

## 「協調と制御」研究領域 領域活動・評価報告書

- 平成 16 年度終了研究課題 -

研究総括 沢田 康次

### 1. 研究領域の概要

人間・社会・環境のそれぞれで生成されその間で伝達される情報の特徴抽出・モデル化、「協調」的の情報処理(コミュニケーション)する様式とその「制御」、さらにそれを実現するための手法を研究します。

例えば、インテリジェントなデバイスとシステム、ブレインコンピューティング、言語的・非言語的コミュニケーション、異種情報の統合シミュレーション、大量データの高速処理による意思決定支援システムの研究などを含みます。

### 2. 研究課題、研究者名

別紙一覧表参照

### 3. 選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

- 1) 選考は「協調と制御」領域に設けた選考委員 9 名と研究総括で行う。
- 2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。
- 3) 募集要領ならびに選考基準を踏まえて、「協調的人間社会の構築に貢献」する「野心的で獨創性」があり「今後の科学技術に大きなインパクトを与える」とともに、当領域の【協調】をテーマとする研究提案を重視。さらに当研究事業は、研究者が研究グループを構成し研究を推進することが前提であるため、研究者自身の研究に対する「活力・リーダーシップ」を重視し、より研究のアクティビティの高いものを採用するようにした。

### 4. 選考の経緯

一応募研究提案について 3 名の選考アドバイザーがそれぞれ専門家としての立場から書類審査を行い、書類選考会において意見を述べ合うとともに研究総括の見解により面接選考の対象者を選定した。続いて面接選考および総合審査により、採用候補者を選定した。

選考	書類選考	面接選考	採用者
対象者数	67 名	18 名	8 名

### 5. 研究実施期間

平成 16 年度より制度が変わり、希望により年度末までの研究期間延長が認められた。

本田研究者 : 平成 13 年 12 月～平成 16 年 11 月

残り 7 研究者 : 平成 13 年 12 月～平成 17 年 3 月

### 6. 領域の活動状況(平成 13 年 12 月～平成 17 年 3 月)

全研究者を対象とした領域会議 7 回、研究分野毎のサブ領域会議 5 回(会議テーマ: 「発達脳科学分野」、「コミュニケーションとインタラクション分野」、脳科学「知覚・認知における身体性」分野、「脳の知的機能への実験的アプローチでの問題点」、「協調的コンピューティング分野」)、研究報告会 1 回(東京)を開催し、研究進捗状況の報告と討論、研究交流を図った。また、研究総括

(および技術参事)は研究者を訪問し、研究実施場所の調査と研究進捗状況を把握するとともに研究における課題について助言などの対応をした。

## 7. 評価の手続き

研究総括が、個人研究者からの報告・自己評価を基に、領域アドバイザーの評価を加味し行った。また、JSTが主催する一般公開の研究報告会において参加者からの意見を参考とした。

(評価の流れ)

平成 16 年 11 月 / 平成 17 年 3 月	研究期間終了
平成 17 年 1 月	研究報告会を東京にて開催
平成 17 年 1 月	自己評価提出
平成 17 年 2 月	領域アドバイザーによる評価
平成 17 年 3 月	研究総括による評価及び研究報告書提出

## 8. 評価項目

(1) 外部発表(論文、口頭発表など)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等研究成果の状況

(2) 今後の発展の可能性

(3) 得られた研究成果の科学技術への貢献

## 9. 研究結果

本領域の研究目的は、現代科学技術におけるコミュニケーションの情報学的・工学的重要性を認識し、コミュニケーションの脳内知覚・運動系メカニズムを解明すると共に、種々のネットワークにおけるインタラクションの協調的制御方法を明らかにすることにより、新しい研究領域を創生することである。

その中で二期生8名は協調関係を3階層、即ち、A.脳内各部の協調関係、B.協調的社会におけるメディアとしての言語・音楽・文字、および C.モバイル社会における協調において研究した。カテゴリーとそのメンバーは、A.脳内の協調的情報処理(本田、筧、山本)、B.音声・音楽と文字列情報処理(岡ノ谷、河原、片寄、篠原)、C.協調的ネットワーク(西尾)であり、それぞれの研究課題において各々独創性の高い研究を行い顕著な成果を挙げた。高く評価したい。

カテゴリー別に言えば、A.「脳内の協調的情報処理」は、脳を構成する数多くの部位がどのように協調的制御を行って複雑に変動する外部環境に対応しているかを研究するグループである。本田は機能的磁気共鳴画像を実験手法として、ヒトの思考には運動野の神経活動が特異的に関与することを初めて実証し、思考と運動の協調関係を明らかにした。筧は、大脳 小脳間の情報伝達とその協調的動作に関して神経生理学的手段により研究し、両者を結合している一つのループ内で変換が起きているのか、複数のループ間で混合が起きているのかを解明するための実験体制を確立した。山本は、適切な振幅のノイズが閾値感度を増大させる確立共振と類似の現象がヒトの制御系にも存在することを実証し臨床応用の可能性を追求した。

B.「音声・音楽と文字列情報処理」では、協調的社会に必須であるコミュニケーションの主たるメディアである言語と音楽に係る研究課題を追求した。岡ノ谷は音声の分節化と言語の関係をトリとヒトについて研究し、トリの鳴き声から歌への分節化、ヒトの音列の分節化認識時の脳波などを発見した。河原は、話し言葉の自動書き起こしとその自動整形、重要文の自動抽出などの研究を着実に進めその分野での最高水準に達した。片寄は、優れた音楽演奏のニュアンスを事例からエレメント化して抽出することにより、演奏インタフェースを作成し、音楽コンテンツ製作支援ツールを作成した。篠原は、遺伝子配列の検索やインターネット検索のように膨大なデータベースからの検索時に必要不可欠な文字列照合の計算量を削減する方法として、このことに数値的演算

手法を用いることの可能性を追求した。

C.「協調的ネットワーク」は、情報技術の発達による PC またはモバイルを通じた協調的コミュニケーションのためのネットワークの研究を行う。今年度修了生の西尾は自律的に再構成するモバイルネットワークを提案し、そのモデルの理論的研究と実機によるクラスタ形成の実証に成功した。

第二期生は粒そろいの研究者集団であって、個性的であると同時に評価の高い研究成果を生み出した。加えてこの事業が個人型であるにもかかわらずポストクのグループメンバーと院生のリサーチスタッフを採用できるという恵まれた環境も、この好結果を生み出した要因になっていることは全ての研究者が認めるところである。

本領域のカバーする研究領域はきわめて広い。視野の広い研究者にはこの領域の広さは新鮮で刺激的であり新しい研究分野の創生には不可欠であるが、反面、領域会議の議論が散漫になりかねない危険性がある。この点を補うために本領域会議独特の「サブ領域会議」を引き続き開催した。この会議は研究者全員には通知するものの、討論者を特定分野の少人数に限り、問題点を絞って設定し、会議の前にメールによって議論を深化しておく。会議当日は研究者の発表はごく短時間に限り問題点を集中的に議論して答えを出すワークショップ形式とした。

領域会議・サブ領域会議を通しての領域アドバイザーからの鋭いコメントと適切なアドバイスは、研究者にとって研究を進める上で最も有益なものであったに違いない。本研究領域の領域アドバイザーはその分野でのトップであるばかりでなく大学経営の中核メンバーも多く、法人化の極めて多忙な時間を割いて本領域の研究成果に貢献していただいた。ここに厚く感謝の意を表したい。

#### 10. 評価者

研究総括 沢田 康次 東北工業大学 教授

##### 領域アドバイザー氏名(五十音順)

有川 節夫	九州大学	理事・副学長
石川 正俊	東京大学	理事・副学長
伊藤 貴康	石巻専修大学	教授
乾 敏郎	京都大学	教授
大森 隆司	北海道大学	教授
竹林 洋一	静岡大学	教授
東倉 洋一	情報・システム研究機構	教授
徳田 英幸	慶応義塾大学	教授
宮原 秀夫	大阪大学	総長

(参考)

(1)外部発表件数

	国内	国際	計
論文	33	51	84
口頭	171	104	104
その他	21	0	0
合計	225	155	380

\*平成17年3月末現在

(2)特許出願件数

国内	国際	計
2	0	2

(3)受賞等

- ・片寄晴弘 FTT2003 論文賞(2003.)  
人工知能学会 ベストプレゼンテーション賞(2003)  
NIME-RenCon (Performance Rendering) Award(2004)
- ・河原達也 情報処理学会 山下記念研究賞(2003.12)  
人工知能学会 優秀論文賞(2003.03)

(4)招待講演

- 国際 7件
- 国内 7件

## 別紙

## 「協調と制御」領域 研究課題名および研究者氏名

研究者名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職 (応募時所属)	研究費 (百万円)
岡ノ谷 一夫 (兼任)	音声分節化のしくみと発達 (千葉大学文学部)	千葉大学文学部 助教授 (同上)	88
笈 慎治 (兼任)	大脳 - 小脳連関の協調的情報処理 (東北大学大学院)	(財)東京都医学研究機構東京都神経科学総合研究所 部門長 (東北大学大学院生命科学研究所 助教授)	86
片寄 晴弘 (兼任)	音楽分野におけるデザイン再利用とその展開 (関西学院大学工学部)	関西学院大学工学部 教授 (和歌山大学システム工学部 助教授)	75
河原 達也 (兼任)	議論や会話における音声言語情報の分析とモデル化 (京都大学学術情報メディアセンター)	京都大学学術情報メディアセンター 教授 (京都大学大学院情報学研究科 助教授)	81
篠原 歩 (兼任)	数値演算的手法による文字列処理 (九州大学大学院)	東北大学大学院情報科学研究科 教授 (九州大学大学院システム情報科学研究科 助教授)	67
西尾 信彦 (兼任)	Improvised Network: 自律的に再構成するモバイルネットワーク (立命館大学情報理工学部)	立命館大学情報理工学部 助教授 (慶応義塾大学大学院政策・メディア研究科 助教授)	68
本田 学 (兼任)	運動・思考・感性の脳内協調制御メカニズム (自然科学研究機構生理学研究所)	自然科学研究機構生理学研究所 助教授 (岡崎国立共同研究機構生理学研究所 助教授)	89
山本 義春 (兼任)	感覚ノイズによる脳機能の活性化手法 (東京大学大学院)	東京大学大学院教育学研究科 教授 (同上)	75

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

音声分節化のしくみと発達

### 2 研究者氏名: 岡ノ谷 一夫

ポスドク研究員: アブラ・デリシャット (研究期間 H.14.1 ~ H.16.3)

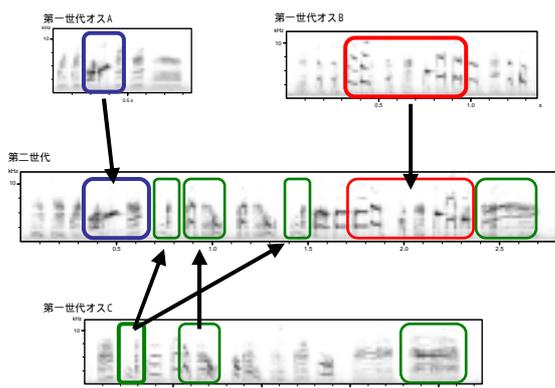
ホスドク研究員: 菅理 恵 (研究期間 H.14.1 ~ H.15.6)

### 3 研究の狙い:

言語は、音素から単語、単語から意味への2重の分節性を持つがゆえに極めて強力な思考とコミュニケーションの道具となった。言語の習得には、聴覚的に連続な刺激が分節化され、意味と対応を持つシンボルとなる必要がある。この過程はいかにして可能になるのだろうか。また、どのような神経機構が必要なのであろうか。時系列信号が分節化されるにあたり、2つの過程が考えられる。第1は入力信号自体の統計的性質にもとづき分節化が行われる過程、第2は入力情報にプロソディなどの補助的な分節化情報が付与され、それが助けとなり分節化が起こる過程である。補助的な分節化情報のひとつとして個体の内部状態をも含めれば、意味の獲得過程も第2の過程の一部であると考えられる。言語の分節化と意味の獲得は、この2つの過程の協調により成立するのであろう。本研究では、音声認識と産出における分節化を可能にする認知機構とその神経基盤について、成人・幼児を対象に、上記2つの過程を検出する実験を計画し、分節化過程で生ずる脳活動を計測する。平行して、コミュニケーション信号を分節化して学習する鳥類を対象に、ヒトで得られた脳活動に対応する神経活動を記録し、分節化に伴って生ずる神経回路の変化を解剖学的に解明する。また、ヒトと鳥の初期音声獲得過程を詳細に分析し、脳活動と音声信号の分節化の対応を調べる。以上のデータをもとに、時系列信号の分節化を可能にするモデルを構成して分節化の機構をシミュレートし、言語の生物学的基盤の理解をめざす。

