

戦略的創造研究推進事業
発展研究（SORST）

研究終了報告書

研究課題

「運動と認知の協調制御による
汎用的能力獲得の神経機構」

研究期間：平成16年12月 1日～
平成19年 3月31日

本田 学

(国立精神・神経センター神経研究所、
部長)

1. 研究実施の概要

この研究プロジェクトに先行する戦略的創造研究推進事業個人研究（さきがけ研究）のプロジェクトでは、運動制御と認知的制御が運動前野をはじめ多くの神経機構を共有し、しかもそれらの脳領域が運動制御と認知的制御の両者に不可欠なものとしてかかわっていること、運動制御において領域間に機能的な役割分担があるように、認知的制御でも役割分担があることを明らかにしてきた。本研究では、こうした先行プロジェクトで得られた知見をさらに発展させ深めるとともに、運動と認知の共通神経機構が、人間のさまざまな技能獲得にどのような効果と影響をおよぼしているかについて着目し、将来的な教育への応用を視野に入れた基礎神経科学の研究成果を得ることをめざして2年間の研究をおこなった。

本研究構想の背景となる問題意識は次のようなものである。現代の専門化社会では、限られたリソースを特定の領域に集中し、効率的に達成度を高める「一点集中型」の能力開発が行われることが標準的である。一方、「一芸に秀でるものは多芸に長ずる」という言葉にみられるように、わが国を含む東アジアの伝統社会では、一つの技能や能力の習得を通して全般的な活性向上をはかる教育システムがかつて確立していた。これら伝統的な教育法のなかで採用されているプロトコルの代表的なものひとつとして、「ひとつのことに集中して学習するのではなく、同時に並行して複数のことを学習する」ことがあげられる。このプロトコルにより、たとえ短期的には効率が悪くても、一度覚えたことが長期にわたって身につく（いわゆる身体で覚える）、さらに学習したこと以外でも改善効果が発揮されることが体験的に知られている。

こうした体験的事実を裏付ける知見として、実験心理学の研究領域では、一点集中型の学習は、短期的効率はよいものの記憶保持が悪いのに対して、同時並行型の学習は、短期的効率は悪いものの記憶の定着がよいことが、運動と認知のどちらのドメインにおいても証明されている。しかし、これらの背景をなす神経基盤は明らかになっていない。そこで私たちは、「同時並行型学習の遂行時には、運動と認知の共通神経制御機構の働きにより、複数内部モデルが並行して形成される」との仮説のもと、学習プロトコルによる成績の違いが、運動と認知の共通制御神経機構とどのような関連をもつかについて、脳機能画像法と磁気刺激法を組み合わせた検討をおこなった。

本研究期間においては具体的に、以下の2点に絞って研究を実施した。まず運動と認知の共通制御神経機構に関するこれまでの成果をさらに発展させるため、認知的制御にかかわる前頭葉高次運動皮質と頭頂葉皮質の機能分担について、「前者は認知的操作をフィードフォワード制御し、後者は認知的制御のフィード

バックモニタリングに関連する」という仮説をたて、磁気共鳴機能画像法と経頭蓋磁気刺激法をもちいてその検証をおこなった。

次に、最近報告されている運動制御における複数内部モデル獲得パラダイムを認知領域に拡張するために、運動制御でありながら、認知的な制御過程が大きな重みを占める条件付け運動順序課題を用いた複数の認知的運動制御学習プロトコルを作成した。そして複数種類の行動課題を離散的集中的逐次的に学習するプロセスと、並列同時に切替ながら学習するプロセスとを高磁場磁気共鳴機能画像をもちいて対比的に検討した。さらに異なるプロトコルで学習をした直後の記憶定着期に、経頭蓋低頻度連続磁気刺激をもちいて前頭葉高次運動皮質に一過性可逆性の機能的「仮想傷害」を発生させることにより、学習の成績に対する影響を検討した。これらによって、運動と認知の両面における複数内部モデルの並列同時形成にかかわる神経機構を明らかにすることを目指した。その結果、以下の結果が得られた。

第一の柱である前頭葉高次運動皮質と頭頂葉皮質との機能分担を明らかにする研究では、決められたルールに従ってフィードフォワード制御のみで課題を遂行することの可能な「あみだクジ」を応用した空間情報操作課題（脳内あみだクジ課題）を考案した。これを用いて、記憶保持期間と情報操作期間の脳活動を磁気共鳴機能画像法により捉えたところ、前頭葉高次運動皮質に属する補足運動野と内側頭頂葉皮質に相当する楔前部皮質の活動が、情報操作期間に特異的に上昇することが明らかになった。次に、実際にあみだクジを行っている最中に、これらの部位の神経活動を磁気刺激によって干渉すると、両部位の刺激は対照的な効果を示した。すなわち、前頭葉高次運動皮質の活動を干渉した場合は、反応時間が延長し正答率も悪化するのに対して、頭頂葉楔前部の活動を干渉した場合は、反応時間が統計的有意に短縮するだけでなく正答率はむしろ改善する傾向を示した。すなわち、前頭葉高次運動皮質の活動干渉は課題遂行に対してネガティブな影響を及ぼすのに対して、頭頂葉楔前部皮質の活動干渉は課題遂行にポジティブな影響を及ぼすことが明らかとなった。今回用いた課題が、脳内空間の実空間との照合のためのフィードバックモニタリングの重みの少ないフィードフォワード制御型の認知操作課題であったことを考慮すると、前頭葉高次運動皮質は認知的操作をフィードフォワード制御し、頭頂葉皮質は認知的制御のフィードバックモニタリングに関連するという仮説を支持する結果といえる。

第二の柱である学習プロトコルの違いによる成績変化と運動・認知共通制御神経機構との関連を明らかにする研究では、視覚刺激の色の違いによって異なる系列運動を学習する条件付け順序運動学習課題を異なる学習スケジュールでおこなう実験を実

施した。すなわち被験者を、3種類の互いに異なる系列運動を一つの系列運動を集中的に学習してから次の系列運動の学習を行うブロック学習群と、3つの運動系列をランダムな順番で学習していくランダム学習群とに分け、学習した運動系列の遂行技能を翌日にどの程度保持しているか、また学習していない新規の運動系列をどの程度上手に遂行できるかを評価した。その結果、すでに学習した運動系列の場合も、また新規の運動系列の場合も、ランダム学習群の成績がブロック学習群よりも優れていることが明らかとなった。学習翌日（二日目）に課題を遂行しているときの脳活動を磁気共鳴機能画像で捉えると、運動と認知の共通制御神経機構に属する補足運動野と頭頂葉後部皮質の活動が、ランダム学習群において高まっていることが明らかになった。次に、これらの領域の活動が、学習プロトコルによる成績の違いにどのように関連しているかを調べるため、一日目の学習終了直後の記憶定着期と考えられる時期に、補足運動野の活動を低頻度磁気刺激によって一過性に阻害し、翌日の成績変化を観察した。その結果、記憶定着期に補足運動野の活動を干渉することにより、ランダム学習群とブロック学習群との成績の差が顕著に小さくなる傾向が示された。このことは、学習プロトコルの違いによる成績の違いに、補足運動野の活動が影響を及ぼしており、しかもその影響は学習直後の記憶定着期にまで及んでいる可能性を示唆するものと考えられる。

今後は、補足運動野の活動干渉をおこなうタイミングや、その他の神経部位における効果を明らかにすることを通じて、短期的に非効率と考えられがちな学習と教育のプロトコルが潜在的にもっている持続的汎用的な効果を神経機構の面から明らかにすることに資する研究を継続していく予定である。

