研究題目

運動試技の成否の予測における大脳-小脳機能連関の解明および脳神経科学に基づいたコーチングメソッドの検証

研究代表者
柳原　大

目　　次

要約……1
緒言……2
方法……3
結果……9
考察……12
参考文献……13
謝辞……13

研究題目

運動試技の成否の予測における大脳-小脳機能連関の解明および脳神経科学に基づいたコーチングメソッドの検証

研究代表者
柳原　大

共同研究者
持永　新　（東京大学大学院総合文化研究科・広域科学専攻・博士後期課程　（生命環境科学系））
古田島浩子　（東京大学大学院総合文化研究科・広域科学専攻・博士後期課程　（生命環境科学系））
青野武志　（順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科・スポーツ科学領域・博士前期課程）
青木和浩　（順天堂大学スポーツ健康科学部）
越川一紀　（順天堂大学スポーツ健康科学部）
花川　隆　（(独)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）

1　要約

スポーツにおける俊敏で巧みな動作（技、運動スキル）の遂行に脳が重要な役割をもっていることはすでに自明である。しかしながら、一流選手の見まねで頭で（脳で）理解したはずの動きを未経験者あるいは初心者が行おうとしても同じようにはいかない。一流選手の繰り出す技は一朝一夕に達成したものではなく、長い年月を試行錯誤して作り上げられた運動の中枢性プログラムによるものであり、それは骨格筋や脊髄の運動ニューロンではなく脳において作製され、保存（記憶）されている。最近、脳において筋・骨格系や操作対象物（例えば、ラケットやバットなど）の入出力関係（動特性）を表現した内部モデルの存在が理論的には明らかにされつつあり、まさに運動スキルはこの内部モデルの出来、不出来を反映していると推測できよう。脳神経系の中で、運動の内部モデルは小脳皮質においてそのシナプス可塑性を基盤として形成されると推定されているが、その内部モデルを動作の予測あるいは判断に利用する際には大脳皮質との機能連関（大脳-小脳機能連関）が重要であると示唆されている。しかしながら、従来までの研究では種々のスポーツ競技およびその動作に関わる競技者特有の脳活動、特に大脳-小脳機能連関について明らかにしたものはない。また、選手を指導する際にはそのほとんどは言葉による伝達に依存し、選手はそれを正しく理解できるかどうかがパフォーマンスおよび動作の上達に大きく影響するが、このような指導者から言葉で教示された際の選手の脳活動についても未だ明らかではない。

本研究においては、走り高跳び競技に焦点をあて、あらかじめ撮影した自分や他人の跳躍試技を見た際の脳活動を機能的核磁気共鳴画像法(functional Magnetic resonance imaging: fMRI)を用いて記録し、特に大脳-小脳機能連関に注目して脳機能解析を行った。被験者としては、陸上競技部等に所属し、競技経験が豊富で一流競技レベルに該当する大学生（競技者群）、一方、走り高跳びの経験がない一般大学生を未経験者群として対象とした。助走から踏切までの動画を見てその後の跳躍の成否を予測する際に、競技者群においては未経験者群よりも小脳外側半球部および島などの領域において有意な活動の増大が認められた。さらに、競技の指導の現場において、競技者に対して指導者がどのような言葉で指導・コーチングするのが有効なのかについて神経生理学的知見を得るために、競技者において自分の試技の動画を見ている際に指導者から言語がけによる教示を与え、その際の脳活動について解析した。事前に撮影した自身の跳躍試技の動画を見た後に直接指導している指導者から言葉がけを呈示し、それらの脳活動を比較した結果、動作の修正を促す言葉がけ後において小脳外側半球部の複数の領域で活動の増加が見られた。

代表者所属：　東京大学・大学院総合文化研究科・生命環境科学系
〒153-8902　東京都目黒区駒場 3－8－1
Tel.: 03-5454-6857
E-mail: dai-y@idaten.c.u-tokyo.ac.jp

