

戦略的創造研究推進事業  
個人型研究(さきがけ)  
研究領域事後評価用資料

研究領域「脳情報の解読と制御」

研究総括:川人 光男

2016年3月



## 目 次

1. 研究領域の概要.....	1
(1) 戦略目標 .....	1
(2) 研究領域 .....	3
(3) 研究総括 .....	3
(4) 採択課題・研究費 .....	4
2. 研究領域および研究総括の選定について(JST 記載) .....	5
3. 研究総括のねらい.....	6
4. 研究課題の選考について.....	7
5. 領域アドバイザーについて.....	8
6. 研究領域の運営の状況について.....	9
7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況.....	12
8. 総合所見.....	15



## 1. 研究領域の概要

### (1) 戦略目標

「運動・判断の脳内情報を利用するための革新的要素技術の創出」

運動や判断を行っている際の脳内情報を解読し、外部機器や身体補助具等を制御するブレイン・マシン・インターフェイス(BMI)は、障害等により制限されている人間の身体機能を回復・補完するためのイノベーション創出に貢献する研究分野である。そのため、本戦略目標では、BMIの開発に必要となる脳の活動から情報を読み出す脳情報解読技術、得られた脳内情報をもとに外部機器等を制御する機器制御技術、外部情報の脳へのフィードバック技術等を実現するための従来にない革新的な要素技術の創出を目標とする。

### ①政策上の位置付け

第3期科学技術基本計画におけるライフサイエンス分野の「生命プログラム再現科学技術」、「臨床研究・臨床への橋渡し研究」、及び情報通信分野の「世界に先駆けた家庭や街で生活に役立つロボット中核技術」と密接に関連する。基礎的な脳の動作原理に迫る基礎研究への展開と理解を背景とした重要技術の開発の両面から、本戦略目標は、脳高次機能の統合的理解(生命プログラム再現科学技術)や神経義肢の開発等を通して、人の医療技術開発(臨床研究・臨床への橋渡し研究)に直接関わるものである。また、人の判断を取り入れた制御技術の開発(世界に先駆けた家庭や街で生活に役立つロボット中核技術)として重要であり、こうした戦略重点科学技術と深く関連がある。長期戦略指針「イノベーション25」及び「新健康フロンティア」等の報告書においても、失われた身体機能の補完・拡張技術として、本戦略目標と同様の技術開発が必要とされている。

### ②当該研究分野における研究振興方策の中での本研究事業の位置づけ、他の関連施策との切り分け、政策効果の違い

脳科学関連の施策としては、2007年度戦略目標「精神・神経疾患の診断・治療法開発に向けた高次脳機能解明によるイノベーション創出」、2008年度新規事業「脳科学研究戦略推進プログラム」が挙げられる。2007年度戦略目標「精神・神経疾患の診断・治療法開発に向けた高次脳機能解明によるイノベーション創出」は、精神・神経疾患の予防、診断、治療法開発に資する研究を推進するものである。そのため、運動・判断の脳内情報を利用した外部機器制御等に資する革新的要素技術の研究を推進する本戦略目標とは異なる。また、2008年度新規事業「脳科学研究戦略推進プログラム」は、脳内情報の解読と機器接続等に関する応用技術、計算論的神経科学、脳型情報システム等の開発を行う「脳に学ぶ」領域等において、優れた実績や他機関を支援する能力を有する大学、独立行政法人、民間企業等から公募により研究拠点(中核機関と参画機関で構成)を整備し、戦略的に研究開発を推進することにより、これまでに得られた研究成果を確実に医療・福祉・教育・産業等につ

なげ、社会ニーズへの還元を加速させることを目的としている。そのため、従来にない革新的要素技術の創出を目的としている本戦略目標とは異なる。なお、本戦略目標の研究実施に当たっては、科学技術・学術審議会脳科学委員会における議論を踏まえ、上記の考え方を基に他の研究事業との役割分担を明確にしつつ推進体制を構築する。

### ③この目標の下、将来実現しうる成果等のイメージ、他の戦略重点科学技術等に比して優先して実施しなければならない理由、緊急性、専門家や産業界のニーズ

ヒトの体から得られる生体信号を活用して外部機器を制御する技術、例えば個人を特定する生体認証技術や筋電信号に基づくロボットスーツ等が社会に認知されつつある。このような状況の中で、脳内情報を解読し外部機器等を制御する BMI の開発が、近年、米国を中心に急速に発展してきている。高齢化社会が進む我が国において、BMI は身体機能の低下を補助あるいは回復する技術として優先して実施すべき課題であり、また、計算論やロボティクスの強みを生かし、我が国が世界をリードできる研究分野である。本戦略目標の研究開発で創出される革新的要素技術により、考えたとおりに動作する義手・義足等の高機能福祉機器が開発され、例えば、脊髄損傷患者の歩行を可能にし、脳卒中等による半身麻痺からの神経リハビリテーションによる回復が望めるなど、現在の技術では回復できない疾患等による身体的な障害の克服に寄与するものと考えられる。現在、脊髄損傷に限っても、日本国内には約 10 万人に及ぶ対象者がおり、そして毎年約 5 千人の受傷者が新たに生じている（「日本せきずい基金」資料）。また、こうした身体機能を補完・強化する技術は、加齢に伴う自然な身体機能の低下を補助する技術にもつながるものであり、社会的な負担が大きい介護を軽減することに貢献する。さらに、手足の運動のみではなく、明瞭な会話の支援、全身麻痺患者の意思の伝達などのコミュニケーションを実現する手段としても期待されるものである。

### ④本研究事業実施期間中に達成を目指す研究対象の科学的裏付け

脳活動から信号を読み出す技術については、非侵襲型の読み出し技術として脳波計測以外に近赤外線計測技術を組み合わせた技術開発の進展が著しい。得られた信号から必要な情報を解読（デコーディング）する技術については、ベイズ推定を用いたデコーディング技術が機能的 MRI からの信号について実現されつつあり、他の計測可能な脳からの信号にもこのような推定手法が適応できることが期待され始めている。得られた脳内情報をもとに外部機器等を制御する技術については、特に手の運動や歩行を代替するロボットの制御技術の発展が本戦略目標の達成に寄与できるものと考えられる。さらに、運動生理学や機能的電気刺激に関する基礎的研究成果が活用されるものと期待される。外部情報を脳へフィードバックする技術については、脳の可塑的变化に関する計測技術の発展と基礎的知見の蓄積が進んでおり、また、聴覚、視覚、触覚などの感覚情報を高感度に計測し、必要な情報に加工する技術に関する研究が進展してきている。本戦略目標により従来にないアイデ

