kisou Kubota (1991) Unique oscillatory activity related to visual processing in the temporal pole of monkeys. *Neuroscience research* 12:293-299
- C. M. Gray, W. Singer (1987) Stimulus-dependent neuronal oscillations in the cat visual cortex area 17. 2nd IBRO-Congress, *Neurosci. Suppl.* 1301
- R. Eckhorn, R. Bauer, W. Jordan, M. Brosch, W. Kruse, M. Munk, H. J. Reitboeck (1988) Coherent oscillations: A mechanism of feature linking in the visual cortex? Multiple electrode and correlation analysis in the cat. *Biological Cybernetics* 60: 121-130
- Andreas K. Engel, Andreas K. Kreiter, Peter Koenig, Wolf Singer (1991) Synchronization of oscillatory neuronal responses between striate and extrastriate visual cortical areas of the cat. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 88: 6048-6052
- A. K. Andreas, W. Singer (1992) Oscillatory Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Awake Macaque Monkey. *European Journal of Neuroscience* 4:369-375
- Andreas K. Engel, Peter Koenig, Wolf Singer (1991) Direct physiological evidence for scene segmentation by temporal coding. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 88: 9136-9140
- Andreas K. Engel, Peter Koenig, Andreas K. Kreiter, Thomas B. Schillen, Wolf Singer (1992) Temporal coding in the visual cortex: new vistas on integration in the nervous system. *TINS* 15-6: 218-226
- Malcom P. Young, Keiji Tanaka, Shigeru Yamane (1992) On Oscillating Neuronal Responses in the Visual Cortex of the Monkey. *Journal of Neurophysiology* 67-6: 1464-1474
- Venkatesh N. Murthy, Eberhard E. Fetz (1992) Coherent 25- to 30-Hz oscillations in

- the sensorimotor cortex of awake behaving monkeys. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89: 5670-5674
- Rodolfo Llinas, Urs Ribary (1993) Coherent 40-Hz oscillation characterizes dream state in humans. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 90: 2078-2081
- Y. Amitai (1994) Membrane potential oscillation underlying firing patterns in neocortical neurons. *Neuroscience* 63: 151-161
- Miles A. Whittington, Roger D. Traub, John G. R. Jefferys (1995) Synchronized oscillations in interneuron networks driven by metabotropic glutamate receptor activation. *NATURE* 373-16: 612-615
- G. Avanzini, M. de Curtis, C. Marescaux, F. Panzica, R. Spreafico, M. Vegnes (1992) Role of the thalamic reticular nucleus in the generation of rhythmic thalamo-cortical activities subserving spike and waves. *J Neural Transm [Suppl]* 35: 85-95
- Martha J. Johnson, Kelvin D. Alloway (1994) Sensory modulation of synchronous thalamocortical interactions in the somatosensory system of the cat. *Exp Brain Res* 102: 181-197
- Daniel S. Barth, Kurt D. MacDonald (1996) Thalamic modulation of high-frequency oscillating potentials in auditory cortex. *NATURE* 383-5: 78-81
- Ch. von der Malsburg, W. Schneider (1986) A Neural Cocktail-Party Processor. *Biological Cybernetics* 54: 29-40
- Andreas K. Engel, Peter Koenig, Andreas K. Kreiter, Thomas B. Schillen, Wolf Singer (1992) Temporal coding in the visual cortex: new vistas on integration in the nervous system. *TINS* 15-6: 218-226
- H. Sompolinsky, D. Golomb, D. Kleinfeld (1990) Global processing of visual stimuli in a neural network of coupled oscillators. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 87: 7200-7204
- H. G. Schuster and P. Wagner (1989) Mutual Entrainment of two Limit Cycle Oscillators with Time Delayed Coupling. *Progress of Theoretical Physics* 81-5: 939-945
- Koji Okuda, Yoshiki Kuramoto (1991) Mutual Entrainment between Populations of Coupled Oscillators. *Progress of Theoretical Physics* 86-6: 1159-1176
- Yoshiki Kuramoto (1991) Collective synchronization of pulse-coupled oscillators and excitable units. *Physica D* 50: 15-30
- David Somers, Nancy Kopell (1993) Rapid Synchronization through fast threshold

- modulation. *Biological Cybernetics* 68: 393-407
- R. Eckhorn, H. J. Reitboeck, M. Arndt, P. Dicke (1990) Feature Linking via Synchronization among Distributed Assemblies: Simulations of Results from Cat Visual Cortex. *Neural Computation* 2:293-307
- H. G. Schuster, P. Wagner (1990) A model for neuronal oscillations in the visual cortex. *Biological Cybernetics* 64: 77-85
- Peter Koenig, Thomas B. Schillen (1991) Stimulus-Dependent Assembly Formation of Oscillatory Responses. *Neural Computation* 3: 155-178
- Olaf Sporns, Giulio Tononi, Gerald M. Edelman (1991) Modeling perceptual grouping and figure-ground segregation by means of active reentrant connections. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 88: 129-133
- Christoph von der Malsburg, Joachim Buhmann (1992) Sensory segmentation with coupled neural oscillators. *Biological Cybernetics* 67: 233-242
- Hartmut Neven, Ad Aertsen (1992) Rate coherence and event coherence in the visual cortex: a neuronal model of object recognition. *Biological Cybernetics* 67: 309-322
- Tsuyoshi Chawanya, Toshio Aoyagi, Ikuko Nishikawa, Koji Okuda, Yoshiki Kuramoto (1993) A model for feature linking via collective oscillations in the primary visual cortex. *Biological Cybernetics* 68: 483-490
- Geoffrey M. Ghose, Ralph D. Freeman (1992) Oscillatory Discharge in the Visual System: Does it Have a Functional Role? *Journal of Neurophysiology* 68: 1558-1574
- Francis Crick (1984) Function of the thalamic reticular complex: The searchlight hypothesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 81: 4586-4590
- Ernst Niebur, Christoph Koch, Christopher Rosin (1993) An Oscillation-Based Model for the Neuronal Basis of Attention. *Vision Res.* 33-18: 2789-2802
- W. Softky (1994) Sub-Millisecond Coincidence Detection in Active Dendritic Trees. *Neuroscience* 58-1: 13-41
- Miguel A. L. Nicolelis, Luiz A. Baccala, Rick C. S. Lin, John K. Chapin (1995) Sensorimotor Encoding by Synchronous Neural Ensemble Activity at Multiple Levels of the Somatosensory System. *SCIENCE* 268: 1353-1358
- Ad Aertsen, Michael Erb, Guenther Palm (1994) Dynamics of functional coupling in the cerebral cortex: an attempt at a model-based interpretation. *Physica D* 75: 103-128

2.3 脳型コンピュータその実現イメージ

2.3.1 神経細胞と人工神経素子モデル

(1) 神経細胞と人工神経素子モデル

a. はじめに

脳・神経系の働きを解明するための戦略の一つに、「脳・神経系のように機能するマシンを作ってみる」ことによって研究を進めようとする構成的アプローチがある。このアプローチを進めるためには実際の神経細胞の基本的な動作特性を知り、その本質的特性を人工的なモデル素子に再現する事が決定的に重要である。近年の急速な研究の進歩により、神経細胞はこれまでに考えられていたよりも、はるかに複雑で動的な特性を有する素子であることが明らかとなってきた。特性の全てをモデル素子に再現することは困難であるとしても、少しでも、あらたに解明されてきた特性を再現したモデルを作り、それを要素とする回路網を構築してみることが望まれる。

実験的研究の近年の進歩はあまりに速く、体系的に確実な知見をまとめられる状況には無い。本稿では神経細胞という情報処理素子の特性、とりわけ近年の研究から明らかになってきた動的な特性を列挙し、それぞれの特性がどのような意義を持つかをのべ、人工神経素子モデルに望まれる特性を列挙することにする。(むしろまだ体系立てることが出来ない状況だからこそ構成的・合成的研究が必要なのだ。)

b. 古典的(マロウ・ピッツ的)神経細胞像

神経細胞の動的な特性を述べる前に古典的な(部分的に誤った)神経細胞像を簡単に説明しておく。現在使われている神経素子モデルは、ほぼこのイメージを元に作られている。

①神経細胞は樹状突起、細胞体、軸索という三部分からなる

樹状突起の膜は興奮性を持たない。多数のシナプスを受け取るために接続の場として広い表面積が必要なので突起が発達した。細胞体は入力情報の統合の場であり、ここから唯一本の軸索が伸びている。神経細胞に発生した活動電位は軸索を通り、標的細胞に向かって伝導してゆく。

②興奮性及び抑制性のシナプス入力の統合が細胞の出力を決定する

神経細胞は興奮性及び抑制性の二種類のシナプス入力を樹状突起及び細胞体に受け取る。興奮性シナプス入力は膜電位の脱分極をもたらす、抑制性入力は過分極をもたらす。シナプス入力が引き起こす電位変化は細胞体に於いて加算され、その和が活動電位発生の閾値を越えると活動電位が発生する。

③出力発生にはシナプス入力の加重が必要である

シナプス入力がもたらす電位変化は短時間のうちに減衰する。細胞が出力を発生するのは、

異なる興奮性入力を同時に多数受け取るか、あるいは短時間のうちに高頻度の興奮性入力を受け取った場合である。

c. 近年明らかになった動的な特性

上に述べた古典的神経細胞像を覆すような、新しい知見を以下に列挙する。

①樹状突起も活動電位（樹状突起スパイク）を発生する

中枢神経系で応答特性がもっとも詳しく研究されている細胞は、皮質の錐体細胞と小脳のプルキンエ細胞であろう。これらはそれぞれ大脳・小脳皮質における情報処理に中心的役割を果たしていると考えられており、いずれも豊富な枝別れと数 100ミクロンから数ミリの長さを持つ発達した樹状突起を有する。以前は、これらの細胞の樹状突起は興奮性を持たないと一般には考えられていたが、活動電位を発生しうる性質を持ち、生理的な条件において現に活動電位を発生している事が明らかとなってきた。

Svoboda 達(1997)はラットの皮質の単一の錐体細胞にイオン感受性色素をガラス電極から注入しておいて、ヒゲへの刺激に対して樹状突起がナトリウム依存性及びカルシウム依存性の二種類の活動電位を発生する事を、二光子吸収レーザー走査顕微測光によって示している（第2.3.1 (1)-1図）。

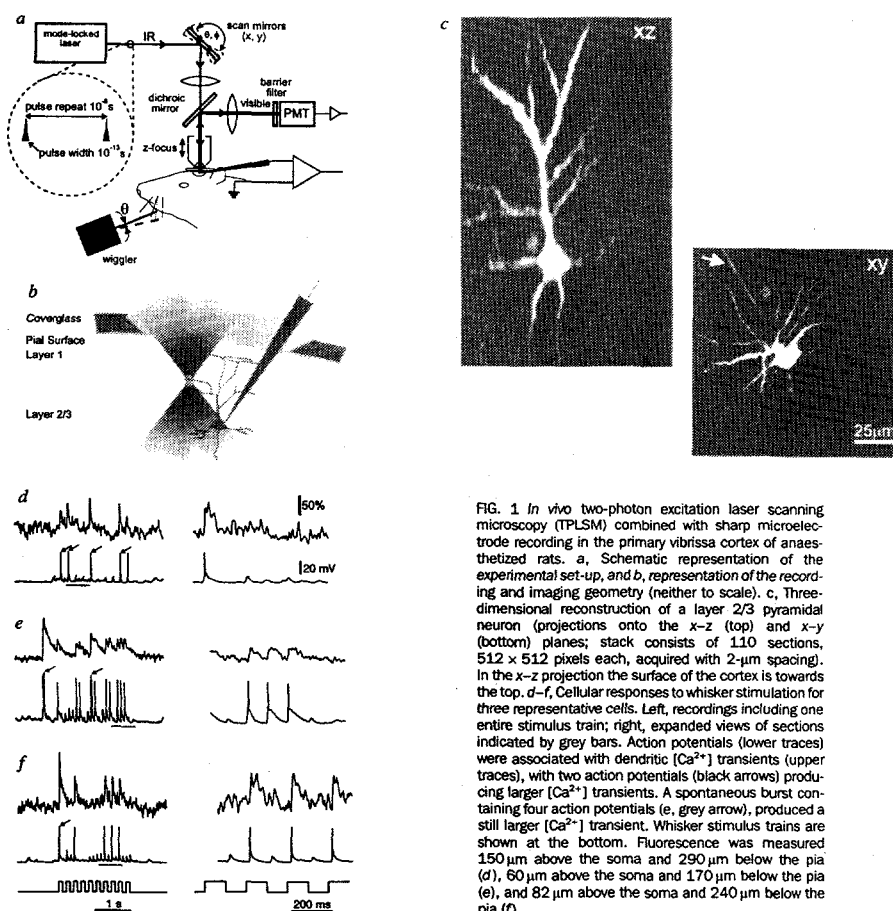


FIG. 1 *In vivo* two-photon excitation laser scanning microscopy (TPLSM) combined with sharp microelectrode recording in the primary vibrissa cortex of anaesthetized rats. a, Schematic representation of the experimental set-up, and b, representation of the recording and imaging geometry (neither to scale). c, Three-dimensional reconstruction of a layer 2/3 pyramidal neuron (projections onto the x-z (top) and x-y (bottom) planes; stack consists of 110 sections, 512 x 512 pixels each, acquired with 2- μm spacing). In the x-z projection the surface of the cortex is towards the top. d-f, Cellular responses to whisker stimulation for three representative cells. Left, recordings including one entire stimulus train; right, expanded views of sections indicated by grey bars. Action potentials (lower traces) were associated with dendritic $[Ca^{2+}]$ transients (upper traces), with two action potentials (black arrows) producing larger $[Ca^{2+}]$ transients. A spontaneous burst containing four action potentials (e, grey arrow), produced a still larger $[Ca^{2+}]$ transient. Whisker stimulus trains are shown at the bottom. Fluorescence was measured 150 μm above the soma and 290 μm below the pia (d), 60 μm above the soma and 170 μm below the pia (e), and 82 μm above the soma and 240 μm below the pia (f).

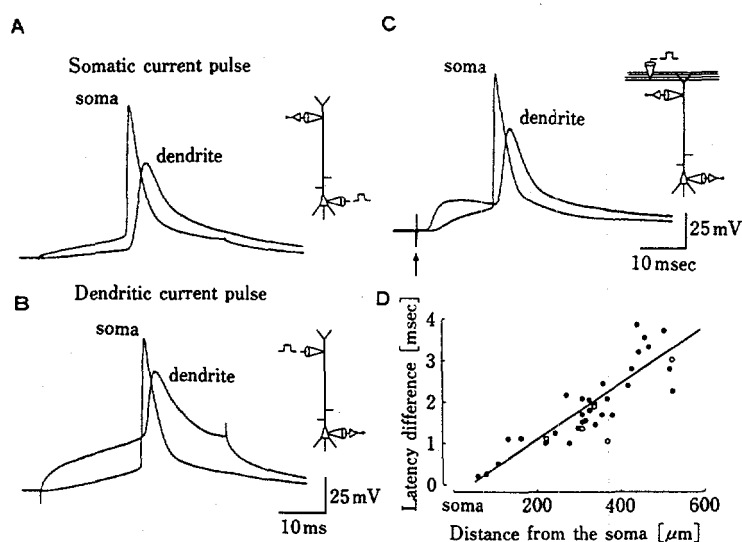
大脳皮質及び海馬の錐体細胞の樹状突起が活動電位を発生しうる事は実は1960年代から知られており、脳スライス標本を用いて多くの研究がなされてきた(総説: Yuste & Tank, 1996)。生理的な条件下に於ける樹状突起スパイクの発生を疑問視する意見もあったが、Svoboda達の研究はこの疑問を取り除いたのである。

小脳プルキンエ細胞については生理的条件下で樹状突起スパイクが発生するか否かは未だ決定的な証明がなされていないが、脳スライス標本を用いた研究からCa依存性の活動電位が樹状突起の全域に発生する事が知られている(Lev-Ram 達, 1992; Llinas & Sugimori, 1980)。

Ca依存性の樹状突起スパイクは小脳プルキンエ細胞と皮質錐体細胞の双方に発生するが、どのような条件で発生するかは未だ明らかになっていない。小脳プルキンエ細胞では登上線維という極めて強力なシナプス入力に応答して発生する事が分かっている(Miyakawa達, 1992)。錐体細胞では抑制性入力に阻止された条件では発火し易いことが分かっている。

②活動電位は細胞体から樹状突起へと逆伝播するらしい

樹状突起が活動電位を発生すると、当然この活動電位が樹状突起から細胞体へ、更には軸索へと伝導するのかが問題となる。錐体細胞に関しては Sakmannの研究グループがこの問題に答える研究を報告している(Stuart & Sackmann, 1994; Spruston達, 1995)。脳スライス標本内の単一細胞の樹状突起と細胞体とから同時にホールセル記録を行うという驚くべき技術により、シナプス入力に応答する際、細胞体が樹状突起スパイクに必ず先立って活動電位を発生する事を示したのである(第2.3.1 (1)-2図)。もっとも、条件によっては樹状突起が先に発火して細胞体へと伝導するとする報告もあり、この問題の決着はまだついていない(Turner達, 1993)。



皮質錐体細胞の細胞体と樹状突起から同時にホールセル記録した活動電位。A: 細胞体からの脱分極通電によって発生した活動電位。B: 樹状突起からの脱分極通電によって発生した活動電位。C: シナプス入力によって発生した活動電位。A, B, C, いずれの場合も、細胞体での活動電位が樹状突起に先行している。D: 細胞体からの距離と活動電位の立ち上がり時刻との関係。樹状突起に沿った活動電位の伝導速度は0.15m/sec。(Stuart and Sakmann: Nature, 367, 69 (1994)より)

第2.3.1 (1)-2図

③樹状突起の活動電位発生に伴って細胞内の Ca^{2+} イオン濃度が上昇する

単一の神経細胞内に Ca^{2+} イオン感受性の色素を注入し、電気的活動と Ca^{2+} 濃度変動を同時に計測する実験から、活動電位に伴って数ミリ秒以内に細胞内の Ca^{2+} 濃度が急激に上昇し、数10ミリ秒から数秒でもとのレベルに戻る事が分かっている。 Ca 依存性活動電位の発生に伴って細胞内の Ca^{2+} 濃度が上昇するのは当然のことであるが (Lev-Ram達、1992)、 Na 依存性活動電位に伴っても Ca^{2+} 濃度が上昇する (Jaffe達、1992)。錐体細胞の細胞体が活動電位を発生すると、樹状突起に Na 依存性活動電位が逆伝播して、一過性の Ca^{2+} 濃度上昇が起きる事になる。

④樹状突起には多様な電位依存性イオンチャネルが分布している

樹状突起には細胞膜の脱分極によって透過性が変化する性質を持った様々な特性のイオンチャネルが分布している。それらのほとんどは脱分極によって開口するもので、ナトリウムあるいはカルシウムを選択的に透過して膜をへだてて内向きの電流を結果的にもたらすものと、カリウムを選択的に透過して外向きの電流をもたらすものがある。興奮性シナプス入力によって脱分極が起きると、 Na チャネルや Ca チャネルが活性化して内向き電流を流れ、膜電位の脱分極をブーストする可能性がある。 Ca チャネルの活性化は細胞内の Ca^{2+} イオン濃度上昇をもたらす。逆に K チャネルが活性化すると外向きの電流が流れ、脱分極を打ち消すダンパーとして働く可能性がある。(総説 Llinas, 1988)

⑤細胞内 Ca^{2+} イオン濃度上昇によって開口するイオンチャネルも分布している

K イオンを選択的に透過するイオンチャネルには、何らかの原因で細胞内 Ca^{2+} イオン濃度が上昇すると開口するものがある。活動電位の発生の直後は、細胞内 Ca^{2+} イオン濃度上昇のためにこのチャネルが活性化し、膜電位の過分極と膜抵抗の減少が起きる。このため、興奮性シナプス入力の細胞体への伝達は活動電位の発生の前後では異なるはずである。

⑥樹状突起、細胞体、軸索起始部に抑制シナプスが入力している

興奮性神経細胞よりもはるかに数は少ないが、神経系には多様な抑制性細胞が存在し、神経細胞の様々な部位にシナプスしている (Buhl達、1994)。抑制性入力は必ずしも過分極をもたらすとは限らず、接続部位によっては脱分極をもたらす。抑制作用は過分極よりもむしろ膜抵抗の低下によって行われる。興奮性シナプス入力のもたらす内向き電流を短絡して脱分極を妨げるのである (短絡抑制)。軸索起始部での短絡抑制はすべての興奮性入力を無効にすることが出来るかも知れない。樹状突起への抑制入力は活動電位の逆伝播を妨げることが出来る (Tsubokawa達、1996)。また、抑制入力は興奮性入力による Ca 依存性活動電位の発生部位を限定する (Callaway達、1995)。

⑦樹状突起スパイクとシナプス可塑性

シナプス伝達が長期的に増強される現象が知られている。樹状突起での活動電位発生がその必要条件であるらしい。弱いシナプス入力を細胞体に加えた脱分極と組み合わせるとシナプス伝達が増強されるが、このときに細胞体から樹状突起への Na 依存性活動電位の伝導を妨げると

シナプス伝達の増強が阻止されるのである(第2.3.1(1)-3図)(Magee & Johnston, 1997; Markram 達, 1997)。「神経細胞が興奮すると、その興奮の発生に関わった興奮性入力は強化される」とする学習の細胞過程に関する仮説があり、ヘッブの学習則と呼ばれている(Hebb, 1949)。樹状突起の活動電位は、ヘッブ則を実現する鍵となる現象であるらしい。

d. 人工神経素子モデルに望まれる特性

上に述べてきた現実の神経細胞の特性をもとに人工神経素子モデルを構築する際に、どのような特性を持たせるかは、構成しようとする回路に何をさせるかによって異なってこようが、ここでは一つの例を示す。目的に応じて特性を取捨選択すればよい。人工神経素子モデルはソフトウェアとしてもあるいはハードウェアとしても実現する事が出来る。なるべく現実の神経細胞に忠実な特性のモデルを得るにはコンパートメントモデルに基づくソフトウェア的実現が有利であろう。大規模の回路網を構成して高速の演算を実行させるにはハードウェアとして実現した方が有利であろう。

1) 出力の決定部位は軸索起始部だけの

一個所とする。出力の決定は、ホジキン-ハクスレー方程式による活動電位発生で行ってもよいが、膜電位閾値で決定する簡便法でもよいだろう。

2) 単一神経細胞を多層神経回路と見なし、興奮性入力を受け取る部分は、いくつかの独立した単位の接続されたものとする。これらの単位を、出力決定部位から樹状突起遠位部まで枝状に順序だてて接続する。

3) 各興奮受容部について、非線型な電位応答特性を持たせる。ソフトウェア的実現としてはパラレルコンダクタンスモデルにより電流の線形和で膜応答を記述するのが妥当であろう。こうしておけば短絡抑制が可能である。電位依存性イオンチャネルの活性化による更に顕著

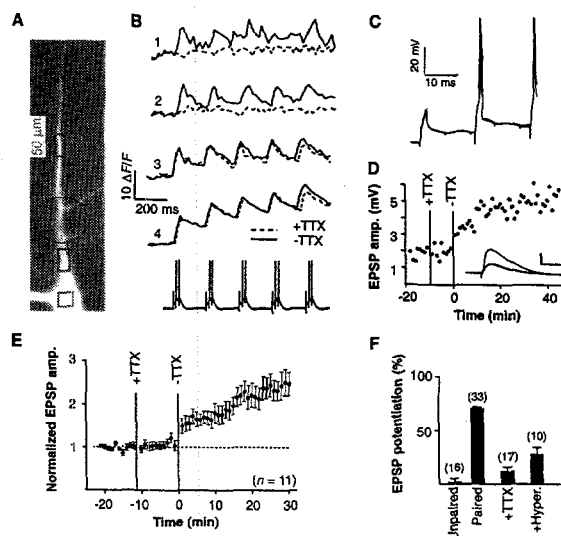


Fig. 4. Dendritic action potentials are required for induction of synaptic plasticity. (A) Fura-filled CA1 pyramidal neuron with somatic electrode. The approximate area of TTX application is shown by the oval. (B) Superimposed optical recordings from regions of the neuron delimited by the boxes in (A). Traces are from progressively more proximal regions moving down the column in (B). Dashed lines are the average $\Delta F/F$ during the pairing protocol given along with a transient application of 10 μ M TTX to the dendrite. Solid lines are the average $\Delta F/F$ during the pairing protocol given without TTX application (~ 11 min later). The increase in $[Ca^{2+}]_i$ is similar in regions of the neuron proximal to the TTX application and is significantly reduced in those regions distal to TTX application site. (Lower trace) Somatic voltage during paired train. (C) Expanded somatic voltage recordings during the first burst of paired stimuli for trains with the TTX application and without. No appreciable differences are observable. The first current injection was subthreshold in all traces so that only two action potentials were evoked during each individual burst. (D) Plot of EPSP amplitude for the same neuron showing that paired stimuli without back-propagating action potentials do not modify EPSP amplitude, whereas subsequent paired stimuli with back-propagating action potentials result in a long-term, large increase in EPSP amplitude. (Inset) Average EPSPs for the last 2 min of each period (control, +TTX, -TTX). (E) Grouped data showing normalized EPSP amplitude after paired stimulation with and without TTX application. (F) Summary of mean LTP amplitude under various experimental conditions. The amount of EPSP potentiation, plotted as percent of control, is shown for all cells under each condition. We calculated potentiation by dividing the average EPSP amplitude at 10 to 15 min after stimulation by the average control EPSP amplitude.

第2.3.1(1)-3図 Magee, J. C., & Johnston, D., Science 275(1997) 209-213 より

な非線型性をモデル化するにはホジキン-ハクスレー方程式様の取り扱いが必要だが、look up tableにして高速化を図ることは可能である。

- 4) 興奮性入力を受容する樹状突起の各部が抑制性入力も受けるようにする。
- 5) 軸索起始部には、出力を全く許さないような抑制シナプスが接続するようにする。
- 6) 出力の送出が決定されたとき、それが樹状突起の各部分に伝達される様にする。抑制入力を受け取った部分ではこの情報の伝達は阻止される。
- 7) 出力の送出を知らせる情報が樹状突起に伝わると、その部分の入力抵抗が一時的に低下するようにする。
- 8) 出力の送出を知らせる情報が樹状突起に伝わると、興奮性シナプス入力 of 効率が長期的に変化するようになる。

e. 結語

物質の性質を理解するために科学者達は、量子力学レベルで構成分子の微視的特性をしらべ、熱力学により巨視的振る舞いを知ったが、微視的理解と巨視的理解を結び付けるにはさらに統計力学が必要であった。人工神経素子モデルによる構成的脳研究は、神経細胞の微視的特性を巨視的な脳の機能と結び付けようとするものである。この努力はこれまでも精力的になされてきたのであるが、近年の実験研究は単一細胞がこれまで考えられていたよりも高度な情報処理能力を持つ事を示している。新しい神経細胞像に基づく処理能力の高い人工神経素子モデルの構築が必要である。

(東京薬科大学 宮 川 博 義)

参考文献

- Buhl, E.H. et al., Nature 368 (1994) 823-828
Callaway, J.C., et al., J. Neuroscience 15 (1995) 2777-2787
Hebb, D.O., The Organization of Behavior, Wiley, New York. (1949)
Jaffe, D.B., et al., Nature 357 (1992) 244-246
Lev-Ram V., et al., J. Neurophysiology 68, (1992) 1167-1177
Llinas, R.R., Science 242 (1988) 1654-1664
Llinas R.R., & Sugimori M., J. Physiology 305 (1980) 197-213
Magee, J.C., & Johnston, D., Science 275 (1997) 209-213
Markram, H., et al., Science 275 (1997) 213-215
Miyakawa H., et al., J. Neurophysiol. 68, (1992) 1178-1189
Spuruston, N., et al., Science 268 (1995) 297-300
Stuart, G.J. & Sakmann, B., Nature, 367 (1994) 69-72
Svoboda K. et al., , Nature 385 (1997) 161-165

Tsubokawa, H & Ross, W. , J. Neurophysiology 76 (1996) 2896-2906

Turner, R.W., et al., Neuroscience 53 (1993) 949-959

Yuste, R., & Tank, D.W., Neuron 16 (1996) 701-716

(2) 神経素子モデルと学習則

脳神経系が持つ情報処理の機構を数理工学的にモデル化し、高度な情報処理能力を人工的に実現するためには、まず、神経素子のモデルと自己組織化のための学習則をどのように表現するモデルを作るかが重要で、それによりその後の神経回路の特性や能力も決まる。例えば、神経細胞素子の入出力が平均発火頻度としたアナログ値とするか、パルス列とするかの選択により情報処理の方式がまったく異なることになることから想像できる。

中枢神経系の生化学や生理学的実験から導かれた学習・記憶や情動などの高次な機能を、まったく生物そのままの仕組みで工学的に実現することは、現在の時点では不可能である。例えば、脳神経系には、分子・シナプス・細胞・神経回路網・脳機能モジュール・中枢神経システムのように対称とする各研究レベルがある。大規模な中枢神経システムを分子レベルのモデルで詳細に記述し計算することは、複雑すぎて実際には処理不可能となる。そこで予め取り扱うべきレベルを限定して、そのレベルに必要な機能を抽出し適切に表現出来る簡単なモデルを作り、工学的に実現することを考えなければならない。

a. 神経回路素子モデル

神経細胞は、前節で述べられたように樹状突起の複雑な構造とそれに結合するシナプスの間での非線型な演算も考えられ、単一の神経細胞のモデルだけでも厳密に考えると限りがないものとなる。ここでは、出来るだけ現実の神経系に近似した機能を実現する神経細胞レベルから神経組織レベルまでの複雑さの神経回路を扱うときの神経素子モデルを検討する。

まず、入力部の樹状突起において複雑な幾何学的な構造からシナプス結合の位置により信号伝達様式が異なることが考えられる。そのために樹状突起をコンパートメントに区分して信号伝達を計算する試みもあるが、単一神経細胞のみを扱う場合なら詳しくても計算が可能であるが多数の素子をもつ回路ではもっと単純化する必要がある。また、最近樹状突起上のスパイク活動電位が何らかの情報処理に寄与するのではないかという議論があり、入力パルスの同時性の検出や、論理演算処理 (AND, OR回路) の可能性も指摘されている[1]。樹状突起での処理過程を神経素子モデルにどのように加味するかは、そこでの情報処理の意義を十分理解した上で必要ならば取り入れられることになる。一般的には、入力部の処理は単純に入力信号と結合係数の積を多数個集積する計算ですませる方法が取られている。

集積された入力信号が細胞体に集まり非線型変換によりパルス列に変換されて軸索を伝導して他の神経素子へと伝達される。この時、どのような非線型変換がされるかは神経素子の機能を決定する上でも重要である。

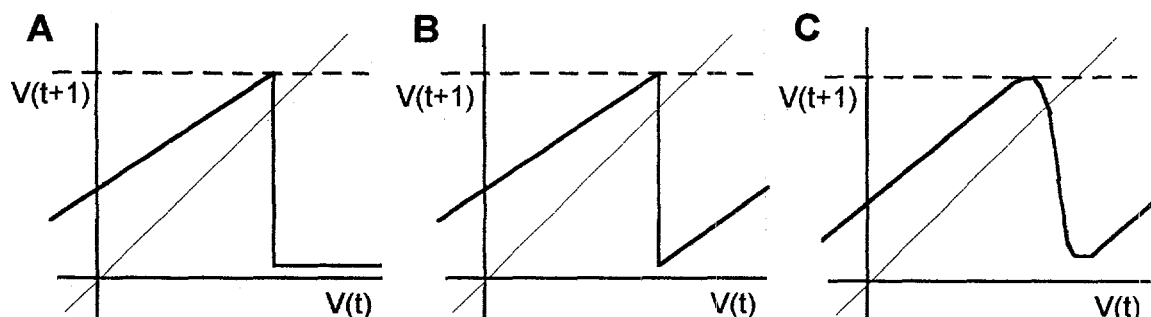
従来のニューラルネットでは出力を平均発火頻度で扱い数学的な扱いやすさから連続関数であるS字型関数変換で処理している。しかし、数理工学的な解析の安易さはあるが、実際の細胞の動作をよく近似できているとは言い難いし、神経の活動をダイナミックに表現する機能は

持ち合わせていない。また、その外に神経細胞を振動子と見なしてそのダイナミックな振動の同期や位相で情報表現をする考えもあるが、振動特性は神経細胞の機能の一部ではあるがそれで全ての機能を表現するには無理がある。

神経細胞が内部ポテンシャルの上昇により閾値を越えたときパルス発火出力をする機能を近似する立場からは、生理的に導かれたホジキン-ハックスレイのイオンチャンネルの式を用いる試みもある。しかし、これでは式があまり複雑すぎ計算が煩雑になるのでそれを単純化する努力も行なわれている。実際の神経細胞ではどのような電位-パルス列変換が行なわれているかのデータはあまり無いが、網膜神経回路の出力端であるガングリオン細胞の内部緩電位とパルス出力のヒストグラムの関係が良く似ている[2]と言われている。その他にも、ハエやコウロギの神経細胞でも入力とパルス列の関係はかなり線形な関係で変換されていると指摘されている。したがって、電圧-パルス列変換はかなり単純化したモデルで取り扱うことが可能であろうと考えられる。

そこで神経細胞の電位-パルス列変換の単純なモデルとしては、次のものがある。

- ① L I F モデル：入力部は漏洩抵抗を持つ積分器で、入力が時間とともに内部電位として集積されて、その電位が閾値を越えるとパルス出力をだし、その時、内部電位が零にリセットされる動作をする。
- ② カイアニエロのモデル：入力部は同じ漏洩の有る積分器で、内部電位が閾値を超えるとパルスを出力し、閾値が上昇して時間とともに元に戻る動作をする。
- ③ S A M モデル：我々の提案するモデルで、入力部は同じ漏洩の有る積分器で、内部電位が閾値を超えるとパルスを出力し、内部電位から発火に伴い定数を差し引く動作をする。



第2.3.1(2)-1図 各神経素子モデルの非線型変換によるリターンマップ図

A：L I F 神経素子モデル、B：S A M 神経素子モデル、C：合原らのカオス神経素子モデル A が最も単調な変化で、B と C の形が似ており、C は角が丸まってカオスが発生する。

カイアニエロのモデルは、特殊な入力一定の場合について、南雲らの詳しい解析が有り南雲-佐藤のモデルとも呼ばれる[3]。このモデルは、いくつかの係数と変数をまとめて置換すると、S A M モデルに近い特性になるので、L I F モデルと S A M モデル[4]について比較を述べる。双方とも計算は非常に単純で、多数の神経素子を用いた回路でその動作を計算すること

