

領域略称名：身体性システム

領域番号：4603

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「(研究領域名) 脳内身体表現の変容機構の理解と制御」

(領域設定期間)

平成26年度～平成30年度

平成28年6月

領域代表者 (東京大学・人工物工学研究センター・教授・太田 順)

# 目 次

## 研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	9
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	10
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	13
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	18
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	20
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	21
9. 総括班評価者による評価	22
10. 今後の研究領域の推進方策	24

**研究組織** (総括：総括班，支援：国際活動支援班，計画：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成 員数
X00 総括	26120001 脳内身体表現の変容機構の理解と制御に関する総括研究	平成26年度～平成30年度	太田 順	東京大学・人工物工学研究センター・教授	12
Y00 支援	15K21754 脳内身体表現の変容機構の理解と制御	平成27年度～平成30年度	太田 順	東京大学・人工物工学研究センター・教授	14
A01 計画	26120002 脳内身体表現の変容を促す神経機構	平成26年度～平成30年度	今水 寛	東京大学・大学院人文社会系研究科・教授	15
A02 計画	26120003 身体変化への脳適応機構の解明	平成26年度～平成30年度	関 和彦	国立研究開発法人 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研究部・部長	17
A02 計画	26120004 姿勢-歩行戦略の変更に伴う脳適応機能の解明	平成26年度～平成30年度	高草木 薫	旭川医科大学・医学部・教授	9
B01 計画	26120005 脳内身体表現のスロウダイナミクスモデル	平成26年度～平成30年度	浅間 一	東京大学・大学院工学系研究科・教授	9
B02 計画	26120006 脳内身体表現を変容させる運動制御モデル	平成26年度～平成30年度	太田 順	東京大学・人工物工学研究センター・教授	9
C01 計画	26120007 脳内身体表現の変容を用いたニューロリハビリテーション	平成26年度～平成30年度	出江 紳一	東北大学・大学院医工学研究科・教授	8
C02 計画	26120008 感覚入力への介入を用いた姿勢・歩行リハビリテーション	平成26年度～平成30年度	芳賀 信彦	東京大学・大学院医学系研究科・教授	10
計画研究 計9件					
A03 公募	15H01657 ハイブリッド技術とリアルタイム処理による機能ダイナミクスの解明	平成27年度～平成28年度	鎌田 恭輔	旭川医科大学・医学部・教授	1
A03 公募	15H01659 脳波を用いた手首運動に係る脳内身体表現の学理とその可視化	平成27年度～平成28年度	吉村 奈津江	東京工業大学・未来産業技術研究所・准教授	2
A03 公募	15H01663 慢性ドーパミン欠乏による大脳基底核の脳内身体表現変容とその制御	平成27年度 (平成28年度は辞職のため辞退)	中村 公一	京都大学・医学系研究科・助教 (H27)	(3)
A03 公募	15H01664 ヒト脳内身体表現の直接記録・刺激介入を用いた神経機構と変容の解明	平成27年度～平成28年度	松本 理器	京都大学・医学系研究科・准教授	6

A03 公募	15H01667 感覚神経損傷による脳内 身体表現の変容動態の可 視化と制御	平成 27 年度～ 平成 28 年度	宮田 麻理子	東京女子医科大学・医学部・教授	4
A03 公募	15H01673 サル半側空間無視モデル における身体と空間	平成 27 年度～ 平成 28 年度	吉田 正俊	生理学研究所・助教	2
A03 公募	15H01674 脳卒中後の把握機能回復 をもたらす脳内身体表現 の変化：サルモデルによ る解明	平成 27 年度～ 平成 28 年度	村田 弓	産業技術総合研究所・研究員	5
B03 公募	15H01660 疾患動物の運動機能回復 の計測・解析に基づくシ ナジーの構成機序の解明	平成 27 年度～ 平成 28 年度	船戸 徹郎	電気通信大学・情報理工学研究科・助 教	1
B03 公募	15H01662 駆動関節を有する人工肢 の運動学習過程における 身体表現変容因子の同定	平成 27 年度～ 平成 28 年度	長谷川 泰久	名古屋大学・工学系研究科・教授	1
B03 公募	15H01665 筋骨格ヒューマノイドを 用いた脳型身体表現モデ ルの構成論的研究	平成 27 年度～ 平成 28 年度	細田 耕	大阪大学・基礎工学研究科・教授	4
B03 公募	15H01670 ベイズ潜在木構造生成過 程による脳内身体表現ス ローダイナミクスモデル	平成 27 年度～ 平成 28 年度	谷口 忠大	立命館大学・情報理工学部・准教授	2
C03 公募	15H01658 神経修飾法による新しい 運動障害治療の開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	濱田 雅	東京大学・医学部附属病院・助教	1
C03 公募	15H01661 動作推定と機能的電気刺 激に基づく筋協調制御能 力獲得型ダイレクトリハ ビリテーション	平成 27 年度～ 平成 28 年度	島 圭介	横浜国立大学・工学系研究科・准教授	4
C03 公募	15H01669 新しいバランス機能評価 システムの開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	向野 雅彦	藤田保健衛生大学・医学部・講師	2
C03 公募	15H01671 身体失認・失行症におけ る身体性変容の解明とニ ューロリハビリテーショ ン法の開発	平成 27 年度～ 平成 28 年度	森岡 周	畿央大学・健康科学部・教授	8
公募研究 計 15 件					

# 研究領域全体に係る事項

## 1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

超高齢社会を迎えた我が国では、**加齢に伴う運動器の障害や脳卒中・脳変性疾患による運動麻痺等が急増**しており、これらを克服する**有効なリハビリテーション（以下リハビリ）法の確立が急務**である。その鍵を握るのは、身体機能の変化に対する脳の適応メカニズムの解明である。我々の脳内には適切な運動を実現するために多種感覚を統合し運動への仲立ちとなる**“脳内身体表現”**が存在し、これが損なわれると、身体の動かし方がわからない、動かしていることがわからない、更には、そもそも身体が自分のものであることがわからない、等々の状況が生じる。このことは、脳卒中や認知症・パーキンソン病などの脳疾患に伴う運動障害の背景に**“脳内身体表現の異常”**が潜んでいる可能性を強く示唆する。脳内身体表現は、能動的な運動によって生じる感覚信号が脳に刻まれることによりリアルタイムに更新される。従って**身体機能の低下や喪失は脳内身体表現の欠如に繋がり**、様々な運動障害ならびにそれに起因する疾患を誘発すると考えられる。これらの病態を改善・克服するためには**「身体」を介した脳の適応機能の解明が必須**である。

本領域では、脳内身体表現を「運動遂行に関連して様々な感覚入力によって時々刻々と更新される姿勢・身体構造等を表す**身体図式**と、“自身が運動している”という運動主体感（sense of agency）や“これが自身の身体である”という身体保持感（sense of ownership）で構成される**身体意識**を総合したもの」と定義し、身体認知と運動制御を統一的に記述できる新しいモデルの構築を目指す。更に脳内身体表現を構成する神経活動を直接、間接的に反映する生体信号を**脳内身体表現マーカー**と定義する。このマーカーは、脳内身体表現の機能を反映する客観的指標であり、その変動は、適応的な運動を生成する機能の再編成の程度を反映し、**リハビリの客観評価に有用**と考える。「健全な脳内身体表現が適応的運動制御を可能にする」なる作業仮説に立脚した上記マーカーの提案、脳内身体表現モデル化、リハビリ医学への応用が本領域の目的である。

### 【基本的な研究戦略】

上記の目的達成に向けて、以下の研究戦略・組織を構成する。

- ① **（A 班 脳科学班）**：脳内身体表現の神経機構の解明と、その変容を反映する脳内身体表現マーカーの提案（脳科学研究者中心）
- ② **（B 班 システム工学班）**：得られた脳科学的・臨床的知見を統合し、感覚－運動連関を実現する脳内身体表現の計算論的機能モデルの確立（システム工学研究者中心）
- ③ **（C 班 リハビリ医学班）**：脳内身体表現の変容を用いたリハビリの原理解明と治療戦略・手法の提案（リハビリ医学研究者中心）

上記三分野の研究者が、①～③の研究を主に担当し、連携して課題解決を図る（図1）。

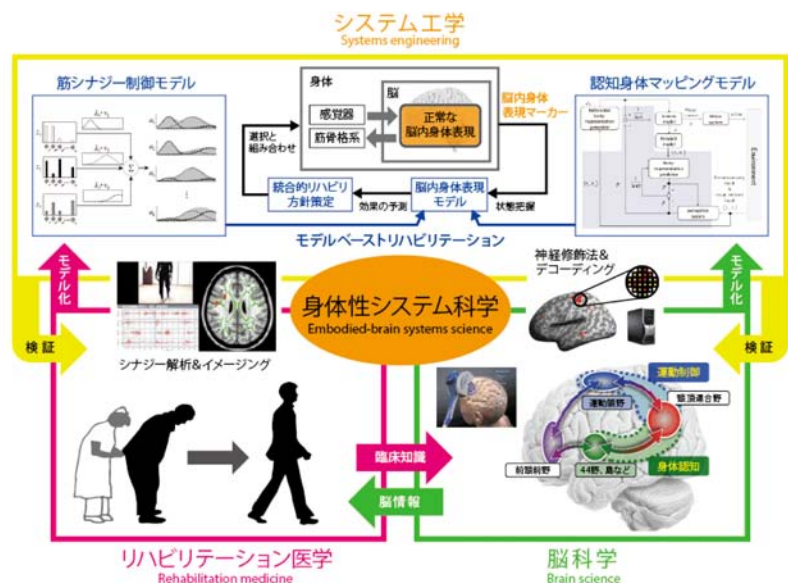


図1 身体性システム科学領域

## 【研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか】

従来の運動制御理論では、速く正確な運動制御を行うために、筋骨格系の動特性を神経機構内で表現・シミュレートする身体の内部モデルが必要とされている。従来の内部モデル理論では身体の基本構造を所与のものとして、その制御系の最適化に重点が置かれてきた。しかし、現実の身体は疾病や加齢などに伴い身体構造は大きく変化し、それに伴って脳内身体表現も変容すると考えられる。本領域では、このような観点から以下の3項目の解明を目指す。

### 1. 脳内身体表現の神経実態の解明と脳内身体表現マーカーの提案

脳内身体表現と身体認知および運動制御との因果性を明らかにするため、脳科学の主要テーマである**身体意識（運動主体感と身体保持感）、協調的筋活動（シナジー）制御、予期的姿勢・歩行制御**の問題を対象にした**介入神経科学的実験**を展開する。ヒトおよびサルなどの動物を対象とし、仮想現実課題による身体認知の操作、感覚系への物理的介入による筋骨格状態の操作、訓練によるサルの歩行様式の操作（2足歩行化）などに対する脳内身体表現の変容過程を電気生理学的手法や脳機能画像法などの解析によって明らかにする。さらに、**脳情報復号化（デコーディング）技術**を導入して、行動変化の予測に関わる脳活動を同定する。これを脳内身体表現マーカーの候補として、項目2のモデル構築や項目3のリハビリ原理の解明に役立てる。これらの研究を遂行することで、脳内身体表現と身体認知および運動制御の因果関係とその神経基盤を明らかにできる点が、脳科学への貢献である。

### 2. 脳内身体表現の計算論的機能モデルの構築

脳科学やリハビリ医学の知見をベースとして、脳内身体表現と身体力学系の相互作用をシミュレーション可能な計算論的機能モデルとして構築する。これは「脳のシナジー制御機構に基づく筋骨格系の即時的な適応機能を記述する**fast dynamics**」と、「運動企図に依存して変容する身体意識などの脳内身体表現の長期的変容（可塑的変化）を記述する**slow dynamics**」から構成される**マルチスケール複数時定数モデル**である。また、運動時の脳神経回路の活動やこれを修飾する神経伝達物質の機能を数理的に解明する。さらに、脳研究の知見を制約条件とした定式化により、適切なモデル構造を求める。この数理モデルに基づいて、項目3のリハビリ原理に対する根拠を与えることを目指す。システム工学研究への貢献としては、身体と脳の相互作用を定量的に記述することによって、様々な運動障害や神経疾患をシミュレートする技術の開発や人間を支援する工学技術の評価に役立てることができる。