アを引き出す研究開発が形成されれば、既存技術の単なる改良ではない独創的技術開発が伸展することが期待される。また、個々の要素研究に関する研究者は我が国に多く存在しており、そうした研究者の中から従来にない発想による革新的な研究開発提案が数多くなされることが想定される。

#### ⑤この目標の下での研究実施にあたり、特に研究開発目標を達成するための留意点

本戦略目標を達成するためには、臨床医学、基礎医学、生物学、工学、情報学など多方面の研究者の協力が不可欠であり、学問分野を超えた連携が必要となる。また、研究の実施に当たっては、倫理的側面など社会との調和に配慮しつつ推進していく必要がある。さらに、本戦略目標を効果的に運営していくため、研究総括は「脳科学研究戦略推進プログラム」と連携し研究管理運営を行う必要がある。

#### (参考)本研究事業実施期間中に達成を目指す政策的な目標

本戦略目標の下に、障害等により制限されている人間の身体機能を回復・補完するためのイノベーションを創出するために必要な技術としては、脳の活動から情報を読み出す脳情報解読技術、得られた脳内情報をもとに外部機器等を制御する機器制御技術、外部情報の脳へのフィードバック技術等がある。本戦略目標の研究実施期間中の研究開発目標としては、BMIの実用化に向けて必要となる上記技術等を実現するための革新的な要素技術の創出を目指す。

#### (2) 研究領域

「脳情報の解読と制御」(2008年度発足)

本研究領域は、運動・判断の脳内情報を利用するための革新的要素技術の創出を目的とし、脳科学の基礎的研究と社会に大きな貢献をすることが期待される応用分野をつなぐ、探索的研究や革新的技術開発を対象とする。

具体的には、ブレインマシンインタフェース(BMI)、ニューロリハビリテーション、ニューロマーケティング、ニューロエコノミクス、ニューロゲノミクス、ニューロエシックスなどの応用分野に資する研究と一体的に、脳の活動から情報を読み出し、操作するための脳情報解読制御技術等の基礎的な研究を進めていくことが期待される。

このような観点から、本研究領域では、脳科学とその応用分野の広がりに対応して、計算・実験神経科学、工学、臨床医学、基礎生物学、経済学を含む社会科学、心理学を含む人文科学、情報学など多方面の研究者を対象とし人材を育成するとともに、次世代の研究の基礎を築く。

#### (3) 研究総括

川人 光男(国際電気通信基礎技術研究所脳情報通信総合研究所 所長)

(4) 採択課題・研究費

採択年度	研究者	所属・役職 上段:研究終了時 下段:応募時	研究課題	研究費 (百万円)
2008 年度	磯田昌岐	関西医科大学医学部 准教授 理化学研究所 研究員	他者と自己の戦略的行動モニタリングとその脳内情報表現	40
	末谷大道	鹿児島大学理学部 准教授 (同上)	非線形多様体学習による脳情報表現とそのBMI技術への応用	86
	高橋晋	同志社大学大学院 脳科学研究科 准教授 京都産業大学コンピュータ理工学部 助教	意図した方向を解読し移動車を操作するBMIの開発	43
	高橋英彦	京都大学大学院医学研究科 准教授 放射線医学総合研究所 主任研究員	情動的意思決定における脳内分子メカニズムの解明	40
	高橋宏知	東京大学先端科学技術研究センター 講師 (同上)	情報理論と情報縮約による適応的デコーディング	40
	中村加枝	関西医科大学医学部 教授 (同上)	ドパミンセロトン相互抑制による報酬・嫌悪情報処理機構	93
	服部憲明	森之宮病院神経リハビリテーション研究部 部長 (同上) 部員	脳卒中中の機能回復の機序の解明とBMIの基礎的応用	47
	花川隆	国立精神・神経医療研究センター 脳病態統合イメージングセンター 部長 国立精神・神経センター神経研究所疾病研究第七部 室長	BMI学習による神経可塑性変化の非侵襲多角計測	116
	林勇一郎	京都大学医学研究科 特任助教 大阪バイオサイエンス研究所 共同研究員	単一ニューロン分解能の神経活動記録・制御技術の開発と応用	37
	山田麻紀	理化学研究所脳科学総合研究センター 研究員 三菱化学生命科学研究所 主任研究員	機能的神経回路形成の可視化と誘導	39
	吉村由美子	自然科学研究機構岡崎統合バイオサイエンスセンター 教授 名古屋大学環境医学研究所 准教授	視覚系をモデルとした、情報処理の基盤をなす神経回路の解析	41
2009 年度	池谷裕二	東京大学大学院薬学系研究科 准教授 (同上)	神経回路網が示す自発的可塑性のルール抽出と制御	41
	小川宏人	北海道大学大学院理学研究院 准教授 (同上)	実行動下動物における方向情報の脳内表現と変換機構の解明と展開	46
	鎌田恭輔	旭川医科大学医学部 教授 東京大学付属病院 講師	脳機能画像と多チャンネルelectrocorticogram融合による言語機能関連BMIの開発	33
	北城圭一	理研BSI-トヨタ連携センター 連携ユニットリーダー 理化学研究所 副チームリーダー	リアルタイムTMS制御による脳情報処理の操作的検証	45
	喜多村和郎	東京大学大学院医学系研究科 准教授 (同上) 助教	感覚情報をコードする局所神経回路の機能構築	40
	河野崇	東京大学生産技術研究所 准教授 (同上)	機能的シリコン神経ネットワークの構築	90
	駒井章治	奈良先端科学技術大学院大学バイオサイエンス研究科准教授 (同上)	光学的BMIによる感覚・運動情報の解読と応用	100
	関和彦	国立精神・神経医療研究センター神経研究所 モデル動物開発部 部長 自然科学研究機構・生理学研究所 助教	感覚帰還信号が内包する運動指令成分の抽出と利用	118
	竹本研	横浜市立大学医学部 助教 (同上)	記憶獲得維持の分子システムの解明～記憶の消去は可能か？	61