2 緒言

スポーツにおける俊敏で巧みな動作(技、運動スキル)の遂行に脳が重要な役割をもっていることは明らかである。しかしながら、一流選手の見まねで頭で(脳で)理解したはずの動きを未経験者あるいは初心者が行おうとしても同じようにはいかない。一流選手の繰り出す技は一朝一夕に達成したものではなく、長い年月を試行錯誤して作り上げられた運動の中枢性プログラムによるものであり、それは骨格筋や脊髄の運動ニューロンではなく脳において作製され、保存(記憶)されている。中枢性プログラムの一種としては、内部モデルという考え方が計算論的神経科学において提案されている。内部モデルは順モデルと逆モデルとの 2 つに大別されるが脳内にはそれらが一対のペアを構成し、そのようなペアが複数個存在するという仮説が提案されている[1]。ここで、逆モデルとは、計画した動作を行うために目標の軌道から各関節における各骨格筋のトルクなどの運動司令を算出するものであり、出力である動作から入力である運動司令を逆算的に求めるために逆モデルと言われている。また順モデルは、その運動司令に基づいて動作を行った結果、最終的にどのような状態(結果)になるかについて等を予測するものと考えられている。Wolpert ら[1]の仮説によれば、動作を行う際に、複数ある逆モデルにより算出された運動司令を組み合わせ、それぞれに重みを付けて全体としての運動司令を構成する。その重みづけの度合いの算出のためは逆モデルによる運動司令から順モデルが予想されうる結果(動作の軌道)をシミュレーションし、その計算された予測と実際の動作を比較し、各ペア内の順モデルと逆モデルを修正し、また、各ペアに対する重みづけの配分を変化させて、運動の学習、最適化された神経制御が実現されるものと考えられる。このように、脳において筋・骨格系、さらには操作対象物(例えば、ラケットやバットなど)の入出力関係(動特性)を表現した内部モデルの存在が理論的には明らかにされつつあり、まさに運動スキルはこの内部モデルの出来、不出来を反映していると推測できよう。脳神経系の中で、運動の内部モデルは小脳皮質においてそのシナプス可塑性を基盤として形成されると推定されているが、その内部モデルを動作の予測あるいは判断に利用する際には大脳皮質との機能連関(大脳-小脳機能連関)が重要であると示唆されている[2, 3]。しかしながら、従来までの研究では種々のスポーツ競技およびその動作に関わる競技者特有の脳活動、特に大脳-小脳機能連関について明らかにしたものはない。また、選手を指導する際にはそのほとんどは言葉による情報の伝達に依存し、選手はそれを正しく理解できるかどうかがパフォーマンスおよび動作の上達に大きく影響するが、このような指導者から言葉で教示された際の選手の脳活動についても未だ明らかではない。

本研究では陸上競技の走り高跳びをとりあげ、走り高跳びの跳躍の助走から踏切までの動画を見て、その後の跳躍が成功したか失敗したかを予測・判断する際の脳活動について機能的核磁気共鳴画像法(functional Magnetic resonance imaging: fMRI)を用いて調べ、競技経験の有無がその脳活動にどのような差異をもたらすか調べた(研究1)。さらに、実際の競技の場、あるいは日々の練習の現場において、競技者は、外在的フィードバックとなる指導者からの様々な手段による指導を受ける。指導内容の伝達手段としては、具体的に動作を表現する、またはオノマトペなどの言葉による「言葉がけ」を手段とした伝達、指導者による示範やその他の映像を用いた視覚情報による伝達、器具を補助的に利用しての筋固有感覚的伝達などがある。このなかでも、指導者からの言葉がけが競技者に対して重要な役割を果たすことは多くの研究ですでに確認されている。そこで、競技の指導の現場において、競技者に対して指導者がどのような言葉で指導・コーチングするのが有効なのかについて神経生理学的知見を得るために、競技者群において自分の試技の動画を見ている際に指導者から言語がけによる教示を与え、その際の脳活動について調べた(研究 2)。本報告書においては、後述するように計画1と計画 2 の方法と結果については分けて記述し、考察において総括的に論議する。