2. 研究構想

私たちは、この研究プロジェクトに先行するプロジェクトとして、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業個人研究（さきがけ研究）の支援を受け、運動制御と認知的制御が運動前野をはじめ多くの神経機構を共有し、しかもそれらの脳領域が運動制御と認知的制御の両者に不可欠なものとしてかかわっていること、運動制御において領域間に機能的な役割分担があるように、認知的制御でも役割分担があることを明らかにしてきた。本研究では、さきがけ研究で得られた知見を発展させ深めるとともに、運動と認知が神経機構を共有化することが、人間のさまざまな技能獲得にどのような効果と影響をおよぼしているかについて着目し、将来的に基礎神経科学研究成果の教育への貢献を視野に入れた2年間の研究をおこなった。

本研究構想の背景となる問題意識は次のようなものである。「一芸に秀でるもの

は多芸に長ずる」という言葉が典型的に描きだすように、わが国の伝統社会では、一つの技能や能力の習得を通して全般的全人的な活性向上をはかる教育システムが確立していた。武道・書道・茶道など「道」という概念に集約されるこうした汎用的能力の開発戦略では、現実世界の物体を制御する感覚運動の練磨を通して、知的能力のみならず人格的育成をはかろうとし、その成果は歴史の中で高い信頼性をもって確認されてきている。これら伝統的な教育法のなかで採用されているプロトコルのひとつとして、ひとつのことに集中して学習するのではなく、同時に並行して複数のことを学習させるというものがある。そのことにより、短期的には効率が悪いものの、記憶が長期に定着すると同時に、学習した課題以外の課題についても改善効果が発揮されることが体験的に知られている。そこでは運動と認知との協調により、効率的な学習を実現するための脳のメカニズムが動員されているものと考えられる。本研究では、これらの背景となる神経機構を明らかにすることを目標とした。

そのために以下の構想に基づいて研究を実施した。まず運動と認知の共通制御神経機構に関するこれまでの成果をさらに発展させるため、認知的制御にかかわる前頭葉高次運動皮質と頭頂葉皮質の機能分担について、「前者は認知的操作そのものに関連し、後者はオンラインフォードバックに関連する」という仮説をたて、磁気共鳴機能画像法と経頭蓋磁気刺激法をもちいてその検証をおこなった。次に、最近報告されている運動制御における複数内部モデル獲得パラダイムを認知領域に拡張するために、運動制御でありながら、認知的な制御過程が大きな重みを占める条件付け運動順序課題を用いた複数の認知的運動制御学習プロトコルを作成した。そして複数種類の行動課題を離散的集中的逐次的に学習するプロセスと、並列同時に切替ながら学習するプロセスとを高磁場磁気共鳴機能画像をもちいて対比的に検討した。さらに経頭蓋低頻度連続磁気刺激をもちいて、安全性の確立された方法で前頭葉高次運動皮質に一過性可逆性の機能的「仮想傷害」を発生させ、学習プロセスに対する影響を検討した。これらによって、運動と認知の両面における複数内部モデルの並列同時形成にかかわる神経機構を明らかにすることを目指した。

ルネ・デカルトが確立した、「モノとココロを分離し、意識で捕捉可能なものだけを検討の対象とする」枠組みは、マックス・ウェーバーによる「人間の能力の単機能専門化礼賛」と結びつき、西欧近現代社会における科学技術の目覚ましい発展を導く一方で、無視できない地球環境の破壊と人間の心の荒廃をもたらした。本研究のアプローチは、こうしたデカルト＝ウェーバーによる知的枠組みの限界を超克することを神経科学の立場から目指すものでもある。

3. 研究内容

本研究プロジェクトの二つの柱となる研究について、その内容を具体的に述べる。

3. 1 “認知的操作における前頭葉高次運動皮質と頭頂葉の役割分担”

私たちはこれまでに、運動を伴わない数、言語、空間情報の操作において、従来運動制御に関わる領域とされてきた運動前野が顕著に活動することを明らかにした。加えて、空間情報を操作する場合には外側運動前野が、言語情報を操作する場合には内側運動前野が、それぞれ強く関与することを示し、運動前野の中でも領域によって機能分担があることを示した。一方、実際の運動を伴わずに頭の中で操作（心的操作）する際には、運動前野と頭頂葉が同時に強く活動することが頻繁に観察される。しかし、これらの領域の機能分担は明らかではない。本研究では、運動前野と頭頂葉の心的操作遂行時の機能特性の違いを検討した。

頭頂葉はイメージの脳内処理に寄与することが知られている。例えば上頭頂小葉を含む頭頂葉損傷患者は、実際の運動実行時にはフィッツの法則に従った速さと正確さのトレードオフを示すのにも関わらず、運動イメージ時には難易度の影響を受けずに非常に速いスピードで運動イメージを達成することが知られている。これは実際の運動実行と脳内での運動イメージとの間に乖離が生じていることを示唆している。またサル電気生理学的研究から、頭頂葉の特に内側部には地誌的情報空間内でのルート探索中に特異的に活動するニューロンや、*real-position cells* と呼ばれる実空間での位置を認識するニューロンが存在することが知られている。これらの先行研究から「前頭葉高次運動皮質は、認知的操作そのものの制御を担うのに対して、頭頂葉は認知的操作において概念的に構成される操作イメージと現実空間とのフィードバックモニタリングに寄与している」という仮説を構成した。そこで私たちは、操作が概念的なイメージ空間で完結し、現実空間との間でのフィードバックモニタリングの寄与が少ない視空間心的操作課題を考案し、この課題の遂行中に経頭蓋磁気刺激法（TMS）をもちいて前頭葉高次運動皮質と頭頂葉の活動を一過性に干渉することによって発生する課題成績への影響を検討した。上記仮説が正しければ、前頭葉高次運動皮質への刺激は課題成績を低下させるのに対して、頭頂葉への刺激は課題成績を低下させないことが予想される。

そこで本研究では、上記課題を設計し、磁気共鳴機能画像法をもちいて、それぞれの大脳皮質の反応パターンを明らかにした。次に、被験者ごとに正確に同定された課題遂行時の脳活動賦活部位を心的操作実行中に刺激し、課題成績の変化をみた。

(1) 課題デザイン

心的操作は、頭の中に記憶してある情報について操作する過程であるため、常に「情報の記憶機能」を要する。本実験では情報の心的操作時に特異的に活動する部位を特定するために、頭の中に「情報を記憶する過程」と「記憶した情報に基づいた操作を実行する過程」を時間的に分離する心的視空間情報操作課題をデザインした(図1)。また具体的な情報を持たず、概念的なイメージ空間で完結する視空間心的操作課題にするべく、日本で古くから親しまれているクジ引き法であるアマダクジを頭の中で遂行する課題を考案した。アマダクジでは操作順路(線を辿る順路)は「垂直線を下に進み、水平線に交差次第、隣の垂直線に移動する」という独自のルールに依存して決まるため、終点を得るために重要な要素は数本の垂直線と、その間を繋ぐ数本の水平線の交差の位置関係のみである。ここで空間内でのルート探索などの必要もないため、地誌的情報などに比べて実空間との対応の負荷は少なく、抽象的(概念的)な心的イメージの中で操作は完結する。

実験条件(MO+)は、視空間パターンを記憶する第1刺激(S1, memory cue)と記憶した情報に基づいて心的操作を実行する第2刺激(S2, mental operation cue)からなる。S1では、アマダクジのパターン(複数の垂直線が異なる高さにある複数の水平線にブリッジされたはしご状の視空間パターン)が呈示される。この視空間パターンはその後消える(垂直線のみ残る)ため、被験者はこのパターンを記憶する必要がある。S2では、複数ある垂直線の中のどれか1本の上端にアマダクジの起点が呈示される。被験者はこの起点から頭の中でアマダクジを遂行し、たどり着いた終点の位置についてボタンで回答する。またコントロール条件として、S2でアマダクジの終点を呈示し、呈示された終点の位置について答える課題(心的操作を要さない課題、MO-条件)を設定した。

