

**(独) 科学技術振興機構  
戦略的創造研究推進事業  
チーム型研究(CREST)  
追跡評価用資料**

**研究領域 「脳を創る」**

**(1997-2004)**

**研究総括 甘利 俊一**

**2011.9.15**



## 目次

第1章 調査概要.....	1
1-1 調査の対象と調査方法 .....	1
1-1-1 研究領域の概要 .....	1
1-1-2 調査方法 .....	2
1-2 全研究課題の調査の纏め.....	6
1-2-1 研究者情報 .....	6
1-2-2 研究助成金 .....	9
1-2-3 論文 .....	10
1-2-4 特許 .....	15
1-2-5 受賞 .....	19
1-3 代表事例について .....	22
第2章 研究領域における研究の継続・発展状況.....	23
2-1 研究領域としてのねらいと達成状況.....	23
2-2 研究課題ごとの研究のねらいと研究期間中の達成状況および研究期間終了後の継続・発展の状況.....	24
2-2-1 脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装（研究代表者：合原 一幸） .....	24
2-2-2 MEGによる人間の高次脳機能の解明（研究代表者：武田 常弘） .....	25
2-2-3 脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発（研究代表者：小柳 光正） .....	26
2-2-4 言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築（研究代表者：酒井 邦嘉） .....	27
2-2-5 聴覚の情景分析に基づく音声・音響処理システム（研究代表者：河原 英紀） .....	28
2-2-6 運動の学習制御における小脳機能の解明（研究代表者：永雄 総一） .....	29
2-2-7 自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発（研究代表者：中村 仁彦） .....	30
2-2-8 時間的情報処理の神経基盤のモデル化（研究代表者：深井 朋樹） .....	31
2-2-9 発声力学に基づくタスクプランニング機構の構築（研究代表者：誉田 雅彰） .....	32
2-2-10 感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現（研究代表者：石川 正俊） .....	33
2-2-11 行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明（研究代表者：銅谷 賢司） .....	34
2-2-12 海馬の動的神経機構を基礎とする状況依存的知能の設計原理（研究代表者：山口 陽子） .....	35
第3章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的および経済的な波及効果.....	36
3-1 脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装（研究代表者：合原 一幸） .....	36
3-1-1 本研究期間中における状況 .....	36

3-1-2	本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	43
3-1-3	研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果.....	44
3-1-4	研究成果から生み出された社会的・経済的な効果・効用および波及効果.....	49
3-2	脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発(研究代表者:小柳 光正)	51
3-2-1	本研究期間中における状況 .....	51
3-2-2	本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	55
3-2-3	研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果.....	59
3-2-4	研究成果から生み出された社会・経済的な効果・効用および波及効果.....	64
3-3	言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築(研究代表者:酒井 邦嘉)	67
3-3-1	本研究期間中における状況 .....	67
3-3-2	本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	70
3-3-3	研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果.....	75
3-3-4	研究成果から生み出された社会・経済的な効果・効用および波及効果.....	77
3-4	自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発(研究代表者:中村 仁彦)	79
3-4-1	本研究期間中における状況 .....	79
3-4-2	本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	83
3-4-3	研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果.....	87
3-4-4	研究成果から生み出された社会的、経済的な効果・効用および波及効果.....	90
3-5	行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明(研究代表者:銅谷 賢治)	91
3-5-1	本研究期間中における状況 .....	91
3-5-2	本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	97
3-5-3	研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果.....	98
3-5-4	研究成果から生み出された社会的、経済的な効果・効用および波及効果.....	102
3-6	詳細調査の概要とまとめ.....	103
3-6-1	詳細調査の概要 .....	103
3-6-2	まとめ.....	106

## 第1章 調査概要

### 1-1 調査の対象と調査方法

#### 1-1-1 研究領域の概要

##### (1) 戦略目標

###### 「脳機能の解明」

脳は多くの画期的な発見が行われる可能性を秘めている研究対象であり、21世紀に残された数少ない巨大フロンティアのひとつである。また、脳科学の進歩は、人間たる所以の根元である脳を知ることにつながり、脳を知るとは即ち人間を理解することにつながる。また、脳科学研究の成果は、脳の老化の防止、アルツハイマー病等脳・神経系の困難な病気の克服、脳の原理を生かしたコンピュータやロボットの開発による新技術・新産業の創出につながる。このような意味で脳科学の推進を図り、脳機能の解明を行うことは、正に人類的課題となってきた。

したがって、戦略目標を、人間の理解の基礎として脳の働きを知るとともに、新技術・新産業の創出にも繋がることを念頭においた「脳機能の解明」とする。

なお、この脳機能の解明を行うためには、脳の働きの理解を目指す「脳を知る」、脳の老化、疾病のメカニズムの理解と制御を目指す「脳を守る」、脳型の情報処理システムの理解と構築を目指す「脳を創る」といった研究領域において、明確な研究目標を設定し、計画的に取り組むことが必要である。

##### (2) 領域名称

###### 「脳を創る」

##### (3) 領域の概要

脳機能の解明のうち、脳型情報処理システムの構築を目標とする研究を対象とするものである。具体的には、「脳型デバイス・アーキテクチャ（学習、連想記憶など）」、「情報生成処理（認知認識、運動計画、思考、言語、評価、記憶など）システム」の構築を目標とする。

##### (4) 研究総括

研究総括は、戦略目標達成に向けた研究を推進するため、バーチャルインスティテュートとなる研究領域の長として、採択課題の決定、研究計画（研究費、研究チーム編成を含む）の調整、研究代表者との意見交換、研究への助言、課題評価、その他必要な手段を通じ研究領域の研究マネジメントを行う。本領域の研究総括の所属機関等を表1に示す。

表 1 研究総括（敬称略）

氏名	所属（当時）	所属（現）
甘利 俊一	(独)理化学研究所 脳科学総合研究センター グループディレクター	(独)理化学研究所 脳科学総合研究センター 脳数理研究チーム 特別顧問

(5) 研究代表者と研究課題一覧

表 2～表 4 に、本調査の対象とした各研究課題の研究代表者名と研究課題名を、採択年度ごとに一覧の形に纏めて示す。採択年度は平成 9 年度から平成 11 年度までの 3 年間に亘っており、研究期間は各々平成 9 年 11 月～平成 14 年 10 月、平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月、平成 11 年 11 月～平成 17 年 3 月（石川研究代表者の課題のみ、平成 16 年 10 月まで）であった。

表 2 研究代表者と研究課題一覧（平成 9 年度採択分）

No.	研究代表者名	研究課題名
1	合原 一幸	脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装
2	武田 常広	MEG による人間の高次脳機能の解明
3	小柳 光正	脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発
4	酒井 邦嘉	言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築
5	河原 英紀	聴覚の情景分析に基づく音声・音響処理システム

表 3 研究代表者と研究課題一覧（平成 10 年度採択分）

No.	研究代表者名	研究課題名
6	永雄 総一	運動の学習制御における小脳機能の解明
7	中村 仁彦	自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発
8	深井 朋樹	時間的情報処理の神経基盤のモデル化
9	菅田 雅彰	発声力学に基づくタスクプランニング機構の構築

表 4 研究代表者と研究課題一覧（平成 11 年度採択分）

No.	研究代表者名	研究課題名
10	石川 正俊	感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現
11	銅谷 賢治	行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明
12	山口 陽子	海馬の動的神経機構を基礎とする状況依存的知能の設計原理

1-1-2 調査方法

図 1 は調査手順をフローチャートの形に纏めたものである。まず、(1)調査を実施するに当たって必要な事前情報を把握する目的で事前調査を行い、(2)事前調査結果を中間報告として取り纏め、(3)研究総括へのヒアリングを実施した。目的は、代表的課題の選定、および領域を全体として捉えた場合の成果・意義等を明らかにすることであった。その際、事前調査結果も参考資料として提供した。次いで、(4)代表的課題について、本研究終了後の継続・発展の状況や、研究成果から生み出された波及効果等を詳細に調査する目的で、研究代

表者へのインタビューを実施し、(5)以上の調査結果を取り纏めて、最終的に本追跡調査報告書を作成した。

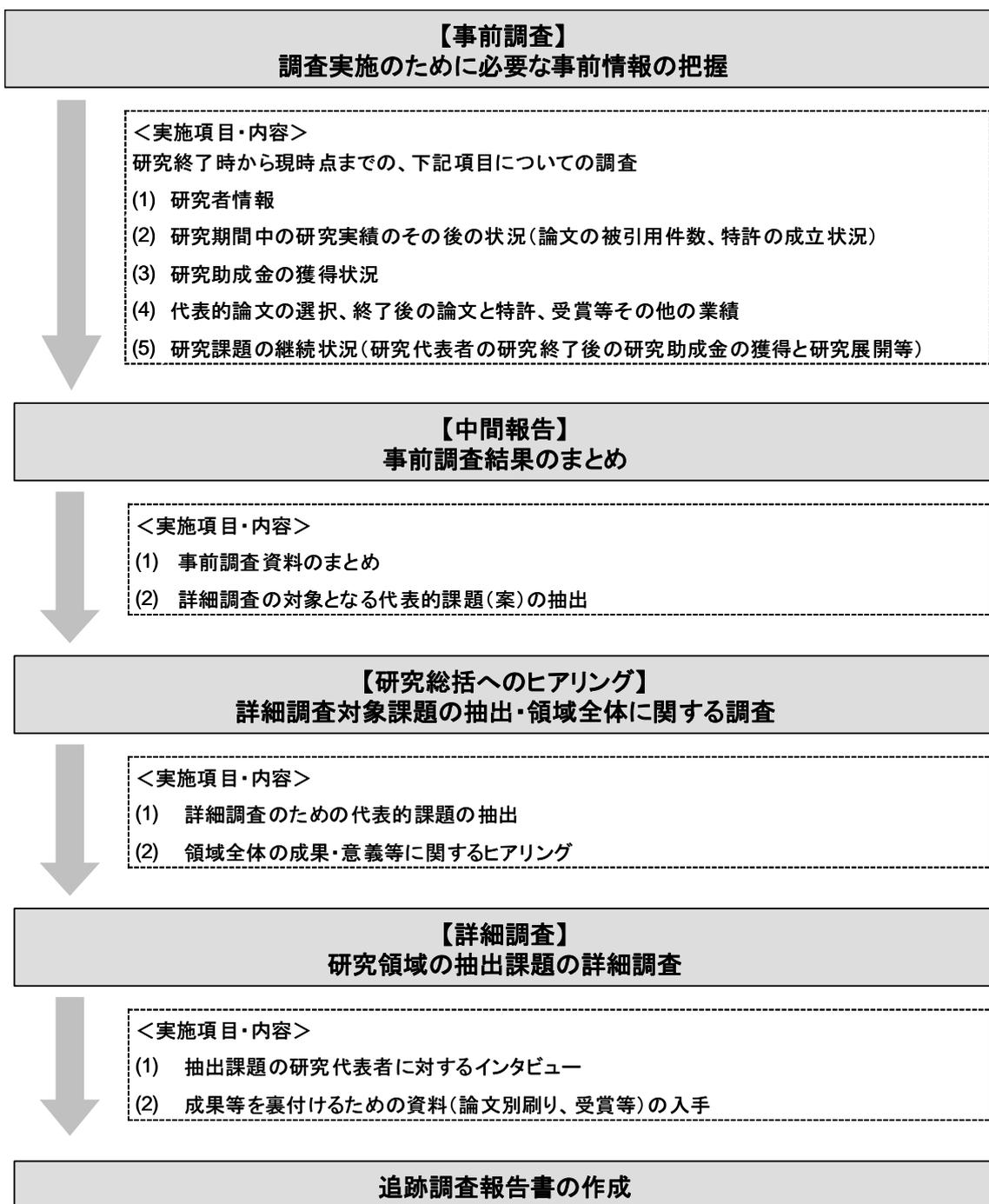


図 1 追跡調査の実施フローチャート

## (1) 事前調査

事前調査として、研究領域終了から本調査時点までの概要を把握するための文献調査、研究業績を把握するための各種データベースによる調査を行った。

### A.文献調査

調査対象とした文献は、研究領域に関連する報告書、研究領域の参加研究者による解説文献、原著論文等であった。

研究領域に関連する報告書としては、事後評価報告書、研究終了報告書を主たる調査対象とした。その他、中間評価報告書、研究年報、CRESTのホームページも適宜参照した。

解説文献、原著論文等については、研究終了報告書に掲載されている論文、文献の中から選ぶことを基本としたが、場合によってはWeb上での調査も行い、研究代表者のホームページを参照した。

### B.各種データベース調査

論文、特許、受賞、競争的資金獲得状況等について、Web情報、各種データベース等を参照して調査した。

#### ①研究者情報

各研究課題の研究代表者については、本研究採択時、本研究終了時、および調査時点での所属・役職、連絡先等を調査した。情報ソースとしては、研究領域に関連する報告書、科学技術振興機構殿（以下、JSTと略記）から提供していただいた資料、研究代表者のホームページを参照した。

#### ②研究助成金

各研究課題の研究代表者が、本研究開始以降に獲得した研究助成金について調査した。内閣府の競争的研究資金制度一覧<sup>1</sup>に掲載されている制度名を対象として、それぞれの制度のデータベースを参照した。

#### ③発表論文

本研究に関連して発表された論文の被引用件数は、トムソン・ロイター社のWeb of Scienceを用いて調査した。調査対象の論文は、本研究期間中の発表論文、本研究終了後の論文に大別される。本研究期間中の論文としては、各研究課題の終了報告書で「主な研究成果」としてリストアップされている論文を調査対象とした。本研究終了後の論文としては、研究代表者が著者となっている論文に限定し、更に本研究との関連性があるものを調査対象とした。具体的には、研究代表者名と本研究のキーワード、および本研究終了後の期間を検索条件としてWeb of Scienceを用いた検索を行った。得られた論文リストに

---

<sup>1</sup> <http://www8.cao.go.jp/cstp/compefund/index.html>

ついて書誌事項および抄録をチェックし、同姓同名の他者の論文などのノイズを排除した。本研究と関連性がある論文に絞り込むに当たってのポイントはキーワードの選択であった。キーワードは事後評価報告書、研究終了報告書および本研究期間中論文の検索結果として得られる抄録を参考にして、期間中の論文が全て検索できるようなキーワード群を選定し、それらを「OR」で連結した。

論文の被引用件数については、被引用件数上位1%に含まれているか否かについても調査した。トムソン・ロイター社のESI (Essential Science Indicator)<sup>2</sup>では、直近の11年間に発表された論文について、論文の発表年、論文の属する学術分野ごとに被引用件数の上位1%にあたる被引用件数を公表している。この値以上の被引用件数を得ている論文を、被引用件数上位1%に含まれる論文として抽出した。

#### ④特許

本研究期間中および終了後の出願特許について、海外等への関連出願の有無、調査時点におけるそれらの登録状況を調査した。本研究期間中における出願特許としては、各研究課題の終了報告書で「主な研究成果」としてリストアップされている出願特許を調査対象とした。本研究終了後については、研究代表者が発明者となっているもので、終了時点から調査時点までの期間に出願された特許を調査対象とした。

使用したデータベースは、国内出願特許については、日本国特許庁の電子図書館の検索データベース<sup>3</sup>、国際出願特許については、欧州特許庁の esp@cenet<sup>4</sup>であった。先ず国内出願特許について登録状況等を調査し、各々の国内出願特許に対して優先権主張関係で関連のある国際出願特許を esp@cenet で調査した。国内出願特許と、優先権主張関係で関連のある出願特許の群を1つのパテントファミリーとして整理した。

#### ⑤受賞

本研究期間中については、各研究課題の終了報告書で「主な研究成果」としてリストアップされている受賞を整理した。さらに研究代表者のホームページを参照して、本研究期間中および終了後の本研究に関連のある受賞について追加調査した。

### (2) 研究総括へのヒアリング

本研究領域発足当時の脳の研究の現状と本領域のねらい、個々の研究課題の成果、また、研究領域としての成果と意義を伺った。さらに、事前調査資料を基に、終了後の研究の継続・発展、社会的あるいは経済的な波及効果についても意見を求め、主要な研究課題を抽出した。

<sup>2</sup> <http://www.thomsonscientific.jp/products/esi/>

<sup>3</sup> <http://www.ipdl.inpit.go.jp/homepg.ipdl>

<sup>4</sup> [http://ep.espacenet.com/advancedSearch?locale=jp\\_EP](http://ep.espacenet.com/advancedSearch?locale=jp_EP)

### (3) 抽出課題の詳細調査

事前調査結果ならびに研究総括へのヒアリングを参考に、詳細調査の対象となる課題 5 件を抽出した。5 課題の研究代表者の研究室を訪問し、本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況や、研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果、研究成果から生み出された社会的、経済的な効果・効用および波及効果等をインタビュー形式で調査した。調査時には事前調査結果を取り纏めた資料を提供し、研究代表者の参考にした。

## 1-2 全研究課題の調査の纏め

### 1-2-1 研究者情報

各研究課題の研究代表者について、本研究採択時、終了時、および調査時点での所属および役職を表 5 に纏めた。

表 5 研究者情報

No	採択年度	研究代表者	所属（本研究採択時）	所属（本研究終了時）	所属（現在）
1	H09	合原一幸	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授	東京大学 生産技術研究所情報・エレクトロニクス系部門 教授
2		武田常広	工業技術院生命工学工業技術研究所 人間情報部行動制御研究室 室長	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
3		小柳光正	東北大学 大学院工学研究科 教授	東北大学 大学院工学研究科 教授	東北大学 大学院工学研究科バイオロボティクス専攻 教授
4		酒井邦嘉	東京大学 大学院総合文化研究科 助教授	東京大学 大学院総合文化研究科 助教授	東京大学 大学院総合文化研究科関連基礎科学系 准教授
5		河原英紀	和歌山大学 システム工学部 教授	和歌山大学 システム工学部 教授	和歌山大学 システム工学部デザイン情報学科 教授
6	H10	永雄総一	自治医科大学 医学部 助教授	自治医科大学 医学部 助教授	(独)理化学研究所 脳科学総合研究センター回路機能メカニズムコア チームリーダー
7		中村仁彦	東京大学 大学院工学系研究科 教授	東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授	東京大学 大学院情報理工学系研究科 工学部機械情報工学科 教授

8		深井朋樹	東海大学 工学部電子工学科 助教授	玉川大学 工学部 教授	(独)理化学研究所 脳科学総合研究センター計 算論的神経科学グループ 研究グループ長
9		誉田雅彰	日本電信電話(株) 基礎研究所 主幹研究員	早稲田大学 スポーツ科学部 教授	早稲田大学 スポーツ科学学術院スポー ツ医科学科 教授
10		石川正俊	東京大学 大学院工学系研究科 教授	東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授	東京大学 大学院情報理工学系研究科 工学部計数工学科 教授
11	H11	銅谷賢治	(株)国際電気通信基礎技 術研究所 研究開発本部 主任研究員	(株)国際電気通信基礎技 術研究所 脳情報研究所 室長	(株)国際電気通信基礎技術 研究所 脳情報研究所計算生物神経 学研究室 室長 独立行政法人沖縄科学技術 研究基盤整備機構 大学院大学先行研究神経計 算ユニット 代表研究者
12		山口陽子	東京電機大学 理工学部情報科学科 教授	(独)理化学研究所 脳科学総合研究センター チームリーダー	(独)理化学研究所 脳科学総合研究センター創 発知能ダイナミクス研究チ ーム チームリーダー

本研究領域で採択された研究課題は、研究分野も研究対象も多岐にわたっているので、キーワードとして「数理モデル」、「生物実験」、「実装/ロボット」、「計測装置」の4つを選定し、各研究課題がどのキーワードと関連しているかを表6にマップとして示した。

表6 各研究課題の位置付け

研究代表者	課題名	プロジェクトの概要	数理モデル	生物実験	実装/ロボット	計測装置
合原一幸	脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装	脳の情報処理機構について、その非同期性、カオス性と動的細胞集集体の特徴に注目して構成論的な研究を行い、それをアナログ電子技術により実装して新しい脳型情報処理装置の基盤技術を構築した。				
武田常弘	MEGによる人間の脳機能の解明	脳磁計測法に関わる多くの問題（刺激法、磁場源推定法、効率的なSQUID冷凍装置など）を解決し、時間特性に優れる本手法を使える装置にした。視覚野から運動野、体性感覚野に至る情報伝達を可視化した。				
小柳光正	脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発	加工済みの2次元LSIを重ねて3次元構造を作る独自の3次元LSI技術の基盤技術を確立し、この技術を駆使して網膜および第一次視覚野の一部の機能を実際の脳の構造に似る積層構造で実現した。				

酒井邦嘉	言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築	脳の言語活動における文法判断と単語記憶を区別できる言語課題を開発し、fMRI、経頭蓋的磁気刺激法（TMS）や光トポグラフを用いて、文法判断機能がモジュールとして存在することを明らかにした。				
河原英紀	聴覚の情景分析に基づく音声・音響処理システム	独自の音声分析・変換・合成方法である"STRAIGHT"を発展させ、聴覚での情報表現と同型の表現を用いて、人間の実際の話し声に匹敵する自然な音質を有する加工音声の生成に成功した。				
永雄 総一	運動の学習制御における小脳機能の解明	小脳の運動学習メカニズム解明のために、短期運動学習と長期運動学習における小脳の役割を分離して評価できる手法を開発し、前者は長期抑圧（LTD）によって小脳皮質に貯えられ、後者はその出力先に貯えられることを見出した。				
中村仁彦	自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発	大自由度系ロボットの力学系の上位にシンボル空間を置いて、これによって滑らかで柔軟な全身運動の生成や、他者の運動認識と自身の運動生成など、人間とのコミュニケーションを可能にするロボットの知能実現の原理を創出し実証した。				
深井朋樹	時間的情報処理の神経基盤のモデル化	大脳新皮質の同期活動の生成、スパイク時間依存のシナプス可塑性（STDP）による学習、自己組織的な非同期的持続発火など、ニューロンやその回路網の活動のもつ時間表現の機能的役割を解明するために理論と実験が緊密に連携した。				
菅田雅彰	発声力学に基づくタスクプランニング機構の構築	人間の音声生成過程の生理的、力学的、音響的なメカニズムに関するモデルを構築するとともに、発声運動計画機構の数理モデルを構築して、脳における音声情報生成の仕組みを明らかにするとともに、発話ロボットを構築した。				
石川正俊	感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現	「手と脳」における感覚と運動の統合を手本として、運動ロボットの構成諸要素を人間の機能を遙かに超えるレベルで作成し、それらをダイナミクス整合、超並列性、能動性と階層分散構造の概念に基づいて統合し、最終システムを人間を超えるレベルで実現した。				
銅谷賢司	行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明	人や動物の柔軟な学習能力を支える機構として、神経修飾物質系が強化学習の大域変数として働くとの仮説を掲げ、階層的強化学習モデルを定式化するとともに、セロトニンの機能を検証した。ロボット集団のマルチエージェント強化学習によりロボットの自律的な適応と進化を実現した。				
山口陽子	海馬の動的神経機構を基礎とする状況依存的知能の設計原理	海馬が神経集団の同期活動によって文脈性のある情報を処理するとの仮説を掲げ、生物実験との緊密な協力の基に、ラットの海馬シータリズムにおける位相歳差現象に着目して、海馬の記憶と空間認知のダイナミクスに関する理論を展開した。				

## 1-2-2 研究助成金

各研究課題の研究代表者が本研究開始以降に獲得した研究助成金のうち、当該研究助成金の代表者となっており金額が1百万円以上のものについて、表7に整理した。また採択年度ごとにグラフ化したものを図2～図4に示す。採択年度ごとに別のグラフとしたのは、本研究開始時点から調査時点（現在）までの経過期間が採択年度ごとに異なることを考慮したものである。なお一覧表および経時的グラフを表Bに示す。

表7 研究助成金の獲得数（研究代表者が、本研究開始以降、代表者として獲得した1百万円以上のファンド）

No.	採択年度	研究代表者名	JST			科研費	その他	合計
			ERATO	CREST	SORST			
1	H09	合原 一幸	1	0	0	4	0	5
2		武田 常広	0	0	0	0	1	1
3		小柳 光正	0	2	0	7	1	10
4		酒井 邦嘉	0	1	1	3	0	5
5		河原 英紀	0	0	0	5	0	5
6	H10	永雄 総一	0	0	0	1	0	1
7		中村 仁彦	0	0	0	7	1	8
8		深井 朋樹	0	0	0	2	0	2
9		菅田 雅彰	0	0	0	2	0	2
10	H11	石川 正俊	0	1	1	5	1	8
11		銅谷 賢治	0	0	0	0	0	0
12		山口 陽子	0	0	0	0	0	0

領域全体では科研費の獲得件数が多かった。内訳はJSTのERATOが1件、CRESTが4件、SORSTが2件であり、科研費が36件、その他が4件であった。

個人別に見ると、平成9年度採択の小柳研究代表者（以下、小柳、他も同様）（合計10件）、平成10年度採択の中村（合計8件）、平成11年度採択の石川（合計8件）が多くの資金を獲得していた。特に小柳は本研究終了後も2件のCREST<sup>5</sup>領域にほぼ切れ目無く採択されており、継続して大型資金を獲得して研究を継続・展開させている。また平成9年度採択の合原はERATO<sup>6</sup>に、酒井と石川は発展研究SORSTに採択されていることに加えて他のCREST<sup>7</sup>にも採択されており、文字通り本研究を継続・発展させている。これらは本研究の成果に対する評価が高いことの反映と考えられる。

<sup>5</sup> 「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」領域 第1期 課題名「共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製」（2002-2006年度）

「ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術」領域 第3期 課題名「自己修復機能を有する3次元VLSIシステムの創製」（2009-2013年度）

<sup>6</sup> 合原複雑数理モデルプロジェクト（2003-2008年度）

<sup>7</sup> 酒井 邦嘉 「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」領域 第1期 課題名「言語の脳機能に基づく獲得メカニズムの解明」（2003-2007年度）

石川 正俊 「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域 第1期 課題名「高速センサー技術に基づく調和型ダイナミック情報環境の構築」（2009-2013年度）

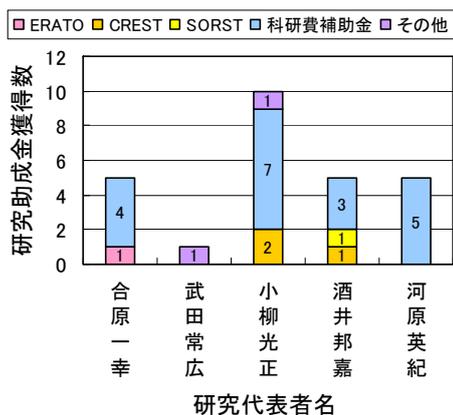


図 2 研究助成金獲得数 (H9 採択課題)

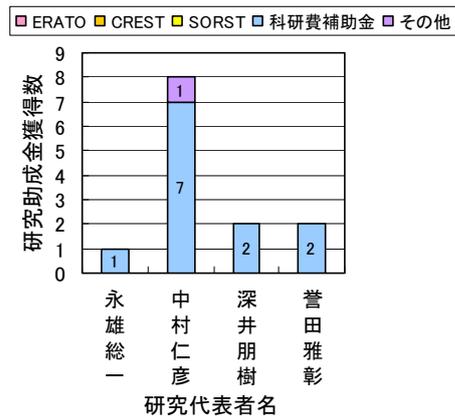


図 3 研究助成金獲得数 (H10 採択課題)

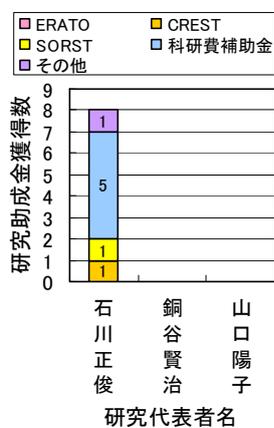


図 4 研究助成金獲得数 (H11 採択課題)

### 1-2-3 論文

本研究期間中および終了後の発表論文に関する各種指標を表 8 に示す。なお、本研究終了後の発表論文とは、1-1-2.(1).B.③に示したとおり、研究代表者の発表論文のうち本研究に関連のある論文のみを抽出したものである。

表 8 発表論文に関する研究課題別の各種指標

No.	採択年度	研究代表者	原著論文														
			研究期間中の論文								期間終了後の研究代表者の論文						
			全論文数 (和文、 検索対象 外論文を 含む)	論文数 (検索 対象)	被引用 件数/ 年 の 平均	平均被 引用件 数	最高被 引用件 数	被引用 件数 ≥100 の論文 数	50≤被 引用件 数<100 の論文 数	Top1% に入る 論文数	論文数	被引用 件数/ 年 の 平均	平均被 引用件 数	最高被 引用件 数	被引用 件数 ≥100 の論文 数	50≤被 引用件 数<100 の論文 数	Top1% に入る 論文数
1	H9	合原 一幸	71	52	1.58	13.6	60	0	3	0	83	1.34	6.1	55	0	1	1
2		武田 常広	27	14	1.34	12.4	33	0	0	0	19	0.54	2.4	12	0	0	0
3		小柳 光正	36	23	1.69	17.0	111	1	1	0	53	0.95	4.6	40	0	0	1
4		酒井 邦嘉	49	10	4.72	42.7	117	1	1	1	28	1.35	7.5	37	0	0	0
5		河原 英紀	16	5	4.22	43.2	134	1	0	1	18	1.17	7.4	98	0	1	0
6	H10	永雄 総一	61	39	2.18	20.0	158	2	2	1	14	1.01	3.8	24	0	0	0
7		中村 仁彦	134	55	0.54	4.2	52	0	1	1	9	1.27	6.9	27	0	0	0
8		深井 朋樹	116	82	3.11	25.9	160	5	8	0	35	0.71	2.2	12	0	0	0
9		萱田 雅彰	25	9	0.77	5.6	18	0	0	0	15	0.40	1.8	11	0	0	0
10	H11	石川 正俊	32	18	1.47	12.2	44	0	0	0	20	0.33	1.5	12	0	0	0
11		銅谷 賢治	122	51	3.91	29.7	156	4	6	3	48	1.76	7.2	118	1	1	2
12		山口 陽子	68	35	3.08	23.5	98	0	4	0	25	1.10	3.8	16	0	0	0

- 注 1) 全論文数とは、研究終了報告書に掲載されている論文の数  
 2) 論文数とは、検索 DB (Web of Science) に収録されている論文の数  
 3) 被引用件数/年 の平均とは、2)で定義した各論文についての被引用件数を、当該論文の発表年から調査時点までの経過年数で除したもの(被引用件数/年)を、2)で定義した全論文について平均したもので、各論文の経過年数の差を補正したもの  
 4) 平均被引用件数とは、2)で定義した各論文の被引用件数を単純平均したもの  
 5) 最高被引用件数とは、2)で定義した全発表論文の中で最高の被引用件数を示した論文の、その被引用件数  
 6) Top1%に入る論文数とは、2)で定義した全発表論文中で、ESI 定義による被引用件数上位 1%に含まれる論文 (1-1-2.(1).B.③参照) の数

## (1) 発表論文数

発表論文数は、研究活動の度合いを示す指標と考えられる。本研究期間中の全論文数および終了後の論文数について、採択年度ごとにグラフ化したものを図 5～図 7 に示す。本研究期間中の全論文数は、研究終了報告書に掲載されている全論文の数（和文も含む）であり、研究代表者が著者になっていない論文も含んでいるのに対して、終了後の論文数は、キーワード検索により抽出された論文の数（原則として和文を含まない）で、研究代表者が著者に含まれる論文に限定されている。従って本研究期間中と終了後との論文数の比較には注意が必要である。その上で本研究期間中と終了後とを比較すると、領域全体の発表論文数は、期間中の 757 報に対して終了後は 367 報で期間中の 48% に相当しており、終了後も活発な論文発表が行われたことがわかる。1 研究課題あたり発表論文数は、本研究期間中が 63.1 報、終了後が 30.6 報であった。

研究課題ごとに比較すると、平成 9 年度採択課題では、本研究期間中は合原の発表論文数が 71 報と最も多く、酒井（49 報）、小柳（36 報）がそれに次いでいた。本研究終了後ではやはり合原（83 報）が最も多く、小柳の 53 報、酒井の 28 報の順になっていた。また合原、小柳の本研究終了後の発表論文数は期間中のそれよりも多くなっており、終了後も活発な研究活動を行っていると思われる。平成 10 年度採択課題について見ると本研究期間中は中村（134 報）、深井（116 報）が 100 報を超える論文を発表していたが、終了後では深井の 35 報がやや多い程度であった。本研究終了後の論文発表はそれほど活発ではなかった。平成 11 年度採択課題では、本研究期間中は銅谷（122 報）の発表論文数が多く、終了後も銅谷の発表論文数（48 報）が多かった。

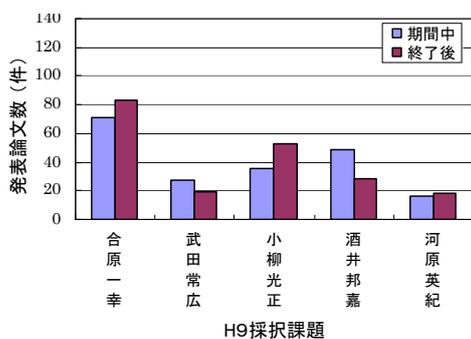


図 5 発表論文数 (H9 採択課題)

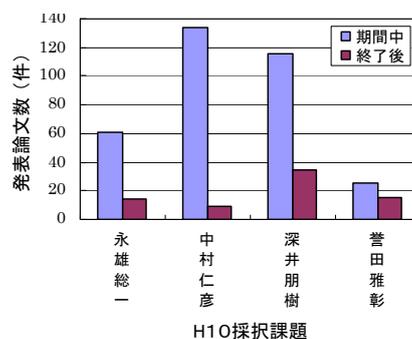


図 6 発表論文数 (H10 採択課題)

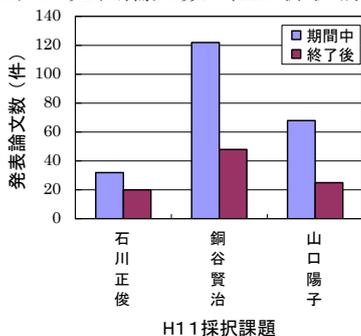


図 7 発表論文数 (H11 採択課題)

## (2) 平均被引用件数

被引用件数は、発表論文のインパクトを計る判断基準として考えられるが、研究の質に対する指標とも見ることが出来る。従って平均被引用件数は、各研究に関連して発表された全論文のインパクトあるいは研究の質を平均したものの意味合いを持つが、一般に論文発表後の経過年数が長くなるほど被引用件数が大きくなると考えられるために、単純平均では経過年数による誤差を排除できない。ここでは1年間当りの被引用件数〔被引用件数/年〕の平均値を採用して比較した。各研究課題の〔被引用件数/年〕の平均を、採択年度別に図8～図10に示す。

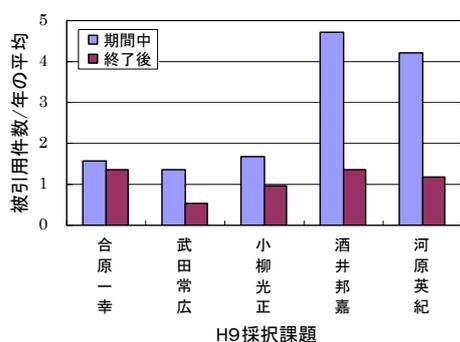


図8〔被引用件数/年〕の平均－1

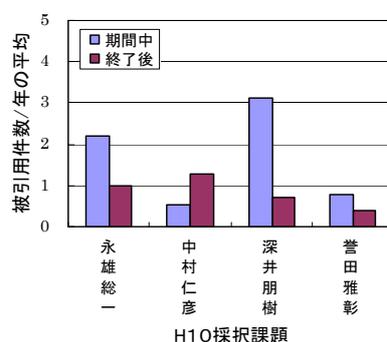


図9〔被引用件数/年〕の平均－2

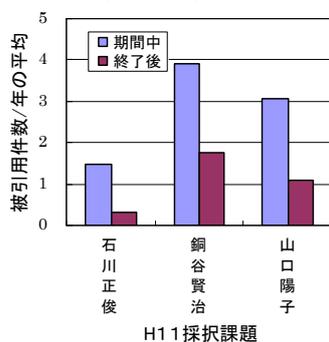


図10〔被引用件数/年〕の平均－3

全般的に本研究期間中の〔被引用件数/年〕の平均が、終了後のそれを上回っていた。被引用件数は、論文発表後徐々に増加し、数年後に極大を示した後減少するのが一般的な傾向である。本研究終了後の〔被引用件数/年〕の平均が低いのは、論文発表後の経過年数が少なく極大を示す前の状態にある論文が多い可能性もあるが、平成9年度採択課題では、終了後既に6年以上経過しており、経過年数が少ないことによる影響は限定的なものと考えられる。本研究期間中は、終了後と比較して注目度の高い論文がより多く生産されたと考えられる。このことは表8の「被引用件数 $\geq 100$ の論文数」、「 $50 \leq$ 被引用件数 $< 100$ の論文数」にも現れている。本研究期間中の「被引用件数 $\geq 100$ の論文数」は領域全体で14報、「 $50 \leq$ 被引用件数 $< 100$ の論文数」は26報であるのに対して、終了後は、各々1報、3報であった。