3 方法

3.1 研究1

3.1.1 被験者

過去に長期の運動の経験を有しない一般健常者 15 名（年齢 21.7±2.0 歳、以下未経験者）と走り高跳びの熟練男性競技者 17 名（年齢 21.4±1.2 歳、記録 206.9cm±7.5cm、以下競技者）を対象とした。fMRI 実験に参加した競技者のうち 2 名を MR 撮像中の体動および課題に対する応答が得られなかったことにより解析対象から除外した。本実験は東京大学の倫理委員会で承認を受け、すべての被験者は書面による実験の説明を受け、同意書により本人の意思による実験への参加について同意をした。

3.1.2 跳躍試技の動画

各競技者に走り高跳びの自己記録の 90%～95%の高さ(180cm～205cm)での跳躍を行わせた。跳躍の助走開始から跳躍を終えマットに着地するまでの試技を、ビデオカメラ（Canon, iVIS HF11）を用いて撮影した（30frames/s）。撮影の際には、各競技者にとって必ずしも成功する高さではないが、すべての跳躍に関して成功させるように指示を与えた。これらの跳躍の成功、失敗の両方の試技について撮影し、また、助走路をランニングするのみの様子も撮影した。走り高跳びのルールでは助走の仕方に制限はないが、本研究に参加した走り高跳びのすべての競技者は背面跳びを行うため、助走の距離および歩数に個人差は見られたが、どの競技者もほぼ同様な曲線を描くように助走を行った。得られた動画のうち、跳ぶ前から明らかに失敗試技と認識できる跳躍の動画は動画編集の際に除き、他の跳躍およびランニングの動画は編集し 3.0 秒（90frames）の長さにした。この際、跳躍の動画に関しては跳躍の最後の一歩の踏切足が地面から離れる瞬間までの助走の動画として編集した。また編集により画像を粗くし（352×240 ピクセル）顔の表情を読み取れないようにした。

3.1.3 課題

fMRI実験の直前に、被験者にその実験で見ることになる競技者の跳躍の動画の成功例を十分に見させ、その後、fMRI実験で用いるものとは別の跳躍の動画を用い課題の練習を行った。 fMRI実験の撮像セッションの間、被験者は鏡越しに投影された画像を見ることができ、手元にあるボタンを使い指示に対し応答することができる。被験者のうち、跳躍撮影に参加した競技者は自分自身の動画と他人2名分の動画を、跳躍撮影に参加しなかった競技者と未経験者は他人3名分の動画を使い課題を行った。解析を行った競技者のうち自分の動画を見た競技者は8名となった。

それぞれの動画が提示される前に課題開始の合図となる「trial」か「running」が画面に1秒間映し出され、その後、跳躍の助走かランニングの動画が3回流れる。合図が「trial」のときは跳躍の成功/失敗の予測判断課題で、跳躍の助走の動画が3回映し出された後、1.5秒の間隔をおいて「yes → button1 or no → button2」と画面上に2.5秒間表示される（図1）。被験者は跳躍の助走を見て、その跳躍が成功したと思ったらyesのほうのボタンを押し、失敗したと思ったらnoのほうのボタンを押す。判断課題では半数が成功跳躍、もう半数が失敗跳躍の動画となっている。合図が「running」のときは解析の際のベースラインとなる無判断課題で、ランニングの動画が3回映し出せられた後、1.5秒の間隔をおいて「press button1」と2.5秒間表示される。被験者には、無判断課題のときは予測・判断するものはないが、競技者が走っている様子をしっかり見るように指示した。判断課題および無判断課題の時、ボタン1を右示指でボタン2を右中指で押すことができ、画面の指示のボタンナンバーはランダムで入れ替わる。ボタンナンバーをランダムで入れ替えることと動画提示から応答までの間に少し時間をおくことで被験者のボタン押し応答のタイミングを一定にすることができ、また押すボタンを事前に決めるという動作の準備を行わせなかった。被験者は撮像セッション1つにつき競技者1名分の36課題を行い、全部で3セッション108課題行った。課題間はランダムで5～8秒の間隔をあけ、判断課題、無判断課題の順序もランダムにした。また眼鏡で視力を矯正している被験者に関しては磁性体を用いてないMR装置用の視力矯正眼鏡をかけさせ、跳躍の細か