(2) 磁気共鳴機能画像実験

fMRI 実験では、視空間情報の記憶と心的操作のそれぞれに対応した脳活動を分

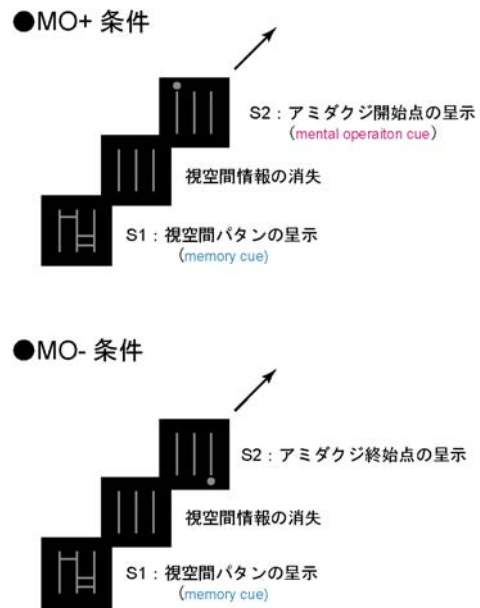


図1. アミダクジをもとにした心的視空間情報操作課題。MO+条件(実験条件): S1で視空間パターンが呈示されると共に、アマダクジの視空間パターンを記憶する。S2ではアマダクジの起点が示され、心的操作(mental operation)遂行する。MO-条件(コントロール条件): S1はMO+条件と同様に視空間パターンを記憶するが、S2でアマダクジの終点が示され、心的操作遂行はない。

離して計測するために S1 と S2 の間隔を長く設定した。加えて回答時のボタン押しに対する脳活動と心的操作に対する脳活動を分離するため、S2

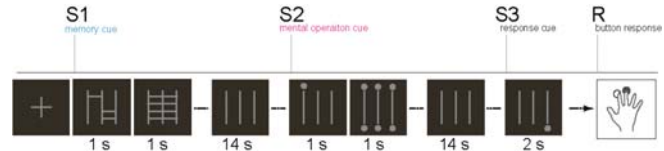


図 2. fMRI 実験における心的視空間情報操作課題 (MO+条件)

の後に第 3 刺激 (S3) として response cue を設定した (図 2)。S1 でのアミダクジパターン呈示は 1 秒間で、追って残像効果をなくすためのマスクイメージが 1 秒間呈示される。S1 と S2 の間隔 (マスクイメージも含む) は 15 秒間設けており、この間隔は刺激に応じて変化する脳血流動態反応が再び安静状態に戻るのに十分な時間といえる。S2 (mental operation cue となるクジの起点) は 1 秒間呈示され、被験者はこの起点からアミダクジを心的に遂行する。続いて S1 と同様、S2 についてもマスクイメージが 1 秒呈示される。その後、S3 でクジの終点が呈示され、被験者は呈示された終点の位置が実際に S2 に応じて得られた終点と一致しているかどうかを判断し、一致していた場合は示指で、一致していない場合は中指で、それぞれ指定されたボタンを押す。MO+条件も同様のデザインであり、同じセッション内で MO+条件と MO-条件のトライアルはランダムに混在している。

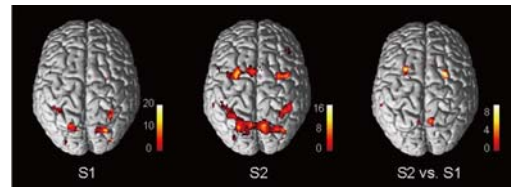


図 3. 心的視空間操作課題実行中の脳活動。MO+条件における各刺激に対する脳活動 (左、中央) および S2 と S1 の活動の差 (右)。

fMRI 実験の結果、MO+条件では S1 に応じて両側後部頭頂皮質に強い活動が確認され、S2 に応じて両側後部頭頂皮質のさらに広い範囲に加えて運動前野に活動が確認された。また S1 よりも S2 でより強く活動する部位として背側運動前野と楔前部が同定された (図 3)。

また S1 から S2 にかけての活動の変化を詳細に調べるため、課題遂行中の各領域の信号値の変化について、temporal asymmetry index (TAI) と称した指標をたてて解析した (図 4.a and b)。TAI は $(P_{S2} - P_{S1}) / (P_{S2} + P_{S1})$ で表され、 P_{S1} は S1 開始から直後のピークまでの信号強度変化、 P_{S2} は S2 開始から直後のピークまでの信

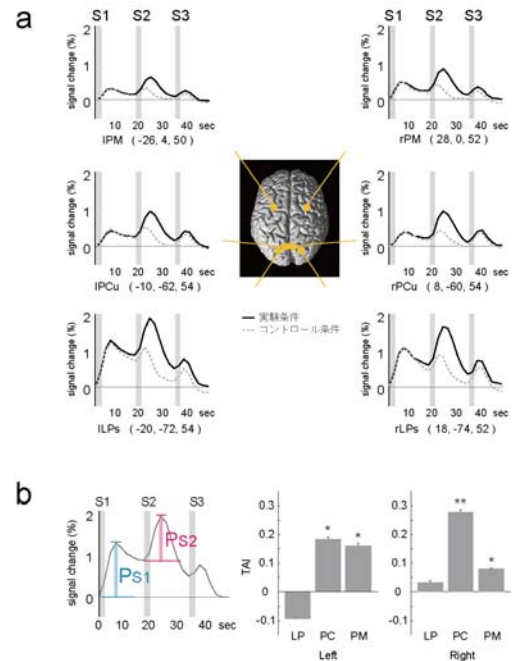


図 4. a. 課題遂行中の運動前野 (PM)、楔前部 (PCu) および上頭頂小葉 (LPs) の信号変化。b. 運動前野、楔前部、上頭頂小葉の TAI 値。

号強度変化を示している。ここで $TAI > 0$ であれば、その部位は S1 よりも S2 でより強く活動することが示される。MO+条件における各部位の TAI を計算した結果、運動前野、楔前部の TAI は有意に 0 よりも大きく、心的操作時に特異的に活動することが確認された (図 4.b)。またこのような運動前野と楔前部の S2 特異的な活動は、MO-条件ではみられなかった。この結果は、心的操作実行時に、運動前野と楔前部が寄与することを強く示唆している。

(3) 経頭蓋磁気刺激実験

次に、fMRI で心的操作時特異的に活動する部位として特定された運動前野と楔前部の機能関連性と機能特異性を TMS 実験により調べた。TMS 実験における課題は fMRI 実験のものと概念的には同じであるが、fMRI 実験と異なる点は各刺激の呈示時間、S1 と S2 の刺激間隔が短縮されたことと、S3 による response cue がないことである (図 5)。TMS 実験では被験者は S2 呈示後、心的操作によってアミダグジの終点にたどり着き次第、その位置に対応したボタンを押して回答する。これにより心的操作に要する反応時間の計測が可能になり、TMS のタスクパフォーマンスへの影響をより正確に評価できる。終点の位置は左から人差し指、中指、薬指小指で押すボタンに対応している。なお MO-条件では、被験者は終点が呈示され次第、その位置に対応するボタンを押す。刺激タイミングは心的操作を指示する S2 の前後 (前 1500ms、前 500ms、後 300ms、後 500ms) で、それぞれ 100ms 間隔の連発で刺激した (STIM 条件)。また刺激音のコントロールとして、頭蓋を直接刺激しない sham 刺激も同じタイミングと頻度で実施した (SHAM 条件)。運動前野と楔前部の位置は、fMRI 結果をもとに被験者毎に決定した。また心的操作時特異的ではないが課題中に活動が見られた上頭頂小葉についても同様に刺激した。刺激効果は S2 呈示からボタンを押すまでの時間として計測した反応時間の平均 (RT) と正答率から解析した。