### 4 研究成果:

#### A. トリにおける分節化の発達



大型のケージをつくり、10つがいのジュウシマツを継続飼育した。このような環境で育ったジュウシマツは、まわりの成鳥の歌を適宜切り貼りして、複雑な歌を構成することがわかった。ジュウシマツは歌学習の過程ですでにモデルとなる歌を分節化して知覚している証拠である。

#### B. トリにおける分節化に関連する脳過程

ジュウシマツの自己歌を編集し、10%周波数を上としたもの、10%長さを伸縮したものをつくって、これらをその歌をうたっていたトリ自身にきかせ、その際の大脳基底核の神経活動を記録した。10%周波数を低くした歌は、自己歌そのものより大きな反応を誘起した。この結果は、10%低くなった自己歌は、自己歌として認識されながら同時に誤差信号も誘起していたと解釈できる。大脳基底核では自己歌の系列を予測し、誤差信号を産出しているという仮説に矛盾しないデータである。

### C. ヒトにおける分節化に対応する脳電位

12半音より3つの音を選び、これをひとまとまりの「単語」とする。これらの「単語」をランダムにつなぎあわせると、メリハリのない無調音楽のようなものができあがる。これを聞かせながら脳波を記録すると、「単語」の切れ目に相当する部位で特異的な事象関連電位があらわれることがわかった。この電位は、セッションの初期にはほとんど出ず、また、学習が完了してしまうとほとんどでない。実時間での分節化獲得率に対応する電位であることがわかった。この電位は、頭頂FCzからもっとも強く記録された。FCzでの活動は、帯状皮質からの誤差信号を反映している可能性がある。そうだとすると、ヒトとトリで、系列誤差を同様なやり方でコードしていることが示唆される。これを確定するため、現在、多チャンネル記録データから電源推定を行っているところである。

さらに、音声分節化可能な刺激とそうでない刺激を聞いたときの差を、光トポグラフィ装置で測定した。結果、分節化可能刺激を聞いた後でのみ、左前頭部、プロカ野周辺と考えられる部位で酸化ヘモグロビン濃度が増加していた。このことから、単純な音の分節化であっても、大脳言語野が関連していることがわかった。

### D. ヒト新生児における分節化の証拠

音声分節化は生後どのくらいで獲得されるのだろうか。これを知るため、新生児から1歳児に至る乳幼児の脳波をはかり、成人で得られたような分節化に対応する脳波が得られるかどうかを検討した。驚くべきことに、新生児ですでにこれに対応する脳波がみられ、分節化の能力は生得的であることが示された。

## 5 自己評価:

### A. 研究計画

言語のもっとも大切な基盤となる能力を「分節化」と位置づけることで、言語の起源の生物学を開くことができた。この点は高く評価できる。鳥の歌学習過程がヒトの言語獲得過程と類似していることを積極的に利用し、音声分節化のしくみと発達について、ヒトと鳥類で比較研究するという戦略をとった。この戦略は極めて生産的であり、今後さらに発展した研究が可能である。

### B. 研究結果

1) ヒト 音声分節化の実時間獲得過程を反映する脳波を特定することができた。学習率に対応する脳波はこれまで記述されることがなかった。わたしたちの研究がはじめてこれを記述したのである。また、ヒト新生児の脳波測定技術を確認し、音声分節化能力が生後すぐ発現していることを突き止めた。これも世界的にみても最初の発見である。しかしこれらの結果はどちらも論文発表まで至っていない。

2) トリ トリの歌の分節化は、大脳基底核と大脳皮質対応部位とのループ構造により可能になることを電気生理学的に示した。また、大脳基底核でコードされている系列予測誤差信号を記録することができた。これらは、トリの歌にとどまらず時系列行動制御の基礎的データとして重要である。これらを含み、論文は部分的には発表した。また数本準備中のものがある。これらを正式に発表することが必要である。

### 3) トリとヒトの比較

トリ、ヒトそれぞれでは興味深いデータを得ることができたが、ヒトにおける分節化仮定をトリをモデルとして深く解明する、という目的については、ようやく始まろうとする段階である。トリの条件づけ技術や電気生理学などは確立していたにも関わらず、具体的にその実験を担当する人材が得られなかったことが理由のひとつだが、実験計画の大切な部分が手つかずであったのは反省しなければならない。

#### 4) 研究の展開

この研究の過程で、言語起源の生物学的研究について深く考える機会をもった。その一部は、岩波「科学」2004年7月号の座談会として結実した。また、2004年の進化学会においても、言語起源のシンポジウムを開催することができた。分節化というとりかかりやすいテーマをえらび、言語起源の生物学を本格的に始動することができたのは、この研究のもっともおおきな成果であるとする。

#### 5) ポスドク研究員

今回のさきがけ研究がスタートするまで、私の研究室は「小鳥の研究室」であった。さきがけ研究で小鳥とヒトを比較するテーマを設定し、ヒトの脳波測定 of 専門家を雇用できたことで、私の研究室は小鳥の研究室から言語起源の研究室へと脱皮することができた。アイデアはあっても個人の力では技術習得がおよばない場合がある。さきがけ研究のポストドク制度によって、あらたな技術を導入しながら研究を展開できたのはたいへん有意義なことであった。

#### 6 研究総括の見解:

言語はコミュニケーションにおける最も有効なツールであり、その進化的起源と発達の学習は極めて重要な研究課題である。本研究はこの課題に対して音声の分節化が言語の発現につながるという独創的な作業仮説を提唱して、トリの鳴き声の分節化課程の脳内メカニズムを生理学的に明らかにすると共にヒトの音声分節化獲得過程を脳波で検出するなど大きな成果を挙げた。今後、更にヒトとトリの分節化過程の比較研究が進めば進化的言語の起源の研究にさらに大きく貢献するものと考えられる。

#### 7 主な論文等:

##### A. 論文

- [1] Yamada, H., & Okanoya, K. (2003). Song syntax changes in Bengalese finches singing in a helium atmosphere. *Neuroreport*, 14, 1725-1729.
- [2] Mizuta, T., Yamada, H., Lin, R. S., Yodogawa, Y., & Okanoya, K. (2003). Sexing White-rumped Munias in Taiwan, using morphology, DNA and distance calls. *Ornithological Science*, 2, 97-102.
- [3] Okanoya, K. (2004). The Bengalese finch: a window on the behavioral neurobiology of bird song syntax. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1016, 724-735.
- [4] Nakamura, K. Z. & Okanoya, K. (2004). Neural correlates of song complexity in Bengalese finch high vocal center. *NeuroReport*, 15, 1359-1363.
- [5] Okanoya, K. (2004). Song syntax in Bengalese finches: proximate and ultimate analyses. *Advances in the Study of Behaviour*, 34, 297-346.
- [6] Okanoya, K. (2004). Functional and Structural Pre-adaptations to Language: Insight from comparative cognitive science into the study of language origin. *Japanese Psychological Research*, 46, 207-215.

##### B. 出版物

- [1] 岡ノ谷一夫 (2003). 小鳥の歌からヒトの言葉へ 岩波科学ライブラリー

##### C. 招待講演

- [1] Sexual selection of syntactical behavior and the origin of language, *The Evolution of Brain, Cognition and Social intelligence*, Sponsored by Behavioural Biology, Utrecht University. (October, 2004)
- [2] Neuroecology of song complexity in Bengalese finches, *International Conference on Bird and Environment*, Gurukula Kangri University, India. (November, 2004)

- [3] Biolinguistics: a biological inquiry into the origin of language, KIT International Symposium on Brain and Language. (December, 2004)
- [4] 「人間と収斂する鳥の進化：社会・音楽・そして言葉へ」, 「脳・心と教育」研究会シンポジウム、学生会館講堂. (December, 2004)

他に論文16、口頭発表71、出版11

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

大脳 小脳連関における協調的情報処理

### 2 研究者氏名: 寛 慎治

ポスドク研究員: 角田 吉昭 (研究期間 H.14.4 ~ H.16.12)

### 3 研究の狙い:

大脳と小脳は脳内で1、2番目のニューロン数を占める最重要部位である。両者は大脳 小脳連関とよばれる強力なループ構造(図1)で結ばれ、運動制御から認知まで含む広範な高次脳機能に関わるとされる。この重要なループの動作原理に関して、従来、大脳の様々な領域からの出力が小脳で収束し、そこで適切な運動指令に変換される「共通運動変換器」とする見方が定説であった。ところが、最新の解剖学的研究により、大脳皮質の異なる部位の出力は小脳で収束せず、並列ループ構造を取ることが明らかになった。従って連合野のループは、運動野のループと独立しており、小脳を「共通運動変換器」とする従来の仮説が成り立たないことは明らかである。各並列ループの小脳側の構造は極めて均一であることから、小脳における情報変換に共通原理が存在することを強く示唆する。本研究の目的は、この共通原理を実験的に検証し、大脳と小脳が連関・協調して機能するための新しい原理を導くことにある。

そのためには、大脳と小脳の間で交換される情報を解読し、小脳が大脳からどのような入力を受け取り、それをどのように変換し出力しているかをシリアルに分析する、前例のない実験を行う必要がある。我々独自の実験系が、この分析を可能にする。具体的には、運動課題実行中の動物の脳からニューロン活動を記録し、ニューロン活動に表現された運動パラメータとその座標系を解読する。この際、大脳小脳連関は基本的に前向き神経結合で構成されるため、システム全体の情報処理を分割してシリアルに解析できるユニークな構造を最大限に利用する。さらに、小脳の神経回路は動物の種類によらず同じであるため、動物実験でも一般性を失わない形で、大脳 小脳連関の基本アルゴリズムが調べられる。

### 4 研究成果:

#### 4.1 同一ループ上のニューロン活動の記録:

小脳における情報変換過程を調べるには、大脳 小脳連関のシリアルな情報の流れを再構築しなければならない。大脳 小脳連関の並列ループ構造を考慮すると、同一ループ上のニューロン活動を記録することが前提になる。特に変換の中核部分を担うと推定される小脳皮質が重要で、橋核で中継された大脳皮質からの入力がプルキンエ細胞の出力に変換される過程では、同一ループ上の入力と出力でなければ「変換」の議論は無意味になる。この技術的問題は、橋核ニューロン活動を、プルキンエ細胞近傍の軸索(苔状線維)から記録することにより克服した。この結果、*in vivo*の高次中枢におけるシリアルな情報処理過程の解析が世界で初めて可能になった。現時点までに、大脳皮質から橋核を経てプルキンエ細胞に至る、大脳 小脳連関ループ全体の約3分の2における情報変換の概要を解析中である。

#### 4.2 ニューロン活動の座標系と座標変換過程の再構築:

大脳皮質ニューロン、小脳皮質入力の苔状線維、同出力のプルキンエ細胞のいずれについても、座標系によるニューロン活動の分類が極めて有効であった。大脳皮質・腹側運動前野(PMV)の二

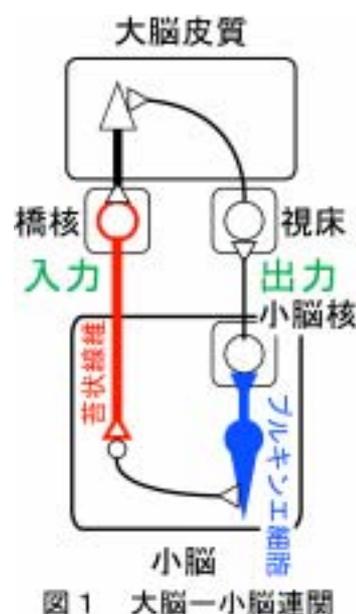


図1 大脳-小脳連関

ニューロンは空間座標系による運動の方向をコードしており、この空間座標系の情報は橋核で中継されても基本的に保存され(図2左上)、小脳皮質IV,V,VI小葉の外側部に入力する(図2右)。これに対して、一次運動野(M1)のニューロンは、空間座標系、筋肉座標系、そして中間座標系の多様な活動パターンを示すが、そのうち筋肉座標系の情報が橋核を介して小脳皮質に入力し(図2左下)、IV,V,VI小葉の内側に投射する(図2右)。従って、小脳皮質ではPMvからの入力とM1からの入力が異なる領域に投射し、入力に関するモジュール構造が保たれていることが、機能的に実証された。次に、各領域においてこの入力情報がどのように変換されるかが問題となる。