や電子回路で実現することはさほど困難ではない。発火により内部電位をリセットするか、定数を引くかの違いは、計算時間幅による大きな違いとして現れる。計算時間幅が広いとLIFモデルは入力信号強度を変化したときパルス周波数出力変化が非常に不自然なステップ状となるため、計算時間幅を細かく取って計算しなければならない欠点がある。SAMモデルではこの欠点はなく、計算時間幅をパルス幅と不応期を含む数ms位に設定するとよい。このモデルは閾値・電位の減衰時定数・発火減少定数のパラメータを調整することにより、神経細胞のいろいろな型の応答に近い動特性を持たせることも出来る。例えば、非常に大きな入力があるとしてばらく発火し続けることも出来る。

神経細胞はカオスの特性を含んでいるとして、合原らはカオスニューロンモデルを提案し、神経回路に不確定性を導入した解析をしている[5]。リターンマップで比較するとSAMモデルは屈曲点の角を丸めるとカオスモデルと同じようになる。一方、変換関数に確率的な要素を入れたボルツマンマシーンモデルもある。実際の神経細胞には雑音成分もかなりあるので、神経素子モデルにも雑音の要素を取り入れた不確定性を与えることにより現実的な応答に近づくとも言える。

軸策の役割は、出力のパルス信号を他の多数の神経素子の入力に伝達し分配することである。軸策では信号は減衰せず伝達の遅れが生じることになる。距離が近い場合は遅れを無視出来るが、伝達の遅れを考慮した情報処理も一部に提案されている。

b. 学習則

神経回路は、入力信号を処理してその結果を出力すると同時に、入力信号により活動した影響が神経回路の結合関係を変えて新しい処理形態をつくる。この学習による結合変化が長期に持続するとき、入力の経験が記憶として回路内に蓄積される事になる。言い換えれば、学習により情報処理プロセスを自己組織的に構築するという事である。

最近の神経科学的研究成果からこの学習に関係するものとして神経細胞相互の結合部での長期増強や長期減衰の現象があり、そのシナプスでの可塑性の機構が明らかに成りつつある[6]。結合の長期増強や長期減衰はそれぞれ異なるメカニズム間のバランスによって生じていると考えられる[7]。

これらシナプスの可塑性はHebbが仮定した入力と出力が同時に応答したとき結合が強化されるという学習則に良く似た現象であると言われている。ただし、数理的にもいくつかの問題点もあるので、Hebbの学習則をもとに生理的なシナプスの可塑性の現象を考慮しながら以下で学習則を検討する。

Hebbの学習則は単一神経細胞の入力と出力が入力結合係数をどう変えるかを記述するもので、局所的な情報による学習則である。いま、jからの入力を $X_j(t)$ 、iの応答を $Y_i(t)$ 、cを学習速度とすると、Hebbの学習則は次の式のように表わされる。

$$\Delta W_{ji} = c \cdot X_j(t) Y_i(t) \dots (1)$$

ある決まった時点での入力出力の同時活性化により結合を強化する学習の仕組みとなっている。この学習則では結合係数が強化される学習ばかりとなり結合が飽和してしまう。そこで、結合係数の増大を押さえるか、減衰する項を導入する必要がある。例えば、忘却により時間とともに結合係数が減衰する項を導入すると、次のように表される。

$$\Delta W_{ji} = C \cdot X_j(t) Y_i(t) - d \cdot W_{ji} \dots (2)$$

したがって、学習によって結合が強化されない古い記憶は忘却して回路内の古く使われなくなったものを取り除き整理する機能を持たせられる。

その他の改良として入力・出力の学習レベル n, m ($n, m \geq 0$) を定め、入出力がそれ以上のとき強化され、以下のとき減衰させられるとした方法も有り、次式のように表され、

$$\Delta W_{ji} = C \cdot (X_j(t)^n \cdot Y_i(t)^m) \dots (3)$$

いろいろな効果を出すことが出来る。例えば、 $m=0$ で n を W_{ji} とすると入力ベクトルに近づいて行くインター学習ができ、 n を細胞内結合係数 W の全合計に比例した値とするとその細胞の全結合係数で抑制する事が出来る。 n や m をある時点の回路全体の平均活動レベルとすると、入出力が平均値より大きいものが強化されるコバリアンス学習となる。また、生理的にはシナプスの後部から前部への何らかの活性を伝えるとされるアルキドン酸・一酸化窒素・一酸化炭素などの影響を考慮すること必要であろうが、現時点では、その効果も明らかでないことや、神経細胞モデルに場所的な要素を入れるためにはモデル自身をより複雑にするので、学習則に入れることは困難である。

上に述べた各種学習則でまだ不足している点は、時間的な情報の処理が取り扱われていないことである。時間的な扱いをするためには、伝達時間の遅れや、短期的な記憶をHebb学習則に導入する必要がある。遅延要素を取り入れた例は、入力信号がいくつかの異なる遅延経路を持つ神経モデルがあるが、時間情報を学習させるために教師有り学習など大局的な情報を必要とするか、特別な回路構成を持たなければならないなどの学習則以外の制限がある。

シナプスの短期的記憶または履歴を学習則に取り入れることは、シナプスでのイオンの残留と減衰など生理的にも妥当なモデル化である。ここでは、時間的な情報は出来事間の順序を記憶にとどめることであるとした学習則を述べる。そこでは、入力の各結合部分毎に入力を時間的に集積し減衰する要素を取り、入力履歴値 $H(t)$ として次のように定める。

$$H_{ji}(t) = X_j(t) + q H_{ji}(t-1) \dots (4)$$

ただし、 q ($0 < q < 1$) は履歴の減衰定数である。

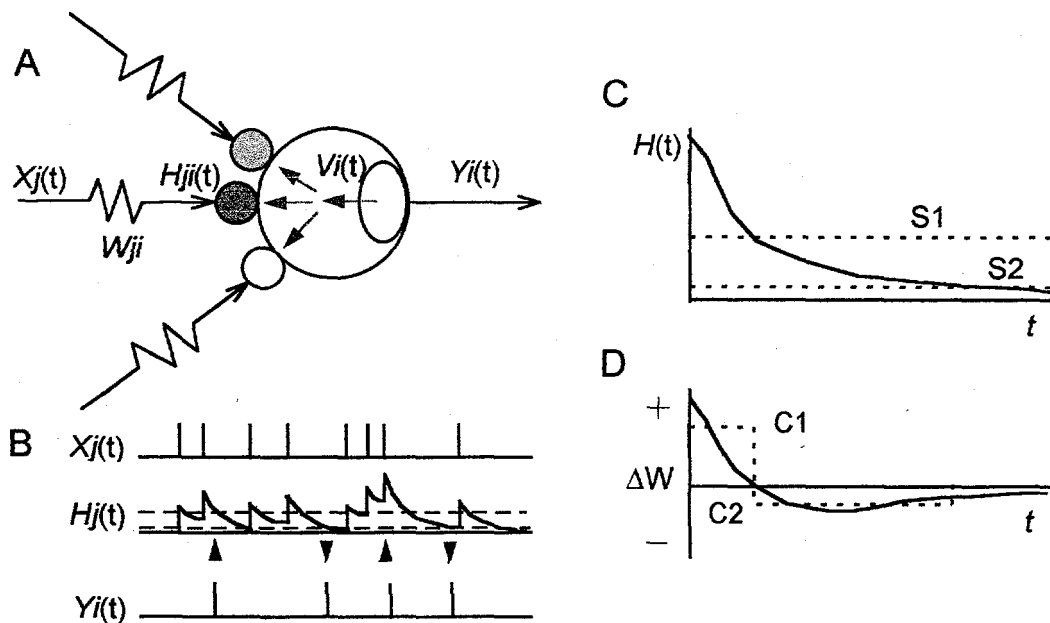
この入力信号の時間的な履歴値が各シナプスで保持されていると仮定することによって、時間的な情報処理を可能とする学習則へと発展できる[8]。そこで、この入力履歴値に対して入力

依存性学習か、出力依存性学習か調べると、発火出力があるとき履歴値にしたがって結合が学習される出力依存性学習が正しく時系列学習ができることが示された。また、入力履歴値と学習の閾値を比較することにより、履歴値の大きなものは結合の増強、中間値のものは減衰、ほとんど発火に関係しないものは履歴値も零に近く結合の変化のない学習をする提案がされている。この関係は次式に表され、

$$\Delta W_{ji} = C_{ji} \cdot (H_{ji}(t) - s_i) Y_i(t) \dots (5)$$

ただし、 $H_{ji} < s_1$ 領域では、上に述べた結合の減衰または無変化をとる。この学習則によって神経素子自身に時系列の学習が可能な機能を持たせる事ができ、これを用いて時系列の連想記憶回路が自己組織化できることが分かった。

さらに、神経回路には、抑制的な神経素子や結果が好ましいものかどうかで、全体的に学習を制御することも必要な要素である。実際の神経回路の計算では側抑制をもつ神経回路で全体の活動が過剰に应答するのを抑制したり、逆に発火のない素子の閾値を下げて活動に参加させるなどの機能も必要となろう。



第2.3.1 (2)-2図 時系列学習則を持つパルス駆動型神経素子モデル

A : 神経素子の模式図、B : 入力 $X(t)$ 、その履歴値 $H(t)$ 、出力 $Y(t)$ 、それぞれの波形、
C : 履歴値の時間減衰、履歴値が学習閾値 S_1 より大きいとき結合増強、 S_1 と S_2 の間のとき減衰、 s_1 以下では不変、D : 時間経過と結合の増強と減衰の関係図

c. おわりに

ここでは、脳神経系の機能を人工的な神経回路素子モデルで実現するためにどうするかという点から述べてきた。結論として、パルス駆動型のダイナミックな神経素子で、時系列学習則

を持ったモデルを用いて脳機能型情報処理を実現する可能性が見えてきたと思われる。

細胞間をパルスで伝送し合うことは、ここで紹介したようなパルス演算による利点や計算の単純さと共に、雑音の影響を避ける結線の容易さという意味もある。特に脳のような大規模システムを作り上げるためには、各要素毎をパルス信号の結線をすることが信頼性の上でも妥当と思われる。

生物は外界から多くの情報を取り入れそれらに関連づけながら学習し、連想記憶として貯えて行く。その連想記憶の中で、空間的な関連と共に、時間的な順序が大切な要素を持っている。これにより、貯えられた経験から次の事態を予測することも可能となる。今後、脳機能の高次な機能をもつ情報処理システムを実現するためには、時系列の処理ができることは必須のことと思う。

大規模な脳型情報処理システムが実現できれば、脳神経系に近い動作をするので、生理的なデータを検証するシミュレータとしても有用となる。さらに、実際の生体情報処理では、視覚や音などの外部刺激の知覚情報の処理に加えて、情動など内部で発生する価値情報による学習の制御も重要で、価値情報をどのように今までの学習や記憶の情報処理の仕組み中に取り入れていくかは、今度の重要な研究の課題でもある[9]。それにより価値情報を考慮した新しい情報処理が開ける。

(電子技術総合研究所 重松 征史)

参考文献

- 1) Fujii, H., Ito, H., Aihara, K., Ichinose, N. and Tsukada, M. (1996) *Neural Networks*, 9, 1303-1350.
- 2) Sakuranaga, M., Ando, Y. and Naka, K. (1987) *J. Gen. Physiol.* 90, 229-259.
- 3) Nagumo, J. and Sato, S. (1972) *Kybernetik*, 10, 155-164.
- 4) Shigematsu, Y., Matsumoto, G. and Akiyama, S. (1992) *Proc. Int. Symp. N.I.S. Iizuka*, 130-133.
- 5) Aihara, K., Takabe, T., and Toyoda, M. (1990) *Physical Letter, A*. 144, 333-340.
- 6) 加藤宏司 (1996) 脳・心・コンピュータ、日本物理学会編、丸善30-58.
- 7) Artora, K. and Singer, W. (1993) *Trends in Neurosci.*, 16, 480-487.
- 8) Shigematsu, Y. and Matsumoto, G. (1994) *Proc. Iconip. Seoul*, 1113-1116.
- 9) Matsumoto, G., Ichikawa, M. and Shigematsu, Y. (1994) *Proc. IC Soft Computing Iizuka'96*, 15-24.

2.3.2 大規模ニューラルネット・チップ

(1) 脳型コンピュータ用プロセッサ・チップ

a. 序

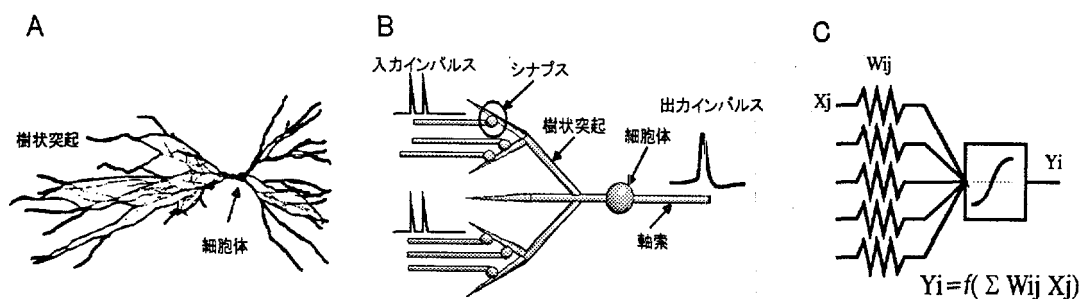
脳の学習には、“情動”が深く関わっていることが予想される(1)。情動とは、細かな解析的な情報処理を伴わずに、脳が外的な変化に機敏に応答する能力であると定義できる。例えば、子供の頃、藪を歩いていて“足元で長いものが動いた”というだけで、ゾクッとして後ずさりし、後からそれがヘビではなくロープだと気づいてホッとするといった経験をお持ちの読者は少なくないだろう。これは、“情動処理”が視覚解析やパターン認識といった脳の正式なデータ処理ルートをバイパスして、とりあえずの答えを出した結果と理解できる。つまり、情動は、脳における最初の価値基準を提供する生来の組み込み処理と考えることができる。脳は、情動の粗いが高速な価値判断と精密で解析的な結論が不一致ならば、その事象をさらに解析して状況を理解するという仮説立証型の情報処理装置である。その過程で、その事象に関する処理方法が抽出されて記憶として固定され、情動自身が経験によって更新されてゆく。逆に、情動が働かないと学習できないわけで、いやいや勉強をしても2-3日ですっかり忘れてしまうのである。

しかしながら、情動と学習の関連は脳研究の1つの大きな課題であり、現在進行形であって、直接に模倣したコンピュータを作れる段階ではない。我々が開発を進めている脳型コンピュータは、脳を完全に模倣することを目指したものではなく、脳の情報処理に含まれる学習機能というエッセンスを部分的にでも実現し、工学的に利用することを目的にしている。そして、その努力の過程でこそ、脳の理解は深まり、情動の本当の意味が理解できるのかも知れない。本稿では、現在、我々の研究室で開発が進んでいる脳型コンピュータのプロトタイプ(専用プロセッサ)について、基本的な神経モデル、その設計コンセプトとデータ処理機構の概要について説明する。

b. 神経細胞のモデル

脳における情報処理の担い手が神経細胞であることはご存知の通りである。そして、学習機能の原点も神経細胞の性質にあり、神経細胞を正しく理解することが脳型コンピュータの原点でもある。脳の神経細胞と一口に言っても実に千差万別で、典型的な神経細胞など存在しないのが実際である。例えば、第2.3.2(1)-1図Aに示したのは、海馬のCA1錐体細胞の実際の形状をトレースしたものである。同じ、神経細胞でもこのように全く異なる形状をしている。当然、内部で行われる情報処理も異なっているわけであるが、従来の神経細胞モデルは全く、第2.3.2(1)-1図に示したような単純なものであった。確かに、神経が多くの入力を受けて、1つ

の出力を送るという意味では良くできたモデルであるが、それ以上のものではない。この単純な細胞モデルが長い間受け入れられて来たのには、神経の形状が持つ意味が生理学的に示されていなかったという大きな理由がある。ところが、最近、デンドリティック・スパイクの研究(2)が進み、事情は急変した。デンドリティック・スパイクとは、神経細胞の樹状突起(デンドライト)でスパイクが発生する現象である。この事実は樹状突起の構造が神経興奮の発生に直接関わることを示す証拠で、これから類推される情報処理は実にバリエーションに富んだものになる。これについては詳しく後述する。また、複雑な細胞をうまく整理する方法がなかったというのも、単純なモデルで試行を重ねる原因になった。そして、ここで提案するモデル化法とプロトタイプ・システムで取り入れたパラメータ設定法は、非常に複雑な細胞をシステムティックに合成することを可能にする新しい手法を提供する。この手法については、次節で例を示しながら解説する。



第2.3.2 (1)-1図 神経細胞とその簡素化モデル

図Aはラット海馬のCA1錐体細胞の形状をトレースしたものである。複雑な形状をした樹状突起には数千のシナプスがあり、前段の神経細胞群(CA1細胞の場合、CA3や嗅内野)からの多くの入力を受け取っている。神経の入出力は普通インパルスと呼ばれる全無律の信号であり、デジタル論理信号に似ている。生物の神経細胞でのシナプス効率のダイナミックレンジはかなり大きく、1000倍程度の差があるらしい。つまり、ひとつで神経が活動するような入力と1000本から入力を受けなければ活動しないような接続が混在している。図Bは神経細胞をスキマティックに描いたものである。シナプスに入力されたインパルスはシナプスで化学的に伝達され、樹状突起の電位を変化させる。電位は樹状突起を伝って細胞体の電位を変える。これがスレショルド・レベルを超えると、インパルスを出力する。図Cは非常に単純化した電氣的なモデルである。抵抗がシナプス(接続の強度 W_{ij} はコンダクタンス)を表し、細胞体で加算され、非線型な変換(f)を受けて、出力(Y_i)を出す。実際の神経との最大の違いは樹状突起での電位伝播を線形加算としている点と時間の概念が全くないことである。しかしながら、簡単で考えやすいので、このような神経を前提に理論を組み上げることが多い。

今一度、従来の神経モデルに立ち返り、それがどんな情報処理を担えるのか考えてみよう。

第2.3.2 (1)-1図Cの抵抗記号は、神経と神経の接続部であるシナプスを示し、この抵抗値が接続の強弱を表現している。つまり、同じように到来した前段の情報が抵抗値に従って、重み付けされて加算されるのがこの神経モデルである。加算結果が閾値を超えれば、この細胞は出力を出す。単体としては、単純な論理であるが、入力数が非常に多く、さらに多数の相互結合を考えれば、システム全体は単純な振る舞いにはならず、複雑な情報処理を担えるだろう。だが、1個の細胞にとって入力がどこから来た情報なのかは関係がなく、細胞は単純に線形加算結果を機械的に出力するだけである。つまり、このモデルには情報の価値を制御する(あるいは検

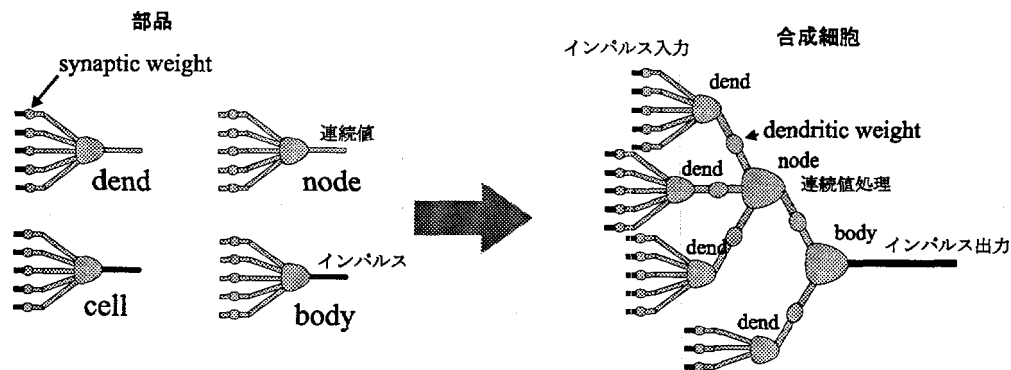
出する) ような機構は存在しないのである。従って、定型的な情報処理、例えば画像の一次処理や簡単なパターン認識では、このような細胞モデルに立脚したシステムがそれなりの性能を発揮できるのであるが、学習機能を持ち合わせた知的な処理をこのモデルに立脚して設計することは難しい。

さて、第2.3.2 (1)-1図AのCA1錐体細胞の形状を見ると、意味ありげに樹状突起を伸ばしている。実際、細胞体から離れた部分と細胞体に近い部分では受ける入力も信号を感受する機構も異なっていることが、近年明らかになっている。CA1錐体細胞の部位により異なる入力を受けている。シャーファー側枝と呼ばれる神経束で送られてくる前段の情報は細胞体に近いデンドライトに接続され、長期増強(LTP) (3) という活動依存の学習機構が存在し、接続自体も強力で、1本の入力でもCA1錐体細胞を発火させることがある。それに対し、パフォーラント線維を受け付ける細胞体から離れた部分の接続は弱く、多くの線維が同時に活動し入力されなければCA1細胞を発火に導くことはできない。また、この接続にはLTPはなく、むしろ、LTPの制御に使われているらしい。さらに、CA1細胞のデンドライトは、大きな入力を受けるとスパイクを生じる。小さな入力で発火する場合は、細胞体がスパイクの発生源であり、神経細胞の樹状突起全体の情報を集めて発火するが、部分的な入力でも効果の大きな入力なら、デンドライトが応答する。このような複雑な特性を兼ね備えた細胞は、単純な第2.3.2 (1)-1図Cのモデルでは表現できず、新たなモデル化の方法を考慮する必要がある。

同時にそのモデル化法が専用プロセッサの処理能力に合致したものでなければならない。これまで、多くの神経モデルは、そのモデル特有の数学的な理論を背景にケースバイケースでシミュレーションされてきた。この専用プロセッサのためのモデル化法は、統一的に多くの神経細胞モデルを表現できるようなものである必要がある。そのためには、オブジェクトの概念を導入するのが簡単である。つまり、機能を果たすいくつかの部品を組み合わせる上位の構造を記述するようなモデリングである。

本節最初に述べたように、神経細胞に典型などない。前例のCA1細胞も1例に過ぎず、この類の細胞だけでシステムを構成することはできない。では、どのようにモデル化すれば、一般的な表現ができ、それを工学的に実現できるのであろうか？それは、神経細胞を細胞体と樹状突起に分解することで整理できることがわかる。第2.3.2 (1)-2図は我々のモデルで定義される基本的な4つの部品である。これらを組み合わせることで、どのような神経細胞でも合成的に仮想実現することができる。

我々の現在の目標は、この複雑な合成神経細胞で学習する大規模神経回路を設計し、それをハードで実現することである。後述するが、学習規則も様々なバリエーションがあるため、ソフトでの実行は極小規模なシステムに限られる。専用ハードが必要な理由は、脳のデータ処理量が膨大なためである。脳の神経細胞数は、100億個以上あり、1個の細胞が1000以上の接続を持っているので、このような接続だけを考えても10テラ・ビットの情報量となり、それが数



第2.3.2 (1)-2図 専用プロセッサで用いる神経モデル

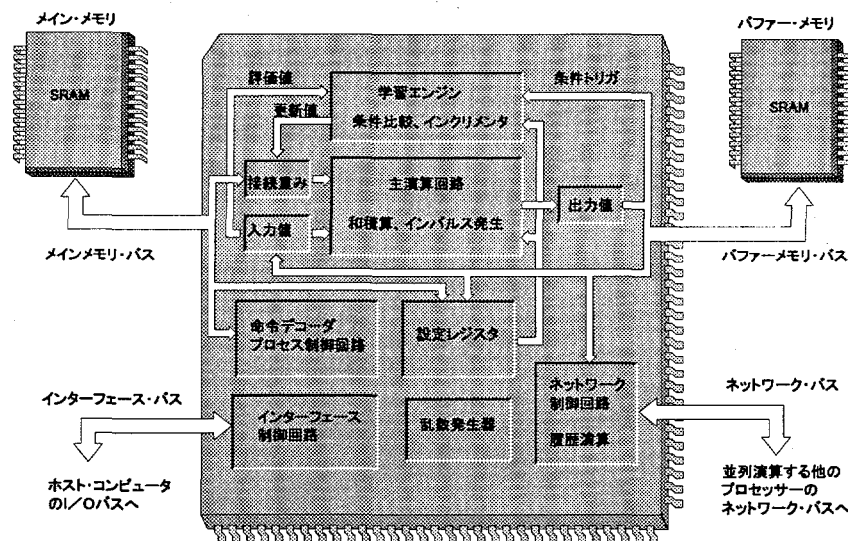
部品はdend（樹状突起） node（接続ノード） cell（小型細胞） body（細胞体）の4種である。これらの違いは、入力と出力の様式であり、インパルスか連続値かだけである。例えば、dendはインパルス入力で連続値出力である。これらを組み合わせると右のような大型の複雑な神経細胞を合成することができる。学習規則や各種パラメータは、部品単位で設定する。従って、合成した大型細胞では、複数の学習機能が共存することができる。また、各種のイオン電流の効果を複数のパラメータの異なる部品を多重に使用することで模擬できる。

十ミリ秒で全てアクセスされている。さらに、それらの接続を作るための学習ルールが主に化学的なプロセスで実行されているわけで、情報処理量は膨大である。従って、ソフトのシミュレーションでは到底、達成できない。専用ハードでも難しいのであるが、可能性としてはソフトより遥かに高いのである。

c. 専用プロセッサの概説

専用プロセッサ（Neural Net Processor）は、神経回路をシミュレートするために開発されたプロセッサである。専用プロセッサによって、非常に複雑で、大規模なシミュレーションを高速に実行することができる。通常のいわゆるCPUが分岐や判断を含むアルゴリズムの実行と論理・算術演算を高速に実行することを目指して設計されているが、専用プロセッサは神経細胞とそれらの接続で表現される神経回路を実現することに最適化を図ったプロセッサである。専用プロセッサの神経回路は、特別なプログラム言語（NNPDL）によって記述され、専用プロセッサはそれをほぼ直接に解釈し、ユーザーが望む神経回路を仮想的に実現する。また、専用プロセッサは、わずかな追加部品で並列接続することが可能で、若干の制約を守れば、プロセッサ数に比例して処理速度と回路規模を拡張することができる。

専用プロセッサのハードの最小単位は処理チップ本体1個と4個のメモリ・チップ（高速SRAM）の5個の部品で構成され（第2.3.2(1)-4図）、その単位で概ね1000個の細胞と100万の接続を実現できる。ただし、正確な細胞や接続の数はプログラムによって異なる。すなわち、メモリー容量の限りにおいて細胞と接続を表現することができるので、細胞の複雑さや接続の学習性などで実現できる回路は制限される。例えば、学習性のない単純な加算的な細胞は、数バイトのメモリで1000以上の入力を受け付けることができるが、学習型の細胞では、接続数と同数のメモリを必要とする。専用プロセッサ内部には並列演算機構が組み込まれており、神

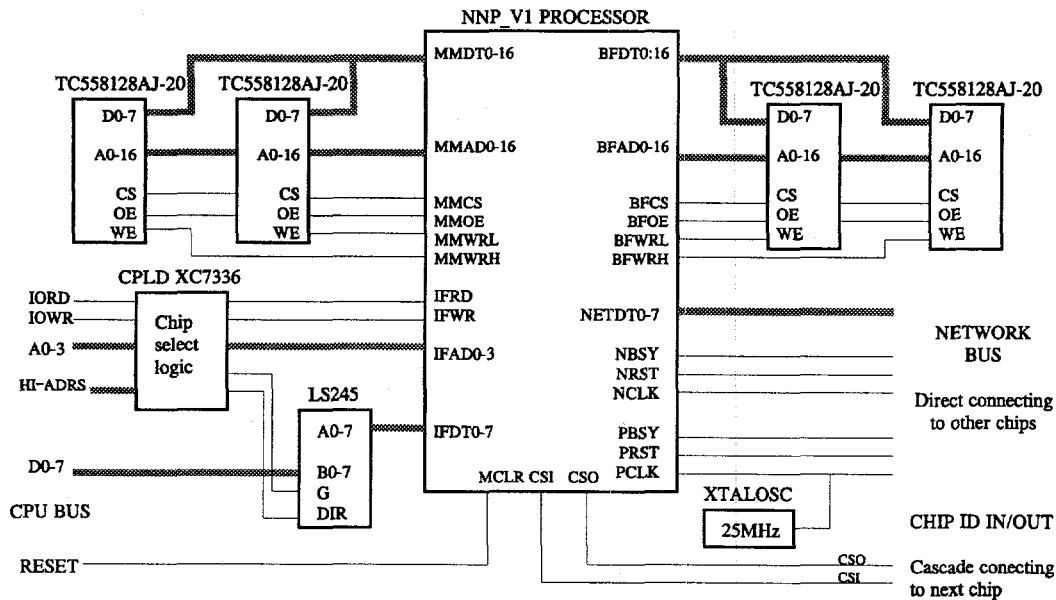


第2.3.2 (1)-3図 プロセッサの内部ブロック図

主演算部は2個の積算器と加算器、アキュムレータ、比較器からなる。これらは全く並列に動作し、パイプラインで演算を高速実行する。学習演算部は比較判定論理と履歴計算、インクリメントなどの回路で構成されていて、主演算と並列に動作する。そのため、このプロセッサでは学習のための実行時間は見かけ上ゼロある。設定レジスタは14本あり、細胞や接続の特性、学習パラメータなどをプログラムから設定する。メモリは2系統あり、一方をメイン、他方をバッファと呼ぶ。メイン・メモリはプログラム・コード（インストラクションのリスト）と接続情報（重みの値と更新に必要な情報）を格納し、バッファ・メモリは各細胞の活動を履歴を含めて保持する。2系統にした理由は、主演算が接続情報と入力の細胞活動の両方を同時に必要のため、メモリ・アクセス時間を短縮するための工夫である。将来、オンチップ・キャッシュにすれば、メモリは1系統でよい。乱数発生回路は3種のm系列乱数を発生し、学習パラメータを分散させ、学習が画一的になるのを防いでいる。命令デコーダは命令数が少ないので非常に簡単であり、プロセス制御も簡単なステート・マシンとカウンタで実現されている。ネットワーク制御回路はバッファ・メモリのアクセスとネットワーク・バスを介してのリード・ライト制御が主たる役割である。また、間接アドレッシング用のテーブルメモリを内蔵し、定型的なパターンのアクセスを高速化している。

経活動の計算と学習のための計算は同時に進行しているため、複雑な特性の神経細胞でも、その処理速度は非常に高速である。基本的には、1接続を1クロックで実行することを目指して設計され、パラメータ読み込みなどのオーバーヘッドがあるものの、接続が多い細胞ほど比率としては高速に実行されるのが特徴である。

専用プロセッサには柔軟でシステマティックな学習機構が備わっている。学習は活動依存的に細胞属するデンドライトの各接続の重みを更新する自己学習則と次段の細胞からの評価フィード・バックで接続を調整する逆行性学習則の二種に大別される。これは、学習のトリガとして、自己の活動を使うのか、あるいは、後段の細胞からの評価信号を使うのかで選択される。また、入力として扱われるインパルスは数種の異なる積分器を会して学習評価に利用される。このため学習トリガ（細胞の活動）に対しての異なる時間関係での学習を行うことができる。最も分かり易いのは、細胞が発火したことを学習のトリガとして、その時に入力のある接続を強化するような学習則（ヘップ則）であろう。この場合、入力の遅延は、細胞全体の応答時間と同程度に設定することで、この学習則が選択される。また、我々の共同研究者の重松が提案したSAM則（4）のように、事象が成立する時間が、学習すべき入力セットより遅れる場合は、遅延の大きい積分器を選択することで実現される。このように専用プロセッサの学習の枠



第2.3.2 (1)-4図 専用プロセッサの最小回路

プロセッサは直接にメモリなど周辺デバイスと接続でき、少数の部品で構成できる。メモリには高速CMOS-SRAMを用いる。128Kバイトタイプのものが最も適当である。CPU（ホスト・コンピュータ）はIBM-PC互換器を想定しており、ISAバスにLS245などのバス・ドライバで接続する。チップセレクト回路はCPLDで適当なものを作る。IFRDとIFWRは負論理の非同期ストロブ信号である。並列処理に必要な回路も全て内蔵されているので、ネットワーク関連の信号線を直結することができる。プロセッサのクロック（PCLK）とネットワークのクロック（NCLK）は非同期なので、多くのプロセッサを並列接続する場合は、NCLKを5MHz程度まで落とすことで配線の遅延を吸収する。もちろん、セグメントに分けて管理することもでき、そのための信号も出力されている。チップIDの自動設定のため、CSIとCSOはカスケード接続する。

組みは一つで、トリガ・ソースと入力の時間応答性の選択によって、無限の組み合わせが可能である。

専用プロセッサの全体コンセプトとして重要なのは、超多入力論理とそれで構成されるステート・マシンの神経回路での実現という観点である。従来の神経回路モデルの多くが数学的な計算を単純な細胞ネットワークで実現しようと試みられていたのに対し、専用プロセッサでは超複雑論理回路を複雑な機能を集積した細胞によって自動的に構築することを目指している。そのため、専用プロセッサの命令セットには、フリップ・フロップや論理デンドライトが含まれる。これらを使うことで、これまでの神経回路ネットワークでは不可能、あるいは多くの細胞を消費するような回路を非常に簡単に表現できる。この特徴は、新しい連想メモリや情動で制御される学習、外部世界の内部表現の獲得などの課題について、ある種の示唆を与えるだろう。逆に、専用プロセッサでは、連続値の精度が問題となるような数学的なモデルを実現することはできない。これらは浮動小数点型のDSPで実行すべきで、専用プロセッサにはその機能を持たせていない。

専用プロセッサで実現できる細胞モデルと学習規則は非常に多彩である。にもかかわらず、それを構成していく手法はきわめて簡単で理路整然としている。（プログラム法の詳細については、専用プロセッサのプログラム用に開発したNNPDLの技術情報を参考にしてください）