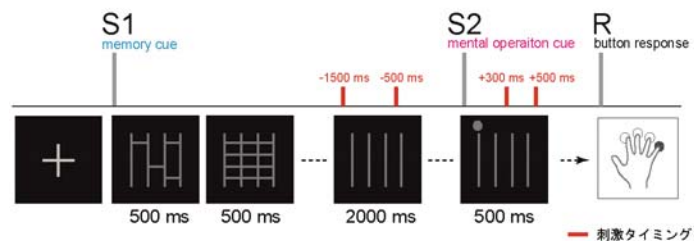


図 5. TMS 実験における心的視空間情報操作課題 (MO+条件)。赤線は各刺激タイミングを示す。

この結果、反応時間および正答率ともに MO+条件の S2 後 300 ms の刺激でのみ、刺激の有無 (STIM/SHAM) と刺激部位 (運動前野/楔前部/上頭頂小葉) の間に交互作用がみられた (RT: $F_{2, 18}=6.948$, $p=0.006$, 正答率: $F_{2, 18}=4.357$, $p=0.03$ 、表 1)。特にこのタイミングでの運動前野と楔前部に対する TMS の効果として統計的有意性

をもった対照的結果が得られた。すなわち、運動前野では SHAM 条件に比べて STIM 条件で反応時間が有意に遅延し ($p=0.029$, one sample t-test、図 6.a)、運動前野では有意に短縮することが確認された ($p=0.045$, one-sample t-test、図 6.a)。また両領域間での差は統計的有意であった (図 6.a、 $p=0.03$, Bonferroni 補正あり)。一方、正答率においても、SHAM 条件と STIM 条件とを比較した場合には有意水準には達しないものの、運動前野の刺激は悪化傾向、楔前部の刺激では改善傾向を示し、両領域間の変化は有意な差をしめした (図正答率 6.a、 $p=0.04$, Bonferroni 補正あり)。また SHAM 条件と STIM 条件での反応時間および正答率の差を 2 次元空間にプロットし、2つの行動指標を統括的に比較したところ、ここでも運動前野と楔前部の刺激との間に有意な差が確認された ($p<0.01$, MANOVA、図 6.c)。一方、上頭頂小葉では刺激効果自体が明らかでなく、また他の部位との間で刺激効果の違いは見られなかった。これら一連の知見は、運動前野の刺激が課題成績に対して抑制的に影響するのに対し、楔前部の刺激がもたらす影響は少なくとも抑制的ではなく、むしろ促進性をもった方向であることを示している。これらの結果は運動前野と楔前部が心的操作実行時に特に重要な機能を担うことを示唆するのに加え、これらの部位が異なる (相反する) 機能を担うことを示唆している。

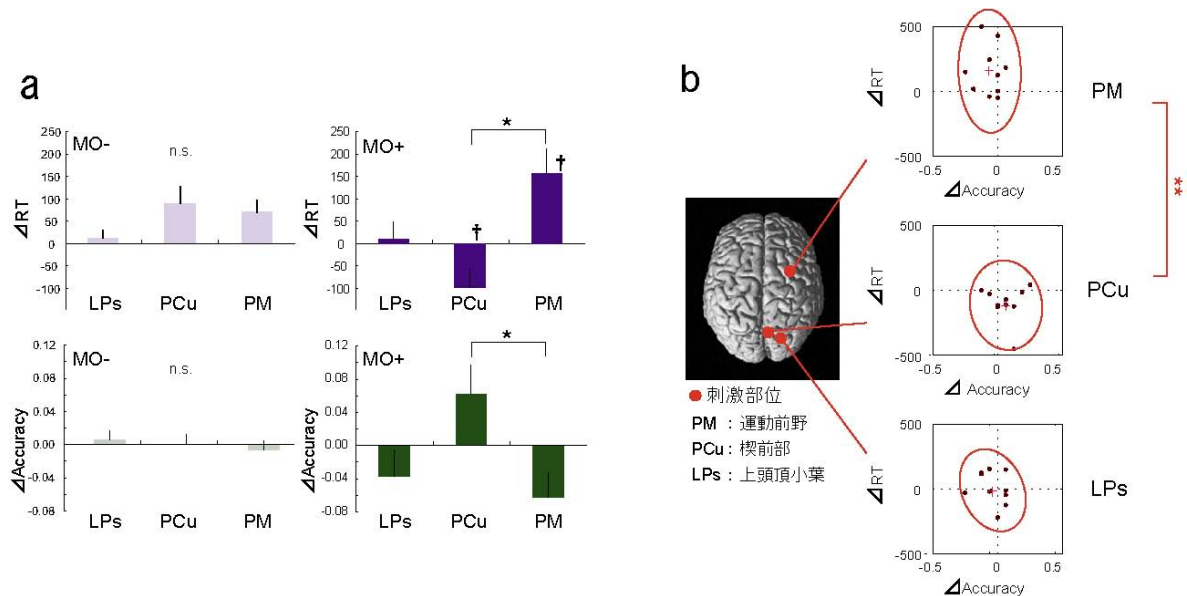


図 6. S2 呈示後 300 ms での TMS の効果。a 刺激の反応時間への効果 (SHAM と比較。 $\Delta RT=RT(STIM-SHAM)$)。b. 刺激の正答率への効果 ($\Delta Accuracy=Accuracy(STIM-SHAM)$)。c. 刺激の反応時間および正答率への効果。楕円は 95% 信頼限界。

(4) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

運動前野と楔前部は、これまでの視空間情報の心的操作に関する先行研究からその重要性が示唆されてきたが、これらの領域の機能特性の違いについては未だ不明なままであった。本研究は、fMRI 実験から運動前野と楔前部が心的操作実行時に

特異的に活動することを示すとともに、TMS 実験から、これらの部位が TMS によって異なる影響を受けることを示している。この結果は、運動前野と楔前部が異なる機能特性を持ち、それぞれが担う機能が相反する可能性を示唆している。

私たちは先に、心的操作実行前に TMS により運動前野を連発刺激することで、心的操作にかかる反応時間が遅延することを示し、運動前野の心的操作における重要性を示してきた。運動前野は、これまでのサルおよびヒトの両研究から、運動計画時や運動の心的リハーサル、運動イメージの想起時に活動することが広く知られており、運動実行出力よりも実行前の動作コーディングを担う部位として機能することが示唆されている。また認知機能に重要とされる前頭前野と解剖学的接続を持っているという報告も合わせると、運動準備時や運動イメージ時に使われる運動前野の動作コーディング機能は、運動実行を伴わないような心的操作においても汎用されていることが予想される。本実験で見られた運動前野の刺激による RT の遅延および正答率の低下傾向は、これまでの研究から考えられる機能を改めて裏付ける結果であるといえる。

一方、楔前部は近年のヒト脳イメージング研究から様々な視空間情報の脳内処理過程で活動することが報告されており、特に注目を浴びている部位であるといえるが、その機能特性は難解で不明なままであった。本実験で楔前部の TMS 刺激によって RT に有意な加速が見られた結果は、楔前部が心的操作実行を抑制するような機能を持ち、TMS によってその抑制が阻止されたことを示唆している。また運動前野の刺激で正答率の低下が見られたのに対し、楔前部の刺激では正答率に低下が見られず、むしろ改善傾向がみられた結果は、心的操作実行系は楔前部ではなく運動前野にあり、楔前部は心的操作実行に対して間接的（補助的）な役割を担う可能性を示唆している。これらは「実践的な空間との対応付けを要さず、概念的に情報操作が完結するような課題においては、頭頂葉の活動のニーズは少ない」という私たちの予想に矛盾がなく、「頭頂葉は頭の中で概念的に描かれる操作イメージと実践的な空間との対応付け（モニタリング）に寄与している」という私たちの仮説を支持している。

運動前野と楔前部はサルの解剖学的研究から神経接続を持つことが明らかにされており、心的視空間情報操作は、この接続を用いながら実現されるものと考えられる。私たちは、これまでの先行研究と本結果をあわせて①運動前野は心的操作時のフィードフォワード操作実行系として、②楔前部は運動前野による心的操作と視空間情報とをモニタリングするフィードバック系として機能する、と考える。特に楔前部はこのモニタリング機能によって、イメージ内での操作と現実の操作を結びつける役割を担うのではないかと予想する。この予想については、更なる調査が