い動きも見られるようにした。

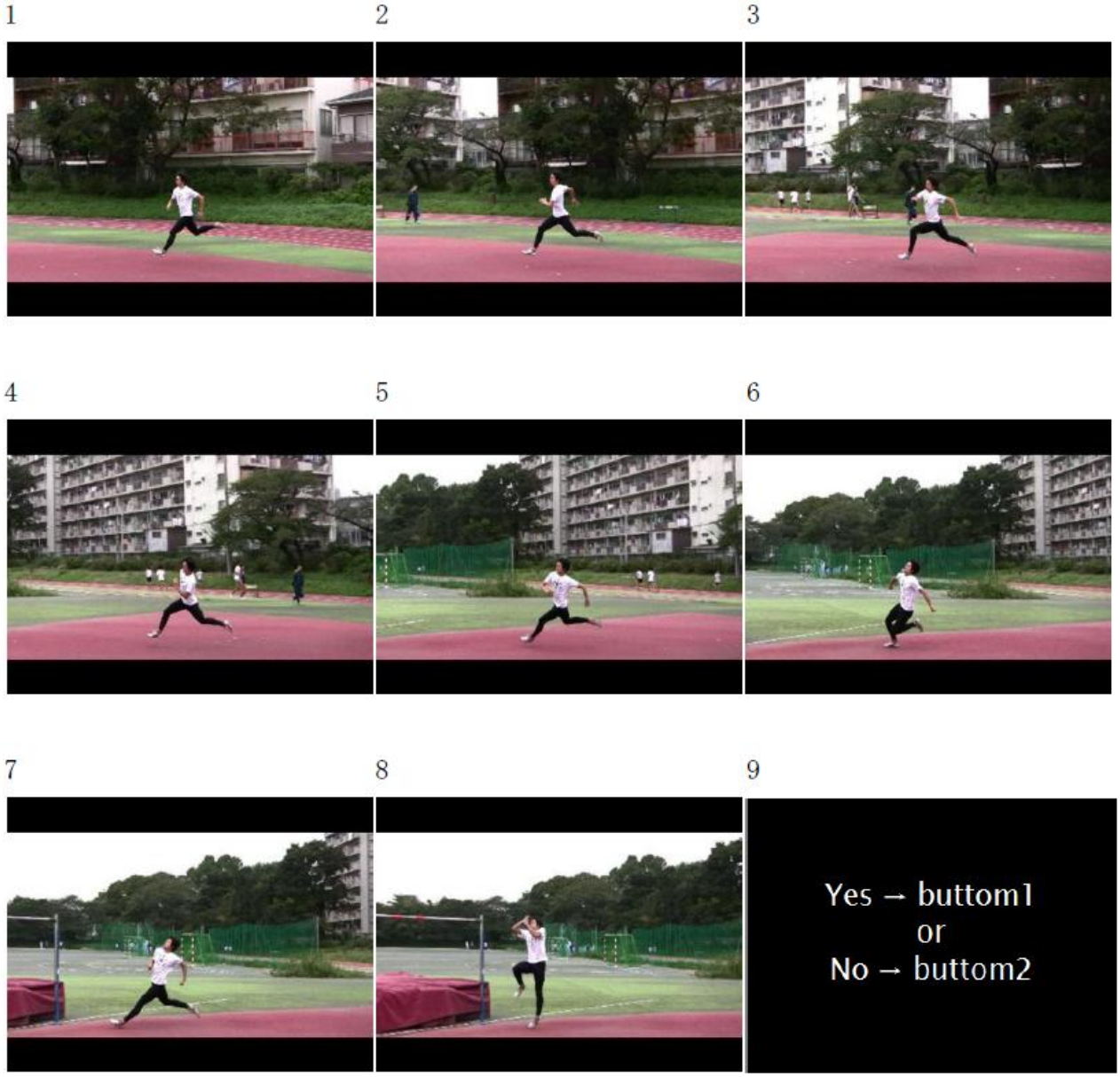

図1　fMRI実験での動画提示の典型例

3.1.4 fMRI撮像方法

3.0TのMR装置（Siemens, Trio）でヘッドコイルは8チャンネル フェイズド アレイコイルとしMR画像を得た。BOLD信号(Blood Oxygen Level Dependent signal)は以下の方法で撮像した。gradient echo-EPI法(echo planar imaging)を用い、スライス方向は横断で撮像範囲は頭頂から小脳までの全脳とし、スライス厚を3mm、スライス枚数を46枚として260スキャン行った。各パラメーターは、TR(repetition time)を3.0秒、TE(echo time)を0.030秒、FOV(field of view)を192mm×192mm、voxelサイズを3×3×3mm3、flip angle を90°とした。また高精度の解剖画像を得るためにT1強調（TR, 2000ms:TE, 4.38ms:slice thickness, 1mm:FOV, 192mm:flip angle, 8°）とT2強調（TR, 4.3ms:TE, 2.15ms:slice thickness, 1mm:FOV, 192mm:flip angle, 23°）の両方を撮像した。認知課題の最初の課題の開始を4番目のMR装置のスキャンパルスに同期させ、10課題目を67番目のパルスと、19課題目を130番目のパルスと、28課題目を192番目のパルスと同期させた。認知課題の画像提示とボタン押し応答の記録はPresentation software (Neurobehavioral Systems)を用いて行った。画像提示は、MR装置外に設置してある