たい。)従来のプログラム(Cやフォートラン)は、データ処理の手順を記述し、ある機能を実現することを目的にコードされる。当然、厳密な論理検証を必要として、誤った論理は機能にとって致命的なバグとなることが予想される。それに対し、専用プロセッサのプログラムが表現しているのは、あくまで情報の流れとその処理方法の概略であり、機能そのものではない。機能(厳密な論理とデータ処理手順)は、学習によって獲得されるべきものである。当然、プログラムが十分でなければ、学習によって正しい機能は獲得できない。つまり、専用プロセッサのプログラムとは学習によって機能を獲得するための構造を記述することである。そして、プログラマは論理の詳細を考えずに、どのような枠組みなら目的とする機能を獲得できるのか、という極めて上位の概念だけを思考するのである。

d. 専用プロセッサの命令

この項では、調査研究で試作した専用プロセッサの技術的なエッセンスを解説する。このプロセッサは従来のCPUとは異なったコンセプトに基き設計されているが、命令を見ればそれがどういうことを意味しているのかが明確になる。

命令体系はシンプルである。16ビット(1ワード)の命令と1—64ワードの変数からなり、命令の一部には変数の数が記述されている。16ビットの命令の最上位4ビットに基本命令があり、続く、4ビットにレジスタやモードなどのパラメータ、下位8ビットに命令の修飾部が位置する。命令と変数は、メイン・メモリの先頭から記憶され、逐次、命令が解釈されて実行されていく。普通、0番地から100ワード程度はプロセッサの初期化コードを書き、256番地から繰り返し演算するコードを書き込む。全ての命令の最後にはstop命令が置かれ、実行はここで停止する。繰り返し実行されるコードの最初(すなわち256番地)からstop命令までを、リスタート・ループと呼ぶ。

loadreg 命令 ロード・レジスタ命令

この命令はチップ内部の設定レジスタ (4.2 を参照) に値をロードするための命令である。1 個のレジスタの個別ロードはもちろん、16 個全てを連続的にロードすることもできる。

2 進表記 (4 ビット分から書き)	修飾部の説明
0000 reg 0001 count	reg: レジスタの番号 count: 連続ロードのレジスタ数

変数はレジスタにロードする値を count の数だけ格納する。

例 (16 進表記) 0012 4050 3020 : レジスタ 0 と 1 に 4050 と 3020 をロードする。

initgrp, initrand, initconn 命令 グループ初期化、乱数初期化、接続初期化

これら命令は、loadreg の派生系でレジスタのロード能力があり、それぞれ、初期化機能をあわせ持つ。

0000 reg init count	init: 1001 initgrp, 0101 initrand, 0011 initconn
---------------------	--

これら命令は記述場所が重要である。initgrp は、グループ定義したい最初の細胞やデンドライトの直前に置く。この命令で、グループの細胞数を観測するカウンタがクリアされる。initrand 命令は通常全てのプロセスの最初にのみ実行する。リスタート・ループの先頭には置いてはいけない (4.5 参照)。initconn 命令は乱数的に接続を制御するオプションに対して有効で、リスタート・ループの先頭に置く。レジスタの設定は本来自由であるが、多くの場合、次に示す例のような形でのみ使用する。

initgrp 例 (16 進表記) 0991 0008 : グループの最大発火細胞数を 8 個としてグループを初期化

initrand 例 (16 進表記) 0C52 0054 1000 : 乱数を 54 でシードして初期化、ネットワークを 4096 細胞までに設定

initconn 例 (16 進表記) 0A32 00C0 0040 : 論理演算の変数域をセットして、接続を初期化

setwta 命令 ウェート・テーブル・アドレス (wta) 設定

この命令は、ウェート・テーブル・アドレスに 20 ビットのポインタ値をセットする

0001 adrs_hi 0000 0001	adrs_hi: 20 ビットのポインタ値の最上位の 4 ビット
------------------------	----------------------------------

変数は 20 ビットのポインタ値の下位 16 ビットである。ポインタ値はメイン・メモリの物理アドレスに等価である。

例 (16 進表記) 1201 0000 : wta を 20000 に設定

table 命令 アクセス・テーブル書き込み

この命令は、アクセス・テーブルを書き込むのに用いる。命令の下位 8 ビットにテーブルの大きさをワード単位で記述し、変数はテーブルの値 (ポインタのオフセット値) のリストである。

0010 0000 count-8bit	count-8bit: テーブルの大きさ (要素数)
----------------------	----------------------------

例 (16 進表記) 2004 0000 0005 000A 000F : 4 つの 5 つ飛びのポインタ・オフセットをアクセス・テーブルに書き込む

注意: 普通、変数の最初の要素は 0 であり、要素は 2 の補数表記で正負の記述ができる。

tablerd 命令 アクセス・テーブル読み出し

この命令はアクセス・テーブルを読み出すのに用いる。命令の下位 8 ビットにテーブルの大きさをワード単位で記述し、変数はダミーで、読み出すテーブルのワード数だけ用意する。

0010 1000 count-8bit	count-8bit: テーブルの大きさ (要素数)
----------------------	----------------------------

例 (16 進表記) 2804 0000 0000 0000 0000 : アクセス・テーブルから 4 つの要素を読み出す。実行後、変数部 (4 つの 0) は書き換わる。

注意: この命令は、アクセス・テーブルのオンチップメモリの機能検査のみに用いる。通常のユーザー・プログラムでは使用する必要はない。

cell/dend 系命令 細胞構築命令

この系の命令が本プロセッサの主演算命令である。各ビットの設定で多彩なバリエーションの細胞を構築することができる。各ビットの機能修飾内容を下記に示す。

bit	15-12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
sec	base	rsv	connection mode			input number		access mode		cell/dend			
on	0100	0	pla	inc	wt	chl	ch0	tbl	rand	this	ext	odd	even

base 命令の基本コード 0100

rsv 予約ビット 0

connection mode 接続のモードを指定するビット

pla:可塑性あり inc:ウェイト・テーブルを自動インクリメント wt:ウェイト・テーブルを使用

input number 入力ポインタの数 chl,ch2 00:1個 01:2個 10:3個 11:4個

access mode アクセス・モードのオプション

tbl:アクセス・テーブルのオフセットをポインタに加算してアクセス

rand:ポインタの最下位1ビットを乱数で発生させる。initconn 命令で乱数初期化

cell・dend 入力、出力が細胞（インパルス）かデンドライト（連続値）かに指定する。このビットはバッファ・メモリの物理アドレスの最上位（ビット16）に対応する。従って、細胞に指定した場合は、自動的にネットワークに接続され並列接続したチップ間で共有され、デンドライト（ビットを1にする）の場合は各チップで独立になる。

this:出力指定、この要素の意味で This という

ext: 外部要素の入力指定、学習ルールで用いる。デンドライトが親細胞を指示することが多い

odd: 奇数 / even: 偶数番めの接続の入力指定。通常は入力が細胞なら両方0、デンドライトなら両方1であるが、2個のポインタを入力し、両者で異なる設定にすることもできる。

変数は、この要素のポインタ、外部要素のポインタ、入力要素のポインタの順である。複数の入力ポインタを持つ場合は、さらに第2、第3、第4の入力要素のポインタを記述する。

例 (16進表記) 4700 1000 0000 0000 単純な可塑細胞（インパルス入力、インパルス出力）で、この細胞は1000番地に出だし、外部細胞は使わない（0000が指定されているが、何でもよい）、0000番地の細胞から入力を受け取る。

例 (16進表記) 4100 1000 0000 0000 前例と似ているが、可塑性はない、ウェイトテーブルを使用

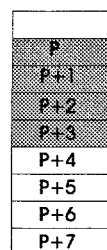
例 (16進表記) 4000 1000 0000 0000 この場合、ウェイトはレジスタ0、1（固定ウェイトレジスタ）が使用され、ウェイトテーブルは使用されない。

例 (16進表記) 4780 1000 0000 0000 0200 これは、2つの入力ポインタを持つ例、4番めのパラメータが、2つめのポインタ。

例 (16進表記) 4720 1000 0000 0000 テーブル・アクセス・モードを指定

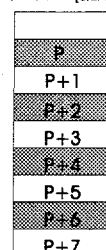
注意1: アクセス・モードは、連続的に計算する接続のアドレスを計算する方法を指示するモードである。右図の示すように、同じ4接続の計算に用いられる入力バッファ上の実アドレスは各モードでバリエーションが得られる。また、テーブル・アクセスとランダム・アクセスは併用が可能である。その場合、テーブルは1ビット左シフトされるので、テーブルデータ作成には注意が必要である。

リニア・アクセス



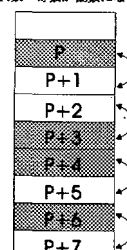
テーブル・アクセス

テーブル={0,2,4,6}



ランダム・アクセス

偶数・奇数が乱数になる



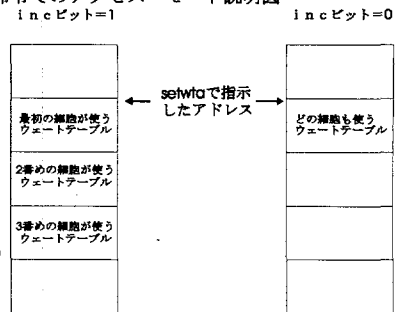
* Pはポインタの指示するアドレス

注意 2: 接続モードは、接続の可塑性 (pla ビット)

やウェイト・テーブル使用/不使用 (wt ビット)、

ウェイト・テーブル・アドレスの自動インクリメント (inc ビット) を決める。wt ビットが 0 の時はレジスタの固定ウェイトが使用される。wt ビットが 1 の時は、メインメモリに確保したウェイト・テーブルが使用される。ウェイト・テーブルの実アドレスは setwta 命令で指示するが、cell 系命令を実行後に、inc ビットが 1 だと、右図のように、命令の実行の度にアドレスを自動インクリメントする。可塑性の接続では、一般的に、inc ビットを 1 にする。

cell 命令でのアクセス・モード説明図



cell 命令の inc ビットの効果の説明図

logic 系命令 少数入力論理演算

この命令は、単純な 1 入力論理 (buf や inv)、2 変数の任意論理 (and や or)、フリップフロップ (dff や rsff) を最小の時間で実現する。

1000 logic mode cell/dend logic: 論理 mode: 入力数, F F cell/dend: 変数が dend なら 1

組み合わせで非常に多様な論理演算が可能であるが、次に示す例を普通は使用する。

reset	804X	常に 0	output
set	8F4X	常に 1	output
buf	8A8X	非反転	input output
inv	858X	反転	input output
nand	87CX	NAND	in1 in2 output
and	88CX	AND	in1 in2 output
or	8ECX	OR	in1 in2 output
nor	81CX	NOR	in1 in2 output
xor	89CX	XOR	in1 in2 output
rsff	84DX	クロックなし RSFF	set reset output
srff	82DX	クロックなし SRFF	reset set output
dff	8AEX	クロック付き DFF	d-in ck output
rsdff	84FX	クロック付き RSFF	reset set ck output
and3	88CX	AND3	in1 in2 in3 output

表の X は cell/dend で変化する。ビット 3 から変数の cell/dend で順に決定する。

例 1 (16 進表記) 8A84 0000 0000 非反転で cell (00000 番地) から dend (10000 番地) へ形を変換する

例 2 (16 進表記) 89C0 0000 0001 0002 XOR 論理を実行、0 番地と 1 番地が入力、2 番地が出力

注意: dend 出力の場合は、設定レジスタ 10、11 (SL, SH) でレベルが決まる。また、dend 入力の場合は、スパイクの 1/0 で論理が演算される (SH レジスタ上位バイトの設定も参照せよ)。

dendreg 命令 dend 型をレジスタにロード

dend 型のフォーマット (8 ビットの指数付き整数) は、レジスタの一部で使用している。いくつかのレジスタに dend 型のアクティビティをロードできる。この命令を使うとよりダイナミックなネットワークが構築できる。

1100 reg 0100 1000 (Cr48 hex) reg: レジスタ番号

例 (16 進表記) C348 0020 スレシヨルド・レベルをデンドライトの 20 番地 (10020 番地) の値にする。

注意: この命令で利用できるレジスタは 0, 1, 3, 8, 9, A, B (レジスタ表の濃い網掛けのレジスタ) のみで、下位 8 ビットにロードされる。

errcell/cntcell 命令 エラー細胞、制御細胞のデータをロード

学習の制御に用いる、err 信号と cnt 信号を、細胞の活動からロードする。

```
1101 0000 0100 0000 (D040 hex) errcell
1101 0001 0100 0000 (D140 hex) cntcell
```

例 (16 進表記) D040 1000 エラー信号を 1000 番地の細胞の活動からロードする。

注意: データがロードされるのはこの命令の実行時のその細胞の活動である。時々刻々変化するエラー信号に対応させる時は、その度にこの命令を実行するようにコードする必要がある。

clrwrk/break/stop プロセス制御命令系

これら命令はプロセス制御のために用いられる。clrwrk は細胞やデンドライトが使用する作業メモリのポインタをクリアし、break はプロセスの中断、stop は終了を意味する。詳細は 3.5 を参照せよ。

```
1111 0001 0100 0000 (F140 hex) clrwrk
1111 1110 0100 0000 (FE40 hex) break
1111 1111 0100 0000 (FF40 hex) stop
```

注意: 本来 1 ワードで済む命令であるが、命令処理系の都合でダミーの変数が 1 つ必要である。例えば、clrwrk の場合、F140 0000 のようにダミーの 0000 を 1 ワードを付加する。

e. 調査研究概要

脳型コンピュータの実現のためには、神経細胞を模擬したニューラル・ネットの工学的な研究が重要である。特に、実際の脳に近い機能を実現した細胞モデルに基づく大規模なシミュレーションの価値は高い。この調査研究の目的は、複雑な構造、学習性（可塑性）を持つ神経細胞をシリコン・チップで仮想的に実現し、それらを大規模（1000個— 10000個）接続するための技術的な可能性を調査するものである。この調査目的のため、前年度より、LSI（大規模集積回路）技術を用いた専用のデジタル・プロセッサを試作し、今年度はそれらを16個並列に接続した評価システムを試作した。評価システムの処理能力は通常のコンピュータでいうIPS（1秒で実行できる命令数）に換算すると、3.2ギガIPSに相当することが予想される。調査の結果、実際の使用条件下でも、その約90%程度の性能で運用できることが分かった。つまり、約3ギガIPSであり、スーパーコンピュータに匹敵する性能が容易に実現できることを示している。

f. まとめ

本調査研究の結果、大きく、次の2つのことが明らかになった。

1. 現状のシリコン・ベース半導体技術で大規模な神経回路の仮想的実現が十分可能である。
さらに最新鋭の半導体技術を導入すれば、脳に近いスケールの超大規模シミュレーションも可能であること。その情報処理能力は十分に実用的なレベルに到達できる可能性があることを実証した。
2. 学習による情報処理手順の獲得には、本調査で行った細胞レベルの学習性（可塑性）に基づく方法は重要であるが、未だに不十分である。今後はシステムレベルでの目的達成型の学習

論理を研究する必要がある。このためには、さらなる脳・神経研究とシリコン技術の連携が必須である。

(電子技術総合研究所 市川道教)

参考文献

- 1) 松本元・日本物理学会編“脳・心・コンピュータ”、丸善、(1996)
- 2) Iijima, T., Ichikawa M. and Matsumoto G.: Imaging of dendritic spike propagation in CA1 neurons of hippocampus. 投稿中
- 3) 山本長三郎：海馬の長期増強と長期抑圧、神経進歩、38, 34-45 (1994)
- 4) 重松征史、松本元：電子情報通信学会技術報告、NC94-131, 131-138 (1995)
- 5) 伊藤正男：“ニューロンの生理学”、岩波書店、(1972)

本調査研究の成果発表論文

- (1) 1996. 11 米国神経科学学会 445. 6
Modeling of Artificial Neurons with Complex Dendrite Structures.
Michinori Ichikawa, Hitoshi Yamada, Toshio Iijima and Gen Matsumoto
- (2) 1996. 11 電子情報通信学会誌解説論文 79 巻 1060—1065
脳におけるデータ処理とエレクトロニクス 松本元、市川道教
- (3) 1997. 2 エレクトロニクス誌 (オーム社) 1997 年 3 月号
夢の脳型コンピュータ 市川道教

本調査研究の報道記事

- (1) 平成 8 年 11 月 14 日 産経新聞記事
- (2) 平成 8 年 12 月 28 日 朝日新聞記事
- (3) 平成 8 年 12 月 20 日 サイエンス (Scias : 科学朝日) 記事連載 立花隆 100 億年の旅

(2) 7ビット100万シナプスで完全結合した1000ニューロンシステム

a. はじめに

ニューラルネットワークをVLSIチップで作る目的は、人が持っている柔軟なパターン認識や記憶検索能力を実時間で実現することにある。そのために必要なニューラルネットワークの機能を大まかに分類すれば、以下の3つの機能に集約できよう。

1. 時間・空間フィルタリング
2. 学習
3. 制約処理

時間、空間フィルタリングは、パターン認識のための特徴抽出の役割を担う。学習は、ものとの関係構造を記憶する。制約処理は、記憶された関係を満たす適切な情報を検索する役割を担う。

これらの機能を実現するために必要なニューラルネットワークの規模を図示すれば、図1のようになる。人の脳の規模と比較するために、大脳皮質の規模（右上）と網膜の出力細胞であるretinal ganglion cellsの規模（右中段）を示している。また、現在のワークステーションで表現可能なニューラルネットワークの規模を、楕円の範囲で示している。

上に示した分類と対応させれば、時間・空間フィルタリングを担うニューラルネットワークの規模は、convolution neural networks で示した線上にのる。3種の画像サイズについてエッジ検出、線分検出、運動検出を行うためのニューラルネットワークの規模を示している。これらのニューラルネットワークの特徴は、シナプス数がニューロン数のオーダーに比例することである。すなわち、ニューロン数が支配的な系である。

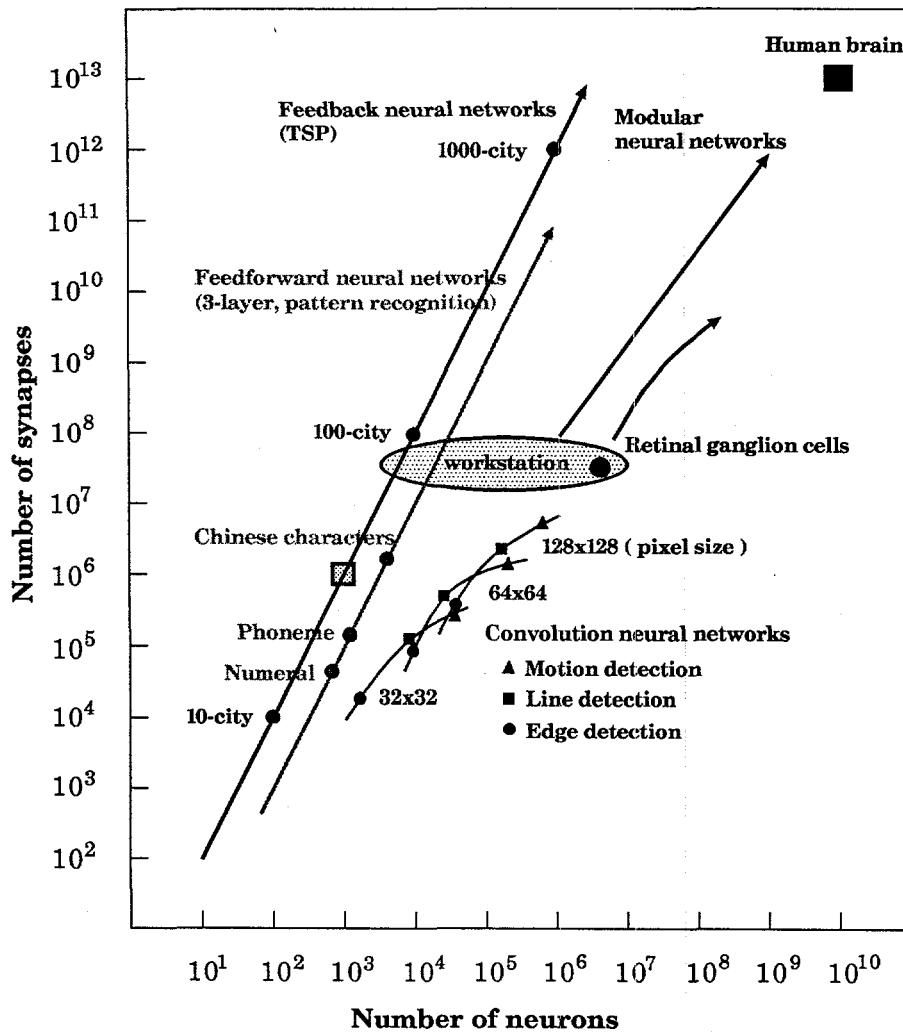
制約処理を担うニューラルネットワークの規模は、feedback neural networksで示した一番左側の線上にのる。典型例として、TSP (Traveling Salesman Problem) の規模を示した。これらのニューラルネットワークでは、シナプス数がニューロン数の2乗に比例するので、シナプス数が支配的な系である。この線上に示した□のマークは、以下に紹介するPDMディジタルニューラルネットワークの規模である。

バックプロパゲーション学習アルゴリズムに代表されるfeedforward neural networksの規模を、3層の場合を例にとって示している。シナプス数はやはりニューロン数の2乗に比例する。ただし、比例係数は1より小さくなる。

人の脳は、convolution neural networks の規模と、feedback neural networksの規模を延長した2本の線の間位置する。すなわち、modular neural networksといえる系である。

先に述べたように、ニューラルネットワークをVLSIチップで作る目的が、実時間処理にあるのであれば、図に示した大規模なニューラルネットワークを実時間で動作させる必要がある。現代のワークステーションは、図に示された規模のニューラルネットワークを大規模なメモリ

Size of typical neural networks.



第2.3.2 (2)-1図 典型的なニューラルネットワークの規模

上に実装することができるが、実時間処理には到底及ばない。

大規模なニューラルネットワークを実時間で実行させるための回路方式として、我々は実際の神経と同様パルス密度 (PDM: Pulse Density Modulation) で動作するデジタル回路方式を採用した。その理由は、大規模なニューラルネットワークを構築するためには

1. 1000個以上のVLSIチップを接続した完全非同期並列動作
2. ニューロン間の正確なデータ転送
3. ニューロン間の完全結合に伴う配線量

などの問題を解消、又は緩和する必要がある、そのためにはPDMデジタル回路方式が最も適していると考えたからである。

また、対象としたニューラルネットワークはフィードバック型ニューラルネットワークである。これまで開発されたニューラルネットワークのハードウェアは、階層型がほとんどであり、

大規模なフィードバック結合をもつニューラルネットワークシステムの開発事例はない。ニューラルネットワークのダイナミクスを用いた制約処理や階層型ニューラルネットワーク、時間・空間フィルタリングなどを一つのシステムで実現できる汎用ニューラルネットワークシステムとなっている。学習機能はないが、全ての7ビットシナプス結合係数は、ホスト計算機からダウンロードできる。

b. 完全結合型1000ニューロンシステムの動作原理

我々は、7ビットの精度をもつ100万個のシナプスで完全結合した、1000個のニューロンで構成されたニューラルネットワークシステムを開発した。実装したモデルは、フィードバック型のニューラルネットワークであり、次の非線形一次微分方程式に従って動作する。

$$\mu_i \frac{dy_i^*(t)}{dt} = -y_i^*(t) + \sum_{j=1}^N w_{ij} y_j(t) + I_i(t) \quad (1)$$

$$y_i(t) = \varphi[y_i^*(t)] \quad (2)$$

$$\varphi[a] = \begin{cases} a & \text{if } a > 0 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 μ はi番目のニューロンの時定数、 $y_i^*(t)$ は時刻tにおけるi番目のニューロンの内部電位、 w_{ij} はj番目のニューロンからi番目のニューロンへのシナプス結合係数、 $I_i(t)$ は時刻tにおけるi番目のニューロンへの外部入力である。また、 $\varphi[a]$ はアナログしきい関数を表し、各ニューロンの非線形出力関数である。全てのニューロンは、上式で示された微分方程式に従って連続的に動作する。また、全てのニューロンは独立のクロックにより駆動させているので、各ニューロンからの出力パルスは非同期に生成される。

① シナプス回路

式(2)と(3)で表現されているように、ニューロンの内部電位が正の場合、その瞬時内部電位に比例した密度のパルス列が出力され、他のニューロンの入力となる。式(1)の右辺第2項の入力とシナプス結合係数との積は、レートマルチプライヤにより実現した。7ビットのシナプス結合係数のなかのMSBが、興奮性あるいは抑制性のシナプスを選択するために使用される。シナプスへの入力パルス密度は、6ビットのシナプス結合係数に比例したパルス密度に変換される。

② 樹状突起回路

興奮性および抑制性シナプスで密度変換されたパルスは、独立にOR回路で加算される。式(1)の加算は全てパルスのORで実現されている。したがって、複数のシナプス回路から同時に

パルスが来ると正確な加算はできない。しかしながら、各ニューロンからの出力パルスが非同期に生成されることを考慮した理論解析と実験結果から、hyperbolic tangent関数の正の部分に類似した飽和特性をもつ非線形加算特性をもつことが分かっている。通常のニューラルネットワークでは、線形加算した結果に対してシグモイド関数などの非線形出力関数を作用させるのに対して、この回路では非線形加算を行った結果に対してアナログしきい関数を作用させることになる。

③細胞体回路

式(1)で表現された微分方程式は、実際には以下の積分形で解いている。

$$y_i^*(t) = \int_0^t \left\{ -y_i^*(\tau) + \sum_{j=1}^N w_{ij} y_j(\tau) + I_i(\tau) \right\} \frac{d\tau}{\mu_i} + y_i^*(0), \quad (4)$$

$y_i^*(0)$ は初期値を表す。積分は12ビットのアップ・ダウンカウンタで実現している。興奮性シナプス回路からのパルスをアップ入力へ、抑制性シナプスからのパルスはダウン側へ入力する。被積分項の中の負帰還は、内部電位の絶対値に比例したパルス列をレートマルチプライヤによって生成し、内部電位が正の場合はダウン側へ、負の場合はアップ側へ入力することで実現している。また、この負帰還回路に6ビットのレートマルチプライヤを挿入し、64レベルの時定数が設定できるようになっている。

c. 1000ニューロンシステムの構成

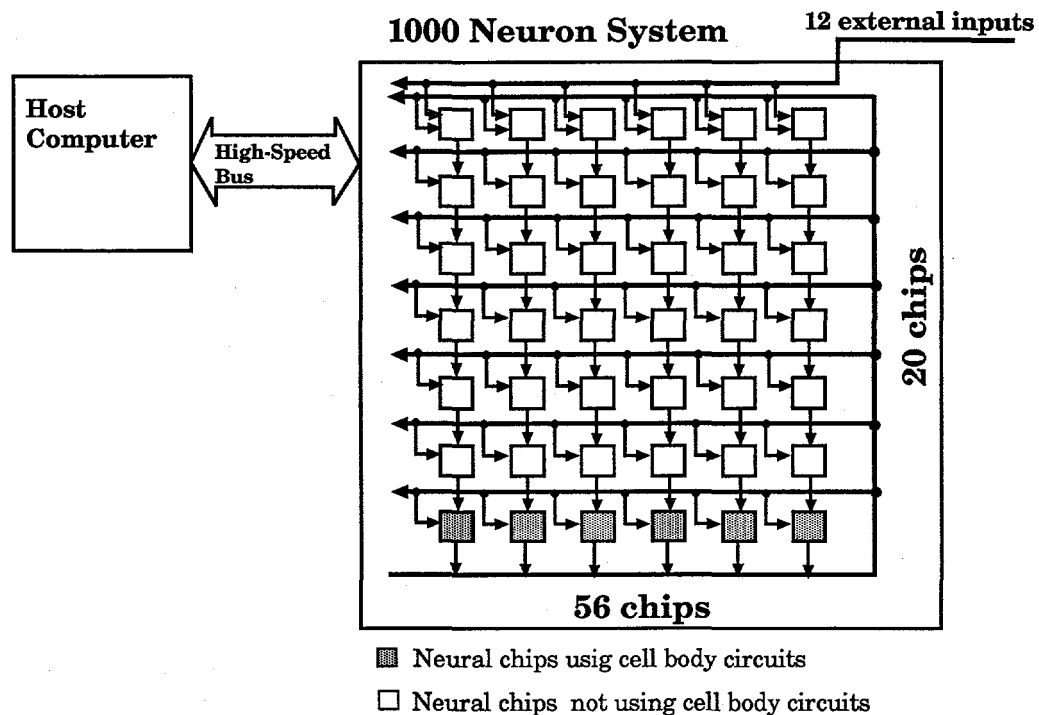
第2.3.2(2)-2図に1000ニューロンシステムの構成図を示した。システム全体は、 20×56 チップの配列で構成されている。全てのシナプス結合係数、細胞体回路のアップ・ダウンカウンタ値、制御レジスタの内容は、ホスト計算機から読み書き可能になっている。

VLSIチップは250,000ゲートの $0.7 \mu\text{mCMOS}$ ゲートアレイを用いて構成した。一つのチップ内に18個の細胞体回路と各細胞体回路につき51個のシナプス回路（全部で918個のシナプス回路）が搭載されている。全ゲートの85%を使用しており、極めて高いゲート使用率を達成できている。

各細胞体回路のシナプス数を拡張するために、第2.3.2(2)-2図に示したように、最下行のチップは細胞体回路とシナプス回路を用い、その他のチップはシナプス回路のみを用いて完全結合型のシステムを構成している。また、一つのボードに20個のチップを搭載し、56枚のボードを結合してシステムを構成している。

システムの仕様を表に示した。実ニューロン数は1,008個であり、各ニューロン当たり1,020個のシナプスを持っている。ニューロン間の結合に使用される1,008個のシナプス以外の12個のシナプスは、外部入力用のシナプスとして使用可能となっている。最大出力周波数は、

2種類選択可能である。5MHzのものはシナプス結合係数が1以下の場合に、10MHzのものは2以下の場合に使用する。シナプス結合係数を表現しているレートマルチプライヤそのものは、1以下の結合係数しか表現できない。出力周波数を倍にすることで2以下の結合係数を実現するようになっている。



第2.3.2 (2)-2図 1000ニューロンシステムの構成図

第2.3.2 (2)-1表 ニューロンシステムの仕様項目仕様

項目	仕様
ニューロン数	1,008
ニューロン当たりのシナプス数	1,020
全シナプス数	1,028,160
外部入力数	12
内部電位の精度	符合を含め12ビット
出力の精度	正値11ビット
シナプス結合係数の精度	符合を含め7ビット
動作クロック周波数	20MHz
最大出力周波数	10MHz 又は 5 MHz 選択
時定数	細胞体毎に6ビット可変
全チップ数	1,120
動作電圧	3.3V

d. まとめ

7ビットの精度を持つ100万個のシナプスで完全結合した1000ニューロンシステムを、PDMデジタル回路方式で構成した。現在システム評価を行っているが、ニューラルネットワークのベンチマークタスクの一つであるWinner-take-all回路を用いて最近のワークステーションと比較した結果、10,000倍高速であることが実証できている。

図1に示したように、人の脳の規模をハードウェアで実現するまでには、まだまだ距離がある。脳内の計算アルゴリズムもまだまだ不明である。地に足をつけた息の長い研究が必要である。このような研究が行える環境整備が益々必要である。

本研究の一部はNEDOによる提案公募型重点分野研究開発による援助を受けた。また、システム開発に当たって、日立マイコン株式会社の協力を受けた。感謝の意を表する。

(筑波大学 平 井 有 三)

参考文献

- [1] Hirai, Y.: *VLSI Neural Network Systems*. Gordon and Breach Science Publishers: Reading, Birkshire 1992
- [2] Hirai, Y. and Yasunaga M.: *A PDM digital neural network system with 1,000 neurons fully interconnected via 1,000,000 6-bit synapses*. Proceedings of ICONIP'96 Hong Kong, pp.1251-1256, 1996

2.3.3 情報工学における脳型コンピュータの位置づけとその役割

(1) 脳型コンピュータに何を期待するか

デジタル式電子式コンピュータがこの世に現れて、早や50年が経とうとしている。デジタル式電子式コンピュータ、すなわち我々がいま、毎日使っているコンピュータの成功の最大のポイントは、「コンピュータを現実の世界から切り離し、記号を介して入出力することによって、論理的手続きを指定された通りに誤りなく実行する」ことにあった。

論理的手続きを指定された通りに誤りなく実行すること、またこれをくり返し誤りなく実行することは、我々人間にとって大変苦手なことであり、ここに人間を補助する道具として確固たる地位を築いていたわけである。ストアドプログラム方式により、汎用性がこの地位を更に確実にしたことはいうまでもない。

デジタル式電子式コンピュータの利点は同時に欠点でもある。「コンピュータを現実の世界において」使おうとすると、実際にはほとんど役に立たない。

これは、現実世界の事象の記号化ができないことによる。この部分を外部から指定する、すなわち現実世界の事象を記号化するためのアルゴリズムを人間があたえることは、現実世界の可能な事象を前もって全て数え上げておくことができないことにより、不可能である（問題領域を限定することによる部分的解決は可能だが、その適応範囲は必ずしも広くはない）

また、現実世界の全ての事象は並列的、かつ非同期的に変化しており、これに対する対応も現状では不可能である。

また、並列性については内部での処理に関しても同様である。そもそも論理的な手続きは、記号列の変換の意識による確認の連鎖であり、逐次的性質が強く、並列処理になじまない面がある。

脳は、現実世界におかれた個体をより有利な方向に導くために発生し、進化してきた装置である。従って、現実世界を把握するためのセンサ及び現実世界への行為を行うためのモーター或いはアクチュエータを伴い、常に現実世界でのみ機能する。

すなわち、現実世界から切り離した状態では存在し得ない。脳に特徴的な「学習」も、まさに現実世界での学習である。

脳型コンピュータに対する情報工学からの期待はここにある。すなわち「知能」に対する2つの重要なアプローチのうちの一つを担うことであり、これまでのコンピュータを相補的に利用したい。以下に特徴的な例を3つあげる。

(a) マンマシンインタフェース

人間と機械の対話は、対話の記号化とその確認の過程である。音声による対話から、マル

チメディア、マルチモーダル対話へと進み、阿吽の呼吸を実現できる。また、緊急時、異常時などの対話も自然かつ有効に行える。また、ゲームのインタフェースとして、また、三次元映像との組み合わせも期待される。

(b) フィジカルエージェント

物理的に存在するエージェント、すなわちロボットである。この分野が行き詰まっている最大の原因はアプローチの誤りであろう。既に研究者がアプローチの修正を行っているが、これをより強く推し進め、脳型コンピュータをベースとして考えていくのも面白い。お掃除ロボット、ペットロボットなどが考えられ、これらが相互に対話するようになるかも知れない。