必要であるが、私たちの結果は、未だ不明な楔前部の機能解明に、さらに踏み込んだ知見を与えるものといえる。

3. 2 “学習スケジュールの違いが認知的運動制御学習に及ぼす影響”

私たちは、ある問題に直面しそれを解決しようとするとき、一点集中型の方略をとる場合が多い。いわゆる一夜漬けである。一夜漬けに代表される一点集中学習はすばやい技能や知識の獲得を可能にするが、だいたいすぐに忘れてしまう。また、そのようにして得た技能や知識は違う状況や問題に対しての応用が利きにくい。覚えたことをすぐに忘れない、違う状況にも応用できるようになる、そのようなことを可能にする学習方法とはどのようなものであろうか。

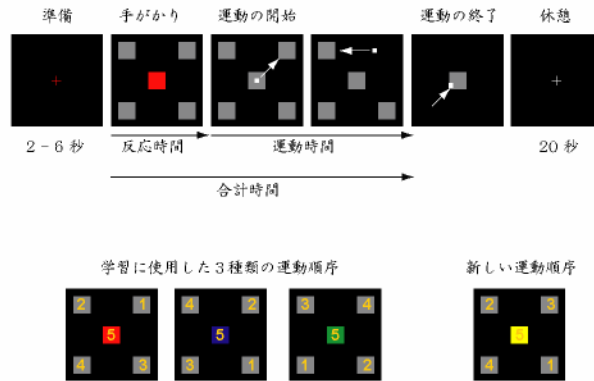
本研究では複数の技能や知識を時間的にランダムに混ぜて学習を行うランダム学習に焦点をあて、その神経基盤を明らかにすることを目的とした。

(1) 磁気共鳴機能画像実験

実験の目的は、複数の技能を学習する際、(1) 同時並列的に学習していくランダム学習スケジュールのほうが技能の獲得に有効であるかどうか、また、もしそうであるなら(2) それはどのような脳活動によって支えられているのか、を明らかにすることであった。

36名の健常被験者が2日間連続の実験に参加した。被験者は磁気共鳴画像装置の中でマウスを用いた系列運動学習の課題を行った。モニタ中央に提示される視覚刺激の色の違いにより3種類の系列運動学習課題が用意された(図1A)。被験者の課題は視覚刺激が提示されたらできる限り速くかつ正確に色に対応する系列運動を遂行することであった。被験者は3つの課題を学習するスケジュールによって3群に分けられた(図1B)。一つの系列運動を集中的に学習してから次の系列運動の学習を行うブロック学習群、3つの運動系列をランダムな順番で学習していくランダム学習群、3つの運動系列を決められた順番で学習していく固定順序学習群の3つの群に各12人ずつの被験者が割り当てられた。初日は各学習スケジュールに従って1セッション12試行の課題を計6セッション行い、学習効果の検討を行った。二日目は、初日に学習した3つの運動系列の保持成績と新たな運動系列に対する転移の成績が3群間で比較され、どの学習スケジュールが効果的であるかの検討が行われた。課題は、初日に学習した運動系列の1つを集中的に行う集中提示条件、同じく3つの運動系列をランダムな順番で学習していくランダム提示条件、そして新たな運動系列を学習していく新規運動条件の3つが用意された。初日及び2日目の課題遂行中の脳活動が機能的磁気共鳴画像法により計測された。

A



B

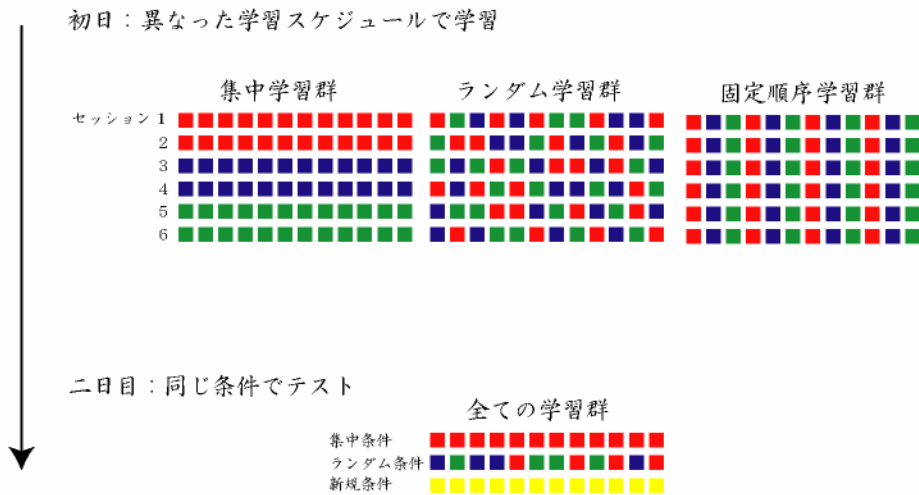


図 1：機能的磁気共鳴画像実験の方法

初日の学習成績について課題遂行にかかった反応時間を対象として解析を行った(図 2 A)。3 (学習群) × 6 (セッション) の分散分析を行ったところ、学習群及びセッションの主効果、また学習群×セッションの交互作用が有意であった(図 2 A)。このことは学習群の違いにより初日の学習パターンが異なっていることを示している。どのセッションで学習群の成績が認められているかを検討するため、多重比較検定を行った。その結果、セッション 1 から 4 までの学習の初期から中期に