投射機から、鏡を介して被験者の頭部付近に設置してあるスクリーンに投影され、スキャナー内の被験者はそのスクリーンに映し出された画像を顔の前にある鏡越しに見ることができるように提示した。応答のために用いたボタンはMR撮像に影響を与えない物であり、押し間違えがないように対応するボタンの配置をボタン装置全体の感触でわかるようにして、右手で押させた。また撮像中の緊急時のために被験者の左手に緊急連絡用のスイッチを握らせた。頭部は柔らかいクッション等で固定し大きく動けないようにし、被験者自身にも意識的に余計な動きをしないように指示をした。また撮像中の音が被験者のすべての応答に影響が出ないよう耳栓をさせた。36課題の1セッションで784秒の撮像時間とし、セッションごとに撮像を1回行い、別に高精度解剖画像(T1強調,T2強調)も撮った。被験者がMR装置内に入っている時間はすべてで60分以内とした。

3.1.5 fMRI解析

脳画像の統計解析にはMATLABと、MATLAB上で作動するソフトウェアのSPM8(http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm8/)により構築した一般線形モデルを用いた。最初の3volumesはT1緩和の平衡のため解析からは外し、残った257のEPI画像は頭部の動きに関して補正し、最初のEPI画像に再調整した。補正されたEPI画像はMNI(Montreal Neurological Institute)のEPI脳テンプレートに標準化した。データは2×2×2 mm3に再構築し、空間的ノイズを取り除くために6 mmのFWHM(full-width at half-maximum)のガウス型フィルターを用いて空間的に平滑化した。また時系列データはMR装置のドリフト等のノイズを取り除くためにカットオフ周期128秒のハイパスフィルターで時間的に平滑化した。