(c) ソフトウェアエージェント/ネットワークエージェント

インターネットの普及により、ソフトウェアはネットワーク上を動き回る目に見えないエージェントとして存在するようになった。もともとソフトウェアは、これまでのコンピュータ用に作られたものであるから、わざわざこれに脳型コンピュータを導入する必要はないかも知れない。しかしながら一方では、セキュリティの問題や実時間性の要求、更にはソフトウェアエージェント間の協調活動の必要性などが発生しており、何らかの形で「現実世界とのフィードバック系」をもったソフトエージェントが必要となる可能性がある。

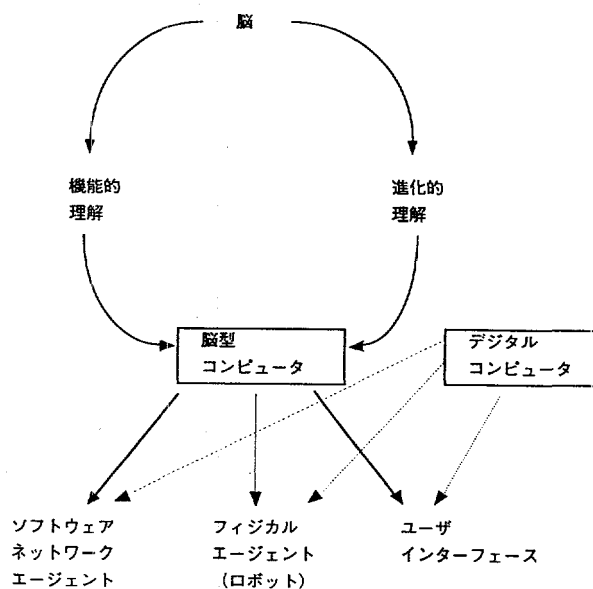
脳型コンピュータに対する情報工学からのアプローチとして、著者は以下の二つを考えている。

第一は、脳の機能的理解とそのモデルの構築である。これまでにいくつものモデルが脳の断片的側面に対して作られてきたが、果たしてそれらを組み合わせることによって、脳の全体がモデル化できるのかという大きな疑問がある。そろそろ全体を考えた上での個別モデルの構築へと移る時期である。

第二は、脳の進化的理解とそのモデルの構築である。たとえば、爬虫類の脳から哺乳類の脳への進化がどのように進んだか、或いは猿から人へと脳がどのように進化したかを理解し、そのモデルを作ることである。

これらのアプローチは、極めて複雑なシステムに共通な機能の局在と統合の問題、階層性と階層間統合の問題に対して、相補的に効果を現すことが期待できる。また、これらのアプローチの遂行には、コンピュータシミュレーションによる合成による解析が重要であろう。

(慶應義塾大学 所 真理雄)



第2.3.(1)-1図

(2) 情報工学関連分野からみた脳型コンピューター

a. 関連分野との関係

脳型コンピュータの位置づけを議論するにあたり、まず、これまでの研究分野を概観する。

人工知能 (Artificial Intelligence)

コンピュータを人間に対比させ、問題解決などに人間の代わりをするようなコンピュータの開発をめざしている。もっとも、初期(1960年代頃)と異なり、手法や対象分野は飛躍的に拡大している。しかしながら、その根底にあるのは推論(Reasoning)であり、ドメイン・インディペンデントな問題解決アルゴリズムが研究されている。推論を行わせるための表現(例えば、ルール)を陽に与えれば、人工知能システムは宣言的なプログラム(Lisp、Prolog、プロダクションシステム記述言語など)により作成することができる。1980年代の人工知能研究ブームは、エキスパートシステムに代表されるように、知識獲得および知識表現の研究およびその実現方法の研究であったといえよう。

脳(Brain)

脳の研究は、医学生理学的な観点からの研究と認知科学的な観点からの研究に大別されよう。医学生理学的な研究対象は人間の脳そのものであり、その解明は脳の神秘を解くと同時に、その治療への貢献も期待されている。一方、認知科学的な研究では、視覚、聴覚から思考(心の神秘)の解明のために脳をモデル化して扱っている。

コンピュータ(Computer)

コンピュータの歴史については専門書⁽¹⁾にゆずるが、ノイマン(Von Neumann)型に象徴されるように、現存するコンピュータはプログラム蓄積型であるがゆえに、(ある意味では)すべてノイマン型コンピュータである。

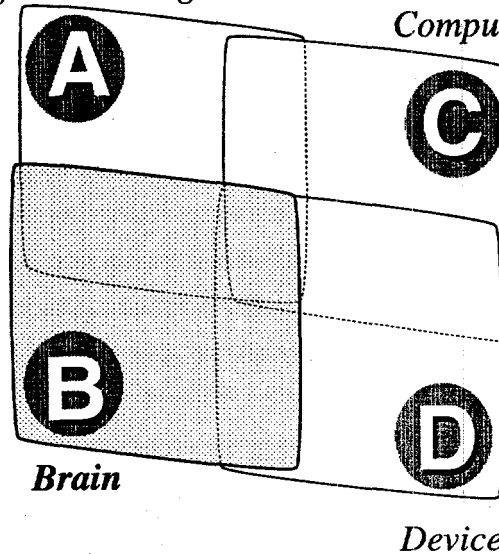
デバイス(Device)

真空管、トランジスタ、集積回路(IC)のように進歩を続けており、基本素子であるトランジスタもバイポーラからMOS(CMOS)、そして微細化されたMOSという方向に進んでいる。片方では、量子化素子も研究が進められている。

これら4つの研究分野を図示したのが第2.3.3(2)-1図である。4つの研究分野はA(人工知能、Artificial Intelligence)、B(脳、Brain)、C(コンピュータ、Computer)、D(デバイス、Device)と略記されている。情報工学はコンピュータCを中心とする工学であり、ノイマン型コンピュータ上のアルゴリズムあるいはプログラムの開発や研究を核心としてもつ。人工知能Aは、問題に依存したアルゴリズムという枠を越え、問題に依存しないドメイン・インディペンデントな問題解決アルゴリズムを対象とする。すなわち、問題が与えられたときにその解決に最良な解法を与えようとするのが、通常アルゴリズムであるのに対し、人工知能では、問題の如何を問わない普遍的な問題解決のためのアルゴリズムを研究してきている。Aア

Artificial Intelligence

Computer



第2.3.3(2)-1図 関連研究分野

ルゴリズムあるいはA* アルゴリズムはその原点にあり、(仮想的かつ暗示的に与えた) コスト関数の最適化を求めることで問題解決を図るという手法を研究対象としている。このように、人工知能の研究を情報工学的に眺めた場合、第2.3.3 (2)-1図の上半分 (AとC) が相当する。

ニューラルネットは、ニューロン、シナプスという脳のモデルにヒントを置いてはいるが、ネットワークとしてモデル化されてから以降はネットワークモデルとしての議論に観点を移している。1950-60年代のニューラルネット研究は主に数学モデルの研究であったが、1980年代では(むろん数学モデルの研究も続行されているが) 諸方面への応用で脚光を浴びた。人工知能の応用では、知識獲得および知識表現というボトルネックが常につきまとう。一方、ニューラルネットでは、学習により自然な知識獲得が行われ、かつ、知識表現を陽に行わないままでも処理が可能である。さらに、ニューロンは機能的にはプリミティブゆえ簡単な数学モデルとして表現され、デバイスとの対応も良い。すなわち、ニューロン素子(デバイス) という融合はごく自然である⁽²⁾⁽³⁾。これまでの脳研究を、ニューロンを中心に眺めた場合、第2.3.3(2)-1図の下半分 (CとD) が相当する。

情報工学という観点から脳研究を眺めた場合、第2.3.3 (2)-1図の下半分にある脳研究はやや見えにくい位置にある。上半分 (AとB) と下半分 (CとD) を結びつけるのは、脳研究の場合、人工知能 (A) と脳 (B) という左半分にあり、その橋渡しは認知科学 (Cognitive Science) である。右半分のコンピュータ (C) とデバイス (D) は、コンピュータ誕生以来、常に密接に関連している。左半分の (A) と (B) が結びつければ、第2.3.3(2)-1図のA、B、C、Dがすべて融合することになるが、その主導権を握るのも脳研究にあるといえよう。脳型コンピュータの意味するところをブレインウェア (Brainware)⁽⁴⁾ という用語で表現したとき、ブレインウェアという概念は、第2.3.3 (2)-1図すなわちA、B、C、Dの融合として

定義することができる。脳研究をあくまでも中心としながらも、認知科学、人工知能という研究分野も包含することで、従来のニューラルネットの研究から、新しい脳型コンピュータへの道が展開されよう。

b. 処理対象と機能

脳型コンピュータへの入力となるデータは、マルチメディアデータすなわち画像、音声、テキスト（それらの単独および融合）である。特徴は、リアルタイム処理をめざすところにある。機能としては、従来の「認識」のみならず「理解」という範疇まで拡大したものを考えなければならない。この機能を考えるとき、「理解するとはどういうことか」ということを明確にしなければならない。

画像、音声、テキスト（およびその融合）を対象とするとき、共通の定義は簡単ではない。「認識」の場合は、類（カテゴリ）に基づく入力の類別、と定義しても、ほぼどのメディアにも共通する。「理解」の場合、入力集合を形成するもとになる構造が、陽であり陰であれ、存在するとするのが妥当であるから、「構造の認識」を「理解」と定義するのが、一つの考え方であろう。むろん、人間のもつ理解能力とはかけはなれている。ここでは、機械に「理解」という仕組みを与えるための定義を述べるにすぎない。プログラム理論での意味の定義の1つとして操作的意味論（Operational Semantics）があるが、そこでは意味をマシンの動きとしてとらえている。マシンは構造を規定するものであり、「構造の認識」は「意味の認識」の1つとして考えてよいであろう。

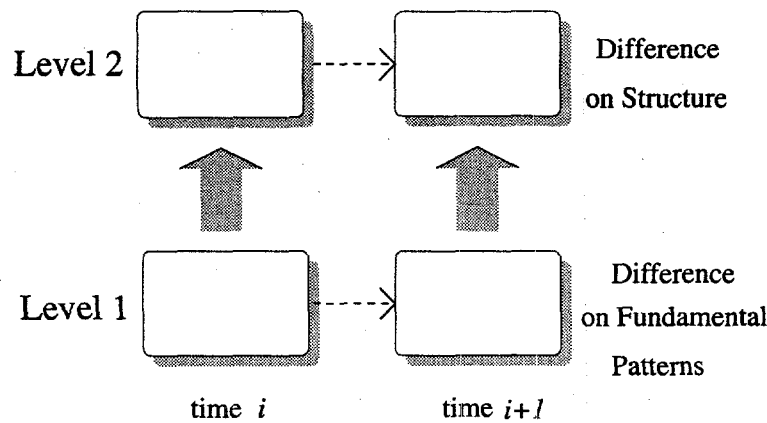
構造は空間と時間の両方に存在する第2.3.3(2)-2図。データのうち、音声、テキストは時間あるいは順序としての取り扱いがすでに発達している。それは空間から対象すべきデータ列の抽出が比較的容易であるため、そのあとの処理は時間（あるいは順序）上での構造の処理に絞られるからである。

一方、画像データについては、空間、時間ともに研究が始められたという段階にある。脳型コンピュータの適用範囲としては、まず、画像データを対象とするのは実りの期待できる分野と考えられよう。人間は空間と時間の両方を同時に処理しているが、脳型コンピュータとしては、当面、別々に処理せざるを得ないであろう。とりわけ、脳型コンピュータに期待されるリアルタイム処理は時間軸上でのデータ処理（動画の処理）が期待されよう。なお、画像データとは、一般的な画像から記号に至るまで広い範囲のデータを意味する。

脳型コンピュータの特長は、プログラミングを学習で行うところにある。通常のコンピュータにおける、問題の分析、アルゴリズムの考案、プログラム作成、という3段階を、脳型コンピュータでは、「例示による学習」で行わせようするものである。従って、両者の応用範囲は自ずから異なると考えられる。

c. 脳型コンピュータのめざすところ

脳型コンピュータは、学習によりプログラミングと同等のものを獲得させようとしている。



第2.3.3(2)-2図 構造（空間および時間）

その応用範囲としては、通常のコンピュータの不得手とする領域である。すなわち、アルゴリズムの考案の困難な領域である。アルゴリズムの考案が困難な場合にも2通りの場合が存在する。

イ) 問題の分析自体が困難な場合

問題の分析自体が困難であると、通常のコンピュータ処理は不向きである。その意味で、脳型コンピュータに期待するところもあるが、脳型コンピュータとしても得意でないことも多い。世界中の人間の中には卓越した人が必ず存在するから、やがて、問題を分析した結果のモデルが提示されるであろう。モデルが提示されたあとは、次のロ) の場合になる。

脳型コンピュータでは、問題の分析自体はやらずに、いきなり「例示による学習」でプログラミングに相当することをさせようとしている。確かに、これまでのニューラルネットの研究ではそれを売り物とするケースもあったが、それは問題の全体ではなく、一部であることが多い。つまり、ある限られた問題に対しては可能であるというように考えるべきであろう。むしろ、限られた問題であっても、非常に効果的であれば、脳型コンピュータをアピールすることができる。

ロ) 問題の分析は可能であるが、アルゴリズムの考案が困難な場合

脳型コンピュータの得意な領域はこの場合であり、通常のコンピュータの不得手なところを補うことが期待される。

この場合も、細かくはさらに2つの場合に分けられる。まず、初めは、アルゴリズムそのものの考案が困難な場合である。例えば、巨大システムの問題が分析されたとしよう。しかし、アルゴリズムは分析通りにつくることは困難な場合も多い。部分的な分析にのみ対応するアルゴリズムから全体を記述しようとする、分散したアルゴリズムが多数個による記述ができる。このような記述から、正しく動作するプログラムが作成できれば良いが、多くは期待できない。もちろん、このような分野の研究も進められてはいるが、すぐ、実用になるものは少なく、依然研究段階にある。

もう一つは、アルゴリズムそのものの考案は可能であるが、プログラムの作成は困難な場合である。プログラムの作成は困難という意味は、原理的には動作するプログラムであっても条件を満足しないために、実用プログラムとは看做せないというものをさす。満足すべき条件は空間と時間の両面にあり、空間的な条件は、プロセッサ数とメモリ量、時間的な条件とは、処理規定時間をさす。これは、一見問題解決ができるように見えても、通常のアゴリズムによる問題解決の限界の存在することを意味している。

脳型コンピュータは、このような場合に、威力を発揮することが期待される。通常のアゴラムが演繹的な問題解法であるのに対し、脳型コンピュータは帰納的な問題解法である。めざすところは、「ロボットの頭脳」であり、限られたハードウェア量のもとで、リアルタイムに問題処理を行う。ハードウェア量は限られるから、独自のアーキテクチャを必要とし、その上で人間と同等以上のリアルタイム処理を行わなければならない。このようなシステム開発が成功して初めて、空飛ぶロボット（鉄腕アトムなど）の頭脳にあたる脳型コンピュータが完成するであろう。

（広島大学 阿 江 忠）

参考文献

- 1) 星野力；誰がどうやってコンピュータを創ったか、共立出版(1995)
- 2) 阿江忠：VLSIニューロコンピュータ、共立出版(1991)
- 3) 岩田穆、雨宮好仁（編）：ニューラルネットLSI、電子情報通信学会(1996)
- 4) 脳研究情報処理の先導研究、平成7年度先導研究報告書NEDO-PR-95009(1996)

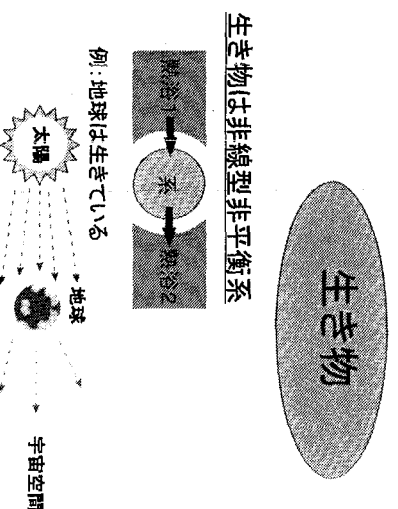
2. 4 第2世代脳型コンピュータ

2. 4. 1 非平衡系としての立場からの情報科学

(1) はじめに

生物は非線形非平衡システムである。それは、生物の存在する地球環境が非線形非平衡システムであり(第2.4.1-1図)、このシステムのもつ自己組織化能によって生物が創り出されてきたからである。近年、物質・エネルギーに対しての開放系(非線形非平衡系)の研究は、流体系、科学反応系などを対象に大変進歩した。例えば、流体系での対流・層流・乱流などの現象は、開放系物理学の見地から良く研究され、新しい自然哲学観を創出しつつある(例えば、グラスノブルフとプリゴジンを参照)。開放系の自然哲学観は、従来物理学が主として対象としてきた平衡系の自然哲学観と本質的な違いがある(第2.4.1-1図; 詳しくは、プリゴジンとスタンジュールを参照)。

生き物は非線形非平衡系であるので、平衡系の科学をもとに人に良かれとして研究開発された技術は基本的に不適合である。このことが、18世紀からの近代(モダンの)科学技術中心の文明が本質的に行き詰まった根元的原因であると考えられる。従って、非線形非平衡系としての自然に対する科学哲学観を確立し、ポストモダンとしての新しいリーダーディングコンセプトを明らかにして、中核思想としてのパラダイムを設定することが、人や地球環境問題を初めとする現代の科学技術文明の輝かしい発展のための緊急の課題である。生き物は、単に物質・エネルギーに対する開放系であるのみならず、情報に対する開放系であることが本質的である。この視点からの研究が、非平衡系としての立場からの情報科学であり、まったく未開拓な分野であると言っても過言ではない(松本元; 「愛は脳を活性化する」岩波科学ライブラリー42, 1996年)。ここで、情報とは物質・エネルギー以外の事柄で、生物に流入・流出し影響を与えるものである。



非線形非平衡系は空間・時間発展し自己組織化(秩序形成)する

例: 生きる努力とは非線形非平衡系を維持すること

非線形非平衡系	平衡系(従来の科学が対象)
非線型 → トータルな視点	線型(重ね合わせが成立) → 要素還元主義・分析手法
時間が不可逆	時間が可逆
小さな揺動が長時間後に大きな影響を生じる可能性	小さな揺動はどんなに時間が経過しても小さな影響しか生じない

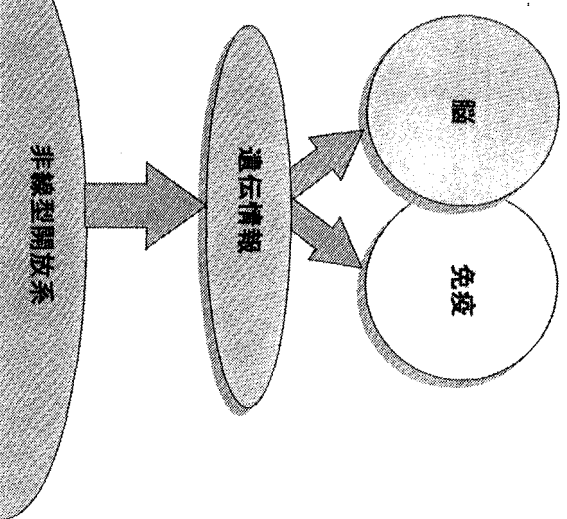
第2.4.1-1図

(2) 生物情報の階層構造性と相同性

生物情報の特徴は、アルゴリズムの自動獲得と階層構造性である。生物が非線形非平衡系であるということから、生物は機能獲得に35億年という時間を要して、人の遺伝情報を獲得し、人はこの遺伝情報が獲得した戦略と可能性に基づき、個体の成長と共に脳や免疫などの情報・機能のアルゴリズムの自動獲得が行える仕組みを与えられている(第2.4.1-2図)。すなわち、生物は、非線形非平衡系という舞台の中で遺伝情報を獲得し、この遺伝情報のアルゴリズムの中で環境適応型の個体構造と機能を発現してゆく。従って、例えば脳の情報システムとしての特徴は、非線形非平衡系としての特徴を包含しているが、非線形非平衡系としての直接の対象は遺伝情報系である。脳の理解は遺伝情報が何を留意してくれたかの戦略(ブレインウェア)とその可能性(ブレインコンピュータ)を知ることから出発すべきであり、生物は進化の過程を経て脳をこのように創ってきている。

遺伝情報もアルゴリズムの自動獲得システムである(第2.4.1-3図)。遺伝子型(Gタイプ)と表現型(Pタイプ)が存在するシステムで相互に影響することで自己増殖オートマトン(フォン・ノイマン)となる。遺伝子型は遺伝情報をDNAの一次元配列として表現し、表現型は機能を担う蛋白質として表現される。すなわち、蛋白質はDNA上の遺伝情報の指令に基づいて合成され、DNAは蛋白質の触媒機能によって合成されるという相互触媒系であるので、自己増殖できるのである(例えば、伏見謙、1997)。DNAが新しい情報のアルゴリズムが獲得するための主戦略は、DNAの偶発的コピーミスという極めて効率の悪いやり方である。これは、生命の起源という、いわば無(機能をもたないもの)から有(ある特定の機能をもつもの)をひとりでに創出する出発点としては、

情報システムの階層構造

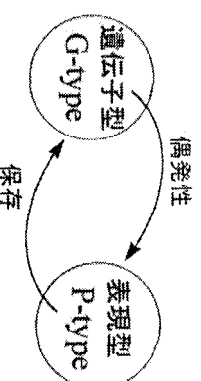


第2.4.1-2図

遺伝情報

遺伝情報: 情報処理の仕方(アルゴリズム)を自動獲得するシステムで階層構造化によって進化

1. 戦略: 偶発的な誤りから進化



2. 表現: DNAの一次元配列

3. 目的: 種の保存(世代間に亘っての環境適合性のアルゴリズム自動獲得システム)

第2.4.1-3図

これより他の戦略はとり得なかった、とも言える。表現型である蛋白質の機能が環境とより適合していれば、この表現型に対応する遺伝子型としてのDNAが保存されるとすると、進化が起きる。すなわち、進化は、表現型の蛋白質が環境適合性という評価によって選択され、それが遺伝子型のDNAに固定されることで起きると、考えられよう。このことは、遺伝情報もアルゴリズムの階層構造化を有し、メモリーベースアーキテクチャ型であって、その数学的構造はまったく脳と相同であることを示している。しかし、進化という手法によるアルゴリズム自動獲得は、アルゴリズム獲得のための戦略が効率が悪い。このため、これを基調として情報工学的応用の試み（GA ; Genetic Algorithms やAL ; Artificial Lifeなど）では、プログラム長が長くなるとこの効率の悪さが顕著化しその障壁をいかに克服するから知性を人間（デザイナー）に強く要求されることになる。

（3）生物情報システムとしての脳

脳は、遺伝情報が35億年をかけて得たアルゴリズムの自動獲得の戦略（ブレインウェア）によって数年から数十年で環境適応型の情報処理システムに成長する。その戦略（ブレインウェア）として、学習性と学習制御性をあげた。学習性は、神経細胞に備えられており、学習制御性は脳の二重構造（大脳の新皮質と古皮質）

として与えられていることは、2.1 序において概説した。ここで付け加えるべき点は、脳が入力情報の価値判定を行う神経回路を学習によって創ってゆくとき、その価値の出発点となるべき初期条件も、欲求という形で遺伝情報が獲得したものとして、生得的に脳に備わっている、ということである（第2.4.1-4図）。遺伝情報は欲求という形での価値の初期基準を獲得したのは、生物の起源が非線形非平衡系である、ということと密接に関係する、と考えられる。すなわち、物質・エネルギーの生体系への流入流出が与えられないと、生物の構造・機能が自己組織化されないでは、あまりにも環境に生命が依存しすぎ、生物の繁殖は極めて限定されよう。このため、生物自身が物質・エネルギーを取り入れ・出すという欲求を遺伝的に獲得することで、より環

ブレインウェア — 遺伝情報から与えられた脳を作り上げる戦略 —

1. アルゴリズムの自動獲得の戦略

— 学習性と学習制御性 —

学習性: 神経細胞の性質として遺伝的に与えられている

学習制御性: 脳の2重構造(大脳の新皮質と古皮質)という構築として遺伝的に与えられている。

2. 価値判定の初期条件も欲求として遺伝的に与えられている。

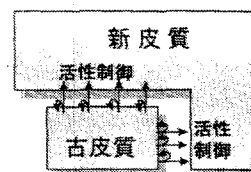
2-1. 遺伝情報がなぜ欲求という価値の初期基準を獲得したか



2-2. 進化によって遺伝情報が獲得したこと

欲求の充足に向けて行動規範を作り、行動する。

欲求の充足方向に向かっているとき脳活性が上がる。*)



2-3. 愛は関係欲求の価値表現

第2.4.1-4図

境適合性を広くゆるやかにし得たのだ、と考えられる。また、物質・エネルギー以外の環境要因（事柄）の非平衡系性についても、関係性を自ら欲しがることで、より環境適合性を広めたとと言える。これらの欲求をそれぞれ生理欲求、関係欲求を命名しよう。

脳は、これらの2つの欲求を充足するように行動することで、脳活性が上がるように脳の二重構造性が備わっている。欲求の充足する方向への行動規模とその具体的な行動経験（出力）が学習効果を生みだし、脳の価値回路が個々に育ってゆくものと考えられる。

（４）むすび

生物情報は、非線形非平衡（開放）系であることから、まったく相同的な構造を持つ遺伝情報、脳・免疫などの階層構造をもつ。さらに遺伝情報も脳もそれぞれ相同のメモリーベースアーキテクチャである。すなわち、生物情報は開放系特有の入れ子構造をもちながら、相互に強く影響し合っているのである。

（電子技術総合研究所 松本 元）

参考文献

- 1) P. グランスドルフ・I. プリゴジン著（松本元・竹山協三訳）
「構造・安定性・ゆらぎ、その熱力学的理論」（みすず書房、1977年）
- 2) I. プリゴジン・I. スタンジェール著（伏見康治・伏見譲・松枝秀明訳）
「混沌からの秩序」（みすず書房、1987年）
- 3) 松本元著「愛は脳を活性化する」
（岩波書店、岩波科学ライブラリー42、1996年）
- 4) 伏見譲、「RNA上の情報をコピーするRNAの創出—生命の起源の実験的研究の進展」
パリティ12, 49—52（1997）

2.4.2 メモリベース・アーキテクチャの第2世代脳型コンピュータ

(1) 脳型コンピュータの世代について

脳の神経モデルとしてのニューラルネットワークをベースにしてつくられるニューロコンピュータは連想メモリをベースにしたコンピュータであると看做することができる⁽¹⁾。従って、メモリベース・アーキテクチャの第1世代はニューラルネットワークをハードウェア化したものとして定義されよう。

通常のコンピュータシステムの場合、第1世代から第4世代までは、コンピュータ構成の基本となるデバイス技術の進展に沿って定義されてきたが、第5世代では、コンピュータのもつ機能に着目した定義となったことは周知のところである。

メモリベース・アーキテクチャは、脳をモデルとするアーキテクチャであるから、脳のモデルがアーキテクチャに反映される。従って、脳に関連する研究から第2段階を模索すればよいであろう。

以下、まず、これまでの脳のアーキテクチャ的なモデルについて概観したのち、第2世代脳型コンピュータとしての候補について述べる。

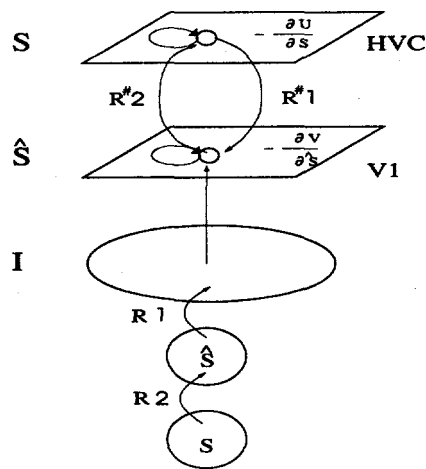
(2) 従来の脳型アーキテクチャ

a. 脳における階層モデル

視覚大脳皮質のモデルとして並列階層モデルがあり、視覚世界の記述レベルの違いに対応して、上下階層がつけられている⁽²⁾。視覚大脳皮質が1層モデルであると視覚世界の大域的構造に関する抽象的記述は無理であり、初期視覚の処理は可能でも、中期視覚や高次視覚の問題の処理は行えない。第2.4.2-1 図は局所モデルを多階層に積み上げることで、大局的モデルを構成している。このことは、階層を積み重ねることが、処理レベルの向上につながるということを意味している。

b. 共鳴理論に基づく階層モデル

ニューラルネットのタイプを、フィードフォワード型、フィードバック型のように分類するとき、この分類に合致しないタイプがあり、システム型という範疇で分類するのが適切である⁽³⁾。システム的なタイプの中にはハイブリッド型に属するものが多いが、ハイブリッド型の場合、基本のニューラルネットワークの単なる組み合わせのものも多い。その中で、第2世代脳型コンピュータを考えるのにもっとも参考になるのは、ART(Adaptive Resonance Theory)に基づくネットワーク、ARTネットワークである。(ART ネットワークは、提唱者の名前からGrossberg Networkとも呼ばれる。)

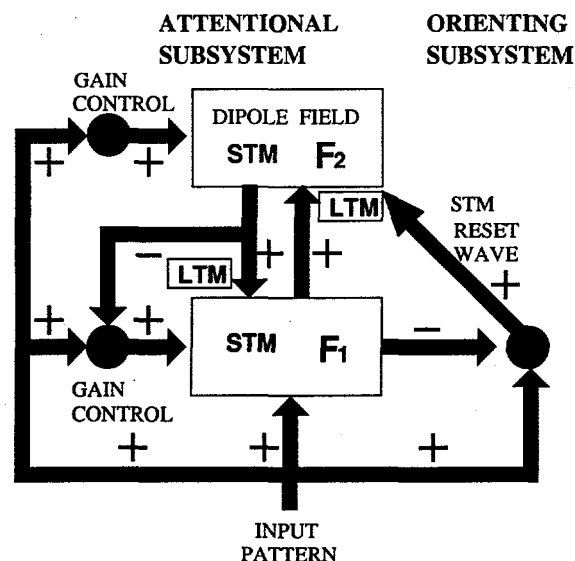


第2.4.2-1 図階層構造の視覚計算モデル

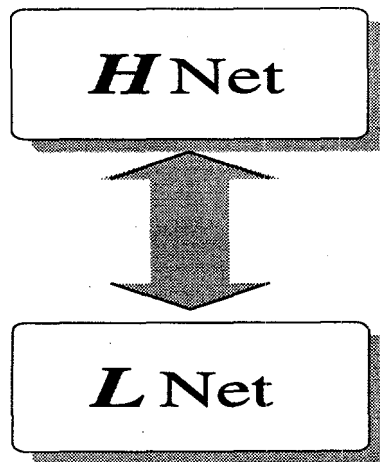
ARTの共鳴理論は、脳における記憶の形成や想起のモデルに「共鳴」という機構がもっとも適しているという提唱であり、具体的な理論とともにアーキテクチャも提唱され、ハードウェア化の試みも多い。アーキテクチャとしては、第2.4.2-2 図のように、短期メモリと長期メモリをベースに階層構造になっている⁽¹⁾。これは、仮説の想起、検定というサイクル動作を繰り返す仕組みを与えている。共鳴がサイクルの終了により得られるような設計になっている。ARTのめざすところは脳の働き一般ということであるが、具体的なアーキテクチャはパターン認識のためのものであり、ハードウェア化もパターン認識を目的につくられている。

c. メタ理論に基づく階層モデル

脳の生理学的モデルに近い階層モデルとは別に、認知科学のメタ理論として、ハーモニー文法による階層モデルがある。出発点はニューロンをベースとしたPDP(Parallel Distributed Processing)コネクショニズムの流れにあり、言語処理を対象としている。



第2.4.2-2 図 ARTネットワーク



第2.4.2-3 ハーモニー文法による階層モデル

ハーモニー理論はサブシンボル仮説に基づく。すなわち、認知の計算過程の基本機構はパターン、すなわち空間的・時間的パターンのアナログ量（数値）処理であるが、その過程を上レベルから眺めるとパターンの相互作用の中から記号的な性質が見えてくる、という仮説である。記号処理はPDPによるパターン処理の近似的記述になる⁽³⁾。

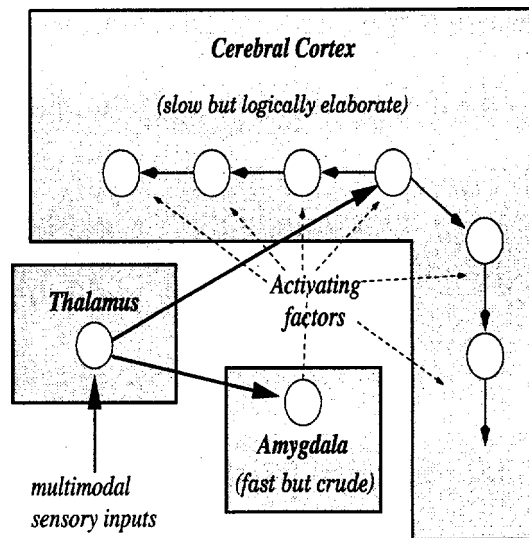
ハーモニー理論はハーモニー文法⁽³⁾からなるが、サブシンボル仮説に基づいて、ハーモニー文法では、PDPのレベルと記号理論のレベルを関係づけるために2つのレベルを仮定する。すなわち、文法判断過程を、低レベルのネットワークLNet(PDPネットワーク)と局所表現を用いる高レベルのネットワークHNetの2つのレベルのネットワークにより処理する（第2.4.2-3 図）。2つのレベルの相互作用としてハーモニーがあるとみなすことができよう。

もっとも、ハーモニー文法のめざすところは、「パターンと記号の問題」という古来からの問題をベースに「知」の研究の発展にある。

（3）第2世代脳型コンピュータ

メモリベース・アーキテクチャの第2世代脳型コンピュータは、階層構造はなく、単層構造である。リカレントネットワークのように、フィードバックがあり状態を保持可能なタイプもメモリとしては単層であるからである。一方、先に述べたように、視覚大脳皮質のモデル自体並列的な階層構造になっている。また、脳の各機能の相互作用に重要な意味を有するモデルでもある。従って、医学生理学的な脳のモデルに忠実な立場からの階層構造をもつメモリベース・アーキテクチャが、第2世代脳型コンピュータとしての候補と考えられる。そのような方向として、第2.4.2-4 図のようなモデルがあげられる⁽⁴⁾。

一方、この対極として、メタ理論のモデルに近い立場からの階層構造をもつメモリベース・アーキテクチャとしては、第2.4.2-5 図のようなモデルを描くことができる。この図は、主と