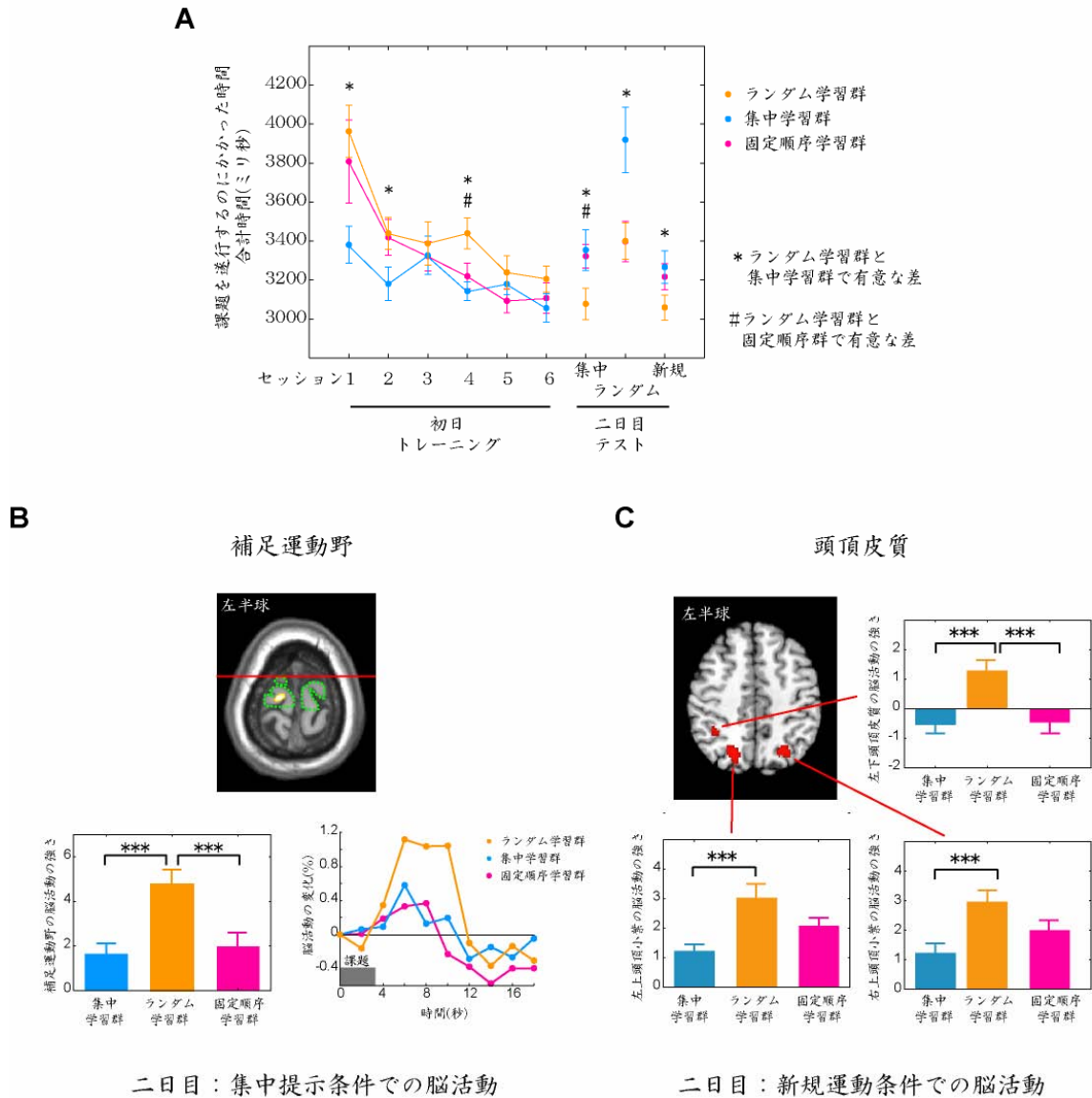


図2：機能的磁気共鳴画像実験の結果

かけてランダム学習群よりも集中学習群において反応時間が有意に速い事が明らかになった。この結果は集中学習スケジュールがランダム学習スケジュールよりもすばやい技能の獲得を可能にしていると解釈できる。次に二日目の学習成績について課題遂行にかかった反応時間を対象として解析を行った(図2A)。先行研究では群間の成績の差は主に最初の数試行で認められているため、各課題の最初の5試行を分析の対象とした。3(学習群)×3(課題)の分散分析を行ったところ、学習群及び課題の主効果、また学習群×課題の交互作用が有意であった。このことは初日の学習スケジュールの違いにより二日目の課題の成績が異なっていることを示している。どの課題で学習群の成績が認められているかを検討するため多重比較検

定を行った。その結果、集中提示条件においてランダム学習群の反応時間が集中学習群や固定順序学習群よりも有意に速いこと、ランダム提示条件においてランダム学習群の反応時間が集中学習群よりも有意に速いこと、さらに新規運動条件においてもランダム学習群の反応時間が集中学習群よりも有意に速いことが明らかになった。この結果は初日の課題成績とは明らかに異なり、ランダム学習スケジュールが技能の保持や類似した課題の転移に有効であることを示している。

そのようなランダム学習スケジュールの優れた成績が脳のどのような領域で表現されているかを検討するため、二日目の課題遂行中の脳活動を各学習スケジュール群間で比較する解析を行った。集中提示条件の脳活動を各学習スケジュールのグループ間で比較すると、ランダム学習群において補足運動野の活動が有意に高いことがわかった（図2B）。補足運動野は系列運動など複雑な運動の記憶の保持に関わる脳領域と考えられている。したがって、ランダム学習スケジュールによって獲得された優れた運動記憶は補足運動野において保存されていることが示唆された。

さらに新規運動条件においてもランダム学習群において両大脳半球の頭頂皮質に他の学習群よりも有意な活動が認められた。ランダム学習スケジュールは新規運動条件においても他の学習スケジュール群よりも優れた成績を示しており、頭頂皮質がそのような柔軟な運動技能の獲得と保持に重要な役割を果たしていることが示唆された。

（2） 経頭蓋磁気刺激実験

磁気共鳴機能画像実験の結果から、他の学習スケジュール群に比べ、ランダム学習スケジュール群において補足運動野がより有意な活動を示していることが明らかになった。しかしながら、磁気共鳴機能画像法では課題遂行に伴って活動する脳領域を明らかにすることができるが、それはあくまで特定の心的機能と脳活動領域の相関関係を示したことであり、その脳活動が本当にその機能に必須なものであるかどうか、すなわちその機能的有意性は検討することができない。それに対し、経頭蓋磁気刺激法は脳領域を刺激し行動への影響を観察することにより、特定の機能と脳領域の因果関係を直接実験的に検討することができる。

本研究では、被験者がマウスを用いた系列運動学習を行った直後に15分間1 Hzの経頭蓋磁気刺激法をターゲットである補足運動野に対して行い、翌日の保持成績への影響を検討した。この低頻度連続刺激によりターゲットとなる皮質の興奮

習直後の補足運動野への磁気刺激が、ランダム学習によって引き起こされる記憶形成のプロセスを干渉し、集中学習スケジュールと同じくらいの保持成績まで低下させたことを示している。経頭蓋磁気刺激の実験結果から、ランダム学習直後の補足運動野の活動が、優れた運動技能の保持成績に必須の役割を果たすことが明らかになった。

(3) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

集中学習と分散学習の効果の違いについては、これまでに実験心理学の分野でさまざまな研究が行われている(Ebbinghaus, 1885)。学習の間に休憩インターバルをはさんで行う分散学習や複数の技能や知識を時間的にランダムに混ぜて学習を行うランダム学習は、一点集中型の学習よりも技能の長期的保持、及び獲得した技能の転移の成績がよいことが示されている。例えば、Baird and Phelps (1987) はスペイン語—英語対連合学習の8年後の再生成績を検討した結果、分散学習の再生率が集中学習の2.5倍であることを報告している。また、Shea and Morgan (1979) は、腕の系列運動学習において、集中学習よりもランダム学習で獲得した系列運動の方が長期に渡って保たれていること、また新たな系列運動の学習も容易であることを報告している。注目すべきは、そのような分散学習やランダム学習の有効性が運動学習と認知学習で共通に認められているということである(Rosenbaum et al., 2001)。このことは、技能の長期的保持や転移に有効な分散学習やランダム学習を支えるメカニズムが、運動や認知といったモジュールの差を越えて共通のものであることを示唆している。しかしながら、そのような学習スケジュールを支える神経基盤とその作動原理に関してはまったくわかっていなかったため、こうした行動実験で得られた効果を現実の教育や学習プロトコルの開発へと結びつける点で必ずしも十分な効果をもたらしてきたとは言い難い。

本研究では、運動制御と認知的制御との両者に共通な制御機構となる補足運動野の活動が、学習スケジュールの違いによるパフォーマンスの効果を発揮する上で、極めて重要であることを示唆するものである。特に、学習中の活動ではなく、学習が終了し、記憶が定着していく過程において補足運動野の機能を干渉することにより、学習スケジュールの違いによる効果が消失する傾向を見せたことは、学習の効果が時間的に遷延して神経機能に影響を及ぼすことを示唆しており興味深い。

なお、本研究項目は実験の遂行に当初の予想以上の時間をとったため、統計的有意性や刺激部位の違いによる効果の違いを出すまで後一步というところで研究期間が終了した。これは学習課題をもちいたため、同じ被験者を複数回使用することができず、スケジュールごと、および実験ごとに異なる被験者をもちいることにな

ったためである。これまでに（のべではなく）90名以上の被験者が実験に参加しているがさらに被験者数を増やす必要があり、実験を継続している。

効果的な学習スケジュールに関する科学的知見は、学校教育、スポーツトレーニング、リハビリテーションなどの実践現場において効果的な学習スケジュールを設計する際に強力な科学的根拠を提供するものである。よって、実社会への応用という点では発展性が高く、社会的インパクトは大きいと考えられる。将来的には、本研究に代表される基礎研究の成果に基づいた実践場面での応用研究が増加することが予測される。

4. 研究実施体制

(1) 体制

個人型研究のためサブグループは構成せず、研究代表者が全体のリーダーを務めた。主な分担はメンバー表に示すとおりであるが、実際はすべての研究を全員が一丸となって研究を推進する体制をとった。