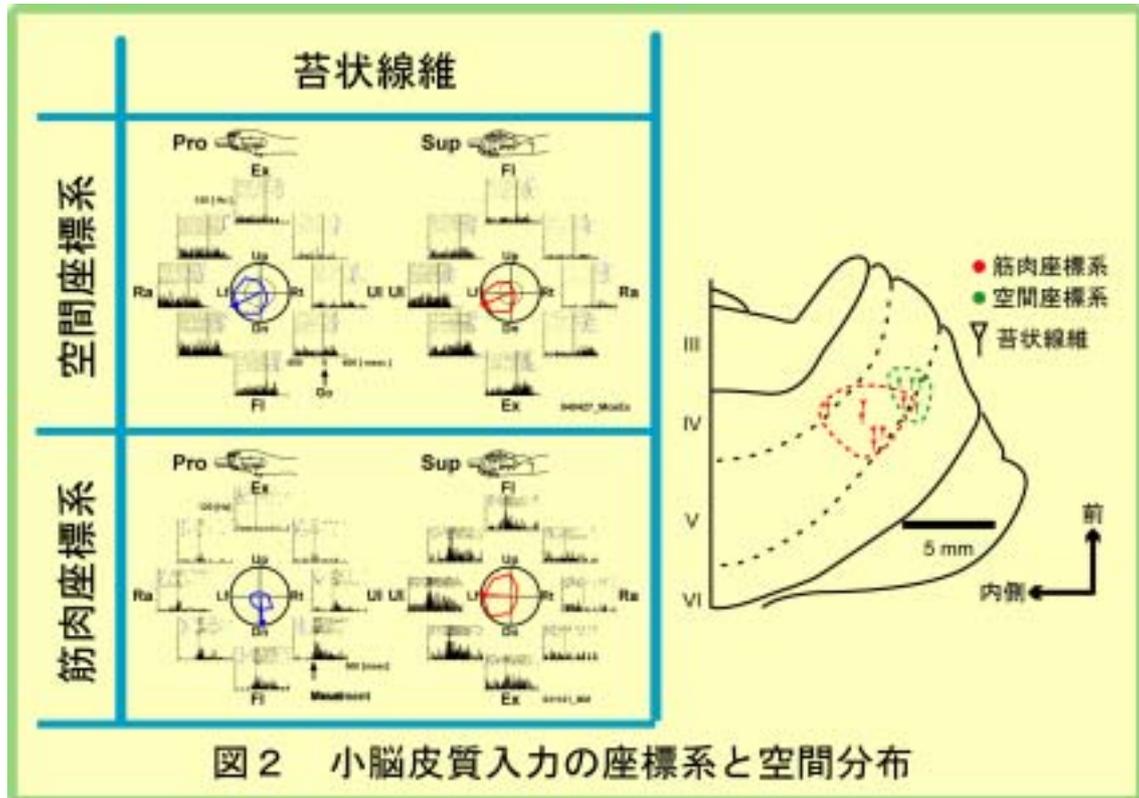


図2 小脳皮質入力の座標系と空間分布

そこで図2右に示した2つの領域でプルキンエ細胞活動の座標系を同様にして解析したところ苔状線維と同様に空間座標系と筋肉座標系の2タイプの活動が見られた(図3左)。しかしその空間分布(図3右)は、苔状線維(図2右)のように分離する傾向を示さず、2つのタイプのプルキンエ細胞が同じ領域に混在していた。苔状線維とプルキンエ細胞の位置精度は同じであるので、この違いは実験誤差では説明が付かない。また、小脳皮質の構造から考えて、2つの領域への苔状線維入力が皮質内で交換された可能性は低い。従って、各領域で2つの座標系のプルキンエ細胞が混在していることは座標変換の中間段階を見ている可能性が高いと考えられる。

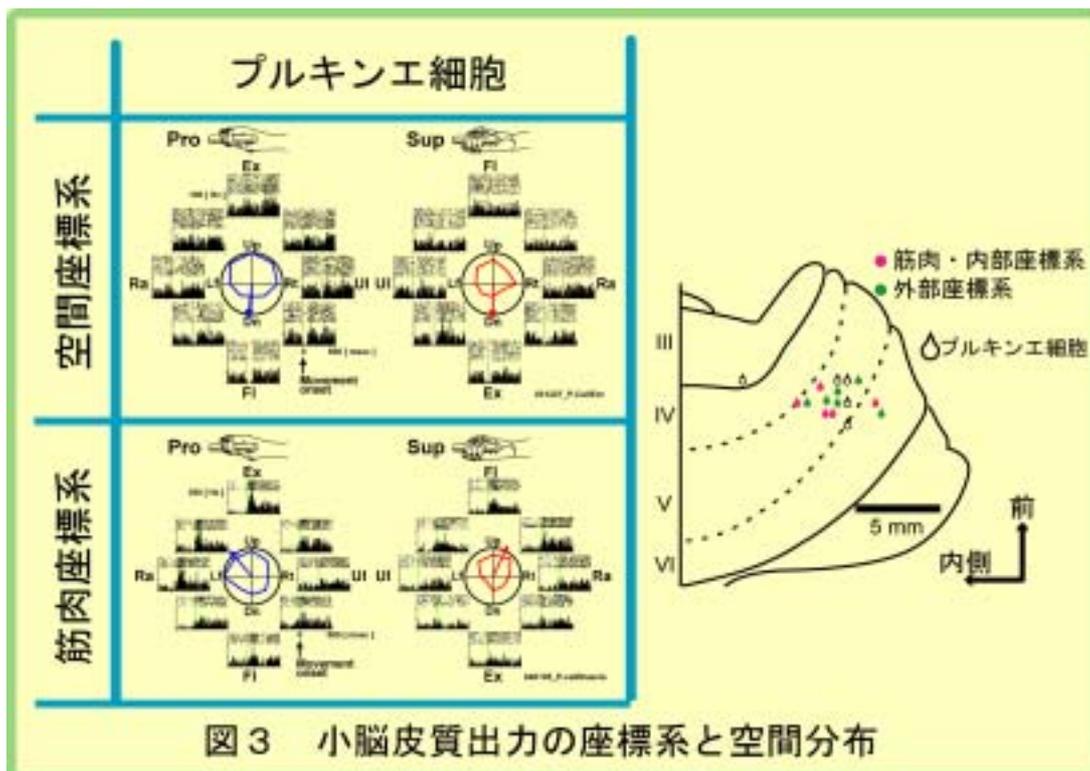


図3 小脳皮質出力の座標系と空間分布

以上のニューロン活動の分析結果をふまえた、大脳皮質からプルキンエ細胞までの座標変換をまとめたものが図4である。

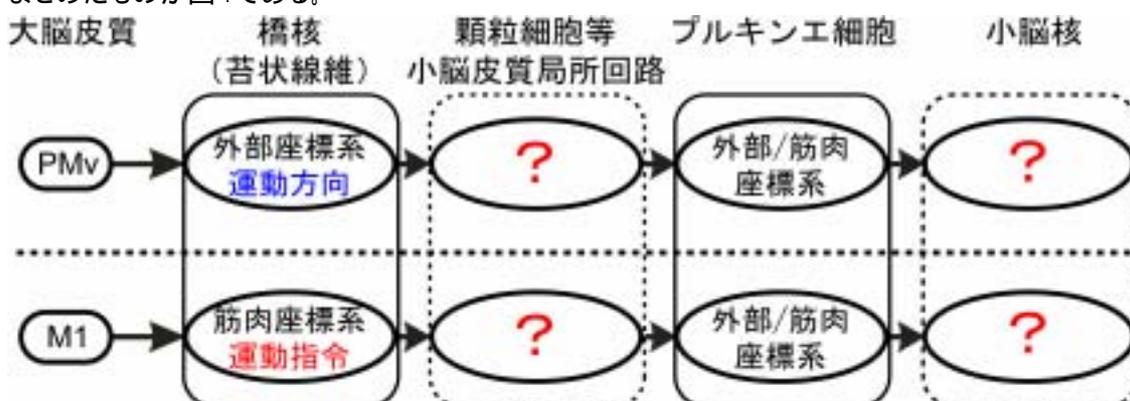


図4 大脳小脳連関における座標変換のまとめ

この図からは、入力(苔状線維)の単純さに比べて、プルキンエ細胞の情報表現は複雑であり、おそらく座標変換が終了しておらず、次の層である小脳核ニューロンの座標系を調べる必要があることが読み取れる。もし PMv システムが逆モデル的な演算をしているとすれば、小脳核の段階では筋肉座標系あるいは関節座標系等の内部座標系ニューロン活動の増加が予測される。それに対して、もし M1 システムが順モデル的な演算をしているとすれば、小脳核では空間座標系のニューロン活動の増加が予測される。今後は、PMv, M1 2つのシステムの両方について、小脳核のみならず大脳-小脳連関のループ全体の座標系を網羅的に調べ、全ループにおける共通情報処理アルゴリズムの抽出を目指す。

##### 5 自己評価:

脳内におけるシリアルな情報の流れを追跡・分析する実験系を世界で初めて確立できたことが現時点での一番の成果である。しかし、これは研究全体から見ると手段であって目的ではない。し

かも、その確立に悪戦苦闘し予想外の時間を要したため、最も重要な結果に関しては未だ論文発表にこぎ着けられず、残念である。大脳 小脳連関の基本アルゴリズムを抽出するという当初の目標に対する達成度は50%程度と自己評価している。しかし、目標への道筋は付けたという確かな手応えは感じている。また、優秀なポスドクを安定して契約可能なポスドク研究員制度の有用性は特筆に値する。科研費を含めて一般的に、他の研究費では金額的にも制度的にもポスドクの確保は不可能である。しかし何よりも、自分の欠点を補い、困難に共に悩み、成功に共に感謝する共同研究者は文字通り”priceless”であった。

#### 6 研究総括の見解:

大脳と小脳の役割はいまだに不明な点が多い。本研究は、大脳と小脳の神経回路結合に関して動物を使った電気生理学的実験によるハードウェア的研究である。そのユニークな研究を可能にしているのは、本研究代表者が構築した空間座標をコードする神経と筋肉座標をコードする神経細胞である。信号が大脳皮質から苔状繊維、プルキンエ細胞に伝播する時、苔状繊維で二種類の細胞は空間的に分離しているのに、次の苔状繊維では空間的に混合されていることを発見した。今後、一つのループ内で変換が起きているのか、複数のループ間で混合が起きているのか、大脳 小脳の情報伝達という重要な研究課題を解明するための実験体制を確立したものと高く評価できる。

#### 7 主な論文等:

発表リスト

[原著論文]

- [1] Kakei S, Hoffman DS, Strick PL, Sensorimotor transformations in cortical motor areas. *Neurosci Res* 46(2003)1-10
- [2] 飯島敏夫、筧 慎治、広瀬秀顕、「超高速光イメージングが明らかにする運動野における神経集団活動の動的変化」.**「脳の科学」**25(2003)61-70

[総説]

- [1] 筧 慎治、「運動野における運動指令の座標変換」.**「脳の科学」**24(2002)381-384

他に論文2、口頭発表7

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

音楽分野におけるデザイン再利用とその展開

### 2 研究者氏名: 片寄 晴弘

ポスドク研究員: 野池 賢二 (研究期間 H.14.4~H.17.3)

ホスドク研究員: 橋田 光代 (研究期間 H.14.8~H.17.3)

### 3 研究の狙い:

音楽や映像、造形や舞踊など、非言語メディアのデザインやイメージを言葉で伝えることは簡単なことではない。そうするより、直接、事例を参照し、その特徴を伝える方がはるかに容易である。職業的なデザイン分野、特に、コンテンツプロダクションにおいては、例えば「ビートルズのあの編曲」、「スタンリー・キューブリック後期作品のシーン展開」などのように、具体的な目標事例を掲げてデザインイメージの伝達・共有をはかり、その上で、具体的な制作プロセスに入ることが多い。

本研究では、このような形で実施されるデザインの支援を行うことを目標とする、つまり、“真似”によって、音楽を創るインタフェースを提供することを課題とする。この方式を用いれば、専門的な知識を持ち合わせていないユーザでも簡単に音楽を創ることが可能となる。具体的には、演奏における表情付け、ミックスダウン(商用音楽制作における最終工程)、作・編曲を対象としたデザイン転写技術の開発に取り組む。さらに、これらの取り組みを起点として、幅広い対象に適用可能なデザイン転写方式に関して考察を進める。また、評価研究の一環として、情緒あふれる演奏生成(Performance Rendering)システムの聴き比べコンテスト Rencon を推進する。

### 4 研究成果:

システム・モデル開発と評価研究に関する成果を以下に示す。

#### <システム開発>

演奏表情抽出ツール、演奏表情データ表示ならびにグルーピングルール(拡張 GPR)適用ツール、演奏表情テンプレートを利用する演奏インタフェース、ミックスダウンデザイン支援インタフェース、アテンションの移動に基づく演奏レンダリングモデル、演奏表現パラメータを考慮したグループ構造解析、音楽経験に基づく統合型音楽生成アーキテクチャ