研究課題別に見ると、本研究期間中では平成9年度採択の酒井が4.72件/年と最も多く、

同じく平成 9 年度採択の河原（4.22 件/年）も 4 件/年を超える引用を受けていた。平成 11 年度採択の銅谷（3.91 件/年）、平成 10 年度採択の深井（3.11 件/年）、平成 11 年度採択の山口（3.08 件/年）がそれに次いでいた。本研究終了後は銅谷の 1.76 件/年が最高であるが、数値的にはそれほど多くはなかった。領域全体の平均値も 0.99 件/年であった。本研究期間中の深井および期間中・終了後を通じての銅谷は発表論文数の面でも顕著な値を示しており、研究活動の生産性および研究の質の両面で、優れた成果を挙げたと言えよう。

### (3) Top1%論文

Top1%論文は、同一の学術分野、同一の年に発表された論文の中で、被引用件数が上位 1%に入る論文であり、非常に注目度の高い重要な論文ということが出来る。また学術分野の異なる論文間の注目度を相対的に比較するには便利な指標である。本研究のように複数の学術分野にまたがる課題群を含むケースでは、特に有用な指標と考えられる。本調査では、トムソン・ロイター社の ESI (Essential Science Indicator) で公表された 2009 年 9 月 18 日時点でのデータを用いた。ただしこの指標には、対象論文が Web of Science に収録されている雑誌に限定されていること、対象期間が直近の 11 年間（今回の調査に於いては 1999 年から 2009 年）に限られていること等の制限がある。従って平成 10 年（1998 年）以前に発表された論文や、Web of Science に収録されていない和文誌は、例え被引用件数が多くてもこの指標では捉えられない。Top1%値を参考資料 2 に、Top1%論文のリストを参考資料 3 に示した。

図 11～図 13 に、各研究課題（研究代表者）から発表された論文のうち、被引用件数が上位 1%に入る論文の数を、採択年度別に示した。

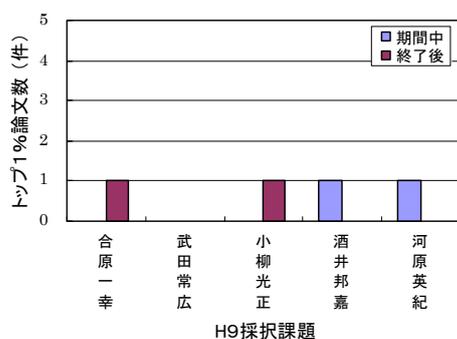


図 11 Top1%に入る論文数(H9 採択課題)

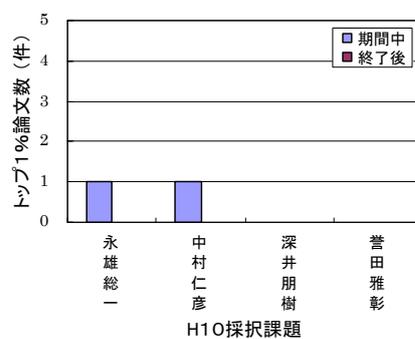


図 12 Top1%に入る論文数(H10 採択課題)

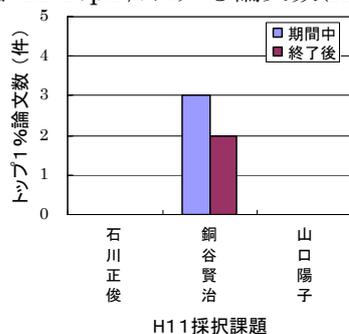


図 13 Top1%に入る論文数(H11 採択課題)

本研究期間中で Top1%論文の数が最も多いのは平成 11 年度採択の銅谷の 3 報で、終了後も銅谷の 2 件であった。本研究における Top1%論文の多寡を論じる場合、本研究から発表された論文のうち何%の論文が Top1%以上の被引用件数を示しているかが一つの尺度になると考えられる。銅谷が本研究期間中および終了後に発表した検索対象論文数（各々表 8 の第 2 列目および第 9 列目）は 51 報および 48 報であり、発表論文数に対する Top1%論文数の比率は各々 5.9%、4.2%と、1%に対してかなり高い割合を示した。銅谷は注目度の高い研究成果を継続的に出していると考えられる。

領域全体の Top1%論文数は、本研究期間中が 7 報で終了後は 4 報であった。検索対象論文数 393 報、367 報に対する比率は各々 1.8%、1.1%であり、何れも 1.0%を超えているもののそれほど顕著な値ではなかった。本領域は、Top1%論文の発表数の面では水準と同程度若しくはそれ以上の成果を挙げていると言えよう。

#### 1-2-4 特許

本研究期間中および終了後の出願特許に関する各種指標を表 9 に示す。パテントファミリーとは、優先権主張関係で関連付けられる国内、海外出願特許の群のことであり、総出願数とはパテントファミリーを構成する各出願特許を夫々 1 件と数えた数値である。

表 9 出願特許に関する研究課題別の各種指標

No.	採択年度	研究代表者	特許出願					
			研究期間の出願特許			期間終了後の研究代表者の出願特許		
			パテントファミリー数	総出願数	成立特許数	パテントファミリー数	総出願数	成立特許数
1	H9	合原 一幸	7	17	8	9	9	4
2		武田 常広	8	15	13	15	21	10
3		小柳 光正	1	1	1	15	45	6
4		酒井 邦嘉	1	1	1	1	2	0
5		河原 英紀	3	3	3	6	14	5
6	H10	永雄 総一	0	0	0	0	0	0
7		中村 仁彦	8	36	19	11	20	3
8		深井 朋樹	3	3	1	0	0	0
9		誉田 雅彰	8	8	0	2	2	0
10	H11	石川 正俊	1	1	1	3	3	0
11		銅谷 賢治	9	13	3	5	5	1
12		山口 陽子	0	0	0	0	0	0

(1) パテントファミリー数

パテントファミリー数は、優先権主張関係で関連付けられる出願特許群を 1 件と数えるものであるから、研究活動により生み出された独立の発明の数と考えることが出来る。研究課題毎のパテントファミリー数を、採択年度別に図 14～図 16 に示す。

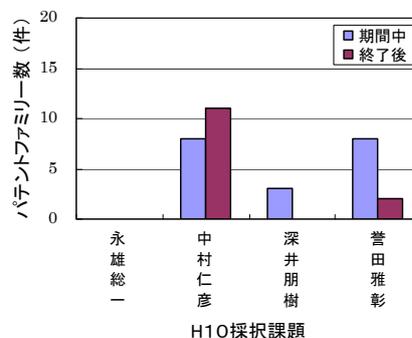
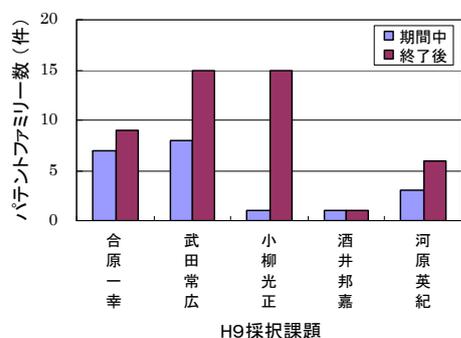


図 14 パテントファミリー数(H9 採択課題)

図 15 パテントファミリー数(H10 採択課題)

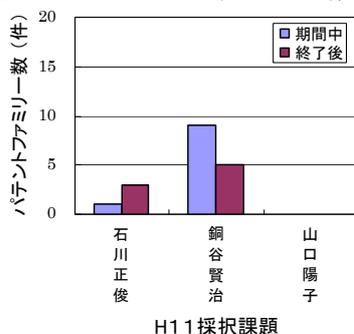


図 16 パテントファミリー数(H11 採択課題)

本研究期間中で出願特許のパテントファミリー数が多いのは、平成 9 年度採択課題では武田 (8 件) と合原 (7 件)、平成 10 年度採択課題では中村 (8 件) と誉田 (8 件)、平成 11 年度採択課題では銅谷 (9 件) であった。また本研究終了後では、平成 9 年度採択の武田 (15 件) と小柳 (15 件)、平成 10 年度採択の中村 (11 件) が 10 件以上のパテントファミリーを出願していた。その他では平成 9 年度採択の合原の 9 件が多かった。

領域全体で見ると、本研究期間中のパテントファミリー数は 49 件で、1 課題あたりでは 4.1 件、終了後は各々 67 件、5.6 件となっていた。本研究期間中よりも終了後のパテントファミリー数が多く、終了後に活発な出願活動が展開されているとの結果であった。

## (2) 総出願数

研究課題毎の総出願特許数を、採択年度別に図 17～図 19 に示す。

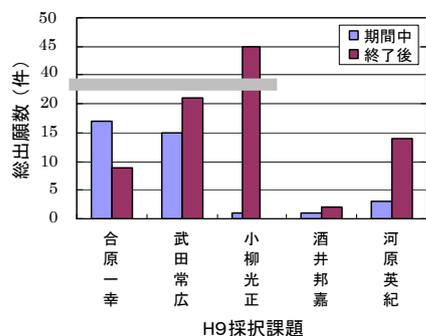


図 17 総出願特許数 (H9 採択課題)

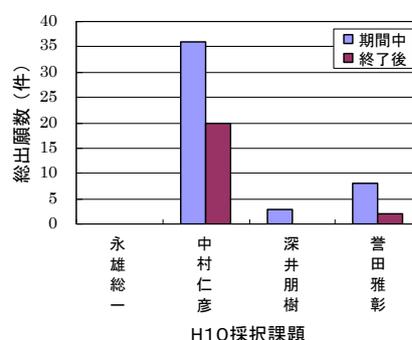


図 18 総出願特許数 (H10 採択課題)

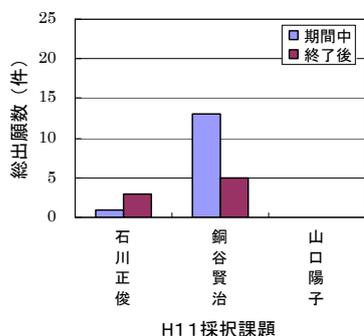


図 19 総出願特許数 (H11 採択課題)

領域全体の総出願数は、本研究期間中が 98 件、終了後が 121 件であり、終了後の方が約 23% 多くなっていた。1 研究課題あたりでは、各々 8.2 件、10.1 件の出願であった。

総出願数とパテントファミリー数の差は、特に同一発明に関する海外展開の度合を表わしていると考えられる。図 14～図 16 と、図 17～図 19 とを比較すると、本研究領域では全般的に海外出願が活発に行なわれたことがわかる。

研究課題別に見ると、本研究期間中では、平成 10 年度採択の中村 (36 件)、平成 9 年度採択の合原 (17 件)、武田 (15 件)、平成 11 年度採択の銅谷 (13 件) の総出願数が多かった。本研究終了後では、平成 9 年度採択の小柳の 45 件が群を抜いて多かった。次いで平成 9 年度採択の武田の 21 件と、平成 10 年度採択の中村の 20 件がほぼ同数で並んでおり、平成 9 年度採択の河原が 14 件で続いていた。

### (3) 成立特許数

研究課題毎の成立特許数を、採択年度別に図 20～図 22 に示す。

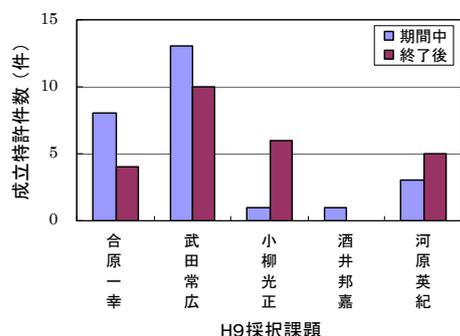


図 20 成立特許数 (H9 採択課題)

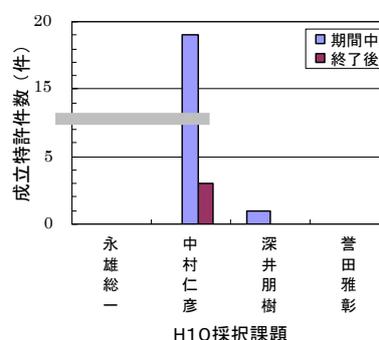


図 21 成立特許数 (H10 採択課題)

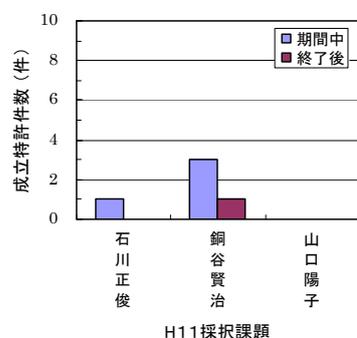


図 22 成立特許数 (H11 採択課題)

領域全体での成立特許数は、本研究期間中が 50 件であるのに対して、終了後は 29 件であった。1 研究課題当りでは、本研究期間中が 4.2 件、終了後で 2.4 件の特許が成立していることになる。パテントファミリー数、総出願数では本研究期間中より終了後の方が大きな値となっていたが、成立特許数では終了後の数値が大きく減少していた。特許成立までにはある程度の経過時間が必要であり、出願後の経過時間の差が影響している可能性もある。

研究課題別に見ると、本研究期間中では、平成 10 年度採択の中村が 19 件、平成 9 年度採択の武田が 13 件、合原が 8 件と多くの特許を成立させていた。本研究終了後では、平成 9 年度採択の武田の 10 件が最多であり、何れも平成 9 年度採択の小柳 (6 件)、河原 (5 件)、合原 (4 件) がそれに続いていた。

## 1-2-5 受賞

本研究期間中については終了報告書の記載を中心に調査し、研究代表者の HP 等で補足調査した。本研究終了後は研究代表者の HP が主体の調査である。本研究終了後については、情報量が十分とは言えない点は否めない。研究課題毎の受賞リストを表 10 に示す。また参考資料 4 に詳細な受賞リストを示す。

表 10 研究課題ごとの受賞リスト

No.	採択年度	研究代表者	受賞者	賞名（授賞機関）	受賞年
1	H9	合原 一幸	H. Fujii H. Ito K. Aihara N. Ichinose M. Tsukada	日本神経回路学会平成 9 年度論文賞	1999 年
2			K. Saeki Y. Sekine K. Aihara	平成 10 年度電気学会電子・情報・システム部門研究会優秀論文発表賞	1998 年
3			合原 一幸	ゴールドメダル賞 (東京テクノ・フォーラム 21)	2000 年
4		武田 常広	武田 常広	バイオメカニズム学会論文賞	2000 年
5			武田 常広	Best Paper Award (The Research Institute of Signal Processing Japan)	2007 年*
6		小柳 光正	小柳 光正	文部科学大臣賞(科学技術功労者)	2001 年
7			小柳 光正	林巖雄賞（応用物理学会）	2001 年
8		酒井 邦嘉	酒井 邦嘉	日本神経科学学会奨励賞	2002 年
9			酒井 邦嘉	毎日出版文化賞	2002 年
10			酒井 邦嘉	第 19 回塚原仲晃記念賞 (ブレインサイエンス振興財団)	2005 年*
11		河原 英紀	T. Irino M. Unoki	第 40 回日本音響学会佐藤論文賞	2000 年
12			H. Kawahara I. Masuda-Katsuse A. de Cheveigne	1998-1999 EURASIP 最優秀論文賞	2000 年
13	H10	中村 仁彦	M. Okada K. Tatani Y. Nakamura	Finalist of Best Conference Paper Award (IEEE International Conference on Robotics and Automation)	2002 年
14			稲邑 哲也	船井情報科学奨励賞 (船井情報科学振興財団)	2003 年
15			稲邑 哲也 戸嶋 巖樹 中村 仁彦	2002 年度人工知能学会全国大会優秀論文賞	2003 年
16			鈴木 山根 多谷 栗原 中村	2003 年度日本ロボット学会研究奨励賞	2003 年
17			University of Tokyo Sega Corporation	Technological Innovation Special Award (International 3D Awards)	2003 年

18		丹下 山根 中村	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECH	2002 年	
19		Y. Nakamura K. Yamane	King-Sun Fu Memorial Best Transactions Paper Award (IEEE Robotics and Automation Society)	2001 年	
20		中村 山根 永嶋	2000 年度日本ロボット学会誌論文賞	2000 年	
21		山根 中村	2000 年度日本ロボット学会研究奨励賞	2000 年	
22		Y. Nakamura W. Chung O. J. Sordalen	King-Sun Fu Memorial Best Transactions Paper Award (IEEE Robotics and Automation Society)	2002 年	
23		光永 法明 浅田 稔	第 18 回日本ロボット学会研究奨励賞	2003 年	
24	深井 朋樹	K. Kitano T. Fukai	Best Poster Award (The 9th international conference on neural information processing)	2002 年	
25	誉田 雅彰	誉田 雅彰	SI2004 ベストセッション講演賞 (計測自動制御学会)	2004 年*	
26		誉田 雅彰	応用部門最優秀論文賞 (IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems)	2004 年*	
27		誉田 雅彰	研究会優秀賞 (日本人工知能学会)	2005 年*	
28	H11	石川 正俊	並木 明夫 中坊 嘉宏 石井 抱 石川 正俊	日本ロボット学会学術奨励賞	2000 年
29			並木 明夫 石川 正俊	日本ロボット学会論文賞	2001 年
30			東森 充 竹中 麗香 金子 真 並木 明夫 石川 正俊	計測自動制御学会学術奨励賞 (研究奨励賞)	2003 年
31			並木 明夫 今井 睦朗 石川 正俊	計測自動制御学会システムインテグレーション部門 奨励賞	2003 年
32			M. Shimojo R. Makino H. Ogawa T. Suzuki A. Namiki T. Saito M. Kunimoto M. Ishikawa K. Mabuchi	Paper Award (6th Japan-France Congress on Mechatronics and 4th Asia-Europe Congress on Mechatronics)	2003 年

33		下条 誠 牧野 了太 小川 博教 鈴木 隆文 並木 明夫 斎藤 敬 石川 正俊 満洲 邦彦	ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECE 賞 (日本機械学会)	2003 年
34		Y. Imai A. Namiki K. Hashimoto M. Ishikawa	Best Vision Paper Award Finalist (International Conference on Robotics and Automation)	2004 年
35		石川 正俊	技術賞・友田賞 (計測自動制御学会)	2004 年
36		石川 正俊	技術振興賞開発賞 (映像情報メディア学会)	2004 年
37		石川 正俊	システムインテグレーション部門 SI2004 ベストセッション講演賞 (計測自動制御学会)	2004 年
38		石川 正俊	システムインテグレーション部門 SI2005 ベストセッション講演賞 (計測自動制御学会)	2005 年*
39		石川 正俊	ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECE 賞 (日本機械学会)	2005 年*
40		石川 正俊	光・電子集積技術業績賞 (林厳雄賞) (応用物理学会)	2005 年*
41		石川 正俊	システムインテグレーション部門 SI2006 優秀講演賞 (計測自動制御学会)	2006 年*
42		石川 正俊	Best Paper in Biomimetics (IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics)	2006 年*
43		石川 正俊	Best Manipulation Paper Award (IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation)	2006 年*
44		石川 正俊	ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECE 賞 (日本機械学会)	2007 年*
45		石川 正俊	論文賞 (日本ロボット学会)	2008 年*
46		石川 正俊	システムインテグレーション部門 SI2008 優秀講演賞 (計測自動制御学会)	2008 年*
47		石川 正俊	優秀論文賞 (3次元画像コンファレンス 2008)	2009 年*
48	銅谷 賢治	銅谷 賢治	論文賞 (日本神経回路学会)	2003 年
49		内部 英治 銅谷 賢治	Best Philosophical Paper Award (International Society for Adaptive Behavior)	2004 年
50		銅谷 賢治	第 21 回塚原仲晃記念賞 (ブレインサイエンス振興財団)	2006 年*
51	山口 陽子	山口 陽子	Best Poster Award (ICONIP2006)	2006 年*

52			山口 陽子	Editors Choice Award on the recommmendation of the Editorial Board (NeuroImage: System Neuroscience Section)	2007年*
----	--	--	-------	---	--------

\*：本研究終了後の受賞

### 1-3 代表事例について

前節に示した調査結果および研究総括ヒアリング結果を基にして、詳細調査の対象となる代表的事例を 5 課題抽出した。それら 5 課題を研究代表者名で示すと、合原、小柳、酒井、中村、銅谷である。

## 第2章 研究領域における研究の継続・発展状況

### 2-1 研究領域としてのねらいと達成状況

米国で大型の脳研究推進の枠組み「脳の10年」が1990年に始まり、これに刺激を受けた世界の動きがある中で日本の脳科学研究の構想「脳の世紀」が定まった。米国では対象を脳の病気に絞ったのに対して、日本は脳の病気だけではなく、脳の仕組み、情報(情報工学から情報技術までを含む)、教育など、21世紀の人間と文明に関わるとも言える広い視点から取り組むことが盛り込まれた。これが起点となって「脳を知る」、「脳を守る」、「脳を創る」の3領域が形成されることになった。このうち1995年に開始したCRESTの中の研究領域として、まず「脳を知る」が設定され、1997年には「脳を創る」を含む上記3領域が揃って新たにスタートすることになった。

それまでの脳研究は、神経科学、解剖学、生理学、分子生物学などに細分化され、実験主導で行われていた。また情報分野は含まれていなかった。日本の取り組みの特徴は、情報分野を含む上記分野を融合した学際的な脳研究を推進したこと、さらに個々のデータに立脚してその仕組みを説明し、実験をデザインできる理論の構築を重視したことであった。この特徴は、「脳を創る」領域において特に顕著であった。「脳を創る」の概念は日本発であり、脳科学と情報科学技術を融合した新しい脳の学問領域を拓いて、「脳型デバイス・アーキテクチャ(学習、連想記憶など)」、「情報生成処理(認知認識、運動計画、思考、言語、評価、記憶など)システム」など、脳型情報処理システムの構築を目標としたものであった。これは、方法論と対象を異にする2つの分野を融合して新しい研究文化を築くことを意味したが、脳科学、情報科学の双方に大きな影響を与えるだけでなく、人間に適合した新しい情報技術と文化を創造する上でも大きな影響を与えることを期待したものであった。

「脳を創る」研究領域は数理モデルから、ハードウェアまで広い分野の課題を採択した。1997年度採択の合原はニューロンとネットワークの数理モデルを構築するだけでなく、それをハードウェア上に実装して見せた。武田は工学の立場でMEGを使って脳の仕組みを探った。小柳は、自身の発明した3D-LSIプロセスを駆使して視覚情報処理の仕組みを模擬して見せた。酒井は言語学と脳科学を融合して文法の座を発見した。河原は情報工学の立場で音声信号処理を扱った。1998年度採択の永尾は小脳の学習について新しい実験パラダイムを考案して長年の論争を解決する結果を得た。中村はロボット工学に脳の知見を導入して、制御、計画、学習、認知に至る新しいロボット技術を開発した。深井は理論と実験の緊密な連携によってニューロンや神経回路のモデル化を行った。誉田は発声機構のモデル化を行って発話ロボットを開発した。1999年度採択の石川は並列処理によって脳を眺みながら人間を超える高機能のロボットを開発した。銅谷はロボット実験の上に脳の強化学習理論を構築した。山口は海馬と大脳皮質を結ぶ、文脈性に富む情報の操作原理を解明するために、リズムと位相に基づく新しい時空間仮説を導入した。

これら多様なアプローチによって21世紀の脳研究への新しい切り口を示すことができた。

## 2-2 研究課題ごとの研究のねらいと研究期間中の達成状況および研究期間終了後の継続・発展の状況

### 2-2-1 脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装（研究代表者：合原 一幸）

本研究は、脳の情報処理においてカオスが重要な役割を果たすとの見地から、脳における非線形時空間動的情報処理機構に関する数理モデルを構成論的に解析するとともに、そのモデルを実装する基礎技術を開発して、現在のデジタルコンピュータの限界を破る脳型時空間情報処理システムを構築するための基盤技術を確立することを目的とした。

理論研究では、まず、同期型のカオスニューラルネットワークモデル (CNN) を用いて、脳型時空間カオスダイナミクスに基づく情報処理能力とその力学構造を数理モデルによって明らかにした。このうち、動的連想記憶では、従来法より少ない計算量で、カオスダイナミクスによる遍歴的な想起が実現し、大規模化とハードウェア化のための困難を解消した。その応答特性の実験では、記憶として埋め込んだパターンの断片を外部から入力すると短時間で元の記憶パターンに到着できることを示した。また、組み合わせ最適化問題の近似的解法を CNN 上で駆動することを提案し、従来法に比べて誤差の小さい良好な解をより高速に得ることに成功し、大規模問題への適用が可能であることを示した。

非同期型の CNN における活動電位パルスの時空間系列の研究では、大脳新皮質に膨大に存在するギャップジャンクション (GJ) の結合抑制系が時空カオスを内包することの原理的可能性を提示した。電氣的スパイク列への情報コーディング機構については、発火率コーディングと時空間スパイクコーディングの 2 説間で論争が行われてきたが、本研究ではノイズ強度に依存してこれらの一つが選択されるというデュアルコーディング仮説を提示した。また神経回路網の活動を記述する数理モデルの分岐解析手法を確立し、基本的な神経回路網に起きる同期現象、バースト発振やカオス遍歴の分岐現象などの機構を解析した。

実装研究では、カオスニューロコンピュータ構築用 IC チップセットを、核となるカオスニューロン回路は実数値演算が可能なアナログ集積回路により、またシナプス結合部は時分割多重・メモリベースのデジタル回路で構成した。モデルパラメータは外部から制御できる。最大 1 万個のニューロンを 1 億個のシナプスで相互結合することが可能になった。このチップセットを用いた大規模カオスニューロコンピュータシステムの構成法を提案した。また、巡回セールスマン問題 (TSP) や二次割り当て問題 (QAP) などの最適化問題を高速に解くカオスニューロシステムを専用 IC とともに開発し、その有効性を確認した。

本研究期間中の成果は、71 報の学術論文として発表された。特許は日本出願が 7 件とこれに関わる外国出願が 10 件であった。本研究終了後 2002 年以降に、合原は 3 件の科研費を獲得し、さらに 2003 年度から 5 年間の JST-ERATO 合原複雑数理モデルプロジェクトを実施して研究を大きく発展させた。この間の成果として、国際誌の学術論文は 83 報に上り、このうちの 1 件は被引用件数トップ 1% 論文にあげられた。また、日本特許出願を 9 件行った。

## 2-2-2 MEGによる人間の脳機能の解明（研究代表者：武田 常弘）

脳磁計（MEG）は、近年開発された人間の脳の内部を非侵襲計測する手段のなかで時間分解特性に優れることを特徴とする。本研究は脳全体の反応を同時に計測可能な全頭型MEGを用いて、人間の五感の基礎動特性から脳の高次機能までを「構成による解析」の手法を用いて解明し、脳型情報処理システム開発のための基礎知識を得ることを目的とした。

色知覚の中枢が大脳底部にあることはfMRIの計測で明らかにされてきたが、その活動のタイミングについては知られていなかった。等輝度の色変化刺激に対するMEG計測の結果、色覚中枢が第4次視覚野（V4）である大脳底部副側溝に存在し、第1次視覚野（V1）の活動から50ms程度後（刺激から150ms後）に活動することを初めて見出した。焦点調節については、ボケ刺激を片眼に与えると、他眼に反応時間の短い輻輳が先ず起こり、次にその反応に誘導されつつ調節反応が起きること、また活動源は頭頂後頭溝にあることを見出した。光刺激への瞳孔反応については皮質の関与自体が明らかでなかったが、瞳孔散大の中枢が中心前溝、外側溝の接合部付近にあることを初めて見出した。また、視覚から運動に至る脳内の情報処理については、LEDの発光を見て指を動かす課題を行うときのMEG計測の変化を、模型脳に配置した複数のダイポールで模擬することによって、視覚野、運動野、体性感覚野に情報が次々に伝達され、処理される過程が明らかになった。

人間特有の高次脳機能についても研究を行った。視覚刺激に先立って与える注意信号に対応して前頭領域に特異的なMEG反応を見出し、脳が能動的に注意を高める反応が前頭部位で生じている可能性を示した。言語機能については、文法は正しいが意味不明の文章を聞くときにのみ特異的に出る大きなMEG反応を確認し、その活動源が側頭および前頭に存在することを見出した。

MEGデータから脳内の活動源を推定する逆問題は極めて重要な課題である。ノイズ成分と分離して信号成分を抽出する独立成分分析法（ICA）と、単一試行波形から信号を抽出することを意図したwavelet変換によるデータ処理法を適用するとともに、分布型磁場源推定法においてL1ノルムとL2ノルムを結合した評価法によって、活動源が独立している場合にも、連続・集中している場合にも妥当な解を推定できる方法を開発した。

MEG装置は高価である上に、多数のSQUIDを動作させるために大量の液体ヘリウムを必要とすることが普及を妨げていた。本研究の過程で、冷凍機の予冷機能を巧みに利用する極めて効率の高い冷却法を考案した。また、冷凍技術において従来極めて深刻な問題であった閉塞問題に対しても、新しい精製器を開発することによって、保守費用の低廉化と、一年間以上の連続運転が可能になる見通しを得た。この技術は冷凍技術に広く適用できる。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に27報の論文として発表された。特許は8件の日本出願が行われ全てが成立した。これに関わる7件の外国出願が行われ、このうち5件が成立した。武田は本研究終了後、2005年に文部科学省の「大学発ベンチャー創出推進」の資金を得た。またこの間、海外19報の論文を発表した。特許出願は、日本出願15件（9件が成立）と、これに関わる6件の外国出願（1件が成立）が行われた。

## 2-2-3 脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発（研究代表者：小柳 光正）

本研究は、人間の思考や認識の機構に学んで、人間の持つしなやかな情報処理システムを工学的に実現するための新しいアーキテクチャとハードウェア技術を併せて開発し、実際に脳型情報処理システムのプリプロセッサともなる視覚情報処理プロセッサを構築すること、および脳の高次領野機能の一部を実現することも目指した。そのキーテクノロジーは小柳の発明による 3 次元積層型集積回路技術（3D-LSI）で、加工済みの 2D-LSI チップを積み重ねて、チップを貫通する垂直配線によってチップ間の電氣的接続を行った後、接着剤によって貼り合わせて 3 次元構造を作る。人間の視覚情報処理システムは網膜、第一次視覚野（V1 野）に始まり頭頂連合野まで、個別の機能および全体が層状的・階層的に構成されている。3D-LSI 構造はこのような生体の機能を再現するのに有利である上、配線負荷が減少するため小型、超並列動作、高速で低消費電力のシステムの実現が可能になる。

本研究では 3D-LSI のための様々な要素技術と視覚情報処理システムの開発を並行して行った。先ずアナログ CMOS による網膜回路とアナログ/デジタル技術による V1 野回路を試作した。網膜回路は光受容と入力画像のコントラスト強調の機能を持つ。V1 野回路のうち、単純細胞回路は線分の有無を検出し方位抽出を行う。複雑細胞回路はデジタル回路により、受容野内でのある程度の位置ずれを許容する機能を受け持つ。これらを 3 層からなる 3D-LSI で試作し、基本的な画像処理動作を確認した。

生体における上丘、MT 野の機能について検討するために 2 次元集積回路を試作した。チップの中央部には円滑追跡眼球運動を制御するための動きの方向検出部と、周辺部にサッカーボール追跡制御のための Delay Line 回路を配置したもので、その基本的な動作を確認した。人の網膜は中心窩のみ解像度が高いので、視覚情報を適切に得るためには注視点の移動が必要不可欠である。このような機能を実現するために、注視点移動ビジョンシステムを製作して四脚歩行ロボットに搭載し、ランダムに動く対象物体の追跡実験を行った。複雑な背景環境に対しても、対象物体を十分に追跡可能であることを確認した。

3 次元積層構造で本格的に網膜の機能を模擬したものとして上の成果は世界初であった。3 次元積層型人工網膜チップは眼科再生医療への応用や、広く高機能イメージセンサとしての応用が見込まれる。開発された 3D-LSI 技術は 2D-LSI では実現できないような機能を持つシステム LSI につながる次世代の本命技術として現在国内外で盛んに研究が行われているが、本研究によって世界を大きくリードすることができた。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に 36 報の論文として発表された。また、1 件の特許出願（3D-LSI の基本技術）が成立している。小柳は本研究終了後に 2002 年度と 2009 年度に始まる 2 件の CREST 研究を獲得した他、2006 年度に始まる NEDO プロジェクト、また 7 件の科研費を獲得した。本技術に対する注目度の高さを示すものといえる。この間の成果として、国際誌の論文は 53 報が発表され、そのうちの 1 報は被引用件数トップ 1% 論文にあげられた。また、15 件の特許出願と 30 件の外国出願を行った。

#### 2-2-4 言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築（研究代表者：酒井 邦嘉）

ヒトの脳はどのようにして言語を処理しているのか、言語の違いによらない普遍的な言語処理の脳機構が実際に存在するのか、また個別言語がその機構の上にどのように獲得されていくのか、これらの問題は脳と言語に関わる根源的な課題である。また、言語能力が、記憶など他の認知機能と原理的に区別できるのかという問題は認知科学における大きな謎であった。本研究では、「文法」という抽象的な概念が脳の中でどのように使われているかを特定の大脳皮質の働きとして客観的に明らかにし、他の認知機能と独立した文法処理のモジュールの存在を脳科学的に証明することを目標とした。

近年、脳機能イメージングの技術によって、様々な言語課題で複数の言語野の活動が見出されているが、言語と他の認知機能とが分離されていないことが上記問題の解決を妨げていた。そこで、新しい実験パラダイムとして、文法的な誤りを含む文と綴りの誤りを含む文を比較する課題を用いる機能的磁気共鳴映像法（fMRI）によって、文法判断に必要な認知機能がブローカ野に関係していることを初めて明確にした。また、より一般的な認知機能として単語記憶を選び、文法と単語記憶を対比させる課題を用いることによって、文法を使う言語理解に対する特異的な活動が左脳の前頭前野に局在し、単語記憶の活動と明確に区別されることを発見した。さらに、経頭蓋的磁気刺激法（TMS）の大脳皮質への無侵襲刺激と、文法正誤判断課題および意味つながり判断課題を行う際の反応時間の相関を調べる実験において、ブローカ野への刺激が文法判断を特異的に促進することを見出した。これらの結果は、ブローカ野が文法処理に特化していることの直接的な証拠であり、脳における文法処理モジュールの存在を示唆した初めての知見であった。

新しい無侵襲の脳機能計測技術である光トポグラフィについて、事象関連光トポグラフィの手法を開発し、文法処理と意味処理に伴う皮質活動の分離に成功した。装置が小型で簡便であるため臨床での使用に適している。損傷した脳の言語獲得の機序測定に使用するタスクの構成や解析法を開発し、実際に失語症回復過程の追跡に有効であることを示した。

同時に活動する複数の脳部位間を結ぶ神経繊維束の経路や結合の強さを無侵襲的に知る方法として、拡散テンソル MRI（DT-MRI）に注目した。水分子の拡散現象を強調するための傾斜磁場パルスを低く抑えて無侵襲性を高め、ノイズ除去フィルタとトラッキングアルゴリズムを新規に開発して、交連繊維近傍の複雑な神経繊維束の描画に成功した。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に 49 報の論文として発表された。このうちの 1 報は被引用件数トップ 1%論文にあげられた。また、本研究の成果を中心にまとめられた中公新書「言語の脳科学」は 2002 年の毎日出版文化賞を受賞した。本研究終了の 2002 年以降に、酒井は 3 件の科研費を獲得し、さらに JST の発展研究（SORST）を経て、2003 年度には第二の CREST 研究となる「脳の機能発達と学習メカニズムの解明（研究総括：津本忠治）」に採択された。ここでは第二言語の習得メカニズムに光を当て、さらに文法中枢の活動観察を通して語学教育の実際に踏み込んだ。この間の成果は、国際誌の論文 28 報として発表された。その成果の一部は 2005 年に Science 誌の総説として発表された。

## 2-2-5 聴覚の情景分析に基づく音声・音響処理システム（研究代表者：河原 英紀）

本研究は、脳における聴覚情報の表現と処理の数理的な本質を明らかにすることを通じて工学的な手段による聴覚脳を実現することを目標とした。具体的には、聴覚の機能についての生態学的理解に基づいて河原が発明した新しい音声分析変換合成方法 **STRAIGHT**（**S**peech **T**ransformation and **R**epresentation using **A**daptive **I**nterpretation of **w**eighted spectrogram）の実時間処理システムを実現することを目指した。

**STRAIGHT** は、音声を駆動源の情報と声道共振の情報に分離するという、1939年に発明された **VOCODER** の基本原理を踏襲しながらも、聴覚での情報表現と機能的に同型の表現を用いることによって、人間の実際の話し声に匹敵する品質と自然性を有する加工音声を生成することを可能にした。音を、響きに対応する滑らかな時間周波数表現を抽出する部分、響きを引き起こす現象の速度に対応する基本周波数とその現象に対応する周期性指標などの音源情報を抽出する部分、およびそれらの情報を用いて音を再合成する3つの部分から構成されている。これには本研究から生まれた、周波数領域での不動点に基づく基本周波数の高精度抽出法、時間領域での不動点に基づく音響的イベントの高精度抽出法、時間軸の非線形伸縮に基づく音源の非周期性指標の抽出ならびに再現方法などの多くの技術が核になっている。

人間は、声道の寸法が異なる大人と子供の周波数成分分布が異なる音声も、言語的には同じと認識することができる。聴覚抹消系の内耳には周波数分析機能があり **wavelet** 変換で近似できる。声道の寸法正規化の機能はその先の聴覚経路または大脳が **Mellin** 変換を行っていると仮定し、聴覚の初期過程が安定化 **wavelet-Mellin** 変換を用いて音響信号から音源の形状とサイズを分離して抽出する問題を解いているとする初期聴覚系の計算理論を構築した。これは、**wavelet** 変換と内耳での信号処理の類似性が表面的なものでなく、時間スケール領域での最小不確定性の要請から必然的に導かれるものであるとした本研究開始時の洞察が、**STRAIGHT** から派生した音源情報抽出法と結合して生まれたものである。