(2) メンバー表

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
本田 学	自然科学機構生理学研究所 平成17年9月～ 国立精神・神経センター神経研究所	助教授 部長	研究の統括	平成16年12月～ 平成19年3月
田中悟志	総合研究大学大学院 平成17年4月～ 日本学術振興会	博士課程学生 特別研究員		平成16年12月～ 平成19年3月
大塩りつ	名古屋大学大学院	博士課程学生		平成16年12月～ 平成19年3月
進藤誠悟	総合研究大学院大学	修士課程学生		平成17年4月～ 平成19年3月

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

なし

(2) 招聘した研究者等

なし

6. 主な研究成果

(1) 論文発表 (国内 5 件、海外 15 件)

1. Kakigi R, Nakata H, Inui K, Hiroe N, Nagata O, Honda M, Tanaka S, Sadato N, Kawakami M. Intracerebral pain processing in a Yoga Master who claims not to feel pain during meditation. *Eur J Pain* 9: 581-589, 2005.
2. Kato H, Honda M. Multiplicatively modulated exponential autoregressive model for corticomuscular functional coupling. *Signal Processing* 85: 1287-1300, 2005.
3. Sadato N, Okada T, Honda M, Matsuki K, Yoshida M, Kashikura K, Takei W, Sato T, Kochiyama T, Yonekura Y. Cross-modal integration and plastic changes revealed by lip movement, random-dot motion and sign languages in the hearing and deaf. *Cereb Cortex* 15: 1113-1122, 2005.
4. Saito DN, Yoshimura K, Kochiyama T, Okada T, Honda M, Sadato N. Cross-modal binding and activated attentional networks during audio-visual speech integration: a functional MRI study. *Cereb Cortex* 15: 1750-1760, 2005.
5. Tanabe HC, Honda M, Sadato N. Functionally segregated neural substrates for arbitrary audiovisual paired-association learning. *J Neurosci* 25: 6409-6418, 2005.
6. Tanaka S, Honda M, Sadato N. Modality-specific cognitive function of medial and lateral human Brodmann area 6. *J Neurosci* 25: 496-501, 2005.
7. 本田 学. 計測を拒む美と快をいかに測るか〜感情・感性のイメージング, 科学, 75:719-725, 2005.
8. 本田 学. 後頭部優位律動脳波の神経基盤—脳血流画像による検討—, 臨床脳波, 47: 357-361, 2005.
9. 田中悟志. 経頭蓋磁気刺激法によるワーキングメモリ研究. 心理学評論 48(4) pp482-497, 2005.
10. Aramaki Y, Honda M, Okada T, Sadato N. Neural Correlates of the Spontaneous Phase Transition during Bimanual Coordination. *Cereb Cortex* 16:1338-1348, 2006.
11. Aramaki Y, Honda M, Sadato N. Suppression of the non-dominant motor cortex during bimanual symmetric finger movement: A functional Magnetic Resonance Imaging study. *Neuroscience*, 141:2147-2153, 2006
12. Hanakawa T, Honda M, Zito G, Dimyan MA, Hallett M. Brain activity during visuomotor behavior triggered by arbitrary and spatially constrained cues: an fMRI study in humans. *Exp Brain Res* 172:275-282, 2006.
13. Kato H, Taniguchi M, Honda M. Statistical analysis for multiplicatively modulated nonlinear autoregressive model and its applications to electrophysiological signal analysis in humans. *IEEE Trans Signal Processing* 54:3414-3425, 2006.
14. Miyamoto JJ, Honda M, Saito DN, Okada T, Ono T, Ohyama K, Sadato N. The

- representation of the human oral area in the somatosensory cortex: a functional MRI study. *Cereb Cortex* 16: 669-675, 2006.
15. Oohashi T, Kawai N, Nishina E, Honda M, Yagi R, Nakamura S, Morimoto M, Maekawa T, Yonekura Y, Shibasaki H. The role of biological system other than auditory air-conduction in the emergence of the hypersonic effect. *Brain Res* 1073-1074: 339-347, 2006.
 16. Qiu Y, Noguchi Y, Honda M, Nakata H, Tamura Y, Tanaka S, Sadato N, Wang X, Inui K, Kakigi R. Brain processing of the signals ascending through unmyelinated C fibers in humans: an event-related functional magnetic resonance imaging study. *Cereb Cortex* 16:1289-1295, 2006.
 17. Saito DN, Okada T, Honda M, Yonekura Y, Sadato N. Practice makes perfect: The neural substrates of tactile discrimination by Mah-Jong experts include the primary visual cortex. *BMC Neurosci* 7:79, 2006.
 18. 本田 学. 高次運動関連脳領域による認知行動の制御機構, 実験医学増刊, 24:2334-2339, 2006.
 19. 本田 学. 画像で見る高次脳機能: 体性感覚認知 (9)身体の位置を感じるー脳機能イメージングによる局在, *Clinical Neuroscience*, 24:734-735, 2006.
 20. 本田 学. 運動と思考の脳内協調制御メカニズム, 大津由紀雄, 波多野誼余夫, 三宅なほみ 共編著, 認知科学への招待 2ー心の研究の多様性を探るー, 研究社, pp.78-94, 2006.
 21. 柿木隆介. 秋云海. 野口泰基. 本田学. 中田大貴. 田村洋平. 田中悟志. 定藤規弘. 王暁宏. 乾幸二. C線維を上行する信号によって賦活される脳部位: 機能的磁気共鳴画像(fMRI)を用いた研究. *Pain Research* 21(3) pp95-102, 2006.
 22. Sawamoto N, Honda M, Hanakawa T, Aso T, Inoue M, Toyoda H, Ishizu K, Fukuyama H, Shibasaki H. Cognitive slowing in Parkinson disease is accompanied by hypofunctioning of the striatum. *Neurology*, .68:1062-1068, 2007

(2) 口頭発表 (内容が重複しているものは除く。国際学会発表を優先。)

①招待、口頭講演 (国内 1 3 件、海外 2 件)

1. 本田 学. 若者の脳～脳科学の視点から問題を探る～, 東京都立第五商業高等学校総合的学習の時間講演会, 国立, 2005 年 2 月.
2. 本田 学. 思考する運動脳, JST 異分野研究者交流促進事業「生物の学習と機械の学習から一般的「知能」の概念に迫る」, 石川, 2005 年 2 月.
3. 本田 学. 運動前野の認知機能: 脳機能イメージングによる統合的アプローチ, 第 82 回日本生理学会大会企画シンポジウム「運動制御・学習: 脳機能イメージングによるアプローチ」, 仙台, 2005 年 5 月.
4. Honda M. Sensorimotor and cognitive functions of motor- related brain regions: Integrative Neuroimaging Approach. Attention & Performance Symposium: SENSORIMOTOR FOUNDATIONS OF HIGHER COGNITION, Lyon, France, June 2006.
5. Honda M. Traditional Asian Wisdom on Controlling Fundamental Brain Functions: Neurobiological Approach to Altered States of Consciousness. The 9th Japanese-American Frontiers of Science Symposium, Irvine, USA, December 2006.