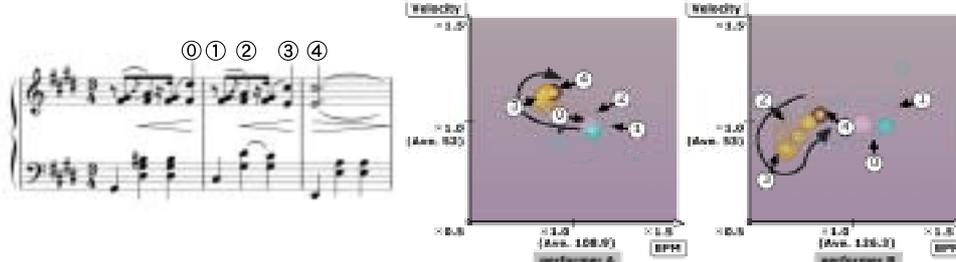
#### <評価研究>

Rencon プロジェクト(パフォーマンスレンダリングコンテスト)、音楽グループ聴取傾向の分析、NIRS を利用した iFP 実施時の芸術的没頭の計測

これらの取り組みを代表して、三つの取り組みについて説明を行う。

#### 4.1 演奏表情テンプレートを利用する演奏インタフェース iFP の構築および評価

iFP は、演奏表情データをテンプレート(図 1)として利用し、演奏上のニュアンスを表現する拍打・指揮型の演奏インタフェースである(図2)。枝葉末節な演奏技術はシステムが担うため、演奏者はフレージングに集中することが可能であり、名ピアニストの手を借りて演奏している、あるいは



は、名演奏者を指揮しているような感覚を味わうことができる。この効果の検証実験を行ったところ、主観評価とNIRSによる脳活動計測の双方において「能動的な鑑賞」における芸術的没頭を示唆するデータが得られた。

図1. 演奏表情データ(可視化例)

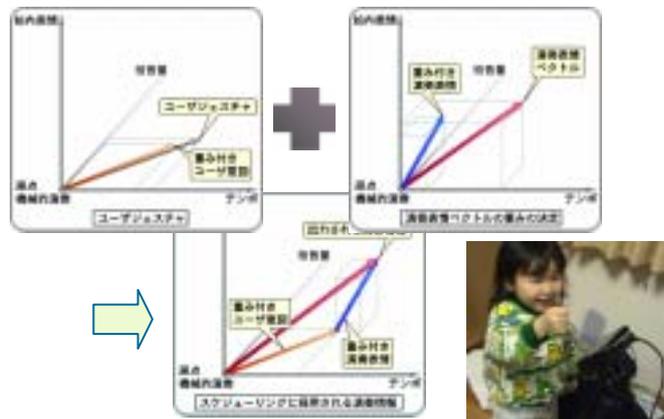


図2. 演奏表情テンプレートを利用した演奏インタフェース iFP

#### 4.2 アテンションの移動に基づく演奏レンダリングモデル

情緒あふれる演奏生成の現状の課題の一つに、複数パートで構成される音楽における各パートの自然な表現がある。この問題に対し、楽曲の各パートに対するアテンション(注意)の移動に着目し、以下の事項を基本とする演奏生成モデル(図 3)を構築した。1)それぞれのパートに独立に演奏表情をつける。2)アテンションの移動の際、当該の音の音長を延ばす。3)グループ構造境界で全パートの発音時刻が一致するよう、オンセットタイミングのスケーリングを行う。このモデルに基づき、ショパン作曲「幻想即興曲」の中間部のレンダリングを実施したものが、NIME04-RENCON Award(演奏生成の聞き比べコンテスト)の受賞対象となった。

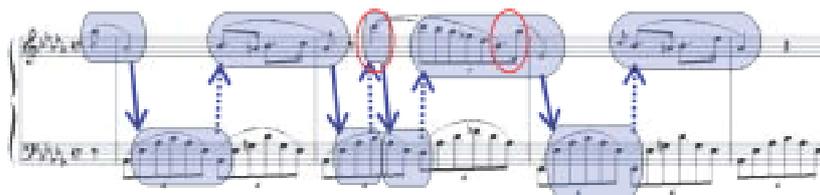


図3. 「幻想即興曲」におけるアテンションの移動

#### 4.3 音楽経験に基づく統合型音楽生成アーキテクチャ

音楽におけるデザイン転写モデルとして、音楽聴取経験に基づく予測補完処理を主眼とするモデル(図4)を考案し、このモデルに基づいて、自動伴奏と演奏の表情付けの2システムをプロトタイプ実装した。従来の音楽システムの多くは、作曲や演奏など音楽タスク毎の個別動作モデルを用いて開発が進められてきたが、人間が音楽タスク毎に異なったモデルを用いているとは考えにくい。このモデルは、作曲、編曲タスクにも適用可能である。加えて、時系列メディア一般のデザイン転写モデルとしての応用も期待される。

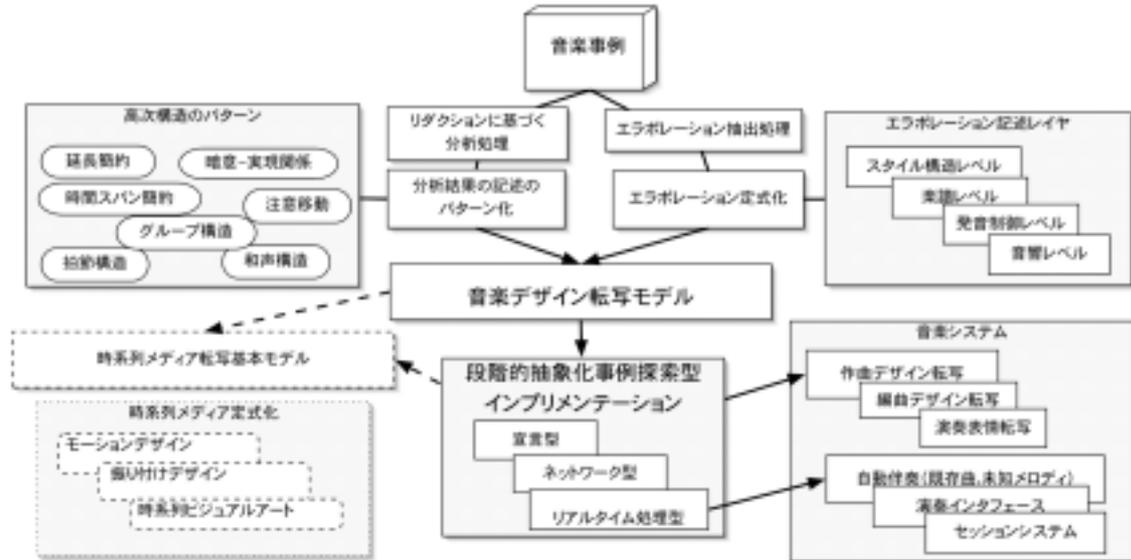


図4. 音楽におけるデザイン転写モデル

#### 5 自己評価:

本研究では、事例中のデザインを転写することによって、音楽コンテンツの制作を支援する手法の構築、評価研究を課題として掲げた。目標については概ね達成できたものと考えている。コンテンツ制作において事例を利用することの第一の効用は、間接的な概念空間を操作・形成することなく、デザインの機微や特徴を“なめらかに”伝達できる点にある。これに加え、副次的な効果として、既存デザインの能動的ななぞりが、作品に対する深い理解や感動をもたらすことが確認された。本取り組みを起点として、音楽、絵画、造形、モーション等、さまざまなデザイン支援に関する研究者との協力関係を構築できたことも大きな収穫であった。今後、この協力体制を活かして、提案に至った音楽デザイン転写モデルの他分野への応用や、可能性や課題に関するさらなる検討を進めていきたい。

本研究が採択された当時、在籍していた大学では博士後期課程の設置準備中であった。また、採択から一年後、他大学新設学部への異動となり、初めからの研究室立ち上げを余儀なくされた。このような中、滞りなく研究が続けられたのは、本制度によるポストクの雇用制度があったからである。本制度並びに研究を支えてくれたスタッフに感謝したい。

#### 6 研究総括の見解:

優れた音楽演奏のニュアンスを事例からエレメント化して抽出することにより、演奏インタフェースを作成し、音楽コンテンツ制作支援ツールとして目覚ましい成果を挙げた。このことはこの技術実用化を含む感性工学への貢献も大きいと考えられるが、又同時に音楽芸術の理解に工学的手法を導入する可能性をも示しており高く評価できる。

## 7 主な論文等:

- [1] 片寄晴弘, 笠尾敦司: マルチメディアコンテンツと情報処理システムとしての評価、情報処理学会論文誌, Vol.44, No.2, pp.222-226 (招待論文, 2003)
  - [2] 片寄晴弘, 奥平啓太, 橋田光代: 演奏表情テンプレートを利用したピアノ演奏システム:sfp, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp.2728-2736 (2003)
  - [3] 谷井章夫, 後藤真孝, 片寄晴弘: ミックスダウンデザインの抽出と適用, FIT 2003 情報技術レターズ, LF-003, pp.109-110 (FIT 論文賞, 2003)
  - [4] Haruhiro Katayose and Keita Okudaira: iFP A Music Interface Using an Expressive Performance Template, Entertainment Computing 2004, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3166, pp.529-540, Springer (2004)
  - [5] Ken'ichi Toyoda, Kenzi Noike and Haruhiro Katayose: Utility System for Constructing Database of Performance Deviations, Proc. ISMIR2004, pp.373-380 (2004)
  - [6] 片寄晴弘, 平田圭二, 野池賢二, 笠尾敦司, 宮田一乗, 平賀瑠美: 非言語メディアのデザイン支援に向けて, 人工知能学会論文誌, Vol.20, No.2, pp.129-128 (2005.3)
- 全 62件発表(うち、査読付き16件)

## 特許

- [1] 出願番号:特願2002-371773号、発明者:片寄晴弘、発明の名称:楽曲ミキシング装置、方法およびプログラム、出願日:平成14年12月24日
- [2] 出願番号:特願2003-20982号、発明者:片寄晴弘、野池賢二、発明の名称:音楽演奏システム、方法およびプログラム、出願日:平成15年2月29日

## 受賞

- [1] 2003年 人工知能学会 全国大会ベストプレゼンテーション賞、近未来チャレンジテーマ採択 片寄晴弘, 平田圭二, 原田利宣, 平賀瑠美, 笠尾敦司: 「事例に基づくデザイン支援と評価基盤の構築」対象
- [2] 2003年 FIT2003 論文賞 谷井章夫, 後藤真孝, 片寄晴弘: 「Mixdown のデザインとその適用」対象
- [3] 2004年 NIME-RecCon (Performance Rendering) Award 橋田光代, 片寄晴弘: 「幻想即興曲」(声部協調型音楽解釈モデルに基づき生成)対象

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

議論や会話における音声言語情報の分析とモデル化

### 2 研究者氏名: 河原 達也

ポスドク研究員: 西田 昌史 (研究期間 H.14.4~H.15.6)

ホスドク研究員: 清田 陽司 (研究期間 H.16.2~H.16.11)

ホスドク研究員: 勅使河原 三保子 (研究期間 H.16.8~H.17.3)

### 3 研究の狙い:

情報技術の進展により、討論や講演などのデジタルアーカイブ化が可能になったが、単に録音しただけでは、検索やブラウジングが困難である。また、その書き起こしには膨大な手間を要するにもかかわらず、音声に含まれるニュアンスや感情などの情報が失われてしまう。そこで、エッセンスとなる情報(話者IDや発話内容・意図など)を抽出し、実際の音声メディアと階層的にリンクしたアーカイブを設計する。本研究では、このような組織的な構造を抽出するための音声コミュニケーションの分析・モデル化を行った。

従来の音声認識・理解の研究は、主としてヒューマン・マシン・インタフェースとして、限られたタスクの制約を満たすものから最もマッチングのよい単語列を見つけるという枠組みで定式化されてきた。これに対して、人間どうしのコミュニケーションにおいては、必ずしも一字一句を聞き取るのではなく、意志の疎通を第一として処理を行っていると考えられる。本研究では、このようなヒューマン・ヒューマン・インタラクションとしての音声会話の理解を指向した計算モデルの設計と実装を行った。

具体的には、実世界の議論や会話を対象として、以下の問題に取り組んだ。

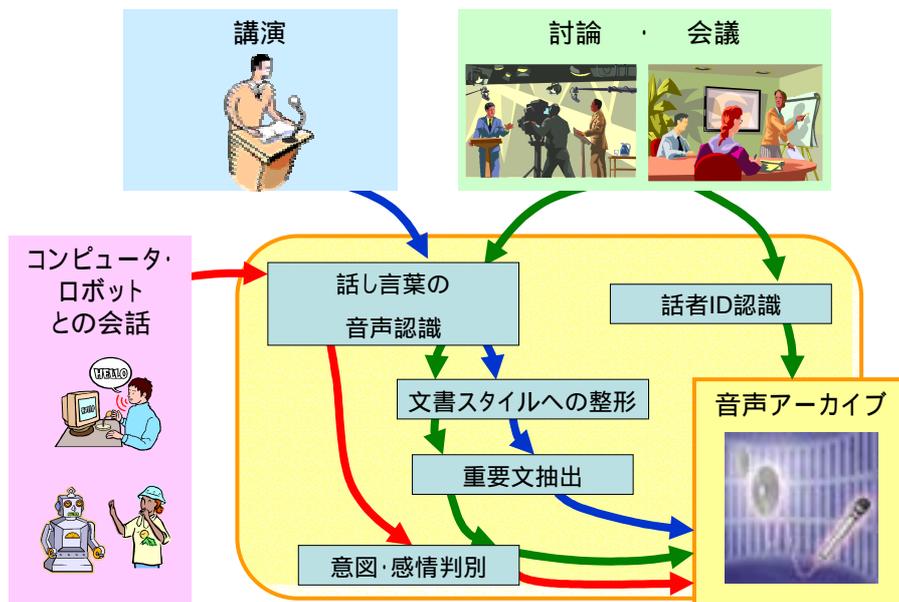
- (1) 話し言葉音声のモデル化と自動認識
- (2) 話し言葉の自動整形と自動要約
- (3) 討論・対話における話者のモデル化と自動認識