2009 年度	西村 幸男	自然科学研究機構・生理学研究所 准教授 ワシントン大学医学部 訪問研究員	人工神経接続によるブレインコンピューターインターフェイス	100
	林 隆介	産業技術総合研究所 研究員 理化学研究所 研究員	BMIを介した観察者間の知覚共有技術の開発	44
	肥後 範行	産業技術総合研究所 主任研究員 (同上)	大脳皮質への神経活動入力による機能回復促進	40
	南本 敬史	放射線医学総合研究所 チームリーダー (同上) 主任研究員	モチベーションの脳内機構と制御	40
	渡部 文子	東京慈恵会医科大学・総合医学研究センター 准教授 東京大学医科学研究所 助教	情動記憶形成と消去を担う扁桃体局所回路の制御機構の解明と応用	40
2010 年度	天野 薫	情報通信研究機構 主任研究員 東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教	MEGを用いた知覚における時間情報のデコーディング	41
	上川内 あづさ	名古屋大学大学院理学研究科 教授 東京薬科大学大学院新領域創成科学研究科 助教	ショウジョウバエ脳において聴覚情報処理を行う神経基盤の解明	41
	河野 剛士	豊橋技術科学大学工学部 准教授 (同上)	電気、化学、光学的マイクロ/ナノニューロプロブレインの開発	82
	玉田 篤史	新潟大学大学院超域学術院 准教授 理化学研究所脳科学総合研究センター 研究員	脳の構造的・機能的左右非対称性の解明	62
	土谷 尚嗣	モナシ大学心理精神学部 准教授 カルフォルニア工科大学人文社会科学部 研究員	高次認知機能を支える脳部位間の機能的つながりを多電極同時記録データから解析する	41
	徳田 崇	奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 准教授 (同上)	光・電気マイクロチップによる高分解能ニューラルインターフェイスとニューロ-LSI融合BMIの開発	39
	春野 雅彦	情報通信研究機構 主任研究員 玉川大学脳科学研究所 グローバルCOE准教授	社会ダイナミクスの多様性を脳活動から読む進化型強化学習	85
	細谷 晴夫	国際電気通信基礎技術研究所 研究員 東京大学情報理工学系研究科 講師	ベイジアンネットに基づく視覚皮質モデルと高次視覚野からの認知的情報の解読	52
	宮田 麻理子	東京女子医科大学医学部 教授 (同上)	末梢神経損傷によって誘導される上位中枢神経回路の改編と動作原理	39
	森口 佑介	上越教育大学大学院学校教育研究科 准教授 (同上) 講師	脳情報の解読による幼児特有の認知的世界の解明	56
	矢尾 育子	浜松医科大学メディカルフオトニクス研究センター 准教授 関西医科大学医学部 講師	質量顕微鏡法による神経伝達物質のイメージング	46
	山田 真希子	放射線医学総合研究所 サブリーダー (同上) 研究員	現実予測に基づく現実喪失感覚の分子・神経メカニズム解明	40
				総研究費

## 2. 研究領域および研究総括の選定について (JST 記載)

### (1) 研究領域の選定について

本研究領域は、基礎的な脳の動作原理に迫る基礎研究への展開と理解を背景とした重要技術の開発の両面から、運動・判断の脳内情報を利用するための革新的要素技術を創出する研究を対象とする。本研究領域は、脳科学研究の重要な基盤の一つとなる脳情報の双方向活用を目指して、脳の活動から情報を読み出す脳情報解読技術、その得られた脳内情報をもとに外部機器などを制御する機器制御技術、外部情報の脳へのフィードバック技術等を実現するための革新的要素技術を創出するための研究を対象とし、戦略目標の達成に向

け適切に設定されている。

本研究領域は、医学、工学、生理学、生物学、情報学などを専門とする各研究者が互いに交流、啓発し、研究に取り組むように門戸を開いていることから、幅広い分野から多様な研究の応募が期待されるように設定されており、優れた研究提案が多数見込まれる。

## (2) 研究総括の選定について

川人光男は、脳科学において、理論と実験を組み合わせる様々な業績を上げ、最も顕著な業績として、運動制御と高次認知機能に重要な役割を果たす小脳に、身体の一部、道具、他人の脳などの機能をまねる神経回路が学習によって獲得されるという「小脳内部モデル理論」があげられる。また、最近では ICORP 「計算脳プロジェクト」において、世界で初めて、サルの大脳皮質の活動により制御されるヒューマノイドロボットの二足歩行に成功するなど、幅広い分野において優れた業績があり、本研究領域において必要な、先見性・洞察力を有していると見られる。

また、2001 年度までは ERATO 研究総括、現在(株)国際電気通信基礎技術研究所脳情報研究所所長、ICORP 研究総括、日本神経学会理事、日本神経回路学会理事を務めており、本研究領域について、適切なマネジメントを行う経験・能力を有していると見られる。

また、研究の裾野を広げ、若手研究者育成の場を作ることを第一の目的としている「『脳を活かす』研究会」の発起人代表の一人であり、研究領域「生命システムの動作原理と基盤技術」(2006 年度発足 CREST・さきがけ)の領域アドバイザーも務めている。これらを総合すると、本研究領域のように多くの若手研究者の応募が見込まれる個人型研究領域の研究総括として適任と思われ、関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行いうると見られる。

## 3. 研究総括のねらい

社会を構成する私達人間の運動、認知、意志決定、社会行動、消費行動など、ありとあらゆる日常活動は、こころの器官である脳の機能に大きく依存している。この事実と、非侵襲脳活動計測手法、分子生物学的手法の導入や計算理論の進歩などが相まって、脳科学はいまや臨床医学だけではなく、経済学、倫理学、法学、マーケティングなどの様々な人文・社会科学とも協力して、社会生活の様々な側面を豊かにする応用分野を築きつつある。

また、このような新しい応用は基礎神経科学が革命的に進歩するきっかけも提供する。例えば、経済学と神経科学が融合した新分野「ニューロエコノミクス」の勃興は、従来の経済学に、非合理的な行動を行うこともある個人の、脳科学に基づく定量的モデルを導入するという革新的な役割を果たす一方で、神経科学の分野では困難な研究対象であったヒトの社会的・経済的活動における脳内情報処理の定量的モデル構築の流れを創り出している。また、BMI の手法をシステム神経科学に導入し、脳内情報を解読し、直接制御することで、情報処理の因果関係をより科学的、客観的に証明できる可能性もある。