**STRAIGHT** の意義として、生態学的に適った聴覚刺激に対する聴覚の機能を明らかにするための新しいパラダイムとツールを提供したことがあげられる。また、**VOCODER** 型の音声処理技術が本来有している加工の柔軟性への関心を改めて喚起し、多くの技術開発がスタートされる端緒ともなった。**STRAIGHT** は国内外の音声知覚研究のデファクトスタンダードともなりつつある。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に 16 報の論文として発表された。このうちの 1 報は被引用件数トップ 1%論文にあげられた。特許は 3 件の日本出願が行われ、その全てが成立した。また、1999年には **EURASIP** の最優秀論文賞および日本音響学会の論文賞を受賞した。本研究終了の 2002年以降に、河原は 4 件の科研費を獲得し研究をさらに発展させた。この間の成果として、国際誌に 18 報の論文が発表された。また、6 件の特許出願（2 件が成立）とこれに関わる 8 件の外国出願（3 件が成立）を行った。

## 2-2-6 運動の学習制御における小脳機能の解明（研究代表者：永雄 総一）

小脳の運動学習に関する具体的なメカニズムについては、2つの対立する仮説の間で20年にわたり論争が続けられてきた。すなわち、長期抑圧（LTD）と呼ばれる小脳のシナプス伝達可塑性が運動学習の原因であるという説と、運動学習の源は小脳の出力先にあり、小脳はそれに必要な信号源としての副次的役割を演じているという説である。本研究は、新しい実験パラダイムによってこの問題を解決する強い根拠を得ることを目標とした。

LTDの生理学的意義を検証する実験モデルとして視機性眼球反応の適応（スクリーンの動きに対する眼球の動きの比（利得）が練習によって変化する現象）を用い、特に小脳皮質である片葉の役割をサルとマウスについて検討した。数時間程度の練習によって生じる適応が小脳皮質のLTDに起因することをLTD消失マウスによって確認した後、適応が生じた直後の片葉を局所麻酔して小脳皮質の出力を遮断すると、利得は直ちに練習前のレベルに戻ることから、その記憶場所は小脳皮質の片葉にあることを明らかにした。

数時間程度の練習で生じる短期運動学習と、数日から週の単位で生じる長期運動学習における小脳の役割を分離して評価できる新しい実験パラダイムを開発した。マウスに1日1時間、視機性眼球運動トレーニングを4～5日にわたって毎日行くと、練習を行う前の利得は徐々に増加し長期の適応が生じた。利得が最大になったところで、両側小脳片葉を局所麻酔によって遮断したところ、その日の短期学習によって生じた利得の増加分は消失したが、長期のトレーニングで生じた利得は影響されなかった。また、LTD阻害剤の投与は短期と長期の適応をとともに阻害することから、これら2種の適応は相関していることが示唆された。これらの結果を総合して、短期適応の記憶はLTDによって小脳皮質（片葉）に貯えられるが、長期運動記憶は二次的に小脳皮質の出力先に貯えられることが結論された。

大脳がイニシアティブをとる随意運動において小脳がどのような役割を演じているのかを霊長類の滑動性追跡眼球運動とサッカーボール眼球運動をモデルとして検討した。まず、眼球運動に関係する前頭葉の前頭眼野、頭頂葉のMT/MST野と特異的に結合している小脳の3つの領域を系統解剖と非侵襲的画像診断法を用いて同定した。これら3つの大脳-小脳神経回路の機能を評価するために、滑動性追跡眼球運動の開始直後に視標を加速させて眼球運動速度に適応が生じるような短期適応のパラダイムを開発した。サルにLTDの阻害剤を予め投与しておき短期適応への影響を行動実験で調べたところ、LTDが随意運動の短期適応にも関与することが明らかになった。サッカーボール眼球運動にも視線と視標に位置ずれを人工的に与えると適応が生じるが、その中枢は傍虫部を中心とする小脳である。網膜部位に表現された位置情報による誤差によってLTDが生じることを仮定する理論モデルを提案し、適応の空間・時間特性を説明することができた。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に61報の論文として発表された。被引用件数が50件以上のものが4報あり、そのうちの1報がトップ1%論文に挙げられた。本研究終了後、2004年に永雄は1件の科研費を獲得した。この間、国際誌に14報の論文を発表した。

## 2-2-7 自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発（研究代表者：中村 仁彦）

本研究は、脳研究のパラダイムを学ぶことによって、ロボットにおける大自由度系の全身運動生成、環境との相互干渉、行動に結びついたシンボル（行動の抽象的表現形態）の獲得、シンボル操作から知能へなど、ロボティクスが解決すべき知能の本質に一步近づき、柔軟性を持つロボットを設計試作することを目指した。

ロボットの情報処理系を非線形力学系として設計する方法を開発した。ヒューマノイドの運動は多数の関節角度で表されるが、運動に重要な要素のみを取り出して低次元化した上で全身周期運動を低  $N$  次元空間内の閉曲線として表現し、これをアトラクタとする力学系とした。センサ信号の認識と運動の生成を力学系の引き込みという形で実現し、アトラクタの引き込み領域を変化させて運動の遷移を行った。さらに、力学系を階層化し、運動の力学系を決める上位の力学系（記号空間）の操作によって異なった運動間の滑らかな変化を可能にした。これらをヒューマノイドロボットに適用し運動生成を行った。

他者の行動の見まねを通じた行動認識と行動生成の相互の循環がシンボル操作などの能力を生み、ヒト知能に繋がったとするミメシス理論にとって、ミラーニューロンの機能の解明は重要であった。本研究では、隠れマルコフモデルの確率的な情報処理を用いて、運動認識と運動生成の双方向情報処理を単一のモデルで実現するミラーニューロンの数理モデルを提案した。このモデルは、運動パターンなどの時系列データを認識・生成するだけでなく、見まねによる行動獲得によって原始シンボル（シンボルとなる前の記号）の獲得を可能にした。さらに、連続分布型隠れマルコフモデルを用いた時系列パターン生成法を開発し、抽象化された表現からのなめらかな運動パターンの復元を可能にした。

複数のシンボル間の関係性を、それらに対応する運動パターン間の類似性として関係づけるために、隠れマルコフモデル間の擬似的な距離を定義し、多次元尺度法に基づいて記号空間（原始シンボル空間）を構成する方法を考案した。原始シンボル空間における幾何学的操作から運動パターンの情報処理を実現する方法を提案して、他者の未知の運動を既知の運動の組み合わせとして認識する機能、既知の運動を組み合わせることで新規の自己の運動を生成する機能を実現した。連続的運動を離散的シンボルに写像することで連続世界を離散記号の関係で捉えるヒトの記憶と知能の基本的表現方法が可能になった。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に 134 報の論文として発表された。開発された多くの技術について、8 件の日本出願（これまでに 7 件が成立）とこれに関わる 28 件の外国出願（12 件が成立）が行われた。本研究期間中の受賞は 11 件を数える。本研究で開発した動力学計算ソフトウェアの一部は世界の多くの研究者に使われている他、運動生成計算のアルゴリズムはアニメーション製作ソフトとして利用されている。本研究終了の 2003 年以降に、中村は 4 件の科研費と 1 件の NEDO 研究を獲得し、活発に研究を發展させている。この間、海外 9 報の国際誌論文が発表され、そのうち 1 報はトップ 1% 論文に挙げられた。特許は日本出願 11 件（2 件が成立）とこれに関わる 9 件の外国出願（1 件が成立）を行った。

## 2-2-8 時間的情報処理の神経基盤のモデル化（研究代表者：深井 朋樹）

本研究は、理論と実験の緊密な連携のもとで、生物学的基盤に立脚したニューロンや神経回路のモデル化を行い、単一ニューロンや神経回路のダイナミカルな性質に基づく情報表現や、その高次脳機能との関係性を解明することを目指した。

近年のマルチ電極を用いた同時記録実験の結果は、ニューロンの同期発火など発火率では表現できない時間軸上の情報が、認知機能の上で重要であることを強く示唆している。本研究では、大脳新皮質の同期活動の生成メカニズムと機能的役割を解明するために、ガンマ周波数やシータ周波数で同期活動するペースメーカー細胞や神経回路をモデル化した。また、近年実験的に明らかになったスパイクの時間差に依存するシナプス可塑性（STDP）に基づく学習理論を整備し、STDP がノイズに埋もれた同期入力 of 検出を可能にすることや、条件付け実験において刺激の出現を同期発火によって予測できるようになることなどを、計算論的モデルを構築して明らかにした。

同期発火やシナプス学習は、ミリ秒レベルの時間精度で神経回路内に起きるミクロな現象であるが、行動生成や学習は秒レベルの時間スケールで起きる。これら時間スケールの異なる現象を結びつける神経メカニズムとして、相互にシナプス結合するニューロン集団が、非同期的な数秒間の持続発火を自己組織化する神経回路モデルを提案した。各ニューロンは、生理実験で見出されている双安定な内部状態（ON 状態と OFF 状態）間の遷移を行うこと、およびランダムなバックグラウンド入力の影響を受けることが仮定されていて、既に ON 状態にあるニューロンが自らの周囲にどれぐらい存在するかをリカレント入力から判断し、自身が ON 状態に移るタイミングを日和見的に見計らう。このモデルでの ON 状態の持続時間の確率過程的振る舞いが、心理実験で知られているスケーリング則（ウェーバー則）を満たすことを示した。また、GO-NOGO 課題を遂行中のサル of 帯状皮質から遅延期間神経活動を記録した実験では、スパイク発火の潜時分布は 2 つのピークを持ち、モデル of 与える予測と極めて良く一致した。

刺激の回数や強度、行動レスポンスの運動量などの定量的情報を脳が表現し、記憶する仕組み（パラメータ・ワーキングメモリ）に関わる持続発火活動が嗅内野皮質の単一神経細胞レベル of メカニズムで生成されていることを示唆する実験が報告され注目されている。これについて、大脳皮質の単一ニューロンが、細胞内カルシウムストア of 非線形ダイナミクスが働いて、安定細胞内カルシウム濃度に連動して安定発火率を連続的に変える自律発火が生起し、アナログ情報を記憶するメカニズムを提案した。この神経活動に極めて類似した前頭前野ニューロンの活動を *vitro* の実験系で確認した。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に 116 報 of 論文として発表された。被引用件数 50 件以上 of のものが 13 報（100 件以上 of のものは 5 報）と多いことが特筆される。特許は、3 件 of 日本出願が行われ、これまでに 1 件が成立した。本研究期間中の 2000 年以降現在までに、深井は 3 件 of 科研費を獲得し、活発に研究を継続している。この間、国際誌に 35 報 of 論文を発表した。

## 2-2-9 発声力学に基づくタスクプランニング機構の構築（研究代表者：菅田 雅彰）

発声動作は脳の行う人間固有の動作であって、発声器官の運動と口の構え（声道）を動的に作りだし、それに伴う声道内での流体音響現象を介して言語情報として認識できる音響信号を生成する。本研究は、人間の発声力学系と発声運動制御系に着目して、音声生成過程の生理的、力学的、音響的な機構に関するモデルを構築するとともに、発声運動計画機構の数理モデルを構築して、脳における音声情報生成の仕組みを明らかにすること、またこれらの知見に基づいて音声処理の基礎技術を確立することを目的とした。

まず、音声生成に至る階層的なタスク構造に着目し、発声動作の運動タスクの所在、および触覚や聴覚による感覚フィードバックが発声動作に及ぼす影響を明らかにするために、発声中に下顎に力学的外力を加える下顎摂動実験装置、および口蓋の形態を瞬時に変化させる口蓋摂動実験装置を開発し、発声時にそれぞれの摂動外力を加えたときに生じる発声補償動作を解析した。発声動作の運動タスクが個々の発声器官の位置制御ではなく、より上位の声道の局所的な形態の形成と、発せられる音声の音響的特徴にあることを明らかにした。これらの実験結果を基に、声道の局所的形態を運動タスクとして発声器官の協調動作を生成する運動計画モデルを提案し、さらに音声の音響的特徴を運動タスクとする発声運動計画モデルを構築した。この課題解決のために、発声動作から音声生成されるまでのプロセスを非線形確率的な動的モデルとして定式化し、所望の音声スペクトルを与える発声動作の統計的最適推定値を得る手法を確立した。これにより、これまで困難とされた子音を含む連続音声から発声動作を決定する逆問題について大きな前進を果たした。

音声生成メカニズムを究明するために、3次元MR画像と解剖学的データに基づく3次元の計算モデルを構築した。このモデルでは弾性体である舌や唇を多質点のバネ・マスモデルで表し、各ノードに筋肉モデルを配置し、筋の収縮に応じた弾性体の大変形を安定かつ少ない計算時間で生成することができる。さらに、声道形状から声道内の音響現象を再現する3次元声道音響モデルを構築し、これまでの1次元音響モデルでは捉えられなかった音声生成の音響現象を明らかにした。

上記計算モデルをさらに発展させ、音声生成の物理音響的な現象を模擬する実態モデル（発話ロボット）を開発した。このロボットは19自由度を持ち、ピッチおよび有声・無声調整機能をもつ声帯と、多様な舌や唇の形態を模擬する発声器官によって構成された。さらに、発声系モデルと運動計画モデルを融合させ、話し手の声を真似て発声する聞き真似発生機能をもつ自立発話ロボットを構築した。全ての発声器官を模擬したトータルシステムの構築は初めての試みであり、音声科学のみならずロボット工学における新たな方向性を示すことができた。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に25報の論文として発表された。また、特許は8件の日本出願が行われた。本研究終了の2003年以降に、菅田は2件の科研費を獲得し研究を進展させている。この間、海外15報の国際誌論文が発表された。特許は日本出願2件を行った。

## 2-2-10 感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現（研究代表者：石川 正俊）

「手と脳」の関係は、感覚系と運動系を超並列的に処理する脳の機能と、優れたアクチュエータであると同時に優れたセンサでもある手との密接な統合によって実現されている。本研究は、このような「手と脳」のもつ感覚と運動の統合機能を手本として、各要素を人間の機能や従来工学システムの能力を遙かに超えるレベルで構築し、最終的な工学的システムを、人間を超えるレベルで実現することを目指した。

その実現のために、与えられた制約の下で最大パフォーマンスを得るために感覚系、処理系、運動系の時間特性を整合させる「ダイナミクス整合」という概念を提案し、その実現にオンライン型強化学習を取り入れた。これに加えて、大量かつ多様なセンサの情報処理とそれに即した実時間での行動制御を実現するための「超並列性」と、システム全体を合目的的に統御するための「能動性」、さらには実世界に対応した様々な行動を同時に実現可能とする行動の「階層的並列構造」を備えるというコンセプトのもとに、各種センサと、ハンドやアームなどのアクチュエータを階層分散構造で統合するシステムを開発した。

高速ロボット多指ハンドは、瞬時トルクが最大になるように新たに設計したアクチュエータを配し、ハンド部重量が約 800g、3 本指 8 自由度を持つ小型軽量のシステムで、約 0.1 秒で各関節を 180 度開閉できる高速性を実現した。

多指ハンドの表面を覆う人工皮膚のための触覚センサを実現するために、ヒステリシスの小さい液状硬化型感圧導電ゴム素材を開発した。ディッピング法により指などの自由曲面にも感圧膜を構成できる。3 次元構造電極と上記素材を用いて法線・接線力触覚センサを構成した。また、高密度分布型触覚センサの局所情報処理のための LSI を開発した。

本研究の情報処理では、視覚センサの大容量データから小規模ながら即時性の必要なデータまでを対象とし、これらを環境変化に応じて柔軟に処理できることが必要である。その解決のために、有線通信に CDMA の多重化と 2 段階同期（コード同期とチップ同期）を提案し、0.25  $\mu$  m CMOS 技術により転送レート 2Gbps、7 多重の CDMA 送受信を実現した。

「手と脳」システムの実例として、人間の視覚および動作能力を超える高速バッテイングロボットを開発した。打撃用マニピュレータは、バネの弾性エネルギーの瞬時放出により 0.05s での高速スイングを実現した。また、高速ビジョンシステムを 2 台用い、これに実時間 3 次元軌道予測アルゴリズムを実装した。打撃実験では、時速 50km 以上で投球されたピンポン球の軌道を正確に予測し、 $\pm 10$  度の誤差で打ち返すことに成功した。

本研究の成果は、従来自動化が困難とされてきた分野（労働集約型産業、医療、農林漁業など）や介護システムなど、多くの分野への適用が期待される。本研究期間中の成果は、内外の学術誌に 32 報の論文として発表された。石川は本研究期間中のものを含む 2 件の科研費、本研究の発展研究（SORST）、および 2009 年度からの新たな CREST 研究を獲得し活発に研究を進展させている。この間、国際誌に 20 報の論文を発表した。特許は、合計 4 件の日本出願が行われ 1 件が成立した。2000 年以降に 20 件に上る受賞（多くは論文賞）があったことが特筆される。

## 2-2-11 行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明（研究代表者：銅谷 賢司）

人間や動物は、機械システムとは異なり、環境の変化に適応するきわめて柔軟な学習を実行している。そのための機構として、通常想定されているシナプス可塑性にもとづく学習の上に、学習方式の学習とも言うべき「メタ学習」の機構を備えている。本研究は、神経修飾物質のメタ学習における役割に関する新しい仮説を導入し、メタ学習の機構を理論的、実験的手法によって解明するとともに、その成果をより人間的なロボットの設計論に結びつけていくことを目標とした。その実現のために、計算理論/生理実験/脳活動計測/ロボット実験という異なる方法を連携・融合した。

強化学習の4つの主要な大域変数（メタパラメータ）が、ドーパミン、セロトニン、ノルアドレナリン、アセチルコリンという4つの神経修飾物質により表現され、メタ学習が行われているという仮説を2002年に *Neural Networks* 誌に発表した。そのアイデアの具体化として、メタパラメータの設定を高次レベルの制御出力としてメタ学習の最適化を行う階層的強化学習モデルを定式化した。さらに環境のダイナミクスモデルを獲得して、それをもとに環境の変化を検出することによって、メタパラメータを制御する方式を開発した。この方式の有効性をシミュレーションによって示した。また、短期および長期の報酬予測がそれぞれ必要な行動学習課題を実施する中で fMRI 計測を行って、強化学習モデルを用いた解析から大脳基底核の線条体が異なった時間スケールでの報酬予測に関与することを特定するとともに、これがセロトニンによって制御されていることを明らかにした。

また、自己保存と自己複製の要請のもとでの報酬系の設計原理を探るため、「エサ」となる電池パックからの自己充電と赤外線通信によるプログラム（遺伝子に相当）コピー機構を持つネズミ型ロボット群「サイバーロードント」を開発した。これを用いて探索、捕食、交配などの行動学習と、報酬関数や学習のメタパラメータの進化を実現した。

さらに、環境の変化、観測の不確かさなどに応じて、適切にメタパラメータの自律制御を行う強化学習の工学的アルゴリズムを開発し、不完全観測環境下での制御問題、不安定系の自律制御などに適用した。また、これら強化学習アルゴリズムで必要な脳内機能の局在モデルを提案し、それを検証するための fMRI 計測を用いた研究から、前部前頭前野および内側前頭前野が不観測状態の推定に関わるという知見を得た。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に122報の論文として発表された。特許は国内出願が9件（これまでに3件が成立）とこれに関わる海外出願が3件であった。本研究終了後2005～2009年に、銅谷は1件の科研費と沖縄科学技術研究基盤整備機構（OIST）からの研究費を得て、さらに研究を発展させている。この間の成果として48報の国際誌論文が発表された。また国内特許出願は5件（1件が成立）である。特筆されるのは、*Neural Networks* 誌が2002年に本研究を中心に特集号を組んだこと、および本研究期間中の論文の3報と終了後の論文の2報が被引用件数においてトップ1%の論文になっていることで、本研究に世界の注目が集まっていることが伺える。

## 2-2-12 海馬の動的神経機構を基礎とする状況依存的知能の設計原理 (研究代表者: 山口 陽子)

生体は時々刻々複雑に変化する環境の情報を取り込み、それに対応して柔軟な判断や行動を行っている。このような知能の働きを支えるのは、繰り返して成立する通常の学習ではなく、複雑で文脈性に富む情報をリアルタイムで処理する能力である。本研究は、大脳の海馬に着目して、その神経機構が神経集団のリズムによる同期活動で統御されることを作業仮説として、文脈性に富む情報の操作の原理を解明することを目的とした。

ラットが空間運動をする間、大脳海馬の場所細胞は $\theta$ 波のリズム (シータリズム) の中で、徐々に位相の早まるタイミングで発火してパルス列を作る (シータ位相歳差)。このため、空間の並びに対応する場所細胞の出す発火パルス列の間で、タイミングに一定の差異が生じるが、これはシータリズムの位相を通して「時」と「場所」についての文脈情報がコードされることである。本研究では、秒単位の時系列入力が、海馬の入力部位である内嗅野で位相歳差に変換され、そのパルス列間の位相差が時間非対称ヘブ則によって、CA3ニューロン間の非対称結合にリアルタイムで記憶貯蔵されるとする計算理論を提案した。また、記憶貯蔵能力について、位相コードは発火率コードとの比較において、広範な時系列パラメータに対応でき、かつ安定に想起できる点で優れ、行動時系列の記憶貯蔵・想起に不可欠の機構であることを計算機実験で示した。

多様なエピソードの記憶記録には、時系列入力には順序の情報だけでなく、時空間パターンの情報が重要である。そこで時空間パターンとしての時系列入力が、位相コードによって正確に記録想起される学習条件を計算機実験により検討した。その結果、入力の時空間パターンと相似なパターンが記憶想起されるためには、場所細胞の発火率がラットの走る速度に依存して単調増加することに加え、シナプス可塑性の大きさが後シナプス細胞ごとに一定になるような可塑性調節機構が必要であることが分かった。これらの性質は実際に生物学的に知られているが、その学習機能上での重要性が示された。

ラットで観測される位相歳差のダイナミクスが、ヒト海馬依存の記憶である物・場所連合記憶の貯蔵に有効か否かを検討した。サルでは海馬細胞の活動は空間における視点に依存することから、サッカーボール運動による視覚時系列を、内嗅野を通して海馬に繋げる新たな神経回路モデルを提案した。物情報はサッカーボールごとに变化するが、空間情報は幾つかのサッカーボールに跨るため連続的に变化する。計算機実験では、数秒間のサッカーボールの入力時系列によって、瞬時に情景と物体の配置を記録でき、位相コードが物と場所の記憶でも有効に働くことが示された。さらに、結果として形成される海馬神経回路は、物と場所について、また場所情報でも異なるスケールの情報では階層化されていることを見出した。ラットから得られた神経メカニズムをヒトの記憶にも適用できることを初めて指摘した。

本研究期間中の成果は、内外の学術誌に 68 報の論文として発表された。本研究終了の 2004 年以降に、山口は 25 報の国際誌の論文を発表し、2 件の論文賞を受賞した。また、2005 年に Neural Networks 誌において特集号を企画編集した。

## 第3章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的および経済的な波及効果

### 3-1 脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装（研究代表者：合原 一幸）

#### 3-1-1 本研究期間中における状況

##### (1) 本研究開始の頃の状況

20 世紀後半以降の急激な高度情報化の進展を根底で支えているデジタルコンピュータについて、近年その性能向上の限界が次第に明らかになってきた。その一つは現行のハードウェアのシステム構成が同期式であることに起因して、その高速化と高集積化が、逆にこの方式に固有な配線遅延と電力消費の問題を顕在化させ、コンピュータの性能限界が見えてきたことである。もう一つは、カオスダイナミクスの重要性が理解されるとともにクローズアップされてきた問題として、カオスの複雑さは初期値の極微の差異に鋭敏に影響されるにもかかわらず、デジタルコンピュータでは有理数を除くほとんど全ての実数を正しく扱うことができないことである。

合原は、1980 年代前半の研究において、ヤリイカの巨大神経軸索の非線形ダイナミクスを電気生理的に検出し理論解析するなかでカオス現象を発見したことに端を発し、カオスを基礎にして 21 世紀の高度情報化社会を支える新しい情報処理系を構築する構想を温めてきた。それをまとめた形で実施したのが本研究である。

研究の基軸を脳のニューロンとそのネットワークの持つ 2 つの際立った性質に求めた。その第一は、ニューロンがその非線形アナログ特性に基づいてカオスを生成するアナログデバイスだということである。そのようなアナログデバイスから生成されるカオスは熱雑音付きのカオスであるが、デジタル実装のカオスとは本質的に異なって数値計算の意味での近似が入らず、実環境でのロバスト性を持つカオスとして工学的応用も期待できる。その第二は脳のニューラルネットワークが活動電位パルスの非同期な時空間系列で駆動されていることである。どちらも現代のデジタルコンピュータの動作原理の対極にある。

そこで本研究では、①理論研究グループにおいて、脳における非線形時空間ダイナミクスによって実現される情報処理の原理を数理モデルによって構成論的に解明し、②実装研究のグループにおいて、アナログ電子回路技術および非同期電子回路技術に基づいて、①で得られた理論モデルの具体的なハードウェア実装の基礎技術を開発した。さらに、③生理実験による検証を行う生理実験研究のグループを加えた 3 つの柱で構成した。本研究期間中の主な成果の概略を以下に記す。

##### (2) 脳の動的時空間計算モデルの理論研究

###### A. 脳型時空間カオスダイナミクスの数理解析

###### ① 動的連想記憶ダイナミクス

連想記憶とはある事物からそれに関連した事物を思い出すような記憶の形式である。ニ

ニューラルネットワークによる連想記憶の機能をカオスの観点から研究した。従来の連想記憶のモデルでは、マカロック-ピッツ型素子<sup>8</sup>を用いるホップフィールドニューラルネットワーク<sup>9</sup>を用いて、シナプス結合を設定することにより記憶させたパターンを、漸近安定不動点への収束という形で想起動作を見るものであった。

本研究では、もっと人間の連想に近い動的連想記憶を実現するために、上記シナプス結合係数を用いたまま、その構成素子をカオスニューロン<sup>10</sup>に置き換えることによって、上記ネットワークの漸近安定不動点を自律的に抜け出し、記憶パターンを動的に想起することができるようになった。カオスニューロン固有のパラメータを決めるのに新しい探索アルゴリズムを開発し、少ない計算量でカオスによって駆動される新しい動的連想記憶の構築が可能になった。これによって大規模化・ハードウェア化を可能にして、応用への道を開いた。また、このようなカオスニューラルネットワークの数学的構造として、対称性によって定まる不変部分空間の階層構造を明らかにした。

動的連想記憶ネットワークでは、カオス性が強まると様々なアトラクタベイスンを均一に訪問するようになる。カオス性の強さを調節することで訪問するアトラクタベイスンの範囲を調節できる。この性質を利用すると記憶のサーチなどに応用できる。さらに、記憶として埋め込んだパターンの一部分を外部から入力すると、短いステップ数で正しいパターンのベイスンに到着できることを確認した (図 23)。生体系における複雑な処理を伴う瞬時応答の実現メカニズムを示唆するものである。



図 23 外部部分入力への応答特性

## ②組み合わせ最適化ダイナミクス

動的連想記憶を実現する時空間ダイナミクスは組み合わせ最適化問題に応用できる。NP 困難<sup>11</sup>な組み合わせ最適化問題では一般に、問題のサイズとともに、探索の組み合わせの数が指数関数的または階乗的に増大するので、最適解を求めることは不可能になる。そこで、厳密解にはこだわらず、実用的な近似解をできるだけ少ない計算量で得るためのアルゴリズムの開発が重要な実用的課題になり、局所的な極小解に陥った場合でも探索を停止することなく抜け出すための工夫を組み入れた近似解法が開発されてきた。これまでに開発さ

<sup>8</sup> ニューロンに多数のニューロンからの出力が入力され、その総和が閾値を超えるとときに発火するという 2 値型モデル。シナプスの信号伝達効率は一律ではなく、興奮性・抑制性の違いもある。これらを入力シナプス結合荷重によって考慮する。また、シナプス可塑性を結合荷重の変化として実現できる。

<sup>9</sup> 非同同期型ネットワークで、ニューロン間相互は対称的に結合されている。

<sup>10</sup> 閾値特性が S 字型のシグモイド関数を持ち、一つの発火のあと発火しにくくなる「不応性」をパラメータとして制御できる。

<sup>11</sup> 解くべき問題の入力サイズ  $n$  に対して、処理時間が  $n$  の多項式で表現できる上界で規定される範囲でアルゴリズム (多項式時間アルゴリズム) が得られないと考えられている問題の範疇。

れたカオスダイナミクスを用いる最適化法も局所解を抜け出す上で高い性能を持つことが分かっているが、ホップフィールドニューラルネットワークを用いていることに起因して大規模な問題への適用が困難であった。

本研究では、大規模問題へ適用可能な近似解法（タブーサーチ<sup>12</sup>）をカオスニューラルネットワークの上で行うという新しいアプローチを提案し、従来のカオス法、従来のシミュレーテッドアニーリング<sup>13</sup>やタブーサーチに比べて誤差の小さい良好な解をより高速に得ることができることを示した。また、その高効率性の基になっているカオス最適化ダイナミクスの大域探索能力、大域分岐構造、さらに安定性と収束性について数理的に解析した。

カオス最適化の具体的応用として、照明設計問題を扱った。照明設計は、光源の個数、配置、色、配光特性など様々な特性が最適化の対象とされるが、直接光だけでなく、相互反射光まで考慮に入れると極めて複雑な問題となり、一般に輝度分布から光源パラメータを解析的に求めることは不可能である。本研究では、カオスニューラルネットワークを最適化手法として導入することで 3 次元空間の照明設計を可能にした。また、その他の最適化方法（ホップフィールド型ニューラルネットワーク、遺伝アルゴリズム<sup>14</sup>、シミュレーテッドアニーリング）との性能比較において、問題サイズが大きくなるにつれて本方法が解の精度と速さにおいて優れていることを示した。

### ③フラクタルコーディング・カオスニューラルネットワーク

カオスを利用したデジタル符号化のために、カオス駆動ニューロンおよび、互いに抑制的に結合するほぼ線形の特徴を持つ 2 個のニューロンからなる安定な（縮小的）応答系からなるカオスニューラルネットワークモデルを解析した。カオスニューロンのダイナミクスがコード系列の情報を反映して、フラクタルアトラクタ上に埋め込まれる。本研究では、カオスニューロンの状態遷移とアトラクタ空間の中の階層的フラクタル構造との関係を考察した（図 27 参照）。

## B.脳型時空間パルスダイナミクスの数理解析

### ①動的細胞集集体理論－Gap Junction

結合系が生成する時空カオス

大脳新皮質において抑制性介在細胞間（FS 細胞間、LTS 細胞間）に膨大な

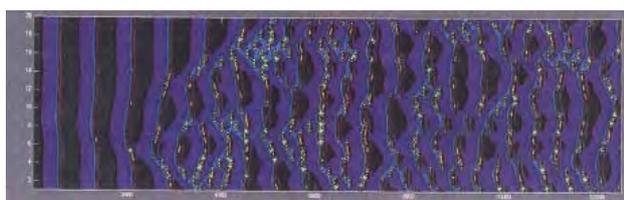


図 24 20 個の Ia 類ニューロンが、ギャップジャンクションによって両隣と相互に結合しているときの膜電位の時間変動を等高線図で表現したもの。時刻 0 におけるわずかの攪乱がカオス的な動力学へと移行する過程が見えている。

<sup>12</sup> 局所探索法の一つで、状態の近傍を複数探索しその中で最も良い近傍状態に遷移する。この操作を「タブーリスト」に記録し、以後同じ操作は行わないことをルールとして、局所極小値で停滞することを防ぐ。

<sup>13</sup> 金属材料の焼き鈍しに倣って、まずシステムの「温度を上げて」エネルギー関数の小さな変化を無視して広い探索を行い、徐々にエネルギーの低い領域に向かって探索範囲を狭めていき、エネルギー関数の最小状態を探索する。

<sup>14</sup> 解の候補を遺伝子で表現した「個体」を複数用意し、適応度の高い個体を優先的に選択して組み替え・突然変異などの操作を繰り返しながら最適解を探索する。

数のギャップジャンクション (GJ) と呼ばれる電気結合が存在することが、近年明らかにされてきたが、その役割は知られていなかった。本研究では、GJ 結合系の動力学に焦点を当て、新皮質における「GJ 結合抑制系は時空カオスを内包する」という原理的可能性を提示した (図 24)。一定の背景入力が存在すれば、たとえ背景入力に時間的、空間的揺らぎが存在しなくても、顕著な不規則時空パターンが自発的に生じる。I a ニューロン相互の GJ 結合がなく孤立した状態では、規則的なスパイク発火をする。その意味で、この時空カオスは結合系において初めて生じる内発的なダイナミクスである。

## ②デュアルコーディング仮説

単純な発火率コーディングでは時間平均操作が必要となるため、しばしば脳内で起きている速い情報処理過程が説明できない。一方、時間精度の高い発火スパイク時系列に基づく時空間スパイクコーディングでは、原理的には、より少ないエネルギーで、より速く情報の処理ができる。また、感覚ニューロンのスパイク間隔時系列は高速で省エネルギーであり、カオス的な外界入力連続情報を保持できることも見出されている。

本研究では、感覚層と皮質層の 2 層からなるフィードフォワード型ニューラルネットワークにおいて、第 1 層を形成する感覚ニューロンはカオス的に変動する連続刺激を受け取り、その情報をスパイク間隔の符号に変換 (コーディング) し、第 2 層を形成する各皮質ニューロンはランダムに選ばれた一定数の感覚ニューロンからパルスを受け取るというモデルを設定した。また、各皮質ニューロンは独立な背景ノイズを受け取ることを仮定した (図 25)。ノイズ強度が小さいときは、皮質ニューロンは同期して同期発火間隔が頑健に外部入力をコードできて、情報伝達速度は同期発火間隔の逆数で規定される。ノイズ強度が強くなると皮質ニューロンは非同期発火し、外部刺激波形は集団的発火率によって精度よくコードされる。すなわち、ノイズ強度パラメータの変化に伴って、単一の枠組みのもとで発火率コーディングか、時空間スパイクコーディングかが効率的に選択されることを見出した<sup>15</sup>。

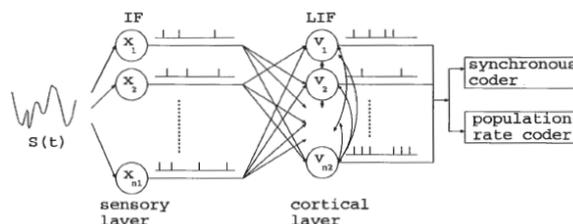


図 25 2層フィードフォワード型ニューラルネットワーク

## C.カオスの工学応用

### ①カオス時系列解析技術

複雑な時系列データからカオスの特性を抽出する「カオス時系列解析」手法を体系化した。すなわち、カオスの特徴づける自己相似 (フラクタル) 性、軌道不安定性 (初期値に対する鋭敏な依存性)、およびそれに起因して生じる短期予測可能性・長期予測不可能性をそれぞれ定量的に解析する方法を開発した。さらに、これらのカオス時系列解析手法をニ

<sup>15</sup> Masuda N, Aihara K, Phys. Rev. Lett., 88, 248101-1-248101-4, 2002

ニューロンのスパイク間隔系列の時系列解析に適用して時間コーディング特性を明らかにした。

## ②カオスの工学応用例

カオスの工学応用として、カオス暗号、音声カオス、船のカオス制御などの問題を取り上げた。この中で、音声カオスでは、母音信号に含まれるピッチ揺らぎをサロゲート法<sup>16</sup>により解析した。母音のピッチ揺らぎが全くランダムなノイズではなく、非線形システムとして合成できる可能性を示した。

## D. 遺伝子タンパク質ネットワークの時空間ダイナミクス

脳の動的時空間計算モデルの成果を遺伝子・タンパク質ネットワークの数理モデル化に応用する研究を行った。

### ①時系列からのネットワーク設計

遺伝子ネットワークを設計（遺伝子間の相互作用を決定）し、遺伝子ネットワークが設計通りに動作するかどうかを確認することでネットワークシステムを理解するという、システムの理解を目指した。本研究では、遺伝子間の相互作用の決め方として、遺伝子発現の時系列として与えられた遺伝子ネットワークの動作データから間接的に決定する方法を提案した。発現・非発現のバイナリ値の時系列からアナログ量の変化を表す区分線形な微分方程式を設計する方法を開発した。

### ②人工遺伝子ネットワーク

プラスミド上に人工的に遺伝子ネットワークを構築して大腸菌内で発現させる場合に、有用な機能を持つネットワークの設計方法や構成論的解析方法についての研究を行った。正のフィードバックのみから構成される遺伝子ネットワークは、転写、翻訳の過程から生じる時間遅れがあっても平衡点に収束すること、スイッチとして望ましい特性を満たすことを示した。

## (3) 脳の動的時空間計算モデルの実装研究

### A. 大規模カオスニューラルネットワークシステム

実数を自然に扱えるアナログ集積回路および非同期電子回路技術に基づいて、(1)～(2)で得られた理論モデルの具体的なハードウェア実装の基礎技術を開発した。非線形結合系の振舞は規模に依存するのでできるだけ大規模化する必要があり、大規模なカオスニューラルネットワークを構築するための IC チップセットを開発した。連続値である実数を扱うために、カオスニューロンはスイッチドキャパシタ (SC) 集積回路で構成した。拡張性と汎