第2.4.2-4 図 情動情報処理モデル

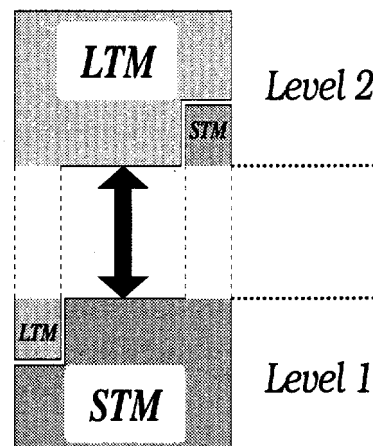
して、上位に長期メモリ (LTM)、下位に短期メモリ (STM)を有した階層構造をなしている⁽⁵⁾。

この2つのアプローチには次のような相異がある。

a. メモリをどのように表現するか？

医学生理学的な脳のモデルでは、大脳の各部分がメモリであるため、機能に応じたメモリを基本単位として、その有機的な集合が脳型コンピュータを形成する。機能を集合させた分散協調型コンピュータモデルが出発点にある。実現段階では、基本機能どおしの相互作用はホストコンピュータにより制御可能であるから、分散システムとしての問題は隠蔽することはできるから、各機能の協調により、第1世代より進んだ脳型コンピュータとなりうることを示唆している。

一方、メタ理論に近い側からのアプローチは、メモリは脳の忠実なモデルからは離れて、一般的な記憶としてとらえられ、長期記憶、短期記憶（場合によっては、中期記憶）のようない



第2.4.2-5 図 階層構造をもつメモリベース・アーキテクチャ

わば抽象的な表現をベースとする。このような扱いは、コンピュータ技術との相性はよく、長期記憶は主記憶装置（メインメモリ）、短期記憶は CPU内のレジスタという対応がつけられよう。

b. 脳型コンピュータの実現範囲は？

医学生理学的な脳のモデルでは、大脳の各部分がどのような機能をもつかがかなり明確になってきている。したがって、これに忠実に実現した脳型コンピュータは、当面、実現した範囲のみを機能としてもつ脳型コンピュータとなる。むろん、そのあと、共通機能をマージさせる方向へ進めば、脳の中での代替機能（XX野が損傷したときXX野が代替）と同様、必要最小限の基本機能単位の集合で、一般的な脳機能の実現は可能となろうが、一般化に進めば進むほど、コントロール部分の実現は複雑になることが予想される。基本機能は脳のもつ特色を有しているから、その特長を生かした実現範囲（例えば、視覚情報処理）が適切でないと思われる。

一方、メタ理論に近い立場は、基本単位そのものが抽象化されているため一般性は高く、応用範囲は広い。しかし、脳のもつ特色は薄くなり、脳型の特長が生かせないきらいがある。

当面、メモリベース・アーキテクチャの第2世代脳型コンピュータはこの対極にある2つの考え方の中間的な位置付けのものになろう。

d) 第2世代脳型コンピュータの実現へ向けて

メモリベース・アーキテクチャの第2世代脳型コンピュータの特徴は（1）（連想メモリのような）機能の集合体であり、機能間の協調作用により、第1世代より高度な脳の働きが実現されている、（2）アーキテクチャとしては階層構造をもち、ハードウェア化（LSI集積化）されている、となろう。

（1）は動作(Behavior)からみた特徴であり、（2）は構成(Architecture)からみた特徴であるが、第2世代脳型コンピュータの設計では、（1）と（2）をともに考えながら、バランスのよい設計をしなければならない。機能の相互作用をあまり複雑なものにすると、その実現は困難になるから、ほどほどにしなければならないし、階層構造も複雑になると同様な問題を生じる。第1世代の連想メモリの機能をベースに、それを下位層にもち、上位層に上位の連想機能をもつ2レベルの階層構造は1つの候補として自然であろう。この場合、重要なのは、上位層は下位層とはレベルが異なり、下位層を統括するものでなければならない。下位層が通常の「連想機能」とすると、上位層は「構造連想機能」に相当し、「理解」を表現可能なアーキテクチャになっている。

もちろん、動作面を優先させたアーキテクチャ、構成的な面を優先させたアーキテクチャ、あるいはその中間ぐらいのスペクトラムがありうるから、具体的な実現はユニークではない。しかし、メモリベース・アーキテクチャの第2世代脳型コンピュータへ向けての挑戦は、脳型コンピュータの研究が新しいステップに入ることを意味しており、今後の発展が期待される。

（広島大学 阿 江 忠）

参考文献

- 1) 阿江忠：神経回路網と機能メモリ、情報処理、Vol. 32、No. 12、pp. 1301-1309(1991)
- 2) ATR編：視聴覚情報科学、オーム社(1994)
- 3) 宮田義郎：情報技術者のための認知科学(II)、電子情報通信学会誌、Vol. 77, No. 12, pp. 1256-1262(1994)
- 4) G. Matsumoto et al.: "Brain-computing", Extended Abstract of Brainware Workshop, FED-148, pp. 31-36, Tsukuba(1996)
- 5) T. Ae et al.: "Two-Level Processing for Real-Time Image Understanding", Real-Time Imaging II, Electrical Imaging' 97, San Jose(1997)

〔附 1〕

高次脳機能計測の現状と展望（対談）

－機能的磁気共鳴描画（fMRI）を中心として－

Peter Bandettini (Medical College of Wisconsin)

and

Hideaki Koizumi (Hitachi Central Research Laboratory)

（1）fMRI 黎明期

Koizumi : あなたの多くの論文は、脳科学、特にfMRI (functional magnetic resonance imaging) の分野で極めてよく知られていますが、あなたのもともとのバックグラウンドはどの分野ですか？

Bandettini : 大学では、物理を学びました。そして、同時に哲学も少し勉強しました。博士過程になってfMRIをやりました。初めは信号処理や物理的なアプローチを進めようと思いましたが、そのうちに生理学に近くなり、さらに神経科学をやりたくなりました。

Koizumi : 最近、ハーバード大学で仕事をしておられましたが、どちらの研究室ですか？

Bandettini : 物理学のローゼン博士のところですよ。マサチューセッツ総合病院 (MGH) の。そして、認知科学のツートル教授とも脳神経科学の研究を進めました。脳神経科学では、物理学的なアプローチと心理学的なアプローチの双方を同時に進めることが極めて大切と思ったからです。

Koizumi : 本質的に重要なことですし、また、素晴らしいことです。

Bandettini : それができたのは幸運だと思います。

Koizumi : 世界で最初に出版されたfMRIの論文は、あなたが筆頭著者でしたね。勿論、小川誠二博士の先駆的な一連の動物実験がありましたが。

Bandettini : たった一週間違いでしたが。速く出版される雑誌に投稿したので結果的にはそうになりました。しかし、ベル研究所のセイジ・オガワ博士はもっと早くから人間についても結果を出していましたし論文投稿日も先でした。それに、NIH (National Institute for Health) のロバート・ターナー博士（現在、ロンドン大学）もハーバードのケン・クワン博士ほかの人々と協力して仕事を進めていました。

Koizumi : このように1992年の6月に期せずして三つの研究グループからfMRIの論文がほぼ同時に出版されましたが、この仕事は完全に三者独立になされたと考えてよいのですか？ ウィスコンシン医科大学、ベル研究所／ミネソタ大学、そしてハーバード大学のマサチューセッツ総合病院についてですが。

Bandettini : 詳しく言えば、デフュージョン／パフュージョン、T1/T2緩和、PET

(positron emission tomography)など、それぞれがヒントとなったアプローチを進めていました。しかし、その中で、互いの考えがさらにヒントとなったり示唆があったりもしました。例えば、セイジ・オガワ博士は私の博士論文の審査委員も務めて下さいました。

Koizumi : すると、三者はコンペティターであると同時に協力者でもあったわけですね。

Bandettini : はい。新しい分野が生まれるときには、手探りですので仲間がどうしても必要です。それに、完全に新しい分野はやるべきことが山ほどあって先が大きく広がっている。それぞれ、自分が自分がという必要がない。いくらでもやることがある。それぞれどんどんやって、どんどん前へ進めばよいのです。皆、ライバルであると同時に、一つの新しい分野を創るためのよい仲間です。

(2) fMRIの最先端

1. トランスディシプリナリティー (超分野性)

Koizumi : fMRIの先駆的な研究を進めてきたのは、先の三者とNIH (米国), そしてフラウム博士のマックスプランク研究所 (ドイツ) などがあると思います。NIHにいたロバート・ターナー博士はロンドン大学へ戻り、現在、脳神経科学の中心にいます。また、同じくデニス・ルビアン博士は、パリ郊外の仏原子力委員会の研究所に戻って言語の研究などを進めています。先の三者は引き続き最先端を走っていますが、あなたはその三者を全て見ている立場にあると思います。fMRIの現状をどのように認識していますか？

Bandettini : 直接関係しているハーバード大学とウィスコンシン医科大学についてですが、両者とも3TのfMRI装置を持ち、装置とその周辺の物理学については臨界点を超えていると思います。そして、その近くに創造的な認知科学者が十分に揃っていて、創造的な物理学者の生み出した成果を活用しています。この両者が揃うことが大変重要で、特にハーバード大学のMGHはその点で世界に類例がないと思います。現在、世界中でたくさんのfMRI装置が動きだしてはいますが。

Koizumi : 確かに、物理学と認知科学の両者が密接に連携していくことが、今後の脳神経科学の発展の鍵でしょうね。今の脳神経科学者がfMRIを自分達だけで本当に使いこなそうとしても、技術の奥が深くてとてもできない。反対に、物理学者が奥の深い技術を創り出しても、それだけでは宝のもちぐされです。

Bandettini : 私は将来そのような方向でやっていきたいと考えています。MGHでは物理学者として認知科学の人々をサポートする仕事がとても多くて、そのためにいつも格闘していたのが実情です。願わくは、将来、両者の橋渡しをして、物理学と認知科学の間のインターフェイスのようになりたい。また、そういう分野を作りたいと思い

ます。

Koizumi : <トランスディシプリナリティー> (超分野性) ということをよく言うのですが、これは、従来のインターディシプリナリティー (学際性) とか、マルチディシプリナリティー (多学性) とは異なったコンセプトだと思っています。脳神経科学は、自然科学系の物理学、化学、数学、生理・生物学と、人文学系の心理学、哲学、言語学、倫理学などとも密接に関係しています。これらは、多学性という概念では、一平面上に多くの分野が乗ってオーバーラップしているだけの状態ですが、それらの多分野を貫いた概念が一つに纏まって、さらに上位の階層に位置すべきと考えています。つまり三次元的な概念ですが、それが脳精神科学という新たな分野を形成して行くのではないのでしょうか。

Bandettini : <トランスディシプリナリティー>、まさに、そのとおりだと思います。完全に同意します。将来は、教育体系もそのようにすべきと思います。将来の神経科学者は、神経に関係した自然科学と人文学の両方を最初から同時に学ぶ必要があります。

Koizumi : 全くそのとうりですね。

Bandettini : 多くの分野を統合・包括させる第一歩として fMRI はよい機会と思います。

Koizumi : 現実に fMRI や光トポグラフィーの前に、最近では心理学者だけでなく言語学者や哲学者も見に来ています。私達の最近の結果について、マサチューセッツ工科大学 (MIT) がセミナーを開いて下さいましたが、自然科学系の脳・認知学科と人文学系の言語・哲学の共催でした。少し前までは考えられなかったことですね。

Bandettini : 確かに高次脳機能の計測装置は現実に多くの分野を結び付けつつありますね。

Koizumi : 包括的な分野を創造・推進するには、多くの異分野がただ寄集まっただけでは駄目だということは、今までの多くの失敗事例が示しています。特に脳精神科学のように極めて包括的な分野は、全体を広く把握したリーダーがどうしても必要です。

Bandettini : そのとおりです。

Koizumi : あなたはそういう人になるのではないのですか？

Bandettini : 今はまだとても。それは私の最終目標であって、それにむかって全力でやりたいと思っています。まずは、fMRI の分野をできるだけ前へ進めたいと思います。

(3) 高磁場か超高磁場か？

Koizumi : 人体用の fMRI では、1.5 T (1テスラ=10,000ガウス) のいわゆる高磁場と、3 T-4 T の超高磁場が使われています。4 T の fMRI の先駆者であるカミール・ウーガビル博士 (ミネソタ大学) は、さかんに 7 T に行きたいと言っていますね。4 T については、わが国の理化学研究所に据付中のものが世界で第 6 番目の装置だそうです。3 T については、正確な数字は擲んでいませんが、3 T の MRI 用磁石

は世界で25台が出荷されたと聞いています。高磁場と超高磁場には一長一短がありますが、この点についてはどう思いますか？

Bandettini : 磁場強度が増すと、まずMR信号のS/N比（信号対雑音比）が上がります。BOLD (blood oxygenation level dependent) コントラストも増大しますので大きな静脈による妨害が少なくなり、毛細血管床からの信号をより観測し易くなります。また、血液の縦緩和時間 (T1) が延びるので流れの計測もより容易になります。これら三つの基本的要件から、磁場強度が高い方が、より小さな部位を、よりはっきりと、より短い時間で観測できることになります。しかし、これはあくまでほかの条件に差がなければとの仮定に立っている原則論です。

研究のために高い空間分解能を指向するなら、間違いなく超高磁場だと思います。ウーガビル博士のところは、4 Tですでに0.3-0.4mmの眼球優位コラムの賦活（活性化）をそれぞれ分解して計測することに成功しています。われわれのところでは、3 Tの超高速法 (EPI: echo-planar imaging) で、既に0.6mmの空間分解能を得ています。しかし、空間分解能についても高磁場から超高磁場への移行は連続的なものですから、高磁場にも多くの余地があります。特に、新たなパラダイム（心理学的課題）を創出することによって、高磁場でも脳神経科学における多くの新しい発見がなされる可能性があります。

Koizumi : 確かに超高磁場を指向するのは直裁的なアプローチですが、新たなパラダイム創出によって大きな発見ができるということですね。

Bandettini : そうです。さらに、高周波の安全性に関するSAR (surface absorption rate) の問題で、超高磁場では使用できないパルスシーケンスがでてきます。そのほかに、高磁場か超高磁場かを論じる際にもう一つ重要なファクターがあるのです。高磁場装置は汎用の臨床機として開発されているので、一般に技術的完成度が高く、磁場強度の割には高いS/Nが得られるということです。コイルにしてもかなり最適化されている。一方、超高磁場装置で限界的なS/Nや分解能を追及するのは、装置を使う研究者個人の努力にかかってきます。4 Tでバードケージ型のQDコイルを安定して作動させるのは至難の業です。3 Tでも決して容易ではありません。

Koizumi : 物理・工学系の強力なサポートなしに超高磁場装置の性能を十分引き出すことは困難だということですね。

Bandettini : そうです。それと、世界に普及しつつあるfMRIの分野で、特に注意が必要ながあります。fMRIでは各種の機能画像が比較的容易に得られますが、同時に、各種の偽像 (artifacts) も得られ易いので、画像の解釈には十分な注意が必要だということです。fMRIの十分な基礎知識なしに得られた画像が氾濫することはサイエンスにとっても危険性をはらみます。

Koizumi : 全く同感ですね。fMRIはサイエンスを進めると同時に、サイエンスを混乱させる両刃の剣にもなり得る可能性があるということですね。使い方を誤ると最先端どころではありません。

(4) 新たなテストパラダイムを求めて

Koizumi : さきほど、装置の性能以上にパラダイムが重要との話がでしたが、何か新しいパラダイムの例を示して頂けますか？

Bandettini : 例えばハーバード大学でランディー・ボクナー博士と一緒にやった仕事があります。彼はワシントン大学のスティーブン・ピーターソン博士とPETのパラダイム創りをやってきました。fMRIはPETよりも空間・時間分解能や感度が良いが、EPR (evoked potential response)よりは時間応答がやや遅いということがあります。旧来のパラダイムはPETから転用されたものが多く、PETの性能の範囲内でやれるテストに限られていました。しかし、そのようなパラダイムに見られるような、20-30秒間タスクを行い、次の20-30秒間は何もしないという繰り返しは極めて人工的で不自然です。これは、脳の機能マッピングには有効かも知れませんが、脳が自然に働いている状態を調べるには適当ではありません。そこで、一回だけのタスクを用いて短い反応を見ることを考えました。そんなことは、信号強度が低くて無理だと思われていたのですが、fMRIで実際にやれることがわかりました。しかも、タスクの結果現われる行動を、信号変化と呼応させて注意深く観察できるのです。そして、行動と信号の相関をとることができます。例えば、語幹を用いたパラダイムにしても、被験者が答えを正しく思いついたときとそうでないときに、脳の働きの差を信号として得ることができます。従来のブロック型のパラダイムでは正誤の差を論じることができませんでした。これなども小さな例の一つかと思います。このようにより創造的なパラダイムをデザインすることにより、より深く信号の意味するところを知ることができるのです。

Koizumi : なるほど。

Bandettini : さらに重要なのは、認知科学ではいろいろ異なった刺激を完全にランダムに与える課題を必要としていることです。さらにまた、一つの短い刺激から、そのインパルス応答を解析をしていく必要があります。つまり脳の各部位が順次応答していく過程を調べる必要があります。それは時間分解能で100 msオーダの話となります。そのためにもブロック型のパラダイムだけではだめで、新しいパラダイムが必要になります。

Koizumi : 新たなパラダイムの創出には、発明によく似た創造性が要求されますね。

Bandettini : そのとおりです。

Koizumi : 古典的なパラダイムが頭に染み着いているとそれから離れるのが難しい。フレッシュな人の方がよいかもしれないですね。

Bandettini : そうかも知れません。

(5) 本当の最先端はどのあたりか？

Koizumi : 科学・技術の最先端（フロンティア）についてどう思いますか？ 先端と名のついているものは必ずしも先端でないものが多い。一般に先端といわれるものは、陽が上って誰の目にも明らかになったものも多く、研究フェーズとしてはまもなく陽が傾いて行くようなものもあるかと思います。本当の先端は、夜明けの薄闇での手探りのようなものですから、誰にも見えるというものではない。半分以上の人が反対して、一部の人が賛成するあたりが研究として最先端のフェーズだと思いますが。

Bandettini : 確かにそうだと思います。

Koizumi : その意味では、fMRIの最先端はどのあたりにあるのでしょうか？ 例えば、磁場を上げてより小さいものを見るとか、海馬を中心とした記憶領野を探ることは皆が狙っていますが、はたして最先端と言えるのでしょうか。

Bandettini : 海馬についてですが、脳の基底部は特に計測に工夫がいくところですよ。まず、血管系の構造が新皮質と異なります。不均一磁場（組織の磁気感受率の差が引き起こす局所的な磁場不均一性）のポストシングや、拍動による動きの補正などが必要で、これらが計測を大変困難にしています。各種の信号後処理法など技術的には随分進歩しましたが、海馬の活性化を観測するにはこの上にパラダイムの工夫が必要でしょう。それに、海馬における神経活動と局所血行動態の結合様式がほかと異なっているという可能性もあります。つまり、逆にfMRIによって神経活動と局所血行動態の結合様式を解明できる可能性があるわけです。fMRIは単に機能マッピングだけでなく、このような脳内の代謝や生理動態を知る大変大きな可能性を秘めているように感じます。

Koizumi : 確かに、脳における神経活動と局所血行動態の結合機序の解明は機能計測の根幹にかかわる問題であると同時に、脳科学としても一つの最先端課題ですね。

Bandettini : さらに私たちが次のステップとして理解しなければならないのは＜意識＞の問題だと思います。まず、＜意識＞という言葉の意味から始めねばならないでしょうが。

（笑）大変重要なのは、意識のモデルを研究している数学者と、純粋な神経学者と、そしてfMRIをやっている物理学者の間のコミュニケーションです。例えば、サンディエゴ（ソーック生物学研究所）のクリストフ・コッホ博士のような意識そのものを研究している人は、どうやって意識を計測したらよいかについて素晴らしいアイデアをもっているはずですよ。まず彼にfMRIの数々の限界点を十分に示して、そ

れではどういうパラダイムで＜意識＞を表に持ち出せるかを議論することが重要になってきます。意識を研究している優れた人々も行動学的なパラダイムでアプローチしており、まだだれもfMRIを使っていません。このような人々とのコミュニケーションが大切だと思います。まさに今始まったばかりと言えるでしょう。

Koizumi : また、トランスディシプリナリーの問題になってきましたね。

Bandettini : はい。私の最終ゴールは、この種の分野間コミュニケーションのコミュニケーターとなることです。

Koizumi : それこそ重要な目標ですし、本当の意味でのフロンティアですね。

(6) 臨床への展開

Koizumi : fMRIは、脳外科手術の術前評価には既に使われていますね。これは、運動野・体性感覚野・言語野など個人差の大きい機能領野を前もって同定し、運動・感覚麻痺や言語障害など手術による後遺症を未然に防ぐものですね。さらに、もっと本質的な多くの臨床応用が現われてくるとおもいますがいかがですか？

Bandettini : はい。精神・神経病には本質的なアプローチが可能と思われます。例えば最近報告されたものと、ディスレクシア (dyslexia, 読字障害) では、第5次視覚野 (MT, 運動視を司る領野) の働きが落ちることが見い出されました。この例にみられるように、病態の根本的な原因を機能計測により解明できる可能性があります。また、いくつかの精神病で、前頭葉の賦活が小さいことも見い出されています。また、てんかんの焦点の決定にも使える可能性があります。

Koizumi : 将来、精神神経病の画像診断装置ができる可能性があるわけですね。

Bandettini : 多くの人が重要な分野と考えています。高次脳機能計測装置は単にブレインマッピングの装置と言う訳ではないと思います。

(7) さらに未来へ向けて

Koizumi : 最近注目されているサンタフェ研究所でも、あなたはセミナーをされたと聞いていますが、どのような印象をもちましたか？

Bandettini : サンタフェ研究所での印象は、脳を計測する努力をするよりも、色々なモデルを創るために多くの人々が働いているということでした。現在わずかに分かっていることをベースに多くの仮説を立てている。そうではなくて、まず、脳を計測して脳自体を知る努力も平行して進めることが大切ではないかと感じました。計測の結果、解釈できない問題もたくさんでてきているのですから。

Koizumi : あそこで研究されている＜複雑系＞(complex systems) というものについてどのように感じましたか？ 例えば、従来から研究されているカオス(caotic system)と

の違いはどのように考えますか？

Bandettini : 自分自身の解釈ですが、エネルギーが非常に小さい状態では原子は静止しており、特に面白い情報はない。一方、エネルギーが非常に大きな状態では原子は完全にランダムでこれまた面白い情報はない。その中間にあって、動的、決定論的、かつ無秩序的な中に秩序があるのがカオスで、あるエネルギー状態にあって情報は蓄積可能であるけれどもそれがデリケートなものと感じています。一方、複雑系は、やはり創発 (emergence) 的に秩序が現われる系ですが、カオスに比べてもっと強固 (robust) で、もっと適応あるいは制御可能な系と捉えています。

Koizumi : これからは、情報あるいはエントロピーと、物質あるいはエネルギーという二つの基本的な概念から、生命を含む自然界の階層構造を考えていかないといけないでしょうね。その中で、環境科学と脳神経科学も結び付くのではないかと考えています。意識については、複雑系から創発 (emergence) 的に現われてくると考えている人が多いですね。ところで意識は将来計れると思いますか？

Bandettini : 私はまだ意識の定義自体に拘泥していますが、もし、意識に物理的な定量性があるならば将来、計測可能だと思います。意識とはある複雑系がある複雑さのレベルを越えると創発的に現われるもので、システムが自らを顧みる過程と考えています。

Koizumi : 最後に一つお聞きしたいと思いますが、fMRIの次に来るのはどのような方法論だと思いますか？

Bandettini : うーん。そうですね・・・ まず、複数の方法論の組み合わせだと思います。fMRI / オプティカルレコーディング、fMRI / NIRS (近赤外分光) イメージング、fMRI / MEG (脳磁計) と言った組み合わせですね。fMRIと光の組み合わせでは、脳活性化時のヘモグロビンの酸化状態がより正確に分かります。fMRIとMEGの組み合わせでは、fMRIの方で高い空間分解能を得ることができ一方、MEGの方で高い時間分解能を得ることができます。これらによって脳の働きがもっとよく分かってくるでしょう。

Koizumi : NIRSイメージング、特に光トポグラフィーについてはどう思われますか？

Bandettini : 光トポグラフィーは、わくわくさせるような方法論です。まず、第一に酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンを同時に計れますから、酸化状態と同時に血液量を計れる。これはfMRIの信号発生機序を解明する重要な手がかりを与えることになるでしょう。さらに、リアルタイムで血液量変化が見えるので、局所血行動態について変動周波数成分を知ることができます。これは、脳内血管系の血流・血圧制御メカニズムを解明する手がかりを与える可能性があるのでこの方法を知って興奮しています。

Koizumi : 私達もその二つに点には強い興味を持っています。

Bandettini : 光トポグラフィーは、fMRI に比べて空間分解能が低いが時間分解能はむしろ高いかも知れない。例えば、情緒・情動の観測などもできるかも知れない。

Koizumi : 自然な環境下で、拘束なしに計れますからね。

Bandettini : すごく色々な応用があるでしょう。動物の行動も計れるかも知れない。

Koizumi : いずれ共同研究を始めましょうか。

Bandettini : ぜひとも一緒にやりたいですね。

Koizumi : それでは、今日は本当に貴重なお話をありがとうございました。

(1997年2月5日、日立中央研究所にて)

(株日立製作所 小泉英明)

参考文献

P. A. Bandettini and H. Koizumi, "ファンクショナルMRIと脳神経科学",
脳科学特集号: 脳科学の時代元年—心のメカニズムは解き明かされる—,
INNERVISION, 12(4), (1997). (医療科学社, Tel: 03-3818-9821)

キーワード注釈

< 高次脳機能 >

大脳皮質によって主に司られる脳の機能全般を指す。一般には、認識、判断、記憶、言語などの精神活動を含めた高次の脳の機能を意味する。脳表面の大脳皮質は霊長類に至って肥大化し新皮質とも呼ばれるが、人間では2 - 5 mmの厚さで、6層からなる層状構造を形成する。多くの神経細胞と細血管を含み、領野によっては0.5mm以下の円柱状のコラムとして機能単位をなす。各種の高次機能は大脳皮質の皺に対応する脳回・脳溝上のいわゆる機能領野に分化局在したり広く分布する場合が多い。例えば、第一次の感覚野は、視覚系が後頭葉後部、体表の感覚を司る体性感覚系は頭頂葉前部、聴覚系は側頭葉にある。また、第一次の運動野は前頭葉後部にあり、第一次の感覚野・運動野の近傍にさらに高次の領野が分布する。前頭前野や頭頂側頭部に代表されるように大脳皮質上には個別領野を統合する連合野が広く分布する。連合野については、まだよく分かっていないところが多い。

< 非侵襲機能計測 >

各種の医療用の画像診断装置が近年急速に発達した結果、非侵襲的（被験者を傷つけたり、苦痛を与えないこと）に、脳の高次機能が計測できるようになってきた。大別して、神経活動に伴う局所血行動態の変化を検出する方法と、神経活動に伴う電流・磁気の変化を検出する方法がある。前者には、機能的MRI (functional magnetic resonance imaging: fMRI)、ポジトロンCT (positron emission tomography: PET)

近赤外光イメージング (near infra-red spectroscopic imaging: NIRSI, or optical topography: OT) がある。後者には、脳電図（脳波） (electro-encephalography: EEG) ならびに、超電動量子干渉素子 (super-conducting quantum interference device: SQUID) を用いた脳磁図 (magneto-encephalography: MEG) がある。これらの方法論を駆使して、最近、人間の各種の脳機能を高い時間・空間分解能をもって計測可能になってきた。感覚・運動だけでなく、言語、記憶、注意などの高次機能も現実的に計測されつつある。

< 機能的磁気共鳴描画 >

(functional magnetic resonance imaging: fMRI)

1992年に初めて論文が出された新しい脳機能の計測技術であるが、特に脳神経科学の分野において急速な進展をみせている。従来のポジトロンCT (PET) と異なり放射線被曝がないので、我々自身がいつでも被験者になれる。血液の磁気的性質は古くファラデーによって見い出されたが、血中ヘモグロビンの磁性が酸化状態に依存すること (blood oxygenation level dependent: BOLD 効果) を利用して、MRIにより脳の高次機能を画像化する方法へと発展した。この方法で既に多くの感覚野や運動野の活性化が計測され、現在、連合野や大脳辺縁系を

含むさらに高次な機能の計測へと展開されつつある。

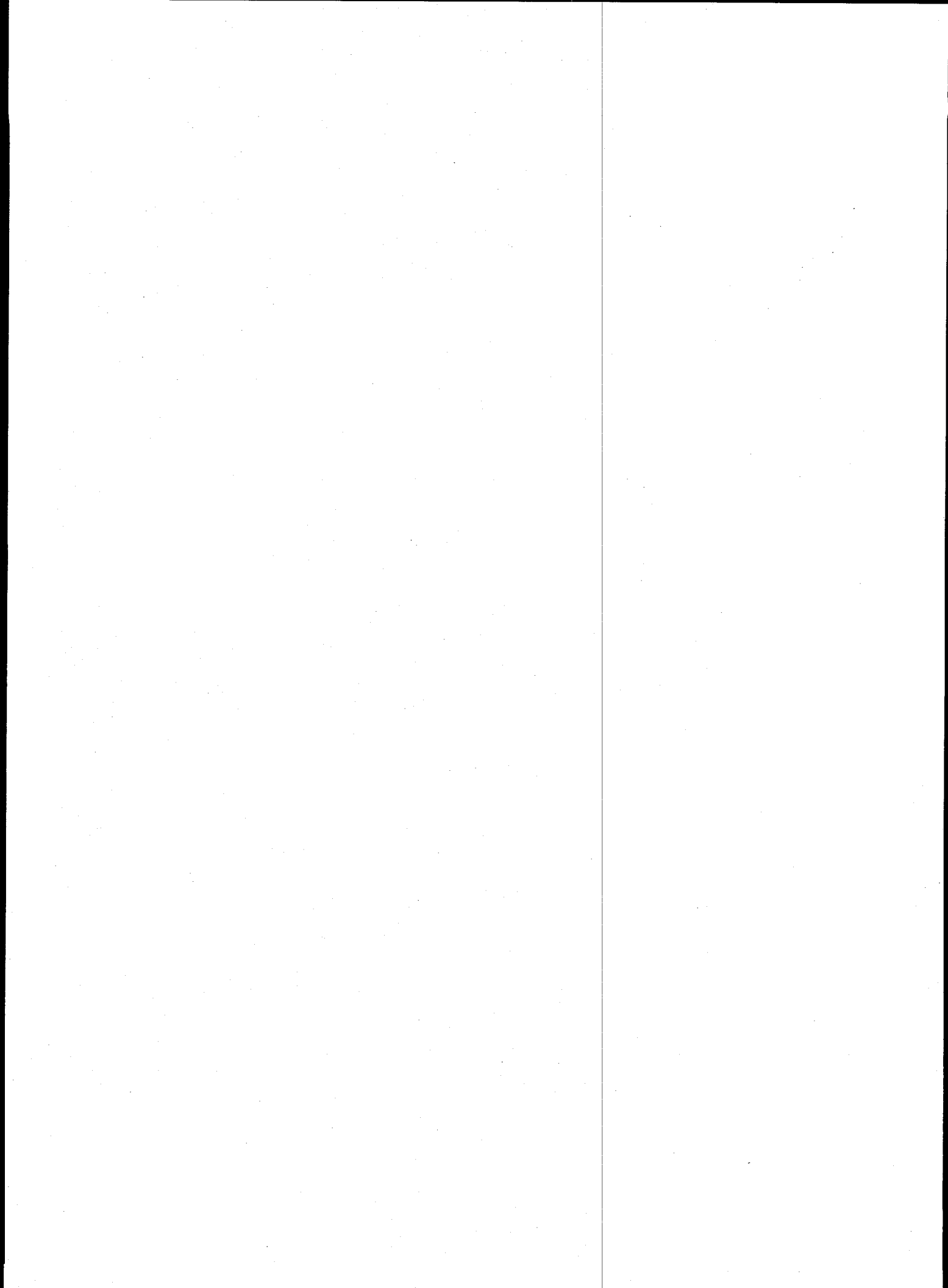
<心理パラダイム>

心理テストのために被験者に与える課題を指す。簡単なものでは、各種の運動機能をテストするために、片方の手の親指の先をその他の指の先に予め指定された順番で触れて行くというローランドのタッピングタスクがある。また、短期記憶の働きをテストするためには、先に示された図形と一定時間後に提示された図形との照合をとる遅延照合パラダイムがよく使用される。また、小脳梗塞にライクルが使用した名詞から動詞へ変換するパラダイムもある。残像や錯視・錯聴をとり入れた心理パラダイムも研究されている。高次脳機能の研究は、種々の非侵襲脳機能計測装置とその計測法の特質を生かした厳密な心理パラダイムの設計によって初めて可能となる。特に高次脳機能計測においては、厳密なレファレンス状態をどのように作るかが鍵である。

<サンタフェ研究所>

米国ニューメキシコ州サンタフェ市にある日乾レンガの古い修道院におかれたユニークな研究所。カリフォルニア工科大学のマレー・ゲルマン（素粒子のクォーク理論でノーベル賞）が中心になって、1984年に設立された。既成の研究所や大学と異なり、創造的な思考を束縛するようなものは一切排除し、学際的で何の制限もない自由な研究施設の実現を目指している。<複雑系 (complex systems)>の概念をこれからのフロンティアと位置付け、分野を超えた自由な思考と、コンピュータの能力を最大限に活用することで新しい道を探っている。