従って神経科学の基礎的研究の進歩と、BMI、ニューロリハビリテーション、ニューロマーケティング、ニューロエコノミクス、ニューロゲノミクス、ニューロエシックスなどの応用分野の発展は、決して基礎から応用に一方的に情報や技術が流れるというものではなく、両者が緊密な共同作業を行うことで互いに革命的な進歩を促し、基礎研究はより深く厳密に、また応用研究は社会により広く、またより大きな貢献をすることが期待される。物理学や化学とその応用諸分野の間に長年にわたって築かれた、相互にとって有益で不可欠な関係を、脳・神経科学とその新しい応用分野の間にも築くことが望まれる。脳神経科学の基礎的研究と応用が互恵的に進展するためには、新進気鋭の研究者が両者を良く理解し、創造的な成果を上げることのできる研究環境を提供しなくてはならない。本研究領域では、第一に計算・実験神経科学、工学、臨床医学、生物学、人文・社会科学、情報学など多方面の学問領域、第二に基礎的研究と実用的技術開発、また第三にBMI、ニューロリハビリテーション、ニューロマーケティング、ニューロエコノミクス、ニューロゲノミクス、ニューロエシックスなどの応用分野の3つの軸(学問領域、基礎と実用、応用分野の3軸)に関して、できるだけ軸のどちらかに偏らずに、学問分野、基礎か実用、応用目的について異なる背景と価値観を持つ研究者を広く募集し、その間に知的で実りの多い交流を促すことによって、神経科学とその応用分野の良好な共進化の礎を築くことを目指す。

#### 4. 研究課題の選考について

脳神経科学の基礎／応用分野が互恵的に進展するためには、新進気鋭の研究者が基礎的研究の流れと応用分野の発展を良く理解し、創造的な成果を上げることのできる研究環境が望まれる。そのため、本研究領域では、第一に学問領域、第二に基礎的研究／実用的技術開発、また第三に種々の応用分野の指向性の3軸に関して、できるだけ偏らずに、異なる背景と価値観を持つ研究者を広く募集し、その間に知的で実りの多い交流を促すことによって、神経科学とその応用分野の良好な共進化の礎を築くことを目指した。

「脳科学研究戦略推進プログラム」が研究拠点を整備し戦略的な研究開発推進により、社会ニーズへの還元加速を目的とするのに比べ、本研究領域では、革新的で探索的な個人研究を対象とし、基礎的研究の対象および応用分野をより広く設定する点に違いがある。本研究領域では新しい研究／応用分野を拓くと共に、それらを担う中核研究者の若手リーダーを育てることを目標とし、その候補の採択を目指した。本研究領域で得られた成果や技術を「脳科学研究戦略推進プログラム」の社会還元に応用する共同研究や共同作業は強く推奨されるが、一方、同一の研究者が含まれる研究チームが、関連する研究課題で脳科学研究戦略推進プログラムと本研究領域の両者に応募・採択されることは避けた。

対象となる研究課題としては、この目標に沿うものであれば、特に限定せず、若手研究者からの基礎／応用、実験科学／理論科学の融合をはかった研究課題や、新しい対象や斬新で独創的な方法論を基にした研究課題が提案されることを期待した。

募集に当たっては、脳科学の新しい応用分野の基礎となる探索的研究についても、応用事例に直結した革新的要素技術開発についても、質が高く探索的・独創的な研究を対象とした。課題選考に当たっては、前者については科学的水準を評価し、後者については実用化の具体性を評価した。

なお、選考に当たっては、JST の選考基準(戦略目標の達成に貢献すること/研究領域の趣旨に合致したものであること/提案者自身の着想であること/独創性を有していること/研究構想の実現に必要な手掛かりが得られていること/今後の科学技術に大きなインパクト(新技術の創出、重要問題の解決など)を与える可能性を有していること/研究が適切な実施規模であること/大挑戦課題については、実現の可能性の観点からは明確な見通しが得難いが、成功した場合に飛躍的、画期的な成果が期待できること)に準拠した。

毎年、応募・採択状況を分析し、全体として採択者の背景分野等が偏らないように方針を検討した。例えば、2008年度採択者が医学分野に偏っていたため、2009年度は、下條信輔(カルフォルニア工科大学教授)と笹井芳樹(理研グループディレクター)という2人の新しい領域アドバイザーに参加を求め、認知科学を含む人文社会科学の提案、また分子レベルの提案、さらに単純なモデル生物を対象とした提案、リアルタイムの神経活動のフィードバックを含むような提案を積極的に採択する方針をとった。過去の採択結果を次年度以降に考慮する選考方針をとったため、3年間の採用期間を通じて、基礎/応用、実験/理論、学問分野等についてバランスの良い採択課題群を得ることができたと考えている。

## 5. 領域アドバイザーについて

アドバイザー名	所属	現役職	任期
銅谷 賢治	沖縄科学技術大学院大学学園	教授	2008年6月～2016年3月
伊佐 正	生理学研究所(～H27.9) 京都大学(H27.10～)	教授 教授	2008年6月～2016年3月
入来 篤史	理化学研究所脳科学総合研究センター	シニア・チーム リーダー	2008年6月～2016年3月
片山 容一	日本大学医学部	教授	2008年6月～2016年3月
清水 公治	京都大学医学部附属病院先端医療機器開発・臨床研究センター	室長、特任教授	2008年6月～2016年3月
佐倉 統	東京大学大学院情報学環	教授	2008年6月～2016年3月
西條 辰義	高知工科大学制度設計工学研究センター(～H27.3) 一橋大学経済研究所(H27.4～)	教授 教授	2008年6月～2016年3月

神崎 亮平	東京大学先端科学技術研究センター	教授	2008年6月～2016年3月
加我 君孝	国際医療福祉大学三田病院	教授	2008年6月～2016年3月
宮井 一郎	特定医療法人大道会 森之宮病院	院長代理	2008年6月～2016年3月
太田 淳	奈良先端科学技術大学院大学	教授	2008年6月～2016年3月
大須賀 美恵子	大阪工業大学工学部	教授	2008年6月～2016年3月
下條 信輔	カリフォルニア工科大学生物学部	教授	2009年9月～2016年3月
笹井 芳樹	理化学研究所	副センター長	2009年9月～2014年7月