### 4 研究成果:

研究の全体像を図に示す。

#### 4.1. 討論音声に対する教師なし話者インデキシング

複数の話者が議論や会話を行っている状況では、いつ誰が話しているかを同定することがまず必要となる。この話者情報は音声認識器を話者ごとに適応する上でも有用である。そこで、当該の音声データのみから自己組織的に話者ごとのモデルを構築する方法を研究した。特に、BIC(ベイズ情報量基準)に基づいて安定したモデルの選択を行う方法を考案し、テレビ討論番組において97%を上回る話者インデキシング精度を実現した。



研究の全体像

#### 4.2. 話し言葉音声の自動書き起こし

人間どうしのコミュニケーションで用いられるような話し言葉音声では、発話速度が速く、発音が不明瞭であるために音響的な変動が大きく、また、口語的な表現や言い淀みなどの現象により言語的な変動も大きいため、従来の音声認識システムでは十分に対応できない。これに対して、実際の学会講演などの大規模なデータベースを用いて、話し言葉に固有の発音変形や言語的多様性の精密なモデル化を行った。また話題や話者に応じて、自動的にモデルを適応する方法も実現した。この結果、学会講演で約80%、テレビ討論番組で約65%、国会討論で約75%の単語認識精度を実現した。これらはいずれも報告されている中で、最高水準の精度である。

#### 4.3. 話し言葉の書き起こしの自動整形

話し言葉をそのまま書き起こしても(たとえ100%の認識精度でも)、読みづらいだけであり、書き言葉に整形する必要がある。このような話し言葉から書き言葉への整形・変換については、従来はパターンマッチング的な書き換え規則を用意する方法が一般的であったが、基本的に1対1変換しか扱えず、前後との整合性が考慮されていなかった。これに対して、話し言葉と書き言葉を別の言語とみなした上で、統計的な機械翻訳の手法を適用することを考案・実装した。

#### 4.4. 重要文の自動抽出

講演や討論の効率的なブラウジングや検索を可能にするために、重要文を自動抽出(タグ付与)する方法を研究した。テキストベースの要約においてはキーワードの統計量に基づく手法が一般的であったが、音声コミュニケーションにおいては話者が話題を転換したり、強調したりする際に使用される言い回し(=談話標識)があることに着目し、これを統計量とともに機械学習する方法を考案した。重要文のタグ付与は主観的な要素もあり、作業間での不一致も小さくないが、このような要因を考慮した評価を行うことにより、提案手法が人間の約9割の精度を実現することを示した。

#### 4.5. コミュニケーションの観点からの音声認識の最適化

従来の音声認識は、入力音声  $X$  に対して最尤の単語列  $W$  を見つける、すなわち事後確率  $P(W|X)$  を最大化する  $W$  を見つける枠組みで定式化されてきた。しかし、人間どうしのコミュニケーションにおいては必ずしも一字一句を聞き取っているのではなく、理解の上で重要な単語とそうでない単語があると考えられる。そこで、単語の重要度を定義した上で、重要な単語を優先的に認識する枠組み、あるいは意志疎通を阻害する誤りを避ける (= ベイズリスク最小化) 枠組みを設計・実装した。

#### 5 自己評価:

当初は、人間どうしの日常会話や人間とロボットの対話なども含む幅広い音声コミュニケーションを想定していたが、このようなデータの大規模な収集が困難であったので、研究の後半は、学会講演やテレビ討論、国会討論の音声を中心に扱うこととした。これにより、統計的モデルの機械学習に基づいた方法論を展開することができ、また客観的な評価を行うことも可能になった。このように対象を絞ったものの、おおむね当初の目標を達成できたと考えている。話者インデキシングや音声認識に関する研究は数多くの研究機関で行われているが、日本語の話言葉音声でこのような精密なモデル化はこれまで行われておらず、実際に最高水準の精度を達成している。また、音声の書き起こしからの自動整形や重要文抽出などの研究は世界的にも先駆的なものである。

このような研究を実施する上で、大規模な音声言語データベース (= コーパス) の構築がきわめて重要であるが、さきがけ研究の3年間にわたる大規模な研究費は非常に有難いものであった。

またポスドク研究員や大学院博士後期課程の学生を雇用できたことにより、個人で行うよりはるかに多くの研究成果を残すことができた。

#### 6 研究総括の見解:

話言葉の自動書き起こし、自動整形、重要文・重要単語の自動抽出など研究を着実に進め、話言葉のアーカイブ化の技術として最高レベルを獲得し、国会から議事録作成に採用可能性について引き合いがあるなど、その成果は研究開始時の予想を越えるものであり、高く評価できる。今後、どのレベルに達するとどのような実用が可能であるかの目標値を設定して研究を進めることにより、実用化が促進されるものと考えられる。

#### 7 主な論文等:

##### [論文]

- [1] M.Nishida and T.Kawahara.

Speaker model selection based on Bayesian information criterion applied to unsupervised speaker indexing.

IEEE Trans. Speech & Audio Processing, (accepted for publication), 2005.

- [2] T.Kawahara, M.Hasegawa, K.Shitaoka, T.Kitade, and H.Nanjo.

Automatic indexing of lecture presentations using unsupervised learning of presumed discourse markers.

IEEE Trans. Speech & Audio Processing, Vol.12, No.4, pp. 409--419, 2004.

- [3] H.Nanjo and T.Kawahara.

Language model and speaking rate adaptation for spontaneous presentation speech recognition.

IEEE Trans. Speech & Audio Processing, Vol.12, No.4, pp. 391--400, 2004.

- [4] 駒谷和範, 上野晋一, 河原達也, 奥乃博.

音声対話システムにおける適応的な応答生成を行うためのユーザモデル.

電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-DII, No.10, pp.1921--1928, 2004.

- [5] 西田昌史, 河原達也.  
BIC に基づく統計的話者モデル選択による教師なし話者インデキシング.  
電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-DII, No.2, pp.504--512, 2004.
- [6] 秋田祐哉, 河原達也.  
多数話者モデルを用いた討論音声の教師なし話者インデキシング.  
電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-DII, No.2, pp.495--503, 2004.

他に、36件発表(国際14件、国内22件)

#### **[受賞]**

- [1] 2003 年度情報処理学会山下記念研究賞. ユーザモデルを導入したバス運行情報案内システムの実験的評価.
- [2] 2003 年度人工知能学会全国大会優秀賞. 京都市バス運行情報案内システムの試験評価とユーザモデルの導入.



的には、 $X \text{ aab} Y = \text{aYabbaba}$  のように、両辺に変数を含むような方程式を解くことを考える(この場合は  $X := \text{ababa}$ ,  $Y := \text{baba}$  という解がある)。このような文字列方程式を解く問題は、見かけほど簡単ではない。例えば方程式  $YYXbaaaaZ = ZYYXaaaab$  の最小解は、

$X := \text{aaaabaaaa}$ ,

$Y := \text{aaaabaaaaaaaaabaaaabaaaa}$ ,

$Z := \text{aaaabaaaaaaaaabaaaabaaaaaaaaabaaaaaaaaab}$

であり、問題の長さ比べて極めて長い。一方、文字列方程式  $XabYY = bZZYX$  は解なしであり、文字列方程式を解くアルゴリズムを開発する際には、どの長さまで調べればその問題には解がないと言えるのかを知る必要がある。このように、解が存在するときにその最小解の上限を求めることが、そのまま最悪時の計算時間の評価に直結する。しかし、一般の文字列方程式に対する最小解の上限について、まだ十分にその挙動が解析されていない。そこで本研究では、変数が1種類だけ使われているような文字列方程式(例えば  $XabXbaaaaa=aaaaabaXbX$ )に限定して、最小解の長さの上限を求めることにした。既存研究においては、方程式の長さの4倍程度でおさえられるだろうという予測はなされていたが、その厳密な値は知られていなかった。我々は、網羅的に1変数文字列方程式を枚挙しながらその解を求めるプログラムを作成して長時間動作させ、その結果を分類しながら問題の分析を行った。その過程の中で、文字列の繰り返し構造のもつ性質に着目することによって、最終的には解の上限を厳密に、しかも極めて単純な式によって表すことに成功し、数学的な証明を与えた。また逆に、任意に指定された長さに対して、この上限と一致する問題を構成的に与えるアルゴリズムも示した。これらの論理的帰結として、1変数文字列方程式は、解をもつとすれば、その最小解は高々、問題の長さで抑えられることになる。このことにより、実用的な観点から、1変数文字列方程式を解くアルゴリズムの高速化が行えることがわかった。

### (3) 高速パターン発見アルゴリズム

数値的に得られた観測データから、そこに内在する関係関数として抽出する手法は、補間や内挿、外挿として知られ、数値データ処理の基本として、さまざまな関数族に対するアルゴリズムが開発され、実用に供している。近年、HTML や XML のような半構造を持ったテキストデータや、DNA 配列、アミノ酸配列のようにほとんど構造の知られていないテキストデータが大量に蓄積され、利用可能になってきたことをうけて、これらのデータベースから、そこに内在する関係を文字列パターンとして発見するための手法の開発が望まれている。本研究では、この問題を、2つの文字列集合を与えられたときに、それを高精度で分離する文字列パターンを見つける最適化問題として定式化し、そのために有用なデータ構造とアルゴリズムを与えた。まず、探索アルゴリズムに関しては、部分文字列パターン、部分列パターン、変数を含むパターン等、さまざまなパターン族に対して、その形式言語としての特徴を生かした探索空間の枝刈り技法を取り入れることにより、ユーザの指定するスコア関数を最適化するパターンを実用的な時間で発見できるアルゴリズムの開発に成功した。また、この中で頻繁に用いられるパターン照合を高速に行うための索引構造として、有効無閉路文字列グラフ(DAWG)、有向無閉路部分列グラフ(DASG)等を対象として、その性質や高速な構築アルゴリズムを開発した。

## 5 自己評価:

文字列処理技術の進展という観点から、おおむね順調に成果が得られたと考えている。特に、最初のハードルであった高速フーリエ変換の適用方法を検討する過程で、文字の差異と数値の差異をどう対応づけるかという本質的な問題に直面したが、この解決策として打ち出した確率的な手法は、今後も他の問題に適用できそうな手応えを感じている。また、文字列方程式に関しても、1変数という非常に限定された状況下ではあるが、解の長さに関する厳密な上限を与えることができたことに満足している。なお、数値方程式においては、解が存在しない場合や、厳密解の計算が困難な場合には、近似解を求めたり、(2次方程式に対して複素数を考えるように)解空間を拡大したりすることによって解決を図る。これに習って、文字列方程式に対する「近似解」や、解空

間の拡大についての考察を重ねてきたが、この方向には今のところ成果に結びついていない。数値演算の活用による文字列処理の高速化として、ビット演算命令を駆使した処理を開発したが、この手法は近年のCPUの持つベクトル命令(MMXやSSEなど)の有効活用に繋がる。しかし浮動小数演算コプロセッサの活用については、今後の課題として残った。

また、本研究の「協調と制御」領域としての意義付けを模索する中で、2年目から複数ロボットの協調制御としてロボカップ・サッカーへの応用に新たに取り組んだ。この2年間で戦果としては大きく前進したものの、本研究で得られた理論的な成果がまだ応用には直接的には結びついていないのが現状である。数値列の処理と文字列の処理の相違を意識しながら、有効な技術を相互に活用する方向で、この研究も継続していきたい。このように、それぞれの方向に進展があった分、また新たな課題をかかえることになっているが、本研究に取り組む前と比較して、より高い視点から問題設定を行い、解決策を探ることができるようになったと実感している。

なお、ポスドク参加型として、他の同様な制度と比較しても、より有利な条件で雇用関係を結ぶことができたおかげで、極めて優秀な内外のポスドクを迎え入れ、研究を推進する大きな原動力となった。本制度に心より感謝する次第である。

#### 6 研究総括の見解:

文字列照合は、遺伝子配列の検索やインターネット検索のように膨大なデータベースからの検索時に必要不可欠で重要技術であるが、その計算量を削減する方法としてこのことに数値的演算手法を用いることの可能性を追求した。その結果、1変数の文字列方程式の解の上限を得るなど基本的な問題を解明すると共に、実用的には重要性の高い近似文字列照合に高速フーリエ変換の手法を応用して検索時間を短縮する試みを行うなど、基礎数学と実用的アルゴリズムの距離を短縮して、極めて独創性の高い成果を生み出したことは高く評価される。