<sup>16</sup> 時系列データについて、仮定した確率的ノイズであるかどうかを統計的に検定する手法。

用性を考慮して、3つの内部状態を持ち、さらに単極及び両極性の出力関数を持つモデルとした。ほとんど全てのモデルパラメータを外部より制御できるように、プログラマブル・キャパシティブアレイ (PCA) を使用するとともに、特性が可変な非線形関数回路とした。図 26 はこの IC チップから得られた分岐特性の一例である。

ニューロンのアナログ出力が軸索では活動電位の有・無に2値化されることから、シナプスは時分割多重・メモリベース構成のデジタル回路とした。これによって最大1万個のニューロンの相互結合 (1億個のシナプスの実装) が可能になった。

このチップセットを用いた大規模カオスニューロコンピュータシステムの構成法を提案した。システムをスケラブルで再構成可能とするため、ボード・ユニット・システムからなる階層的構造を導入した。これらのアーキテクチャの有効性を実証するため200ニューロンからなる検証システムを構築し、システムの全ての機能を確認するとともに、動的連想記憶を実現した<sup>17</sup>。

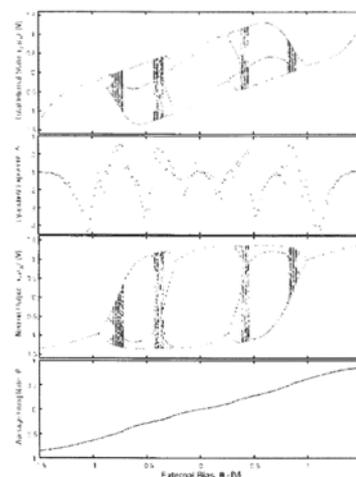


図 26 集積回路化したカオスニューロンの外部バイアスを変化させたときの分岐特性の測定例。上から、内部状態の総和、リアプノフ指数、ニューロン出力、平均発火率

### B.カオスニューロハードウェアによる組み合わせ最適化問題の解法

理論研究で明らかになったように、時空間カオスニューロダイナミクスを他の手法と組み合わせることにより最適化問題の解の探索に利用できる。NP 困難問題である、巡回セールスマン問題<sup>18</sup> (TSP)、二次割り当て問題<sup>19</sup> (QAP) を、従来のホップフィールド型のニューラルネットワークによる解法でなく、カオスニューラルネットワークの上で近似解法 (2-opt 法<sup>20</sup>を用いるタブーサーチ) を実行するための専用のカオスニューロン回路を開発した。TSP については並列処理と大規模化を、QAP については高速化を目指し、検証システムを構築してこれらの優れた解法能力を確認することに成功した。

### C.カオスニューロチップによるフラクタルコーディング

理論グループが(2)A.③で研究したように、2個のほぼ線形のニューロンの結合系からなる縮小写像システムを1個のカオスニューロンで駆動することにより、縮小写像システム

<sup>17</sup> Horio Y et al., IEEE trans. Neural Networks, 14, 1393-1404, 2003

<sup>18</sup> 与えられた全ての都市を一度ずつ巡り出発地に戻る巡回路の総移動距離が最小のものを求める組み合わせ最適化問題。

<sup>19</sup> 物資の輸送量と頻度を考慮して全体のコストが最小になる施設の配置を求める施設配置問題を典型例とする組み合わせ最適化問題。

<sup>20</sup> たとえば、TSP 問題において、既に構成済みの巡回路を改良する局所探索の方法で、巡回路の中から2都市間を結ぶ路を2本選んで入れ替える操作を繰り返す。

の出力値からなる状態空間中に、カオスニューロンの出力時系列をフラクタル構造として埋め込むことができる。このシステムをスイッチドキャパシタ回路技術で集積回路化して、カオスニューロンの時系列がフラクタル構造中に埋め込まれていることを確認した (図 27)。このユニットをアナログ回路で作ると理想的には容量無限大のメモリが作れる。

#### D.非同期パルスニューラルネットワークの構築

近年、多数ニューロンの活動電位パルスのもつ時空間構造が脳内の情報表現・処理様式として用いられている可能性が示唆されている。このような情報表現を実現するために、連続時間が扱え、連続値も扱えるアナログ集積回路を用いて、活動電位パルスの時空間構造が反映されるニューロハードウェアを構築し、動作を確認した。

非同期に飛び交うパルスにより情報を処理するネットワークでは、多数のパルス列の時間構造が保存されることが重要である。これをできるだけ少ない配線量で、かつ、時間情報を保存するようなパルス伝送方式を提案し、シミュレーションにより有効性を確認した。

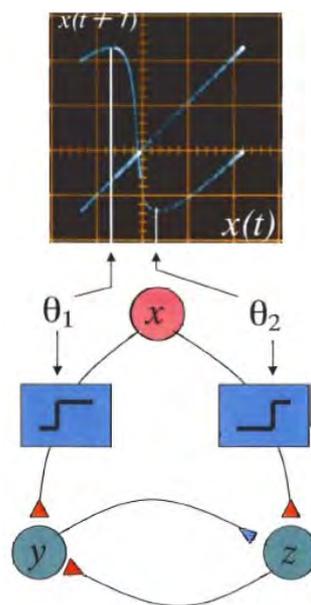


図 27 カオスニューロンマップとフラクタルコーディングネットワーク

#### (4) 脳の動的時空間計算モデルの実験研究

海馬は長期増強 (Long-Term Potentiation, LTP) および長期抑圧 (Long-Term Depression, LTD) として知られるシナプスの伝達効率の変化を基礎過程として、空間的、時空間的に発生する事象を時空間文脈構造として一時的に記憶する場所であると考えられているが、その記憶のメカニズムについては十分わかっていない。本研究では、海馬 CA1 への時系列刺激と LTP/LTD 誘起の関係を調べた。実験は、刺激電極を海馬 CA3 の出力であるシェプアー側枝 (CA1 の入力) に刺入し、その電氣的刺激による細胞活動の電位の変化を錐体細胞層からの集合電位計測、およびオプティカルイメージング法<sup>21</sup>によって計測した。

電氣的刺激として様々な時間パターンからなる複合的な電氣的刺激を与えて反応を記録した結果、LTP の誘起には時間的に二つの動的過程があり、両過程が共同して働くことを見出した。一つはバースト現象に相当する短い時間間隔 (数 ms~10ms) の LTP であり、他方は海馬  $\theta$  リズムに見られるような数 100ms 程度の時間間隔の LTP である。

さらに、海馬 CA3 ではカオス時系列が観測されていることから、カオス時系列刺激 (2 値化した時間間隔の刺激パターンがカオス時系列となるもの) を海馬 CA1 に与えて LTP/LTD 誘起の効果を調べた。その結果、海馬 CA1 の回路網の LTP/LTD はある高次の相

<sup>21</sup> 電位感受性色素で海馬の切片を染めておき、細胞の集団的活動の電位の変化を光の透過率や反射率の変化に変換して検出する方法。

関のあるカオス時系列に敏感であり、文脈記憶コーディングにカオス時系列が使われている可能性を見出した。

### 3-1-2 本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

#### (1) 本研究終了後の研究の流れ

研究資金	研究テーマ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CREST	脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装	1期												
科学研究費補助金萌芽的研究	昆虫の複雑形態の多様性に関する画像解析と数理モデル化													
ERATO	合原複雑数理モデルプロジェクト													
科学研究費補助金特定領域研究	モデル脳におけるコーディングとエルゴード性に関する数理的研究													
科学研究費補助金特定領域研究	異種情報の時空間コーディングと統合的処理に関する非線形システム論													
科学研究費補助金基盤研究(A)	シナプス前制御に基づく神経情報処理の数理モデル化とその工学応用													

図 28 本研究以降に獲得した主な研究助成金（合原）

本研究以降に合原が獲得した主な研究助成金は、図 28 のとおりであった。

本研究終了後の 2002 年以降に、合原は 3 件の科研費を獲得した。また、本研究の理論研究と実装研究の部分が契機になって 2003 年度から 5 年間の ERATO「合原複雑数理モデルプロジェクト」（以下「ERATO プロジェクト」と省略）を実施して研究を大きく発展させた。さらに、2009 年度に始まった「最先端研究開発支援プログラム」における「複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技术応用」プロジェクト（以下「最先端プロジェクト」）に採択された。実験研究の部分に関しては、科研費の特定領域研究の大きなプロジェクトの中で発展している。「脳科学の先端的研究」（以下「先端脳」）が 2000～2004 年度に実施され、その後 2005 年度から「脳機能の統合的研究」（以下「統合脳」）が行われている。合原もグループリーダーであった塚田稔と共に参加している。

上記 3-1-1(2)A 項の「脳型時空間カオスダイナミクスの数理解析」は、カオスを用いる情報処理がテーマで、その後 ERATO プロジェクトにおける主要テーマへと大きく発展した。

(2)B 項の「脳型時空間パルスダイナミクスの数理解析」では、脳神経の情報処理に学んでパルスによる情報処理を研究した。これは、この後脳科学全体の理論研究がパルスダイナミクスの研究に進んでいったのでその先駆けになったものである。脳科学全体に大きなインパクトを与えた研究であったといえる。

(2)C 項のカオスの工学的応用についても ERATO プロジェクトにつながって本格的に発展した。時系列解析は応用の範囲が広く、時間データが取れる分野であれば例えば経済分野にでも応用できる。最先端プロジェクトではさらに広く、複雑系全体の応用という研究に拡大した。なお、本研究で取り上げた音声カオスの知見はそれが基礎になって様々に応用されている。

(2)D 項の遺伝子・タンパク質ネットワークについても ERATO プロジェクトにおいて発展し、最先端プロジェクトでもテーマとして取り上げられている。本研究から生まれた理論が世界のこの分野をリードしている。

(3)項のハードウェアはこれが基礎となって ERATO プロジェクトの成果につながり、従来のデジタル集積回路とは違うアナログ集積回路やパルスを使う集積回路の基礎を構築することが出来た。それがさらに最先端プロジェクトへとつながる発展の基盤となった。

(4)項の実験の方は、科研費の「先端脳」「統合脳」に発展した。グループリーダーであった塚田は玉川大学で唯一のグローバル COE を獲得した。この結果、玉川大学は脳科学研究のひとつの中心となっている。

### 3-1-3 研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果

#### (1) 科学・技術の進歩に貢献する成果

##### A. 複雑系研究における新しい流れ

20 世紀の科学技術の根底を支えてきた線形の理論に対して、その後半になってカオス、フラクタルなど非線形（複雑系）理論が進歩した。21 世紀は産業領域まで広く複雑系理論によって支えられる時代になると考えられる。本研究が、単に理論だけの研究ではなく実装研究まで行ったことによって<sup>22</sup>、複雑系研究が理論の世界に留まらず工学的にも使える学問であり、産業応用も視野に入れることができることを分かりやすい形で示すことができた。同時に、従来のデジタルコンピュータによる擬似的なシミュレーションでなく、アナログ回路による実装ができるということは、カオス研究の方法論の上でも強い説得力が生まれた。複雑系では、ハードウェアだけでなく数理モデルについても、作ってみて解析する構成的研究（Analysis by Synthesis）は重要な方法論といわれるようになったが、これはもともと工学本来の方法論である。理論と実験を合体することはよく行われるが、本研究ではそれにハードウェアを合体した。本研究はそれによって、複雑系研究の全く新しいスタイルを示すことができた。

また、本研究は「脳」を対象にしつつも、数学が基礎になっているので分野横断性があり、その成果は広範囲に適用できることを示した。数理工学は最先端の数学を使って工学に寄与するという日本で生まれた学問分野である。出口としての特定の産業が用意されていないという事情もあって分野横断的な学問を創ってきた伝統があり、これが本研究から最先端プロジェクトに至る広いスコープの研究につなげることが出来た背景になっている。その結果、数理工学の重要性を、本研究の脳科学をきっかけにして広めることが出来て、さらに最先端プロジェクトにおいて複雑系数理モデル学という概念を完成させようとして

---

<sup>22</sup> Aihara K, Proc. IEEE, 90, 919-930, 2002

いる。脳という「狭い」ところから始まって、数理工学を基礎に横断的に例えば経済データまでも扱える広い分野をカバーできる理論体系に育てた。最先端プロジェクトのように、広い産業応用まで視野に入れた複雑系科学技術研究は世界にも例がない。今後、独自の伝統と豊富な人材を生かして、日本がこの分野を牽引する可能性を開いたといえる。

## B.脳型時空間カオスダイナミクスの数理解析

### ①動的連想ダイナミクスと組み合わせ最適化問題への応用

動的連想ダイナミクスのテーマにおいて、複雑なシステムでシミュレーションを行うときには、パラメータをどう設定するかということは計算時間に関わる重要な問題である。本研究では、パラメータ設定の仕方をアルゴリズムとして構成し、これによって、大規模化とハードウェア化が可能になった。このテーマではカオスニューラルネットワークの数学的構造の解明や、動的連想記憶をしているときに外部入力を入れることによってカオスを制御できることなどの重要な成果が上がっている。それまでの連想記憶に比べると、カオスによってより人間らしい連想になっているのと、組み合わせ最適化問題の解法、検索機能への応用が開けたという意義がある。記憶の検索に応用すると、少しでも思い出した部分があると、それをきっかけに完全な情報を読み出せるという機能が作れる。

組み合わせ最適化問題では、巡回セールスマン (TSP) 問題や二次割り当て (QAP) 問題を代表とする NP 困難問題の組み合わせ最適化問題にカオスニューラルネットワークを用いる方法が、たいへん優れていることを実証することができた。カオスを用いると局所的な極小値に停留することなく遍歴的にそこから抜け出すことは従来から分かっていたが、本研究では大規模な TSP 問題に、カオスニューラルネットワークの上で大規模化可能な近似解法 (2-opt 法やタブーサーチ) を駆動する方法を応用することによって、極めて効率的に良好な解に到達できることを示した。また、QAP 問題では、ニューラルネットワークの上で指数減衰タブーサーチを駆動するという方法を採用することによって、従来のカオス応用のみならず、従来のタブーサーチや指数減衰タブーサーチに比べても、計算時間と解の精度において優れていることを示した。カオスニューロンの不応性のために真の最適解からも抜け出すという心配に対しては、その対策として新しいアニーリング法 (カオスアニーリング) が提案された。確率的アニーリングと異なり、決定論的メカニズムによるアニーリングであるため計算の高速化が期待できるが、それを実証することができた。

さらに本研究では、TSP 問題や QAP 問題のための専用アナログ集積回路を作製し、有効に働くことを実証するのに成功した。組み合わせ最適化問題は応用上重要なテーマであり、ERATO プロジェクトでの大きな成果 (複雑系コンピューティング) につながった。工学的に重要な組み合わせ最適化問題の対象は数多く存在することから、カオスニューラルネットワークは今後広く有効に使われるようになると期待される。

### ②フラクタルコーディング

「フラクタルコーディング」のテーマの中で研究したカオスニューラルネットワークについて、ラットの海馬の中でこれに近いことが実際に起きていることを、塚田と津田 一郎（北大）らが科研費プロジェクトにおいて最近発見した。本研究ではそれに先だって、アナログ集積回路を作って動かし、実際の物理システムとして使えることを示した。本研究で、カオスやフラクタルが情報処理に使えるということが分かったので、ERATO プロジェクトではもうすこし広い複雑系・脳型コンピューティングという概念で研究を実施して大きな成果を上げた。

### C.脳型時空間パルスダイナミクス

#### ①非同期情報処理

3-1-1(2)B.の脳型時空間パルスダイナミクスのテーマにおいて、非同期情報処理の問題を扱った。脳の中は、おのおののニューロンが非同期で発生するパルスが飛び交っている。これは、生物のニューラルネットワークが同期式で動く現在のコンピュータの対極にあることを意味する。非同期式のコンピュータについての研究はあるが、脳の情報処理の非同期性の仕組みが分かれば工学的にも大きな意義を持つ。E 項（48 ページ）に記すように、本研究では、VLSI 実装に適した非同期パルスニューロンモデルを開発し、実際に内部状態の値や出力パルスの時間間隔にカオスを含む複雑な挙動を生み出すことを確認した。

ERATO プロジェクトではこれが発展して、複雑システムおよび脳神経システムの情報処理に関する種々の数理モデルを構築すると共に、多様なカオス実装技術およびニューロン・シナプス実装技術を確立した。その研究の過程では理論研究と実装研究の融合が効果的であった。その好例としては、脳科学分野で最近発見されて注目を集めている、入出力神経パルスのタイミングに応じてシナプス結合が変化する STDP (Spike Timing Dependent Plasticity) 学習則に関する成果が挙げられる。この研究では、シナプス結合を介した神経スパイクによる情報伝達に関する情報理論的解析により、ニューロンの入出力スパイク列間の相互情報量最大化原理に基づいて電気生理実験で得られている STDP 特性とよく似た学習則を理論的に導出した。2005 年に論文を発表し<sup>23</sup>、かつそれを学習するチップとしてハードウェアで実現できた。

#### ②動的細胞集集体理論

近年、高次機能を担う大脳新皮質領域において抑制性介在細胞間 (FS 細胞間、LTS 細胞間) の至る所に、膨大な数のギャップジャンクション (GJ) の存在が報告されるようになった。このことが動機になって、本研究では新皮質ニューロンの発火特性上の分類である I 類ニューロンのサブクラスの GJ 結合系の動力学に初めて焦点を当てたが、この結果から、今後の脳神経科学ないしは認知神経科学の研究に新しい道が開ける可能性がある。GJ の抑制的結合がカオス的ダイナミクスを内包することはその後、実験的な検証が ERATO プロ

<sup>23</sup> Toyozumi T et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 102, 5239-5244, 2005

ジェクトの中で出来た。実際に GJ がたくさん存在する部位である脳の下オリーブ核の実験データをニューヨーク大学の Eric J. Lang 准教授から入手して、そのデータ解析から、GJ の結合系で下オリーブ核の振るまいが説明できることを示した。Lang、川人光男（ATR 脳情報研究所長）、合原らの共著論文が近く出版される。

### ③デュアルコーディング仮説

本研究ではノイズ強度に応じて、通常の発火率コーディングだけでなく時空間パルスコーディングも使われていることを主張した。同じハードウェア（脳のネットワーク）がノイズ強度に依存して動作モードを切り替え、二つのコーディングを使い分けることを意味する。ノイズがなければ結合している各ニューロンは同期できて時空間パルスコーディングになる。ノイズが強いと同期できなくなり、非同期の情報処理である発火率コーディングのパフォーマンスが上がる。このデュアルコーディング仮説については、未だに論争が続いている。その間、時空間パルスコーディングについての多くの実験データが出てきている。神経のコーディングについての研究は今後も長く続くものと予想されるが、時空間パルスコーディングの意義を指摘したことはインパクトがあった。また、雑音の強度によってコーディングを使い分けるということに多くの研究者が興味を示した。ノイズに意味があるという現象は Stochastic Resonance（確率共振）、Coherence Resonance や、カオスにおける Noise-Induced Order などが知られているが、新しいタイプの現象を見つけたという位置づけになる。この仮説は未だ検証されてはいないが、いまでも有力な仮説として残っている。

### D. 遺伝子・タンパク質ネットワークの時空間ダイナミクス

遺伝子・タンパク質ネットワークについては、本グループの理論が世界のこの分野の数理研究をリードしている。ゲノム科学の実験の進展によって、細胞の中で遺伝子とタンパク質がネットワークを作っていることが分かってきたが、脳のネットワークが理論なしでは理解できなかったように、遺伝子・タンパク質のネットワークも数学に裏打ちされた深い理論がないと理解できない。その基盤を、本研究グループが作ってきた。ERATO プロジェクトでも、遺伝子・タンパク質ネットワーク、さらにはそれらに内在する細胞の集団ダイナミクスの生命情報処理に関する数理モデルおよびその解析方法の構築を進めた<sup>24</sup>。その後の研究成果も含めた遺伝子・タンパク質ネットワークの数学理論に関する本格的専門書<sup>25</sup>が、Springer 社から 2010 年中に出版される予定である。遺伝子・タンパク質分野では、実験に比べて理論はこれからだが、その数理的基盤が本研究からスタートしたことの意義は大きい。

<sup>24</sup> Zhou T, et al., Phys. Rev. Lett., 95, 178103-1–178103-4, 2005

<sup>25</sup> “Modeling Biomolecular Networks: Structures and Dynamics”, by Chen L, Wang R, Li C and Aihara K, Springer

## E.カオスのハードウェア実装と複雑系コンピューティング

本研究は、カオスを基礎にして 21 世紀の高度情報化社会を支える新しい情報処理系を構築する構想から始まり、実装グループはその構想を具体化する役割を担った。

本研究では、拡張性と汎用性、および再構成可能性を備えるカオスニューラルネットワークを階層的システムとして開発した。基本となる IC チップセットは、10 個のカオスニューロン（アナログ回路であるスイッチドキャパシタ集積回路で構成）とそのシナプス（時分割多重・メモリベースのデジタル回路で構成）からなる「ボード」である。その上の階層であるユニットは最大 10 枚のボードからなる。全体のシステムは最大 100 個のユニットからなる。200 カオスニューロンからなる検証システムによって、動的連想記憶を実証することができた。その結果、最大で 1 万個のカオスニューロンを 1 億個のシナプスで結合する大規模なカオスニューロコンピュータが実現可能であることを示した。

カオスニューロハードウェアによる高速性と並列計算性を生かした、組み合わせ最適化問題（巡回セールスマン問題（TSP）と二次割り当て問題（QAP））の高速な解法の実現のために、それぞれ小型で高速な専用カオスニューロン回路を開発した。TSP では、複数の小規模ハードウェアを並列に用いて高速に解くための並列分割方式を開発した。これによって、1 万都市を超える大規模問題を 2-opt 法で高速に解くことが可能になった。

理論グループの研究から生まれたフラクタルコーディングの基本構造（1 個のカオスニューロンと 2 個のほぼ線形なニューロンの結合系からなる縮小写像システム）をスイッチドキャパシタからなるアナログ回路で構成し集積化した。このようなシステムによって大容量のメモリや高密度の情報圧縮ができると期待される。

近年、多数のニューロンの活動電位パルスの詳細な時空間構造が脳内情報の表現・処理様式として用いられている可能性が示唆されている。このような情報表現においては、連続時間が重要な役割を果たす。そこで、連続時間が扱え、さらにカオスダイナミクスで重要な連続値も扱うことができるアナログ集積回路技術を用いて、活動電位パルスの時空間構造が反映されるニューロハードウェアを構築した。そのために、VLSI 実装に適した非同期パルスニューロンモデルを開発し、実際に内部状態の値や出力パルスの時間間隔にカオスを含む複雑な挙動を示すことを確認した。

ERATO プロジェクトでは本研究の取り組みが発展して、複雑システムおよび脳神経システムの情報処理に関する種々の数理モデルを構築すると共に、多様なカオス実装技術およびニューロン・シナプス実装技術を確立した。そしてそれらの成果をもとにして複雑系コンピューティングと脳型コンピューティングを実現するための様々な計算方式を提案した<sup>26</sup>。

本研究によって、デジタル計算全盛の中で忘れ去られていたアナログ計算技術を今日の意味で復興させる「複雑系で計算する」ための基盤技術を整備した。このような新しいコンピューティングシステムの担うべき課題としては、様々な NP 困難な問題がまず挙げられ

---

<sup>26</sup> Horio Y and Aihara K, Physica D, 237, 1215-1225, 2008

る。そのような問題には車両の経路決定問題、インターネットのパケットルーティング問題、DNAのモチーフ検索問題などがある。また、ロボットが環境を瞬時に認識するための認知システム、不良設定問題に対して柔軟に意思決定するためのシステム、環境の変化に柔軟に対応して、協調または対抗して動作するロボットのセンサ-アクチュエータシステムなど、いずれも現在のコンピュータシステムでは扱うのが困難な分野が対象として考えられる。その取り組みの第一歩としての工学的意義は極めて大きい。

## (2)人材育成状況

本研究に参加した多くの若い研究員が分野を担う研究者になっていて、人材の育成に大きく貢献したといえる。下表に大学関係者を記す。

### (理論研究グループ)

氏名	本研究終了時の所属	現在の所属	備考
渡辺 正峰	東京大学 助教授	海外にて研究中	
村重 淳	東京大学 助教授	函館未来大学 教授	
鈴木 秀幸	東京大学 助手	東京大学生産技術研究所 准教授	さきがけ研究
増田 直紀	東京大学 大学院生	東京大学大学院数理情報専攻 准教授	さきがけ研究
上田 哲史	徳島大学 講師	徳島大学 教授	
小室 元政	帝京科学大学 助教授	帝京科学大学 教授	
黒岩 丈介	福井大学 助教授	福井大学 准教授	
作村 勇一	奈良先端大学院大学 助手	奈良先端大学院大学 准教授	
伊藤 秀昭	東京工業大学 助手	佐賀大学 講師	

### (実装研究グループ)

安達 雅春	東京電機大学 助教授	東京電機大学 教授	
佐伯 勝敏	日本大学 助手	日本大学 准教授	

## 3-1-4 研究成果から生み出された社会的・経済的な効果・効用および波及効果

本研究の「カオスの工学応用」において、実世界の様々な問題にカオスを典型例とする非線形性が潜んでいることの一端を示した。これをさらに拡大し他の分野も取り込んで大きく発展したことを端的に示すのが、最先端プロジェクトにおける「複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技术応用」プロジェクトである。数理工学的手法が持つ分野横断性によって、例えば、最先端複雑系制御理論の製造業への応用、複雑ネットワーク理論の工学応用、新型インフルエンザなどの感染伝播解析、数理モデルに基づく前立腺癌治療などの多様な応用研究も期待されている。このような個々の応用システムを本

格的に実用化するためには、最先端プロジェクトの予算でも不十分であるが、このプロジェクトで数理モデルをきちんと整備しておけば、将来の産業界における実用化の基盤となる。特許でいうビジネスモデルに相当する、科学技術研究のビジネスモデルというべきところを数理的に研究するという位置づけになる。ビジネスモデルの特許が大事なように、科学技術でも数学的理論が戦略的要所となる。個々の応用テーマにおける新たな実用化研究は必要だが、数学の強みは、たとえば電力ネットワーク、通信ネットワーク、交通ネットワークなどの様々な複雑ネットワークに、共通の数理的成果が横断的に使えることである。多くの特許取得が期待できるが、JST 自身の事業ではなく、支援機関という位置づけなので、特許の維持をどこが面倒見るかが決まっていないことが課題として残っている。

## 3-2 脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発（研究代表者：小柳 光正）

### 3-2-1 本研究期間中における状況

#### (1) 本研究開始の頃の状況

本研究が開始した頃、日本では半導体が戦略産業とされていた。LSI は世界で 30 兆円の規模になったものの、韓国、台湾の追い上げがある中で、システムに強いアメリカ勢とも競合していく必要があり、日本がマーケットシェアでトップを取り続けていくことはこの先大変だと予想された。それまで 2 次元集積回路（2D-LSI）の開発は、ITRS 委員会のロードマップ（International Technology Roadmap for Semiconductors）<sup>27</sup>に沿ってトランジスタを微細化して、集積度を上げスピードを上げるという方針で来た。当時でもワンチップに数千万～数億個もの微細なトランジスタを積んでいたが、全部のトランジスタの特性が揃っていないと LSI は働かないので、集積度が上がるにつれて歩留まりが悪くなる。ロジックの方はパワーが持たなくなる。その上、配線の負荷容量の増加が避けられないので高速化が頭打ちになる。従って微細化の限界が来るだろうと予想された。また、製造ラインだけで 1 兆円規模の投資が必要なのに、それに見合うようなビジネスを展開できるかということも重大な問題であった。

小柳は 1990 年代始めから、3 次元構造の LSI（3D-LSI）と並列コンピュータの研究を同時に進めていた。並列処理の良いところは微細化によらずともシステム性能を上げられる上に、配線負荷の障害もなくなる。3D 構造は並列処理に適している。そこで 3D-LSI と並列処理化が必至の情勢であると考えていた。

3D 超並列処理の典型的な例が脳である。知能を生む新皮質は薄皮状であり、その断面構造は 6 重の層状構造になっている。そこで、人間の思考や認識の機構に学んで、人間の持つしなやかな情報処理システムを工学的に実現すること、具体的には、3D 構造の上に超並列処理を行う低電力で高性能のシステムを実現することを提案して採択された。

視覚情報処理を研究の対象に選んだのは、視覚機能再生のためのデバイスに需要があり、実用につながるものを意図したためであった。また、視覚情報処理自体が 3D-並列処理の世界である。一番下のレベルの網膜から始まって、階層構造によって大きなシステムを形成している。視覚野は、それ自身がいくつかのコンピュータを繋げたようなシステムであり、さらにそれがたくさん

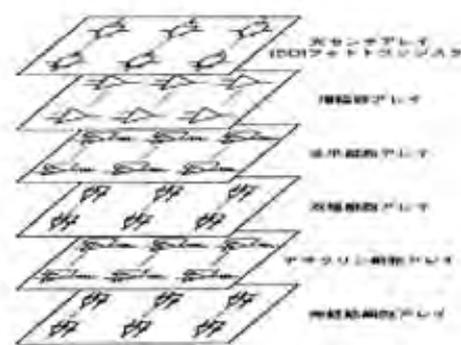


図 29 3 次元集積化技術による人工網膜チップの構成

<sup>27</sup> LSI 微細化の経験則である Moore の法則の実現のために、将来の半導体製品に立ちふさがる技術的な障害を分析・予測する目的で出されるロードマップ。

集まったのが脳である。脳の超並列性にいきなり取り組むのは現実的ではない。そこで、網膜から始まって、視覚情報処理については 3D-LSI 回路によってできるところを実現して、情報処理のアルゴリズムを乗せたシステムとするしかないと考えた (図 29)。以下に本研究期間中の成果の概要を述べる。

## (2) 3次元集積化のための要素技術の開発

小柳の考案による 3D-LSI 技術の基本的な概念は、予め完成した 2D-LSI を薄くして TSV (Through Silicon Via) による貫通配線を垂直方向に繋げ、貼り合わせていくことである (特許 4063944 号)。このプロセスは 2次元の量産ラインにもフィットして量産に適している。このプロセスのための主要な要素技術、すなわち貫通配線の形成、ウェーハ薄層化、マイクロバンプ形成、ウェーハ位置合わせ、およびウェーハ接着の技術を開発した。プロセスの概略は以下の通りである (図 30)。

①貫通配線の形成：従来の 2D-LSI の前工程に相当する工程において、トランジスタや多層配線を作成すると同時に、貫通配線 (TSV) を形成する。貫通配線は縦方向に Si 基板を貫通し、次層となるデバイスの形成されたウェーハ表面との電気的接続を行う。そのためには穴径  $2.5\mu\text{m}$ 、深さ  $50\mu\text{m}$  以上のアスペクト比 20 を超えるトレンチを形成し、絶縁膜を成膜後、導体をトレンチに埋め込む。トレンチの形成は ICP 方式のドライエッチング装置により行い、導体としては燐ドーパの poly-Si を用いた。さらなる微細化と低抵抗化のためにタンゲステン導体の適用にも成功した。

②ガラス支持基板への接着：最上層に相当するウェーハを先ずガラス支持基板に接着する。この支持基板は全てのプロセス終了後も剥がすことなくパッケージとしての機能も果たす。

③ウェーハ薄層化とバンプの形成：支持基板に接着されたウェーハを裏面から CMP (Chemical Mechanical Polishing) 装置によって研磨し、垂直配線の先端が裏面に露出するまで薄層化する。次に、絶縁膜と裏面配線 (再配線層) を形成し、さらにリフトオフの手法でウェーハ間の配線接続に用いるマイクロバンプを形成する (図 31)。マイクロバンプはウェーハ間の電気的接続とウェーハを樹脂で完全に接着するまでの仮止めの役目も果たす。試作では樹脂の耐熱温度以下で接着できる In/Au 合金を用いて  $5\mu\text{m}$  角、高さ  $3\mu\text{m}$  のものまで良好に形成できた。

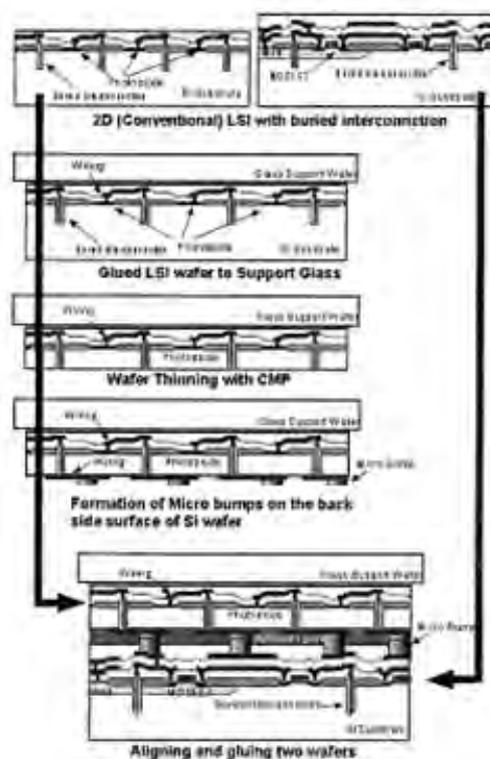


図 30 3D-LSI の製作工程

④ウェーハ間の位置合わせと電気的な接続：新たに開発した 3 次元ウェーハライメント装置を用いて、2 層目のウェーハとの位置合わせを行い、マイクロバンプ同士の仮接着（電気的な接続）を行う。本装置の位置合わせは、赤外線透過像による。x、y、z、 $\theta$  の 4 自由度に対応するように piezo アクチュエータが取り付けられていて、最小  $0.1 \mu\text{m}$  ステップでステージの移動ができる。± $1 \mu\text{m}$  の精度の位置合わせを実現した。

⑤ウェーハ同士の接着：機械的接着強度を上げるために、仮接着した基板間に接着剤を注入する。接着剤をウェーハ間のギャップに均一に注入するために真空注入法を開発した。

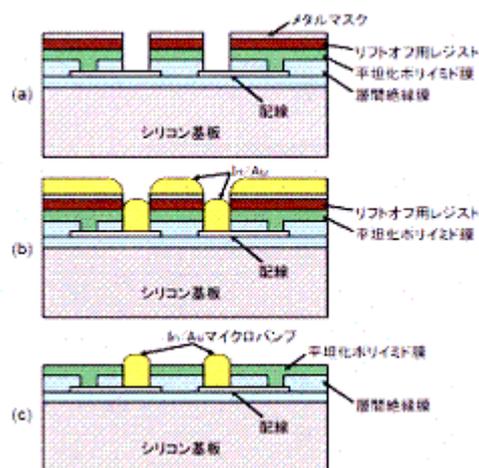


図 31 マイクロバンプの形成

⑥多層化による 3 次元化：貼り合わせた 2 層目ウェーハを裏面から薄層化し、③～⑤の工程を繰り返して 3 層目ウェーハを貼り合わせる。さらにこの工程を繰り返して、多層に積層された 3D-LSI を構成する。

上の基本技術に加えて、将来の様々な 3 次元デバイスの応用に備えて、SOI ウェーハの利用について検討を進めた。SOI ウェーハをバルクウェーハの代わりに用いると、デバイス形成層を  $1 \mu\text{m}$  以下にまで均一に薄くできることと、リーク電流と浮遊容量を大きく減少させることができるので、デバイスの高性能化にとって極めて有利である。また、極微細トランジスタのための基盤技術（SiGe 選択成長技術、低抵抗接合のための Ni シリサイド形成技術、極浅接合の形成技術など）の開発も進めた。

3D-LSI ではチップ内配線による信号遅延の問題はなくなるが、チップ間、ボード内およびシステム内の配線による信号遅延が顕在化する。この問題の解決のためには光インターコネクション技術が極めて重要になってくる。そこで、3D-LSI チップの高速接続のための光インターコネクションのための要素技術の開発を進めた。

### (3) 3 次元積層型人工網膜チップの開発

人間の思考や認識のメカニズムに学んだ新しい情報処理システムを工学的に実現するためには、上述の 3D-LSI 技術を核にした新しいアルゴリズム、アーキテクチャ、ハードウェア技術、およびシステム集積化技術の研究を併せて行うことが必要である。本研究では実際に脳型情報処理システムのプリプロセッサともなる視覚情報処理プロセッサを構築すること、および脳の高次領野機能の一部を実現することも目指した。

#### A. 人工網膜回路と V1 回路

人工網膜回路と V1 回路にはアナログ CMOS 回路技術を用いた (図 32)。フォトディテクタのアナログ信号を直接処理できて大きな専有面積を持つ A/D 変換器が不要になるだけでなく、高速化できリアルタイム処理の上で非常に有利になる。アナログ回路は、回路構成が簡単で占有面積が小さくてすみ極めて小さな電力で動作するシステムが実現できるので、生体の機能の実現に適している。

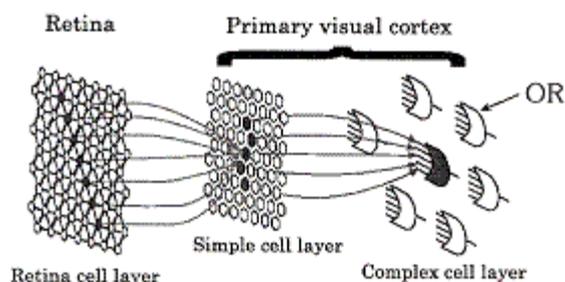


図 32 網膜および第一次視覚野における視覚情報処理機能を実現するための回路構成

網膜 (retina) 回路は生体の視細胞、水平細胞、双極細胞に対応して、それぞれ光受容、光受容器出力の平滑化および入力画像のコントラストを強調する機能を実現する。