人選にあたっては、第一に、従来の BMI 領域での代表的研究者、すなわち、脳深部刺激法の開発者である片山容一(日本大学教授)、人工内耳の権威、加我君孝元東京医療センター臨床研究(感覚器)センター長(現国際医療福祉大学三田病院教授)を選んだ。第二に BMI の応用面から神経内科・リハビリテーション医学の宮井一郎(森之宮病院院長代理)、医用工学の専門家、大須賀美恵子(大阪工業大学教授)、電極の専門家として太田淳(奈良先端科学技術大学院大学教授)を選んだ。また、脳イメージングが研究面でも応用面でも重要であるので、脳イメージング機器の代表的企業の1つである島津製作所の清水公治部長(現京都大学特任教授)を選んだ。基礎研究の専門家として、神経科学実験分野から伊佐正(自然科学研究機構生理学研究所教授)、入来篤史(理化学研究所シニア・チームリーダー)、計算論の分野から銅谷賢治(沖縄科学技術大学院大学学園教授)、ニューロエコノミクスの分野から西條辰義(大阪大学教授、現高知工科大学教授)、スモールシステムの分野から神崎亮平(東京大学教授)を選んだ。いずれも当該分野の第一人者であり、また、これらの分野の融合に積極的な関心を持つ研究者で、これらの領域アドバイザーの指導・薫陶により、BMI 関連の基礎/応用分野の共進が可能であると考えられた。BMI の応用に不可欠である倫理の分野からは、佐倉統(東京大学教授)を選んだ。また、第一年次の採択課題が医療分野に偏っていたために、第二年次から、分子生物学の笹井芳樹(理化学研究所グループディレクター)、心理学分野の下條信輔(カリフォルニア大学教授)に参加を求めた。

## 6. 研究領域の運営の状況について

「脳情報の解読と制御」のような新しい研究分野では基礎分野と応用分野の両方向性の共進が重要である。例えば、経済学と神経科学が融合した新分野「ニューロエコノミクス」の勃興は、従来の経済学に、「非合理的な行動を行うこともある個人についての、脳科学に基づく定量的モデルを導入する」という革新的な役割を果たす。あるいは、神経科学分野では困難な研究対象であったヒトの社会的・経済的活動における脳内情報処理の定量的モデル構築の流れを創り出す。また、BMI の手法をシステム神経科学に導入し、脳内情報を解

読し、直接制御することで、情報処理の因果関係をより科学的、客観的に証明できる。神経科学の基礎的研究の進歩と、BMI、ニューロリハビリテーション等の応用分野の発展は、決して基礎から応用に一方的に情報や技術が流れるのではなく、両者が緊密な共同作業を行うことで互いに革命的な進歩を促し、基礎研究はより深く厳密に、また応用研究は社会により広く、またより大きな貢献をすることが期待される。物理学や化学とその応用諸分野の間に長年にわたって築かれた、相互にとって有益で不可欠な関係を、脳・神経科学とその新しい応用分野の間にも築くことが望まれる。

このため本研究領域では、脳神経科学の基礎的研究と応用が互恵的に進展するため、新進気鋭の研究者が基礎／応用の両者を良く理解し、創造的な成果を上げ得る研究環境の提供を運営の目標とした。すなわち、学問分野別、基礎／実用別、応用目的別に異なる背景と価値観を持つ研究者を広く募集し、その間に知的で実りの多い交流を促し、もって神経科学とその応用分野の良好な共進化の礎を築くことを目指した。

さきがけ研究は、新しい研究／応用分野を切り開くとともに、その分野を担う中核的研究者の若手リーダーを育成することを目標とする。そのため、本研究では、革新的で探索的な個人研究を対象とし、基礎的研究の対象と応用分野を広く設定した。なお、本研究領域で得られた成果や技術を「脳科学研究戦略推進プログラム」の社会還元に応用する共同研究や共同作業は強く推奨した。全研究者について最低 1 回の研究総括によるサイトビジットを行い、研究者の置かれた環境・抱える問題等についての把握を行い、研究総括による指導の参考とした。さらに、必要に応じて、研究者を研究総括の所属する(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)に招き、当該研究所の研究者を含めた協議の場を設け、あるいは ATR の研究会で講演・討議を行うことを求めた。これらの流れの中で、年 2 回の領域会議での研究総括・領域アドバイザーの指導とともに、さきがけ研究者全員による相互討議が活発に行われ、また交流会で種々の情報交換が行われ、研究の方向性に良い影響を与えたと思われる。討議の結果は、「Q&A 集」として全員にフィードバックした。研究総括等の指導はその他にも、必要に応じて個別にも行い、末谷大道研究者(理論的研究の実験的研究との関わり方)、天野研究者(研究の DecNef 法への拡大)等の多くの研究者が研究総括の指導の下に共同研究を行った。また、大挑戦課題については、特に議論の機会を頻繁に設け、研究総括が研究進捗状況を把握するとともに助言を与えた。また本研究領域の中心的学会の学術集会には研究総括、領域アドバイザー、技術参事が参加して、外部発表の状況を把握するとともに、機会に応じて、研究者の発表についての議論に参加した。さらに、本研究領域は脳科学研究戦略推進プログラム(脳プロ)と連携して運営することが戦略目標の中で明記されており、脳プロの諸会議、発表会に研究者が積極的に参加するように配慮した。

こうした研究環境の中で、研究者間での研究協力、共同研究が幾つも芽生えた。例えば、理論的背景を持つ研究者と実験研究者との共同研究、研究協力として、宮田麻理子研究者と春野雅彦研究者(2013 年 6 月～:「神経損傷や発達期における神経回路改編過程の計算的予測」)や同じく宮田麻理子研究者と高橋宏知研究者の共同研究(2013 年 6 月～:「覚醒視床