#### 7 主な論文等:

- [1] Shunsuke Inenaga, Ayumi Shinohara, Masayuki Takeda, and Setsuo Arikawa, "Compact Directed Acyclic Word Graphs for a Sliding Window", Proc. 9th International Symposium on String Processing and Information Retrieval (SPIRE2002), Lecture Notes in Computer Science 2476, pp. 310-324, Springer-Verlag, September 2002.
- [2] Shunsuke Inenaga, Ayumi Shinohara, Masayuki Takeda, Hideo Bannai, and Setsuo Arikawa, "Space-Economical Construction of Index Structures for All Suffixes of a String", Proc. 27th International Symposium on Mathematical Foundation of Computer Science (MFCS2002), Lecture Notes in Computer Science 2420, pp. 341-352, Springer-Verlag, August 2002.
- [3] Shunsuke Inenaga, Hideo Bannai, Ayumi Shinohara, Masayuki Takeda, and Setsuo Arikawa, "Discovering Best Variable-Length-Don't-Care Patterns", Proc. 5th International Conference on Discovery Science (DS2002), Lecture Notes in Computer Science 2534, pp. 86-97, Springer-Verlag, November 2002.
- [4] Kensuke Baba, Ayumi Shinohara, Masayuki Takeda, Shunsuke Inenaga, and Setsuo Arikawa, "A Note on Randomized Algorithm for String Matching with Mismatches", Nordic Journal of Computing, Vol. 10, pp. 2-10, 2003.
- [5] Kensuke Baba, Satoshi Tsuruta, Ayumi Shinohara, and Masayuki Takeda, "On the Length of the Minimum Solution of Word Equations in One Variable", Proc. 28th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS2003), Lecture Notes in Computer Science 2747, pp. 189-197, Springer-Verlag, August 2003.
- [6] Heikki Hyyro, Jun Takaba, Ayumi Shinohara, Masayuki Takeda, "On Bit-Parallel Processing of Multi-byte Strings", Proc. 1st Asia Information Retrieval Symposium (AIRS2004),

October, 2004.  
査読付き論文 26 (上記含む)、口頭発表 2

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

Improvised Network: 自律的に再構成するモバイルネットワーク

### 2 研究者氏名: 西尾 信彦

ポスドク研究員: Gaute Lambertsen (研究期間 H.15.4 ~ H.17.3)

### 3 研究の狙い:

本研究では来るべきポスト PC 時代に向けて、情報通信機能を備えたデバイスが人や自動車などに付随して広域に分散しているような環境を想定して、そこでの新しい形のアプリケーションの構築を可能にする基盤ソフトウェアの提供を目標とする。本研究が想定する典型的なアプリケーションとしてはコンテキストウェアアプリケーションやセンサネットワークを用いた広域環境情報観測などで、より具体的にはショッピング情報配信から地雷搜索までを稼働させることを想定している。このために、大量に情報通信ノードが分散した状況で、常に適切なノードを動的に選択して参加させた即興的な(improvised)ネットワークの構築を提案する。この実現のためには各ノードが自律的に自己の状況を認識するとともに、それに動的に適応した挙動をとり、かつ他のノードと各自の持つ最新情報の授受を適宜行うことによりネットワークシステム全体としての適応活動を持続しなければならない。本研究では特に各ノードの位置などの状況情報を用いた動的なネットワークの再構成機構を与えることによって通信の効率化と作業の最適化を目的とする。具体的な研究アプローチとしては、(1)各ノードの自律的な制御手法を理論的に解析するとともにシミュレーションにより大量ノードの振舞いを解析する手法と、(2)想定に相応しい実機を用いての実証実験による手法の双方を併用する。

### 4 研究成果:

上記の2つのアプローチに沿って研究は進められた。以下にそれぞれについて得ることのできた研究成果について述べる。

#### 4.1 理論的手法による自律的ノード協調処理機構

本機構については位置情報処理機構である GOMASHIO の設計およびシミュレータ開発と評価より開始し、その後、研究対象をノードの移動パターンを意図的移動と非意図的移動に分けそのそれぞれについて研究開発を行なった。本研究において時々移動するノードの位置情報把握は重要な課題であり、GOMASHIO は少数のランドマークとなるノードとの相対的な位置関係を自律的に算出する位置情報取得機構である。その後、研究着手した位置意図的移動とは各ノードがアプリケーションの目的に沿うように移動を行なう場合で、引力・斥力モデルを提案しそのシミュレーションを実装し評価した。各ノードがアプリケーションの意図とは無関係に移動する環境はよりチャレンジングであり、またより本研究の目的に合致している。ここではまず動的かつ自律的にクラスタを構成する手法を研究開発し、シミュレーションによりその構成および維持に関し評価した。また研究期間の後半では、そのクラスタを効率的に利用することによってノード間協調を促進し通信量を効率化することによる省電力化を図るクラスタ内処理の設計およびシミュレータによる実装評価を行なった。さらに、本クラスタ構成機構についてはシミュレーションだけではなくその挙動に関し理論的解析を行ない性能の限界や実環境に適応する場合のノード数などの適正な数を想定することが可能になった。

#### 4.2 コビキタシステムにおける実機実行環境

本研究では多くの人々や車などが無線通信機能を有する携帯デバイスを持ち歩く環境を想定しており、そのような環境は今後のコビキタ社会の振興によりますます広まっていくと考えられる。そのため、シミュレーションや理論的な解析だけにとどめず想定環境に近い形での実機による研

究開発評価が必須となる。本成果は実機環境の充実に関するもので、まず最初に着手したのは想定するような大量ノードをそのまま利用するのではなく N ノードのうち 1 ノードのみ実機で N-1 ノードはシミュレータ上で実行する環境を実現する N-1 ネットワークシミュレーション を設計し開発評価した。続いて全ノードを実機で実装するのであるが、そのスケールを空間的にも時間的にも適応可能にする Multi-Hop on Table-Top 環境を設計、実装し 1 にて研究開発されていた動的クラスタ機構をその上で実装し動作、性能評価を行なった。

## 5 自己評価:

研究提案時期には日本ではほとんど研究されていなかったセンサネットワーク技術を取りあげ日本が得意とするユビキタスコンピューティングに適用するという試みは現在では多くの研究者がとりこんでいるトピックであり、本研究は先見的な研究として見るができると思われる。センサネットワーク技術では米国や現在の日本でも多くが現実の温度や湿度、加速度などといったセンサ機器を用いたアプリケーションを構築しようとしていて、そのため適用範囲が戦場や農場、工場などかなり限られた環境でのものに限定される傾向がある。しかし、本研究ではそれよりも高次の情報、例えば街中で探している店舗や駐車場といった目的地に近づいたという情報に対してのセンシング技術という意味で活用することを提案してきたために、より現実的で応用範囲の広い研究に拡げていくことができたと自負している。

3 ヶ年度にわたる研究期間において最も成功したと自己評価しているのは、当初よりシミュレーションや理論的解析のみではなく実機による実装評価を行なうという構想がほぼ達成できたという点である。当初、大量ノードによる実機評価は世界でもあまり例がなく、米国においてはその実験を行なうだけでも大々的に取り上げられる。それだけ物量や人的資源が必要であり軍事實験などの例がある。その意味でも本研究の成果である Multi-Hop on Table-Top 環境は比較的容易に実機環境でリアルコードが実証できるという意味で意義が大きいと考えている。本環境は単にそれだけで利用するものではなく実際に本研究で研究開発された動的かつ自律的クラスタリングプロトコルをその環境上で稼動することにも成功しており、同環境の完成度も高いものであると評価している。国際学会での成果発表でも注目を浴び、その後も海外の研究者から教材として利用したいとの申し出を受けている。その一方、N-1 ネットワークシミュレーションも国際学会では高い注目を浴びたものの、高価ではあるが類似の市販品があることがわかり、我々は開発を市販品がとり扱っていない無線移動ノードのサポートにしぼって行なった。

研究開発された自律的ノード協調処理機構には近年の研究動向に関しての萌芽的な研究があった。位置情報処理機構である GOMASHIO はその後、京都大学(ATR)や九州大学の研究者により SOM(Self-Organizing Map)的な手法による位置情報システムへと発展している。引力・斥力モデルについては直接には我々の研究対象ではない意図的移動をフォーカスしていたため時間や資源の関係で発展させなかったが、今後もまだ魅力的な応用範囲をもっており、その意味でもまだ研究課題を残しているといえる。

最後に動的な自律的クラスタリングプロトコルの研究開発についてもまだ基礎的な構成機構とデータ集約機構の研究開発が行なえた程度であり、このクラスタ機構を用いての属性ベースルーティングなど研究提案時に掲げた目標からは残念ながらまだ課題を残している。とはいえ、これより先の課題は一般的なあらゆるアプリケーションに適用可能な汎用の手法は存在しえないため、今後は特定のアプリケーションを想定しなければならない。その意味では、本研究に続くポストプロジェクトとしていくつか有望な研究活動を開始している。まず、特定アプリケーションとして、街中の防犯ネットワークシステムの構築を選び、その中でも近年多くの問題を憂慮される登下校時の学童見守りシステムを構築する研究プロジェクト(西大津における産学民による地域防犯システム、2004 年 11 月に記者発表、その後実証実験を実施中)を始めている。さらに、街中の人々をつなぐユビキタスシステム構築のために自動販売機を用いたインフラネットワークと人々の携帯する移動端末の構成するアドホックネットワークからなるハイブリッドネットワークを構築する研究プロジェ

クト(大阪府企画室ほかとの共同プロジェクトで「u-シティ構想」と呼ばれ、2004年11月に記者発表)を開始している。ここでは3年間の研究成果をさらに発展させたインフラネットワークとのハイブリッド環境を想定した技術開発を行っており、今後の街中ユビキタス環境の現出に重要な役割をもつと期待している。

本研究事業のポスドク参加型についてであるが、我々は当初ポスドクの人材獲得にかなり苦労した。理由は、様々にあった(時期の問題、他のポストなど多くの確定者からキャンセルされた)が我々の研究分野においては身分が継続的に保証されないポスドクには有能な人材があまり興味をもってくれないという点があったと思う。それをカバーする意味でも我々は海外の著名な研究者に声をかけポスドクを広範に募ったが、逆に海外からは我々の提供できる環境が(米国のそれと比較すると)魅力のあるものであったとはいいがたくやはり苦戦した。しかし、ひとたび人材さえ獲得できれば、本研究事業に参加できたポスドクにはその研究キャリア(少なくとも我が国においては)にはその実績面に関しても運営面に関しても申し分のない機会を与えうるものであると思う。多くの大学から助手ポストが有期に変わりつつある近年ではポスドクはさらにその重要度を増すものとするが、実質的な魅力を増す努力がまだまだ必要であるとする。その意味でも研究期間が今期より年度末まで延長可能になったことは多いに評価できると思う。

#### 6 研究総括の見解:

自律的に移動体ノード間に形成されるモバイルネットワークは、これからのユビキタス情報社会の一つの有力な技術である。本研究では、動的且つ自律的にクラスタを形成する自律ノード協調処理機構について理論的な解析とシミュレーションにより評価と性能の限界を明らかにした。続いて実機によるクラスタ形成をテーブルトップで実証したことは高く評価される。本研究の成果の上にたって、すでにその実用性に着目した複数の地域連携・産学連携プロジェクトがスタートしてその将来性に関しても特筆に値する。今後、実用化のための情報工学的問題の解決と同時に、他の手法との比較評価を深化させることにより独自性と有用性が確立されると考えられる。

#### 7 主な論文等:

- [1] G. Lambertsen, Y. Enokibori, K. Takeda, K. Tani, K. Shuto, N. Nishio: "Multi-Hop on Table-Top: A Scalable Evaluation Workbench for Wireless Ad-Hoc/Sensor Network Systems," The Sixth International Conference on Ubiquitous Computing 2004, 2004/9/7-10, UK
- [2] G. Lambertsen and N. Nishio: "Clustering Techniques for Cooperative Processing with Support for Unintentional Movement in Dynamic Sensor Networks", 情報処理学会 SACSIS2004 - 先進的計算基盤システムシンポジウム, 2004/5/26-28.
- [3] G. Lambertsen and N. Nishio: "Dynamic Clustering Techniques in Sensor Networks", ソフトウェア科学会ソフトウェアシステム研究会, 第7回プログラミングおよび応用システムに関するワークショップ(SPA2004), 2004/3/1-3.
- [4] 永田智大, 西尾信彦, 徳田英幸: "サービス利用状況の変化に対する適応支援機構", 情報処理学会 論文誌, 2003/3, Vol. 44, No. 3, pp. 835-847, 2003.
- [5] 岩井将行, 中澤仁, 西尾信彦, 徳田英幸: "分散コンポーネントによる即興的アプリケーション構成機構の実現", 情報処理学会論文誌「システムソフトウェアの新しい潮流」特集号, 2002/6, Vol. 43, No. 6, pp. 1664-1676, 2002.