第 3 章 研究体制



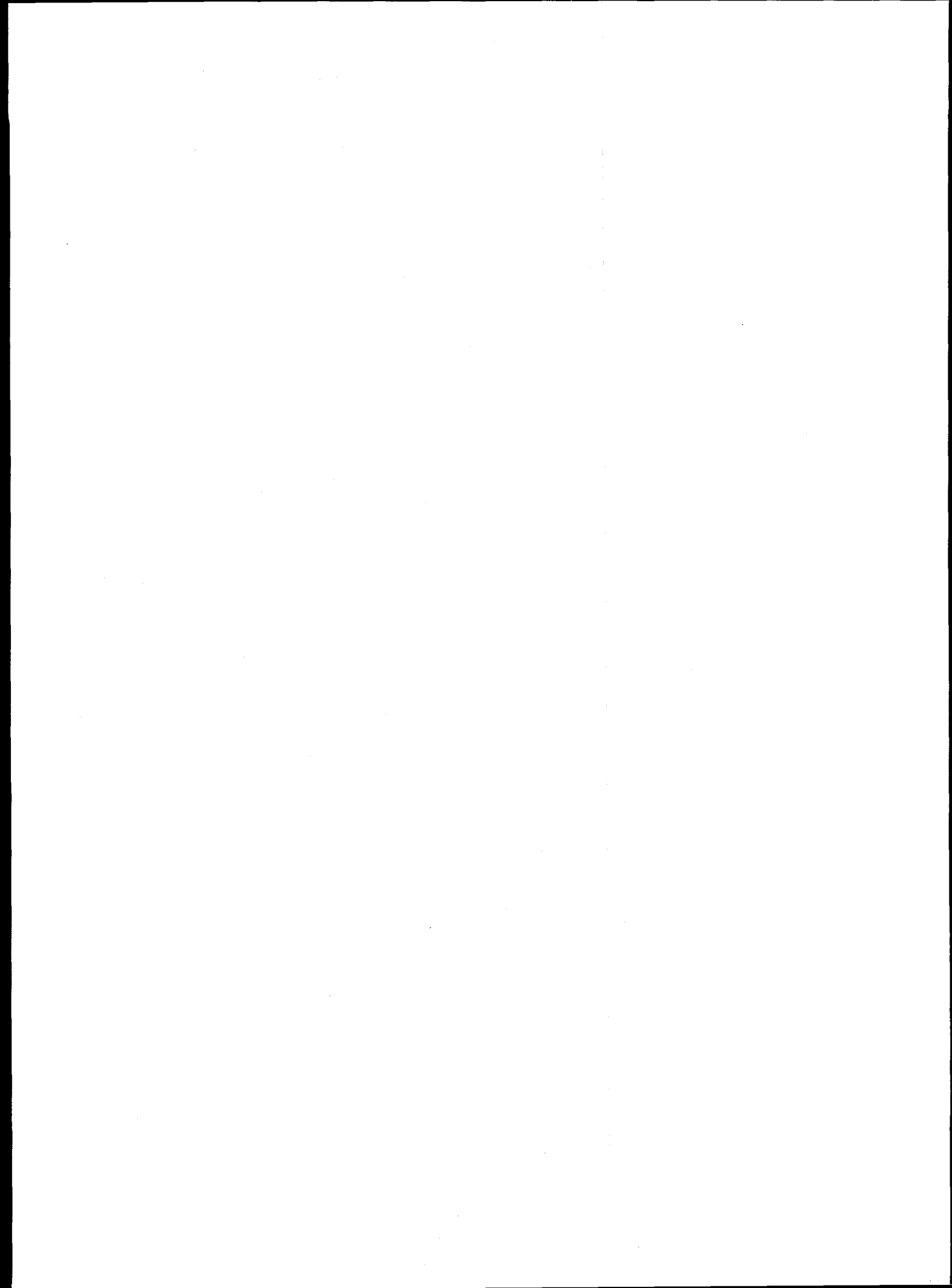
第3章 研究体制

本研究開発は、基礎的かつ開拓的な技術開発であることから、長期的な観点で取り組む必要がある。特に、プロジェクト前半では後半にわたる研究課題を十分に掘り下げ、その要素技術を確認しなければならない。また、当分野の進展や技術動向に基づいて、取り組みや意義を見直せられるよう、10年程度（前期5年、後期5年程度）の開発期間が適切と思われる。しかし、当該技術の進歩は著しく、研究内容に応じて、期間を変更していくも考えられる。

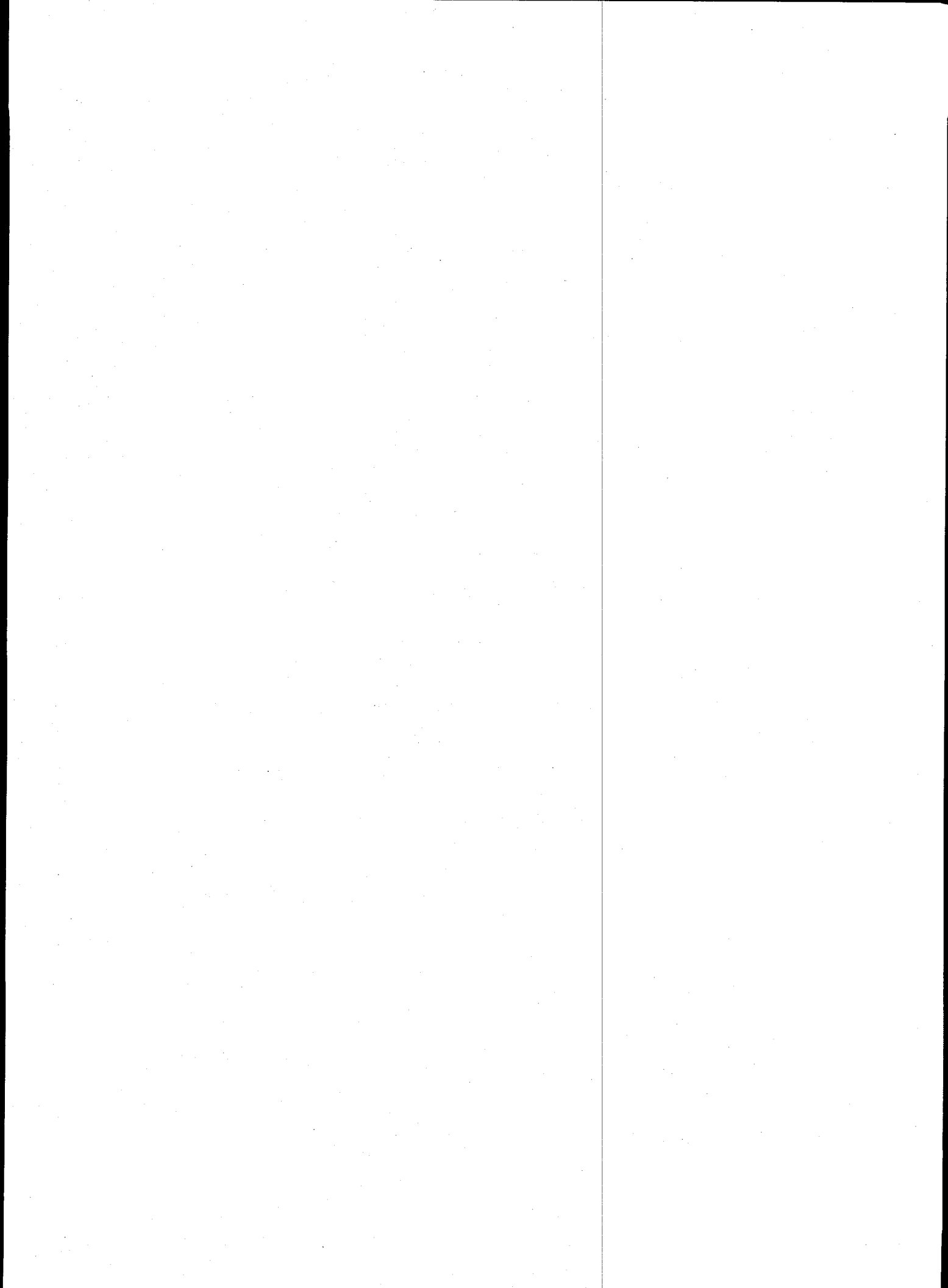
本プロジェクトは、生理研究・物性研究等の基礎的な研究から、工学的な視点からみた機能解明、デバイス・システムの開発まで広範囲の学際分野の連携が不可欠であり、これらの分野の研究者交流による産官学連携のもとでの研究推進の効果をあげる環境整備が必要である。また本プロジェクトの研究開発課題は国際的にも注目されており多数の海外からの研究者の来日が予想される。このためにも、多岐にわたる実験装置、測定装置を集中的に設置し、広範囲にわたる分野の国内外の産官学の共同研究を有効的に推進できる国際的な研究協力環境の整備、が必要である。このようなインフラストラクチャの整備は、共通基盤的な研究に必要な装置を限られた予算内で効率的に活用する上でも有効である。

一方、従来の研究実績または独自のアイデアを基にした研究開発や、すでに当該研究課題を推進できる環境基盤を有する研究グループに対しては、従来の再委託や公募による研究開発体制が適切であり、企業研究者にとってより効率的な研究開発を推進できるという点から範囲型研究開発方式が望ましい。

（新機能素子研究開発協会）



第4章 むすび



第4章 むすび

現代は情報の時代であり、インターネットを介して頻繁に事実（データ）よ考えが世界的規模に行き交う時代である。しかし、情報とは人に英子湯を与えることがらであるとすると、人との関係において、情報をとらえることが必要である。

人はプログラムのようマニュアルや規則に従って動かされるのではないので、現在のマニュアル（プログラム）駆動型コンピュータは人や社会の情報の介在物としてはそもそもなじまない。

現代が人や社会の情報化時代に変容するためには、人になじみのよい情報介在物を研究開発すべきである。日本独自の発案のもと、既にプロトタイプで実現されている脳型コンピュータは、このブレークスルーの有力な要素技術として大きな期待がかけられている。

脳型コンピュータは現在のプロセッサベースアーキテクチャのコンピュータがかかえる未解決の課題や本質的に困難とされている事柄を克服できる要素を持っている。

現在のプロセッサ・ベース・アーキテクチャのフォンノイマン型コンピュータはプログラムに従って情報を処理するので、コンピュータが能力を獲得するためにはプログラムによってマニュアルを作成することである。換言すれば、マニュアル型コンピュータはマニュアルには忠実に動くがマニュアルにないことは全く対応できず、柔軟性のない固い情報処理システムである。このため、曖昧で不完全な情報をもとに情報処理を行うべき現実社会への対応や不測の事態に対する危機管理などを現在のコンピュータで行うことは難しい。

これに対し、脳型コンピュータは学習によって経験に基づく典型パターンを作り上げ、情報処理のアルゴリズム（答）をあらかじめつくり、入力情報は答えを検索するための除法として使われ、答え出力することが必要とあれば、あらかじめ用意した答の中から最もふさわしいものを出力する。出力することで学習効果が生じ、アルゴリズム（答）が書き替わる。このような意味で、脳型コンピュータはメモリー・ベース・アーキテクチャの非ノイマン型コンピュータであり、ここでのメモリは出力することで更新される能動性をもっている。

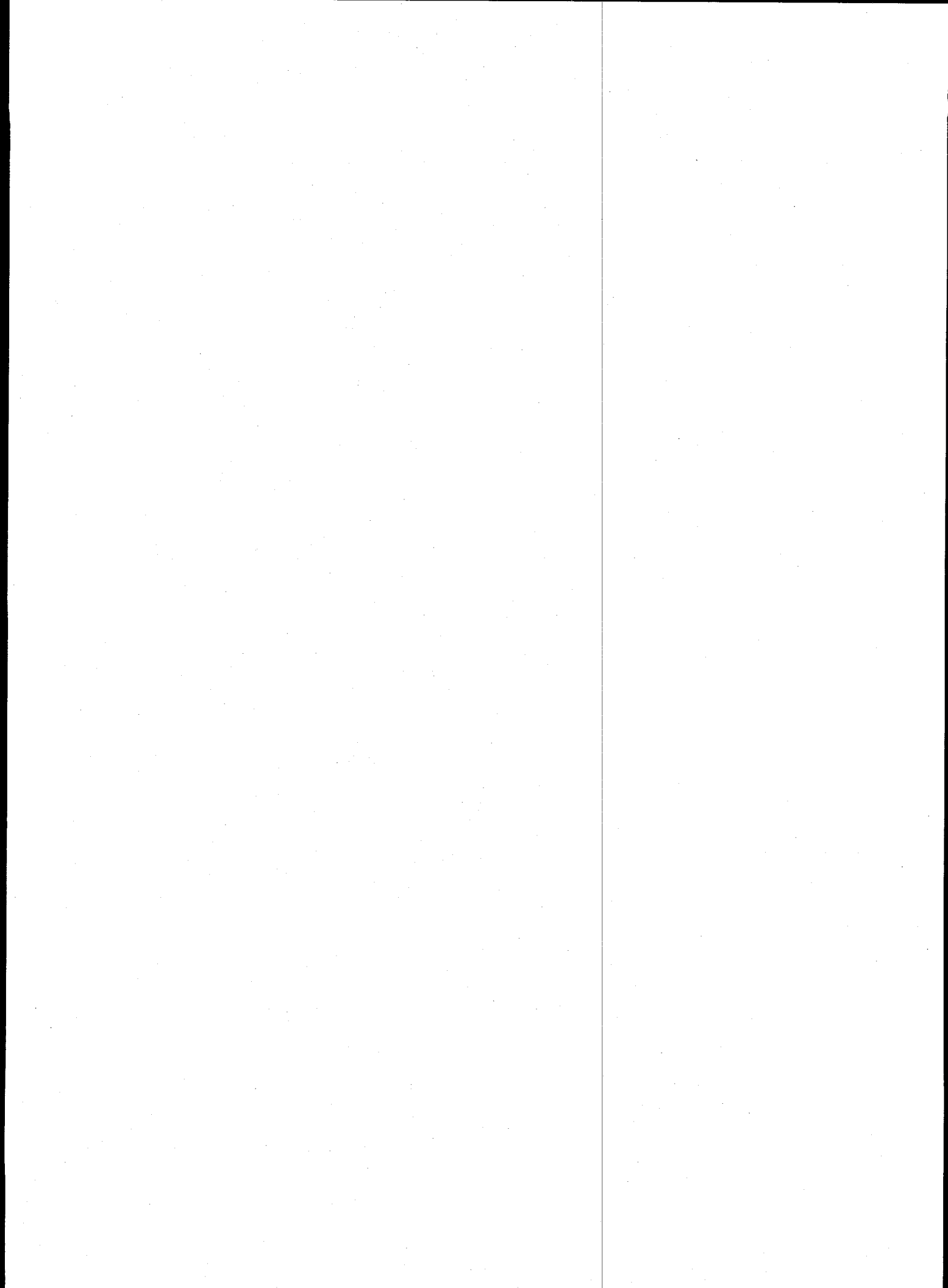
この革新的な脳型コンピュータのコンセプトは、世界に先駆けて電子技術総合研究所で発案され、アルゴリズムを自動獲得する基本素子プロトタイプは、学習性と超並列性を兼ね備えておりシリコン半導体LSIチップとして、工学的に実現されつつある。

将来、脳型コンピュータは、従来のプロセッサ・ベース・アーキテクチャのフォンノイマン型コンピュータと同様に計算汎用性を持ちながら、柔軟かい情報処理を行うことができるようになるなど、従来のコンピュータと相補的に新しい情報世界を拓くであろう。

本先導研究（調査研究）は、脳型コンピュータがアルゴリズムを自動獲得し、その獲得するアルゴリズムの目的・評価も自動決定できる戦略（ブレインウェア）を脳そのものの研究によっても明らかにすることにより、実用システムとしての脳型コンピュータを研究開発するための課題を、いくつかの局面から探った。

Appendix

- A. 1 先導研究 委員会
- A. 2 「脳機能情報処理国際ワークショップ」開催報告
- A. 3 海外技術調査



A. 1 先導研究 委員会

平成8年度・「脳機能情報処理の先導研究」第1回技術委員会 議事録

1. 開催日：平成8年7月10日（水） 15：30 ～ 17：30

2. 開催場所：（財）新機能素子研究開発協会 会議室

3. 出席者：

(1) 委員

・委員長 松本（電総研）

・委員 守谷（電総研）、飯島（電総研）、重松（電総研）、市川（電総研）、国吉（電総研）、平井（筑波大）、大森（農工大）、関口（三洋電機）、高橋（三菱化学）、川上（富士通研）、岡島、山崎（日本電気）、小泉（日立）、宮本（シャープ）、清水（福西代理、日立）、永井（近藤代理、本田技研）、杉山（素子協）

(2) 通商産業省

工業技術院

城

(3) NEDO

応用技術開発室

大屋

(4) 事務局（素子協）

前田専務理事、池田、吉田

配付資料

H8脳技1-1	平成7年度報告書 目次及び研究概要
H8脳技1-2	国際ワークショップ 開催案内（案）
H8脳技1-3	国際ワークショップ 開催案内（英文）
H8脳技1-4	国際ワークショップ 開催マスター・スケジュール
H8脳技1-5	国際ワークショップ セッション（案）
H8脳技1-6	国際ワークショップ 招待講演者等（案）
H8脳技1-7	技術委員会 委員名簿

4. 議 事

(1) 挨拶：

開会に先立ち、前田専務理事より挨拶があった。

・昨年度報告書及びワークショップへの協力謝意。

・脳の研究に関する世界的に重要性が増している中での、本先導研究の意義

(2)委員長選出及び挨拶：

事務局より本委員会の委員長に松本 元氏を、また委員会の調整役として幹事をおき、幹事として守谷 哲郎氏を推薦することが諮られ承認され、松本委員長の挨拶があった。

- ・本先導研究は平成9年度のプロジェクト化が見送られた。
- ・非採択理由として民間企業とのコンセンサス不獲得の意見があったが、これをクリヤして、本年度研究はプロジェクト提案を目指した、思い切った提案をする。
- ・脳の研究は科学技術基本法成立により重点研究の一つとして上げられており、医学とは異なった視点からの取り組みは通産省の役割である。
- ・プロジェクトは脳計測や神経回路学を基本としたモデル化に重点を置く。
- ・本年度の先導研究は委員各位の負担を減らす為、作業の簡略化を図りたい。
- ・報告書はプロジェクト化課題を明確にし、昨年度報告書を補完する形でまとめる。

(3)委員紹介

出席者が順次自己紹介した。

(4)前年度先導研究概要報告

事務局より、資料 H8脳技1-1 に基づき調査研究、集積回路試作、ワークショップ開催及び海外調査外注等の概要が説明された。

(5)平成8年度先導研究について

杉山委員（素子協）より、本年度の調査研究に関し、以下の提案があり、承認された。

- ・先導研究は前年度の研究を補完する形でまとめる。たとえば、この分野のニーズや技術の波及効果等がやや不足しておりこれを補ったり、昨年度報告内容のその後の進展とコメント等委員各位の意見を集め課題の抽出を図り、担当執筆者を決め、報告書にまとめる。
- ・先導研究の一環として、国際ワークショップ開催を予定しており、詳細は開催準備会で検討され、本日当委員会で審議する。
- ・委員の委員会出席の負担軽減のため、技術委員会幹事会を設け、実行計画の検討、試案策定等を行い、委員会での審議の効率化を図り、委員会開催回数の最小限度に止める（年2～3回程度）。

(6)国際ワークショップについて

事務局より資料 H8脳技1-2 ～ H8脳技1-6 に基づき、ワークショップの開催準備状況が報告され、審議の結果以下の特別講演者及び招待講演者（候補）に関する事項以外は原案通り承認された。なお今後の詳細は事務局がまとめ、適時幹事会で検討のうえ、文書等で委員に諮ることとした。

- ・特別講演者は丹治 順氏（東北大）を候補とする。→交渉者：飯島委員
- ・セッション2A.の海外招待講演者（1名）は LeDoux, Goldman Rakic, McGough各氏の順

で交渉する。→交渉者：松本委員長。 国内招待講演者に予備候補として藤田 一郎氏（阪大）を加える。→交渉者：飯島委員

- ・セッション2.の海外招待講演者（1名）は、Aertsen, Singer, Abeles各氏の順で交渉する。→交渉者：松本委員長。国内招待講演者候補より畠中 寛氏を削除する。
- ・セッション2B.の国内招待講演者（2名）は田中 力氏（新潟大→交渉者：飯島委員）栗城 真也氏（北大→交渉者：小泉委員）、菅野氏（秋田脳研→交渉者：飯島委員）、川島 隆太氏（東北大→交渉者：飯島委員）の順位で交渉する。

武者 利光氏は削除。

- ・セッション3.の国内招待講演者（3名）はKoerner氏（本田技研→交渉者：近藤委員）、市川 道教氏（電総研：委員）、川人 光男氏（ATR →交渉者：飯島委員）とする。海外招待講演者候補は、セッション5.に移動する。 丹治氏は特別講演者へ。

- ・セッション5.の海外招待講演者（1名）は、Koch氏（交渉者：松本委員長）、Leon Chua氏（新規提案 Calif.Univ. →交渉者：大森委員）、Poggio氏（交渉者：松本委員長）の順位で交渉する。国内招待講演者（3名）は相澤 益男氏（東工大→交渉者：事務局）、平井 有三氏（筑波大：委員）、山本 昌弘氏（NEC →交渉者：岡島委員）と交渉する。

なお、パネルディスカッションのタイトルは「脳機能情報処理の展望」とすることにし、パネラー等は上記招待講演者の交渉結果を待って決めることにした。

以 上

平成8年度・「脳機能情報処理の先導研究」第1回企画委員会 議事録

1. 開催日：平成8年7月30日（火） 13：30～15：30

2. 開催場所：（財）新機能素子研究開発協会 会議室

3. 出席者：

（1）委員

・委員長 伊藤（理研）

・委員 松本（電総研）、守谷（電総研）、富塚（生命研）、所（慶応大）、阿江（広島大）、前川（三洋電機）、小林（三菱化学）、福西（浅井代理、日立）、岡島（覧具代理、日本電気）、高津（石川代理、富士通）、竹谷（新田代理、松下電器）

（2）通商産業省

機械情報産業局 電子機器課 山名

工業技術院 黒田、城

（3）NEDO

産業技術研究開発部 尾沢、太田

応用技術開発室 大屋

（4）事務局（素子協）

前田、杉山、池田、吉田

配付資料

H8脳企1-1	平成7年度報告書 目次及び研究概要
H8脳企1-2	国際ワークショップ 開催案内ポスター（案）
H8脳企1-3	国際ワークショップ 開催案内及び参加申込様式（案）
H8脳企1-4	国際ワークショップ 開催マスター・スケジュール
H8脳企1-5	国際ワークショップ セッション（案）
H8脳企1-6	国際ワークショップ 招待講演者等（案）
H8脳企1-7	企画委員会 委員名簿
H8脳企1-8	技術委員会 委員目簿

4. 議 事

（1）挨拶：

開会に先立ち、前田専務理事より挨拶があった。

また、本委員会の傘下にある技術委員会が7月10日に開催したと報告があった。

(2)委員長選出及び挨拶：

事務局より本委員会の委員長に伊藤正男氏を推薦することが諮られ承認され、挨拶があった。

- ・科学技術庁が「脳科学の時代」の名称で、国家的事業と位置づけて脳に関する総合的研究開発を提案を発表し、予算要求をしている
- ・この提案の「脳を創る」の項で、ブレインウェアは特に工学的な応用を重視し、情報生成型の脳型コンピュータによる、これまでと異なった新しい情報処理のカテゴリーを開拓するものと示されている。今年度の調査研究もこの趣意と関連して、力を注ぎたい。

(3)臨席者挨拶

a. 黒田開発官（工技院）：

- ・平成7年度先導研究報告書は立派な出来映えで、本分野の研究開発の重要性は高く評価されたが、平成9年度プロジェクト化審議の段階で、研究の手段、成果等が不明確との評価がなされ、プロジェクト化が見送られた。
- ・現在、平成9年度先導研究3年目の線もあるが、平成10年度プロジェクト化の為には、早期に明確な方針を検討し、平成9年5月の予算要求の時期までに研究計画をまとめ上げる必要がある。

b. 尾沢課長（NEDO）：

- ・6/25に本先導研究を管轄する産業技術研究開発課に着任した。今後この分野の研究開発の知識を深めていきたい。

c. 山名技官（電子機器課）：

- ・通産省では、「脳の研究」に対する重要性は認識されているが、本先導研究は産技プロジェクトとしてのまとめが必要である。先導研究延長により、プロジェクト化への具体的なアイデアが固まることを期待している。

(4)委員紹介

出席者が順次自己紹介した。

(5)前年度先導研究概要報告

事務局（杉山 研究開発部長）より、資料 H8脳企1-1 に基づき調査研究、試作ワークショップ開催及び海外調査外注等の概要が説明された。

(6)平成8年度先導研究について

守谷委員（技術委員会 幹事）より、本件に関し平成8年7月10日に開催された技術委員会での審議結果が報告され、承認された。

- ・先導研究は前年度の研究を補完する形でまとめる。たとえば、この分野のニーズや技術の波及効果等がやや不足しており、委員各位の意見を集め課題の抽出を図り、担当

執筆者を決め、報告書にまとめる。

- ・先導研究の一環として、国際ワークショップ開催を予定しており、詳細は開催準備会や技術委員会の審議を経て、準備が進められている。

また、事務局より技術、企画両委員の委員会出席の負担軽減のため、技術委員会幹事会を設け、実行計画の検討、試案策定等を行い、委員会での審議の効率化を図り、委員会開催回数の削減するとの提案があり承認された。

(7)国際ワークショップについて

事務局より資料 H8脳企1-2 ～ H8脳企1-6 に基づき、ワークショップの開催準備状況が報告、確認され、今後詳細は事務局に一任されることが承認された。

(8)その他

委員長より、本先導研究の今後の進め方に関し、出席委員の自由討論が提案され以下の意見があった。

a. 本分野の技術的な特徴、課題、展開等

技術領域が広いので、特長技術を抽出した上での研究開発がほとんどの意見を占め以下の応用への可能性が提示された。

- ・メモリの機能を上げる (Functional Memories) という方向がある。
- ・自己組織的処理を利用して、ユーザインタフェースの改良やフェールセーフ等
- ・神経回路素子を集積した脳機能のシミュレーションを更に検証する。
- ・自律性という特長を活かしつつ、明確な入・出力関係が必要条件となる工学的なデバイス/システム等への展開を図る。
- ・生物現象を基本としているので、生物の不完全さを補う介護ロボット等への適用
- ・人間とモノとの接点にある技術として、AIセンサやセンサフュージョンを突破口とする
- ・情報の流れ装置としての脳機能に注目し、センサと知的回路との結合システム技術

b. 企業の取り組み

本分野の研究開発の現況や今後の取り組みの可能性等について以下の意見があった。

- ・現行シリコンベースの技術を超えての脳型コンピュータという提案余地はあるか
- ・他の研究開発への寄与（波及）という観点で実行。但し長期研究開発は不可
- ・基礎研究領域であり具体的なターゲットと関連性の兆しが見えれば着手可能
- ・生物現象の原理を応用するという取り組みであり、あえて自らやる必要はない
- ・現状は基礎研究領域。視覚システムのような特定ターゲットを決めるのが望ましい。

c. 今後のプロジェクトへのつなげ方やプロジェクトとしての在り方

- ・科技庁提案の”脳を創る”を通産省として分担する。
- ・基礎的分野であることを考え、将来技術として目標（応用）が明確でなくても国家プロジェクトとして取り組む姿勢は必要。

- ・発足時の計画にとらわれることなく、結果が良ければ成功との評価にすべき
- ・研究の先見性が重要で、目標にどの程度接近できたかを評価する。モノの形での成果を5年で得られなくても可とすることを考える。
- ・プロジェクト化するためには、研究領域を絞り込む。

本件に関連して、工技院より意見があった。

- ・先導研究2年度の成果を以て、具体的な形でプロジェクト提案することを期待
- ・国家プロジェクトの研究期間は今後5年となる。その時点での評価により継続が検討される。
- ・プロジェクトとしての予算規模は年間数億円、成果が得られれば20～30億円と考えられる。

以 上

平成8年度・「脳機能情報処理の先導研究」第2回技術委員会 議事録

1. 開催日：平成8年11月 6日（水） 13：00～15：30

2. 開催場所：（財）新機能素子研究開発協会 会議室

3. 出席者：

(1) 委員

・委員長 松本（電総研）

・委員 守谷（電総研）、重松（電総研）、鈴木（赤松代理、生命研）、関口（三洋電機）、高橋（三菱化学）、川上（富士通研）、岡島、山崎（日本電気）、小泉（日立）、清水（福西代理、日立）、永井（近藤代理、本田技研）、杉山（素子協）

(2) 通商産業省

電子機器課 山名
工業技術院 黒田、小竹、城

(3) NEDO

応用技術開発室 伊東

(4) 事務局（素子協） 吉田、河野

配付資料

H8脳技2-1	平成8年度 第1回技術委員会議事録（案）
H8脳技2-2	平成7年度報告書 目次
H8脳技2-3	平成8年度報告書構成（案）
H8脳技2-4	国際ワークショップ プログラム
H8脳技2-5	技術委員会 委員名簿

4. 議 事

(1) 挨拶：

開会に先立ち、杉山研究開発部長より開会の挨拶があった。

(2) 平成8年度報告書構成案：

松本委員長より今年度の報告書は、脳機能情報処理の中から「脳型コンピュータ」に焦点を絞って報告書をまとめる方針が提示され、報告書構成案が説明された。

- ・序として 脳の情報獲得の戦術（ブレインウェア）
- ・第1章 脳型コンピュータ —そのコンセプト

- ・第2章 脳型コンピュータ —その実現イメージ
- ・第3章 第2世代脳型コンピュータ
- ・結 び 情報化社会と脳型コンピュータ

からなり、これらに加えて付章として、

- ・高機能型脳活動実時間イメージングシステムの研究開発
- ・遺伝情報研究からみたブレインウェア
- ・脳型コンピュータと人工知能研究

等、「脳型コンピュータ」関連技術についての調査をとりあげることが、提案された。

この提案に、

- ・生体の機能を人工神経回路に置き換える困難さの解決策
- ・アルゴリズムの自動生成の方法
- ・工学的応用の見通し
- ・機能の工学的実現の姿（素子化） - アナログLSIの可能性
- ・脳型コンピュータのコンセプト、応用分野及び開発の意義の明確化。
- ・バイオロジーとエレクトロニクスをつなげる概念づくりの必要性
- ・ゴールの設定とプロセスのスケジュール化

等の質疑応答や提案に対するコメントがあったが、基本的には提案が承認された。次回に最終案をまとめることとし、幹事会で今回の議論を踏まえて若干の手直しを行い、次回に再度検討することにした。

(3)国際ワークショップ開催準備状況について

事務局より、12月開催の国際ワークショップの準備状況の説明があり、承認された。

なお、開催当日、海外招待講演者への対応が、重松委員及び永井（代理）委員に要請された。

次回（第3回）技術委員会は、平成8年12月17日（火）午後1時30分から開催することが決まった。

以 上

平成8年度・「脳機能情報処理の先導研究」第3回技術委員会 議事録

1.開催日：平成8年12月17日（火） 13：30～16：30

2.開催場所：（財）新機能素子研究開発協会 会議室

3.出席者：

(1)委員

・委員長 松本（電総研）

・委員 守谷（電総研）、赤松（生命研）、重松（電総研）、市川（電総研）、阿江（広島大）、大森（東農工大）、関口（三洋電機）、高橋（三菱化学）、川上（富士通研）、岡島、山崎（日本電気）、小泉（日立）、福西（日立）、岡（竹谷代理、松下）、宮本（シャープ）、永井（近藤代理、本田技研）、杉山・篠原（素子協）

(2)通商産業省

電子機器課	山名
工業技術院	黒田、小竹、城

(3)NEDO

応用技術開発室 大屋

(4)事務局（素子協） 吉田、河野

配付資料

H8脳技3-1 平成8年度 第2回技術委員会議事録（案）

H8脳技3-2 平成8年度報告書構成（目次）（案）

4.議事

(1)挨拶：

議事に先立ち、杉山委員（研究開発部長）より開会の挨拶があった。

(2)前回議事録の確認

事務局より、資料 H8脳技3-1 に基づき、第2回技術委員会の議事内容の概要が説明され、異議なく承認された。

(3)平成8年度報告書構成案：

松本委員長より今年度の報告書は、この委員会としての提案を投げかけ、外部からの反響を聞き、他者からの優れた提案は受け容れることを行う基石としたい、との方針が述べられ、前回に引き続き、報告書構成および技術内容について以下検討した。

「全体のトーン」

- ・技術開発課題の明確化
- ・この報告書の提案の位置づけ→ 先を見越した提案
- ・脳型コンピュータを実現するために、何をすべきか、困難を伴うがそれをどのようにして実現するかなどを明示できないか。
- ・応用像の明確化と時間軸をつけた開発のロードマップを期待したい。
- ・できるだけ具体例を示すようにしたい。
- ・新しいアルゴリズムの確立（ブレークスルー）が応用には重要
- ・この分野は未解明の課題も多く、直ぐの応用を論じるのは避ける

「各章」

- ・基礎的な研究部分と工学的な実現を目指す部分との連続性を工夫する
- ・メモリベースアーキテクチャの捉え方
- ・現在探求されている非平衡系の情報科学の考え方との相違点
- ・技術的な課題が明らかでない場合は方向性を示すことでよい

以上をまとめて、委員長より今年度の報告書では、各分野の専門家の研究成果や技術展望が示され、「脳型コンピュータ」の実現イメージが明らかにされる。これによっていろいろな応用へのアプローチが見えてき、更に今回の検討事項も解決の道筋が見られるようになる。また、研究開発は長期的な視野に立って、今日的なアプローチを考える必要がある、との発言があった。

なお、執筆者を委員長と事務局で協議の上、年内に決定することにした。

(4) その他

- ・臨席された、黒田開発官より以下の説明があった。

平成8年度の補正予算で脳型コンピュータ・アーキテクチャの研究開発に関して、予算要求中であり、NEDO出資の形を取る予定。

また、先導研究を更に1年延長して、平成9年度も実施を予定している。

次回、技術委員会は平成9年2月12日（水）午後1時30分より（財）新機能素子研究開発協会会議室で行う。

以 上

平成8年度・「脳機能情報処理の先導研究」

第2回企画委員会／第4回技術委員会 合同委員会 議事録

1.開催日：平成9年2月12日（水） 13：30～15：30

2.開催場所：（財）新機能素子研究開発協会 会議室

3.出席者：

(1)委員

・委員長 松本（伊藤代理兼：電総研）

・委員 守谷（電総研）、重松（電総研）、市川（電総研）、赤松（生命研）、所（慶応大）、大森（農工大）、前川・関口（三洋電機）、小林（三菱化学）、川上（富士通研）、岡島・山崎（日本電気）、小泉（日立）、福西（浅井代理兼：日立）、岡（新田・竹谷代理兼：松下）、永井（橋本代理、本田技研）

[杉山（素子協）]

(2)通商産業省

工業技術院 城

(3)事務局（素子協） 前田専務理事、杉山研究開発部長、吉田

配付資料

H8脳企2/技4-1	平成8年度 第1回企画委員会議事録（案）
H8脳企2/技4-2	平成8年度 第3回技術委員会議事録（案）
H8脳企2/技4-3	平成8年度 調査研究報告書構成（案）
H8脳企2/技4-4	平成8年度 企画委員会 委員名簿
H8脳企2/技4-5	平成8年度 技術委員会 委員名簿