### 3. 脳内身体表現に基づくリハビリ原理の解明

現状のリハビリは経験的に確立されたものが多い。近年、脳の可塑性に着目した運動療法や運動企図に応じて脳神経に介入するニューロリハビリも重要視されてきたが、それらの機序も明らかではない。さらに運動療法で脳機能が向上するという知見も多くなった一方で、特定の身体部位に対する運動療法が他の部位の運動機能に悪影響を及ぼすという問題も生じている（例えばTakeuchi N, Izumi S. *Neural Plast.* 2012）。従って、リハビリによる脳内身体表現の変容を定量的に評価する仕組みを構築し、脳内身体表現に基づくリハビリ原理を解明する必要がある。本項目では、項目1と協力して脳内身体表現マーカーの有効性を検証し、項目2のモデルと統合して、**モデルベーストリハビリテーション**の実現を目指す。

なお本領域は応募時に「(2) 異なる学問分野の研究者の共同研究等の推進による当該研究領域の発展」、「(3) 既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成」を選択した。ここでは、人間の神経生理を扱う領域（脳神経科学、認知脳科学等）と、人間の運動を扱う領域（リハビリ医学、整形外科学等）の、システム科学（システム工学、データ工学等）による統合を目指す共同研究を推進し、新しい融合領域である**身体性システム科学**の創成を図る。これは、関連分野である心理学やスポーツ科学などにも波及効果が期待できる。

## 2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

本領域では、脳内身体表現の神経機構とその長期的変容メカニズムを明らかにし、リハビリテーション介入に応用することを目的としている。このため、システムの振る舞いを数理モデルとして統合的に記述できるシステム工学（B班）を仲立ちとして脳科学（A班）とリハビリテーション医学（C班）を融合することを試みる。これにより、運動制御と身体認知を統合的に理解し、真に効果的なリハビリテーション法を確立する「身体性システム科学」なる新たな学問領域の創出を目指す（図2）。

先に述べた設定目的の達成に向けて、本領域では上記の3つの班に、9つの研究項目（A01, A02, A03, B01, B02, B03, C01, C02, C03）を設定し、研究を進める。

研究項目 A01・A02 は、それぞれ身体認知（運動主体感や身体保持感）と運動制御（筋シナジー制御、先行性姿勢制御）の観点から介入神経科学的手法を用いた実験をヒトおよびサルで展開し、脳内身体表現の神経機構ならびにその変容過程の解明を試みる。同時に、脳内身体表現を構成する神経活動を反映する生体信号を脳内身体表現マーカーとして抽出する。

研究項目 B01・B02 は、神経生理学的実験データ、リハビリテーション中の臨床データに基づき、脳内身体表現の活動(fast dynamics)と変容(slow dynamics)のダイナミクスを各々時定数の異なる力学系としてモデル化する（脳内身体表現モデル）。

研究項目 C01・C02 は、脳内身体表現マーカーを活用することでリハビリテーション効果の定量化に取り組む。また、脳内身体表現モデルと統合することで、感覚運動機能の最大化に向けたリハビリ方針の策定を行うモデルベーストリハビリテーションを実践し、介入の帰結予測を行う。

研究項目 A03・B03・C03 は公募班のための研究項目である。

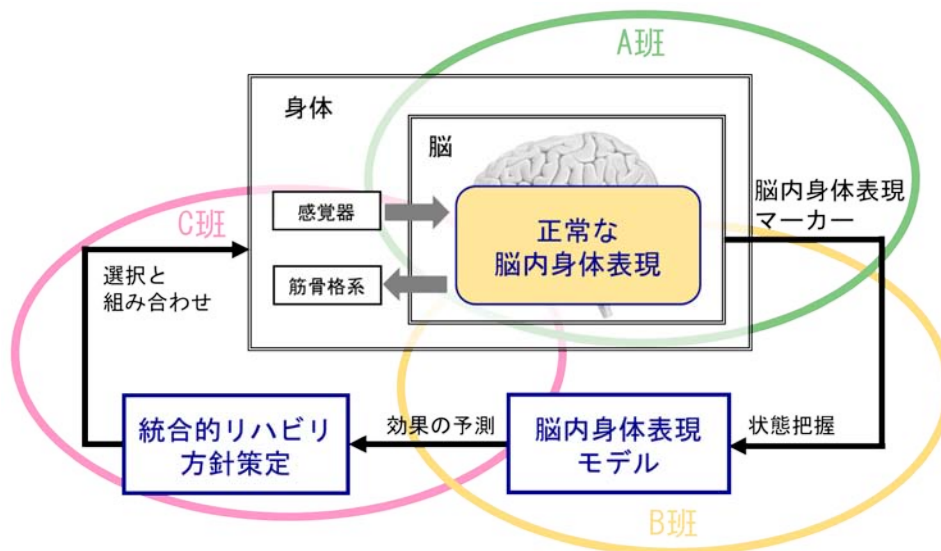


図2 モデルベーストリハビリテーションの実現に向けた研究体制

研究の進展状況について、以下に計画研究ごとに記述する。

### 計画研究 A01-1 研究代表者 今水 寛（東京大学）

脳内身体表現の認知的側面としての身体意識（運動主体感・身体保持感）を主な対象とし、その神経基盤解明に向けた研究を進めている。現在までに、健常者や統合失調症患者を対象とした行動実験と脳活動計測およびサルを対象とした電気生理実験で一定の成果を得ている。サルの電気生理実験で

発見したミラーニューロンの自己他者判別特性や健常者と統合失調症患者における脳活動計測の結果は、一貫して右半球の前頭-頭頂ネットワーク（特に SLFIII と呼ばれる連合線維束の周辺）が身体意識の神経基盤である可能性を強く示唆している。また、脳情報復号化技術により、右の SLFIII 周辺の fMRI 脳活動パターンから、運動が自己に属するか/他者に属するかという主観的な判断が予測できる可能性を示し、この領域の活動が**身体意識（運動主体感）の指標**として利用できることが解ってきた。さらに、神経情報をオンラインで利用するため、脳波による身体意識の情報抽出の準備を進め、加えて、神経介入のためにニューロフィードバックの基礎技術開発を進めている。

#### 計画研究 A02-1 研究代表者 関 和彦（国立精神・神経医療研究センター）

筋シナジー制御器の作動原理と身体改変に対する筋シナジー制御器再形成過程の神経基盤解明に取り組んでいる。前者については、ヒトの上肢から筋シナジーを抽出する方法を確立しつつある。また、C02-1 で対象となるジストニアの脳内身体表現マーカーを同定するため、個々の手指の表現を同定できる新しい fMRI デコーディング方法 (iSLR) を新規に開発した。さらに、中脳赤核と運動皮質にそれぞれ性質の異なる筋シナジー生成器が存在する可能性、および小脳の**登上線維が筋シナジー制御器の活動と関連している**可能性をそれぞれ動物実験によって示した。身体改変に対する脳内身体表現の長期的変容の原理を明らかにするため、手指支配筋の腱を付け替えたサルを作成とこの実験系の確立に成功し、改変後に 4 か月をかけて筋が新たな機能を獲得していく過程 (**slow dynamics**) を明らかにしている。

#### 計画研究 A02-2 研究代表者 高草木 薫（旭川医科大学）

動物実験とヒトにおける研究によって、**先行性姿勢制御（予期的姿勢調節）は脳内身体表現に基づく姿勢筋シナジー生成プログラムによって実現される**との作業仮説の検証を試みている。近畿大学では、2 足歩行能を獲得したニホンザルからの大脳皮質細胞活動を解析できる実験系を実現し、4 足から 2 足への歩容変化に伴う先行性姿勢制御には、**補足運動野が関与する**という新しい知見を得ている。旭川医大の動物実験では、補足運動野から入力を受ける**延髄網様体**が、**先行性姿勢制御の姿勢筋シナジー生成に関与する**成績を得ている。さらにヒトの研究において、脳の多種感覚統合機能が起立姿勢の維持や先行性姿勢制御に関与することを見出した。B02-1 との連携によって、多種感覚に基づく姿勢制御メカニズムを説明可能な数理モデルの提案に至っている。

#### 計画研究 B01-1 研究代表者 浅間 一（東京大学）

感覚統合や運動企図が身体意識を修飾するメカニズムの構成論的解明および身体意識（身体保持感、運動主体感）のモデル化に取り組んでいる。また、それらを定量化する生理的特徴量（マーカー）の同定を進めている。さらに、**運動制御モデルの構築とそれに基づくモデルベーストリハビリテーションの方法論**について探究している。特に、身体意識のモデル化に向けて、ラバーハンド実験などに見られる感覚統合や高次の認知過程が身体意識に及ぼす影響を調査する心理実験を行い多くの成果を得ている。これにより、モデル構造の推定（どのパラメータが関連するか）、定式化、実データとの関連付けを行った。加えて、脳波の特徴量（信号源推定、準備電位、事象関連脱同期）が、運動企図・身体図式・身体意識を定量化する脳内身体表現マーカーになり得る可能性を検証した。さらには、空間ベクトル表現に基づく運動野神経活動の数理モデルや、統計的学習理論による統合失調症の計算論モデル構築を行い、実験データとモデルの整合性を評価するとともに、逆にモデルから推察される実験仮説を心理物理実験、脳計測実験により検証している。



#### 計画研究 B02-1 研究代表者 太田 順（東京大学）

ラットや人の実験に基づいた、筋シナジーベースの起立姿勢制御・歩行モデルの構築を行った。多様な感覚入力や筋出力の重み付けやその変容を、筋シナジー、感覚フィードバックループを用いて行った。姿勢制御の fast dynamics に対し、膝拘束による移動床面実験と筋骨格シミュレータを用いた姿勢制御モデルの構築を行った。また、歩行の fast, slow dynamics モデルを提案し、人間やラットが左右分離型トレッドミル上で2足歩行を行い、外乱を与えた際の動作変化について、実験での確認を行った。臨床現場で筋シナジー制御状態をモニターするシステムとして、筋シナジー解析ツールを開発した。このツールは既に多くの領域内関連研究機関に導入され、B03-1、C02-1 との共同研究より、無痛無汗症患者の初めての筋シナジー解析を行い、筋シナジー制御に関する新たな知見を得た。

#### 計画研究 C01-1 研究代表者 出江 紳一（東北大学）

片麻痺患者の身体認知機能を客観的かつ簡便に評価できる間接マーカーを確立するため、健常者および片麻痺患者において、身体（上肢）部位への視覚刺激検出反応課題を実施した。片麻痺患者は、有意に刺激検出反応が遅く、またこの度合いは上肢運動機能の回復とよい相関を示したことから、この指標（身体に向けられる注意量）が間接マーカーの一つの候補となりうる事が解った。また、脳のミラーニューロンシステムや多種感覚統合機能（A01-1）を活かした課題没入型仮想空間（VR）におけるモデルベーストリハビリテーション法を構築するため、今後患者へ介入するための効果的な対象動作を健常者から収集する実験を完了した。対象となる患者それぞれのニーズに臨機応変に対応できるパラメータセッティング（四肢の長さ、視点の変更など）を可能にし、患者の身体保持感および運動主体感を効果的に誘導できるプロトタイプを完成させた。加えて、クラウド型運動データベースの構築のため、患者が模倣すべき対象動作と実際に患者が行った追従動作の双方を記録・管理するシステムのプロトタイプを実装した。