他に口頭発表43

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

運動・思考・感性の脳内協調制御メカニズム

### 2 研究者氏名: 本田 学

ポスドク研究員: 中村 聡 (研究期間 H.14.1 ~ H.16.11)

### 3 研究の狙い:

人間において高度に発達した思考過程は、抽象化した情報を自由に操作することを可能にし、科学技術の発展を通して高度な文明社会を築いてきた。一方で、環境からの制約を失った思考過程が暴走すると、脳内世界が歪み、現実環境との間に深刻な不調和をおこすような事態も生じている。そこで本研究では、自由度の高い思考過程が、どのようにして環境との調和を保つようにコントロールされているかを解明するために、「運動と思考との共通制御機構」および「環境から与えられる感性情報による行動制御」の2項目を柱とする研究を実施した。研究項目1では「心の制御機構は現実環境を捉えそれに対して働きかける感覚運動制御機構の制御対象が連続的に変化したもの」との作業仮説に基づき、運動と思考に共通する神経機構と作動原理、そして両者相互の依存関係について、健常人と疾患例を対象とした非侵襲脳機能計測および経頭蓋磁気刺激による仮想傷害実験を組み合わせた検討をおこなった。研究項目2では、運動と思考を含む行動を協調的かつ暗黙的に制御する感性機能について、大橋の「感性の神経モデル」に立脚した実証的検証をおこない、ポジトロン断層撮像による血流測定、脳波計測、行動実験および生理活性物質計測による生体制御メカニズムの解明をおこなった。これらを通して、モノとココロを結ぶ脳の仕組みについての理解を深め、現代社会で深刻な問題となっているココロの荒廃に対する生理学的なアプローチの道を拓くことを目指した。

### 4 研究成果:

#### 4.1 研究項目1:「運動と思考との共通制御機構」

##### 運動前野吻側部の認知的操作に対する関与の証明

独自に開発した厳密に運動制御要素を排除した心内表象操作課題をもちいて、運動の高次制御にかかわるブロードマン6野(運動前野)吻側部の機能が、非運動性の心内表象の操作にも関わっていることをポジトロン断層法、機能的磁気共鳴画像マッピング、事象関連磁気共鳴機能画像法を組み合わせて明らかにした。

##### パーキンソン病における認知速度低下の証明と認知速度と運動速度の相関の発見

運動制御の要素を排して認知的操作速度を評価する課題を開発し、古典的には運動制御系の障害と考えられてきたパーキンソン病で、シンボル表象のシミュレーション速度が有意に低下するとともに、認知速度の低下が運動速度の低下と相関することを明らかにした。

##### パーキンソン病における認知速度低下が大脳基底核の機能不全によることの見

パーキンソン病において、メンタルシミュレーション課題遂行中の脳活動をポジトロン断層法により検討し、認知速度の低下が大脳基底核尾状核頭部の活性障害に起因することを発見した。

そろばん熟練者の優れた暗算能力が運動制御神経系を動員することにより実現することを発見

そろばん熟練者は、複雑な視覚運動制御を学習する過程で、数の表象を空間表象に変換することにより驚くほど大きな桁数の計算を正確におこなうことが可能になる。そろばん熟練者が暗算を行っているときには、視覚運動制御中枢である背外側運動前野が関わっていることを明らかにした。

##### 外側運動前野が表象の更新をともなわない空間表象の保持にかかわることを証明

そろばんの熟練者が数列を単純に保持記憶しているときの脳活動を計測し、数を空間表象に変換して保持するときに、背外側運動前野が活動することを示し、背外側運動前野は操作の種類によらず空間表象に特異的な役割を担っていることを明らかにした。

#### 内側と外側の運動前野が認知操作において領域特異的な必須の役割をもつことを発見

空間表象を操作するときには外側の運動前野の活動が、文字列表象を操作するときには内側の運動前野の活動が特異的に高まると同時に、それらの部位の機能を経頭蓋低頻度連続磁気刺激によって一過性に低下させることにより、課題選択的に成績が悪化することを発見した。これらの知見は、運動制御機構の重要な要素である運動前野が認知的操作においても必須の役割を果たしており、運動制御と同様に部位ごとに異なる役割分担をおこなっていることを示すものである。

#### 心内表象の操作プロセスのモデル化

そろばん熟練者の暗算プロセスを直接の題材として、認知的操作過程をモデル化し、amodal emulator の概念を提出するとともに、その神経機構として運動前野吻側部が想定されることを示した。

### **4.2 研究項目2:「感性情報による行動制御メカニズムの基礎的検討」**

#### 超高周波成分を含む音による感性反応が脳幹部と前頭前野の連動によることを発見

人間の耳に聞こえない超高周波成分を豊富に含む音は、音知覚を快適にする感性反応を誘導することが知られている。その神経基盤の全体像を探るため、ポジトロン断層撮像法をもちいて非可聴域超高周波成分を豊富に含む音を聴取時、同じ音源から超高周波成分を除去した音を聴取時、暗騒音(ベースライン)時の脳血流を計測し、主成分分析をもちいて互いに相関して活動する神経機能ネットワークの全体像を抽出した。その結果、第一成分として両側聴覚野を含む成分、第二成分として視床、視床下部、脳幹を中心として、前頭前野へと広がる成分が抽出された。この知見は、感性による行動制御モデルを直接支持する中核的知見である。

#### 感性応答が導く全身性反応として免疫系の賦活を発見

超高周波成分を含む音の聴取時には、免疫活性を示す血中 NK 細胞活性が上昇するとともに、唾液中のクロモグラニン A、免疫グロブリン A が有意に上昇することを発見した。

#### 感性反応が誘導する刺激受容行動促進効果を不特定多数の被験者で証明

公共空間に超広帯域音響呈示システムを設置し、音響信号を背景に流して不特定多数の利用者の質問紙調査を実施したところ、超高周波成分を豊富に含む音の呈示により快適性が向上するのに対して、同じ音源から作成した超高周波成分を除いた音の呈示では、むしろ音呈示がないときよりも快適性が低減することを示した。また平均滞在時間が延長する傾向を示した。

#### 感性反応が誘導する刺激受容行動促進効果を適意レベルをもちいた厳密な行動実験により証明

音呈示を行っているときに被験者に自由にボリューム調整させると、超高周波成分を含まない音よりも含む音のほうを、またさらに超高周波成分のみを+6dB 増強した音のほうを、より大音量で聞こうとすることを発見した。このことは感性反応による刺激受容行動促進効果を示すものと考えられる。

### **5 自己評価:**

当初計画に対して良好な成果を残すことができたと考えている。特に思考の基盤となる認知的制御において、運動制御の中核である運動前野が、領域特異的に必須の働きを担っていることを、世界で初めて示すことができた。さらに環境に含まれる知覚圏外の音情報が、脳幹から前頭前野にいたる神経回路の活性化を介して接近行動を誘導することを示すことができた。

また当初計画に含まれていた以下の2点については、研究開始後、技術的な問題が解決されず、本研究期間では着手を見送った。今後の課題として引き続き検討をおこなっていく予定である。

#### 内因性ドーパミン計測によるドーパミン系と思考制御系との関連の検討

研究計画時には内因性ドーパミン計測についての先駆的報告がなされていたが、その後、計測上の技術的な問題があきらかになり、方法論の全面的な見直しが世界中の有力な施設で行われた。その結果、今回の研究からは全面的に見送った。

#### 視覚情報による感性反応効果

高精細視覚情報をもちいた実験を実施する予定であったが、fMRIスキャナ内に呈示する画像の精細度を十分に高めることが困難であったため、今回は聴覚刺激にしばった検討を行った。

本研究では、ポスドク参加型として採択した研究者に「感性情報による行動制御メカニズムの基礎的検討」をかなり独立性をもたせた形で遂行させた。そのことにより、結果的には極めて効率的な研究運営が実施できたと考えており、本制度は中規模の研究プロジェクトとして適切なものであったと感じている。

#### 6 研究総括の見解:

こころの進化的発生および発達の出現のメカニズムはコミュニケーションにとっても極めて重要であるにもかかわらず、その解明が進んでいない。本研究課題は、思考と運動機能の関連についてイメージングと磁気刺激の実験手法により、健常人と運動機能障害をもつパーキンソン病患者について行い、あたらしい数々の興味ある事実を明らかにした。即ち、思考は外界を認識して対応する運動機能がその対象を変化させたものであるとの考えから、脳内において思考には運動野の神経活動が特異的に関与することを初めて実証したことは重要な成果である。今後、動物の生理学研究における関連データが蓄積されれば、この壮大なテーマのより精緻な理解が進むものとする。

#### 7 主な論文等:

##### 代表的論文

- [1] Hanakawa T, Honda M, Sawamoto N, Okada T, Yonekura Y, Fukuyama H, Shibasaki H (2002) The Role of Rostral Brodmann Area 6 in Mental-operation Tasks: an Integrative Neuroimaging Approach. *Cereb Cortex* 12:1157-1170.
- [2] Sawamoto N, Honda M, Hanakawa T, Fukuyama H, Shibasaki H (2002) Cognitive slowing in Parkinson's disease: a behavioral evaluation independent of motor slowing. *J Neurosci* 22:5198-5203.
- [3] Hanakawa T, Honda M, Okada T, Fukuyama H, Shibasaki H (2003) Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage* 19:296-307.
- [4] Yagi R, Nishina E, Honda M, Oohashi T (2003) Modulatory effect of inaudible high-frequency sounds on human acoustic perception. *Neuroscience Letters*, 351:191-195.
- [5] Tanaka S, Honda M, Sadato N (2005) Modality-Specific Cognitive Function of Medial and Lateral Human Brodmann Area 6. *J Neurosci*, 25:496-501.
- [6] Hanakawa T, Honda M, Hallett M (2003) Amodal imagery in rostral premotor areas. *Behavioral and Brain Sciences*, In press

他に、論文5、口頭発表22

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

感覚ノイズによる脳機能の活性化手法

### 2 研究者氏名: 山本 義春

ポスドク研究員: 相馬 りか (研究期間 H.13.12 ~ H.16.7)

ホスドク研究員: Safonov Leonid (研究期間 H.14.11 ~ H.17.3)

ホスドク研究員: Struzik Zbigniew (研究期間 H.15.8 ~ H.16.10)

### 3 研究の狙い:

人工的計算機と異なり、ヒトを含めた生物の脳・神経系は電氣的・化学的ノイズの中で作動しているといわれる。そのような環境中で脳・神経系が如何にして頑健性を維持しているかについては未だ十分明らかになっていない。しかしながら、進化の過程で、外界あるいは内在するノイズを逆に利用するようなメカニズムが脳・神経系に獲得されたと考える研究者も存在する。このようなメカニズムの候補として挙げられているのが確率共振現象である。確率共振は、微弱な入力信号に対する非線形系の応答が適度な強度のノイズによって増強されるという現象で、横軸にノイズ強度、縦軸に信号/ノイズ比など信号の検出感度を示すパラメータをとると、中央が高い、釣鐘型のグラフが得られる。これは元来氷河期の周期的到来を説明するために考え出された概念であるが、その後幅広い物理系でその存在が確認された。さらに、いくつかの実験研究によって、感覚神経細胞におけるノイズ印加が閾値下入力信号の検出力を高めることが明らかになり、外界あるいは脳・神経系に内在するノイズは、計算機の場合とは異なり、脳・神経系の動作に弊害を及ぼすどころか、ある場合には有利に働くという概念が定着した。

そこでまず、我々は、ヒトの脳機能として血圧調節機能に着目し、健常成人の心肺圧受容器に微小な周期信号を入力し、同時に頸動脈洞圧受容器にランダムな機械的刺激を加えたとき、心肺圧反射による心拍数調節機能および遠心性交感神経調節機能が向上するという現象を見出した。そしてこの場合、入力信号およびノイズの情報がそれぞれ異なる受容器からの求心路を介して脳(延髄)において初めて合流することから、我々は、ヒトの脳機能を確率共振によって高め得ると結論した。これを受けて、本研究では新たな研究目標として、1. 延髄より上位の高次脳における確率共振の惹起とそのメカニズムの検討、2. 確率共振の臨床応用、の2点を設定した。

### 4 研究成果:

#### 4.1 高次脳における確率共振の惹起

まず、ステレオスコープを用いて片眼に選択入力した視覚刺激に対する知覚 - 行為系の応答が、対眼に分離入力した視覚ノイズによって改善されるかを検討した。具体的には、コンピューター画面上に表示されるランダムに変化するグレイレベル(ノイズ)を一方の眼に入力し、対眼には微細かつ予測不能なグレイレベルの変化(入力信号)を入力、信号に合わせて握力を発揮させるという課題を、健常成人を対象として実施した。発揮された握力とグレイレベル信号との相