3.1.6 統計解析

各被験者内で固定効果解析を行った。説明変数として、判断課題と無判断課題の予測判断時の2条件とそれぞれの課題のボタン押し時の2条件を設定した。また、ボタン押しが複数回確認できた課題と、応答の指示提示時間外にボタン押しが確認できた課題はエキストラ条件として設定した。この条件は条件比較には用いなかった。それぞれの課題の予測判断時の2条件で、応答指示提示の瞬間から前にさかのぼって10秒間を条件モデルとして説明変数ベクトルに組み込み、ボタン押し時の2条件は応答が帰ってきた瞬間の事象関連モデルとして説明変数ベクトルに組み込んだ。この際の基底関数はHRF(hemodynamics response function: 血流動態関数)とした。その後、変量効果を解析する集団解析を行った。まず各被験者群内で1標本T検定をし、その後、群間で2標本T検定を行った。群内検定の有意水準は$p<0.05$(多重比較補正あり)、群間検定の有意水準は$p<0.001$(多重比較補正なし)とした。

3.1.7 解剖部位特定

fMRIの統計解析で求められたvoxelの座標からSPM8上で機能するAnatomy toolbox(http://www.fz-juelich.de/inm/spm/Anatomy_v16.zip)を用い対応する脳部位を特定した。そのためAnatomy toolboxが分別可能な部位のみ結果には示し、また各脳部位別にBOLD信号の変化量を示すzスコアが一番高かった座標のみ結果の表に示した。 表の座標については、前交連を(0 0 0)とし、前交連―後交連を結んだ線に対し左右がx座標(右が正)、前後がy座標(前が正)、上下がz座標(上が正)となっている。

3.2 研究2

3.2.1 被験者

被験者は、右利きの走高跳競技経験者7名 (男性5名、女性2名、年齢20.7±0.8歳、競技歴7.4±1.0年) を対象とした。全ての被験者には、本研究の目的および研究方法を十分に説明し、実験の危険性および方法について詳細に説明した。また本人の意思により本研究に参加する旨の同意書を得た。なお、本研究は順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科における倫理委員会および東京大学の倫理委員会により認可を受けた上で実施された。

3.2.2 動画撮影および音声記録方法

全ての被験者を対象に、トレーニングおよび競技会における走高跳の跳躍試技を撮影した。試技は、助走開始から跳躍を終えマットに着地するまでを、ビデオカメラ(Canon, iVIS HF11)を用いて撮影した(30 frames/s)。被験者の負担を考え、2日または3日間の撮影日数を設け、十分な回数の走高跳の跳躍試技を撮影できるまで被験者に跳躍を行わせた。撮影におけるカメラの設置位置は、MR 装置内での画面上に映る競技者の大きさが変わらないよう、毎回助走路からほぼ等距離となる位置で行った。また後の実験で注視点等を作らないことから、余計な刺激とならないように被験者が常に画面の中央に位置するように撮影し、助走路付近に他者を立たせないようにした。得られた動画のうち、跳ぶ前から明らかに失敗だとわかる跳躍の動画は編集の際に除き、他の跳躍の動画は、動画編集ソフト(Corel, VideoStudio X3)を用いて実験用に編集し、4.0秒(120 frames)の長さにした。この際、跳躍の動画に関しては被験者が走高跳のバーの上に跳び上がるまでとし、助走からその時点までの4.0 秒の動画として編集した。

IC レコーダー(SANYO, ICR-PS511RM)を用いて指導者の音声を記録した(PCM: 48 kHz)。録音の対象とした音声の内容を選択する際、予備調査を行い、動作を表す言葉がけ条件4種類とコントロール条件として、動作を表す言葉がけ条件 4 種類の計 8 種類を録音の対象とした。録音の際には、指導者以外の声および外部の音が録音されないように、完全に閉め切った部屋において行った。録音した音声は、動画編集ソフトを用いて実験用に編集し、3.0 秒以内の長さの wav ファイル(48kH z、16bit)に変換した。