#### 計画研究 C02-1 研究代表者 芳賀 信彦（東京大学）

筋シナジーを計測するための機器整備を終了し、さらに統合的な脳機能解析システムを構築する段階に進んでいる。先天性無痛無汗症、パーキンソン病、脳卒中を対象とした研究環境を構築し、感覚入力への介入として感覚モダリティ変換装具、神経介入として経頭蓋直流電気刺激や機能的電気刺激等をパイロット的に使用し、効果を評価しながら改良を加えている。また、手指巧緻運動の障害を示す疾患として書痙や音楽家のジストニアを対象とし、キネマティクス、筋電図、脳波、MRIなどの多次元計測を行うシステムをA02-1とともに確立した。現在までに、ジストニア患者30名以上とこれと同数の対照群についても計測を終え、大脳半球間神経線維連絡や大脳小脳連関における異常がこの直接マーカーとなりうる病態仮説をレビュー論文等で提案している。加えて、歩行障害を示す疾患として、パーキンソン病を対象とした研究に取り組み、同疾患群に特徴的な「すくみ足」に対応した筋シナジー制御の変容を通して歩行を評価できるシステムを、B03-1との連携で確立した。

### 3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

#### 総括班（X00）

コメント1：総括班の事務員に9名と多数の事務員を配置する点。

対応策1：予算費目を変更し、総括業務を効率化し、事務員の配置を週1.5名程度に減らした、

コメント2：初年度から多額の海外調査にかかる経費が多い点。

対応策2：予算費目を変更し、初年度の海外調査を、領域代表が領域促進のために必要と考える国際会議参加（1件）のみに制限した。

コメント3：多額の海外渡航費用。

対応策3：予算費目を変更し、海外調査にかかる費用を、領域代表が領域全体の内容をプレゼンテーションするか領域に役立つ情報収集を図るための国際会議や調査等に参加するための旅費のみに減らした、

コメント4：研究領域として公募研究に期待する要求が大きいにもかかわらず、その採択予定数が少ない点。例えば総括班で様々な支援にあたること1件当たりの研究予算下げる等の工夫をして、採択候補研究課題を増やす等、公募研究の構成の再検討を行うこと。

対応策4：ここでは、総括班での支援についてのみ述べる、当初採択予定の12件を15件とするとともに、公募研究の研究代表者に対して、当該研究項目に属する若手連携研究者や若手研究協力者が領域全体会議に参加・発表するための旅費を支援し、総括班関係の業務を補助してもらうという形式で、公募研究への支援を行った。具体的にH27年度には5名の若手研究者を選抜し、支援を行った。

#### A01-1 研究項目

コメント：設備備品が突出している。

対応策：動物実験に使用する光学的運動計測装置は神経活動と運動の相関を解析するためには必須の備品である、サルのECoGデータはモデル班や領域全体で共有し有効に活用する。領域内には動物実験を行える施設は少なく、これらの施設から得られた貴重なデータを共有することで、領域全体で効率的な研究ができると考えられる、

#### A02-1 研究項目

コメント：設備備品が突出している。

対応策：動物実験にはいずれも真に必要な設備・整備であるが、指摘に従い、個々の機器に求める機能を最低限にする変更を行った。例えば、マカク用アイソレーターケージは筋シナジー適応の神経基盤解明に必須であるが、京都大学霊長類研究所と同一仕様にして設計費を節減すると同時に、換気フィルター機構を簡素化するなどの変更を行った。また、128チャンネルの神経信号記録装置を購入する予定であったが、脳内記録部位をより精度高く限局させる事により、少ない電極数で神経活動を記録できるようになる事が見込まれたため、小チャンネル数構成の装置を購入した。

#### A02-2 研究項目

コメント：設備備品が突出している。

対応策：いずれも真に必要な設備・装置であるが、限られた予算内で研究計画を予定通り遂行するため、必要に応じて仕様を変更して対応した。具体的には、動物用筋電記録システムをテレメータ筋電用受信機とヒト・動物兼用高感度増幅器に変更した。解析機器については汎用性の高いものを選定し、B02-1との共同利用を推進した、また、機器・備品をより有効活用できるよう領域内での共同利用を検討した、

設備の有効活用については、総括班が中心となり、整備された大型研究装置を領域内で共用できる枠組みを構築することで対応した。

#### 4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

##### A01 計画研究

脳内に学習速度の異なる複数の運動記憶が存在することは、理論や行動実験で示されていたが、いくつかの記憶要素があるのか、また、それらは脳内にどのように分布しているのか、は未解明の問題であった。A01-1 の今水らは、モデル班の提案する fast dynamics と slow dynamics の枠組みに基づいて、ジョイスティック操作を学習しているときの脳活動を数理モデルで解析した。その結果、今回採用した課題では、1) 4 つの記憶要素（図 4-1）で脳活動の変動の 99.5% を説明できる、2) 比較的早い学習要素 2 つ（青・緑）は前頭-頭頂ネットワークの広い範囲に分布し、3) 中間的な要素（水色）は頭頂の一部、4) 遅い要素（赤）は小脳に分布する、などを明らかにした（*PLoS Biology*, 成果 6）。この結果に基づき、比較的早い学習要素は、運動主体感や身体保持感などの身体意識と関連するとの仮説を立てた。この仮説に基づいて、fMRI デコーディングの手法で前頭-頭頂ネットワークから主観的な身体意識を予測することを試み、有意な予測をすることに成功した。この結果は、脳活動をモニタリングしながら効率的なリハビリを行うモデルベーストリハビリテーションの基礎技術となる。

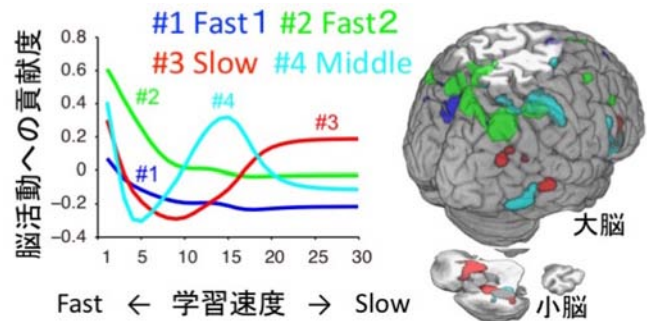


図 4-1 Slow/fast dynamics の神経基盤

その結果、今回採用した課題では、1) 4 つの記憶要素（図 4-1）で脳活動の変動の 99.5% を説明できる、2) 比較的早い学習要素 2 つ（青・緑）は前頭-頭頂ネットワークの広い範囲に分布し、3) 中間的な要素（水色）は頭頂の一部、4) 遅い要素（赤）は小脳に分布する、などを明らかにした（*PLoS Biology*, 成果 6）。この結果に基づき、比較的早い学習要素は、運動主体感や身体保持感などの身体意識と関連するとの仮説を立てた。この仮説に基づいて、fMRI デコーディングの手法で前頭-頭頂ネットワークから主観的な身体意識を予測することを試み、有意な予測をすることに成功した。この結果は、脳活動をモニタリングしながら効率的なリハビリを行うモデルベーストリハビリテーションの基礎技術となる。

##### A02 計画研究

A02-1 の関らは、サルを対象とした実験において、世界で初めて脊髄に筋シナジー生成器が存在する可能性を明らかにした（*Journal of Neuroscience*, 成果 16）。実験ではサルの手の状態を変化させて脊髄を電気刺激する電極を開発し、腕の姿勢に応じて異なる筋の活動パターンが変化している事を示した（図 4-2）。この現象は脳と脊髄の信号を切断した状態でも観察された事から、腕の姿勢に応じた脳内身体表現の fast dynamics が脊髄によって制御されている可能性を示唆する。A02-1 の内藤らは、3 テスラ MRI を用いて、運動準備期間に将来の運動の種類を予測する脳活動を同定することに成功した（*European Journal of Neuroscience*, 成果 17）。A02-1 の関らは、筋シナジー制御器について、登上線維の刺激への応答性が予想外に高く時定数の推定が困難であることを明らかにし（*Journal of Neurophysiology*, 成果 20）、登上線維入力の高頻度を高くする研究デザインを確立した。

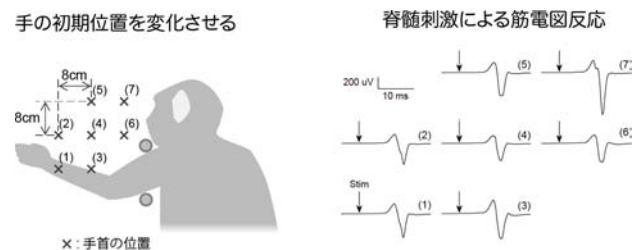


図 4-2 姿勢によって変化する脊髄出力効果  
(fast dynamics の神経表現)

A02-1 の関らは、サルを対象とした実験において、世界で初めて脊髄に筋シナジー生成器が存在する可能性を明らかにした（*Journal of Neuroscience*, 成果 16）。実験ではサルの手の状態を変化させて脊髄を電気刺激する電極を開発し、腕の姿勢に応じて異なる筋の活動パターンが変化している事を示した（図 4-2）。この現象は脳と脊髄の信号を切断した状態でも観察された事から、腕の姿勢に応じた脳内身体表現の fast dynamics が脊髄によって制御されている可能性を示唆する。A02-1 の内藤らは、3 テスラ MRI を用いて、運動準備期間に将来の運動の種類を予測する脳活動を同定することに成功した（*European Journal of Neuroscience*, 成果 17）。A02-1 の関らは、筋シナジー制御器について、登上線維の刺激への応答性が予想外に高く時定数の推定が困難であることを明らかにし（*Journal of Neurophysiology*, 成果 20）、登上線維入力の高頻度を高くする研究デザインを確立した。

A02-2 の高草木らは、歩行と姿勢に関与する筋シナジー生成メカニズムの機能局在が脳幹の中脳外側部と橋・延髄網様体に存在することを証明し、上位中枢（大脳皮質・基底核・辺縁系・小脳）が、この仕組みの中核を担う網様体脊髄路を介して状況依存的な適応的運動機能の発現に関与する可能性を指摘した（*Journal of Neural Transmission*, 成果 23）。

### A03 公募研究

A03-7 の村田らは、第一次運動野に人工的に損傷を与えたサルを用いて、損傷後の精密把握の回復の背景にある脳活動および遺伝子発現変化を検証した (*Journal of Neuroscience*, 成果 30)。損傷後は対側上肢の手指に弛緩麻痺が生じ、把握動作が困難となるが、損傷後約 1 か月間の把握訓練期間を経て、精密把握を含む手の巧緻動作に回復が見られた。同時に PET (陽電子放出断層撮影法) を用いて、精密把握を行っている際の脳活動を計測し、損傷前と把握動作が回復した時期における脳活動の変化を検証した結果、損傷前と比べ、損傷半球の運動前野腹側部の活動が上昇する傾向が認められた。

### B01 計画研究

B01-1 の浅間らは、高次の認知過程と感覚処理過程が、それぞれ運動主体感の生起に及ぼす影響を明らかにするため、物体制御課題に制御遅延と課題パフォーマンスを操作する条件を付加して心理物理実験を行った (図 4-3)。その結果、制御遅延が大きい場合には感覚処理過程に不確実性が生じ、制御指令によらず課題パフォーマンスを高めた場合でも運動主体感が向上することを確認した。また、これに基づいた身体意識のモデルを提案した (*PLoS ONE*, 成果 37)。B01-1 の矢野

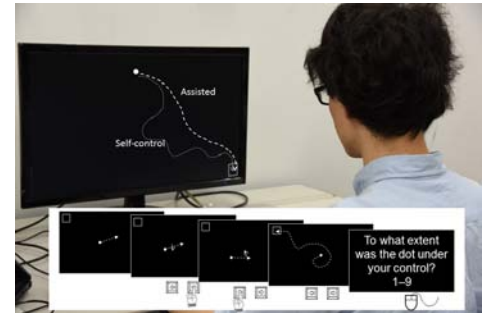


図 4-3 身体意識解明に向けた心理実験

は、人間はベイズ推定によって予測分布を更新しているという仮説のもと、A01-1 前田と連携して、運動主体感の統計学習理論的解釈モデルを提案した (*Neuroscience Research*, 成果 33)。B01-1 の田中は、第一次運動野の情報表現として空間ベクトル表現に基づく視覚運動変換モデルを構築し、多様な神経活動の性質やヒト運動適応の心理物理実験を統一的に説明した (*Journal of neurophysiology*, 成果 41)。