V1 (Primary visual cortex : 第一次大脳皮質視覚野) は単純細胞と複雑細胞の機能を実現する。単純細胞回路は、V1 の単純細胞の持つ方位選択性の機能を受け持つ。すなわち、ある角度に並んだいくつかの網膜回路からの入力を受け、その網膜回路からの入力総和をしきい値処理 (2 値化) することで、線分の有無を判断するとともに方位抽出を行う。一方、V1 の複雑細胞が受容野の狭い単純細胞のシナプス結合の出力を受け取ることで受容野を広げている事実に基づいて、複雑細胞回路は単純細胞回路からの出力を論理和することによって受容野内での最適刺激の位置の許容性を拡大する。単純細胞の出力は既に 2 値化されているのでこの部分はデジタル回路で構成した。

これらの回路の動作シミュレーションではコントラストを強調した出力画像が得られて良好に動作することが示された。

## B. 上丘および MT 野チップ

サルや人間の眼は視野の中心付近 (中心窩) の解像度が高くできているため、何かを注視するときには必ず視野の中心に対象をとらえようとする。ゆっくりと動く小さな点を追跡する円滑性追跡眼球運動 (Smooth Pursuit) と、対象物に視線を向けるときの急速眼球運動 (サッカード) があり、上丘と MT 野が受け持っている。これらの機能を集積回路で実現することを検討した。

Smooth Pursuit の機能を実現するために、方向選択性をもった動き検出を行う回路を設計した。画素となるフォトダイオードで光信号を電圧信号に変え、その時間微分によってその画素において Smooth Pursuit の対象が移動してきたことが捉えられる。この局所的な動きの情報と隣の画素からの情報を比べることにより、スポット光の動いた方向を判断することができる。これから、一方向の動きにのみ反応するような動き検出器を設計した。シミュレーションによって Smooth Pursuit の機能が制御できることを確認した。

次に、この動き検出回路と Delay Line 回路を用いて、上丘および MT 野の機能を持つチップを設計・試作した。このチップの中心部分では動き検出を利用した Smooth Pursuit 制

御を行い、周辺部分では Delay Line 回路を利用したサッカード制御を行う。このチップをロボットのカメラとして搭載して移動物体の追跡を行わせるとき、追跡対象の動きが遅い場合にはチップ中心部分の動き検出による Smooth Pursuit 制御によって追従できるが、動きが速い場合には対象が中心視野から外れてしまうので、Delay Line 回路を用いたサッカード制御により高速にカメラを動かして対象を中心視野で捉えることができた。

### (3) 視覚情報システム

人間の網膜は解像度の高い中心視の部分（中心窩）と解像度の低い周辺視の部分より構成されている。このような構造をもつセンサで 3 次元空間的な視覚情報を収集、処理するためには注視点の移動が必要不可欠である。本研究では、このような機能をもつ視覚情報処理システムを実現するための基礎的な検討のために、注視点移動ビジョンシステムを製作した。

ロボットヘッドの注視点から少しずれた周辺部分で手を振り、それを注視対象として認識させサッカードを行わせたところ、サッカードの最高角速度は約 300 度/秒であり、設計値（人間の最高速度である約 600 度/秒）の半分であった。この原因は視覚野の不足にあると考えられた。

次に、このような視覚系をもつ四脚歩行ロボットを用いて、移動物体追跡行動実験を行った。追跡対象は直径 70mm のボールで、周囲に様々な物体が存在する複雑な状況の中で、ロボットは対象物体を十分追跡できることが確認された。

## 3-2-2 本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

### (1) 本研究終了後のファンド獲得の状況

研究資金	研究テーマ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CREST	脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発	1期												
科学研究費補助金基盤研究(A)	学習機能を有する積層型マイクロ視角情報処理システム													
科学研究費補助金重点領域研究	室温で高速動作可能なマルチ単電子メモリ													
科学研究費補助金特定領域研究(A)	室温で高速動作可能なCMOS融合型マルチ単電子メモリ													
科学研究費補助金基盤研究(A)	キュービックインテグレーション技術を用いたウェーハスケール並列処理システムの試作													
科学研究費補助金基盤研究(A)	ウェーハスケール光導波路結合型ダイナミックニューラルネットワークシステム													
科学研究費補助金特定領域研究	超機能化ヒューマン・インターフェース画像処理・ワイヤレス情報端末チップ創製													
CREST	「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」領域共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創製						1期							
科学研究費補助金基盤研究(S)	三次元積層型プロセッサチップを用いた超高性能並列処理システム													
高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト(N.E.D.O.)	半導体横方向配線技術の研究開発													
CREST	「ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術」領域自己修復機能を有する3次元VLSIシステムの創製													3期

図 33 本研究以降に獲得した主な研究助成金（小柳）

本研究以降に小柳が獲得した主な研究助成金は、図 33 のとおりであった。

本研究の後、2 番目の CREST 研究となった「超高速・長省電力高性能ナノデバイス・システムの創成」研究領域(研究総括：榊裕之)では、研究課題「共鳴磁気トンネル・ナノドット不揮発性メモリの創成」(2002 - 2006 年度)において、ナノドットを使ってメモリの微細化に取り組んだ。この研究は今でも続けていて、東北大の中で共同してスピンドバイスを含む新しい 3D デバイスに発展している。

3 次元 LSI 技術と超並列処理技術を駆使して、自己修復・自己組織化・自己調整・再構成・自己診断などの機能を有する新しいディペンダブル VLSI を開発する、3 番目の CREST 研究課題「自己修復機能を有する 3 次元 VLSI システムの創製」が、研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」(研究総括：浅井彰二郎)の第 3 期 2009 年度採択分として始まっている。

科研費については、本研究期間中から継続して助成を受けているが、特に 2003～2008 年度において基盤研究(S)により課題「3 次元積層型超高性能並列処理システム」が採択された。この課題では、今後の情報処理技術の核となる新しい 3 次元積層型プロセッサチップと、光インターコネクションを用いた共有メモリ結合型の超高性能並列処理システムの研究を行った。

## (2) 超高性能並列処理システムの研究

2003 年度に採択となった科研費基盤研究(S)の課題「3 次元積層型プロセッサチップを用いた超高性能並列処理システム」(2003 - 2007 年度)では、大量の画像データの高速転送と処理を可能にする 3 次元積層型プロセッサチップと、それを用いた共有メモリ結合型の超高性能並列処理システムを実現することを目指した。情報処理システムの高性能化には並列処理の導入が効果的であるが、共有バスで複数のプロセッサを接続するとバスの競合によってシステム性能は制約

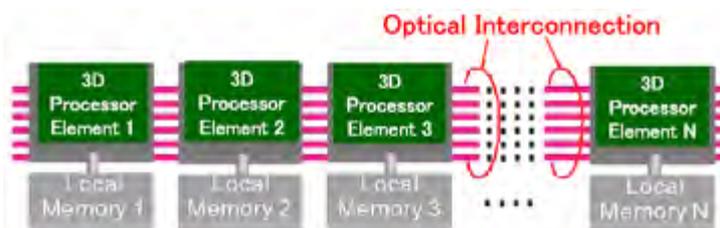


図 34 光導波路接続による共有メモリ結合型並列処理システムの構成

を受ける。そこで、光インターコネクションを用いて複数の共有メモリチップを接続することにより、メモリチップ間で擬似的にメモリの共有動作を行わせる新しい共有メモリシステムを提案した(図 34)。

共有メモリチップは 3 次元積層技術を用いて多層積層型とし、各メモリ層を一つのポートに割り当てることにより、共有メモリチップ自体もマルチポート化すること、さらに、3 次元積層型の共有メモリとプロセッサチップを積層することによってマルチポート共有入力の新しいプロセッサエレメントを実現することを提案した。

提案されたシステムを構成する 3 次元積層型プロセッサチップ、3 次元積層型共有メモリ

チップの試作と、光導波路を介したメモリチップの光信号データ転送に世界で初めて成功し、ポスト集積回路ともいえる新しい集積 SOC (システム・オン・チップ) 実現への道を開いた<sup>28</sup>。

このシステムを試作する中で、以下の重要な技術を確立した。

#### A. 自己組織化による一括積層

3次元積層化技術についての小柳の当初の提案はウェーハ上のウェーハ、およびウェーハ上のチップのスタックであった。前者はスループットが良いが、重ねる度に歩留まりが低下する。チップを一個一個置く方式ではチップを選別できるので歩留まりは上がるが、スループットはパッケージ単位の製造と同じになってコストが下がらない。

いま東北大学が開発しているのは、数千～数万のチップをウェーハ上に重ねると同時に位置合わせをする **Super Chip Integration** と呼ぶ技術である (図 35) (特願 2006-553851)。良品のチップのみを選んで、かつ自己組織化の力を利用して瞬時 (0.5 秒以下) に一括して重ねてしまうので、歩留まりはチップ同士のスタックのレベル、スループットはウェーハ同士のスタックのレベルが実現でき、かつ違ったサイズでも重ねられるという特徴を持つ。究極的にはサイズ、タイプ、材料によらず様々なデバイスを重ねてシステムにすることを狙っている。この技術によって **3D-LSI** は真に利益の出るプロセスになると考えられる。

自己組織化のメカニズムは水の表面張力による。ウェーハ表面に親水性と疎水性の部分を作り分け、親水性の部分に水を垂らしておいて、上からチップをラフに置くだけで親水性膜の形状に従って、 $0.5\mu\text{m}$  以下の精度で位置合わせが行える。これを機械で行うと合わせ精度は一桁悪くなる。この技術を 2005 年の IEDM で発表した<sup>29</sup>。ヨーロッパの SGS-Thomson Microelectronics (ST マイクロ) などが大いに注目して後追いしている。

#### B. 光インターコネクション技術

光導波路と 3次元積層チップを接続する光インターコネクション技術と、それをういたマルチチップモジュール (MCM) 製作技術を確立した。この技術によって共有メモリを構成する **SRAM** チップをポリマー光導波路で接続し、メモリチップ間のデータ転送にも成功した。光インターコネクション技術の開発は本研究期間中から始めたものである。

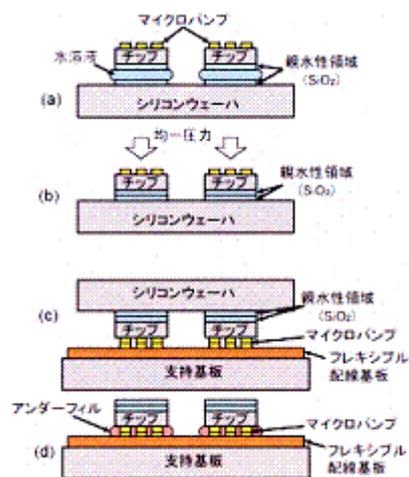


図 35 自己組織化を用いる一括積層

<sup>28</sup> Kuribara H, et al., Jpn. J. Appl. Phys. Part 1-Regul. Apap. Brief Commun. Rev. Pa., 45, 3504-3509, 2006

<sup>29</sup> Fukushima T et al., IEEE Int. Electron Device Meeting, 359-362, 2005

## C.SOI ウェーハ利用技術

SOI ウェーハの利用についても本研究期間中から開発を始めたが、技術が進み良い性能が出るようになった。BOX 層をエッチングのストップ層として利用できるため、次のデバイス層が透けて見えるほど均一に薄くすることができる。

### (3) 3D-LSI のバイオへの応用

脳と眼への 3D-LSI の応用は、本研究を契機に始めたものである。中心になっていた栗野助教授が、その成果が認められ始めたときに急逝したことが惜まれる。その後、脳については東北大学医学研究系の丹治順教授、その跡を継いだ虫明元教授と、眼の方は同大学国際高等融合領域研究所の富田浩史准教授と網膜について共同研究を行っていて、その関係はいまでも続いている。

## A.BMI と脳深部解析のための Si 製プローブ

最近脚光を浴びている BMI についても、本研究の頃から続けている。もともとは、3D を使って脳型コンピュータを作る方向と同時に、脳の中を調べるツールとしての脳埋め込みデバイスと、眼の埋め込みデバイスの研究を行っていたが、最近は埋め込みデバイスに重心を移している。栗野准教授の後継として、田中徹教授が生体埋め込みのバイオマイクロシステムを担当し、本研究のバイオ応用の分野を引き継いでいる。虫明医学部教授との共同研究で、インプラントや脳深部解析のための Si 製プローブを開発している。Si 両面電極と 3D デバイスを組み合わせた探針は世界初であり、脳の機能を測定すること、刺激を与えること、および薬品を注入して反応を直接見ることが出来る。プローブ分野はミシガン大学とユタ大学がトップだが、この電極が出来れば競争に勝つことができる。

## B.眼への埋め込みデバイス

失明は、眼球から大脳皮質視覚野までの視覚伝導路の一部が損傷することによって起きる。中でも網膜の疾病が原因で失明する加齢黄斑変性症や網膜色素変性症は、年々増加傾向にあるにも関わらずその治療方法は確立されていない。このような患者の視覚を再生する手段として眼球内への人工網膜チップ埋め込みが注目されている。米国で開発された技術では、眼の外に視覚センサを置き、網膜の位置に刺激電流生成回路を配置して、RF で電力を供給する。サッカード（注目しているところだけを中心窩を使って高精細に見るための急速眼球運動）の機能がないので、視点を変えるのに頭を動かさねばならない。

眼はただのセンサでなく脳の一部として情報処理を行っている。その機能と併せて、高精細化とサッカードを可能にするには 3D 構造が必須である。現在の開発目標<sup>30</sup>は、顔の認識が出来るくらいの精細度として 1000 画素と、網膜の中心窩の位置に微細なチップを置くことで可能になる眼球の動きによるサッカード、および感染症の心配がない RF による 3.3V、

<sup>30</sup> 小柳光正, 田中徹, *Magnetics Soc. Jpn.*, 4, 426-434, 2009

20～50mW の電力供給を合わせた技術を 2mm 角の大きさのチップで実現することである。通常眼で悪くなるのは奥に位置する視細胞で、その手前に出力細胞である網膜細胞がある。受光器のアナログ信号を 3D-LSI でパルス列に変え情報処理をした後、これを接触する網膜細胞に受け渡す。接続の位置合わせは脳自身がりハビリの中で可塑性を発揮してくれる。光強度はパルス数で表現される（パルス数変調）。生体の中でチャージアップが起きないように、網膜細胞の出力信号に倣って双極性のパルス信号を発生させる。網膜細胞を電流刺激して脳に視覚を発生するためには電流パルスの振幅、パルス幅、パルス間隔を患者ごとに最適化する必要がある、これを眼球外からの無線信号によって調整する。

このような概念を検討するために、10×10 画素の人工網膜モジュールを試作してフレキシブルケーブルに搭載してウサギの眼に埋め込んだ。フレキシブルケーブルを介して直接網膜細胞を電流パルス刺激したときの脳視覚野における誘発電位波形を観測したところ、通常の光刺激による脳誘発電位の波形と同様の波形が得られることを確認した。この結果を基に、32×32 画素を有する 3 次元積層型人工網膜チップを開発している。

本研究で手がけた機械的に移動物体を追跡するサッカーの研究はその後手が着かないでいるが、監視カメラの追跡機能を高機能化するための需要があり開発を望まれている。

#### (4) 自己修復機能を有する 3 次元 VLSI システム

BMI と網膜、脳型コンピュータなど脳がらみでは、システム全体を生体と同じような低電力で動かす方向で研究が進んでいる。Subthreshold 領域（0.1～0.2V 位の低い電圧）で動かすこと、および不具合があったときに自分でチェックして修復出来るような LSI（脳とは言えないが生体が持っている機能）の実現を考えるようになってきている。これらを実現するにも、3D 構造が有効である。従来の自己修復回路（SPG）は、ロジックの基本回路を用意しておいて、それをソフトで切り替えるものだが、将来はダイナミックに再構成する自己修復が求められる。フレキシブルで省電力の LSI が 3D-LSI の未来である。

3 次元 LSI 技術と超並列処理技術を駆使して、自己修復・自己組織化・自己調整・再構成・自己診断などの機能を有する新しいディペンダブル VLSI を開発するために、3 番目の CREST 研究課題「自己修復機能を有する 3 次元 VLSI システムの創製」が研究領域「ディペンダブル VLSI システムの基盤技術」（研究総括：浅井彰二郎）の 2009 年度採択分として始まっている。

### 3-2-3 研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果

#### (1) 科学・技術の進歩に貢献する成果

##### A.3D-LSI 技術の潮流

2D-LSI の限界が言われるようになって久しいが、実際には技術の壁が現れる度に、世界の半導体メーカーがしのぎを削ってその壁を乗り越え、今日の高度情報化社会が築かれた。次世代量産品の線幅は 32nm とされ、これが 20nm になるのも時間の問題と言われている

が、ナノテクノロジーの潮流の主要な部分としてのトップダウン型技術分野を築いている。しかし、微細化に物理的な限界があることも明らかであり、リソグラフィの限界、配線負荷をもたらす高速化の限界、エネルギー消費と加熱の問題など、いずれも原理的な問題が微細化による高機能化そのものを困難にしている。このような開発のハードルが高くなるに伴って開発コストが巨大化し、また生産ラインへの投資が巨大化することによって産業自体の疲弊を招いている。日本は正にその波の直撃を受けている。

1990年代の早い時期に、小柳は微細化のロードマップに従うことの危うさを見抜き、発想の転換をして考案したのが、3次元LSI (3D-LSI) 構造とそれによる超並列情報処理の技術の方向である。3D-LSIは1980年代の旧通産省の主導で行われた3次元LSI研究プロジェクトの中でも検討されたが、これはトランジスタレベルのスタックに相当し、スループットが上がらず実用化には至らなかった。小柳は、個別の技術の改良というより、技術そのものを大きなシステムと見なして、合理性を追求した。

当初小柳が考案したのは、2D-LSIとして完成したウェーハ同士をスタックする方法で、貫通配線の形成法、ウェーハ同士の配線を繋ぐバンプの形成法、ウェーハ間の位置合わせ法、ウェーハの接着法などの要素技術がセットになっていた。この一組の技術は簡潔であり、並列化情報処理を前提にしているので力づくの微細化を追求する必要がなく、既存の技術レベルで十分高性能化できることに原理的な強みがある。2D-LSIの微細化の限界を破るためのリソグラフィ技術一つをとっても大変なハードルがあることを考えればこの利点は極めて大きい。

しかし、ウェーハ同士のスタックでは、スループットは最大限高くなるが、生産性を高めるために、ウェーハを大口径化すると歩留まりはチップ面積に指数関数的に反比例して下がる。これは2D-LSIの中に不良チップが確率的に含まれることは避けられず、スタックの度に不良率はかけ算で増えるので、最終的な歩留まりが上がらないためである。歩留まりの観点からは良品のみを選んでスタックする方法が勝れている。LSIのコストは同時にたくさんのチップを作るバッチ処理工程で下げられる。このため研究開発から量産に行くところで2桁くらいコストを下げられるのが半導体産業の大きな特徴であるが、チップ同士を重ねる方法、ウェーハを下地にしてチップを重ねる方法などではこの特徴を生かせない。3D-LSIでも、3D-SiP (System in Package)、あるいはSoP (System on Package) はパッケージの立場から発想されたもので、スループットが低くてコストが下がらない。

ウェーハ同士のスタックとチップごとのスタックの長所のみを合体できるのが、自己組織化的にたくさんのチップを一括して重ねることを可能にする、「スーパーチップ」の技術である。この技術を加えることによって、3D-LSI製造技術は簡潔で強力な技術になった。大学の研究室から生まれた技術が世界の産業の源流になる可能性がある。世界の半導体メーカーで既にその動きが見えている。

## B.3D-LSIの利点

3D-LSI は次のような特徴によって ITRS のロードマップとは一線を画した高性能化への道を可能にする。すなわち、色々な機能を持つ回路ブロックを 3 次元的に配置でき、レイアウトの自由度が増す。貫通配線によって立体的に回路ブロック間を接続できるので配線長が短縮できて配線負荷を低く抑えられる結果、処理速度が向上し、消費電力を低減できる。多数の信号線で回路ブロックを接続する構造は並列処理に適している。さらに、3D を構成する各層は  $10\mu\text{m}$  以下に薄くできるので数 10 層重ねても 1mm 以下に抑えられ、小型で高性能の LSI を従来の大きさのパッケージに収めることができる。

3D-LSI 技術のもう一つの強みはインテグレーションに対する幅の広さである。将来の 3D-LSI は、材料や機能が異なる様々なデバイスがインテグレートされる。2D-LSI ウェーハを複数のメーカーで製作した後、インテグレートすることも自由である。MEMS やセンサ自体は部品であり、情報処理の LSI (intelligence) を入れてインテグレートする際に、3次元構造にすることは極めて有利である。そこで、色々なものを融合してどのようにシステムにするかのインテグレーションの視点が 3D-LSI の時代には重要になる。

## (2) 応用に向けた発展

### A.NEDO のプロジェクト

NEDO では本研究の頃から、小柳の技術に基づく 3D-LSI 技術開発のための一連のプロジェクトを実施している。すなわち 1999～2003 年度の「超高密度電子 SI 技術プロジェクト」における「Si 貫通ビアにおける 3 次元チップ積層技術」、および 2004～2006 年度の「積層 DRAM 技術開発プロジェクト」に続いて、2006～2008 年度には「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト (ファイン MEMS プロジェクト)」が実施された。

さらにこれらの成果を受けて、2008 年度から IT イノベーションプログラムの一環として、「立体構造新機能集積回路 (ドリームチップ) 技術開発」プロジェクトが始まっている。

ドリームチッププロジェクトは次の 3 つの目標を掲げている。

- ①多機能高密度三次元集積化技術： 様々な機能を持つ半導体チップをできるだけ短時間で設計するための高速シミュレーション技術を開発すること、また半導体チップを重ねる前に、それぞれのチップの動作を効率的にテストする検査技術を開発する。
- ②複数周波数対応通信三次元デバイス技術： 現在の携帯電話は決まった電波を受信するための通信素子と IC のみでできているので、海外での通信機能や無線 LAN を付加するには、その通信方式に対応した通信素子と IC を追加で用意しなければならない。この問題に対して、受信する電波に合わせて特性を変えられる通信素子と半導体チップを重ね、一つの小さな通信素子で多様な通信を可能にする。
- ③三次元回路再構成可能デバイス技術： 従来の演算機能を変更可能な半導体チップでは、あらゆる機器の高機能化が進む現代の需要に対応できなくなっている。そこで、演算機能を変更できる半導体チップを積み重ねることで、多様な用途に対応し、演算機能や消費電力の上でも性能向上を図る。これにより、プログラミング可能と同時に多機能であるとい

う便利な半導体 IC が実現する。

## B.実現した色々な 3D-LSI の例

本研究では、初めから実用に供することを想定して基盤技術の開発と試作を行い、その中で多くの世界初となる 3D-LSI デバイスを生み出した。IEEE 主催の 2 大重要国際学会である IEDM (International Electron Devices Meeting) および ISSCC (International Solid-State Circuits Conference) に発表されたものの中には、本研究での画像処理デバイス (IEDM, 1999 年)、共有メモリ (IEDM, 2000 年)、人工網膜 (ISSCC, 2001 年)、マイクロプロセッサ (IEEE Cool Chips, 2002 年)、10 層積層メモリ (IEDM, 2005 年)、38 層積層の 3 次元スーパーチップ (IEDM, 2007 年) などがある。

以下に、いくつかの応用についての状況を述べる。

### ①DRAM

日立製作所で机を並べていたライバル同士の考案による 2 つのキャパシタ構造を有する DRAM、すなわちスタック型 DRAM(小柳による発明)とトレンチ型 DRAM (角南英夫による発明) の間の競争が世界中を巻き込み、最終的には前者が席巻した。スタック型 DRAM はそれ自体立体構造であるが、さらにスタックして 3 次元集積構造にするのに適している。最近、新しい原理のメモリがいろいろ提案されているが、半導体メモリは全て 3 次元構造になって行くと考えられる。その基本は小柳が 1980 年に DRAM で提案した COB (Capacitance-Over-Bit Line) 型 3 次元スタックキャパシタである<sup>31</sup>。2004~2006 年度の NEDO プロジェクト「積層メモリチップ技術開発プロジェクト」ではエルピーダメモリ、NEC、沖電気工業の三社による積層 DRAM の開発が行われた。三星電子はいち早く 3D-DRAM の製品化を始めた。

### ②画像処理装置

2008 年度から始まった NEDO の「立体構造新機能集積回路 (ドリームチップ) 技術開発プロジェクト」において高解像・超並列の本格的な画像処理装置の開発を始めた。台湾の ITRI はこれを真似して巨額の資金を投入して 2010 年から始める。イメージセンサから直接、隣接するプロセッサに信号を送り高速に画像処理することによって 1 万フレーム/秒のカメラができる。最初に出来れば、世界の市場を押さえることができる。

### ③NEDO・MEMS プロジェクトにおける MEMS デバイスおよび要素技術開発

第 3 世代以降の GPS 搭載携帯電話には、加速度センサに加えて、ジャイロセンサや Si マイク、RF スイッチなど、様々な MEMS デバイスが搭載され、LSI と複合したマルチチップモジュール (MCM) と、様々な電子部品を一体化してプリント配線板やフレキシブル基

---

<sup>31</sup> Koyanagi M, et al., IEEE Trans. on Electron Devices, ED-8, 1596-1601, 1980

板上に実装する技術が求められている。

小柳は、2006年度からの NEDO のファイン MEMS プロジェクトにおいて、課題「セルフアセンブリーと乗り越え配線による MEMS・半導体の低温高密度一体化実装技術」を担当した。このなかで、平均化リフトオフ法を用いてフレキシブル基板上に  $5\mu\text{m}$  角のマイクロバンプを狭ピッチで形成する技術、また、厚さ  $100\mu\text{m}$  のチップを乗り越える線幅  $10\mu\text{m}$  の横方向配線形成の技術を開発した。さらに、自己組織化を利用して、MEMS チップ、コンデンサチップ、インダクタチップをフレキシブル基板上に一括実装した。MEMS チップには厚さ  $400\mu\text{m}$  の圧力センサチップを用い、TSV 付き Si キャップを用いて電氣的に接続した。それらを乗り越え配線で接続したテストモジュールを試作して、良好な電氣的特性を得た。

#### ④ VCSEL と光インターコネクションによる光 MCM 技術

小柳らは 3D-LSI 技術と光インターコネクション技術を組み合わせた光 MCM 技術を提案した。3D-LSI 技術によって顕在化するボード内の配線遅延を光インターコネクションによって解決する。そのための要素技術となる、光導波路基板形成と受光用ダイオードを一括して集積する技術、VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting LASER、垂直共振器面発光レーザ) の搭載技術を開発した。本研究では要素技術を開発したが、科研費プロジェクトで装置になった。Eye Pattern の明確な 10Gbps の伝送が出来ることを実証した。

### C.3D プロセスのための装置開発

TSV を用いる 3D-LSI は設計と製造工程に大きな変化をもたらす。貫通孔を開けるエッチング装置やレーザ装置、Si チップを極薄に削る装置など多くの製造装置と検査用装置が必要になる。小柳は、これまでの開発の途上でいくつかの独自装置を開発した。

#### ① 3D 用の開発装置

小柳は 1990 年に初めて開発装置を作った。三菱重工が取り上げたが早すぎて止めてしまった。現在、世界でビジネスが始まっている。

#### ② 自己組織化実装装置

2006～2008 年度の NEDO プロジェクト「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト」において、500 個以上のチップを 8 インチウェーハに一括搭載するための自己組織化実装装置を開発した。平均  $0.4\mu\text{m}$  の位置合わせ精度が得られている。ST マイクロなどヨーロッパ勢も開発している。

### (3) 人材育成状況

研究室の院生は全て企業に就職している。3D-LSI 研究の経験を生かして、企業に行って

も 3D-LSI 開発の中心を担う人材になっている。CREST 研究員であった李康旭氏は本研究期間中に博士号を取得し、米国のレンセラ工科大学（DARPA の 3D プロジェクトに属する大学の一つ）に転出して 2 年間のポスドクを経て三星電子に入り、3D の DRAM を立ち上げ世界的に有名な研究者になった。その後、バイオ応用を研究するために、三星電子の部長を辞めて東北大学に戻ってきた。今は産学連携研究員のポストにいる。

栗野浩之助教授はその仕事が評価されるようになったときに惜しくも急逝した。南和幸助教授（山口大学）は現在、同大学の微小生体医用工学専攻の教授として、バイオがらみの微細加工の研究を行っている。脳メカニズムグループの虫明元助教授は丹治順教授の後を継いで東北大学医学部生体システム生理分野教授になっている。

### 3-2-4 研究成果から生み出された社会・経済的な効果・効用および波及効果

#### (1) 半導体次世代技術の本命としての 3D-LSI 技術

半導体集積回路は、高度情報化社会を支える基盤技術としてますます重要性を増して留まることがない。1980～1990 年代 DRAM が「産業の米」といわれ半導体産業の牽引役であった時代に日本は大きな成功を納め世界の技術をリードしていた。今日隆盛しているスタックドキャパシタ型 DRAM やフラッシュメモリは其中で生まれた日本発の技術である。それにもかかわらず、現状の日本の半導体産業は「枯れつつある」と表現されるような状態にある。一方では、従来の 2D-LSI 技術の微細化路線が行き詰まり、技術の潮流が変化するときを迎えている。そのときに、小柳の発明による 3D-LSI が各国の半導体企業の戦略技術と位置づけられてきていることは、再び日本発の技術が今後の世界の産業と社会のあらゆる場面で重要な役割を果たす可能性を示唆している。現実には、メモリと同様に日本発の技術であるにもかかわらず日本が主導権を取れないことが懸念される。

#### (2) 日本の半導体産業の状況

いま、日本の半導体産業は大きな困難に直面している。台湾、韓国の成長が著しい中で、日本企業は再編の波を受け、東芝は一社でやっているが、日立と三菱は組んでルネサスとなった。DRAM は日立と NEC が組んでエルピーダとなり、さらにルネサスは NEC と組んで新しい会社となった。半導体の世界で生き残るには、インテルや IBM のように誰も真似できない技術を持っているか、韓国や台湾のように低コスト・大量生産の力勝負で利益を上げるかのどちらかしかない。また、プロセッサ、DRAM、フラッシュメモリの大きなマーケットのいずれかを握っていないと次の投資が出来ない。日本はこの選択を誤り、DRAM は一回捨ててしまって辛うじてエルピーダが残っている状態であり、フラッシュメモリは東芝が頑張っているが他のところは皆敗退した。集合するとともに小さくなり、次世代技術に対する取り組みが遅れてしまった。半導体は IT の基本であり、そこで負けてしまうことは重大な結果をもたらす。

3D-LSI 技術は次世代の本命の技術として世界中が取り組み始めていて潮流になりつつ

ある。集積回路に関する国際会議の一番のトピックスはすべて 3D-LSI になっている。小柳が 3D-LSI 技術を提案した頃は日本では全く理解されず、最初に動き始めたのは欧米陣であった。その中であって、東北大学は本研究で基本技術について相当の蓄積ができ、むしろ欧米はその技術を後追いしている。

NEDO では本研究の頃から、小柳の技術に基づく 3D-LSI 技術開発のための一連のプロジェクトを実施している。すなわち 1999～2003 年度の「超高密度電子 SI 技術プロジェクト」における「Si 貫通ビアにおける 3 次元チップ積層技術」、および 2004～2006 年度の「積層 DRAM 技術開発プロジェクト」に続いて、2006～2008 年度には 8 企業、3 研究機関、3 大学を委託先として「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト（ファイン MEMS プロジェクト）」が実施された。さらにこれらの成果を受けて、2008 年度から IT イノベーションプログラムの一環として、「立体構造新機能集積回路（ドリームチップ）技術開発」プロジェクトが始まっている。これらの委託先企業としては日本の有力な電子産業企業が名を連ねている。因みに、ドリームチッププロジェクトの委託先は、超先端電子技術開発機構（ASET）、富士通、日立製作所、ニコン、産業技術総合研究所、東京工業大学である。

問題は企業の戦略としての取り組みが他国に比べて相当遅れていることである。企業が目先の利益を重視するのは仕方がないが、台湾、韓国や欧米はそこで国が重点投資している。韓国は今年から国が 3D 研究プロジェクトに対して何百億円と投資する。他国が重要なところにまとめて投資するのに対して、日本では何が重要かの見極め（戦略性）がないので重要技術を育てることができない。このやり方は昔から変わっていないが、今は特に戦略的な投資が必要な時代である。IT（コンピュータ、LSI）の基本を取られてしまうと科学技術立国を掲げる日本には未来がなくなる。

その中で、3 次元 LSI を事業の柱とするベンチャー会社、ザイキューブ（代表：益子原學、CTO：小柳光正）が 2002 年に設立されて内外の注目を集めている。これは小柳の研究成果である 3 次元 LSI の基本技術と、科研費基盤研究(S)「3 次元積層型プロセッサチップを用いた超高性能並列処理システム」によるシステム・オン・チップの実現、NEDO プロジェクト「超高密度電子 SI 技術プロジェクト」などにおける実用化技術を基にして、自らの設計による LSI 製品を開発・販売をする会社である。事業の運営には、東北大学、公的機関、パートナー企業が産学連携して行っている。

### (3) 世界の動向

3D 技術は技術の全体を変えるような大きな技術なので、技術だけでは動かず、装置メーカーやインフラも全部揃う必要がある。今、装置メーカーも動き始めて、かなりの 3D 用の装置が出来てきた。

米国では DARPA が戦略的な技術として主導し、IBM を中心に据え、MIT のリンカーン研究所（軍の研究所）の他、いくつかの主要な大学と企業を入れて大きな 3D のプロセスを作った。企業としては、2003 年頃 IBM が微細化路線だけでは LSI は行き詰まるとして、3

つの柱を立てた。一つは今までの微細化路線。二つめはビジネスの本命で 3D-LSI。三つ目は基礎研究で CNT などずっと先の技術。IBM は 3D-LSI について最もアクティブであり、W の TSV と Cu-Cu ボンディングを採用した。米国では産学協同が盛んに行われるが、そのための仕組みとして大学が設計した LSI を委託製作するシステム (MOSIS) が DARPA の肝いりで早くから出来ていて (日本は 20 年遅れて VDECH を作った)、ベンチャーの Tezzaron が 3D のデバイスを製作する。米国は、3D になると異なった技術がでて来ることを予期して、国が全米に考えさせた。

ヨーロッパで IMEC が 3D-LSI の開発を始めたのは 3 年前と遅かったが、戦略的に人材を集め、相当の投資をして世界の最前線に躍り出た。研究開発をビジネスにして 100 億円/年を稼ぎ、台湾、中国とも戦略的に連携している。2008 年 9 月にオースチンで開催された International Technology Conference では、3D がホットな話題であったが、IMEC が基調講演を行い、小柳の”Super Chip”を引用して加工済みのウェーハをオンデマンドで組み合わせ 3D 集積するサービスをアピールした。フラウンホーファ研究所は集積化技術に強みを持ち 3D の研究拠点になっている。

台湾の ITRI は日本の産総研に相当し 1 万人位の研究員を擁する機関であるが、シリコンバレーを立ち上げた優秀な人達が 15 年ほど前に台湾に戻って、新竹 (シンチュウ) に第二のシリコンバレーを作る上で重要な働きをした。TSMC というファンドリメーカーは ITRI に起源があり、世界の半導体工場になっている。日本の半導体メーカーも皆ここに委託する。ITRI は 2009 年から 3D に力を入れたばかりだが、すでに 12 インチウェーハを使って 3D 化して世界最先端に並ぼうとしている。TSMC は 3D-LSI のファンドリを始める。

韓国も三星電子が 3D-LSI の開発を熱心に進めている。2005 年の IEDM で、三星電子の社長が基調講演を行ったが、内容は「3D で脳型コンピュータ」というものだった。三星電子の DRAM の 3D 化のきっかけを作ったのは小柳研究室で博士号を取得した李康旭氏である。DARPA でのポストクの後、三星電子に入り 3D プロジェクトを立ち上げた。三星電子はその後、2009 年の 2 月の ISSCC で 3D-DRAM を発表した。1Gbit が製品になっている。慌ててエルピーダも同年の秋に 3D メモリを発表した。2010 年には、三星電子からプロセスと DRAM を接合した 3D が出てくるだろうといわれている。

このように日本発の技術の製品化が日本ではなく、まず外国で始まろうとしている。

### 3-3 言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築（研究代表者：酒井 邦嘉）

#### 3-3-1 本研究期間中における状況

##### (1) 本研究開始の頃の状況

幼児の言語獲得能力の素晴らしさは、環境から十分とはいえない言葉のデータを取り込みつつ、驚くべき速さと自然さによって完璧な母語を獲得してしまうことである。このようにして生まれる言語能力は、脳の最も高次の情報処理システムとして人間のみにも備わったものである。人間は言語をどのように獲得するのか、またどのように言語を処理しているのか、これらの問題は脳と言語に関わる最大の難問である。チョムスキーの「普遍文法」説では、人間は言語能力（言語獲得装置）を生得的に持ち、母語を用いて発話し他者の発話を理解する際に、普遍文法にもとづく言語情報処理を無意識のうちに行っているとする。言語能力は一般的には学習の結果得られると考えられることが多いが、言語学ではこの生得的な普遍文法の存在が大きな議論の対象となってきた。