4.議 事

(1)挨拶：

前田専務理事より、委員会協力への謝辞と脳機能情報処理の進め方をさらに討議を重ねるよう要請があった。

また、松本委員長より、

- ・脳研究への国の投資が実行段階に入った
- ・この先導研究に関連して平成8年度補正予算による「脳型コンピュータ・アーキテクチャの研究開発」として、プロジェクトが行われる。

等この分野の現況が報告され、今後国全体としての進め方の課題で、組織間の障壁克

服、推進する体制づくり、研究開発資金の効率的な運用等があげられた。

城技官より、今後工技院として脳研究に予算を獲得するためには、産業界の一層の協力により、よいプロジェクト提案が出されることが大切であると要請された。

(2)議事録確認

事務局より、第1回企画委員会議事録(案)及び第3回技術委員会議事録(案)が説明され、意義なく承認された。

(3)平成8年度 調査研究報告書構成(案)について:

事務局より第3回技術委員会で承認された報告書構成の確認と執筆者よりの寄稿状況が報告された。原稿の到着が遅れているため、内容等の確認は委員会で行わず、幹事と事務局に一任された。

(4)国際ワークショップ開催報告について

事務局より以下報告された。

①開催日: 平成8年12月10日～11日

②場所: 千代田区北の丸公園科学技術館 サイエンスホール

③講演・ポスター: 特別講演 1件、招待講演 15件(内 海外招待 3件)
ポスター発表 29件

④参加者数: 登録者 197名

参加者 279名(内 外国人 22名)

(5)人工神経回路素子(脳型プロセッサ)の研究について

電子技術総合研究所 超分子部 市川主任研究官(先導研究 技術委員)より、同氏らによって開発されたプロセッサについて、脳研究に基づくモデル化、素子としての構成、チップ(LSI)化および機能の評価について、講演があった。

(6)脳型コンピュータ・アーキテクチャの研究開発」での「脳型コンピュータ用プロセッサチップの評価研究」について

委員長より補正予算による研究開発(PJ)でプロセッサチップの応用開発を目的とした評価研究の実施予定が説明された。

実施に関する詳細が決定次第、事務局より各委員に連絡することとした。

(7)その他

出席委員による「脳機能情報処理」技術の研究開発について、自由討論を行った。

主な論点は以下の通りであった。

①研究開発の内容

- ・まず現在手持ちのツールで”脳づくり”に挑戦する。
- ・必ずしも”モノづくり”に固執せず、脳研究でのエレクトロニクスの果たす役割を見極める。

- ・研究開発テーマを絞り込むと企業として参加できない場合もある。
- ・生化学での人工神経をつくる研究とエレクトロニクスでのそれとの接点を探求する
- ・”脳を創る”といってもまだ極めて初歩的なモノしかできないが、これまでにない新しいモノに企業がどの程度支援できるかが課題。

②体制

- ・他の研究グループとの研究開発のネットワークづくりをする。
- ・いろいろな研究者の競合的な提案を受け入れ、開発課題の明確化を図る。
- ・ビックプロジェクトでなく範囲型のプロジェクトの方が取り組みやすい。
- ・従来のように、各企業のフェーズを調整することが単純でない要素が多いことを前提に横並び参加型はやらない。

③施策と企業の対応

- ・企業としても脳研究の重要性が意識されはじめているので、これまでの研究を一步進められる国の支援を期待する。
- ・民間主導のプロジェクトでは資金が小さくなり、この分野の研究は困難。国の大きな視点からの取り組みが必要である。
- ・これまでの先導研究でかなりメニューが出ているので、これからは企業個々の対応（提案）の段階になっている。

④委員会運営

- ・まだ見えない技術要素も多い技術領域でもあり、研究的な議論の場づくりを期待する。
- ・研究すべき材料を見出すためには、より研究現場に近い人たちとの交流がほしい。

最後に杉山研究開発部長より、平成9年度の先導研究委員会の進め方についての構想が説明された。

- ・プロジェクト化の提案はいろいろの切り口から開発課題を抽出できるような運営を考えている。
- ・このために、積極的に外部から専門家を招き、ヒアリングとそれに続く検討会の形を取ることを計画する。
- ・今年は脳型コンピュータを中心に議論を進めてきたが、この継続とあわせ脳の入出力系に的を当てた調査を進める予定でいる。

以 上

A. 2 「脳機能情報処理国際ワークショップ」開催報告

英語名称 : International Workshop on Brainware

略 称 : IWB'96

主 催 : 新エネルギー・産業技術総合開発機構
財団法人 新機能素子研究開発協会

共 催 : 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所

協 賛 : 応用物理学会、情報処理学会、人工知能学会、電子情報通信学会
日本神経回路学会、日本神経科学会、日本生物物理学会、日本物理学会

開催日時 : 平成8年12月10日(火)～ 11日(水)

12月10日 12:30～18:20

12月11日 9:30～18:00

開催場所 : 科学技術館 サイエンスホール
(東京都千代田区北の丸公園)

会議構成 : 特別講演と7セッション
「脳の情報処理(1)」 「脳の情報処理(2)」 「脳機能計測」
「デバイス/システム」 「脳型コンピュータ」 「パネルディスカッション」
及び「ポスター」

口 頭 講 演 15件 (内 海外招待講演 3件)

ポスター発表 29件

会議参加者 : 参加登録者 197名
参加者数(2日間) 279名 (内 外国人 22名)

(1) 脳機能情報処理 (ブレインウェア) 国際ワークショッププログラム

平成 8 年 12 月 10 日 (火)

オープニング/プレナリー

(座長: 松本 元 ; 電子技術総合研究所)

開会挨拶

12:30 - 13:00

通商産業省
新エネルギー・産業技術総合開発機構
電子技術総合研究所

特別 (基調) 講演

13:00 - 13:30

伊藤 正男

日本学術会議 会長

M. Ito

President, Science Council of Japan

「脳を創る - 脳型コンピュータ開発 -」

"To Create the Brain - Perspective of Brain-like Computers"

セッション 1 A. 脳の情報処理(1)

(座長: 飯島 敏夫 ; 電子技術総合研究所)

L 1. L. Cahill

Univ. of California, USA

13:30 - 14:20

"Brain Mechanisms for the Modulation of Memory
by Emotion"

L 2. 田中 啓治

理化学研究所

14:20 - 14:55

K. Tanaka

Inst. of Phys. and Chem. Res. (RIKEN), Japan

「物体視の脳内過程」

"Neural Mechanisms of Object Vision"

L 3. 河野 憲二

電子技術総合研究所

14:55 - 15:30

K. Kawano

Electrotechnical Laboratory, Japan

「追従眼球運動の神経機構」

"Neural Mechanisms of Ocular Following Responses"

コーヒーブレイク

15:30 - 15:45

セッション 1 B. 脳の情報処理(2)

(座長: 河野 憲二 ; 電子技術総合研究所)

L 4. A. Aertsen

Albert-Ludwigs Univ., Germany

15:45 - 16:35

"Dynamic Organization of Cortical Activity"

L 5. 飯島 敏夫

電子技術総合研究所

16:35 - 17:10

T. Iijima

Electrotechnical Lab., Japan

「リアルタイムイメージング法による嗅内野-海馬系
神経構造の解析」

"Entorhinal-Hippocampal Interactions Revealed by Real-Time Imaging"

セッション 2. 脳機能計測

(座長：小泉 英明 ; 日立製作所)

L 6. 中田 力 新潟大学 17:10 - 17:45
 T. Nakada Niigata Univ., Japan
 「磁気共鳴による脳機能解析法 - その現状と未来 -」
 "MR Analysis of Brain Function: Present and Future"

L 7. 栗城 真也 北海道大学 17:45 - 18:20
 S. Kuriki Hokkaido Univ, Japan
 「脳磁界計測による文字知覚・認知の脳内プロセスに関する研究」
 " Perception and Recognition of Letters
 - Magnetoencephalographic Study of Human Brain - "

バンケット 18:30 - 20:00
 挨拶 前田 祝 ((財)新機能素子研究開発協会 専務理事)
 S. Maeda

平成8年12月11日 (水)

セッション 3. デバイス/システム

(座長：守谷 哲郎 ; 電子技術総合研究所)

L 8. 相澤 益男 東京工業大学 9:30 - 10:05
 M. Aizawa Tokyo Inst. of Tech., Japan
 「固体基板上の生体分子およびニューロネットワーク構築」
 "Artificially Designed Formation of Biomolecular and Neuronal
 Networks on Solid Surface"

L 9. S. Ullman Weizmann Inst., Israel 10:05 - 10:55
 " A Model for Bottom-up and Top-down Information Processing
 in the Visual Cortex"

L10. 平井 有三 筑波大学 10:55 - 11:30
 Y. Hirai Univ. of Tsukuba, Japan
 「6ビット100万シナプスによる1,000ニューロン完全結合型P A D
 デジタルニューラルネットワークシステム」
 " PDM Digital Neural Network System with 1,000 Neurons
 Fully Interconnected via 1,000,000 6-bit Synapses"

L11. 山田 敬嗣 日本電気 11:30 - 12:05
 K. Yamada NEC Corp., Japan
 「実用的パターン情報処理における人工ニューラルネットワーク」
 "Artificial Neural Networks for Practical Pattern Proces-
 sing"

昼 食 12:05 - 13:00

セッション 4. ポスタープレゼンテーション

13:00 - 14:15

講演会場外周通路

セッション 5. 脳型コンピュータ

(座長: 岡島 健治 ; 日本電気)

L12. E. Koerner 本田技研 14:15 - 14:50

Honda R&D Co. Ltd., Japan

「非同期スパイクニューロンネットワークにおける並列-逐次
プロセッシング: 大脳皮質の計算理論」

"Parallel-Sequential Processing in Asynchronous Networks of
Spiking Neurons: A Theory of Cortical Computing"

L13. 市川 道教 電子技術総合研究所 14:50 - 15:25

M. Ichikawa Electrotechnical Lab., Japan

「脳型コンピュータを目指したマイクロ・プロセッサの開発」

"A Newly Developed Micro-Processor for Brain Computing"

L14. 銅谷 賢治 科学技術振興事業団 15:25 - 16:00

K. Doya Japan Sci. and Tech. Corp., Japan

「生物とロボットの強化学習」

"Reinforcement Learning in Animals and Robots"

コーヒープレーク 16:00 - 16:15

セッション 6. パネルディスカッション

(座長: 松本 元 ; 電子技術総合研究所)

16:15 - 17:45

「脳機能情報処理の展望」

"Brainware & Brain Computing"

パネラー

L. Cahill (Univ. of California, USA)

A. Aertsen (Albert-Ludwigs Univ., Germany)

S. Ullman (Weizman Inst., Israel)

平井 有三 (筑波大学)

小泉 英明 (日立製作所)

岡島 健治 (日本電気)

クロージング 松本 元 17:45 - 18:00

(2) 講演の概要

① セッション 1A: Information Processing in Brain (脳の情報処理 (1))

このセッションでは、L. Cahill博士による”Brain Mechanisms for the Modulation of Memory by Emotion”、田中博士による「物体視の脳内過程」及び河野博士による「追従眼球運動の神経機構」の3講演があった。

L. Cahill博士は、動物及び人間における実験結果をもとに、情動がいかに記憶機構に関与するかを解析した結果について報告した。動物、人間とも機械的(単純)な記憶機構に加えて、その機能を修飾する機構が脳内に存在する。そのモジュレーション機構には少なくとも二つの構成要素がある。一つは抹消系のストレスホルモン(特にアドレナリン)であり、もう一つは扁桃体である。ストレス下でアドレナリンが過剰に分泌されると、それが扁桃体に作用し、結果的に記憶活動に影響を及ぼすと、同博士は説明している。

田中博士は、目で受容した物体の視覚像が初め後頭葉へ伝えられ、それから3段程度の領野を経て側頭葉へ伝えられる過程で、視覚情報処理の最終段である側頭葉での物体の視覚像の表現についての研究を報告した。光計測法により、側頭葉には脳の表面方向で0.4ミリほどの広がりを持った領域を単位とするモジュール構造があり、関連した図形特徴に反応するモジュールが隣り合って並んで連続的なマップを構成すること等を明らかにし、物体視の脳内過程を知る上で有力な手がかりを得ている。

河野博士は、広い視野の視覚刺激が動くと、眼は非常に短い潜時でその動きを追いかけるように動く追従眼球運動は、視覚のブレを防ぎ、良好な視覚を保つのに重要な役割を持っている。サルがこの眼球運動を行っているときに、小脳腹側傍片葉からプルキンエ細胞の単純スパイク活動を記録し、解析の結果、ニューロンの発火頻度が同時に観測された眼球運動の加速度、速度、位置の成分の線形加算で近似できるが判明した。この結果は、小脳皮質で運動のダイナミックな指令がつくられている可能性があること示唆している。

以上、このセッションでは、最初の講演者が心理的要素が脳情報処理に大きな影響を及ぼすという現実を、物質的側面から説明したのに続いて、だい2、3講演者は脳の情報処理を機能的構造の側面から説明したと言えよう。このように、かつては極めて複雑とされていた、脳の高次機能が具体的な物質や機能単位の協調動作から明快に説明されるようになってきたのが印象的であった。

(電子技術総合研究所 飯島敏夫)

② セッション1B: Information Processing in the Brain (脳の情報処理 (2))

このセッションでは、Ad Aertsen博士の”Dynamic Organization of Cortical Activity”と飯島博士の”Entorhinal-Hippocampal Interactions Revealed by Real-Time Imaging”の2つ

の講演があった。

Aertsen博士は、大脳皮質活動の時間的、空間的に動的な変動と、一つ一つのニューロンの活動の関係について興味深い研究成果を示した。無麻酔ネコの大脳視覚領の活動を光計測法によって測ると、時々刻々と絶えず変化している様子が捉えられる。視覚領から記録されるニューロンは、視覚刺激に反応するが、同じニューロンに対して同じ視覚刺激を用いてもいつも同じ反応が観察されるわけではない。何度かの同じ刺激に対する反応を加算平均することにより、試行毎の変動を取り除き、再現性のある反応を抽出することができる。そして、前述した試行毎に異なる反応は、光計測法によって測られる時々刻々と変化する活動(ongoing activity)と加算平均したニューロンの反応とを線形加算することにより予測できることが示された。時々刻々と試行毎に変動する活動は、感覚刺激に対するニューロンの反応に比べても遜色ないほど大きく、ノイズとしてかたづけられるようなものではない。おそらく、動物のおかれた状況、環境、意識状態などを反映していて、実際の脳の働きに大きな影響力を持っていると考えられる。

飯島博士は、記憶に重要な役割を果たしていると考えられている「嗅内皮質－海馬」を光計測法によって調べ、興味深い研究成果を示した。ラットの脳から嗅内皮質－海馬系を含む切片(スライス)を切り出し、高速、高感度の光計測法で観察することにより、単発の電気刺激によって惹起された興奮が嗅内皮質と海馬を含む神経回路を、何度も繰り返し回っている様子が明らかになった。この現象は、嗅内皮質－海馬系が閉じた反響回路として働いている可能性を示唆するものであり、記憶の神経メカニズムを解明していく上で一つの手掛かりを与えてくれるものである。

これら2つの講演ともに、脳の情報処理機構を考える時、脳の活動を時間的、空間的にダイナミックに観察していくことが重要であることを示すものであり、脳機能情報処理(ブレインウェア)の今後の展開に有意義な示唆を与えてくれた。

(電子技術総合研究所 河野 憲 二)

③ セッション2 : Measurement of Brain Activities (脳機能計測)

本セッションは、人間の高次脳機能計測の現状と将来を展望するために計画された。高次脳機能とは、主として大脳皮質によって司られる機能を指し、一般に精神活動も含まれる。非侵襲的(傷つけたり痛みを伴わない)な高次脳機能計測法は、信号源の性格から、原理的に二つの方法に大別される。一つは、神経活動にともなって発生する神経電流あるいは磁場を直接計測する方法である。今一つは、神経活動にともなう局所の血行動態変化を計測する方法である。最近では、前者は、量子干渉素子

(Superconducting Quantum Interference Device : SQUID)、後者は機能的MRI

(Functional Magnetic Resonance Imaging : fMRI) に代表される。ポジトロンCT

(Positron Emission Tomography) は後者であるが、放射線被爆を伴うため、健常者を被検者とする神経科学的研究には適用が困難となりつつある。本セッションでは、前者と後者に関し、それぞれ講演を載いた。

fMRIについては中田から、まず、その基本であるBOLD (Blood Oxygenation State Level Dependent) 法について述べられた。これは、ヘモグロビンの磁性が酸化状態によって大きく変わることを利用しており、常磁性の還元型のヘモグロビンを内因性の造影剤として血液二を間接的に計測するものである。賦活による信号変化は、通常の磁場強度1.5Tのシステム(いわゆる高磁場システム)では2-5%であるが、磁気感受率の磁場強度依存性により4Tの超高磁場システムでは15%にも達するとし、超高磁場システムが有利であるとした。さらに、超高磁場システムによりOne shot study が可能であるとした。

次に3DAC (Three Dimensional Anisotropy Contrast) Axonography についても言及した。これは、拡散の3次元異方性による神経描画法である。神経の走向に平行、あるいは直交するかによって拡散係数が変わることを利用して神経の走行を画像化する。

次に、栗城から、MEGによる最近の応用計測として、文字知覚と脳内認知過程について述べられた。使用されたMEG装置は、2連の各37チャンネルのSQUIDで、文字刺激は正常な文字と疑似文字、さらに3文字から構成される単語を目視することによって与えられた。一個一個の正常文字は後頭葉での処理が、疑似文字と単語は刺激後250ms以前では左側頭案下部(IT)にて処理され、250ms以降では側頭連合野へ移ることが複数の被験者に共通して観測された。このように、MEGを用いて文字認識の脳内過程を観測することができることが示された。

(日立製作所 小 泉 英 明)

④ セッション3 : Devices and Systems (デバイスとシステム)

本セッションは、脳そのものの研究からは少し離れて、基本デバイス或いはそれをどのようにシステムの中で利用していくかという、応用サイドの話題を取り上げた。

相沢教授(東工大)は、神経細胞を微細加工を施された電極基板上に培養し、細胞活動を人為的にコントロールしたり、細胞活動の物理化学的データを直接収集する新たな方法について発表を行った。

Ullman博士(ワイズマン科学研究所)は視覚神経系の情報処理についてシステム論的立場から議論を行った。その中で、従来のシステム論では見落とされがちだった概念から実画像へ向かう処理と、実画像から概念形成へ向かう処理が中間レベルで相互作用をすることによって、非常に対応力の高い画像認識システムが構築可能になることを強調した。

平井教授(筑波大)は、電子回路を用いて生物の神経系をモデル化し、完全結合可能な1,000ニューロンのデジタルニューラルネットワークを制作し、その性能を報告した。この回路のシナプス結合度を適切にチューンすると、その並列処理能力を利用して微分方程式な

どを従来コンピュータに比して圧倒的に高速で解くことが可能になると予測している。

山田研究員（NEC情報メディア研究所）は実用的パターン情報処理における人工ニューラルネットワークの利便性を、実用機レベル及びプロトタイプ機レベルでの問題点等の議論を通して示した。

以上本セッションは、他のセッションと比べサイエンスの側面ももちろんであるが、新技術の動向と応用への発展を中心に活発な議論が行われた。

（電子技術総合研究所 守谷哲郎）

⑤ セッション5：Brain Computing（脳型コンピュータ）

脳型コンピュータのセッションでは3名の研究者の方々に発表をお願いし、脳型コンピュータに関連する講演とそれに関する熱心な討論が行われた。

セッションではまずはじめに、本田技研和光基礎技術センターのKoerner博士が“Parallel-sequential processing in asynchronous networks of spiking neurons : A theory of cortical computing”と題した発表を行った。Koerner博士は、神経細胞を、神経インパルスの同期を検出する“coincidence detector”としてとらえ、脳における認識処理が、①大まかではあるが非常に高速な認識過程と、②それに引き続くより詳細な検証過程とによって進んでいくとする大きな枠組みを提案した。また、この枠組みに沿って、大脳皮質の基本モジュール（コラム構造）に関する非常に一般的なモデルを提案した。さらに、提案したモデルに基づき、“temporal coding”（神経インパルスの時系列による情報コーディング）の仕組みに関して考察し、ガンマ波と呼ばれる40Hz程度の脳波がこのモデルによって説明できる可能性を示唆した。temporal codingの問題はブレインコンピューティングにおける非常にホットな話題の一つであり、活発な質疑討論が行われた。

次に電子技術総合研究所の市川博士、重松博士、松本博士による“A newly developed micro-processor for brain computing”と題した発表が行われた。神経回路網をハードウェアに装しようとする場合、大別するとアナログ回路を用いる方法と、ディジタル技術を用いる方法とが考えられるが、市川博士らが開発したLSIはディジタル技術を用いた神経回路網計算専用プロセッサ（ゲートアレイ）である。このため、アナログ回路と比べ、より大規模な神経回路網シミュレーションが可能である。また専用プロセッサとすることで汎用CPUと比べ非常に高速な処理が実現できる。1チップの場合でも、1000ニューロン、100万コネクシオンの大規模神経回路網の計算が実時間で可能であるという。また複数のプロセッサをネットワークバスでパラレルに接続することによって、さらに大規模な神経回路網のシミュレーションが可能になっている。実際の神経細胞により近い複雑な構造や、さまざまな学習則がシミュレートできるという点も従来にない重要な特長である。脳型プロセッサの研究は、工業的応用を考えた場合にも、また構成的アプローチによる脳の理解という立場からも、ブレインコン

ピューティングの研究において中心的な役割を担うであろうことは疑いがない。会場では、ハードウェアの詳細や学習則等を含めて活発な質疑討論が行われた。

最後に科学技術振興事業団の銅谷博士による“Reinforcement learning in animals and robots”と題した発表が行われた。銅谷博士はTemporal Difference (TD) 学習則を中心とした「強化学習」を、倒立振り子の制御に応用した実例などについてビデオもまじえて分かりやすく説明された。脳における学習メカニズムを解明することは、ブレインコンピューティングにおける中心的な課題の一つであるが、問題は脳の神経回路網はその処理が好ましい結果を生んだかどうかをすぐには知ることができないという点にある。この意味において、時間遅れのある報酬信号によって学習を進めることができるTD学習則は、誤差逆伝播法等と比べ、より現実的な学習則である可能性がある。銅谷博士は、ある種の動物学習のメカニズムがTD学習則に基づいたモデルで説明できる可能性を提唱し、またその場合に大脳基底核がTD学習則の“actor-critic system”として働いているとするモデルを示した。

以上まとめると、本セッションでは、temporal codingの問題、脳におけるフィードフォワード-フィードバック処理の問題、大脳基本モジュールの問題、脳型プロセッサのハードウェア、学習機構の問題等々、ブレインコンピューティングにおける中心的なトピックスが取り上げられ、それらについて有意義な討論がなされた。

(日本電気 岡 島 健 治)

(3) Workshop Schedule

December 10 (Tues), 1996	December 11 (Wed), 1996
(Science Hall) Opening 12:30-13:00 Plenary 13:00-13:30 Session 1A 13:30-15:30 L1 - L3 Coffee Break 15:30-15:45 Session 1B 15:45-17:10 L4,L5 Session 2 17:10-18:20 L6,L7 Banquet 18:30-20:00 (Restaurant "The Space")	(Science Hall) Session 3 9:30-12:05 L8 - L11 Lunch 12:05-13:00 Session 4 13:00-14:15 Poster Session PA-1 ~ PA-13 PB-1 PC-1 ~ PC-11 PD-1 ~ PD-4 Session 5 14:15-16:00 L12-L14 Coffee Break 16:00-16:15 Session 6 16:15-17:45 Panel Discussion Closing 17:45-18:00

P
O
S
T
E
R

E
X
H
I
B
I
T
I
O
N

P
O
S
T
E
R

E
X
H
I
B
I
T
I
O
N

(4) CONTENTS / PROGRAM FOR EXTENDED ABSTRACTS

December 10, 1996

Lecture Session

Plenary

- To Create the Brain -Perspective of Brain-like Computers-
M. Ito (13:00-13:30)
President, Science Council of Japan

Session 1A; Information Processing in Brain (1)

- L-1. Brain Mechanisms for the Modulation of Memory by Emotion 3
L. Cahill (13:30-14:20)
University of California
- L-2. Neural Mechanisms of Object Vision 14
K. Tanaka (14:20-14:55)
The Institute of Physical and Chemical Research(RIKEN)
- L-3. Neural Mechanisms of Ocular Following Responses 17
K. Kawano (14:55-15:30)
Electrotechnical Laboratory

Session 1B; Information Processing in Brain (2)

- L-4. Dynamic Organization of Cortical Activity 23
A. Aertsen (15:45-16:35)
Albert -Ludwigs University
- L-5. Entorhinal-Hippocampal Interactions Revealed by Real-Time Imaging 27
T. Iijima (16:35-17:10)
Electrotechnical Laboratory

Session 2; Measurement of Brain Activities

- L-6. MR Analysis of Brain Function: Present and Future 33
T. Nakada (17:10-17:45)
Niigata University
- L-7. Perception and Recognition of Letters-Magnetoencephalographic Study of
Human Brain- 36
S. Kuriki (17:45-18:20)
Hokkaido University

Session 3; Devices and Systems

- L-8. Artificially Designed Formation of Biomolecular and Neuronal Networks
on Solid Surface 41
M. Aizawa (9:30-10:05)
Tokyo Institute of Technology
- L-9. A Model for Bottom-up and Top-down Information Processing in
the Visual Cortex 44
S. Ullman (10:05-10:55)
The Weizmann Institute of Science
- L-10. PDM Digital Neural Network System with 1,000 Neurons
Fully Interconnected via 1,000,000 6-bit Synapses 54
Y. Hirai (10:55-11:30)
University of Tsukuba
- L-11. Artificial Neural Networks for Practical Pattern Processing 57
K. Yamada (11:30-12:05)
NEC Corporation

Session 5; Brain Computing

- L-12. Parallel-Sequential Processing in Asynchronous Networks of Spiking
Neurons: A Theory of Cortical Computing 63
E. Koerner (14:15-14:50)
Honda R&D Co., Ltd.
- L-13. A Newly Developed Micro-Processor for Brain Computing 66
M. Ichikawa (14:50-15:25)
Electrotechnical Laboratory
- L-14. Reinforcement Learning in Animals and Robots 69
K. Doya (15:25-16:00)
Japan Science and Technology Corporation

Session 6; Panel Discussion

- "Brainware & Brain Computing" (16:15-17:45)
Chairperson: Panelists:
G. Matsumoto L. Cahill Y. Hirai
(Electrotechnical A. Aertsen H. Koizumi (Hitachi, Ltd.)
Laboratory) S. Ullman K. Okajima (NEC Corp.)

Poster Session (Session 4)

- PA-1. Hypothetical Reasoning in a Brain-like Modular Network 75
H. Tsujino, T. Masutani and E. Koerner
Honda R&D Co., Ltd.
- PA-2. Synchronization of Processing in Asynchronous Networks of Spiking
Neurons: A Novel Scheme for Gamma Oscillation in the Brain 78
S. Nagai and E. Koerner
Honda R&D Co., Ltd.
- PA-3. An Autonomous Robot with Biological Brain Model Based on Basal Ganglia
and Hippocampus 81
J. Yamamoto and Y. Anzai
Keio University
- PA-4. Computational Physiology of Lateral Inhibition 84
T. Kato, T. Sakamoto and Y. Kobayashi*
Electrotechnical Laboratory
*Toppan Printing Co., Ltd.
- PA-5. Dual Oscillator System in the Procerebral Lobe of Limax Brain 87
A. Iwama, A. Yamada, E. Kono, T. Kimura and T. Sekiguchi
Sanyo Electric Co., Ltd.
- PA-6. Neurotransmitter Levels in a Rat Brain Subject to Magnetic Resonance
Imaging 90
K. Hyodo and K. Homma
Mechanical Engineering Laboratory
- PA-7. Theory of Self-Organization of Spatio-Temporal Receptive Fields 93
M. Miyashita and S. Tanaka*
NEC Corp.
*The Institute of Physical and Chemical Research(RIKEN)
- PA-8. Identification of Noradrenaline Receptor Subtypes that Mediate
Synaptic Plasticity in the Cerebral Cortex 96
N. Okado, K. Nakadate and M. Matsukawa
University of Tsukuba

- PA-9. Distribution Pattern of Serotonin-2A Receptors that Mediate Synaptic Plasticity: An Immunohistochemical Study 98
S. Hamada, N. Okado and K. Senzaki
University of Tsukuba
- PA-10. Aggression and Serotonin : Contribution of Inhibitory Mechanisms 101
S. Ueda, A. Nishimura* and K. Yoshimoto*
Dokkyo University School of Medicine
*Kyoto Prefectural University of Medicine
- PA-11. Correlated Activities of Adjacent Neurons in the Hippocampus 104
S. Suzuki, H. Kaneko, M. Akamatsu and J. Okada*
National Inst. of Bioscience and Human-Technology
*Kyushu University
- PA-12. Dynamical Neural Responses for Vocalization in Guinea Pig Auditory Cortex 107
R. Tokioka, T. Miyashita, N. Murai and K. Fukunishi
Hitachi Ltd.
- PA-13. A Role of Dynamics of Piriform/Entorhinal/Hippocampal Cortical System in Odor Recognition 110
T. Oyamada, Y. Kashimori and T. Kambara,
The University of Electro-Communication
- PB-1. Dynamically Adaptable CMOS Winner-Take-All Neural Network..... 113
K. Iizuka, M. Miyamoto and H. Matsui
Sharp Corp.
- PC-1. Image Enhancement Based on Lateral Inhibition and Light/Dark Adaptation 116
Y. Kobayashi, T. Kato* and T. Sakamoto*
Toppan Printing Co.,Ltd.
*Electrotechnical Laboratory
- PC-2. The Gabor-Type Receptive Field as Derived by the Mutual-Information Maximization 119
K. Okajima
NEC Corp.