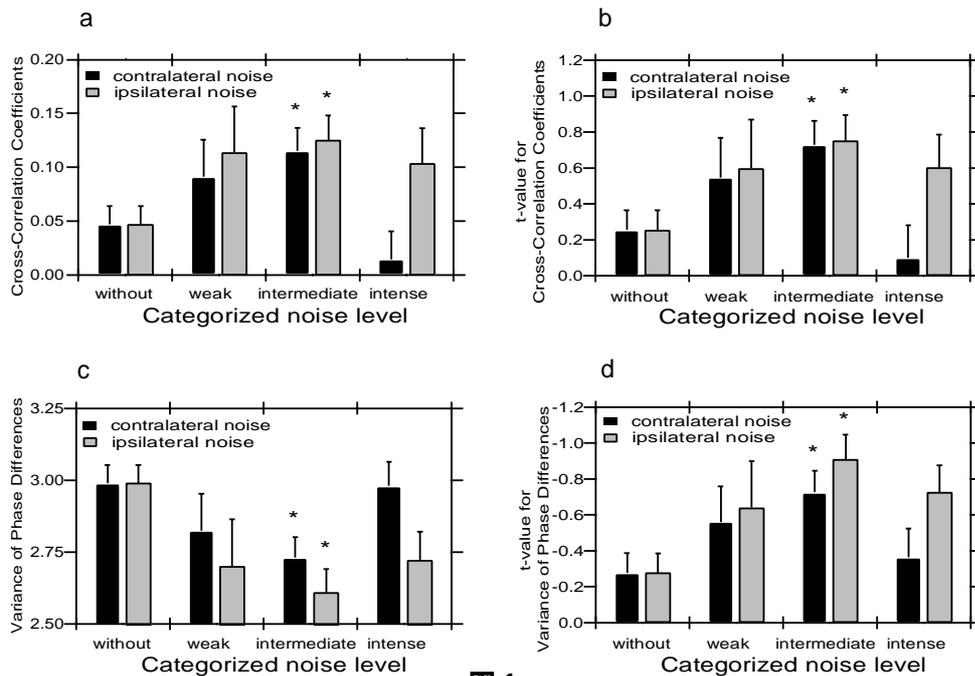


図 1

ノイズ強度ごとの相互相関係数(a), 相互相関係数 t 値(b), 位相差分散(c), 位相差分散 t 値(d) 中程度ノイズで t 値の有意な上昇が観察された。

互相関係数、解析信号化された両信号の位相成分から瞬時位相差分散値を評価したところ、中程度ノイズで相互相関係数の上昇、位相差分散値の減少、およびそれぞれの t 値の有意な上昇が観察された(図1)。この結果から、高次脳の機能である視覚刺激に対する知覚 - 行為系の応答において、確率共振が生じることが示された(主論文[5])。

そこで、上記とほぼ同様のタスクを実施した際の脳波の異なる電極間の位相同期度を検討したところ、脳波 帯域(30Hz)では、最適ノイズ強度条件で、信号呈示後 200-250 ミリ秒付近に過渡的で大規模な位相同期が観察された。一方 帯域(12Hz)では、弱いノイズ強度で 300 ミリ秒以降に持続的かつ有意な位相同期が観察された。個別の検討では、視覚 - 運動関連対および視覚関連対の位相同期度が向上していた。帯域(12Hz)での同期現象に関しては、信号の知覚自体と関連していることが行為パフォーマンスの解析から示唆されたが、一方で 帯域(30Hz)での同期現象は、ノイズによる行為パフォーマンスの向上と直接関連することがわかった。いずれにせよ、視覚刺激に対する知覚 - 行為系の応答においては、適度な強度のノイズ印加によって関連する脳内部位間の位相同期度が高まり、行為のレベルでの確率共振が生じると考えられた(論文査読中)。

#### 4.2 確率共振の臨床応用

一次性自律神経不全 (Primary Autonomic Failure; PAF) 患者を対象に、傾斜台による水平から 60 度ないし 30 度頭部挙上の起立負荷試験を行い、頸動脈洞圧受容器に加えたランダムな空気圧刺激の影響を観察した。その結果、患者群では頭部挙上時の心拍数、血圧の応答がノイズ印加によって向上することが示され、頸動脈圧受容器に対するノイズ刺激を利用した起立性低血圧の症状改善の可能性が示唆された(主論文[6])。

一方、脳幹へ別経路から電氣的にノイズを印加する経路として、経皮的前庭電気刺激法を試みた。傾斜台上で、仰臥位閉眼の被験者に対して、擬似的に上下方向の前庭感覚をもたらす電極配置で印加したノイズ強度を漸増し、傾斜台の周期的な上下動に対する心拍数の応答を検討した。心拍数と傾斜角の共分散で循環応答を評価した結果、循環応答はノイズ強度の増加に伴い一旦向上したのち低下するという典型的な確率共振を示し、通電感覚閾値を最大強度としたノイズの約 60%強度で応答が最適化された(図2)。一方、ノイズ源としての有効性を 1/f ノイズとホワイトノイズで比較したところ、1/f ノイズが有意に低強度のノイズで応答を最適化した。この結果は、脳、ひいては自然界における 1/f ノイズの存在意義を考える上で、重要な示唆を与えるものと考えられる(主論文[4])。

この結果を受けて、中枢性自律神経不全患者に対する臨床応用を目的として、携帯型の前庭電気刺激装置を開発した。その上で、当大学附属病院に入院中のパーキンソン病および PAF のうち多系統萎縮症 (MSA) の患者計 15 名に対し、前庭電気ノイズ刺激を行った際の心拍数および体動の動態を検討した。連続した 2 日間の 1 日を前庭電気ノイズ刺激、1 日をコントロールとして、患者ごとにランダム順に条件を振り分け、携帯型の装置で心拍数および体幹部加速度の連続計測を実施、予め健康人

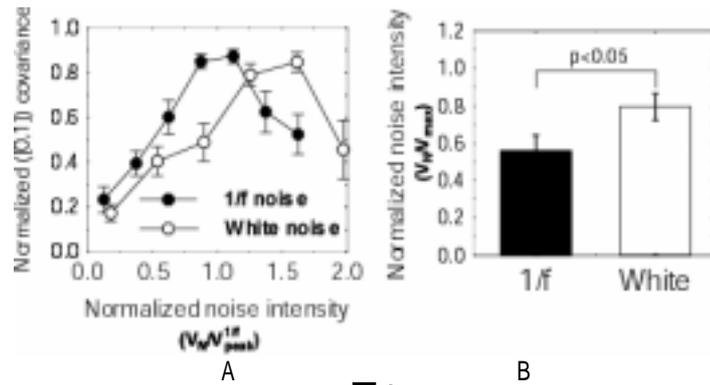


図2

A: ノイズ強度 (横軸) と起立刺激に対する心拍数の応答、B: 最適なノイズ強度

A: ノイズ強度の増加に伴い、心拍数増加率と頭部挙上角度の共分散は一旦増加したのち低下するという確率共振特有の応答を示した。(B) 印加するノイズを 1/f ノイズとした場合と、ホワイトノイズとした場合を比較すると、1/f ノイズの方が有意に弱いノイズ強度で応答を最適化した。

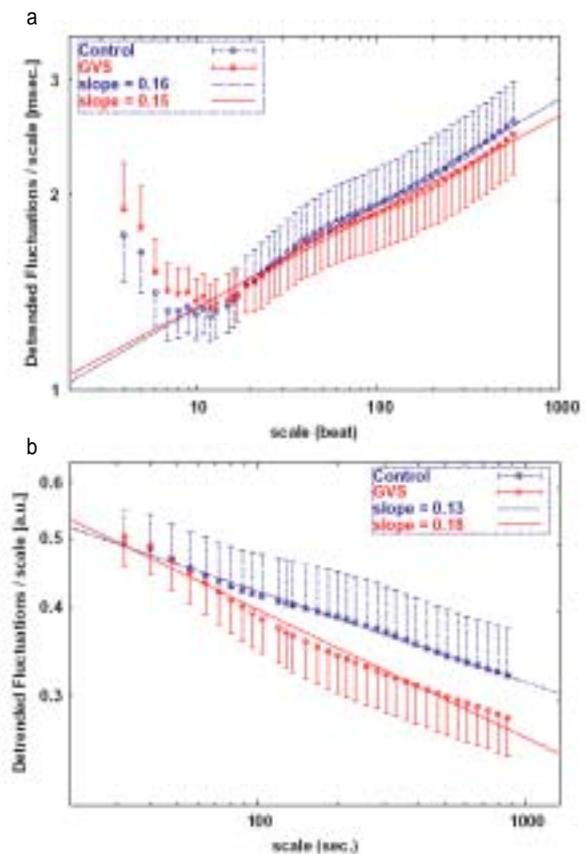


図3

MSA、パーキンソン病患者の心拍数(a)および体動(b)の Detrended fluctuation analysis

赤: 前庭電気刺激、青: コントロール。エラーバーは標準誤差。

および疾患を対象にその効果を確認した時系列統計解析法(主論文[1] - [3])により、自律神経活動性、行動反応性について評価した。MSA 患者の心拍数については、前庭電気ノイズ刺激によって、10 拍以内の短時間スケールでの変動が有意に増大した(図3a)。このスケールでの変動は主として心拍数の呼吸性変動の大きさを表し、その大きさは副交感神経活動の評価指標として広く用いられている。一般に、副交感神経活動の上昇は循環調節においては血圧に与えられた急激な外乱に対する補償性向上をもたらすことから、前庭電気ノイズ刺激は、MSA 患者の自律神経反応性を亢進させたと考えられる。一方、parkinsonism を呈する PD および MSA 患者における体動時系列については、スケールを横軸、非定常トレンドを除去したゆらぎの大きさを縦軸とした対数プロットの傾きから算出されるハースト指数が、前庭電気ノイズ刺激によって有意に低下した(図3b)。ハースト指数の大きさは変動の持続性に依存し、体動の場合、緩慢(持続的)な動作で増大、すみやかな(反持続的)動作で減少を示す。したがって、前庭電気ノイズ刺激によって、患者のすみやかな動作パターンが増加したと考えられ、パーキンソン病の症状のひとつである動作緩慢の改善が示唆された(論文査読中)。

#### 5 自己評価:

これまで3年間の研究によって、ヒト脳における確率共振に関して、当初予定していた研究成果をほぼ得ることができた。また、確率共振を切り口として、「脳におけるゆらぎと知覚」「1/f ゆらぎの存在意義」「生体長期統計による自律神経・行動系異常の診断法」といったより広範なトピックに対しても知見が得られた。さらに、前庭電気刺激の研究成果の新聞掲載をきっかけに、全国の多数のパーキンソン病患者の方々から手紙やメールをいただき、この研究の意義を再認識した。MSA やパーキンソン病など神経難病の非薬物的治療法開発の第一歩としては順調であり、(未だ予算的目処が立たないものの)今後幅広い対象で検討を重ね、一日も早くご協力いただいた患者さんに成果を還元したい。

ポスドク制度については、生理学実験、数値解析、理論的考察、臨床応用といった、多面的なアプローチを可能にしたのはそれぞれ異なる特性をもつポスドクの活躍によるものであり、本研究の遂行上、ポスドクの存在は不可欠で、非常に有用な制度であった。

#### 6 研究総括の見解:

非線形閾値システムは適切な大きさのノイズを加えることにより、その状態遷移確率が増大する現象は確率共振と呼ばれ、そのメカニズムは検出器に応用されるばかりでなく、ザリガニなどの生体においても存在することが知られていた。本研究は、ヒトの感覚系に類似現象が存在すること、さらにその MSA やパーキンソン病などへの臨床応用が可能であることを示した。また、その動作原理が元来の確率共振そのものであるかなどの基礎的研究にも成果を挙げており、その幅広い研究成果は高く評価される。

#### 7 主な論文等:

- [1] Struzik, Z. R., J. Hayano, S. Sakata, S. Kwak, and Y. Yamamoto. 1/f scaling in heart rate requires antagonistic autonomic control. *Physical Review E* 70: 050901(R)-1-4, 2004.
- [2] Kiyono, K., Z. R. Struzik, N. Aoyagi, S. Sakata, J. Hayano, and Y. Yamamoto. Critical scale-invariance in healthy human heart rate. *Physical Review Letters* 93: 178103-1-4, 2004.
- [3] Ohashi, K., L. A. N. Amaral, B. H. Natelson, and Y. Yamamoto. Asymmetrical singularities in real-world signals. *Physical Review E* 68: 065204(R)-1-4, 2003.
- [4] Soma, R., D. Nozaki, S. Kwak, and Y. Yamamoto. 1/f noise outperforms white noise in sensitizing baroreflex function in the human brain. *Physical Review Letters* 91: 078101-1-4, 2003.
- [5] Kitajo, K., D. Nozaki, L. M. Ward, and Y. Yamamoto. Behavioral stochastic resonance within

the human brain. Physical Review Letters 90: 218103-1-4, 2003.

- [6] Yamamoto, Y., I. Hidaka, D. Nozaki, N. Iso-o, R. Soma, and S. Kwak. Noise-induced sensitization of human brain. Physica A 314: 53-60, 2002.

国際誌論文 18 件(上記を含む)、国際学会発表 11 件(招待講演 4 件を含む)

国内誌論文 14 件、国内学会発表 7 件(招待講演 6 件を含む)