脳波の周波数解析と周波数依存的脳内刺激系の確立」、小川宏人研究者と春野雅彦研究者の研究協力(刺激方向情報のポピュレーションコーディングに関する統計的予測、2013年4月～2014年3月)、北城圭一研究者と花川隆研究者との共同研究(2011年10月～:高頻度連続TMSによるヒト脳活動振動同期の大域的制御)等がある。同じく北城圭一研究者は、土谷尚嗣研究者(2011年1月～:Continuous Flash SuppressionのTMSによる制御)、池谷裕二研究者(2013年12月～:LFPの位相リセット解析)、山田真希子研究者および末谷大道研究者(2013年12月～:ヒトの脳のランダムネス)、服部憲明研究者(2011年11月～:脳卒中患者の脳ネットワーク解析)と共同研究、研究協力を行っている。また、理論畑土士の共同研究としては、末谷大道研究者と北城圭一研究者との共同研究(2011年4月～:脳のコンシステンシー)がある。末谷大道研究者は山田真希子研究者(2012年7月～:認知課題遂行中の重心移動データ解析)、矢尾育子研究者(2013年～:質量顕微鏡データの数理処理)に対しても研究協力をしている。このほか、シンプルシステムと哺乳類運動系の研究者の研究協力としては、小川宏人研究者と西村幸男研究者(2013年7月～2014年6月:昆虫の下行性ニューロン集団による運動制御機構のデコーディング解析)との研究協力がある。また、小川宏人研究者、北城圭一研究者は各々、入来篤史領域アドバイザーと共同研究(2013年4月～2015年3月:昆虫気流感覚系をモデルとした空間認知の三次元バイアス解析)、(2013年4月～:内臓感覚についての研究)を行っている。

本研究領域の特徴の1つであるBMI関連としては、徳田崇研究者が提供した電極を用いた関和彦研究者による共同研究(2010年10月～:生体埋込み型柔軟LED光刺激プローブの開発)、鎌田恭輔研究者と関和彦研究者との共同研究(2013年1月～:マカクサル of 脊髄前角細胞慢性記録方法の開発)、花川隆研究者と関和彦研究者の共同研究(2011年7月～:マカクサルの解剖・機能MRI)等がある。

これらの共同研究は、領域会議における研究総括・領域アドバイザーの指導、研究者同士の議論によって生まれたものであるが、さらに、第7回領域会議(2011年12月)では研究者が5つのグループに分かれ、今後の脳科学関連の挑戦的課題を各グループ内の討論により選び、その方向性、方法論などを全体会議に提案し、全員で討議を行うブレインストーミングセッションを行った。次いで第8回領域会議(2012年6月)では、この中から選択された「脳の自発活動」に関わる研究についての特別セッションを行い、池谷裕二研究者が基調講演、北城圭一研究者および服部憲明研究者が指名討論を行い、これに続いて川人研究総括が特別講演を行い、全員で討議を行った。これに続いて2012年7月には第1回の研究者主導研究会を行い、花川隆研究者が中心となり、高橋英彦研究者、高橋宏知研究者、北城圭一研究者、池谷裕二研究者が「脳の自発活動研究とその応用」についてレポートをまとめた。

## 7. 研究領域のねらいに対する成果の達成状況

研究総括のねらいの第一は、「脳情報の解読と制御」研究領域の1つの中心課題であるブレイン・マシンインタフェース(BMI)の基礎研究/応用技術開発に当たって、基礎/応用が共進する研究環境を達成することである。BMI研究は実用化研究からその基礎をなす研究に至るまで幅が広く、実用技術開発と基礎研究の間に相互共進的な関係が強いことは既に「3. 研究総括のねらい」に述べた通りである。この点については、「6. 研究領域の運営状況について」で述べたように、多くの異分野を背景に持つ研究者の間で研究協力、共同研究が育つ等の成果をあげつつある。さきがけ研究は新分野を拓くとともに、その分野を担う若手研究者のリーダーを育てることにあるが、その意味では、付表の研究者一覧表のように、約60%の研究者が昇進し、重要な役割を担うようになったことも成果の1つと考えられる(1. 研究領域の概要(4)表参照、37名中22名、59%)。なお、男女機会均等についても、女性研究者は8人(22%)と20%台をクリアした。

狙いの第二は、BMIに関する成果を上げることである。BMIは最近、大きな広がりを見せているが、介護・医療関係を中心とした最新動向としては、1)ロボット制御の超高度化/2)リハビリテーション BMI の代償型応用から治療型応用への進化/3)治療型 BMI の神経疾患から精神疾患への応用の拡大の3つがあげられる。特に、1)として、一昨年、ドナヒューたちのグループは麻痺患者が自らの制御で水を飲む実験に成功したが、制御技術が高度化し、これまで困難だった柔らかに精妙な動作が可能となったこと、2)これまで代償型 BMI が主力であったが、最近、慶応大学の里宇、牛場らのグループが治療型 BMI に成功し、以後、同様の試みがドイツ、アメリカ、中国、シンガポールなどで行われていること、3)これまで BMI は主に神経疾患に活用されてきたが、精神科領域でも応用され成果を上げつつあることが最近の動向として注目される。これまでも DBS(脳深部刺激法、Deep Brain Stimulation)、TMS(経頭蓋磁気刺激法、Transcranial Magnetic Stimulation)、ニューロフィードバックは神経疾患に活用されてきた。DBS は領域アドバイザーの片山教授(日大)らが開発をした方法で、パーキンソン病などの運動疾患の症状改善、慢性疼痛の治療に用いられてきた。一方、ニューロフィードバック法は、種々の環境条件で脳活動を解読し、「望ましいとされる脳活動」と「そのときの患者の脳活動」との差が少なくなったときに、報酬を与える方法が標準的である。研究総括の川人らは、decoded neuro feedback と呼ばれる方法を提案、リハビリテーションの領域で治療法として好結果を得たが、さらに精神科医とともに自閉症のバイオマーカーとして応用し、世界レベルを遙かに上回る高い判別結果を得た。全体として、欧米では侵襲型の BMI 研究が主流であるのに対して、日本では低侵襲型ないしは非侵襲型の BMI 研究で世界に伍した成果を上げており、この分野ではむしろ、世界を凌駕しているといっても過言ではない。

これらの研究の流れに沿って、本さきがけ領域の成果の達成状況を検討すると次の通りである。BMI の実用化に当たっては、脳イメージングを用いた研究が不可欠である。特に、BMI を用いるためには、利用者が BMI を使うことに適応することが必要であるが、このこと