一方、脳科学の進歩に伴い、人間の脳活動を画像として捉える fMRI（機能的磁気共鳴映像法）などを用いて心の様々な機能の座がどこにあるかを特定できるようになってきた。しかし、言語能力が、記憶など他の認知機能と原理的に区別できるかという問題は認知科学における大きな謎のままであった。これは従来の脳科学からのアプローチが、20 世紀後半の言語学の成果を踏まえることなしに行われたためである。

酒井は、本研究を開始する前に、日米の国際共同研究である ICORP「心表象プロジェクト」に参加し、共同研究の相手である MIT のチョムスキーのもとで言語学を学んだことを契機に、理系と文系の学問である脳科学と言語学を本格的に融合する新しい分野を切り開くことになった。すなわち、本研究では、「文法」という抽象的な概念が脳の中でどのように使われているかを特定の大脳皮質の働きとして客観的に明らかにし、記憶などの他の認知機能と独立した文法処理のモジュールの存在を脳科学的に証明することを目標とした。研究は脳活動のイメージングによる言語獲得装置の解析、言語の数理解析、失語症への臨床応用、計測法開発の4つの柱から構成した。以下に本研究期間中の成果の概略を記す。

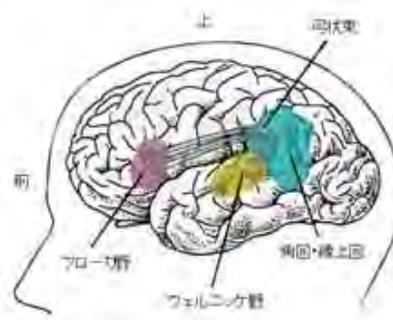


図 36 言語野

言語野は、前頭葉、側頭葉、頭頂葉にある、それぞれブローカ野、ウェルニック野、角回・縁上回の3つで、お互いに神経繊維で結合されている。

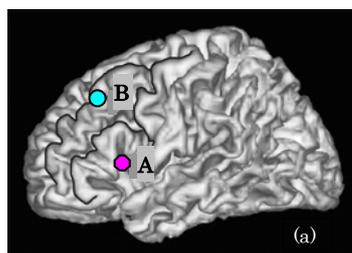
##### (2) 脳における言語獲得装置の解析

文法を使って言語を理解するときに働く脳の場所を明らかにするために、英語を母語とする被験者に英語の文を視覚的に提示して、文法的な語順の判断と綴りの判断を対比する言語課題を行う際の脳活動を fMRI によって比較した。文法的な間違いを含む文は、綴りの間違いを含

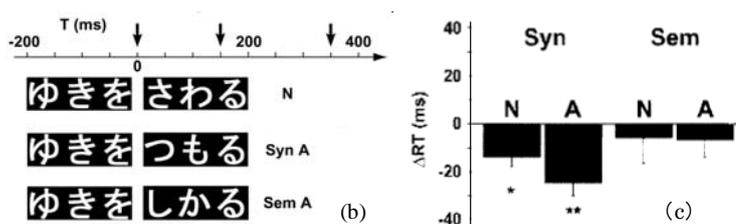
む文よりも強い活動を、大脳皮質の各言語野（図 36）に引き起こしたが、この2条件での皮質活動の差は、左脳のブローカ野が最大であった<sup>32</sup>。

言語機能と一般的な認知機能（見る、聞く、理解する、覚える、考える、意志の伝達など）がどのように区別できるかは認知科学上の重要な問題であった。認知機能がどのようにブローカ野の活動に影響するかを明らかにするために、文法を言語機能の中心に位置づけ、認知機能の代表として記憶を取り上げて、これらの機能を取り出して対比できる言語課題を考案し、課題を行う際の被験者の脳活動を fMRI によって比較した。その結果、文法を使う言語理解に対する特異的な活動が左脳の前頭前野に局在することを見出した。記憶とは独立の言語能力の座を特定したこの知見は世界で初めてのものである<sup>33</sup>。

上記 fMRI では脳の活動と精神機能の相関は分かるが、両者の因果関係は分からない。そこで、磁気による刺激を脳の電気活動に干渉させて感覚や反応への影響を調べる TMS



（経頭蓋的磁気刺激法）によって、無侵襲的にブローカ野（人間のみにある）および中前頭回（サルにもある）を刺激して脳の領野と機能の因果関係を求める実験を行った（図 37）。文法の判断と意味の判断を対比させる、日本語の名詞と動詞の2語からなる刺激文を与え、動詞提示開始時を基準として右図矢印のタイミングで磁気刺激を与えた。



比較させる、日本語の名詞と動詞の2語からなる刺激文を与え、動詞提示開始時を基準として右図矢印のタイミングで磁気刺激を与えた。磁気刺激の効果は、磁気刺激なしの条件を基準とする反応時間の变化で評価した。その結果、特に T=150ms のタイミングでブローカ

図 37 TMS（経頭蓋的磁気刺激法）による実験

磁気刺激の対象部位 A：ブローカ野、B：中前回頭 TMS 実験で使われた刺激文の例と磁気刺激のタイミング。

N：正文、A：誤文、

Syn A：文法判断に用いられた誤文の例、

Sem A：意味判断に用いられた誤文の例ブローカ野に T=150ms のタイミングで磁気刺激を与えた結果。縦軸は反応時間の变化で、負値は反応の促進を示す。

野に与えた磁気刺激が文法判断を顕著に促進することを見出した。意味判断課題の場合ではこのような変化は見られなかった。また、中前回頭への磁気刺激の効果は文法判断、意味判断ともに見られなかった。この結果からブローカ野の活動と文法判断の因果関係が明確になった。また、これまで事象関連の TMS 実験では脳機能を抑制することが報告されていたので、文法判断を特異的に促進するというこの知見は、TMS についての常識を覆す発見であった<sup>34</sup>。

<sup>32</sup> Embick D, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 97, 6150-6154, 2000

<sup>33</sup> Hashimoto R & Sakai KL, Neuron, 35, 589-597, 2002

<sup>34</sup> Sakai KL, et al., Neuron, 35, 1177-1182, 2002

これら一連の結果はブローカ野が文法処理に特化していることを示す直接的な証拠であり、脳における文法処理モジュールの存在を強く示唆するものである。

### (3) 脳をモデルにした自然言語処理

個別言語の枠組みを超えて、普遍的な言語システムの構成原理を明らかにするために、言語機能の情報数理論とアルゴリズムの研究を行った。その第一歩として、シグモイド素子を用いた再帰的神経回路網の最も単純な SRN (simple recurrent network) の計算能力について検討した。その結果、①耐ノイズ性を多少とも要求すると、ある程度の学習は可能であるが、有限オートマトンより大きな能力は持ち得ず、カウンタの獲得さえ困難である。②名詞、動詞などの基本的品詞の獲得は、学習によらず、単語が出現する文脈の記憶とクラスタリングだけで可能である。③有限状態オートマトンは、離散的な値を用いる再帰型神経回路網において確率的学習アルゴリズムにより学習可能である、などの結果を得た。

そこで、構文解析木のように自己埋め込みを伴う構造（自己再帰的構造）と、構文解析・文生成に用いる有限状態オートマトンで表現される統語規則部分とを分離した新たな語彙獲得モデルを考案した。また、有限状態オートマトンの動作を安定なものとするために、各素子を動作が離散状態である古典的なパーセプトロンとした再帰結合型神経回路網を構築し、さらにパーセプトロンを組み合わせた多層神経回路網のための学習アルゴリズムを開発した。このモデルは脳の言語機能のモデルとしてだけでなく、実際のコーパスから統語規則を学習するアルゴリズムとしてテキストマイニングに利用することが出来る。

### (4) イメージング技術の開発と応用

#### A. 光トポグラフィ解析手法の開発

光トポグラフィは、ヘモグロビンの近赤外光吸収スペクトルを利用して、脳活動に伴う酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb) および脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb) の濃度変化のマッピングを光反射強度の多点同時計測によって得る手法である。同じく脳活動を血流量の変化として捉える PET や fMRI に比べて装置が小さく、取り扱いが簡単であるため臨床に使う上での利点がある。被験者の頭部を拘束することなく計測できるので言語など脳機能計測に適している。光トポグラフィ測定装置は日立製作所中央研究所および日立メディコが世界に先駆けて開発してきた。これまで Oxy-Hb と Deoxy-Hb の分子吸収係数の大きさが逆転する 2 波長 (780nm 付近および 830nm 付近) を用いて計測していたが、本研究において短波長側の波長をさらに短く (692nm) して計測精度の向上に成功した。

解析法については、主成分分析法を取り入れて、従来が目視によって波形を取捨する過程を排除し、自動的に主成分の大きさが求められるようにした結果、信頼性が増した。

単一事象の信号変化を捉える事象関連光トポグラフィの手法を初めて開発し、文法処理と意味処理に伴う皮質活動を分離することに成功し上記(2)の結果を裏付ける結果を得た<sup>35</sup>。

<sup>35</sup> Noguchi Y, et al., Hum. Brain Mapp., 17, 89-99, 2002

また、fMRI が検出する Deoxy-Hb の変化と、光トポグラフィの検出する Oxy-Hb の変化が相関することを明らかにした。

### B.失語症における病態生理の解析

損傷した脳が言語を獲得する機序を捉えて、脳の機能回復の機序を見ようとした。そのための計測手法として光トポグラフィを適用するために、失語症患者に適用できる基本的なタスクや解析法の開発を行った。主成分分析法を取り入れて解析の信頼性が増した結果、失語症回復期の長期追跡の解析も行える道が開け、実際に7つの症例について初期的な調査を行った。その中で、失語症の急性期に右脳の活動が増えることが見出された。

### C.DT-MRI による言語機能計測

fMRI などで複数の脳活動部位が観測された場合、それらの活動に関連性があるか否かを考察する上で、複数部位間を連絡する神経繊維束の経路や結合の強さが分かれば、問題解決の重要な手掛かりとなる。特に個人差が問題となる診断や研究では非侵襲的な脳神経繊維束の描画手法が必須であり、DT-MRI (Diffusion Tensor Magnetic Resonance Imaging) に注目した。DT-MRI では、傾斜磁場パルスを複数の方向に印加することにより水分子の拡散現象を強調して、拡散運動の大きさと方向を計測し、可動性の高い方向を順次探索することにより、神経繊維束の描出が可能となる。問題は、神経繊維束の描出を効率的に行うために高強度の傾斜磁場パルスをかけると、振動に起因する画像劣化が著しいことであった。本研究では、小さな拡散強調でも神経繊維束の描画を可能にするために、新たに画像ノイズ除去フィルタとトラッキングアルゴリズムを開発した。その結果、様々な方向に向かう神経繊維束が混在する交連繊維近傍の神経繊維束を描画することに成功した。

## 3-3-2 本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

### (1) 本研究終了後のファンド獲得と研究の状況

研究資金	研究テーマ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CREST	言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築	1期												
科学研究費補助金若手研究(A)	機能イメージング法による言語の脳システムの解明													
SORST	言語の脳機能に基づく言語獲得装置の解明													
CREST	「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」領域 言語の脳機能に基づく獲得メカニズムの解明							1期						
科学研究費補助金特定領域研究	文法処理を中心とする言語の脳内メカニズムの解明													
科学研究費補助金基盤研究(S)	言語の脳機能に基づく手話の獲得メカニズムの解明													

図 38 本研究以降に獲得した主な研究助成金 (酒井)

本研究以降に酒井が獲得した主な研究助成金は、図 38 のとおりであった。

酒井は、本研究を 2002 年 9 月に終了した後、発展研究 (SORST) に採択され、同じチーム構成で研究を継続した。SORST 期間中の 2003 年に、CREST の新領域「脳の機能発

達と学習メカニズムの解明」(研究総括：津本忠治)が始まり、新たな研究課題「言語の脳機能に基づく獲得メカニズムの解明」(2003-2008年度)(以下、第二のCREST)がその第1期課題として採択された。これによって、酒井は言語神経科学からの語学教育への取り組みを展開することになった。

本研究では、日本語または英語を母語とする成人の脳について文法中枢が局在することを明らかにした。チョムスキーの普遍文法理論によれば、人間は人間に特異な場所を使って、個別言語によらず、普遍的に言語を処理するはずである。従って、日本語とかなり離れた言語である英語について、日本人の脳に後から入ってくる場合の影響を調べることは重要な問題である。そこで、第二のCRESTにおいては、日本語を母語とする脳に、教育によって英語が入ってくると脳はどう変わるのかを、眼で見える形で捉えるということを新しいテーマとした。これによって、脳科学の観点から教育に取り組む際の指針となるようなデータを蓄積することを目指した。このような研究を実施する目的で、2000年頃から東京大学教育学部附属中等教育学校の生徒に調査に協力して貰う体制が出来ていたので、第二のCRESTが始まる頃にはスムーズに実験できるようになっていた。このような学校と一体になって取り組む研究は世界的にも例が無いものである。また、本研究で行われた上記以外の研究については、第二のCRESTにおいて発展継続が行われた。

なお、これまで本研究の調査の対象になったのはいずれも成人の脳であった。乳児の発達過程を直接追跡することは、CREST「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」研究領域(研究総括：津本忠治)の中の課題「乳児における発達脳科学研究」(研究代表者：多賀巖太郎)において、光トポグラフィを用いた言語発達の脳内機構(主として抑揚情報の処理に関わる皮質領域の特定と発達)の研究が行われた。その研究を担当したのは、本研究で大学院生として参加した保前文高(現首都大学東京、助教)である。乳児の脳内機構がどのように文法中枢の芽につながっていくかを調べることは困難だが興味深い問題であり、今後の解明が待たれる。

以下に第二のCRESTでの主な成果の概要を述べる。

## (2) 言語機能の局在、および母語と第二言語の獲得メカニズムの解明

### A. 文法中枢における第二言語習得の初期過程

それまでに、母語と第二言語におけるブローカ野の役割に関するfMRIの実験がいくつか報告されているが、いずれも部分的であり統一した知見が確立されるには至っていなかった。第二のCRESTでは、まず東京大学教育学部附属中等教育学校の中学1年生全員に対し、英語のヒアリング能力と文法運用能力の向上を促すトレーニングを2ヶ月実施した。この授業を受けた全生徒の中に含まれる双生児に対して、トレーニングの前後における脳活動の変化をfMRIによって測定した。言語課題としては英語(第二外国語)と日本語(母語)のそれぞれについて、動詞の原形を過去形に変える活用変化の文法判断と、動詞のマッチング課題(動詞の現在形を文字で提示して、同じ動詞を強制2択法で選ばせる)を対比

して、これら 4 課題を行っている際の脳活動を計測した。

英語の過去形課題におけるブローカ野の活動変化は、各双生児のペア同士で高い相関を示した。さらに、各被験者が示す英語の成績の向上に対して、ブローカ野における活動が正の相関を持つことが明らかになった。この脳の場所はそれまでの研究で特定した「文法中枢」と一致しており、日本語による同様の課題で見られた活動の場所とも一致するという重要な結果であった。この結果は、少なくとも中学一年生では、英語が上達すると、文法中枢の機能変化によって英語の文法能力が定着することを示唆した。

## B. 第二言語習得の定着過程

次に、英語習得の熟達度を見るために、日本語を母語とする大学生を対象に、英語の過去形課題をテストした。fMRI による調査の結果、ブローカ野に最も強い活動が見られるのは中学生の場合と共通しているが、大学生では熟達度の高い者は熟達度の低い者に比べて、文法中枢の活動は著しく減少していることが見出された。さらに、マッチング課題においても、fMRI で同じ傾向が見られた。以上の結果から、熟達度が高くなるほどブローカ野の活動が節約されるという負の相関が見出された。

第二言語習得の初期過程と定着過程における 2 つの結果を合わせると、習得の初期の獲得過程で文法中枢の活動が高まり、その活動レベルが維持された後、定着期では活動を節約できるように変化することが示唆された (図 39)。長期にわたる英語習得の過程が文法中枢のダイナミクスとして観察できるというこの結果は、教育の見地からも意義深い。

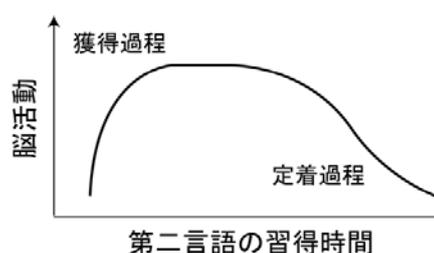


図 39 第二言語の習得過程における脳活動の変化

## C. 人間の言語中枢の同定

これまで左脳で言語をつかさどる領域は「言語野」と呼ばれ、ブローカ野やウェルニッケ野のように大まかな区分しか分かっていなかった。第二の CREST では、延べ 70 人の被験者を得て、文法知識や文章理解、単語やアクセントの正誤を問う問題を解いているときの脳活動を fMRI や TMS を用いて調べた。その結果、言語に伴う脳の活動パターンを地図にすると、4 つの中枢に分けられることを見出した (図 40)。前頭葉には文レベルの言語処理に必要とされる文法中枢と文章理解の中枢があり、また側頭葉から頭頂葉にかけては単語レベルの言語処理に必要とされる単語と音韻(アクセントなど)の中枢がある。これらの知見は 2005 年 Science 誌の総説として発表された<sup>36</sup>。



図 40 人間の左脳の言語中枢

<sup>36</sup> Sakai KL, Science, 310, 815-819, 2005

#### D. 語学の適性に関係する脳部位の特定

外国語としての英語が習得される約 6 年の初期から定着期にかけて、左前頭葉の文法中枢の活動が高まり、その後維持・節約されるというダイナミクスが見いだされたが、一方では文法能力など語学についての適性に個人差があり、それが脳のどのような構造的な特徴と関係があるかについては分かっていなかった。

そこで、英語を外国語として習得中の中高校生（日本人）と成人（海外からの留学生）を含む 95 人を対象に、英語文の文法性の判断能力を調査する課題を行うとともに、脳の局所体積を MRI で測定し、その個人差を分析した。その結果、脳の下前頭回の局所体積を右脳と左脳で比べるときの左脳の優位性（非対称性の程度）が、文法課題の成績に対し正の相関を持つことが明らかになった。この部位は既知の文法中枢に一致する。語学の適正に関係する脳部位を、年齢や習得期間と独立した要因として特定したのは初めてであった<sup>37</sup>。左脳と右脳の対応部位は、すべて脳梁繊維によって互いに抑制的に結びつけられており、下前頭回の左側化が強いほど、右下前頭回からの抑制が相対的に弱いいため、左脳にある文法中枢の可塑性が増す結果、外国語の習得における柔軟な適応が可能になるものと考えられる。

#### E. 文の統語構造の時間的情報処理

近年開発された脳機能のマッピング法の中で時間分解能に勝れる MEG（多点同時測定できる脳磁計測：Magnetoencephalography）を用いて、日本語の名詞と動詞の最小対組み合わせによる統語課題と意味課題を遂行中の被験者の脳活動を計測した。統語課題では、他動詞と自動詞の区別、および格助詞と動詞の関係性についての知識を用いて文章の文法的な正誤を判断する。名詞と動詞の最小対では、名詞は格助詞「を」と「が」によって目的格か主格のどちらかになるので、対となるべき動詞が他動詞であるか自動詞であるかが文法的判断で問われることになる。意味課題は、主語としての名詞と自動詞の組み合わせが適切かどうかを判断する課題である。

目的語・動詞（OV）文、あるいは主語・動詞（SV）文を文節ごとに提示して、名詞の次に来る動詞に対する脳活動を解析の対象とした。その結果、OV 文（正文）に対する 3 つの有意な反応がそれぞれ異なったタイミングと部位で得られた。これらは、階層的な統語構造と、課題に関する予測も含めた情報処理の過程で、複数の領域が協働するダイナミクスを初めて捉えたものであった<sup>38</sup>。

#### (3) 失語症と失文法への機能計測

脳卒中後の失語症のリハビリテーションにおいて、回復過程を光トポグラフィによって

<sup>37</sup> Nauchi A and Sakai KL, Hum. Brain Mapp., 30, 3625-3635, 2009

<sup>38</sup> Iijima K, et al., NeuroImage, 44, 1387-1396, 2009

観察し、脳がどのように言語機能を再獲得するのかを探った。失語症の研究は 19 世紀の Broca 以来の蓄積があり、劣位（右）半球が回復過程で重要な役割を担うことを示唆する症例が多く報告されていた。しかし、それらは十分な科学的証拠に基づいているとはいえないものであった。第二の CREST では、非侵襲性脳機能マッピング法の中でも比較的被験者への負担の少ない光トポグラフィを用いて、劣位側および言語関連周辺領野の役割を検討した。11 症例について複数回の計測を行ない活動部位の変遷を調べた。そのうち 7 例は始めに非優位側に活性が認められたが、3~6 ヶ月後には優位側にも活動が現れるとともに非優位側の活動が低減するのが観察された。一方残りの 4 例では初めから優位側に潜時の遅れや波形逆転などの異常はあるものの何らかの活性があり、経過とともに明確で正常な反応へと変化するのが認められた。この結果は、回復期の早期には非優位側が言語活動を支え、優位側が回復してくるに従い、非優位側の活動が低下して切り替えが行われることを明瞭に裏付けるものであった<sup>39</sup>。

それまでの研究により、文法中枢の存在が明らかになったが、同部位の損傷によって文法に選択的な障害が生じるかどうかについては明確になっていなかった。左前頭葉に脳腫瘍を持つが見かけ上言語障害が見出されていない患者に対して、新たに考案した文法判断テスト（日本語の文と絵を同時に見ながら内容が合っているか否かを答える「絵と文のマッチング課題」）を実施し、その腫瘍部位を MRI で調べて文法中枢に腫瘍がある患者では、左前頭葉の他の部位に腫瘍がある患者より誤答率が高くなることを見出した。臨床的には失語症と診断されていないにもかかわらず、顕著な文法障害を特定したのは初めてであり、MRI による文法中枢の診断が従来の診断法より優れていることを示した。この結果は、既述の健常者での TMS の実験以上に直接的に脳の構造から機能への因果関係を実証出来たという意義を持つ。また、失文法の原因についての 19 世紀以来の永い論争に決着を付けることになった。なお、この研究は、昭和大学医学部の金野竜太助教、および東京女子医科大学の村垣善浩講師らと共同で行われた<sup>40</sup>。

#### (4) 言語獲得のメカニズムへの自然言語処理的アプローチ

乳児は意識的に教えなくても勝手に親がしゃべっている言葉の句切りをうまく見つける。母親が話す言葉の、どこまでが単語でどこが助詞なのか知らないはずなのに、「おやつを」と言ったときに正しく「おやつ」で切れて「を」がついていることが分かる。冠詞を使う英、独、仏語では日本語の格助詞に相当する情報が冠詞に入っている。このような構文解析の能力を基に言語の獲得が進むと思われる。

自然言語処理のグループは、文字のつながりをコンピュータ上のニューラルネットワークに入力してツリー構造が認識できるかどうかを探った。研究の目的は、脳が何を計算しているかを明らかにすることで、その結果、ネットワークが再帰的（リカレント）に繰り返す

<sup>39</sup> 小黒恵司他, 臨床脳波, 50(2), 110-117, 2008

<sup>40</sup> Kinno R, et al., Brain & Language, 110, 71-80, 2009

返すことが重要だということが分かった。「リカレント」は言語学でも自然言語処理でも鍵となる概念である。フィードバックが常に掛かっていて自分の計算結果をもう一度入力することを繰り返すことによって、自分の中にもう一つ小さい構造を作る。これを繰り返していけばツリー構造が出来ていく。

エルマンによるリカレントネットワークの研究では、先に何の単語が来るかを予測した。しかし、それは一次元的な配列を予期したに過ぎない。第二の CREST の研究グループが新しいモデルで狙ったのは、枝分かれのノードが幾つあるのか、それがどれくらいの深さにあるのかの情報を使いながらツリー構造を作っていくことであった。日本語では助詞が使えることは実験上大きなメリットがあり、意味処理は無視できるので計算機処理に馴染む。枝分かれの深さを増すと、その負荷に応じて脳の活動の変化が実際に見られるということを fMRI の手法で検証出来たので、論文発表の準備をしている段階である。

### 3-3-3 研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果

#### (1) 科学・技術の進歩に貢献する成果

##### A. 言語神経科学の創出と脳科学における新しい概念

人間の脳活動を画像として捉える fMRI などの進歩があつて、心の様々の機能の座がどこにあるかが調べられるようになってきたが、人間だけに備わった言語能力が、その他の心の機能と原理的に分けられるかという問題は、依然として認知科学における大きな謎であった。本研究では、言語学の知見に基づいて文法を記憶から切り分ける言語課題を考案し、課題に取り組む被験者に脳科学の手法である fMRI や TMS の手法を使うことによって、言語の基礎的な機能（モジュール）として、文法処理に特異的に活動する部位（文法中枢）が、左脳前頭葉のブローカ野に局在することを初めて明らかにした。従来は、言語は大きなシステムなので脳全体を使っているのではないかと、言語野と言いつつも記憶を担当しているのではないかと、あるいは言語は人間だけに限られず、例えばサルにも言語の芽のようなものがあるかもしれないなど、色々な議論があつた中でそれらを一気に解決する成果であった。言語のモジュール性については、ドイツ語など他の言語でも検証されている。

チョムスキーを含めて現象から見えないものに迫っていく言語学の理論的な手法は 20 世紀の後半非常に進歩した。しかし、これを脳科学に適用するという事は考えられていなかった。事実、90 年代の終わりまで文法に着目した脳科学の論文はなかった。その原因の一つは、脳科学者が言語学を学んでから言語を取り上げる研究者がいなかったことである。研究をする上で言語学を知らないで実験をデザインすると本質に至れない。酒井は本研究の開始直前までチョムスキーのもとで言語学に接したことを契機に、言語学の上に脳科学を築く言語神経科学（あるいは言語脳科学）という新しい学際的領域を創出することになった。これに刺激を受けていくつかのグループが研究を始めることになった。

## B.失文法の原因解明

ブローカが 1861 年に発話の障害を報告して以来、言語障害の症例がこれまで数多く蓄積されてきた。その中で、大脳皮質の言語野であるブローカ野が損傷を受けると、発話される文から文法的な要素が抜けてしまう「失文法」と呼ばれる現象が知られていて、その原因について長く議論が続けられてきた。本研究によって初めて文法中枢のモジュールの存在が明らかになったが、文法中枢が損傷を受けると失文法の症状を現すかどうかについては謎のままであった。臨床医からも、ブローカ野に損傷のある患者でも言語障害が見られないことについての疑問がしばしば投げかけられた。

この疑問に対して、文法中枢に腫瘍が掛かっている患者に対して、新たに考案した絵と文を用いた文法判断のテストを行うと共に、腫瘍部位を MRI で正確に同定して、それらの関係を詳細に分析することによって、文法中枢に腫瘍が掛かっている患者に特異的に失文法が現れることを証明することに成功した。この結果によって、文法中枢が文法モジュールとしての機能を果たしていることがさらに明確になるとともに、失文法の原因について行われてきた 19 世紀以来の永い議論への明快な回答が与えられることになった。

## C.第二言語の学習についての脳科学的アプローチ

脳の活動が静的なものではなく動的であり、学習によって上がって、熟達すると共に再び下がるといふ発見は、脳の活動についての新しい概念をもたらしたものである。ブローカ野の活動を時系列的に見れば個人差を含めて学習の効果が見えるので、直接的に学習の効果や経験を脳で見る方法を提唱したことにもなる。

一方、語学の適性は脳科学で未知の問題とされてきた。本研究によって、下前頭回部位の左脳の右脳に対する優位性（非対称性指数）の程度が、年齢や習得期間とは独立の、文法課題の成績の個人差の要因であり、この部位は文法中枢に一致することが明らかとなった。各個人の文法獲得の適性を知る上で初めての脳科学データとなった。下前頭回部位の左脳優位性は、脳が器質的に初めから持っているのか、あるいは学習の結果生じたかについては、まだ不明である。

## D.言語機能から心の働きの解明へ

思考などのあらゆる知的機能が言語を介して行われていることから、言語機能の解明が突破口となって心の働きの解明が進むことが期待される。また、サルやチンパンジーにも見られる他の認知能力と異なり、言語処理が人間の脳に特異的であることを明らかにしたことは、従来支配的であった言語能力を一般的な認知能力の延長としてとらえる（サルの延長としての）人間観を変革させることになる。

### (2) イメージング技術の開発

#### A.光トポグラフィ技術の開発

日立製作所と日立メディコのグループが当初から開発してきた光トポグラフ装置は、手軽に使える、ベッドサイドに持って行けること、被験者への心理的、生理的負担が少ないことなどの利点があり、色々な分野で使われるようになってきた。ただ、脳の深いところまでは計測できないことや、空間解像度が問題点となっているので、MRI との十分な対応付けが課題として残っている。MRI 装置との位置関係と、乗せ方など技術的に改善の余地がある。これらを解決していけば、利点を生かして臨床現場などでも広く使われると期待される。

### B.DT-MRI (Diffusion Tensor Magnetic Resonance Imaging) の開発

DT-MRI で神経繊維束を画像化する技術では、新たに画像ノイズ除去フィルタとトラッキングアルゴリズムを開発することによって、磁場強度を上げなくても S/N 比を上げることができ、神経繊維束の方向と太さが分かるようになった。また、脳機能画像における複数の賦活部位間の神経的な連絡状態を可視化するため、fMRI や光トポグラフィ画像などいろいろなモダリティ画像を重畳して表示できるソフトウェアを開発した。この表示用ソフトウェアは脳機能画像と神経繊維束画像を重畳表示する形態画像の任意の断面を選択する機能、賦活部位の領野名称を脳領域情報（機能領域ごとに番号を割り当てた Automated Anatomical Labeling: AAL）を用いて表示する機能などを搭載した。将来的には、コンピュータの回路図のようなものとして神経ネットワークの青写真を画きながら、機能を見ていくということが期待される。

### (3) 人材育成状況

本研究には若い研究員として 7 人の大学院生が参加していた。そのうち橋本龍一郎、保前文高の 2 人が博士号を取得した。保前は、CREST「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」研究領域（研究総括：津本忠治）の中の「乳児における発達脳科学研究」（研究代表者：多賀巖太郎）において CREST 研究員として参加した後、現在首都大学東京の助教である。大学院生の野口泰基は生理学研究所で博士号取得の後、名古屋大学、カルフォルニア工科大学のポスドクを経て、現在神戸大学大学院人文学研究科の講師を務めている。

## 3-3-4 研究成果から生み出された社会・経済的な効果・効用および波及効果

### (1) 教育に貢献する成果

文の理解と単語の羅列の記憶が、脳の全く異なる領域で処理されているという成果は、単語の丸覚え中心の語学教育から、語順の文法と理解を重視する言語習得法への移行を強く促すものである。今までの語学教育では、語彙さえ増やせば深い内容でも語れるとされていた傾向があるが、実際はその組み合わせ方（文法）が最も重要である。日本人の英語でしばしば見られる問題であるが、和英辞典を引きながら日本語の翻訳をすると不自然な言葉のつながりになってしまう。この問題も言語教育における文法の重要性を示している。

脳の機能について細分化した言語地図が得られたことは、語学学習の効果の評価にも役立つと考えられ、計測的な裏付けのなかった語学教育の方法論に新しい視点を提供するものである。

## (2) 臨床応用に貢献する成果

文法中枢の損傷と失語症との因果関係が明らかになった。さらに、同じ文法中枢でも腫瘍の場所によって、劣位（右）側が動員されるタイプと、劣位側の活動が上がらず優位球側も落ちてしまうタイプの異なったパターンがあることが明らかになってきた。後者は今まで知られていなかったタイプである。障害部位が明確になることによって、治療法の開発や言語リハビリテーションも進むと期待される。細分化した言語地図を作ることで、言語障害が脳のどの部分の障害に起因するかが詳細に明らかになる可能性があり、障害の種類を考慮したリハビリテーションのメニューを作れる可能性が開ける。

従来の診断法では言語障害の患者とはされず、本人もその自覚が無く、周りの人も気づいていないような場合でも、fMRIによる厳密な文法テストを実施すると、明らかに文法だけの障害が見つかることがある。すなわち、従来の検査方法では文法に注目していないので、医師や言語聴覚士が見落としていたのである。また、言語聴覚士がリハビリのために患者に接するときにも、文法に注目することは殆どなく、単語が言えるということ以上のケアは行われぬ。これらは、単語を言えるということと、文法を使って人間らしい言語を使うということのギャップが十分に認識されていないことに起因する。実際には障害があるにもかかわらず、社会的にも障害になっていることを知らずに過ごしていたが、本人は何らかのコミュニケーションの困難さにもどかしさを感じていたということがあり得る。そういう障害のあり方が分かってきたことは、新しい診断法を通して本研究が医学の進歩に貢献したといえる。

### 3-4 自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発（研究代表者：中村 仁彦）

#### 3-4-1 本研究期間中における状況

##### (1) 本研究開始の頃の状況

HONDA が 10 年の研究を経て自律歩行する人間型ロボット（以下、ヒューマノイドロボット）を公開し世の中を驚かせたのは 1996 年である。1998 年からは、通産省（当時）の「人間協調・共存型ロボットシステム開発」プロジェクトが始まり、ヒューマノイドロボットがますます注目されるようになった。ヒューマノイドロボットの身体が先端的なメカトロニクスを駆使することでハードウェアとしての完成度が高くなるに従い、それにふさわしい情報処理システムとしての「脳を創る」必要がある。しかし、従来の技術還元論に基づくロボティクスの方法論では解決困難な本質的な問題があることが分かってきた。

中村は東大に着任した 90 年代初め頃からロボットの非線形問題、特に非ホロノミック<sup>41</sup>という複雑な拘束条件を持ったロボットの制御が難しく、かつ色々な場面で現れる重要な問題であることに興味を持っていた。また非線形力学系は、ある時はカオス的な挙動を示したり、ある時はアトラクタと呼ばれる特有のパターンを生成したりと複雑な行動をする。それが人間の連想や、動きの遷移になっているということは自然に思いつくが、それをどうすれば設計できるか、制御できるかが問題である。そこで、非線形の拘束条件問題からカオスを初めとする様々な非線形現象をつなげて、ロボットの知能に至る研究ができるだろうと構想を温めていた。その実現を目指してロボットの脳を創る研究を始めたのが本研究である。本研究期間中の主な成果の概略を以下に述べる。

##### (2) 運動パターンの生成と遷移のための力学的情報処理

従来のヒューマノイドロボットの運動決定機構では、参照軌道の存在を前提として環境の変化に対してロバストな安定化コントローラ的设计法を中心に議論されてきた。このため決められた運動はできるが、運動を自由に合成して多様な運動を行うことはできなかった。本研究では、非線形力学の観点からロボットの情報処理系の設計と制御に取り組んだ。ロボットは多くの自由度を持つので、計算量が膨大になるのを避けるため関節角の相関を利用した低次元化を行った上で、全身周期運動を低  $N$  次元空間内の閉曲線として表現し、これをアトラクタとする力学系を設計した。その上でヒューマノイドロボットの全身に対して 30 次元程度の空間に拡大した。全身の運動をいかに低次元化するか、低次元の運動をいかに拡大するかが重要な課題であった。

このとき、力学系が特有のアトラクタのパターンをとり、遷移してカオス的になって次のパターンにつながっていく現象を、システム解析の方法やシステム設計の方法を使い、非線形力学を多項式近似して非線形場を設計した。多項式近似を行う意図は、完全にカオ

---

<sup>41</sup> 力学的な拘束条件で、速度または加速度を含むが、時間に対して積分できないもの。直接の駆動機構のない変数によって生じる。

動的な現象に頼ってしまうと安定な動作を保証できない危険があるので、むしろ流れ場を設計して確実な性質を持たせることにあった<sup>42</sup>。

センサ信号に基づいて、アトラクタの引き込み領域を変化させて運動の遷移を行うことによって、環境条件に応じて変化するロボットの運動を可能にした。さらに、異なった運動間の滑らかな変化を可能にするために、運動力学系を階層化した。すなわち、運動空間のベクトル場を記号空間の一点に

対応づける上位の記号空間を構成することによって、記号空間内の連続的な移動によって運動空間のベクトル場が連続的に変化し、ロボットの運動の生成と遷移を行うことが可能になった。これらの成果を全身型ヒューマノイドロボット HOAP-1 と上半身型ヒューマノイドロボット Robovie に適用して、実際の運動の生成と遷移を確認した (図 41)。

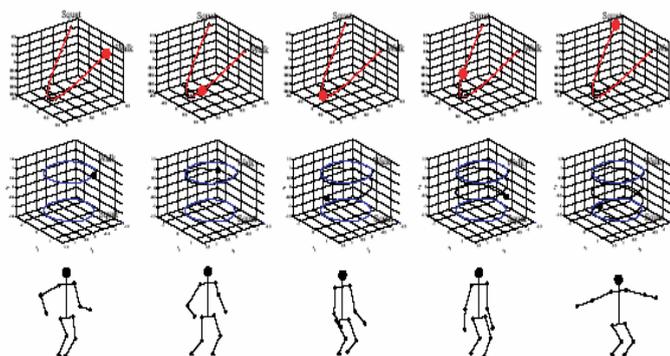


図 41 (上)記号空間における力学系の動き、(中)運動空間における力学系の動き、(下)ロボットの動き

### (3) 運動パターンの認識と生成を統一する統計的情報処理

ヒューマノイドロボットにおける運動パターンの認識と生成の問題から知能への接近を試みるため、ミラーニューロンとミメシス理論に注目した。ミラーニューロンはサルやヒトにおける運動性言語野に近い部位にあるとされる神経細胞群で、他者の行動の認識と自己の行動生成の双方において活性化する。ミメシス理論では、見まねがコミュニケーションを通じた原始シンボル (シンボルとなる前の記号) 生成の源であり、そこからヒトや類人猿の高度な知能が形成されたとする仮説<sup>43</sup>が提唱されている。この仮説は、行動の認識と生成の双方向の機能 (見まね学習) を実行する装置が脳のハードウェアに埋め込まれていて、高次機能の基礎になっていることを意味する。本研究では、情報処理の双方向の機能を一つのモデルで実現することは情報学的に見ても極めて合理的な設計論であるとの観点から、シンボルを獲得し操作して全身で行動するヒューマノイドロボットの知能の構成論を研究した。