### B02 計画研究

B02-1 の青井は、B03-1 の船戸と共同で、歩行の fast, slow dynamics のモデル化に取り組み、fast dynamics を接地感覚情報に基づく反射的制御、slow dynamics を接地タイミングに基づく学習的制御としてモデル化した (図 4-4)。これを評価するために、左右分離型トレッドミル歩行に着目し、二足ロボットを用いた実験を行った結果、左右の肢間協調にヒトと同様の即時的・長期的な変化が見られた (*Journal of the Royal Society Interface*, 成果 46)。

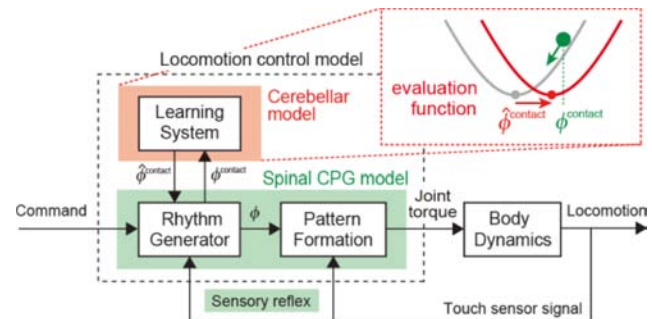


図 4-4 反射的制御と学習的制御に基づく fast, slow dynamic モデル

現在このモデルを筋シナジー制御に適用し、ラットの筋骨格モデルシミュレーションやラットの計測でも同様の振る舞いが見られており、これらのモデルが適応的な運動制御の本質を説明する可能性が示唆された。また、B02-1 の太田、千葉は、ヒトの姿勢制御における fast dynamics を解明するため、移動床面上での姿勢制御実験を行い、筋シナジー構造を抽出することでモデル化を行った (*Neuroscience Research*, 成果 42)。

### B03 公募研究

B03-1 の船戸は、B02-1、C02-1 との連携研究により、筋シナジー制御状態をモニターするシステムを開発した。これは筋電計と統計解析ソフトウェアを統合したもので、現場で計測を行いながら、簡単な操作によって解析結果をリアルタイム表示できる。これにより、シナジーベースド・リハビリテーション法の基礎技術を開発した。

## C01 計画研究

C01-1 の出江らは、脳卒中患者の麻痺肢の運動制御に身体保持感や運動主体感が及ぼす影響について調査した。片麻痺患者が装着したヘッドマウントディスプレイ上に一人称視点の手を提示し、その手に対してラバーハンド錯覚を利用して身体保持感を付与した。その条件下で映像中の手が開閉運動を行う様子を観察、模倣させた結果、身体保持感を付与しない統制条件と比べ、身体保持感を付与した実験条件では、麻痺肢の手指開閉角度が有意に拡大すること、麻痺肢に対する身体意識が麻痺肢の運動制御に影響することを示した（高次脳機能研究, 成果 52）。C01-1 の稲邑は、幻肢痛患者に対する模倣運動介入や pusher 症候群による身体軸の傾斜知覚の補正など、様々な疾患のリハビリ応用に向けて、患者の脳内身体表現を実時間で計測し、患者の症状に応じて視覚情報を変更する没入型 VR インタフェースを用いたモデルベーストリハビリシステムを開発した（国際会議 CME 2015 で発表）。これをプラットフォームとして領域全体で共有する体制を整えた。また、模倣療法のためのクラウド型運動データベースとして、患者の動作を記録、管理するシステムを実装し、上記プラットフォームの追加機能として公開した。



図 4-5 麻痺患者への模倣運動介入

## C02 計画研究

芳賀と四津は、先天性無痛症など感覚障害を有する疾患の歩行を改善すべく、痛覚に代わる代替感覚介入や、シナジーベースド・リハビリテーションによる歩様の改善を評価できる臨床実験体制を構築した。大脇は、足底圧感覚を音情報としてフィードバックする感覚モダリティ変換装置（Auditory Foot）を開発し、芳賀らと連携してこれを感覚障害患者に適用し、一定の介入効果を得ている（*Neuroscience Research*, 成果 55）。

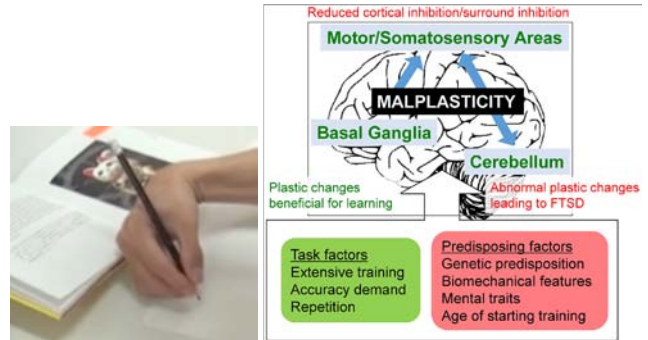


図 4-6 ジストニア（書痙）の例と病態モデル

花川は、大脇や B03-1 の船戸と連携し、パーキンソン病の歩行障害に関わる筋シナジー異常の測定に取り組んでいる（*Journal of Clinical Movement Disorder*, 成果 58）。また、手指巧緻運動の障害を示す疾患として書痙や音楽家のジストニアを対象とし、キネマティクス、筋電図、脳波、MRI などの多次元計測を行うシステムを確立した（図 4-7）。提案した病態モデルに基づき（*Neuroscience Research*, 成果 56）、経頭蓋直流電気刺激（*Frontiers in Cellular Neuroscience*, 成果 60）と両側手指の鏡像運動を組み合わせたリハビリテーションによる介入研究に着手し（UMIN000017590）、介入前後に多次元計測を行うことで新規リハビリテーションの実証を進めつつ、ジストニアの病態に関わる fast dynamics の解明を行っている。

## C03 公募研究

C03-1 の濱田は、本領域が推進する介入神経科学的手法による新しい運動機能障害の治療法開発について研究を進めた。特に、非侵襲な神経修飾法による脳内身体表現の変容実現を目指し、刺激間隔を最適に設計した独自の脳刺激法である Quadripulse Stimulation (QPS) を提案し、その有効性に関するデータをj得ている（*Clinical Neurophysiology*, 成果 63）。

## 5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

【主な論文】 [] 内は備考。共同研究には同一研究機関の同一研究グループによるものは含めない。

### A01 計画研究

- ▲\*Ohata R, Ogawa K, and \*Imamizu H: Single-trial prediction of reaction time variability from MEG brain activity, *Scientific Reports*, in press.
  - ◎▲\*Murata A, Wen W, and Asama H: The body and objects represented in the ventral stream of the parieto-premotor network, *Neuroscience Research*, Vol.104, pp.4-15, 2016. [領域内共同研究]
  - ▲\*Yamashita M, Kawato M, and \*Imamizu H: Predicting learning plateau of working memory from whole-brain intrinsic network connectivity patterns. *Scientific Reports*, Vol. 5, e7622, 2015.
  - ▲\*Megumi F, Yamashita A, Kawato M, and \*Imamizu H: Functional MRI neurofeedback training on connectivity between two regions induces long-lasting changes in intrinsic functional network. *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 9, e160, 2015.
  - ▲\*Togo S and Imamizu H: Normalized index of synergy for evaluating the coordination of motor commands, *PLoS ONE*, Vol. 10, e0140836, 2015.
  - ▲Kim S, Ogawa K, Lu J, \*Schweighofer N, and Imamizu H: Neural substrates related to motor memory with multiple timescales in sensorimotor adaptation. *PLoS Biology*, Vol. 13, e1002312, 2015.
  - ▲\*Koreki A, Maeda T, Fukushima H, Umeda S, Takahata K, Okimura T, Funayama M, Iwashita S, Mimura M, and Kato M: Behavioral evidence of delayed prediction signals during agency attribution in patients with schizophrenia. *Psychiatry Research*, Vol. 280, pp.78-83, 2015.
  - ▲Maeda K, Ishida H, Nakajima K, Inase M, and \*Murata A: Functional properties of parietal hand manipulation-related neurons and mirror neurons responding to vision of own hand action. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 27, pp. 560-72, 2015.
  - ▲\*Shibuya S, Unenaka S, and Ohki Y: Is this my hand? Body-ownership and the rubber hand illusion, *The Journal of Physical Fitness Sports Medicine*, Vol. 4, pp. 213-216, 2015.
- その他、A01 の論文発表 14 件

### A02 計画研究

- ◎▲\*Naito E, Ota J, Murata A Body representation in the brain. *Neuroscience Research*, 104: 1-3, 2016. [領域内共同研究]
- ▲Anemiyama K and \*Naito E Importance of human right inferior frontoparietal network connected by inferior branch of superior longitudinal fasciculus tract in corporeal awareness of kinesthetic illusory movement. *Cortex* 78: 15-30, 2016.
- \*▲Snijders AH, Takakusaki K, Debu B, Lozano AM, Krishna V, Fasano A, Aziz TZ, Papa SM, Factor SA, M. Hallett M. Physiology of freezing of gait (Review). *Annals of Neurology*, in press.
- \*Okumura T, Nozu T, Kumei S, Takakusaki K, Miyagishi S, Ohhira M. Adenosine A1 receptors mediate the intracisternal injection of orexin-induced antinociceptive action against colonic distension in conscious rats. *Journal of the Neurological Sciences*, 2016; 362: 106-110.
- \*Okumura T, Nozu T, Kumei S, Takakusaki K, Miyagishi S, Ohhira M. Levodopa acts centrally to induce an antinociceptive action against colonic distension through activation of D2 dopamine receptors and the orexinergic system in the brain in conscious rats. *Journal of Pharmacological Sciences*, 2016. 130; 123-127.
- \*Nozu T, Miyagishi S, Nozu R, Takakusaki K, Okumura T. Water avoidance stress induces visceral hyposensitivity through peripheral corticotropin releasing factor receptor type 2 and central dopamine D2 receptor in rats. *Neurogastroenterology and Motility*, 2016; 28:522-531.
- ▲Yaguchi H, Takei T, Kowalski D, Suzuki T, Mabuchi K, and \*Seki K: Modulation of spinal motor output by initial arm postures in anesthetized Monkeys. *Journal of Neuroscience*, 29 April 2015, 35(17): 6937-6945, 2015.
- \*Nambu I, Hagura N, Hirose S, Wada Y, Kawato M and \*Naito E Decoding sequential finger movements from preparatory activity in higher-order motor regions: an fMRI multi-voxel pattern analysis. *European Journal of Neuroscience*, 42(10): 2851-2859, 2015.
- ◎▲Ishikawa T, Tomatsu S, Izawa J, \*Takei S. The cerebro-cerebellum: Could it be loci of forward models? *Neuroscience Research*, 2015. [領域内共同研究]