が同時に脳の可塑性を通じて、脳活動を変化させることに繋がる。実用化に当たっては、BMI による想定外の脳活動の変化が起こることも視野に入れる必要がある。脳イメージングを用いた研究は、花川隆、服部憲明、鎌田恭輔、天野薫、北城圭一研究者らが行い、特筆すべき成果を上げた。花川研究者は BMI が脳活動に与える効果について分析し、当該分野の内外雑誌を中心に 53 の論文発表、その他 99 の口頭発表を行ったが、技術的にも、世界に先駆けて MRI (核磁気共鳴) と EEG (脳波) の同時記録を可能としたことは特筆できる (特許 1 件)。服部研究者は実際に患者に DecNef 法を適用してその有効性を確認した。これらの研究は非侵襲型 BMI の実用化に極めて重要な貢献が期待されるものである。一方、鎌田研究者は低侵襲の BMI として最近脚光を浴びている大脳皮質電極法 (ECoG) を用いた先進的研究を行い、当該分野の内外の雑誌を中心に 80 の論文発表、その他 122 の口頭発表を行った。技術面では、g-Tech 社 (オーストリア) と連携し、リアルタイムマッピング、解読可能なシステム/装置の共同開発を行っている (特許 1 件)。これは低侵襲型 BMI として日本が得意とする領域である。脊髄損傷についての基礎的データ収集、BMI への応用の試みは西村幸男、関和彦研究者が行い、Neuron や当該分野の国際一流誌 Journal of Neuroscience (JNS) に報告した。西村研究者は、全面的アシストとは異なり、患者の障害されずに残った神経・筋機能を活かし、損傷部分を繋ぐことにより機能回復を図る BMI 装置の開発に従事し、基礎的な動物実験と非侵襲的な範囲での人間での研究を併用している。非拘束状態での動物実験、電気刺激を用いた人での研究に成功しており、世界レベルの研究である (特許 1 件)。関研究者も脊髄レベルで求心系に注目し、世界レベルの研究を行った。これらの研究はアメリカの Fetz の研究と共に、世界有数ということが出来る。これらの BMI 研究、実用化研究に不可欠な電極の開発は徳田崇、河野剛士研究者が行っており、いずれも独自の技術を生かし、侵襲性の低い電極の開発に成功している。

ニューロコミュニケーション、ニューロエコノミクスの分野では、高橋英彦研究者が情動に関する脳活動の分野で独創的な研究を行い、Nature、Science、PNAS、JNS 等に報告を行った。山田真希子研究者は、錯覚を利用した現実感覚の研究を行い、Nature、PNAS 等に報告を行い、世界的な注目を浴びた。春野雅彦研究者はニューロエコノミクスと関連する分野で系統的な研究を行い、扁桃核や側座核の活動を示すなど顕著な成果をあげ、Neuron、PNAS、JNS 等に報告した。動物同士のコミュニケーションに関わる脳活動については磯田昌岐研究者が世界的に注目を集めた研究を行い、JNS に 3 編の報告を行っている。BMI の実用化にあたっては報酬や不快感についての情動研究も不可欠である。中村加枝研究者は報酬に関係の深い大脳基底核、背側縫線核について詳細な研究を行い、その機能、ことにセロトニン系の機能について、従来の仮説を覆す発見をし、JNS 等に発表した。また南本敬史研究者は報酬の判断に関わる独自の優れたモデルを構築し (特許 3 件)、Neuron や JNS に発表した。

これらの脳活動の基礎をなす細胞レベルでの研究では、池谷裕二、喜多村和郎、宮田麻理子研究者らが電気生理学的手法、オプトジェネティクスを活用し、顕著な研究を行い、

Nature、Science、Neuron、PNAS、JNS 等に発表した。なお、池谷研究者は研究期間終了前に最先端・次世代プロジェクトへ移行したが、以後も領域会議等に参加し、本研究領域の活動に貢献した。なお、哺乳類の脳活動は複雑なシステムに依拠しており、実験データは膨大とならざるをえない。このため、比較的の小規模の神経回路で脳活動を行っている昆虫等を用いた研究も有用であると考えられる。本研究領域ではスモールシステムとしてシヨウジョウハエ(上川内あづさ研究者)やコオロギ(小川宏人研究者)の研究者も加わり、別の視点から討議に加わった。

脳活動についての実験データは大容量にならざるを得ないので、そのデータ情報処理法はまだ、研究の途次にある。本研究領域では、末谷大道、高橋宏知、土谷尚嗣研究者が研究にあたった。特に末谷研究者は「6. 研究運営状況について」に述べたように、多くの研究者と研究協力、共同研究を行い、数理面から大きな貢献をなした。

大挑戦研究課題としては、竹本研、玉田篤史研究者が研究期間の延長を認められた。竹本研究者は CALI 法を用いグルタミン酸受容体を局所破壊し、記憶の機構解明に挑戦したもので、基本的な技法を開発し、動物行動で記憶への介入実験を行い、研究成果が出つつある。玉田研究者は脳の左右差の機構に独自の仮説を構築し、細胞のモーター分子の改変を行うと共に、軸索標識した脳の 3 次元画像から神経走行パターンを数値化する方法、培養下の神経細胞の回転・旋回運動を計測するタイムラプスイメージング法および運動パターンを解析する手法などを開発し、仮説を確かめつつある。2 人とも課題が非常に挑戦的であるにも関わらず、研究の進捗状況は良好であり、今後とも将来に大きな期待が持てる。

全体として、外部発表数は論文発表数 539 件(国際 409 件、国内 130 件)、口頭発表数 984 件(国際 323 件、国内 661 件)、合計 1,523 件である。これらは、著者の重複を除くと、Science 4 件、Nature Neuroscience、Nature Communications、Nature Methods など Nature 系 6 件、Proceedings of National Academy 5 件、Neuron 5 件、Journal of Neuroscience 31 件等を含む。特許出願は登録済みの 5 件を含めて 22 件である(うち PCT 出願 1 件)。関連するプレスリリースは 24 件である。

文部科学大臣表彰 4 件、日本学士院学術奨励賞 1 件、日本学術振興会賞 3 件をはじめとして、受賞は 28 件を数える。

## 8. 総合所見

### (1) 研究領域と研究総括の選定について

本研究領域では3回の募集において、第一に学問領域、第二に基礎的研究／実用的技術開発、また第三に種々の応用分野の指向性の3軸に関して、できるだけ偏らずに、異なる背景と価値観を持つ研究者を広く募集し、各研究分野から340件余り応募があった。また、研究期間内に知的で実りの多い交流を促すことによって、神経科学とその応用分野の良好な共進化の礎を築くことを目指した。3回の募集期間を通じて、学問分野、基礎／応用、実験／理論、等についてバランスの良い採択課題群を得ることができたと考える。また、研究総括のマネジメントの下、多くの異分野を背景に持つ研究者の間で研究協力、共同研究が育つ等の成果をあげつつある。