PC-3. Illusory Line Motion by Two-stage Motion Energy Model for Area MT	122
M. Nomura NEC Corp.	
PC-4. Dynamical Map Model Processing Temporal Correlations between Stimuli	125
N. Kiriyaama, O. Hoshino, Y. Kashimori and T. Kambara The University of Electro-Communication	
PC-5. A Model of Working Memory Playing a Leading Part in Awareness	128
S. Inoue, O. Hoshino, Y. Kashimori and T. Kambara The University of Electro-Communication	
PC-6. Active Perception Based on Coupling between Electrolocation and Jamming Avoidance Response	131
Y. Kashimori and T. Kambara The University of Electro-Communication	
PC-7. Coherent Link between Dynamical Attractors as a Key Process for Odor Perception	134
O. Hoshino, Y. Kashimori and T. Kambara The University of Electro-Communication	
PC-8. Recognition Mechanism of Quality and Intensity of Taste Stimuli in Gustatory System	137
H. Horie, A. Tsuboi, K. Waki, Y. Kashimori and T. Kambara The University of Electro-Communication	
PC-9. Models of Electoreceptor and Electrosensory Lateral Line Lobe for Electrolocation of Electric Fish	140
H. Owada, M. Kimiyasu, Y. Kashimori and T. Kambara The University of Electro-Communication	
PC-10. Possible Architecture for a Brain Like Computation Machine	143
T. Omori Tokyo University of Agriculture & Technology	
PC-11. Inductive Learning on Special-Purpose Brainware Architecture	146
H. Fukumoto, S. Hiwatashi and T. Ae Hiroshima University	

- PD-1. Multiple-Dipole Source Localization Based on Information Criteria ... 147
T. Kiyuna, K. Kamijo and T. Yamazaki
NEC Corp.
- PD-2. Self-Repairing in Neuro-Computers under Defective Neuron Circuits
..... 150
M. Yasunaga and K. Moki*
University of Tsukuba
*Hitachi Microcomputer System Ltd.
- PD-3. 3D Object Representation in the Inferotemporal Cortex of
Macaque Monkeys 153
H. Tamura
National Inst. of Bioscience and Human-Technology
- PD-4. Development of Multi-channel Extracellular Recording System and
Its Application. 156
H. Oka, H. Sugihara, R. Ogawa and M. Taketani
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

A. 3 海外技術動向調査報告

(1) センサフュージョンと知能システムマイクロ技術

a. はじめに

1996年12月9日から15日まで、米国に出向き、海外技術動向調査を行ったので、以下のとおり報告する。前半は、ワシントンD.C.で開催された”MFI '96”と通称されているセンサーに関する国際会議に出席した。後半は、西海岸へ飛んで、カリフォルニア工科大学(C.I.T.), カリフォルニア大学(ロサンゼルス校), カリフォルニア大学(バークレイ校)を訪問し、マイクロ技術、マイクロセンサー技術などを中心に、先端技術の調査、討論を行った。

b. 国際会議 ” The 2nd MFI '96 ”について

この会議は、IEEE/SICE (計測自動制御学会) /RSJ (日本ロボット学会) 主催の ”1996 International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System”(知能システムのための複数センサー融合および統合に関する国際会議) というものであって、第1回は1994年にラスベガスで開催された。それに引き続いての第2回が1996年に催されたのである。対象とされるシステムは、非常に広い範囲に亘っている。たとえば、工場の自動化(factory automation), 自律走行機構の誘導(autonomous vehicle navigation), 検査(inspection), 農業(agriculture), 外科手術支援(medical operation support), が取り上げられている。とくに、今回は、2つの新しい研究分野に重点をおいて企画されたという。それらは、生物における情報処理(bio-based information processing)および信号と記号レベル(signal and symbol level)での情報融合(information fusion)である。以下に、各セッションにおける発表論文件数と1つ、2つの代表的な論文タイトルを示しておく。

① 理論(theory)-----4編

”Statistical Decision Theory for Mobile Robotics: Theory and Application” など。

② 不確実さと信頼性(Uncertainty & Relyability)-----8編

”False Alarm Reduction of Ground Penetration Radar Returns through Multisensor Fusion”, ”Uncertain Information Fusion Using Belief Measure and Its Application to Signal Classification” など。

③ 応用と器具(Application & Implementation)-----11編

”Development of 'AI-VISION' for Fluidized-Bed Incinerator”,
”Automatic Operation of a Combined Harvest in a Rice Field” など。

④ 力とトルクの融合(Force / Torque Fusion)

"Including Sensor Bias in Shape from Motion Calibration and Sensor Fusion" など。

⑤ 誘導(Navigation)-----18編

"Adaptive Rule of Combination for Observations Over Time", "Dead Reckoning Navigation of Mobile Robot Using an Indirect Kalman Filter" など。

⑥ 雑センサー(Varied Sensing)----- 6 編

"Study of Odor Compass" など。

⑦ 複数エージェントシステム(Multi-Agent System)----- 4 編

"Multiagent-Based Distributed Manipulator Control", "Guiding Distributed Manipulation with Mobile Sensor" など。

⑧ 画像理解とコンピュータビジョン(Image Understanding & Computer Vision) ----- 4 編

"Shape Reconstruction from Endoscope Image by Its Shadings", "Stereo Matching as a Multistage Grouping Process" など。

⑨ 把握(Grasping)----- 4 編

"Dynamic Object Localization via a Proximity Sensor Network", "Integration of Vision and Force Sensors for Grasping" など。

⑩ 生物関係(Bio-Based)----- 2 編

"Development of a Fish-eye VR System with Human Visual Functioning and Biological Signals", "Analog VLSI Circuits for Sensory Attentive Processing"

⑪ 立体視(Stereo)----- 3 編

"Multi-Sensor Fusion Scheme for Calibration-Free StereoVision in a Manufacturing Workcell" など。

⑫ 目標物検知と追跡(Target Detection & Tracking)-----10編

"Human Motion Capture by Integrating Gyroscopes and Accelerometers", "Multiplicative Inhibitory Velocity Detector (MIVD) and Multi-Velocity Motion Detection Neural Network Model" など。

⑬ 実時間計算(Real World Computing)----- 4 編

"A Proposal of Novel Information Architecture--Open Cooperative Work Space--" など。

⑭ 視覚と距離の融合(Vision & Range Fusion)----- 4 編

"Sensor-Fusion of Intensity- and Laserrnge- Images", "Recovering Shape and Reflectance Properties from a Sequence of Range and Color

Images” など。

⑮ 触覚(Tactile Sensing)----- 4 編

”Optimal Grasping Using Visual and Tactile Feedback” など。

⑯ 能動センシングとプランニング(Active Sensing & Planning)----- 3 編

”Multimedia Sensor Fusion for Intelligent Camera Control” など。

⑰ 応用(Application)----- 3 編

”Sensor Fusion and Planning with Perception-Action Network” など。

⑱ 低レベルの融合(Low-Level Fusion)----- 4 編

”Adaptive Sensor Models”, ”Optical Design of Distributed Signal Detection Systems” など。

⑲ ソナー (Sonar)----- 4 編

”Fusing Binaural Sonar Information for Object Recognition Systems” など。

⑳ ニューラルネット(Neural Net)----- 3 編

”On the Active Perception of Speech by Robots” など。

㉑ 高レベルの融合(High-Level Fusion)

”Intelligence Fusion”, ”Communications Management in Decentralised Data Fusion Systems” など。

㉒ 構造(Architecture)----- 4 編

”Real-Time Microvision System with Three-Dimensional Integration”,
”Video Compression and Enhancement Sensors Using Column-Parallel architecture” など。

「会議の概要」

このシンポジウムは、センサ融合、情報融合に的が絞られているとはいえ、非常に広い範囲の研究が含まれていた。比較的人気があって議論が活発であったセッションをいくつか取り上げる。最後にキーノートスピーチについても紹介する。

i. 移動ロボットの誘導について

そもそもセンサ融合という概念が発生した源となったひとつは、移動ロボットの走行制御が論じられる際であったと思う。障害物を見つけるのに、カメラによる視覚情報、超音波による距離情報、あるいは赤外線センサによる環境情報などを融合する研究がかなり以前から行われた。それゆえ今回も誘導(Navigation)に関する論文は非常に多かった。セッションとしては18編ということになっているが、他セッションにも誘導に関係するものは散見された。

用いられるセンサについても非常に種類が多い。車輪付ロボットでは基本的なのはエンコー

ダーで、車輪の回転角を計る。つぎに加速度計である。これは積分すると速度情報を得られるし、さらに積分すれば走行距離が得られる。加速度計システムの欠点は誤差が累積していくことで、これを補うためにどうしても他のセンサが必要になる。発表されたものでもいろいろな組み合わせが論じられていた。最も確実なのはランドマークの利用である。オフィスや病院、工場内での移動ロボットには、ランドマークシステムは十分に実用可能である。ランドマークに対してロボットが自分の相対的な位置を知るにも種々の方法があり、ここでもセンサ融合の問題が取り上げられていた。

移動ロボットの位置検出の理想的なものは慣性誘導システムだと個人的には考えている。加速度計とジャイロ(gyro)を内蔵しておれば、外からの助けを受けないで、自分だけで位置、姿勢検出が可能なわけである。宇宙のような、何の基準もないところを移動するにはこれしか方法はない。宇宙で用いられたシステムが徐々に地上に降りてきているというのが現状であろうか。今回はジャイロを用いるシステムも多く取り上げられており、ジャイロ機器の改良（低価格化、性能向上など）があれば、ロボットにも広く用いられるようになるだろう。移動ロボット絶対方向制御に、ローター方式のジャイロコンパス（北方向が分かる）と磁気コンパスとの融合を図ろうとする報告も興味深かった。

ii. 目標物検知と追跡

これも発表論文が多かった。種類の異なるセンサを複数個用いるものと、同じセンサを複数個セットして、それぞれの出力を統合して、最も可能性の高い方向に目標物が存在するものと考ええるアルゴリズムなど、今後発展しそうなテーマがいくつか見受けられた。

iii. 生体の動きの検出

最近ロボットに人間の巧みな動きを取り入れようという傾向があって、人間の動きを詳細にデータとして収集しようとする試みがある。腕の各部に加速度計やジャイロを取り付ける計測法などが扱われていた。この場合も必ずビデオカメラなどによって画像を取り込み、融合によってセンサ入力との時間合わせを行い、データの質の向上に努めていた。多くの人の関心と呼んだのは、歩行する人間を計測対象として、男性か女性かを判定しようとする研究であった。日本の研究者によるものである。センサとしては、カメラ、加速度計、接触圧力センサを用いる。マーケティング調査などにおいてカスタマーの性別が必要になることがあるのでこのような研究がなされたとのことである。カメラはシルエットを捉え統計的に性別を判断し、加速度計はステップをフーリエ解析するのに用いられ、接触センサでは足の裏の圧力分布を測定することで性別の判定に用いられる。ほぼ90%の判定に成功している。人間以外の動物に関しても観察研究は盛んで、今後バイオメカトロニクスという分野が進むにつれて興味深い進展が見られそうである。

iv. キーノートスピーチ：「コンピュータビジョン」

金出武雄（カーネギーメロン大学教授ロボット研究所所長）

金出教授はロボティクスにおいて世界的なリーディングパーソンであることは有名であるが、とくに視覚センサの分野では幅広い活躍を早くから行われており、今回のシンポジウムでは最適のキーノートスピーカーだといえよう。

よく知られているCMU（カーネギーメロン大学）の“NAVLAB”の話は誠に興味深いものであった。10年以上前からCMUロボット研究所で行われている研究で、普通の道路を自動操縦で走る自動車の開発研究である。重点は視覚認識システムにおかれており、道路の境界を認識すること、陰との区別を行うこと、道路を横切る車や人などの障害物を確実に見い出すこと、しかもこれらを自動車の走行に間に合うようにリアルタイムで処理しなければならないことなど、視覚センシングの問題としては非常に挑戦的なものである。

昨年、最新のNAVLAB（第5号機だったか？）は、ピッツバーグから西海岸のサンノゼまで、高速道路の99%を自動走行したとのことであった。テレビやラジオ、雑誌、新聞などにも取り上げられ、大きな話題になったとのことであった。

CMUのロボット研究所は火星探検用の移動ロボットの開発でも有名であるが、南極における失敗をもとにアラスカのマッキンリーで実験を行い、これも成功したとのことであった。

視覚センサから得られる情報は蓄積されている知識情報と融合して初めて有効な情報となるわけであるから、上記のような移動ロボットにおいては人工知能技術とのかかわりも大きく、これからもセンサ融合、情報融合の分野の大きな研究テーマとなりつづけるであろう。

c. 研究機関訪問調査

①カリフォルニア工科大学(Caltech) 訪問

YU-CHONG TAI助教授の研究室を訪問し、見学、討論を行った。TAI助教授は、カリフォルニア大学バークレイ校において、マイクロ技術についての研究を行い、本学のマイクロ研究の立ち上げのために赴任した。殆ど彼だけのちからでファシリティをきずきあげたようである。

Caltechのマイクロマシン研究所は、公式には、クリーンルーム完成直後の1991年に発足した。現在は、20人の研究者を擁し、10余りの大きなプロジェクトが走っている。主に、電気工学科のSTEELE Laboratory に所属している。自分でプロセスをハンドリングするための施設で、完全に、マイクロマシニングとMEMS(Micro-electro-mechanical system) ために使われている。現在は、2ないし4インチのウエハが加工される。施設の広さは、4,000平方フィートである。フォトリソグラフィと高熱炉のためのクリーンルーム（クラス100）が800平方フィート、バルクマイクロ加工、電子メッキ、マスク製造のためのクリーンルーム（クラス10000）が700平方フィート、金属加工、RIE、パッケージングのための面積が500平方フィート、CAD、計測、テストのための面積が1000平方フィート、事務所が1000平方フィートである。さらに、1995年

に3000平方フィートのクリーンルーム（クラス100--1000）がMOORE Laboratoryに建設された。
主なプロジェクトは、以下の通りである。

- （1）シリコンの機械特性を研究するためのマイクロ曲げテスト。
- （2）バルクマイクロ加工によるニューロチップの製作。
- （3）アクティブニューロン井戸の研究。
- （4）エアークoil磁気アクチュエータの製作。
- （5）集積ハードディスク駆動モーターの製作。
- （6）パーマロイ磁気アクチュエータの製作。
- （7）せん断ストレスセンサーの製作。
- （8）マイクロ熱線風速計の製作。
- （9）完全シリコン集積STM / AFM プローブの製作。
- （10）マイクロ管路流れ特性研究用フローチップの製作。

これらの研究は、以下の団体から支援を受けている。

ARPA, NSF(grants and PYI Award), NIH, AFOSR, Packard and Lucile Foundation
(PackardFellowship), HP, Seagate, Rockwell International, Medtronic, Topomatrix,
JPL (President and DDF Funds), Xerox, BEI Inc. and NSIC / ARPA.

②カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)訪問調査

UCLAでは、KRISTFER S. J. PISTER 助教授、CHANG-JIN KIM助教授、CHIH-MING HO教授、MING C. WU助教授を訪問した。UCLAでは、工学部長がマイクロ技術に対して理解があり、かなりの予算が投じられてマイクロ加工のための設備が充実している。わが国では、マイクロマシン技術は、ロボットなどのメカトロニクスとの結び付きが強いが、UCLAでは、流体力学とか、光学など非常に広い分野の研究者がマイクロ技術に注目しており、これをうまく使って、何か新しいことをやってやろうと、虎視眈々狙っているという感じが如実に感じられた。

「KRISTFER S. J. PISTER助教授の研究室」

彼は、カリフォルニア大学バークレー校でマイクロ技術の研究を行い、マイクロ加工技術を身につけたという。近いうちに古巣へ戻るとのこと。電気工学科所属であるが、かなりマイクロ機械構造物に興味を持っているようであった。主な研究テーマあるいは製作、加工品を列挙しておく。

- （1）多関節ロボットの各種部品
- （2）表面マイクロ加工によるリニアステッパ
- （3）マイクロ反射鏡
- （4）心臓筋肉の収縮力計測のためのMEMS力センサー

- (5) マイクロ静電気共振子の低温特性の研究
- (6) キセノン2 フッカ物によるマイクロ加工
- (7) 標準CMOSにおける3Dマイクロ光工学
- (8) 標準CMOSにおける単体3軸加速度計

「CHIH-MING HO教授の研究室」

彼は、流体力学の専門家であるが、マイクロ技術を用いて新しいことを試みたいと考えて、南カリフォルニア大学(USC) からUCLAへ移ってきたという。日本からも研究者がしばしば訪問するとのことで、我々が訪問したときも、一人の日本人の流体力学研究者が長期滞在して、共同研究を行っていた。

わが国では、殆ど何もなされていないが、マイクロ流体力学の発展の可能性を如実に示そうとしている姿勢が非常に新鮮であった。彼の考え方は、” REVIEW: MEMS and Its Application for Flow Control (Transaction of ASME, Journal of Fluid Engineering, Vol.118, SEPTEMBER 1996 / 437-447 (by Chih-Ming Ho & Yu-Chong Tai) に詳しく述べられている。この論文の共著者のYu-Chong Tai氏は前述のChaltechの助教授で、この二人が、マイクロセンサーの製作者と利用者という関係になっており、非常にうまく連携がとれているところが素晴らしいと思った。

彼は、流体力学以外にもマイクロセンサーの応用に関して研究をしており、その範囲は広いが、ここでは、流体に関係の深い3分野を上げておく。

- (1) マイクロ熱線風速計による壁面近辺の流速測定。
- (2) マイクロせん断力(Shear-Stress)センサーによる境界層の測定。
- (3) 磁気によって駆動されるマイクロフラップ。

これらの技術によって、航空機の翼の表面境界層流れをコントロールすることを目的にしている。ラジコンの3角翼の飛行機をこの方法でコントロールする実験のビデオを見せてもらったが、角翼にたった一つだけのマイクロフラップをつけて翼表面の摩擦抵抗をコントロールするだけで、宙返りや、ローリング制御が、いとも簡単に行えることに驚いた。

「MING C. WU助教授の研究室」

彼は、ELECTRO-OPTICS, OPTOELECTRONICS の専門家であるが、マイクロ技術を利用して、一枚のシリコンウエハの上に完全な光学系を作り上げようとしている。これを、” Micro-Optical Bench on a Chip”と呼んでいる。

Bench には、ダイオードレーザー、マイクロフレネル(Fresnel) レンズ、ロータリービームスプレッター、インテグレイテッドホトディテクター、角反射ミラーが形成できるようになっており、たとえば、光ディスクピックアップヘッドなどがウエハの上に一体として作り上げら

れるのである。

寸法についていえば、たとえば、マイクロフレネルレンズは、直径180mm、焦点距離500mm、光軸はシリコンウエハの表面から254mm上方。シリコンウエハの上にすべてを作り上げると、相対的な位置の狂いがでないので、非常に都合がよいとのことである。光通信のデバイスとして、マイクロミラーなどの応用については、わが国でもよく見聞きしていたが、このような技術については始めて接したので、新鮮な印象を受けた。

「CHANG-JIN KIM 助教授の研究室」

彼は、UCLAのクリーンルームの維持、管理の責任を持っている。設計も彼によるものである。彼も、カリフォルニア大学バークレー校においてマイクロ技術の研究を行って、UCLAのマイクロ研究の立ち上げに協力するために移籍したとのことである。

来年度から、学部学生にマイクロ技術の演習をやらせるとのことで、その準備に忙しそうであった。簡単なマイクロストラクチャーの設計から、製造プロセス設計、プロセス実行まで一連の過程をすべて経験させて、マイクロファブリケーションの素養を全員に与えたいとのことであった。主に機械工学科、電気工学科の学生を対象にするとのことである。そのために、ティーチングアシスタントをかなりの人数用意するとのことである。

③カリフォルニア大学バークレー校(UC Berkeley) 訪問

カリフォルニア大学バークレー校は、マイクロ技術に関してはアメリカばかりでなく、世界のリーディングパートをつとめてきた機関で、民間との協力体制も整っており、大学の外に特別の設備を持っていると聞く。この事情は多くのところで紹介されているので、今回は訪問することはしなかった。我々の研究活動に関係の深い以下の二つの研究室を訪れた。

「RONALD S. FEARING 助教授の研究室」マイクロマニピュレータを作成したのが彼の一つの成果である(Robotics Research, The Seventh International Symposium, edited by George Giralt and Gerhard Hirzinger, Springer, 1996, 570-581)。これは、マイクロ技術によって、基板の上にマイクロコイルアレイ(ひとつのコイルの直径2、3ミリ)を作成し、適当なコイルに電流を流して磁界を作り、磁化された対象物を目的位置まで移動させようとするもので、マイクロ機構の組み立てや、小さい部品の移動などに応用しようとするものである。もうひとつ、彼が力を入れているのは、マイクロサージェリー(マイクロ外科手術)システムである。手先の駆動には、作動流体として水を用いた流体駆動システムを用いている。マイクロポンプ、マイクロバルブシステムなど、今後開発しなければならないものは多いが、世界中で研究の進んでいる分野であり、今後が期待できるようであった。

彼は、Department of Integrative Biology という学科に属しており、主に、爬虫類や節足動物の身体運動や歩行運動の解析を専門としている。我々は、昆虫の歩行解析を一つの研究主題としているので、以前から親交があり、今回は生物からのいろいろな情報のピックアップの仕方を教えてもらおうと訪問した。ゴキブリの神経電流の計測方法などにもかかれらなりのノウハウを獲得しており、非常に参考になった。過重分布が計測可能な平板の上で、トカゲを歩行させ、4本の足が発生している垂直抗力、摩擦力などを測定し、体の動きを捕えた画像とあわせて、歩行運動の詳細な解析を行っていた。カニやムカデについても、精密な高速度撮影を行い、種々の興味ある結果を得ていた。

また、生物の動きを解析するためのデータ収集を目的とする機器システムを一箇所に集めることを行っており、このシステムは、たとえば、映画製作のためにアニメーションを作成するような場合に、撮影会社に貸し出すようなことも考えているとのこと、興味深かった。

d. むすび

あわただしい一週間の調査研究であったが、センサー技術、マイクロ技術、バイオメカトロニクスの最先端にいくらか触れることができた。西海岸では、あまり人が訪れることが少ないような研究室を訪問したので、目新しい情報にも触れることができた。

(東京大学 三 浦 宏 文)

海外技術動向調査研究旅程

日数	年月日 平成8年12月	旅 程	宿泊地
第1日	9日(月)	成田発----->ワシントン着	*ワシントン国際会議出席
第2日	10(火)	*国際会議出席	ワシントン
第3日	11(水)	国際会議出席 ワシントン発-->ロサンゼルス着	ロサンゼルス
第4日	12(木)	カリフォルニア工科大学 ロサンゼルス YU-CHONG TAI助教授訪問 UCLA (カリフォルニア大学ロサンゼルス校) KRISTOFER S. J. PISTER助教授 CHANG-JIN KIM助教授 CHIH-MING HO教授 MING C. WU助教授	訪問
第5日	13(金)	カリフォルニア大学 サンフランシスコバークレイ校 RONALD S. FEARING助教授	ROBERT J. FULL教授 訪問
第6日	14(土)	サンフランシスコ発--->機中泊	
第7日	15(日)	成田着*IEEE / SICE(計測自動制御学会)/ RSJ (日本ロボット学会) 主催の"1996 International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System" (知能システムのための複数 センサー融合および統合に関する国際会議)	

(2) ニューラルネットワークとイメージ処理および生成

a. Electronic Imaging' 97国際会議

1997年2月9日より14日までアメリカSan Jose Convention Centerにて開催されたElectronic Imaging' 97に2月10日-13日の間参加した。このConvention Centerにおける国際会議は、もともと、SPIE(The International Society for Optical Engineering)の主催するPhotonics Westに、IS&T(The Society for Image Science and Technology)主催のElectronic Imagingが合体した形で運営されている。私の出席したのは後者であるが、このElectronic Imaging自体次の8つに分かれている。

3D Displays

2D Displays

Electronic Imaging Systems

Document Imaging

CCD Images

Multimedia Processing and Applications

Visual Communications and Image Processing

Image Processing Methods

さらに、各々実体は数セッション並列になっており、連日参加しても1部を垣間見ることになる。私の参加したImage Processing Methodsの中のReal-Time Imaging IIとApplications of Artificial Neural Networks in Image Processing IIの2つの会議を中心に報告したい。(いずれも、IIがついているのは、昨年度に引き続いて、という意味である。)

リアルタイムイメージング (Real-Time Imaging II)

セッションは Image Understanding, Tracking, Video, Real-Time Imaging Systemの4つであった。

イメージ理解 (Image Understanding)は特徴抽出、パターンマッチングが主で、トップダウン的な「理解」への関心は低い。リアルタイムイメージングシステム (Real-Time Imaging System)は非常に具体的なシステムの発表が主であった。

いずれも、オーソドックスな手法を中心とし、それを如何にリアルタイムの条件を満たすように、インプリメントするか、というものが多い。例えば、イメージフィルタリングのアルゴリズムにしても、特徴抽出アルゴリズムの改良とそのインプリメンテーションという筋になる。

同じイメージ処理でも、ニューラルネットワーク関連は、次の会議が中心になっている。

イメージ処理における人工ニューラルネットワークの応用

(Applications of Artificial Neural Networks in Image Processing II)

セッションの構成は次のとおりであった。

Neural Networks Architecture for Image Coding

Neural Image Segmentation, Compression, and Texture Classification

Neural Networks for Object Recognition and Classification

Optimization and Learning

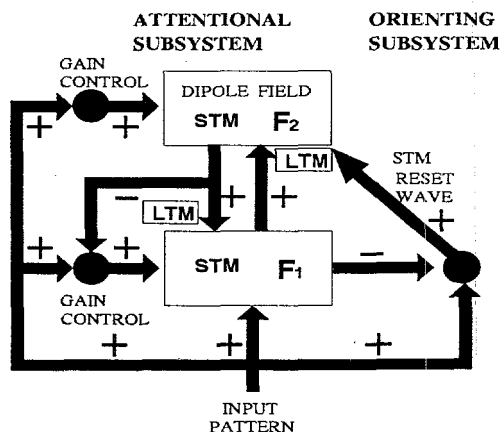
全体を通じていえることは、人工ニューラルネットとしては工夫の凝らされたものもあったが、いろいろな技術の組み合わせを試みているにすぎないという感じは否めない。この中で脳型コンピュータの第2世代を考えるのに参考となるART (Adaptive Resonance Theory、適応共鳴理論) ネットに関する発表について紹介したい。

ARTネット(Grossberg Net ともいう)は第A3.(2)-1図のような構成になっている。STM (短期メモリ) は入力側 (下) では入力用バッファ、上では主に照合 (パターンマッチング) を行う。LTM (長期メモリ) は上下間の相互変換を行う。この上下の間で、仮設・検定という人間の思考サイクルと類似のものを実現する。パターン認識については共鳴理論に基づく理論づけがなされている。ARTネット自体は10数年以上前から知られているものであるが、ARTのハードウェア化、チップ化という試みは、アメリカでは結構続けられている。

このようなARTネットのハード化の方向における今年の発表について、もう少し、紹介したい。

Multisensor Integration and Image Recognition using Adaptive Resonance Theory by
Steven M. Singer (Naval Air Warfare Center, Aircraft Division, Lakehurst, NJ)

内容を、一言でいえば、分散型 ARTである。CCDから取り込んだイメージ (ビットマップ

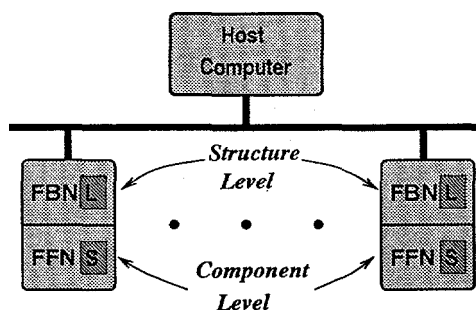


第A3.(2)-1図 ARTネット

96x128) を 19x25 (ただし、実験は 3x5) の単位の ART ネットに分割して処理し、結果をマスター ART で統合しようとしたものである。ニューラルネットの特徴を生かした処理は小さな例では上手くいっても、限界のあることが多い。イメージ処理はそのような例であり、限界打破の一つは巨大なニューラルネットの実現を目指すという方向であるが、もう一つはこの論文のように、小さい基本ニューラルネットの集合により、現実的なサイズのイメージ処理に対応させる方向である。ただし、後者のように、分散した処理結果を統合させるためには、ニューラルネットモデルの拡張を伴う。この分散型 ART の場合、統合のところに Fuzzy Logic を導入しており、Fuzzy ART と称している (発表の主眼はここにある)。実験例は Aircraft (F18) の離発着時の識別をリアルタイムで行おうとするものであった。

このような、分散・統合型のシステムは第 A3. (2)-2 図のように描くことができる (プロシーディングは後日発行されるタイプの会議であるため、図はいずれも報告者が説明のために用いているものであり、発表者のものではない)。イメージ処理をパターン認識のレベルから、パターンを生成している構造の認識まで高めることが出来れば、「パターン理解」と呼ぶことが出来る。パターンを生成している構造を特徴化するアルゴリズムが明確であれば、アルゴリズムによる理解も可能であるが、そのようなアルゴリズムが明確でない場合も多い。ニューラルネットからのアプローチはそのような場合に適している。

パターンを生成している構造を、空間的なものと時間的なものに分類したとき、本論文は空間的な構造を対象としていると看做することができる。ただし、構造の議論を積極的に行うという立場ではなく、処理するには大きすぎるパターンを分割するというのが主眼である。図附 2.2.2 のような分散アーキテクチャにはなっているが、空間的あるいは時間的な構造の認識として利用しているわけではない (Real-Time Imaging II における筆者らの発表は同じアーキテクチャを構造の認識のために用いている)。事実、扱っている Aircraft も 1 台であり、この場合は上手くいくとのことであった。Aircraft が 2 台以上になると、構造が陽に入ってくる。「2 台の場合上手くいくか?」という会場からの質問には「どうなるかはわからない」と答えていた。今後の問題ということであった。



FBN :Feedback Network

FFN :Feed-forward Network

第 A 3. (2)-2 図 分散・統合型システム

b. 研究機関訪問調査—Stanford UniversityのProfessor John Koze—

2月14日午後、Stanford Universityの Professor John Kozaを訪問した。(KozaグループのForrest H Bennett III 研究員も同席された。) Professor John Kozaは、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GAと省略) の創始者であるJohn Holland (University of Michigan) のもとで PhDをとられたことからわかるように、GA分野の研究者であり、現在、GAを発展させた GP(Genetic Programming)の第一人者として、学界をリードされている(昨年、今年とGenetic Programming の国際会議を立ち上げられ、General Chairとしてご活躍である)。

ご自身の研究の分野は、3つに大別される。

- 1) GPによる複雑な構造の自動生成
- 2) GPによる分子生物計算モデルへの取組み
- 3) 汎用GPツールキットの作成

ここでは、GAとGPの違いについて説明しておきたい。GA (Genetic Algorithm)を手続き風に書くと

Procedure GA:

begin

 initialize Population $P(0)$;

 evaluate $P(0)$;

$t=1$;

 repeat

 select $P(t)$ from $P(t-1)$;

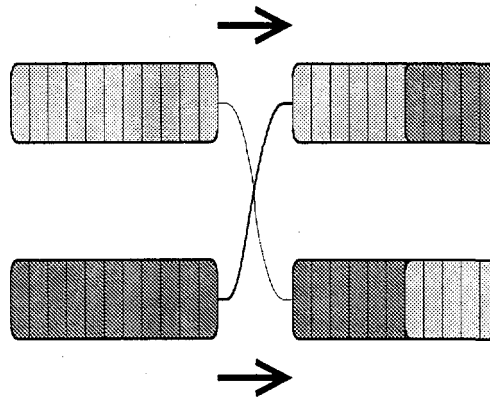
 recombine $P(t)$;

 evaluate $P(t)$;

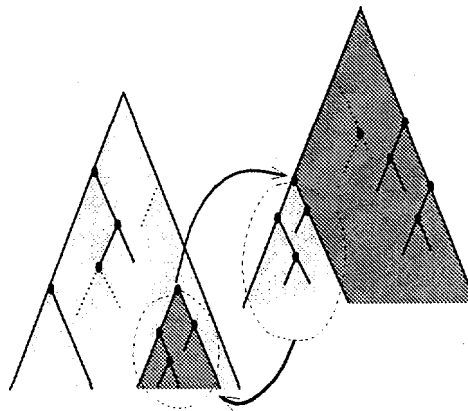
 until (terminate condition);

end. のように表現される。

ダーウィニズムに基づき、遺伝子プールは初期世代 $P(0)$ から、選択(select)、再結合(recombine)、評価(evaluate)を行い、次の世代 $P(1)$ へ引き継がれる。これを、 $P(2)$, $P(3)$, $P(4)$, と繰り返す。筆者は1989年頃にこの一見奇妙な(?) アルゴリズムを知り、著書(1)の中で紹介したことがある。その後は、たまに(ご都合的に)使うというくらいのものであったが、EHW(Evolavable HardWare)にも使われるようになって、「なるほど」と思うようになった。GP(Genetic Programming)については、GAを具体的にプログラムに利用したもの、ぐらいに思っていたが、今回、Professor John Kozaを訪問し、GAとGPの間には図附2.2.3 と第A3.(2)-3図のような違いのあることが確認できた。



第 A 3. (2) - 3 図 GAにおける交配



第 A 3. (2) - 4 図 GPにおける交配

GAの操作 (recombine)としては、交配 (crossover)、突然変異 (mutation)などが用いられる。交配を例にとると、GAでは遺伝子列にあたるストリング (String)を対象とするから、交配は図附2.2.3のようにあらわされる。一方、GPは表現木 (Expression Tree)を対象とするので、交配は第A3.(2)-4図のように部分木のつけかえ操作となる。表面上は、ストリングが機になっただけのように見えるが、ストリングでは「要素を対象とした操作」にすぎなかったのが、木を対象とすることで、「構造への操作」に進展している。ただし、構造の扱いについては、次の2とおりがある。

[表現木が陽な場合]

構造を文法 (Grammar)的に記述する場合が相当する。導出木 (Derivation Tree) を考えれば、交配は図附2.2.3のような木の上での交配となる。John KozaのいうGPにおけるプログラムはまさに文法的記述そのものであるから、表現木は陽であり、その交配も直接表現木上であらわされることになる。

注意すべきは、入力データは要素列 (表現木でいえば葉 (leaf)の列) であり、要素列 (instance)とのマッチングの良い表現木の構成が自動化されるところにある。むろん、表現木

をつくるための基本単位（基本プロセジャー）は与えておくが、（人工知能AIにおける知識表現とは異なり）表現木の操作を行う手続きが陽にあるわけではない。逆にいえば、要素列（instance）の集合から、知識表現に相当する表現木が求められている。（つまり、帰納学習の一例でもある。）なお、GPの場合、表現木をつくるためのプロセジャーは基本のものだけでなく、既習得のものも用いられる。この Reuseは実用上重要な役割をする。

[表現木は陽でない場合]

構造の記述を文法と双対な関係にあるオートマトンで行う場合が相当する。オートマトンと文法の関係はよく知られているが、帰納学習の可能なクラスは有限オートマトン（とその周辺）である。その中で状態数を1次元（あるいは2次元）面に拡張したセルラーオートマトンは、よくGPの対象として用いられている。オートマトンの場合、その振舞いと導出木は裏表の関係であるから、陽に表現木は見えなくても同じことである。オートマトンは構造そのものであるから、入力サンプル列から構造を獲得する帰納学習そのものをGPが行っている。

GAを発展させたGPには次のような特徴がある。

1) 類別のみならず、生成が行える。

この特徴自体はGAの特徴の継承であるが、パターン認識のみならずパターン生成が可能である。パターン生成の例は、セルラーオートマトンを用いるライフゲームにみられる。

2) 構造が導入されたため、応用範囲が拡大した。

GAでは遺伝子列であるストリングが対象であるため、応用範囲が限定されるきらいがあった。もっとも、GAを直接適用し難い例の場合、自然にGAを修正・拡大する必要が生じる。これを明示したのがGPであるということも出来る。

3) 評価に同値類を利用できる。

GAでは、評価(evaluate)のためにfitness関数を用いるが、fitness関数の適否がGAの性能を左右する。GPの場合、fitness関数がなくても、構造から与えられる同値類がある程度の評価を与えることも可能である。もちろん、fitness関数があれば、さらに都合のよいことはいうまでもない。

以上の特徴は、脳型コンピュータを考える場合、有用であろう。脳のモデルを記号表現に対応できた時点ではGPとの整合性はよくなるから、将来予測をGPによる生成で行うことも可能となろう。

もっとも、脳の数式モデルからのカオス的な方向でのアプローチとの比較は必要であるが、各々の長所を生かした棲み分けが考えられよう。

GPによる複雑な構造の自動生成

Professor John Kozaのところでは「GPによる複雑な構造の自動生成」として、アナログ電子回路を対象とされている。これは BHWまさしく進化していくハードウェアである。複雑な系の構造をGPで処理する場合、計算パワーは強力なものを必要とする。Professor John Kozaの

研究室では、Power PCプロセッサ64台からなる並列コンピュータを用いて処理している。Forrest H Bennett III 研究員から、ハードウェアの説明をしてもらったが、この並列コンピュータとトランスピュータが専用空調室に格納されていた。操作はワークステーション6台からなされる。(これら研究用のコンピュータ装置はStanford大にではなく、郊外の自宅に設置されていた。)

いろいろ質問することでGPについて学習させて戴いたが、「GPが構造を導入しているのは、AIでDomain Knowledgeを導入するのと同じでないのか？」という質問には「それは違いうだろう」という答えが返ってきた。こちらも、反語的に質問したつもりであったので、安心した。Domain Knowledgeの導入はDomain Independentという特徴を壊す方向であるのに対し、「構造の導入は依然としてDomain Independentという特徴を堅持する」と著者はかねがね主張しているからである。

脳型コンピュータの研究からみれば、メタ理論的なアプローチであるが、内容は非常に興味深かった。限られた時間であったが、(国際会議よりも)面白かった。なお、GPについての詳細は文献(2)を参照されたい。

訪問に快く応じて戴いたProfessor John Kozaならびに今回の海外技術調査のご支援を戴いた新機能素子研究開発協会に謝意を表する次第である。

(広島大学 阿 江 忠)

参考文献

- (1) 阿江忠 ; VLSIニューロコンピュータ、(コラム8) Genetic Algorithm、pp.188-190、共立出版(1991)
- (2) J.Koza; Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs, MIT Press (1994)

海外技術動向調査研究旅程

日数	年月日	旅程	宿泊地
第1日	平成9年2月 8日(土)	関空 発 → サンフランシスコ着	サンフランシスコ(米)
第2日	9日(日)	→ サンノゼ 国際会議 出席 国際会議 出席	サンノゼ(米) " (米) "
	↓		
第7日	14日(金)	サンノゼ発 → サンフランシスコ着 スタンフォード大学 訪問	サンフランシスコ(米)
第8日	15日(土)	サンフランシスコ発 →	機中泊
第9日	16日(日)	関空 着	