19. ▲Ishikawa T., Takei S., \*Mitoma H. Overlooked Holmes' clinical signs: reevaluation by recent physiological findings. *Cerebellum and Ataxias*, 2(13), 2015.
20. ▲Tomatsu S, Ishikawa T., Tsunoda Y, Lee J., Hoffman DS, \*Takei S. Information processing in the hemisphere of the cerebellar cortex for control of wrist movement. *Journal of Neurophysiology*, 2015.
21. ▲Lee J, Kagamihara Y, \*Takei S. A New Method for Functional Evaluation of Motor Commands in Patients with Cerebellar Ataxia, *PLoS ONE*, Vol. 10, No. 7: e0132983. 2015.
22. ▲Ishikawa T., Tomatsu S, Tsunoda Y, Lee J., Hoffman DS, \*Takei S. Releasing dentate nucleus cells from Purkinje cell inhibition generates output from the cerebrocerebellum. *PLoS ONE*, 9(10):e108774., 2014.
23. \*▲Takakusaki K., Chiba R, Nozu T, Okumura T. Brainstem control of locomotion and muscle tone with special reference to the role of the mesopontine tegmentum and medullary reticulospinal systems. (Review) *Journal of Neural Transmission* (Vienna). 2015.
24. \*▲Okumura T, Nozu T, Kumei S, Takakusaki K., Miyagishi S, Ohhira M. Involvement of the dopaminergic system in the central orexin-induced antinociceptive action against colonic distension in conscious rats. *Neuroscience Letters*. 2015; 605: 34-38.  
その他、A02 の論文発表 43 件

#### A03 公募研究

25. Ogawa H, \*Kamada K. The Road to Nonawaking Functional Mapping Combining High Gamma Activity with Corticocortical Evoked Potential, *World Neurosurgery*, 2015, Vol.84, No.1, pp187-188
26. ◎▲\*Yoshimura N., Nishimoto A, Belkacem AN, Shin D, Kambara H., Hanakawa T., Koike Y: Decoding of covert vowel articulation using electroencephalography cortical currents. *Frontiers in Neuroscience*, 10(175), 2016 [領域内共同研究]
27. A. Abdi, N. Mallet, F.Y. Mohamed, A. Sharott, P.D. Dodson, K.C. Nakamura, S. Suri, S.V. Avery, J.T. Larvin, F.N. Garas, S.N. Garas, F. Vinciati, S. Morin, E. Bezdard, J. Baufreton, \*P.J. Magill, Prototypic and arky pallidal neurons in the dopamine-intact external globus pallidus, *Journal of Neuroscience*, 2015, Vol. 35, No. 17. pp.6667-6688
28. Y. Yamao, \*R. Matsumoto, K. Kunieda, Y. Arakawa, K. Kikuchi T, S. Shibata, A. Ikeda, H. Fukuyama, S. Miyamoto: A possible variant of negative motor seizure arising from the supplementary negative motor area, *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 2015, Vol. 134, pp. 126-29
29. \*Yoshida M., Isa T, Signal detection analysis of blindsight in monkeys., *Scientific reports*, 2015, 5:10755
30. \*Y. Murata, N. Higo, T. Hayashi, Y. Nishimura, Y. Sugiyama, T. Oishi, H. Tsukada, T. Isa, H. Onoe, Temporal plasticity involved in recovery from manual dexterity deficit after motor cortex lesion in macaque monkeys, *Journal of Neuroscience* 35, 2015, pp. 84-95.  
その他、A03 の論文発表 38 件

#### B01 計画研究

31. ◎▲\*Arizono, N., Ohmura, Y., Yano, S. & Kondo, T., Functional connectivity analysis of NIRS recordings under rubber hand illusion to find a biomarker of body ownership, *Neural Plasticity*, in press.
32. ◎▲\*Izawa, J., Asai, T., & Imamizu, H., Computational motor control as a window to understanding schizophrenia, *Neuroscience research*, 104, pp. 44-51, 2016. [領域内共同研究]
33. ◎▲\*Yano, S., Maeda, M., & Kondo, T., Slow dynamics perspectives on the Embodied-Brain Systems Science, *Neuroscience research*, 104, pp. 52-55, 2016. [領域内共同研究]
34. ▲\*Tanaka, H., Modeling the motor cortex: Optimality, recurrent neural networks, and spatial dynamics, *Neuroscience Research*, 104, 64-71, 2016.
35. ▲\*Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S., Coordinate Systems in the Motor System: Computational Modeling and EEG Experiment, *Advances in Cognitive Neurodynamics (V)*, pp. 85-92, 2016.
36. ▲\*Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H., Divided attention and processes underlying sense of agency, *Frontiers in Psychology*, 7:35, 2016.
37. ▲\*Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H., The sense of agency during continuous action: Performance is more important than action-feedback association, *PLoS ONE*, 10(4): e0125226, 2015.
38. ▲\*Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H., The influence of action-outcome delay and arousal on sense of agency and the intentional binding effect, *Consciousness and Cognition*, 36, 87-95. 2015.
39. ▲\*Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H., The influence of goals on sense of control, *Consciousness and Cognition*, 37, 83-90, 2015.
40. ▲\*Sakamoto, T. & Kondo, T., Visuomotor learning by passive motor experience, *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, doi: 10.3389/fnhum.2015.00279.
41. ▲\*Tanaka, H., & Sejnowski, T. J., Motor adaptation and generalization of reaching movements using motor primitives based on spatial coordinates, *Journal of neurophysiology*, 113(4), 1217-1233, 2015.  
その他、B01 の論文発表 6 件

#### B02 計画研究

42. ◎▲\*R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, A. Yozu, N. Haga, Human upright posture control models based on multisensory inputs; in fast and slow dynamics, *Neuroscience Research*, 104:96-104, 2016. [領域内共同研究]

43. ▲\*T. Ogata, A. Nagata, Z. Huang, T. Katayama, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, K. Aida, N. Kuwahara, J. Ota, Mannequin system for the self-training of nurses in the changing of clothes, *Kybernetes*, 45(5): 839-852, 2016.
44. ▲\*Z. Huang, T. Katayama, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, K. Aida, N. Kuwahara, T. Ogata, J. Ota, Design and evaluation of robot patient for nursing skill training in patient transfer, *Advanced Robotics*, 29(19):1269-1285, 2015.
45. ▲\*S. Aoi and T. Funato, Neuromusculoskeletal models based on the muscle synergy hypothesis for the investigation of adaptive motor control in locomotion via sensory-motor coordination, *Neuroscience Research*, 104:88-95, 2016. [領域内共同研究]
46. ▲S. Fujiki, \*S. Aoi, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, Adaptation mechanism of interlimb coordination in human split-belt treadmill walking through learning of foot contact timing: a robotics study, *Journal of the Royal Society Interface*, 12(110):20150542, 2015.
47. ▲\*S. Aoi, Neuromusculoskeletal modeling for the adaptive control of posture during locomotion, *Neuromechanical Modeling of Posture and Locomotion*, B. Prilutsky and D.H. Edwards (Eds.), pp. 225-244, Springer-Verlag, New York, 2016.  
その他、B02 の論文発表 18 件

### B03 公募研究

48. ▲\*T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, T. Imai, T. Aoyagi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, Evaluation of the phase-dependent rhythm control of human walking using phase response curves, *PLoS Computational Biology*, 12(5):e1004950, 2016. [領域内共同研究]
49. ▲\*T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, Smooth enlargement of human standing sway by instability due to weak reaction floor and noise, *Royal Society Open Science*, 3(1):150570, 2016. [領域内共同研究]
50. ▲\*T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, Validating the feedback control of intersegmental coordination by fluctuation analysis of disturbed walking, *Experimental Brain Research*, 233(5):1421-1432, 2015. [領域内共同研究]  
その他、B03 の論文発表 6 件

### C01 計画研究

51. ◎▲\*Oouchida Y., Sudo S, Inamura T., Tanaka N., Ohki Y., and Izumi S.: Maladaptive change of body representation in the brain after damage to central or peripheral nervous system, *Neuroscience Research*, Vol.104, pp.38-43, 2016. [領域内共同研究]
52. ▲\*須藤珠水, 会津直樹, 太内田裕, 出江紳一:一人称視点による模倣運動を利用した運動・感覚リハビリテーション, 高次脳機能研究, 36(3),2016.
53. \*出江紳一, 八島建樹.:末梢神経連続パルス磁気刺激の製品化, *BIO Clinica*, 30(12) :45-49, 2015.
54. ▲\*出江紳一.:回復の原理と身体性システム科学, *BIO Clinica*, 30(12):13, 2015.  
その他、C01 の論文発表 13 件

### C02 計画研究

55. ◎\*A. Yozu, N. Haga, T. Funato, D. Owaki, R. Chiba, and J. Ota: Hereditary sensory and autonomic neuropathy types 4 and 5: review and proposal of a new rehabilitation method, *Neuroscience Research*, doi:10.1016/j.neures.2015, 2015. [領域内共同研究]
56. ▲\*Furuya S. and Hanakawa T.: A curse of motor expertise: focal task-specific dystonia as manifestation of maladaptive changes in body representations. *Neuroscience Research*, doi: 10.1016/j.neures.2015.12.001.
57. ▲\*Hanakawa T.: Organizing motor imageries. *Neuroscience Research*, doi: 10.1016/j.neures.2015.11.003.
58. ▲\*Iseki K., Fukuyama H., Oishi N., Tomimoto H., Otsuka Y., Nankaku M., Benninger D., Hallett M., Hanakawa T.: Freezing of gait and white matter changes: a tract-based spatial statistics study. *Journal of Clinical Movement Disorders* 2:1, 2015.
59. Furusawa Y., Hanakawa T., Mukai Y., Aihara Y., Taminato T., Iwata Y., Takei T., Sakamoto T., \*Murata M.: Mechanisms of camptocormia in Parkinson's disease analyzed by tilt table-EMG recording. *Parkinsonism and Related Disorders* 21(7): 765-70, 2015.
60. ▲Li LM., Uehara K., \*Hanakawa T.: The contribution of interindividual factors to variability of response in transcranial direct current stimulation studies. *Frontiers in Cellular Neuroscience* 9: 181
61. \*Shitara H., Shimoyama D., Sasaki T., Hanamo N., Ichinose T., Yamamoto A., Kobayashi T., Osawa T., Hanakawa T., Tsushima Y., Takagishi K.: The neural correlates of shoulder apprehension: a functional MRI study. *PLoS ONE* 10(9): e0137387, 2015.  
その他、C02 の論文発表 14 件

### C03 公募研究

62. Grimaldi G., Argyropoulos GP., Bastian A., Cortes M., Davis NJ., Edwards DJ., Ferrucci R., Fregni F., Galea JM., Hamada M., Manto M., Miall RC., Morales-Quezada L., Pope PA., Priori A., Rothwell J., Tomlinson SP., \*Celnik P.: Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation (ctDCS): A Novel Approach to Understanding Cerebellar Function in Health and Disease., *The Neuroscientist*, 2016, 22(1):83-97
63. \*Nakatani-Enomoto S., Hanajima R., Hamada M., Terao Y., Matsumoto H., Shirota Y., Ohminami S., Okabe S., Hirose M., Nakamura K., Furubayashi T., Groiss SJ., Kobayashi S., Mochizuki H., Enomoto H., Ugawa Y.:



Somatosensory-evoked potential modulation by quadripulse transcranial magnetic stimulation in patients with benign myoclonus epilepsy. *Clinical Neurophysiology*, 2016, 127(2):1560–1567

64. \*Terao Y, Fukuda H, Tokushige S, Inomata-Terada S, Yugeta A, Hamada M, Ichikawa Y, Hanajima R, Ugawa Y.: Is multiple system atrophy with cerebellar ataxia (MSA-C) like spinocerebellar ataxia and multiple system atrophy with parkinsonism (MSA-P) like Parkinson's disease? – A saccade study on pathophysiology., *Clinical Neurophysiology*, 2016, 127(2):1491–1502