3.2.3 実験課題のデザイン

動画を提示する前に実験課題開始の合図となる「trial」を画面に1秒間映し出し、その後、被験者自身が行う跳躍試技の映像を4秒間提示する。映像の後、黒色の画面をランダムに7、8、9秒間提示し、その後、音声刺激を3秒間与える。音声刺激に関しては、競技動作に特化した言葉がけと競技動作に特化しない言葉がけ条件の2 条件に関して各 4 種類を設定し、計 8 種類がランダムに各 8 回等しい回数与えた。音声刺激の後、黒色の画面を 7 秒間設け、ボタン押しを指示する画面を 2 秒間映した。画面の内容に関しては、動作を表す言葉がけ条件の課題においては、「Bad 1 2 3 4 Good」を提示した。この画面を提示した際は、映像から被験者自身が判断した動作の修正内容と、音声として提示された指導者が同じ映像から判断し選択した言葉がけの内容がどの程度適合しているかを、主観的に評価するように被験者に指示した。映像に対してかけられた言葉がけの内容がより適合していると感じたらGoodに近い数字のボタンを押し、適合していないと感じた場合はBadに近い数字のボタンを押すように指示した。動作を表さない言葉がけ条件の課題においては、「press button1」または「press button2」を提示し、画面の内容に則したボタンを押すように指示した。ボタン押し画面の提示後には、黒い画面をランダムに 6、7、8 秒間提示し、その間、被験者は安静状態でいた。ここまでの一連の流れが 1 課題となる。実験に用いた言葉がけの文言を表 1 に示す。

表 1 本実験において用いた指導者からの言葉がけ

言葉がけ内容	
動作を表す言葉がけ	動作を表さない言葉がけ
A)踏み切りで肩をギュンっと、合わせましょう	a)一度、休憩しましょう
B)踏み切った後に、腕でリードしましょう	b)一度、水分補給しましょう
C)最後の2歩をダ・ダーンと踏み切りましょう	c)気持ちを落ち着けましょう
D)踏み切った後に、バーまで膝をあげましょう	d)しっかり集中しましょう

被験者は、1 セッションの撮像につき 16 課題を行い、課題間は 6 秒から 8 秒の間隔をランダムに設けた。そして、全4セッションの計 64 課題行った。撮像終了後、質問紙による内省報告を被験者に行ってもらった。質問紙

の内容は、各言葉がけの内容に関して、動作をイメージしたか、そして、動作をイメージした場合には、どのような動きをイメージしたかを自由記述によって回答させるものである。

分析対象範囲として、動作を表す言葉がけ提示後の 7 秒間(以下、Action 条件とする)、動作を表さない言葉がけ提示後の 7 秒間(以下、NonAction 条件とする)、映像提示後の 7 秒間(以下、Movie 条件とする)を選択した。

3.2.4 fMRI撮像方法

3.0T の磁気共鳴画像診断装置（MRI: Magnetic Resonance Imaging, Siemens, Trio）で 8 チャンネルフェイズドアレイヘッドコイルを用い MR 画像を得た。課題中の脳活動の画像である機能画像は以下の方法で撮像した。gradient echo-EPI 法(echo planar imaging)を用い、スライス方向は AC-PC line を基準とし横断面撮像、撮像範囲は頭頂から小脳までの全脳、スライス厚を 3mm、スライス枚数を 46 枚として 185 スキャン行った。各パラメーターは、TR(repetition time)を 3.0 秒、TE(echo time)を 0.030 秒、FOV(field of view)を 192mm×192mm、voxel size を $3\times3\times3mm^3$、flip angle を 90°とした。また高精度の解剖画像を得るために T1 強調（TR, 2000ms:TE, 4.38ms:slice thickness, 1mm:FOV, 192mm:flip angle, 8°）と T2 強調（TR, 4.3ms:TE, 2.15ms:slice thickness, 1mm:FOV, 192mm:flip angle, 23°）の両方の画像を撮像した。課題の開始を 4 番目の MR 装置のスキャンに同期させ、9 課題目を 91 番目のスキャンと同期させた。課題の画像提示とボタン押し応答の記録は Presentation (Neurobehavioral Systems)を用いて行った。画像提示は、MR 装置外に設置してある投射機から、鏡を介して被験者の頭部付近に設置してあるスクリーンに投影され、スキャナー内の被験者はそのスクリーンに映し出された画像を顔の前にある鏡越しに見ることができるように提示した。音声提示は、MR 撮像に影響を与えないヘッドホンを用い、実験の際に頭部に装着した。応答のために用いたボタンは MR 撮像に影響を与えない物であり、押し間違えがないように対応するボタンの配置をボタン装置全体の感触でわかるようにし、右手で押させた。また撮像中の緊急時のために被験者の左手に緊急連絡用のスイッチを握らせた。頭部はクッション等で固定し大きく動けないようにし、被験者自身にも意識的に余計な動きをしないよう指示をした。16 課題の 1 セッションで 552 秒の撮像時間とし、セッションごとに撮像を 1 回行い、別に高精度解剖画像(T1 強調,T2 強調)も撮った。被験者が MR 装置内に入っている時間はすべてで 60 分以内とした。