6. 本田 学. 情報環境不適合が誘導する病理の克服に向けて, 厚生労働省精神・神経疾患委託費研究事業発達障害関係合同シンポジウム招待講演, 東京, 2006年1月.
7. 本田 学. 計測を拒む美と快をいかに測るか～感性の脳機構イメージング～, 情報処理学会ヒューマンインターフェース研究会特別講演, つくば, 2006年1月.
8. 本田 学. 脳科学からみたライフデザイン, 東京都立第五商業高等学校平成17年度総合的な学習の時間, 国立, 2006年2月.
9. 本田 学. 音楽への生理学的アプローチは可能か?～ケーススタディ: ハイパーソニック・エフェクト～, 第83回日本生理学会大会シンポジウム, 前橋, 2006年3月.
10. 本田 学. 計測を拒む美と快をいかに測るか ～感性の脳機能イメージング～, 日立基礎研究所セミナー招待講演, 埼玉, 2006年5月.
11. 本田 学. 環境不適合性病理に対する〈情報医療〉の開拓に向けて, 第32回WIN定例講演会「最先端脳科学が社会生活に与えるインパクト」, 東京, 2006年6月.
12. 本田 学. 「主体性」の神経機構にまつわるいくつかの話題, 国際高等研究所2006年度研究プロジェクト「認識と運動における主体性の数理脳科学」研究会, 京都, 2006年8月.
13. 本田 学. 脳科学と情報環境学が導く新しい生命倫理課題, 第18回日本生命倫理学会年次大会ワークショップ「脳神経倫理学(ニューロエシックス)への招待」, 岡山, 2006年11月.
14. 本田 学. 計測を拒む美と快をいかに測るか ～ケーススタディ: ハイパーソニック・エフェクト～, 第7回日立中研・基礎研合同研究会招待講演, 国分寺, 2006年11月.
15. 本田 学. 汎用性能力獲得の神経機構「一芸に秀でるものは多芸に長ずる」, 国際高等研究所2006年度研究プロジェクト「学習の生物学」研究会, 京都, 2006年11月.

②ポスター発表(国内6件、海外9件)

1. Tanabe HC, Honda M, Sadato N. Functionally segregated neural substrates for arbitrary audio-visual paired association learning: a functional MRI study. Human Brain Mapping 2005 Conference, Toronto, Canada, June, 2005.6.
2. 田邊宏樹, 本田 学, 定藤規弘. 機能的MRIを用いた聴覚一視覚刺激対連合学習における脳活動変化の解析, 第20回生体・生理学シンポジウム(BPES2005), 東京, 2005年9月.
3. Aramaki Y, Honda M, Sadato N Bimanual symmetric finger movement activates the non-dominant motor cortex less than unimanual non-dominant finger movement . 35th Annual Meeting Society for Neuroscience, Washington DC, USA, November 2005.
4. Murase M, Saito DN, Kochiyama T, Tanabe HC, Tanaka S, Aramaki Y, Honda M, Sadato N Involvement of the orbitofrontal cortex in the cross-modal integration during lipreading: a functional MRI study . The 35th Annual Meeting of the Society for Neuroscience, Washington DC, USA, November, 2005.

5. Uchiyama Y, Toyoda H, Honda M, Yoshida H, Kochiyama T, Ebe K, Sadato N The role of interhemispheric control of Broca's area for syntactic processes . The 35th Annual Meeting of the Society for Neuroscience, Washington DC, USA, November 2005.
6. 内山祐司, 豊田浩士, 本田 学, 吉田晴世, 河内山隆紀, 江部和俊, 定藤規弘. 左下前頭回における文法処理機能の分離, 第 8 回日本ヒト脳機能マッピング学会, 岡崎, 2006 年 3 月
7. 大塩立華, 田中悟志, 定藤規弘, 本田 学. 空間情報の脳内操作における運動前野と頭頂葉の機能分担, 第 8 回日本ヒト脳機能マッピング学会, 岡崎, 2006 年 3 月.
8. 齋藤大輔, 豊田浩士, 岡田知久, 本田 学, 米倉義晴, 定藤規弘. 熟練者における触覚弁別の神経基盤: 磁気共鳴画像法(fMRI)を用いた研究, 第 8 回日本ヒト脳機能マッピング学会, 岡崎, 2006 年 3 月.
9. 村瀬未花, 齋藤大輔, 河内山隆紀, 田邊宏樹, 田中悟志, 荒牧 勇, 本田 学, 定藤規弘. 読唇における異種感覚統合への前頭眼窩皮質の関与: 機能的 MRI 研究, 第 8 回日本ヒト脳機能マッピング学会, 岡崎, 2006 年 3 月.
10. 高橋賢. 田口徹. 田中悟志. 定藤規弘. 柿木隆介. 水村和枝. 筋肉痛に応ずる脳部位. 第 36 回日本臨床神経生理学会, 横浜, 2006 年 11 月.
11. Takahashi K, Taguchi T, Tanaka S, Kakigi R, Sadato N and Mizumura K. Brain regions that distinguish muscle pain from skin pain. *The 83rd Annual Meeting of the Physiological Society of Japan*, Gunma, JAPAN, March 2006.
12. Oshio R, Tanaka S, Hanakawa T, Sadato N, Honda M Functional specificity of premotor and parietal cortex for spatial mental-operation. 12th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Florence, Italy, June 2006.
13. Tanaka S, Oshio R, Sadato N., and Honda M. The effect of random practice schedule on arbitrary stimulus-response association learning. The 29th annual meeting of the Japan Neuroscience Society, Kyoto, JAPAN, July 2006.
14. Tanaka S, Perez MA, Reis J, Wise SP, Willingham DT and Cohen LG. Neural substrates underlying intermanual transfer of procedural knowledge. II. Supplementary motor area. *The Society for Neuroscience 36rd Annual Meeting*, Atlanta, USA, November, 2006.
15. Tanaka S, Sadato N, Cohen LG and Honda M. Random training schedule of sequential movements enhances the activity in the medial Brodmann area 6. *13th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain*, Chicago, USA, June 2007.

(3)特許出願 (国内 0 件、海外 0 件)

なし

7. 結び

本研究は当初JSTから支援をいただいていたさきがけ研究の単なる延長線上に位置するものではなく、その知見を発展的に継承し、新しい問題意識のもとに

研究を立ち上げた。特に基礎神経科学の成果を、近視眼的にはではなく長期的に社会へ還元していくことを視野におさめた研究である。その成果は、当初の予想を遙かに上回るものとなったと評価している。特に、学習スケジュールの違いによる学習効果の検討では、ランダム型学習が単によりよい記憶の定着を導いただけでなく、新規の課題の成績も向上するとの知見が得られたことは、研究課題名にあげた汎用的能力獲得の神経基盤に迫るものとなった。特に、先行したさきがけ研究とこの発展研究とで一貫してとってきた画像法と刺激法を組み合わせたアプローチは、脳機能の機能的有意性を含めて立体的な脳機能解析を行う上で、極めて信頼性の高い手法といえる。

その一方で、発展研究の2年間は短く、この研究のようにある程度先行プロジェクトの内容を継承しつつも新しいことを立ち上げるような研究には十分ではなかった。また研究期間中に研究代表者の研究拠点が自然科学研究機構から国立精神・神経センターへと変更になったこともあり、旧所属機関と新所属機関との間で分かれて研究を遂行する時期が1年余りに及んだことはインパクトが大きかった。こうした予期せぬ事情もあり、学習スケジュールに関する研究は、ぎりぎりまで粘ったものの、統計的有意性を示すまで後一步というところで研究期間は終了となった。これまでに150名近い被験者がすでに実験に参加しているが、さらに被験者数を増やす必要があり、実験を継続している。論文発表は時差が生じてしまうため、この研究期間中の発表は概ね先行する「さきがけ研究」における成果の発表となった。

本研究の制度がすでに廃止されたことは残念であるが、私の場合、特に2年間という期間が研究計画を完遂するには若干短かったことを考慮すると、もっと長い研究期間（せめて後1年）が欲しかったというのが率直な感想である。

なお若手の育成については、非常に大きな効果があった。本研究でも、研究の主体となったのは学生であるが、独立した研究者としてもものを考える足腰の力は最低限ついたのではないかと評価している。

今後は、先行する「さきがけ研究」の成果を継続して発表するとともに、このプロジェクトそのものの成果を論文として発表することを短期的な目標としつつ、脳の情報処理様式に学んだ教育や学習プロトコルの開発に向け、長期的視野での脳科学の社会への貢献に資する研究をおこなっていきたい。