その他、C03 の論文発表 27 件

### 【書籍】

1. 水口伸章、川人光男、内藤栄一、情動と運動-スポーツとこころ 運動と情動が生じるとき ブレインマシンインターフェイス, 朝倉書店, 2016
2. 太住倫弘, 森岡周, 臨床思考を踏まえる理学療法プラクティス 感覚入力で挑む 慢性疼痛の場合, 文光堂, 2016.pp.117-127
3. 花川 隆, ブレイン・マシン・インターフェイス研究の最新動向. Annual Review 神経 2016, 中外医学社, 2016
4. Matsumoto R, Kunieda T Cortico-cortical evoked potential mapping (Chapter 46, Section 5: Human Brain Mapping). Oxford University Press 2016 (in press)
5. 内藤栄一, 南部功夫, 廣瀬智士: イメージトレーニングによる運動学習と脳内機構 体育の科学, 2016, 66 巻 1 月号, 11-18
6. 森岡周, 発達を学ぶ 人間発達学レクチャー, 協同医書出版社, 2015
7. 高草木 薫・中階克己・千葉龍介・村田哲: 姿勢・歩行の制御 Clinical Neuroscience 2015 33; 740-744, 中外医学社
8. 花川 隆 (分担), 神経科学の最前線とリハビリテーション, 医歯薬出版, 2015
9. 高草木 薫: 運動麻痺と皮質-網様体投射 脊椎脊髄ジャーナル 三輪書店 Vol. 27 (2); pp 99-106, 2014
10. 高草木 他: Annual Review 神経 2015, オレキシシンと姿勢制御, 中外医学社, 2015  
その他 20 件

### 【学会発表】

発表 498 件 (うち国際会議発表 140 件、招待講演・基調講演 50 件)

### 【特許出願】

前田貴記: 特許出願「統合失調症を診断するための方法および装置: Sense of agency task (Keio method) および Temporal order judgment task (Keio method)」(特願 2015-245979)  
その他 3 件

### 【新聞・テレビなどでの報道】

1. 太田順 (領域代表) 2015 年 3 月 17 日、デンマークのラジオ放送局 Danish Broadcasting Corporation の科学番組でインタビューが放送
  2. 太田順 (領域代表)、内藤 栄一、出江 紳一、2015 年 2 月 2 日、朝日新聞朝刊「科学の扉」
  3. 今水 寛 (A01-1) 2015 年 12 月 9 日、プレスリリース「短期と長期の運動記憶の画像化に成功 早く学んですぐ忘れる・ゆっくり学んで長く記憶 その違いはどこに？」
  4. 今水 寛 (A01-1) 2015 年 1 月 6 日、「安静にしているときの脳活動から作業記憶トレーニング効果の個人差を予測することに成功」日本経済新聞, 毎日新聞, 産経新聞, 京都新聞, 中日新聞
  5. 島圭介 (C03-2) 2016 年 2 月 18 日、NHK「NEWS WEB」、ヒトからヒトへ技を伝える技術
  6. 稲邑哲也 (C01-1) 2015 年 9 月 3 日、BS 日テレ木曜スペシャル「すぐに役立つ! 錯覚ミステリー！」
  7. 花川 隆 (C02-1) 2016 年 3 月 6 日、NHK E テレ「サイエンス ZERO」
- その他 32 件



朝日新聞 朝刊 (2015 年 2 月 2 日)

### 【ホームページ】

平成 26 年 8 月 29 日に領域ホームページ (<http://embodied-brain.org/>) を整備し、公開シンポジウム等のイベント案内、研究成果の公表に加え、ニュースレター、年次報告書の電子ファイル公開を実施した。平成 26 年 10 月 31 日には英語版の領域ホームページ (<http://embodied-brain.org/eng/>) も整備し、研究成果の国際的な広報に務めた。

## 【ニュースレター・年次報告書】

ニュースレターNo. 1-4（それぞれ4-8ページ）を作成し、印刷物での配布と領域HPからのダウンロードにより公開した。H26・H27年度の年次報告書（和文・英文）を作成し、領域HPにて公開した。

## 【主催シンポジウム等の状況】

現在までに、国際シンポジウム1回、国内シンポジウム6回（含む一般公開シンポジウム）を実施した。以下にその詳細を示す。

- 第1回国際シンポジウム（平成28年5月8日～9日、東京大学伊藤謝恩ホール）、参加者120名
  - 第3回領域全体シンポジウム（平成28年3月7日～9日、ホテル千秋閣）、参加者100名
  - 包括脳ネットワーク冬のシンポジウム：新学術領域「身体性システム・こころの時間学：身体とこころの融合」（平成27年12月19日、一橋講堂）、参加者40名
  - 第1回一般公開シンポジウム（平成27年10月25日、東京大学武田ホール）、参加者191名
  - 第2回領域全体シンポジウム（平成27年7月4日、杏林大学三鷹キャンパス）、参加者100名
  - 第1回領域全体シンポジウム（平成27年3月9日～11日、ホテル千秋閣）、参加者60名
  - キックオフシンポジウム（平成26年9月29日、東京大学伊藤謝恩ホール）、参加者190名
- この他に、国際会議ワークショップ2回、国内外の学会のオーガナイズドセッション（12回）を実施した。

## 【アウトリーチ活動】

本領域のアウトプットの一つは、脳科学の知見に基づき、システム工学によりモデル化された新たなリハビリ手法を確立することであり、リハビリ現場で働く医師、理学療法士、作業療法士に向けた啓蒙活動が重要である。本領域のメンバーは、これまでに全国各地で70回以上の講演会・研修会を開催し、参加者総数は13,000人を超えている。以下にその一部を抜粋し示す。

2016年5月27日、第51回日本理学療法学術大会  
日本神経理学療法学会（札幌）、「運動制御と身体認知を支える脳内身体表現の神経基盤」と題する講演を実施、参加者2000名

2016年3月23日、第93回日本生理学会大会（札幌）、「中枢神経系における身体表現と認知運動連関の機能構築再構築」と題する講演を実施、参加者70名

2016年3月13日、第54回大阪体育学会（和歌山）、「ネイマールの脳から解かる効率的な運動制御」と題する講演を実施、参加者100名

2016年3月1日、神奈川神経内科学セミナー（横浜）、「大脳基底核と運動機能の調節」と題する講演を実施、参加者120名

2016年1月22日、第10回スーパーコンピュータ「京」と創薬・医療の産学連携セミナー（大阪）、「多数の筋の協調関係が生じる脳内最適化過程のシミュレーション」と題する講演を実施、参加者100名

2015年12月10日、第39回日本高次脳機能障害学会学術総会ワークショップ（東京）、「Sense of agencyパラダイムによる新たなリハビリテーション戦略ー運動麻痺から高次脳機能障害まで」と題する講演会を実施、参加者2000名

2015年11月3日、大阪理学療法士会研修会（大阪）、「運動麻痺・不随意運動と運動失調・身体認知と運動機能の再建」と題する講演を実施、参加者330名

2015年7月2日、青洲会病院リハビリテーション研修会（福岡）、「中枢神経機能の概要・歩行障害と運動麻痺」と題する講演を実施、参加者280名

2015年6月12日、国立情報学研究所オープンハウス新学術領域研究セッション（東京）、参加者80名【一般向け講演会】

2015年6月5日、第50回日本理学療法学術大会（東京）、「姿勢と歩行の神経科学」と題する講演を実施、参加者2400名

2015年3月21日、日本リハビリテーション医学会市民公開講座（仙台）、「脳科学とリハビリテーションー先端的システム工学による融合」と題する講演会を実施、参加者130名【一般向け講演会】

2014年11月30日、クオラリハビリテーション病院脳生理研修会（鹿児島）、脊髄と歩行・姿勢・運動と身体認知・運動麻痺と皮質・網様体投射、参加者350名

2014年10月26日、旭川医師会講演会（旭川）、「脳の高次機能を守ることができるのか」と題する講演を実施、参加者420名、【一般向け講演会】

2014年9月19日、旭川医科大学市民公開講座（旭川）、脳機能と運動機能の再建について講演を実施、参加者275名【一般向け講演会】



アウトリーチ活動の様子（第39回日本高次脳機能障害学会学術総会ワークショップ、参加2000人）

## 6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域は、脳科学、システム工学、リハビリテーション医学の複合領域であることから、研究項目間の連携は必然であり、図 6-1 に示すように、研究項目間の連携研究は着実に増加している。計画研究のみならず公募研究が密に組み込まれている点が特徴であり、領域の飛躍的広がりを表している。

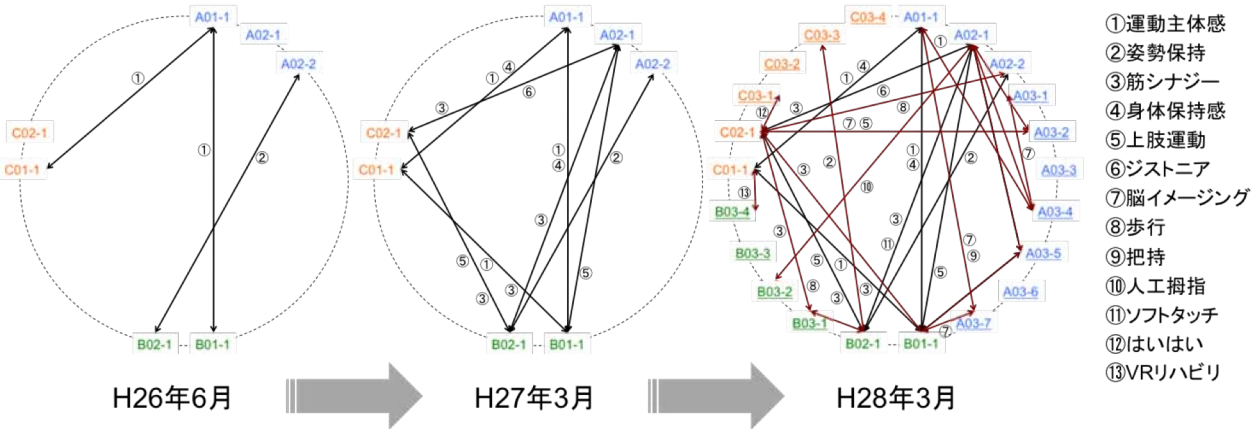


図 6-1 研究項目間の具体的な研究連携の状況（下線は公募研究）

以下に、これらの中から具体的な成果に繋がっている 4 つの代表的な連携研究について述べる。

### 1. 運動主体感を用いた身体認知機能の診断・介入法の検討（A01-1 前田、A03-4 松本、B01-1 矢野）

#### 【図 6-1 の①に対応】

運動機能のリハビリテーション過程では、患者自身が自分の運動機能や身体状態を適切に把握する必要がある。このため本研究では、当事者の身体認知機能を推定・診断する特徴量として運動主体感を計測し、その認知機能に応じた介入手段をモデルに基づいて設計することを試みている。本共同研究を推進している主な研究者は、被計測者に低負荷な運動主体感の計測手法を確立した前田（A01-1、慶應大学）、統計的学習理論の枠組みから身体認知機能の診断手法と介入策を設計する矢野（B01-1、東京農工大学）、てんかん治療前後において実際の診断と介入策の有効性を検証する松本（A03-4、京都大学）の 3 名である。

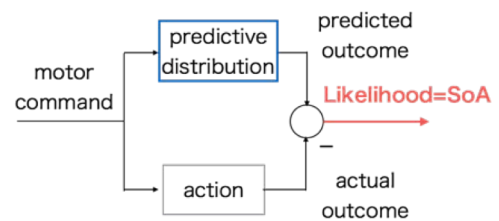


図 6-2 予測分布の尤度を運動主体感とみなすことで、当事者の認知状態を推定する枠組み

### 2. 機能回復に関する神経生理学的知見と計算論的神経科学の融合（A01-1 今水、A03-7 村田弓、B01-1 井澤）【図 6-1 の⑦と⑨に対応】

モデルベースドリハビリテーションを確立するためには、運動制御・学習分野で発展してきた計算論とその神経実装に関する研究成果と、脳機能回復に関わる神経生理学を統合する必要がある。本研究では特に、運動障害が損傷による脳の機能や構造変化に対する再最適化の結果として生成されるといふ仮説に立脚し、補償動作獲得時における報酬情報の役割を明らかにするものである。本共同研究は、運動学習が報酬情報を手がかりとした再最適化プロセスであることを世界で初めて明らかにした井澤（B01-1、筑波大学）、内部モデルのfast/slow dynamicsの神経相関を発見した今水（A01-1、東京大学）、サル脳の卒中モデルを開発し機能回復に係る神経基盤を明らかにした村田（A03-7、産業技術総合研究所）の 3 名に加え、世界で初めて計算論的脳科学の枠組みを機能回復へ適用した Prof. Schweighofer (University of South California, U.S.A.) が参画している。