さきがけ研究は新分野を拓くとともに、その分野を担う若手研究者のリーダーを育てることにあるが、その意味では、採択後に約60%の研究者が昇進し、また、現在の脳科学の中核を担うまでになってきている。以上のことから、領域の選定、研究総括の選定は想像以上の結果が出たと考えられる。

### (2) 研究領域のマネジメント

すでに「4. 研究課題の選考について」で述べたように、本研究領域の中心課題であるブレインマシンインタフェース(BMI)については、基礎研究と技術開発の共進が双方の発展のために重要である。このために、課題選考に当たっては、関連諸分野の基礎／応用、理論／実験領域を背景に持つ研究課題の採択に努めた。毎年の選考結果の分析は研究総括・領域アドバイザーの間で共有され、次年度の選考に生かした。特に第2年度には、カルフォルニア工科大学の下條信輔教授、理研の笹井芳樹グループディレクターを新たに領域アドバイザーに加え、心理学分野、分子生物学分野の課題を補強した。3年間で結果的に、異なる背景を持つ研究者を本研究領域にバランス良く採択できた。採択後できるだけ早期に研究総括によるサイトビジットを行い、各研究者の研究環境を把握し、指導の参考とした。「6. 研究領域の運営」の項で述べたように、年2回(2014, 2015年度は各1回)、研究総括・領域アドバイザーの出席のもとで領域会議を行い包括的な指導を行い、また本研究領域の研究者の交流の場とした。必要に応じて、個別指導の場を設けた。また、必要に応じてブレインストームセッションや特別セッションを領域会議で研究者主導により行う場を設け、研究総括・領域アドバイザーも参加して、総合討論をおこなった。これらの相互討論、研究総括・領域アドバイザーの指導により、研究者間で多くの研究協力や共同研究が行われ、研究者主体の研究会も発足した。全体として、異なる背景を持つ研究者が情報を共有して、諸分野の共進を齎す研究環境を整えることに成功したと考えている。多くの研究者がその成果を評価され、種々の研究機関で重要な役割を担いつつあり、新しい分野を担う若手研究者のリーダーが育ちつつあると考えている。

### (3) 研究領域としての成果

「7. 成果の達成状況」に述べたように、BMI 研究の中心領域である脳イメージングを用いた研究では、花川研究者が MRI と EEG の同時計測の開発に成功し、BMI 使用に伴う利用者側の学習可塑性について優れた研究を行った。BMI 使用に伴う過適応が今後、問題になることも視野に入れており、高い評価を得ている。鎌田研究者は日本の得意とする低侵襲 BMI の有力な手段である大脳皮質電極法 (ECoG) の標準化に大きく貢献する研究を行い、オーストリアの企業とリアルマッピングシステムの開発を行っている。低侵襲 BMI に必須な電極では河野(剛)研究者、徳田研究者が各々独自の技術開発を行い、生物材料での検証も行った。脊髄損傷に対する BMI 適用については、関、西村研究者が基礎研究で顕著な成果を上げるとともに、西村研究者が患者の残存機能をフルに生かした部分アシストを行う BMI 装置の開発に成功している。非侵襲 BMI では、天野研究者が基礎的研究を行い、服部研究者が臨床の場で有用性の検証を行った。この方法は脳プロでのチーム研究の進展ともあいまって、今後の BMI の動向を支配する可能性が大きく、強い期待が持てる。BMI の実用化にとって不可避な情動・報酬判断の領域では、中村研究者が基礎研究を行い、従来の仮説を覆す発見をし、世界的に注目を集めている。また高橋(英)、山田(真)、春野研究者は脳イメージングとニューロエコノミクス課題や錯覚課題を組み合わせ、顕著な成果を得た。これらの結果から数理モデルを構築する試みも注目される。

### (4) 科学技術イノベーション創出への展望

「7. 研究成果の達成状況」で述べたように、現在 BMI は世界的に、従来の侵襲性の強い方法から低侵襲性・非侵襲性 BMI の方向へ動く趨勢にある。低侵襲性 BMI については大脳皮質電極を用いる方法が有力であり、日本が大きな貢献をなし、世界で主導的な立場を獲得しつつある。さらに非侵襲性 BMI については、脳プロ課題 A の研究で大きく進展し、今後、従来のリハビリ分野のみでなく、精神科的領域でも有用な診断・治療法の 1 つとなる可能性が大きい。これらの期待を実現する核となる研究者が育ったと考えている。

### (5) 本研究領域を設定したことの意義、科学技術に対する貢献

本研究領域は脳プロと連携して運営するように戦略目標に明記され、役割を分担している。すなわち、脳プロのような拠点型の大規模研究とは異なり、さきがけ研究の目的は個人研究を通じて新しい分野を拓くとともに、その分野を担う若手研究者のリーダーを育てることである。本研究領域の多くの研究者は、BMI に関する基礎／応用分野で顕著な成果をあげ、その結果、種々の研究機関で昇進し、あるいは新しい研究機関に転任し、各々重要な役割を担いつつある。また相互の研究協力、共同研究も盛んである。本研究領域を設定したことにより、異なる背景を持つ研究者が共通の場で討議を行い、優れた領域アドバイザーの助けもあり、新たな概念や研究手法を自らのものとして、研究に生かすことができた。脳プロは実績のある研究者が率いる大きなチームとして、まとまった業績を挙げる役

割を担うが、さきがけ研究は次の時代を考慮に入れながら、基礎を固めてゆくという役割を担っており、その点で、今後の日本での BMI 研究の礎を築いたと自負している。なお、脳プロにしても、本研究領域にしても、欧米で既に発展を遂げた BMI の後追いという批判を当初受けたようであるが、事實は、低侵襲性・非侵襲性 BMI への動きのなかで、日本が主導的な役割の一角を担うことができた。この成果は、脳プロおよび本研究領域を設立したことも大きな力となって達成されたと云って過言ではない。

#### (6) 今後への期待や展望

本研究領域は異なる背景を持つ研究者が基礎／応用研究の共進を図ることを目標に運営され、成功を収めた。今後、更に BMI が発展する過程で、例えば過適応や情動など種々の課題を克服する必要があると想定される。これらの課題を克服するためには、応用研究のみでなく、基礎研究を十分に行うことが不可欠であり、今後、この面でも十分な支援が必要であろう。