他者の行動を認識するプロセス、自己の行動を生成するプロセス、原始シンボルを創発するプロセス、この 3 つを統合する数理モデルとして確率的な情報処理手法である隠れマ

<sup>42</sup> Okada M and Nakamura Y, Proc. Int. Workshop on Control Problems in Robotics, Finalist Paper, 91-104, Published by Springer, Control Problems in Robotics, 2003

<sup>43</sup> ホモエレクトスにおいて運動を記号化する意味記憶の能力が生まれ、ここから行為と記憶を結びつけるリハーサルと非言語的なコミュニケーションを経て、言語が生まれてきたとされる。

ルコフモデル<sup>44</sup> (HMM) を採用し、連続分布型 HMM (CHMM) に基づくミメシモデルを考案した。連続的な運動認識・生成と離散的なシンボルとの関係を記述するには複雑な行動を構成する基本的な行動要素(プリミティブ)を決め、プリミティブを短時間における関節角の角度ベクトルおよび角速度ベクトルに対してベクトル量子化を行い、代表的なベクトルと HMM の出力記号を対応づけることによって運動認識を実現した。逆に HMM から自己行動要素列を作るために最大尤度を求めることは計算時間がかかり現実的でないので、遺伝的アルゴリズムを用いて探索する方法を採った<sup>45</sup> (図 42)。

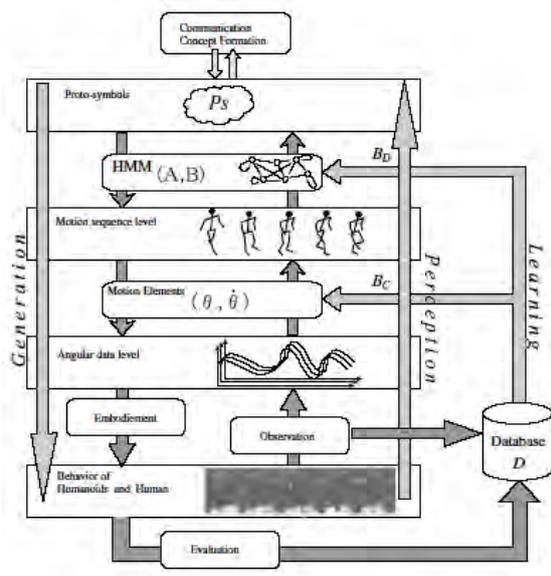


図 42 隠れマルコフモデルに基づくミメシモデル

また、原始シンボル間の関係性を記述する

ための原始シンボル空間を形成する手法を提案し、幾何学的な原始シンボル操作によって、複雑な運動の認識・生成を実現した。さらに、階層構造を重ねることでより高次のシンボル操作へと発展させるためのメタ原始シンボルの概念を提示し、隠れマルコフモデルによって階層的な運動・認識および生成が可能であることを示した。

確率データとして色々な運動を取ったときに、それを空間の中に埋め込んで低次元の空間で表すことができる。一つの運動に対して一つの統計パラメータができる。それが多数集まって集合相互の距離を定義すると位相構造ができて空間(原始シンボル空間)が張れる。これによって、異なった運動相互間の距離、あるいは中間の運動などについての計算が自由に出来るようになった。

#### (4) ハードウェアの設計

従来のヒューマノイドロボットの機構では、重心の制御性を向上させるために膝を曲げた運動を行っているが、大きなエネルギーを消費するだけでなく膝への大型アクチュエータ配置を必要とする。この問題の解決には、腰関節の導入が運動性向上に重要だと考えられている。また、それまでのヒューマノイドロボットの関節では、ロボットが外力や環境の変化に応じて柔軟に運動を変化させるような、力に敏感な機構(バックドライバビリティ)を作ることができなかった。

本研究では、ヒューマノイドロボットの運動性向上を目的とした2つの機構を開発した。二重球面ジョイントは6自由度を持つ関節機構で、全ての軸の回転中心が一点で交わるよ

<sup>44</sup> 確率的な状態遷移と確率的な出力変数を持つオートマトン。状態遷移は「隠れ」ていて出力系列からは一意に決められない。

<sup>45</sup> Inamura T, et al., Int. J. Robotics Research, 23, 363-377, 2004

うに構成される。この機構を用いた股関節機構はアクチュエータを増やすことなく腰関節機構の役割を果たす。バックラッシュクラッチはモータと関節の駆動伝達機構であり、高トルク伝達特性とフリー状態の両方を実現するメカニカルなクラッチである。この機構を膝関節に用いるための制御方法を開発した。二重球面ジョイントによる股関節、バックラッシュクラッチによる膝関節、さらに先に開発したサイバネティックショルダによる肩関節を併せて搭載したヒューマノイドロボット UT- $\theta$  を開発し、その有効性を検証した。二重球面ジョイントの適用によってロボットは上半身の重心の制御が容易になり、膝を曲げない歩行ができるようになった。また、バックラッシュクラッチによる膝関節によって省エネルギー化と身体の力学に従ったより自然な運動を可能にした。

一方、これまでに開発されたヒューマノイドロボットは 1m を超えるものが多く、運動能力は過酷な実環境に対してはあまりに脆弱であり、実環境中での高い機動性を実現するための開発に使える小型・軽量のヒューマノイドロボットが求められていた。本研究ではその目的のために UT- $\mu$  を開発した。

#### (5) ヒューマンフィギュアから筋骨格モデルへ

自由度が 20 を超えるようなヒューマノイドロボットの柔軟な全身運動を生成することは難しい。しかも、運動の自由度が限られているため、任意の運動を実現できるわけではない。そのため、多数の自由度を容易に操作できるインタフェースや、力学的に実現可能な運動を自動的に生成する方法が望まれていた。特に脳型情報処理においては、入力となる視覚・体性感覚などの感覚情報と、出力としての運動を計測・計算することが必要である。本研究では、この問題を解決するために、以下の計算法とシステムを開発した。

##### A. 並列高速動力学計算法

一般的には自由度  $N$  に対して  $N$  の 3 乗に比例する計算量が必要になる。本研究では、20 ~ 50 の自由度を持つヒューマンフィギュアの計算のために、独立した部分リンク機構を作成または分解する計算では並列計算を利用することによって、計算時間が  $\log N$  に比例する高速計算法を開発した。

##### B. 力学的整合性を考慮したヒューマンフィギュアの運動生成法

モーションキャプチャなどにより得られた運動が、ロボットにとって力学的に実現不可能な運動であるとき、もとの運動に修正を加えることによって実現可能な運動に高速変換する機能（力学フィルタ）を開発した。この力学フィルタはグローバルな最適化を行わないため、運動を逐次リアルタイムで入力することができ、高いインタラクティブ性を持つ。

##### C. 逆運動学計算を用いた直感的な運動生成法

逆運動学計算<sup>46</sup>の既存の方法では自由度が少ない場合が対象で、ヒューマンフィギュアの全身運動を一回の操作で扱えるものはなかった。本研究では、従来の逆運動学計算法を拡張し全身運動を一回の操作で生成できるようにするとともに、関節についての拘束条件を追加することにより自然な運動の生成を実現した。

#### D. ビヘイビアキャプチャシステム

被験者に取り付けた再帰反射性マーカを複数台のモーションキャプチャシステムのカメラがそれぞれ1台のPCに画像を送り、各PCで画像からマーカを検出する処理を並列に行う。マーカ位置データは再構成PCに集められて、3次元位置計算とラベリング<sup>47</sup>を行う。マーカ位置を非対称にすることによりラベリングをリアルタイムで行うことに成功した(図43)。このマーカ位置から上記逆運動学計算法を用いて関節角を計算した。

このモーションキャプチャシステムに床反力、視線方向、リンクの3次元位置と姿勢および筋電位系を接続し、複数のデータを同時に取得できるようにして、ビヘイビアキャプチャシステムを構成した。

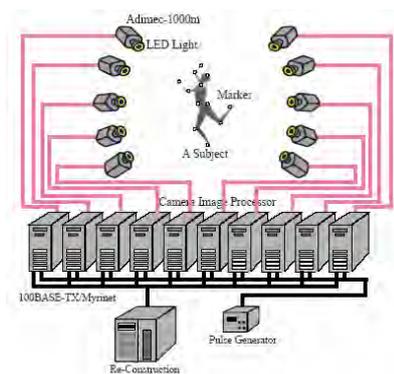


図 43 モーションキャプチャシステム

#### E. ヒトの筋骨格モデルの力学計算法

51個の骨群、366本の腱、34本の靭帯からなり、155自由度を持つ筋骨格モデルを作成した。それぞれの筋・腱・靭帯はワイヤとして、また上腕二頭筋のように枝分かれのある筋も仮想的なリンクを用いて忠実にモデル化されている。逆運動計算を行うことにより、ビヘイビアキャプチャシステムで計測された運動を実現するのに必要な筋力や、骨、靭帯にかかる体性感覚情報を計算し、発生力の度合いをカラー表示した。

### 3-4-2 本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

#### (1) 本研究終了後のファンド獲得の状況

<sup>46</sup> リンク機構の手先位置が与えられたときにそれを実現する関節角を求める計算法

<sup>47</sup> 各マーカが予め定義されたマーカセットのどのマーカであるかを判別する作業

研究資金	研究テーマ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CREST	自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発		2期											
科学研究費補助金萌芽的研究	形状記憶合金オブティカル・アクチュエータの開発													
科学研究費補助金基盤研究(B)	大規模構造可変リンク系のO(N)順動力学計算法の開発とそのCG製作への応用													
科学研究費補助金基盤研究◎	ヒューマノイド・ロボットの周波数ハイブリッドコンプライアンスの設計に関する研究													
科学研究費補助金基盤研究(S)	知能の力学的情報処理モデルの展開													
次世代ロボット実用化プロジェクト	ヒューマノイドロボットのためのインタラクション・ミドルウェアの開発													
科学研究費補助金特定領域研究	膨大なモーションデータの蓄積・分類と認識・検索への応用													
科学研究費補助金特定領域研究	膨大な運動データの抽象化・構造化に基づく運動言語の獲得													
科学研究費補助金基盤研究(S)	身体運動と言語を統一した人間・機械コミュニケーションの成立													

図 44 本研究以降に獲得した主な研究助成金（中村）

本研究以降に中村が獲得した主な研究助成金は、図 44 のとおりであった。

本研究終了の 2003 年以降に、中村は 2 件の基盤研究 (S) を含む 4 件の科研費（総額 2 億 3600 万円）と 1 件の NEDO プロジェクトを獲得し、活発に研究を進展させている。科研費基盤研究 (S) は本研究終了後 2003～2007 年度の「知能の力学的情報処理モデルの展開」、および 2008～2012 年度の「身体運動と言語を統一した人間・機械コミュニケーションの成立」である。また、NEDO プロジェクトは 2004～2005 年度の「次世代ロボット実用化プロジェクト」におけるテーマ「アニメトロニック・ヒューマノイドロボットの研究開発」である。

以下に、本研究で取り上げた主なテーマのその後の発展状況について記載する。

## (2) 統計的情報処理

運動パターンの認識と生成のための統計的情報処理は、本研究終了後の 2 つの科研費基盤研究(S)で大きく展開した 2 つのテーマの一つである。隠れマルコフモデルで作った記号のモデルを、ロボットと人間のコミュニケーションに適用した。同じ隠れマルコフモデルに基盤を置く言語の統計的モデルを使って、ロボットが人間の行動を基にして人の行動を理解し（行動モデルを持ち）、自身の行動を作るというメカニズムを作った<sup>48</sup>。

2005 年の愛知万博で、NEDO の「次世代ロボット実用化プロジェクト」の一環として、たくさんのロボットの研究テーマが選ばれてロボット館に参加した。その中の一つとして、ヒューマノイドロボットと人間が格闘技をするというゲーム仕立てのデモンストレーションを行った。本研究で作った小型ロボット（ $\mu$ 型の 2 号機）と人が同じ場所において、人の動きを捉えるモーションキャプチャをロボットの眼と見立てて、ロボットは人の動きを前述の記号モデルで理解する。人の動きに対して、ロボットは自身の技（ガードをする、パンチを出す、キックをするなど）を 300ms 遅れのリアルタイムで作ることができた。

相手の動きを見て自分の行動を作るために、格闘技をするときの対抗技（例えば、相手

<sup>48</sup> Kulic D, et al., Int. J. Robotics Research, 27, 761-784, 2008

の技に応じて避けるとか、ガードをするなど関係性のモデル) を学習させておく。技の出し合いを記号のモデルとして持たせる。その上でもう一つ上位に 2 人の関係を表現する隠れマルコフモデルを作った。これには、まず 2 人の人間が戦っている様子を見せて、2 人の関係性のモデルとして、一方の動きと相手の動きについてのモデルを作る。ロボットは自分の持っている技のモデルを使って、人の動きと自分の身体の動きを知って、2 人の関係性のモデルから次はどんな動きをすれば良いかを知って動きを作る。

格闘ゲームソフトとの違いは、ゲームソフトは予め全て決めて作ってあるのに対し、このロボットは、人間の動きを見てデータを蓄積し上達するメカニズムを持っている。確率過程のメカニズムによって、瞬間瞬間の条件に応じて最適な確率の動作が選ばれる。リアルタイムで隠れマルコフモデルを使ってロボットと人間がコミュニケーションするメカニズムを世界で初めて実現した。

この延長線上で現在、自然言語処理と行動言語（または運動言語）の間をつなぐことに取り組んでいる。自然言語処理の方が歴史は古いが、図らずも隠れマルコフモデル（ベイジアン）が自然言語処理の標準的なツールになっていて共通に使える。すなわち、同じ枠組みで言語から運動を連想し、運動から言語を連想するという計算がマッチング良くできる。日常生活で普通の人が普通のコミュニケーションをするように、ロボットに何か頼みたいことを普通の言葉で伝えられるようになることが目標である。

### (3) ハードウェアの開発

ヒューマノイドロボットのハードウェア研究は大学では難しいし、予算の獲得も難しい。しかし、依然としてハードウェアが実用化のネックになっている。人間の行動では、身体の各部分の質量分布を反映して自然な動きをする。現在のヒューマノイドロボットは緻密に作られていて階段を上ったり走ったりも出来るが、外からの力を受け流したり、身体を変えていくことは出来ない。すなわち、外力が加わったときにそれに依って柔軟に運動を変化できるような、力に敏感なメカニズム（バックドライバビリティ）が求められている。

本研究では膝関節（バックラッシュクラッチ）、股関節（2 重球面ジョイント）および肩関節（サイバネティックショルダ）を搭載したヒューマノイドロボットを作り、膝を曲げないでも二足歩行できるロボットを作り、外力を受け流すことが出来て環境の変化に敏感に対応出来るようなものを作った。これらの関節についてはその後研究を進めていないが、最近では、股関節に自由度を与えて膝を曲げないでも歩くロボットが主流になりつつある。

外力に敏感な駆動系は、ヒューマノイドロボット開発の要点である。日本でも、外力に敏感な駆動系を作り、それを全身に持ったヒューマノイドロボットを作りたいと考えて、アクチュエータから全身の駆動機構を開発してきた。それを今でも続けている。振興調整費の IRT 研究機構は東大情報理工学系研究科の知能機械情報学専攻に拠点をおいて、トヨタ、富士通、オリンパスなど企業 7 社と連携して進めてきた。その中でヒューマノイドロボット用のアクチュエータを研究している。

#### (4) ヒューマンフィギュア

本研究で開発したビヘイビアキャプチャシステムでは、モーションキャプチャで人の全身運動を計測するとともに、床反力計で足と床との力のやりとりを計測し、さらに多数の筋電計を身体に付けて主な筋肉の活動の信号を拾うことによって、人間の動きと同時に体性感覚を計測した。そのデータを用いて複雑な構造の動きを並列計算によって高速に計算し、その



図 45 マジックミラー

結果から人間の骨、筋肉および靭帯にかかる力を求める手法を構築した。この仕事が発展して、500~1000 程度の自由度で拮抗筋も含めて全身の筋肉が運動中にどのような力を出しているかという計算を行うことができるようになった<sup>49</sup>。

(株)ナックイメージテクノロジーから 2009 年 12 月に、nMotion muscular(エヌモーションマスキュラス)というソフトウェアの製品が発売された<sup>50</sup>。モーションキャプチャのデータを使って筋肉の活動の解析をするソフトで、2 年程度掛けて最初のバージョンが完成した。この製品では 10 秒計測して、画像にするまで計算に 1 時間かかる。

これを筋肉のグループ化によって 62 自由度まで簡略化して、かつ並列計算も入れるとリアルタイムで出来るようになり、2009 年 3 月に「マジックミラー」という名前で、プレス発表<sup>51</sup>した。ビデオの映像に筋肉の活動状況の映像をリアルタイムで重ねると、例えばゴルフスイングをするときの筋肉の動きをあたかも透視するように見ることが出来る(図 45)。活動の程度を色分けして表している。リアルタイムで出来ることが受けて TV 局などで紹介された他、しばしば番組のための撮影の依頼がある。

筋肉の活動から、筋肉への指令を出している神経の活動を捉えるための神経のモデル化ができる。2009 年秋に出た博士論文のテーマは、筋肉の活動から主だった太い神経束の活動を推定することで、全身の反射のメカニズムを数学的なニューラルネットワークでモデル化するというものであった。脊髄の中で、どういう神経の結びつきがあって、どういう反射ループがあるかは調べる手段がないので分かっていないが、人の動きが全身の構造を最適に使っていると仮定して、人の動きを見てニューラルネットワークが学習する。この仕事は色々な人達から注目を浴びて、例えば東大の神経内科の先生達と共同研究で、神経性の運動疾患(パーキンソン病や小脳性の疾患など)の診断に使う研究を始めるきっかけとなった。

数学的に捉えたモデルを測定によって実証することが重要な課題であるが、それに向けて、理研(筑波)のバイオリソースセンターの人々と共同研究を始めている。

<sup>49</sup> Nakamura Y, et al., IEEE Trans. Robotics, 21, 58-66, 2005

<sup>50</sup> <http://analysis.nacinc.jp/products/soft/nMotion/>

<sup>51</sup> <http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2009/03/02/1639.html>

神経のモデルをリハビリに使うことや、FES (Functional Electrical Stimulation) <sup>52</sup>への応用について、フランス・モンペリエ大学とツールーズの LAAS 研究所と共同研究をしようとして、日本側で東大、産総研と東京農大のチームを作って連携を図ろうとしている。

### 3-4-3 研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果

#### (1) 科学・技術の進歩に貢献する成果

##### A. ロボット研究における新しい潮流

本研究は、人間の情報処理と知能の問題に構成論的に迫り、応用技術としても人間の情報処理を機能的に模擬することによって、柔軟性を持つロボットを構築することを目指した。ロボットを自律力学系の結合と捉え、これを統御することで知能情報処理に迫る方式を実現した。ロボットに運動構成要素、センサ系、力学系の特性を与えて、目的とする全体の運動パターンを生成する設計方式を確立するとともに、他者の運動パターンの認識とこれに基づく見まねができるようにした。さらに、離散的なシンボル系からアナログの運動動作を生成する方式を可能にした。この技術において統計的情報処理を媒介にしたことは、言語を通じた人間とヒューマノイドロボットのコミュニケーションへの道を開いた。

本研究とその後の発展から、ロボットのアルゴリズムと制御の考え方が人間のモデル化と行動解析に使えることが認識され、生物(マウス)や医療の研究者達とも連携ができ、それがロボット研究の新しい潮流を生みつつある。単にロボットを動かして役に立てるといふこと以上に、人間の全身を扱う学問、ヒューマノイドの知能としての言語や身体論など基礎科学的な観点から研究するさきがけとなったといえる。脳についても、本研究では非線形力学の視点からロボットの望ましい知能を実現することをテーマとしたが、開始から11年程経つ間に、逆にロボットの知能を通して人間の行動と身体を研究する人間中心の情報学というべきものになってきた。

世界的にも独、仏、スイス、イタリアなどヨーロッパでそのような研究への取り組みが広がってきている。その象徴的な例を挙げれば、中村は、2009年11月末～12月末までフランス・パリのカレッジ・ド・フランス(50名の高名な教授のみからなる学生のいない大学)の認知行動学のアラン・ベトウス(Alain Berthoz)教授に招待され、4回の公開講義を行った。内容は、メカニズムの話、記号化の話、人間の筋肉と神経の話、コミュニケーションの話。この3番目の講義はIEEEの国際会議Humanoids 2009のプレナリレクチャにもなっていた。

#### (2) 応用に向けた発展

##### A. NEDO プロジェクト「次世代ロボット実用化プロジェクト」

2004～2005年度にかけて実施されたNEDOプロジェクト「次世代ロボット実用化プロ

<sup>52</sup> 神経の機能を失った人のリハビリに電氣的刺激を使う方法

ジェクト」は、短期的視点でのロボットの実用化を目的とする実用システム化推進事業、および中長期的な視点から広い応用が可能となるようなロボットの実現に向けて日本発のオリジナル技術発掘のためのプロトタイプ開発支援事業の2つの事業からなっていた。中村の研究グループは、後者事業において、「アニマトロニック・ヒューマノイドロボットの研究開発」のテーマのもとに、本研究で開発した小型ロボット UT- $\mu$  型の 2 号機 (magnum) を用いた「格闘技ロボット」を開発し、愛知万博 (愛・地球博) のモリゾーキッコロメッセにおいて 11 日間のデモを実施した。

開発したロボットは、全高約 56 cm、総重量 7.5kg、関節数 20 である。小型ロボットでは搭載スペースの制約から設計に余裕がなく拡張性・保守性が低下することが多いが、magnum においては、電子部品を高密度に集積した制御コアユニット AnimatoCore を開発して、この問題を回避した。万博のデモでは、人間の運動をリアルタイムで計測するモーションキャプチャ、他者の行動に呼応しロボットの戦略を決定するミメティックコミュニケーションモデル、ロボットの力学系に無理のある運動指令をオンラインで修正する運動計画法という三つの技術を融合して、人間とロボットの仮想格闘デモを行った。本研究で開発した技術を集大成することによって、他者の行動認識から、自立的意志決定と実ロボットの行動へという完結したシステムを構築し、格闘の形式を通して即応性が要求される次世代のヒューマノイドの形を表現することに挑戦したものであった。

#### B.NEDO 若手研究グラント「筋骨格・神経モデルと非侵襲的な運動計測に基づく全身筋・神経情報推定装置の開発と応用」

ヒューマンフィギュアの成果は、山根克准教授 (東京大学大学院情報工学系研究科) を研究代表者とする 2005 年度の NEDO 若手グラントに引き継がれた。このプロジェクトにおいては、これまで開発してきた順・逆動力学計算法の計算精度と速度の向上を図ると共に、ヒト筋骨格モデルの精度をさらに上げて、155 自由度の骨格モデル、筋 997 本、腱 50 本、靭帯 117 本の筋-腱ネットワークとし、新たに脊髄から筋までの運動神経および体性感覚情報を脊髄にフィードバックする神経-筋ネットワークモデルを構築した。完成した神経筋骨格モデルは、世界最高の解析精度を実現するものとなった。さらに、狭い部屋で障害のある患者の運動を計測する場合でも安全に使える運動計測システムと、精度の高いパラメータ同定法を開発した。また、神経筋疾患診断支援システムやリハビリテーション支援システムを開発し、診断やリハビリテーションのための使いやすいツールを提供した<sup>53</sup>。

#### C.特許のライセンス

本研究期間中に開発された多くの技術について、9 件の日本出願 (これまでに 7 件が成立) とこれに関わる 26 件の外国出願 (10 件が成立) が行われたが、このうち 3 件がライセンスされている。

本研究終了後に、日本出願 11 件 (2 件が成立) とこれに関わる 7 件の外国出願 (1 件が

<sup>53</sup>村井昭彦他、第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿、RSJ2008AC1I3-02

成立、4 件は PCT 出願の段階) を行った。このうち、2 件の国内出願とその外国出願がライセンスされている。

### (3) 人材育成状況

本研究においてポスドクや博士課程の学生として研究を担当した多くの若い研究員が最前線の研究者に育っていることが特筆される。いくつかの例を挙げれば、力学的情報処理の分野を最初に担当したポスドクの岡田昌史は東大の准教授を経て現在は東工大の准教授、統計的情報処理を担当したポスドクの稲邑哲也は東大の講師から転出して国立情報学研究所の准教授になり、その分野で活躍している。ヒューマンフィギュアの研究で中心になっていた山根 克は本研究期間中の 2001 年に博士号を取得し、その後中村研究室の助教から准教授を経て、2009 年米国ディズニー研究所（ピッツバーグのカーネギーメロン大学内にある研究所）のシニアリサーチャおよびカーネギーメロン大学の **Adjunct Associate Professor** を兼務している。山根は 2001 年の IEEE の最優秀論文賞、および 2005 年文部大臣表彰の若手科学者賞をそれぞれ最年少で受賞している。JST 研究員として本研究に参加した黄 強は現在北京工科大学の教授として、中国のヒューマノイドのリーダーとして注目される存在であり、日本にとっては宇宙ロボットの競争相手になっている。本研究参加研究員のうち現在大学・研究所関係に所属する研究者を以下に挙げる。

#### (中村グループ)

氏 名	本研究終了時の所属	現在の所属
岡田 昌史	東大 講師	東京工業大学 大学院理工学研究科機械物理工学専攻 准教授
黄 強	JST 研究員	北京工科大学 教授
稲邑 哲也	東大 講師	国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系 准教授
関口 暁宣	弘前大 助手	首都大学東京 准教授
山根 克	東大 准教授	ディズニー研究所 シニアリサーチャ
大武 美保子	COE 特任助手	東大新領域創成研究科（柏）講師
水内 郁夫	東大 講師	東京農工大工学部 准教授
金広 文男	博士課程	産総研知能システム研究部門 研究員
岡田 慧	博士課程	東大大学院情報理工学系 特任講師
杉原 知道	博士課程	九州大高等研究院 特別准教授
栗原 一貴	博士課程	産総研情報技術研究部門 研究員
戸嶋 巖樹	博士課程	NTT コミュニケーション科学基礎研究所 主幹研究員
門根 秀樹	博士課程	カレッジ・ド・フランス 研究員

#### (浅田グループ)

高橋 泰岳	阪大 助手	福井大学大学院工学研究科 講師
光永 法明	阪大 助手	金沢工大工学部機械系 准教授

#### (土屋グループ)

辻田 勝吉	京大 助手	大阪工大工学部電気電子システム工学科 准教授
-------	-------	------------------------

青井 伸也	博士課程	京大大学院工学系 航空宇宙工学 助教
-------	------	--------------------

(荒井グループ)

比留川 博久	産総研 グループ長	産総研知能システム研究部門 部門長
横井 一仁	産総研 主任研究官	産総研知能システム研究部門 副部門長

### 3-4-4 研究成果から生み出された社会的、経済的な効果・効用および波及効果

#### (1) 医療や介護に貢献する信頼されるロボット

格闘技ロボットで実証されたように、運動パターンと記号の相互結合モデル、相互発達モデルが実現することにより、次のような効果が期待できる。すなわち、①見まねによる運動学習： 教示者と学習者の身体構造が異なっても、抽象化された記号表現を経由して運動パターンを伝えることにより、運動を学習することができる。②言葉の指示に基づく運動の獲得： ヒューマノイドロボットの運動を設計する問題やロボットに自ら運動を獲得させる問題はロボットの自由度が大きくなるに従って難しくなる。教示者が言葉の指示を加えることによって、運動パターンの獲得や設計を促進することが可能になる。

この一連の研究の延長線上に、人間とコミュニケーションができるヒューマノイドロボットがある。ヒューマノイドロボットが人間にとって理解しやすい存在となり、行動が十分予測できることへの信頼性を獲得する。さらに、ロボットの方では、人間の行動と言葉を理解して何を求められているかを察知してサービス行動ができる。そのような未来は、人間の運動と体性感覚のシンボルの世界を構築することに始まり、それをヒューマノイドロボットが理解し、さらにシンボルから自身の行動を生成するプロセスによってロボットの知性を形成していくことの中にあると考えられる。信頼されるヒューマノイドロボットは、これからの少子高齢化社会において人や社会を支えるための重要な基盤技術になる。

#### (2) スポーツ科学や医療への貢献

スポーツ科学や医療の分野において、筋骨格系のモデルを用いた運動解析が行われてきた。その主たる目的は、筋・腱張力などの情報を運動フォームの改善、リハビリ支援や診断に活用することである。このような応用のためには、全身のバランスとともに詳細な筋の伸縮に関わる情報が重要であるが、特定の部位だけを扱った人体モデルや簡略化されたモデルを用いている現状は十分とはいえない。詳細な筋骨格モデルを用いてモーションキャプチャデータから逆動力学による筋力計算を行うマジックミラーの技術は、スポーツや医療の分野で画期的なツールとなることが期待される。

### 3-5 行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明(研究代表者：銅谷 賢治)

#### 3-5-1 本研究期間中における状況

##### (1) 本研究開始の頃の状況

人間や動物の脳は、行動に対して好ましい結果が得られたときには同じ行為を繰り返し、不都合な結果が得られたときには避けるような「強化学習」の仕組みを備えている。しかも、多様かつ予期できない状況のもとで、極めて柔軟に学習して適応することができるということは、脳には単に個々の細胞や回路、領野ごとの学習だけでなく、学習の大域的なパラメータを環境と目的に適応して制御する「メタ学習」のシステムが存在することを示唆している。脳における大域的な制御機構として、脳幹から、海馬、大脳皮質、基底核、小脳などに投射する神経修飾物質系が注目されている。その代表的なものとして、中脳の黒質および腹側被蓋野のドーパミン系、青斑核のノルアドレナリン系、縫線核のセロトニン系、マイネルト核のアセチルコリン系がある。

一方、今日の人工的な学習システム（機械やプログラム）の多くは、その構造やパラメータは開発者が経験的・試行錯誤的に設定するままで、システム自身が環境に適応して学習のしかたを変化するメカニズムを与えられていないために適応範囲は限られる。

本研究の目的は、メタ学習の理論研究と神経修飾物質系の生理実験を基に、脳の大域的な学習の制御メカニズムを解明すること、その理解をより人間的なロボットやコンピュータの設計論に結びつけていくことにあった。具体的には上記主要な4つの神経修飾物質系が行動系のメタパラメータの制御に関わっているという作業仮説を提案し、それらの関係性を数理モデルと実験によって検証するために、

(a)学習系のメタパラメータ調節の理論と神経修飾物質系の機構

(b)課題や環境に適した内部表現を獲得する際の大脳皮質の機能

(c)メタ学習機構としてのコミュニケーションと進化の役割

という3つの主要テーマを掲げた。これらに取り組むために、計算理論/生理実験/脳活動計測/ロボット実験という異なるアプローチを連携・融合しながら実施した。その主な成果の概要を以下に記す。

##### (2) 計算理論

###### A. ベイズ学習理論

強化学習<sup>54</sup>は、学習エージェント（エージェント）がどのように行動するべきかの具体的な指針（教師信号）が与えられない状況で、行動の善し悪しに応じた「報酬」と「罰」を手掛かりに、将来の報酬予測（価値関数）が最大になる行動指針を選択しながら進んでゆく学習の枠組みである。本研究では機械学習の視点から、強化学習におけるメタ学習アル

---

<sup>54</sup> 現在の行動指針(方策)に従って行動し、得られた報酬から価値関数を作成すること(方策の評価)、および価値関数を最大化する方策を作成すること(方策の改良)の二つのプロセスを繰り返し行う。

ゴリズムを主としてベイズ的枠組みの上に構築することをねらいとした。

強化学習を off-policy モデル<sup>55</sup>により構築し、「逐次周辺尤度」(Sequential Marginal Likelihood)を計算することにより、環境の変化を検出して、メタパラメータと付随するパラメータの適応的学習を行うことが可能であることを示した。また、逐次モンテカルロ法が有効であることを示した。それぞれ異なる報酬期待値を持つ 15 種類の行動から、最適なものを選ぶ”Multi-armed bandit” 課題<sup>56</sup>において、500 単位時間ごとに報酬期待値がランダムに変化するという実験を行った。オンライン推定された周辺尤度の変化により、環境の変化を検知し、それに応じて学習率などのメタパラメータの再設定を行うことで、より効率の良い学習が可能になった。

さらに、並列モデル<sup>57</sup>による価値関数の経験分散最小メタ学習手法を提案し、その有効性を具体例で示した。さらに、強化学習を含む広いクラスの問題に対し、ベイズ的枠組みで定式化した。

また、ベイズ学習理論の脳科学への応用として、変分ベイズ法による脳磁気計 (MEG) からの脳内電流源推定<sup>58</sup>、および逐次モンテカルロ法<sup>59</sup> (Sequential Monte Carlo) による行動データからの学習系のパラメータ推定のアルゴリズム<sup>60</sup>を開発し、シミュレーションによりその有効性を確認した。

## B. 強化学習理論

変化する環境や、環境を部分的にしか観測できないような状況において、適切にメタパラメータの自律制御を行う強化学習の工学的アルゴリズムを開発し、不完全観測環境での制御問題、不安定系の自律制御などに適用した<sup>61</sup>。さらに、そうした強化学習法の脳内実現のモデルを構築し、行動実験やイメージング研究などの手法により検証を行い、情動情報処理における、行動系メタパラメータ制御の意義を検討した。

強化学習においてエージェントは、過去に試した行動のなかでより多くの報酬が期待できる行動を選ぶ必要に迫られる。一方では、新たな情報を得るために未経験の行動を試す必要もある。不完全観測の場合に、環境の変化をベイズ推定しながら、未来の報酬のために探索 (exploration) するか、現在見えている報酬を搾取 (exploitation) するかの選択を

---

<sup>55</sup> TD 誤差を利用して、行動指針 (Policy) とは独立に、行動価値関数の最大値で最適行動価値関数  $Q^*(s,a)$  を直接更新する ”Q-learning”

<sup>56</sup> 異なる  $K$  個のスロットマシンから 1 台のマシンを選択するという試行を繰り返し行う状況において、総合利得を最大化するようにマシンを選択する問題

<sup>57</sup> 異なる学習率をもつモデルを複数用意し、各モデルが TD 学習を行う。また各モデルは価値関数の分散の推定値を保持しており、学習過程のステップごとにこの推定値が最小であるモデルがそのときの学習率として採用される。

<sup>58</sup> Sato M, et al., NeuroImage, 23, 806-826, 2004

<sup>59</sup> 状態  $s$  において行動  $a$  をとり、以後最適な行動指針 (方策) に従って行動したときに得られる報酬の期待値、最適行動価値関数  $Q^*(s,a)$  を直接更新してゆく ”Q-learning” のこと。

<sup>60</sup> Samejima K, et al., Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), 1335-1342, 2004

<sup>61</sup> Ishii S, et al., Neural Networks, 15, 665-687 2002;  
Hirayama J, et al., Neural Networks, 17, 1391-1400, 2004

行うモデル同定型強化学習アルゴリズム、および環境の変化のベイズ推定に基づき、学習係数を自律的に制御する学習法を開発した。

また、これら強化学習アルゴリズムで必要な脳内機能の局在モデルを提案し、その一部を検証するための機能的磁気共鳴画像法（fMRI）を用いたイメージング研究を行い、前部前頭前野および内側前頭前野が不完全観測状態の推定に関わるという知見を得た。

不完全観測変数が非常に多い場合には、平均化(平均場近似)を行うことで、効率の良い推定が可能になる。この方法を用いたマルチエージェント強化学習法を開発した。また、強化学習における行動指針（方策）が確率分布をしているとして、そのパラメータを方策勾配法により決定する手法を、2足歩行運動の自律的獲得や実アクトロッド<sup>62</sup>の自律制御に応用し成功した。

また、階層並列的な学習系において、報酬とダイナミクス予測によるモジュール選択方式、重点サンプリング法により異なる自由度を持つ並列学習回路を複数学習させる方式を定式化し、非線形制御、ロボットのバッテリー捕獲課題などでその有効性を確認した<sup>63</sup>。

### (3) 神経修飾物質系モデル

脳内で強化学習が行われている、その4つの主要な大域変数が、ドーパミン、セロトニン、ノルアドレナリン、アセチルコリンという4つの主要な神経修飾物質系により表現されて、脳における学習の進め方の学習、すなわちメタ学習が行われているという仮説を、Neural Networks 誌の特集