3. 歩行に対する筋シナジーモデルベーストリハビリシステムの構築と無痛無汗症患者への適用 (B03-1 船戸、C02-1 四津・大脇)【図 6-1 の⑧に対応】

筋シナジーのリアルタイム解析による神経系（脳内身体表現）のモニタリングと、それによる効果的なリハビリシステムの構築を目的として、筋シナジーの解析システムの構築と無痛無汗症患者を対象とした実証実験を行っている。無痛無汗症患者は、歩行時に接地圧を低下できないことで、気づかないうちに頻りに骨折をしてしまう問題がある。本研究では、歩行中の足底圧情報の音による提示と筋シナジーを基にした歩容の修正を行うフィードバックシステムを提案し、実証実験を行っている。本共同研究を推進している研究者は、小児科専門医、リハビリ科専門医・指導医である四津



図 6-3 筋シナジーベーストリハビリシステムによる無痛無汗症患者への介入効果

(C02-1、東京大学)、筋シナジー解析を担当する船戸 (B03-1、電気通信大学)、感覚障害を対象とした感覚代償装具という新規なリハビリ装具を開発し、片麻痺患者への効果を示した実績のある大脇 (C02-1、東北大学) の3名である。現在までの研究状況として、無痛無汗症患者に音による接地・離地情報を与えることで、歩行中の接地時の床圧力の低下が確認されている。また、このときシナジーには、ピークタイミングの変化が見られている (図 6-3)。今後、シナジーのタイミングを基に音情報を与えてフィードバックを行うことで、無痛無汗症患者に対する効果的な歩容の生成ができるようなリハビリテーション手法の構築を目指して研究をすすめていく。

4. シナジーベースド・リハビリテーション (A02-1 関、A03-2 吉村、B02-1 太田)【図 6-1 の③に対応】

把持運動をしている人の脳波と筋シナジー情報を実時間で抽出し、その情報を基にニューロフィードバックを行うシステムの開発を目指している。ここでは、以下の3段階の処理フローを想定している。(a)64チャンネルの脳波計をヒトの頭皮上に装着し、256チャンネルの表面筋電位センサ群を上肢前腕筋上の皮膚に装着する。(b)表面筋電位情報から、把持運動を生成する合計27個の筋出力値を再構成する。(c)筋出力から筋シナジー情報を求め、



図 6-4 シナジーベースドリハビリテーション

脳波情報と統合してリハビリテーションに役立てる。(a)については市販されている脳波計ならびに表面筋電位センサシステムを適用し、(c)は、3のシステムを改良して用いる。(b)の信号処理がポイントとなるが、ここでは上記3研究室と、脳波情報・筋電位情報の信号処理の世界的権威である米国 University of California San Diego 校、Swartz Center for Computational Neuroscience の Prof. Scott Makeig 研究室と共同で、独立成分分析とベイズ推定を組み合わせた方法論による推定法を開発中である。図 6-4 に、人間が上肢運動をしている際の、脳波情報と筋電位情報の基礎的な計測実験の様子を示す。

## 7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

### 【身体性システム若手の会の組織化】

本領域では、数理モデル化を軸としたシステム工学における構成論的研究アプローチと脳神経科学・リハビリ医学の知見を有機的に組み合わせることにより、脳内身体表現の神経基盤の解明とモデルベーストリハビリテーション法の確立を目指している。「身体性システム科学」という新しい学術領域を創成し、学問として体系化するためには、異分野融合の理念に精通して実践的に研究を推進できる若手研究者の育成が不可欠である。このため本領域では、領域に所属する若手研究者の会「身体性システム若手の会（通称若手の会）」を組織化した。領域の若手研究者とその研究協力者から現在までに44名が参加している。

若手の会では、これまでに国内学会のセッション企画（2回）、身体性システム講演会の企画・開催、身体性システム科学勉強会を計4回企画・開催した。さらに今後もチュートリアル・セミナーを企画・開催する予定である。

また、国際活動支援班を活用して、領域内で選ばれた有望な若手研究者を、海外の関連研究機関に長期派遣して研鑽させることにより、国際的な若手研究者のネットワークを構築し、次世代の研究リーダーたる人材を身体性システム科学領域から輩出する。

### 【若手の会の活動実績】

平成26年11月22日 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2014（岡山大学）：「脳内身体表現に基づく適応的運動機能のシステム論的理解」と題したセッションを企画し、領域の若手研究者10名が発表した。

平成27年3月19日 第1回身体性システム講演会（同志社大学）：システム制御理論に関する講演と運動生理学に関する講演が行われ、融合研究について議論した。約30名が参加した。

平成27年6月26日 第2回身体性システム講演会（京都大学）：「新しい身体運動学習理論に向けて」と題し3名の講師が講演。約50名が参加した。

平成27年8月21日 第3回身体性システム講演会（東京大学）：「モデルベース歩行支援技術から機能回復へ」と題し3名の講師が講演。講演者のうち1名は海外研究者であった。

平成27年11月22日 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2015（函館アリーナ）：「身体性システム」と題したセッションを企画し、領域の若手研究者17名が発表した。

平成28年5月7日 身体性システム勉強会（東京大学）：Neuroscience Researchの本領域特集号におけるレビュー論文著者2名による若手向けのチュートリアル講演を行った。



図7-1 分野を超えた若手研究者の交流



図7-2 第2回身体性システム講演会の様

## 8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

以下に本領域で使用した比較的高額な設備の備品を列挙する。

- A01-1 サル実験用光学的運動計測装置（(株)ノビテック製、VNS-3D3-1.3MF）4,972,509、近畿大学
- A01-1 身体意識推定用脳波計（eemagine 社製、eegosports）6,480,907 円、杏林大学
- A02-1 マカクサル用アイソレータ（特注）9,720,000 円、国立精神・神経医療研究センター
- A02-1 脊髄小脳変性症患者動作解析システム（カメラ 8 台）5,918,400 円、東京都医学総合研究所
- A02-1 Alpha SnR system（Alpha Omega 社製）6,922,800 円、国立精神・神経医療研究センター
- A02-2 電磁シールドルーム（東京計器）4,959,144 円、旭川医科大学
- B01-1 床反力計（TF4060, TF3040）4,104,000 円、東京大学
- B02-1 ラット計測用モーションキャプチャカメラ（Oqus300+）9,957,600 円、京都大学
- B02-1 人間計測用モーションキャプチャカメラ（Kestrel）6,912,100 円、東京大学
- C01-1 SIGVerse 用人間計測システム（VENUS3D）3,656,664 円、国立情報学研究所
- C02-1 無線筋電システム（Delsys Trigno16）4,823,280 円、東京大学
- C02-1 パーキンソン病歩行分析システム（Qualisys）8,424,000 円、国立精神・神経医療研究センター
- C02-1 圧力分布計測トレッドミル（Zebris FDM）3,294,000 円、東京大学

すべての研究項目において、高額な設備等は真に必要なものに限定して導入するとともに、その有効活用に向けて、総括班で共同利用設備リストを整備し、公募班を含め領域全体に公開して備品の相互利用の促進を図っている。これにより、領域内のメンバーが新たに融合研究に着手しやすい環境が整備される。また計測データ等の標準化・データベースによる共有化も併せて行うことで、領域内の異分野融合研究をさらに加速することが期待される。

これまでに、ワイヤレス筋電計測装置（東京大学と旭川医科大学）、光学式モーションキャプチャシステム（京都大学と東京大学）、Keio method 実験装置（ATR と慶応義塾大学）との間に設備備品の共同利用実績がある。その他に、国立精神・神経医療研究センターや近畿大学医学部に設置された動物実験用設備など、使用目的・方法が限定される備品については、備品管理者との共同研究という形式で利用することになっている。

総括班の経費は、領域全体会議、アウトリーチ活動（一般公開シンポジウムの開催費用、領域パンフレット、ニュースレター、ホームページの作成等）、身体性システム講演会（4 回開催）や若手の会主催のチュートリアル・セミナーの開催費用などに有効に使用されている。また、H27 年度より、公募班の若手研究者が、領域全体会議に参加する際の旅費支援としても使用している。

研究費を効果的に使用している例としては、領域ホームページの維持・管理費用が挙げられる。領域ホームページを WordPress によるコンテンツ・マネジメント・システムを用いて設計したことで、初年度のページデザインには予算を要したものの、その後の保守・管理については特段の費用はかからず、研究費の有効利用を実現できている。

## 9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

総括班では、外国人評価委員1名（Paolo Dario 教授 (Scuola Superiore Sant'Anna, Italy)）、国内評価委員3名（篠田義一氏（東京医科歯科大学・名誉教授）、伊藤宏司氏（東京工業大学・名誉教授）、才藤栄一氏（藤田保健衛生大学・教授））の4名に評価委員を依頼している。これまでに、国際シンポジウム1回、国内シンポジウム3回を開催し、その都度、以下のとおり評価を依頼した。

第1回身体性システム国内シンポジウム（2015年3月9日～11日）

国内評価委員による領域全体および計画研究の2014年度の研究成果および進捗状況に対する評価

第2回身体性システム国内シンポジウム（2015年7月4日）

国内評価委員による公募研究の2015年度の研究計画に対するコメント

第3回身体性システム国内シンポジウム（2016年3月7日～9日）

国内評価委員による領域全体および各研究項目（計画・公募研究）の研究進捗状況に対する評価

第1回身体性システム国際シンポジウム（2016年5月8日～9日）

外国人評価委員および国内評価委員による領域研究の研究進捗状況に対する評価

評価結果は、コメントも含め、領域代表、班代表、研究代表者にそれぞれフィードバックし、その後の研究の進め方の指針とするよう指示を行った。これに基づき、各研究者は、評価結果を踏まえた上で、研究を適切に進めている。

2016年5月に行われた第1回身体性システム国際シンポジウムでは、外国人評価委員を含むすべての評価委員に評価を行って頂いた結果、本領域の重要性が認識され、2年余りという短い期間での進捗に対して非常に高い評価を得た。以下に具体的内容を述べる（分量制約の観点から、一部元の意味を損なわない範囲で原文を変更している）。

### Prof. Paolo Dario :

この新学術領域は、神経科学、システム工学、リハビリ医学の分野に進展と新たな理解をもたらす可能性を持つ「身体性システムの解明」を狙った明確かつ野心的なプロジェクトである。脳内身体表現の長期的な変容メカニズムを解明し、その知見をリハビリテーション介入に応用しようとする研究目的は国際的にも極めて新しい。この「身体性システム科学」なる新たな学問領域の設立をゴールに設定することは賞賛に値する。私はこのプロジェクトに参画する研究者の多くを知っているが、彼らの評判、技量そして国際的な認知度は秀逸である。このプロジェクトでは、個々のグループが優れた研究成果を追い求めるだけでなく、それらを統合することに重点が置かれている。領域代表や総括班はこの点についてよく考慮している。すでに多くの会議が開催され、融合研究の成果が示されていることから、研究グループ間の連携がうまく機能していることがわかる。本プロジェクトの国際的な連携も大変優れており、日本における他の類似のプロジェクトと比べても多大な進歩を示している。学生は領域の様々な活動にうまく参画しており、シニア研究者とアクティブに相互作用することが推奨されている。私からは、各個人が高い水準の研究業績を挙げることに加えて、リハビリテーションの臨床に対し、科学に立脚した研究アプローチのインパクトを示すために、研究活動と結果を結びつけるべくさらなる努力を続けることを望みたい。最後に、領域代表、研究代表者ならびにすべての研究者がこれまでに達成した優れた研究成果を賞賛したい。

### 篠田義一氏 :

この2年間の本領域研究を見ていると、領域の開始当初から工学系と生物・医学系の若手が入り混じって共同研究を進めており、工学系の研究者が生物系のグループに参加して実験する、患者からのデータを取り解析に加わっており、一方、生物系の人、工学的モデルや理論、新しい工学的プログ

ラムによって開発されたデバイスを記録・解析に導入するという形でうまくコラボレーションできている点が高く評価できる。短期間ではあるが、多くの研究課題が着実に進行しており、既に出されている優れた成果を含め今後高い水準の成果が期待できる。これはオーガナイザが、異なる分野の全体をよく理解し掌握する努力をしており、各グループリーダーとの間で共通の目的に向かった協力関係を構築することを積極的に推進していることが要因となっている。今後の展開に向けていくつかの要望点を以下に述べる。1)「脳内身体表現」とはどのようなものであるか、この定義に関して各研究者の間での意識差がまだ多少残っている。この点に関して、色々な立場での考え方を整理し、より一層の認識の共通化により研究を進めることで、成果の新しさをより明確な形で周囲に示すことができる。2) 公募研究には、計画研究では十分でない部分を補う人材を加えることが望ましい。現状の公募班メンバーに加えて、高等哺乳類を用いたシステム神経生理学的研究者の追加が望ましい。3) 新たに提案する解析手法の問題点・限界についての理解をすることでより一層の進展が望まれる。

#### 伊藤宏司氏：

本領域の取組みは、脳機能障害克服に向けて最も期待される科学分野の一つであり、長期的な視野に立って推進すべき領域である。新分野創出のためには、脳科学 (A 班)、システム工学 (B 班)、リハビリテーション医学 (C 班) の分野間の相互理解および柔軟な思考と幅広い視野を有する若手研究者の育成が重要な課題である。各班ともよく組織化されており、多くの新たな知見や成果が得られていると判断する。分野間の共同研究にも、没入型 VR システムや筋シナジー解析システムを核とした独創的なテーマが進行している。ともに臨床応用を目指しており、今後の進展が大いに期待される。分野間の相互理解を深めるために、後半では合同班会議等を活用して新分野創出にむけてより一層精力的に取り組む必要がある。公募研究には計画研究を補完する魅力的な研究課題がいくつか見られる。後半は、公募班の中から推進すべきテーマを複数取り上げ、計画研究との積極的な融合を進めていくことが有効である。若手研究者については、最先端のテーマを遂行している一流の研究者に直接触れ、議論できることは極めて貴重な体験であり、彼らが将来新分野を創成し課題を解決していく上で有用であると期待できる。この意味で、本領域で進めている班会議や研究会・講演会はよい機会を提供していると考えられる。後半でも積極的な取組みを期待する。国際会議でのオーガナイズドセッション提案、国際論文誌の特集号企画、国際シンポジウムの開催など、本領域研究を国際的に展開する試みが数多く見られ高く評価できる。今後は、ここまでで培った国際研究者グループを長期的に持続させることが重要であると考えられる。

#### 才藤栄一氏：

太田順教授による本課題への挑戦的な組織化には、生き生きとして十分な速度がある。このような新領域形成には欠くことのできないリーダーシップであり、実際、短時間のうちに多くの研究課題を誘導、促進し、成果を上げている。個々の分担領域におけるその主要研究は、どれも極めて高い水準にある。従って、この新学術領域は、新鮮で活発な領域として正しく芽生えたと断言したい。以下、この新領域研究への今後の展開に関する要望を論じたい。

1) リハビリにおける運動系練習プログラムは、運動学と行動心理学的な背景を有する論理に基づいて構成されている。学習だけでなく、筋力増強、可動域拡大など、運動に関わる諸要素を向上させ、それを課題達成という目的のための協調性 (巧緻性) に組み合わせている。そして、それらの時間配分、難易度調整、転移性などが訓練の成否を左右する。本領域に所属している研究者は、リハビリテーションに関する新しい知見を得たこの段階において、現状のリハビリテーションにおける上記の介入行為との対応を議論してほしい。2) 具体的な臨床例を集中的に議論することで、互いの概念がカバーしている範囲、あるいはその外にある部分をより一層確認・議論してほしい。



## 10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

領域メンバー自身の評価結果と、評価班メンバーからの評価結果より、領域研究はほぼ順調に進んでいるといえる。今後も、領域融合と計画・公募研究融合による学問領域の確立と発展、若手の育成、国際的展開とアウトリーチ活動を中心課題に据えて、進めていく。

### 1. 領域融合による学問領域の確立

#### (a) ターゲットとする疾患の選定

モデルベーストリハビリテーションの実適用のため、脳科学、システム工学、リハビリテーション医学の3つの分野の研究者が集結して集中的に扱う疾患を設定する。**身体認知**に関しては、**幻肢痛**と**片麻痺**を対象とし、身体意識を用いたリハビリテーション手法(以下:リハ手法)の確立を目指す。**運動制御**に関しては、**先天性無痛無汗症**と**ジストニア**を対象とし、筋シナジー制御を用いたリハ手法の確立を目指す。国際支援班における海外著名研究者との連携も同じ枠組みで行っており、領域の成果と国際支援班の成果との共有化が容易である。この際、リハ手法の確立に加えて、患者の現在の状態を知る脳内身体表現マーカーの発見、脳内身体表現の動的モデル(=日々のリハビリと長期的変容との関係を表す数理モデル)の構築を目指す。

#### (b) 学術論文執筆の促進

これまでの *Neural Plasticity*, *Advanced Robotics* 等に引き続き、国際雑誌におけるスペシャルイシューを継続的に企画し、身体性システム科学に関わる領域内外の研究者の投稿を促進する。領域内メンバーの論文成果の公表は基より、**身体性システム科学の世界的な浸透**を促進する。この実現のため、同一出版社内で複数の学問領域にまたがって企画可能な**ヴァーチャルスペシャルイシュー (virtual special issue)**を企画し、領域横断的な学問領域の浸透を図る。加えて、国際共同研究の成果に基づく共著論文の投稿も促進する。

#### (c) 資産の共有化、データベース環境の構築による研究立ち上げ支援

身体性システム科学の広がりのためには、研究者人口の増大は不可欠である。領域内のメンバーが新しい研究を開始することを支援するために、前述した備品リストの公開による領域メンバーの**備品相互利用制度の確立**およびデータベース環境の構築による**データ標準化・共有化**の準備を行う。様々な研究で必要となる実験機器を利用しやすくすることで、研究推進の加速化が大いに期待できる。また、データ標準化や共有化により、他の研究者との計測データや知見の共有を促進できることとなる。

#### (d) 対外的広報・学会活動の継続

(b)で述べた国際雑誌におけるスペシャルイシューに加えて、国際会議、国内会議におけるワークショップ、シンポジウム、オーガナイズドセッション、国内外雑誌での特集号、更には、領域主催のシンポジウム等を今後も継続的に実施する。

### 2. 若手研究者の育成

#### (a) 若手の会を中心とした企画立案と実行

脳科学、システム工学、リハビリテーション医学それぞれの分野における若手研究者から構成された**身体性システム若手の会**を、学問融合の一つの核とする。現在、領域メンバー14名が執筆した

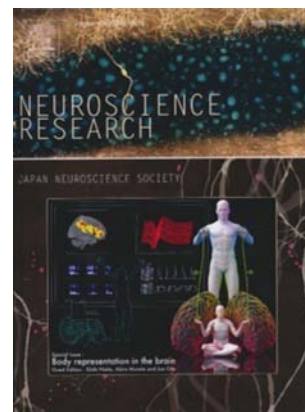


図 10-1 Neuroscience Research の2016年3月特集号表紙

Neuroscience Research の身体性システム特集号（図 10-1）における身体性システム科学に関するレビュー記事のチュートリアルを定期的で開催しており、若手研究者を中心に身体性システム科学の基本概念の習得・発展に一定の成果を得ている。加えて、この会合では、次世代での身体性システム科学のコアとなる身体認知と運動制御の相互作用に関する議論も進んでいる。さらには、この会の運営を通じて、若手研究者の学際的プロジェクト運営能力の促進も図る。

### (b) 領域における用語集の作成

複合領域研究を推進する上で大きな障害となるのは、異分野の研究者が用いる学術用語の定義に差異があることである。この相違が時として議論を難しくしている。ここで重要なのは、**用語の定義の共通化**である。そこで、若手の会メンバーが中心になって、領域内で扱う用語集作成を行っている。その内容の一部は、計測自動制御学会誌「計測と制御」における身体性システム特集号（2017年3月発行予定）に掲載する予定である。

## 3. アウトリーチ活動

### (a) 講演会等の精力的開催

前述のとおり、これまでに、様々なシンポジウムにおける領域メンバーの講演数は、**総計 70 回**を超え、**参加者は延べ 13,000 名**を超えている。これらの実績は、本領域メンバーのリハ分野等における**高い知名度と大きな貢献度**を意味している。次年度以降も引き続き精力的に講演を行う。今後さらに期待できる当領域の成果を公表することで、**身体性システム科学とモデルベーストリハビリテーションの概念の浸透**

が可能となる。また、このようなアウトリーチ活動が可能なる人材育成を目指す。

### (b) 在宅リハビリテーション用システムの開発

将来的に、全国どこの病院でも、さらには在宅でも使えるリハビリシステムの開発を目指す。本領域活動中には、そのための**基盤となりうる 4 つの技術開発**（図 10-2 参照）を進める。一つは、例えば、個々の研究者や医療従事者が誰でも同様に、実時間で筋シナジーの情報を得られるような**標準化された筋シナジー解析環境**の開発である。2つ目は、ポータブルでどこでも使用できる介入法の開発であり、具体的には、**筋への磁気刺激装置**や**没入型 VR リハシステム**を開発している。加えて、医療従事者らが、患者のリハの進行度合いを把握し、リハ効果の総合的な知識を共有できるような**クラウド型リハビリシステム**の開発にも取り掛かっている。

### 不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充

計画班メンバーに不足している以下の観点に貢献できる研究者を公募研究で重点的に補充したい。

- 大量かつ多様な生体データ（例えば、脳波信号や表面筋電位信号）を処理して、意図する情報を抽出できる研究者
- 領域メンバーが共用できる、計測データの実時間処理・表示システムを構成できる研究者
- 多くの患者データを保有し、モデルベーストリハビリテーションの確立に向けたモデル構築に貢献できる研究者

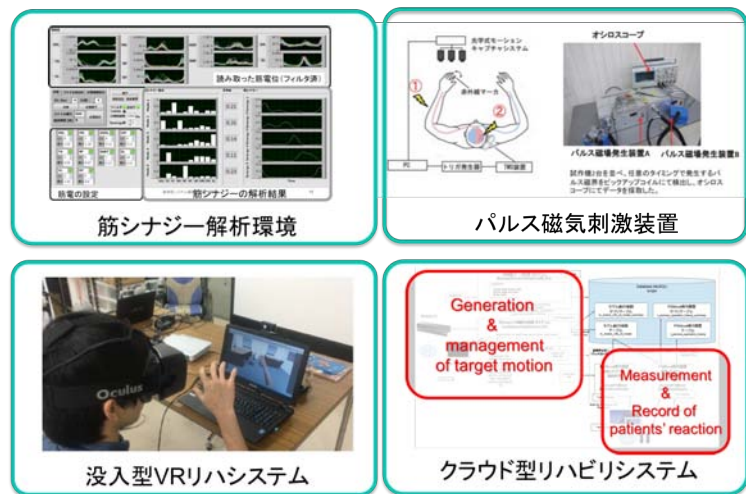


図 10-2 在宅リハビリテーションシステムの開発に向けて