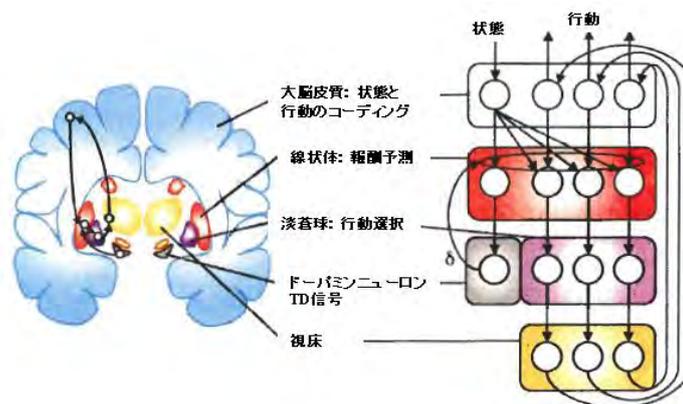


図 46 神経修飾物質の投射と強化学習のモデル

号, "Computational Models of Neuromodulation" のキーノートの論文として発表した(図46)<sup>64</sup>。神経修飾物質は神経伝達物質の一種であるが、単一のニューロンが大域的、継続的な情報を伝達する働きをもち、また受容するニューロンへの効果も単純な興奮や抑制でなく複雑で不明な部分が多い。グルタミン酸や GABA などの神経伝達物質が、感覚や運動などの個別的、即時的な情報を伝達するのと対照的である。上記仮説においては、これまで多くのグループによって蓄積された実験結果から神経修飾物質系の特徴を抽出して、強化学習に現れる3つの主要なメタパラメータ ( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ) と学習信号 ( $\delta$ ) の特徴と対応づけた。すなわち、

<sup>62</sup> 受動関節を有する2リンクマニピュレータで、アクチュエータの数が自由度より少ないため非ホロノミック系に属する。

<sup>63</sup> Uchibe E and Doya K, The 8<sup>th</sup> Int. Conf. Simulation of Adaptive Behavior (SAB), 278-296, 2004, (best paper award)

<sup>64</sup> Doya K, "Metalearning and neuromodulation", Neural Networks, 15, 495-506, 2002

①ドーパミン系は報酬予測の誤差  $\delta$  を表現する。サル報酬予測とドーパミン細胞の活動についての一連の実験と、強化学習において価値関数の学習の信号として使われる TD 誤差信号 (Temporal Difference, 報酬予測と結果の誤差)  $\delta$  との類似性から対応づけられた。

②セロトニン系は将来の報酬割引率  $\gamma$  を制御する。 $\gamma$  は、各時間ステップでの状態や行動の結果得られる報酬の期待値を求める際に、将来得られる見込みの報酬は割り引いて評価するための割引率であり、どの程度の未来まで考慮して行動するかに関わる。神経修飾物質としてのセロトニンの働きについては、すぐに得られる小さな報酬と、遅れを伴うが大きな報酬のどちらを選ぶかという課題において、セロトニン系の障害が目先の報酬の選択につながることを動物実験によって指摘されている。本研究ではセロトニンの機能について集中的な研究を行った。

③ノルアドレナリン系は動作選択の逆温度  $\beta$  を制御する。 $\beta$  は行動価値関数を基に行動探索をする際に、行動価値関数の高い (エネルギーの低い) ほど高い確率で選ばれるようにするための、熱力学のボルツマン分布における  $1/kT$  に相当するパラメータで逆温度と呼ばれるものである。動物実験では、ノルアドレナリン系がストレスの高い状態では高く、リラックスした状態では低いことが知られていることから、緊急事態では現時点で考えられるベストの選択を行い、通常は行動にランダムさを持たせるという探索の制御に対応づけた。

④アセチルコリン系は学習速度係数  $\alpha$  を制御する。 $\alpha$  は学習速度を設定するパラメータであるが、素早くかつ正確な学習のためには適切な設定が重要である。アセチルコリン系は、海馬および大脳皮質の細胞で、シナプス可塑性の効率に影響を与えることから対応づけられた。

さらに、以上のアイデアの具体化として、メタパラメータの設定を高次レベルの行動として捉えた階層強化学習モデルを定式化し、変化する環境への適応の可能性と、その脳内メカニズムとしての可能性を示した<sup>65</sup>。

#### (4) ロボット実験

動物や人にとって、食物や水、痛み、性行動など様々な報酬系は、自己保存と自己複製という生物の基本的な要請を満たすように進化してきたと考えられる。そこで、報酬系の設計原理を探るために、自己保存と自己複製という生物と同じ要請をもつネズミ型ロボット群「サイバーローデント」(図 47)を開発し、学習と進化実験を行った。サイバーローデントは「エサ」となるバッテリーパックを捕獲し自己充電することによる自己保存と、「遺伝子」となる学習プログラムやパラメータを赤外通信により他の個体にコピーするソフト的な自己複製を行うことができる。

<sup>65</sup> Schweighofer N and Doya K, Neural Networks, 16 5-9, 2003

まず、バッテリーパックの捕獲や、他個体との交配などの基本行動の学習と進化の実験を行った。次に学習速度や行動選択の逆温度などのメタパラメータを進化させることにより、世代を追って学習機構が環境に応じて最適化されることを確認した。さらに、各個体が捕食行動と交配行動をバッテリーの充電レベルに応じて選択するという条件の下で、これら基本的要請に関わる報酬関数やパラメータを進化させていく、自律適応的なロボット集団を実現することに成功した。

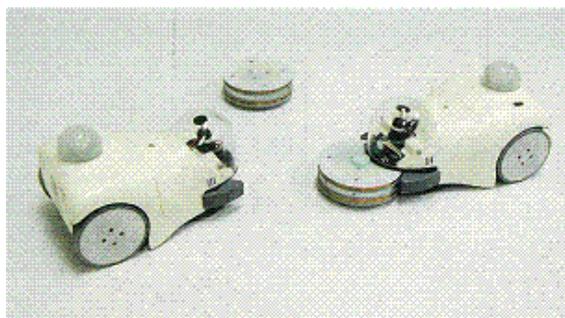


図 47 サイバーローデントとバッテリーパック

## (5) 大脳皮質の適応的状態表現

### A. 前頭前野の神経活動

脳における強化学習の基礎になると考えられる、環境の変化に応じた行動指針の切り替えに関わる前頭前皮質ニューロン機構に焦点を当て、主にサル前頭前皮質における単一ニューロン活動記録法により研究を進めた。

報酬獲得時に見られる神経活動が、直前の行動とその種類に依存して活動を変えることを見出した。行動指針の切り替えのためには、行動の結果、報酬を得られたかどうかが必要な情報となる。この報酬獲得と行為の統合は行動の評価に関わると考えられる。

報酬期待が、行動決定に使用されるワーキングメモリのニューロン活動を増強することを見出した。以前から、ワーキングメモリ過程と報酬期待の関わりは示唆されてきたが、行動を導くために用いられる感覚情報の保持過程に、報酬期待が特に関与することを見出した。このことから、前頭前皮質は報酬期待に基づいた行動指令の生成過程に関与することが示唆された。

報酬獲得時から次の試行の開始にかけての神経活動が、行動指針の切り替えに依存して変化することを見出した。このことから、前頭前皮質は変化する環境に応じて行動指針を変換し保持する過程に関わると考えられる。以上の一連の研究から、前頭前皮質は自身の行動の結果を評価し、その評価に基づいて行動や行動指針を生成する過程に関与すると考えられる<sup>66</sup>。

### B. 目的指向的内部表現の獲得

追跡眼球運動の行動心理実験により、ヒトは視標の運動を等速直線運動に限らず予測できることを明らかにし、さらに脳活動計測により、MST 野が視標の運動の予測に関与することを示した。

<sup>66</sup> Tsujimoto S and Sawaguchi T, Cerebral Cortex, 14, 47-55, 2004

## (6) セロトニンと短期／長期の報酬予測

人間の学習、情動などの高次脳機能のメタ学習制御に関与する神経修飾物質系のうち、特にセロトニン系が、今すぐ得られる報酬を重視するか、長期的に物事を評価するかという時間スケールの評価基準を決めるという仮説の検証に焦点を当て実験的に検討した。

健常者およびうつ病患者を対象に、将来の報酬予測に基づく意志決定課題や Go-NoGo 課題遂行中の機能的核磁気共鳴画像法 (fMRI) 測定によって、将来の報酬予測および反応抑制に関する脳機能を調べた。健常者において、将来の報酬予測は右前頭前野 (右背外側前頭前野・右腹外側前頭前野)・帯状回前部・右前頂葉・視床・基底核 (淡蒼球)・左小脳を含むネットワークと関連していること、および反応抑制は右前頭前野・右頭頂葉と関連していることが明らかになった。一方で、うつ病患者では、これらの機能に関連した脳領域の活動が低下していることが明らかになった。

健常者を対象とする以下の実験によって、脳の中に異なった時間スケールで報酬予測を行うメカニズムの存在を見出した。短期の報酬予測と長期の報酬予測が共に必要な「損して得取れ」行動学習課題を開発し<sup>67</sup>、課題を遂行中の脳活動を fMRI によって測定した。通常のブロック比較の解析手法により、長期の報酬予測時には、頭頂葉、前頭前野、運動前野、線条体、小脳外側部、および脳幹のセロトニン中枢である縫線核の活動が高まっていることが明らかになった。さらに、強化学習モデルを用いた解析により、前頭葉腹内側部、島皮質、線条体で、それぞれ腹側部はより短期の、背側部はより長期の報酬予測に関与することを明らかにした<sup>68</sup>。

また、セロトニンの行動決定における役割を解明するために、セロトニンの前駆物質であるトリプトファンの摂取量を調節して脳内セロトニン活性を変化させ、それによる行動と脳活動の変化との関連を調べた。心理尺度である POMS (Profile of Mood States) に関しては、トリプトファン欠乏条件は過剰条件と比べて、POMS の下位項目のうち倦怠感の得点が有意に高かった。このことから、中枢神経系セロトニン変化は気分に影響を与えていると考えられた。

さらに、トリプトファン摂取量が時間スケールの異なる報酬予測にどのように影響するかを調べるために、将来の報酬予測に基づく意志決定課題中の脳活動を fMRI によって計測した。コントロール条件では、線条体の腹側部から背側部方向に将来の報酬割引率の大きさが傾斜していて、腹側部では割引率が大きく背側部では割引率は小さく、それぞれ短期と長期の報酬予測に関与している。このような線条体における時間スケールの異なる報酬予測に関与する並列的な神経回路は、セロトニン系中枢から異なったやりかたで制御されることを見出した。すなわち、トリプトファン欠乏条件においては、縫線核、手綱核の活動上昇が見られた。また、被験者の報酬予測を異なる時間スケールで推定し、それと相関

<sup>67</sup> 被験者は提示された図形に対して 2 つのボタンの一つを押す。その選択により、そのステップでの報酬額だけでなく、次にどの図形が提示されるかが決定される。

<sup>68</sup> Tanaka S, et al., Nature Neuroscience, 7, 887-893, 2004

する脳活動部位を調べた結果、線条体腹側部では、短い時間スケールでの報酬予測の活動がトリプトファン欠乏時に亢進し、線条体背側部では長い時間スケールでの報酬予測の活動がトリプトファン過剰時に亢進していることが明らかになった<sup>69</sup>。

### 3-5-2 本研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

#### (1) 本研究終了後の研究の状況

2004年に銅谷は国際電気通信基礎技術研究所（ATR）脳情報研究所から出向し、新設された沖縄科学技術研究基盤整備機構（OIST）大学院大学先行研究プロジェクトの神経計算ユニット代表研究者の職に就いた。5年間のレビューを経て2期目に入ったが、予算は明示的でなく必要に応じて理事長と交渉する仕組みになっている。外部の競争資金にも積極的に応募している。科研費特定領域「統合脳」と理研「次世代生命体統合シミュレーション」では分担メンバーになっている。OISTでは何もない状態から6人のメンバーでスタートして動物実験施設を立ち上げ、ラット脳内のセロトニン濃度の化学計測やセロトニンニューロンの発火を電極で記録する実験を新しく始めた。メンバーは総勢15名を擁するまでになった。本研究の研究体制と同じように、理論チーム（4人）、生物実験チーム（6人）、およびロボット研究チーム（5人）の3つのグループで構成している。ロボット集団（サイバーローデント）とラットを対象とする強化学習の実験とモデル解析に取り組んでいる。

#### (2) 理論研究

本研究の理論研究ではメタ学習のパラメータをどう最適化するかという命題で研究したが、道半ばである。いくつかのアルゴリズムを作ったが決定版には至らず、OISTではそれを継続テーマとして取り組んでいる。ベイズ推定やサンプリング手法など、本研究期間中に得たアイデアを展開している。近年、細胞内の分子カスケードや遺伝子ネットワークなど生化学反応系における大規模な計算機シミュレーションモデルが多数提案されているが、そのパラメータ推定にベイズ推定の枠組みを使うことを提案して開発したプログラム LetItB (Let It found by Bayes)<sup>70</sup>を公開した。生化学反応経路のブロック図の作成、シミュレーションの実行、および与えられた実験データを最も良く再現できる反応パラメータの推定とモデルの妥当性の定量的な評価などを行うことができる。

#### (3) ロボットにおけるメタ学習アルゴリズム

サイバーローデントの集団を対象にして、自己保存と自己複製の仕組みに必要なメカニズムを探索し、生物の報酬系・情動系の起源を探る研究をOISTでも継続している。マルチエージェント系の強化学習から生まれた概念である、単一の身体内の複数の学習エージェントによる効率よい学習法、Cooperative-Competitive-Concurrent Learning with

<sup>69</sup> SC.Tanaka SC, et al., PloS One, e1333, 2007

<sup>70</sup> <http://www.nc.irp.oist.jp/software/>

Importance Sampling (CLIS) は Simulation of Adaptive Behavior (SAB) 2004 国際会議において Best Philosophical Paper Award を受賞した<sup>71</sup>。

#### (4) セロトニン系の働きの検証

新しく立ち上げた動物実験施設でのラットの実験から新たな成果が得られている。セロトニン神経の起始核である背側縫線核に微量透析プローブを刺入し、エサ場と水場を往復する行動中のドーパミンとセロトニンの濃度を測定した。その結果、エサ場の穴に頭を入れてからエサが得られるまでに何秒か待たねばならないという状況では、脳内のセロトニン濃度が上昇していることが明らかになった。一方、エサ場にたどり着いても3回に1回しかエサが出て来ないという状況では、ドーパミン濃度は減少したがセロトニン濃度には変化がなかった。

また、背側縫線核に電極を刺入し、同じ行動を実行中のセロトニン神経細胞の活動を記録した。その結果セロトニンニューロンは、エサ場にたどり着いてからエサが与えられるまでの待ち時間中に発火を高めていることが明らかになった。さらに、ラットがエサを待ち切れずに諦めてしまった試行では、セロトニン神経細胞の発火がまず低下し、その数百ミリ秒後にラットはエサ場から抜け出すことが明らかになった。

これらの結果は、セロトニンがどれだけ先の報酬まで評価に入れて行動するか、いわば辛抱強さの制御に関わっているという仮説を支持するものである。また、ドーパミンが報酬の予測を表すのに対しセロトニンは罰の予測を表すという Dayan 達の主張に対して、この結果は良い反証になった。

### 3-5-3 研究成果から生み出された科学技術的な効果・効用および波及効果

#### (1) 科学・技術の進歩に貢献する成果

##### A. 神経修飾物質と強化学習のメタパラメータの関係性についての作業仮説

2002年 Neural Networks において提案した作業仮説は、これまでのいくつかのグループによって蓄積された実験結果から神経修飾物質の特徴を抽出して、強化学習に現れるメタパラメータの特徴と対応づけたものである。本研究は、このうちセロトニンの働きと強化学習との関係についての検証に集中して、仮説が正しいことを示した。またこの仮説の検証のための脳活動計測実験のために、異なるタスクのもとでの脳活動の比較による定性的な解釈だけでなく、強化学習の数理モデルに基づくデータ解析によって特定の計算機構を担う脳部位を探り出すという新たなパラダイムを打ち立てた。この数理モデルによる脳機構の解析手法は、その後京都府立医大の木村実教授のグループとの共同研究によるサル脳ニューロンの解析にも発展した。

ロボットで見つけた課題に対して仮説を立てて実験し、モデルを立てて脳信号の解析を

<sup>71</sup>Uchibe E and Doya K, 8th Int.l Conf. Simulation of Adaptive Behavior, 287-296, 2004  
Doya K and Uchibe E, Adaptive Behavior, 13, 149-160, 2005

行うという解析手法は本研究でパイオニア的に打ち出した新しいパラダイムであった。行動と報酬体験から新しい行動を獲得するという強化学習の機構を数理モデルによって表し、fMRI や神経活動の解析に使うというモデルベースの研究の枠組みは、今や世界的に行われるようになった。以前は条件の違うタスクで有意差があるかどうかを調べる手法が主流であったが、モデルベースの手法では、実験タスクをこなす間に報酬が時間に依存してどのように変化するかまでを予測でき、それに相関する脳活動や細胞を探す。この手法によって実験データをより有効に使うことが出来るようになった。

銅谷は 2007 年 *J. Neuroscience* 誌<sup>72</sup>および、2008 年 *Nature Neuroscience* 誌<sup>73</sup>の総説において、最新の多くの実験データに基づいて、強化学習理論の計算論的観点から意志決定に影響する要因を選び出し、神経修飾物質との関わりについて述べている。

## B. ロボットにおけるメタ学習アルゴリズムと脳科学のツールとしてのロボット研究

自己保存と自己複製という生物と同じ要請を持つロボット、サイバーローダントの集団で強化学習の機構を進化させるという発想は非常に前衛的なものであり、まだそれに追隨する研究は少ない。

個々のロボットは報酬を手掛かりに自律的に行動を学習する。さらに、集団の中の各ロボットはそれぞれの遺伝子（学習プログラム）によって異なる報酬系を持つ。電池に対する報酬、他のロボットと交配行動をする報酬、電池や他のロボットを視野に捉えたことに対する報酬など、これらをバランス良く持っているものほど高い確率で生存し、自分の遺伝子を複製できる。集団の中の競合（生存競争）の結果として、その環境に適した報酬系を持った個体が増えていく。すなわち、人が全部決めなくてもロボット自身が獲得していく。ロボット自身が集団内での進化の過程で環境に応じた学習のメカニズム（報酬関数と評価の時間スケールなどのメタパラメータ）を獲得できることが実証できた。

具体的な問題に強化学習を適用する際に重要な問題は、適切な状態表現と学習アルゴリズムの組み合わせを選ぶことであるが、従来は試行錯誤的に決める意外になく手間の掛かるプロセスであった。マルチエージェント系では、複数の学習プログラムがそれぞれ学習を進め、環境に適合する優れたものが優勢になる。人間の手でチューニングするプロセスの代わりに、系自身が最適化してくれる。個別のロボットについても、環境に応じてパラメータを最適化するところはネックになっている。しなやかなロボットが自己を守りながらも集団として進化・最適化していく可能性が本研究から開けた。ロボット研究は強化学習に限っても多いが、その上のレベルの生存や繁殖を基に評価学習を使っていく手法は本研究から生まれたものである。

マルチエージェント系は脳の並列情報処理機構と似ている。脳自体をマルチエージェント系と捉える視点もまた本研究の中で生まれたものである。一つの個体が状態表現と学習

---

<sup>72</sup> Corrado G and Doya K, *J. Neuroscience*, 27(31) 8178-8180, 2007

<sup>73</sup> Doya K, *Nature Neuroscience*, 11 410-416, 2008

アルゴリズムの異なる複数の学習モジュールを持ち、その中で実際には行動出力に携わらなかったモジュールも、選択されたモジュールの行動とその結果を観測しながら、同じ行動を自分が取る確率が高ければ大きな重みを、確率が低ければ小さな重みを付けて学習する”Importance Sampling”<sup>74</sup>を用いて、学習モジュール同士が互いの行動を参考にしながら同時並列的に学習し、与えられた状況に最も良く適応したモジュールが制御を担うという概念は Cooperative-Competitive-Concurrent Learning with Importance Sampling (CLIS) と名付けられた。

### C. 神経修飾物質の働きの検証

ドーパミンが報酬予測に関わるというシュルツらの実験結果に刺激を受けて、銅谷は 4 種の神経修飾物質の学習モデルにおける具体的な働きについての仮説を提案した (Doya K, *Neural Networks*, 2002)。本研究ではそのうちセロトニン系が、短期に得られる報酬を重視するか、長期的に物事を評価するかという時間スケールの評価基準を決めるという仮説の検証に焦点をあてた。本研究の開始以前に大脳基底核が強化学習に関与する可能性が言及されたことはあるが、実際に課題実施中のヒトの fMRI 測定や、サルやラットの大脳基底核の電気生理学的測定を行い、脳の活動を強化学習モデルによって直接解析したのは本研究が最初であった。ヒトではセロトニン前駆物質であるトリプトファンの摂取量のちがいが、またラットでは課題実施中の脳の微量透析法によって直接セロトニンとドーパミンレベルの測定も行って脳の活動との対応関係を調べた。これらの研究の結果は、脳の強化学習では線条体の神経細胞が行動の善し悪しを評価する重要な役割を担うことが明らかになり、またセロトニンがどれだけ先の報酬まで評価にいれるか、いわば辛抱強さの制御に関わっているという仮説を支持するものであった。

神経修飾物質とメタパラメータの関係性について提案したことを、他の研究グループが同じ手法を使って検証した例もある。スイスのグループの論文<sup>75</sup>において、ノルアドレナリンのレベルが高いときは探索を絞り込み、低いときは探索を広く行うという違いが出るという結果が報告された。ノルアドレナリンは探索だけでなく報酬評価の時間スケールにも影響するという結果なので必ずしも一対一の対応ではないが、大筋としては提案した仮説は間違っていないと考えられる。

### D. 研究分野の拡大 (意志決定の機構と神経経済学)

本研究の研究チームが 2004 年に *Nature Neuroscience* の論文を出した時期に符合して、神経経済学 (ニューロエコノミクス) や、報酬と意志決定 (Decision Making) の機構などの研究が盛んになった。人の意志決定やニューロエコノミクスなどに興味を持つ研究者の世界的なネットワークが出来て、定期的にワークショップが開かれる。銅谷はそのコアメ

<sup>74</sup> 自然に考えられる本来の確率分布にしたがってサンプリングするのではなく、重要と考えられる領域により大きな重みを置いてサンプルをとる方法

<sup>75</sup> Luksys G, et al., *Nature Neuroscience*, 12, 1180-1186, 2009

ンバーの一人であり、2006年UCLA、2008年沖縄、2010年イスラエルでのワークショップではオーガナイザーの一人であった。これらのワークショップで特徴的なことは、ほとんどの講演が実験のみ、理論のみに偏することなく、実験による理論の検証、あるいは実験から新たな理論を提示する、または従来の理論を拡張し脳活動との対応を調べるというスタイルの研究であったことである。銅谷はその中で、強化学習を実行中のラットの脳の活動を直接電極で測定して、行動価値関数の推定と行動決定について行った理論解析に関する講演を行った<sup>76</sup>。

神経経済学は神経科学と実験経済学が融合してできた新しい研究分野であるが、脳が社会的、経済的な環境に置かれたときに行う意志決定のメカニズムを研究する。これまで認知神経科学で研究されてきた報酬と意志決定のメカニズムの研究と違って「他者との駆け引きを通じて報酬を得る」という要素が入るので、設定された報酬を最大限得るという合理的な意志決定モデルが必ずしも当てはまらない。投機的な経済現象が世界を揺るがしているが、その背後にある脳のメカニズムに迫ることは極めて現代的な問題であるといえる。本研究の研究手法はこのような複数のエージェント間の相互作用を通じた学習と行動を考察する問題へのアプローチにもなる。

#### E. ベイズ推定に基づく計算神経科学

脳の働きをベイズ推定の視点から理解しようという立場は、近年非常に注目を集めている。短期的には隠れ変数の推定、長期的には確率モデルの学習、という立場から大脳皮質のダイナミクスと学習の機構に迫る研究は計算神経科学の中で現在最も勢いのある分野になっている。本研究では、脳の働きを強化学習モデルにフィッティングさせるのにベイズ推定を初めて使ったが、その後関連のワークショップを開いて手法の普及に重要な役割を果たした<sup>77</sup>。

#### (2) 人材育成状況

本研究は国際的に活躍できる人材の育成に貢献した。銅谷グループにいた田中沙織はCALTECを経て、大阪大学社会経済研究所特任准教授になった。石井グループの大学院生から澤口グループのポスドクになった雨森賢一はMITで研究員をしている。石井グループで研究員をしていた吉田和子はロンドンで活躍している。関野グループの出身である伊藤真はOISTの研究室において、ラットの実験の中心者として活躍している。銅谷自身も国際会議やシンポジウムへの招待やレビューの執筆依頼（脳と強化学習についてのレビューHFSP Journal 2007, Nature Neuroscience 2008など）が増えた。

---

<sup>76</sup> "Action Values and Action Selection in the Cortico-Basal Ganglia Loop", Reward and Decision making in corticobasal ganglia networks, Annals of the New York Academy of Science, 2006

<sup>77</sup> Bayesian Brain, 2007年 MIT Press

### 3-5-4 研究成果から生み出された社会的、経済的な効果・効用および波及効果

#### (1) 社会的、経済的な効果・効用につながる芽

##### A. マルチエージェント強化学習

本研究の成果によって、ロボットの集団のなかで学習の仕方が自律的に進化することが、夢物語ではなく現実に可能なことが実証された。この知見は、今後知能を持つロボットが社会の基盤技術になることを考えれば、社会的な効果が期待できる。いまは赤外線でお互いに通信して進化するが、インターネットで学習結果を交換すれば離れたロボット間での進化が可能になる。そのときには、ネットワークロボットの進化を支える標準プロトコルが求められる。さらに、いまソフトウェアのアップデートはサポートセンターに皆がアクセスしてダウンロードするのだが、横方向で通信し合っただんだん賢くなっていくということがあります。そこでは、適応度の評価をいかにごまかしなく行うか、ウイルスの伝搬をいかに防ぐかなどセキュリティ問題を考慮した上で、分散的に進化するプログラムが求められてくる。

##### B. 学習系の障害の視点からの精神疾患

精神疾患を学習系の暴走として捉えるという視点は本研究からしだいに広まり、うつ病や薬物依存に関していくつかのモデルが提案されている。銅谷は *Neural Networks* 誌の特集号“*Neural models of brain disorders*”のエディタもつとめており、今後の研究の広がりが期待されている。

## 3-6 詳細調査の概要とまとめ

### 3-6-1 詳細調査の概要

本章では本研究領域の課題の中から 5 件を抽出して詳細調査を行った結果について記載した。以下にその概要を記す。

#### (1) 脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装（研究代表者：合原 一幸）

本研究は、2002 年度からの ERATO「合原複雑数理モデルプロジェクト」に繋がり、大きく発展した。カオスの理論研究では、カオスニューロンのネットワークによって、人間の行う連想に似た動的連想記憶を実現した。この成果から組み合わせ最適化問題へのカオス応用の道が開けた。近似解法をカオスニューラルネットワークの上で行う新しい手法を提案し、既存の方法よりも誤差の小さい良好な解に高速で到達できることが実証され、実際に様々な大規模問題に適用されようとしている。遺伝子・タンパク質ネットワークの時空間ダイナミクス理論は、ゲノム科学の理論において世界をリードする重要な存在になっている。また、複雑な時系列データからカオスの特性を定量的に抽出する手法を開発して、ニューロンのスパイク間隔の時系列解析に適用した。経済現象の解析など広範な問題への応用がなされようとしている。

カオス理論と実装研究との緊密な連携によって、カオスニューロンを基本素子とする LSI を開発して、拡張性、汎用性および再構成可能性を備える階層的なアナログコンピュータシステムを構築した。複雑系の原理に基づいて計算する新世代のアナログコンピュータは、デジタルコンピュータの苦手分野を担い、さらにその限界を破る役割を果たして、今後の高度情報化社会を支える新たな技術基盤になることが期待される。基礎科学の上にも大きな成果を生んだ。STDP (Spike Timing Dependent Plasticity) 学習則の実験結果を解析して導いた理論式は、学習するチップとしてハードウェア化された。このような理論研究と実装研究の連携は、複雑系研究における構成論的研究の新しいスタイルの例となった。

合原は 2009 年度の「最先端研究開発支援プログラム」に採択された。その中で、脳研究から生まれた複雑系モデル学を広く社会と産業の複雑な問題にも適用し戦略的要所を握れる学問に育てようとしている。複雑系研究の意義が今後ますます大きくなると思われる。

#### (2) 脳型情報処理システムのための視覚情報処理プロセッサの開発（研究代表者：小柳 光正）

本研究を契機に始まった 3D-LSI 技術のバイオ応用の研究は、医学部との共同研究により二つの分野で継続されている。一つは、BMI と脳深部解析のためのシリコン製プローブで、シリコン製の両面電極と 3D デバイスを組み合わせ、脳の機能の測定、刺激の付加、および薬品の注入の機能を併せ持つもので、完成すれば世界初の画期的なものになる。他の一つは、失明者の視覚再生のための眼球内への埋め込み用人工網膜チップである。顔の認識が

できる 1000 画素と画像処理、眼球自身の動きによるサッカード機能、および電波による電力供給の機能を盛り込んで 2mm 角の大きさの 3D チップで実現する開発を行っている。

小柳の 3D-LSI 技術の基本は、縦方向の貫通配線 (TSV) を作り付けた加工済みの 2D-LSI を位置合わせして貼り合わせ、3 次元構造を構成していく技術である。並列処理と相性が良く力ずくの微細化に頼らなくても高性能化ができることと、配線長が短縮できるので高速化と省エネルギー化に有利である。さらに、新たに考案されたウェーハ同士の位置合わせを自己組織的に行う「スーパーチップ」の技術によれば、良品のチップのみを選んで、多数のチップを一度にかつ瞬時に精度良く位置合わせできる。これら一連の技術によって、スループットと歩留まりの両方に優れる 3D-LSI 製造技術の基礎が出来上がった。大きさ、材料、機能の異なるウェーハを重ねて 3D-LSI とすることができるので、インテグレーションに従来の技術にない強みを発揮する。LSI 技術の壁を打ち破るものとして、世界の半導体メーカーが開発にしのぎを削る動きになっている。また、デバイス関連の主要な国際学会では 3D-LSI が最もホットな話題になっている。

小柳自身は本研究終了後、2つの CREST 研究、科研費と NEDO プロジェクトを実施する中で、多くの世界初となる 3D-LSI を作り出した。日本では本研究期間中から、関連の NEDO プロジェクトが実施されていて、主要な電子産業企業が委託先に名を連ねている。その中で、小柳自身が取締役 CTO をつとめる 3D-LSI 製品の開発・製造を行うベンチャー会社、ザイキューブが 2002 年に誕生して注目されている。

### (3) 言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築 (研究代表者: 酒井 邦嘉)

母国語としての英語または日本語の文法判断を担う脳の部位 (文法中枢) がブローカ野に局在することを見出したことは本研究期間中の大きな成果となり、酒井はこれによって言語学の上に脳科学を築く言語脳科学という新しい分野を拓くことになった。

引き続き第二の CREST 研究では、日本語を母国語とする脳に第二言語としての英語が入ってくるときの文法処理に働く部位と、学習の深まりによってそれがどのような変化を受けるかを調べた。その結果、第二言語の文法判断も母語のそれと同じブローカ野で行われること、および学習の初期 (中学生) には英語の上達とともに文法中枢の活動が高まる変化を見せるが、大学生では逆に熟達度の高い者ほど活動が節約されるという、長期にわたる英語習得の過程が文法中枢のダイナミクスとして現れることを見出した。

さらに、文法知識や文章理解、単語やアクセントの正誤を問う課題を解いているときの脳活動を調べることにより、従来言語野といわれてきた領域が詳細には機能別に分かれていて、前頭葉には文法中枢と文章理解の中枢、側頭葉から頭頂葉にかけては単語レベルの言語処理に必要な単語と音韻の中枢があることを見出した。言語中枢の詳細な地図は、言語教育の方法論の上で、またその客観的な評価の方法に対して重要な手掛かりになる。

文法中枢に腫瘍が掛かっている患者に対して、絵と文を用いる文法判断課題を行って失文法との相関を明らかにした。これによって 19 世紀以来の失文法の原因についての議論に

明快な回答が与えられた。また、臨床的にも役立つ正確な診断方法を確立したことになる。

#### (4) 自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発（研究代表者：中村 仁彦）

従来のヒューマノイドロボットの運動決定機構では、決められた運動はできるが、運動を自由に合成して多様な運動を行うことはできなかった。本研究では、ロボットを自律力学系の結合と捉え、これを統御することで知能情報処理に迫る画期的な方式を実現した。ロボットに運動構成要素、センサ系、力学系の特性を与えて、目的とする全体の運動パターンを生成する設計方法を確立するとともに、他者の運動パターンの認識とこれに基づく見まねができるようにした。これはミラーニューロンの仮説をヒントにして生まれた技術である。この技術において、隠れマルコフモデルを媒介にしたことは同じ技術基盤に立つ自然言語処理と相性が良く、図らずも言語を通じた人間とヒューマノイドロボットのコミュニケーションへの道が開かれた。

2005年の愛知万博において、ロボットと人間が身体の動きを通してのコミュニケーションができることを実証する実験をNEDOプロジェクトの一環として行った。本研究で開発した小型ロボットを改造し、人間とロボットが互いに対抗技を繰り出す格闘技を300ms遅れのリアルタイムで実現して見せることに成功した。

ビヘイビアキャプチャシステムにおいて人間の身体の動き、床反力および体性感覚を同時計測し、そのデータから筋骨格の各部にかかる力を高速に計算する技術を開発した。その技術に用いる順・逆動力学計算の精度と速度を向上させるとともに、筋骨格モデルの精度をさらに高め、新たに脊髄から筋までの運動神経および体性感覚情報を脊髄にフィードバックする神経・筋ネットワークモデルを世界最高の精度で構築した。神経筋疾患の診断やリハビリテーション支援システムとしての臨床応用に使われようとしている。逆に、筋骨格モデルの自由度を下げ簡略化し、さらに計算の高速化を図ることによりリアルタイムで筋肉の活動状況をビデオの画像に重ねることができるようになった。マジックミラーと命名されて、スポーツ科学や医療への応用が期待されている。

#### (5) 行動系のメタ学習と情動コミュニケーション機構の解明（研究代表者：銅谷 賢治）

人や動物では強化学習が行われていて、その4つの主要な大域変数（学習速度係数 $\alpha$ 、動作選択の逆温度 $\beta$ 、将来の報酬の割引率 $\gamma$ 、報酬予測の誤差 $\delta$ ）がアセチルコリン、ノルアドレナリン、セロトニン、ドーパミンという4つの神経修飾物質によって表現されるとする仮説を2002年に発表した。この提案を具体化するものとして、メタパラメータの設定を高次レベルの行動として捉えた階層的強化学習モデルを定式化し、変化する環境への適応の可能性と、その脳内メカニズムとしての可能性を示した。

人間や動物の高次脳機能のメタ学習制御に関与する神経修飾物質のうち、特にセロトニン系が、今すぐ得られる報酬を重視するか、長期的に物事を評価するかの時間スケールの評価基準を決めるという仮説の検証に焦点を当てた。人を対象にしたfMRI計測では、大脳

基底核の線条体の異なった部位が時間スケールの違う報酬予測に関与することを特定するとともに、これがセロトニンによって制御されていることを明らかにした。ラットを対象にする生理実験でも、報酬が与えられるのを予測しながら待っているという状況では、セロトニンを送る神経細胞の活動が高まり、脳内のセロトニン濃度が上昇していることが明らかになった。

人間や動物の感じる報酬は突き詰めれば自己保存と自己複製という基本的な要請から発する。それと同じ要請を持つネズミ型ロボット、サイバーローデントの集団による強化学習実験では、集団の中の競合の結果として、その環境に適した報酬系を持つ個体が増えていく。すなわち、ロボット自身が集団内の進化の過程で環境に応じた学習のメカニズムを獲得して行くことを実証した。マルチエージェント系による強化学習の枠組みは、通常の方法では実用的な時間内に解が得られないような複雑な問題の解法として役立つと期待される。これから脳自体をマルチエージェント系と捉える視点と、一つの個体が状態表現と学習アルゴリズムの異なる複数の学習モジュールを持ち、学習モジュールが互いに切磋琢磨しながら学習するという概念が生まれ **Cooperative- Competitive- Concurrent Learning with Importance Sampling (CLIS)** と名付けられた。

### 3-6-2 まとめ

「脳の世紀」という大きな構想の下に始まった日本の脳科学への取り組みは、それまで個別に行われていた生命科学の諸分野と情報科学を大きく融合する学際的研究を意図していた。CRESTの脳の3領域はそのさきがけであり、中でも、「脳を創る」研究領域は、脳の情報処理に学んで、脳科学と情報科学技術を融合した新しい脳の学問領域を拓き、脳型情報処理システムを構築することを領域のねらいとしたこと、また理論の構築を重視したことで、本研究領域が「脳の世紀」への日本の取り組みの象徴的な存在であったと考えられる。詳細調査の結果、それぞれのプロジェクトが独創的な視点で情報処理装置としての脳に取り組んだ姿が浮かび上がった。これらの研究を通して、脳科学と情報処理を結ぶ本分野が基礎科学と応用の両方において持つ意義と可能性、そして日本の持つ人的ポテンシャルが明らかになったと思われる。

脳は人間の本質を握る存在であり、人類がやっと取り組み始めた最大の難問である。短兵急にことを運んでも大きな果実は得られるはずはなく、腰を据えて長期戦略的に行う必要がある。本格的な「脳の世紀」の流れの中で、日本が大きく貢献できるように今後の息長い研究支援が行われることが望まれる。