3.2.5 fMRI 解析

脳画像の統計解析には MATLAB と、MATLAB 上で作動するソフトウェアの SPM8 (http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm8/)を用いた。最初の 3 volumes は T1 緩和の平衡のため解析から外した。残った 182Volumes の機能画像は頭部の動きを算出し、そのデータを基に補正し、最初の機能画像に再調整した。補正された機能画像は MNI(Montreal Neurological Institute)の脳テンプレートの空間的座標に標準化し、データは $2\times2\times2$ mm^3 の voxel size で再取得した。空間的ノイズを取り除くために FWHM(full-width at half-maximum)が 8 mm のガウス型フィルターを用いて空間的に平滑化した。また画像データは MR 装置のドリフト等のノイズを取り除くために、カットオフ周期 128 秒のハイパスフィルターを用いた。

3.2.6 統計解析

各被験者内で固定効果解析を行った。説明変数として、走高跳映像提示区間の 4 秒間と提示終了後から 7 秒間の区間を設定した。音声刺激に関するものは、音声提示区間の 3 秒間と音声提示終了後から 7 秒間の区間を設定した。さらにそれぞれの音声後のボタン押し提示区間の 3 秒間を設定した。また、ボタン押しが複数回確認された課題と、応答の指示提示時間外にボタン押しが確認された課題はリジェクト条件として設定した。この条件は条件比較には用いなかった。そして、それらを条件モデルとして説明変数ベクトルに組み込み、ボタン押し提示区間は事象関連モデルとして説明変数ベクトルに組み込んだ。この際の基底関数は HRF（hemodynamic response function: 血流動態関数）とし、説明変数ベクトルと畳み込み積分をした。コントラストの

作成では、音声提示終了後からの 7 秒間を、動作を表す言葉がけと動作を表さない言葉がけの 2 条件に分け、各被験者内で、動作を表す言葉がけと動作を表さない言葉がけの比較を行った。さらに、動作を表す言葉がけと映像提示後の 7 秒間の比較を、各被験者内で行った。その後、被験者集団による変量効果解析を行った。この解析では、各被験者内で行った動作を表す言葉がけと動作を表さない言葉がけの条件を比較したコントラストデータ、そして、動作を表す言葉がけの条件と映像提示条件を比較したコントラストデータを、コントラスト毎に被験者 7 名分まとめた。そして、コントラストデータ毎に被験者群内で 1 標本の T 検定を行った。群内検定の有意水準は$p < 0.001$（多重比較補正なし）とし、群内検定での検出する連続 voxels の数の閾値として extent threshold $k > 20$ とした。

3.2.7 解剖部位特定

fMRIの統計解析で求められたvoxelの座標からSPM8上で機能するAnatomy toolboxを用い対応する脳活動領域を特定した。そのためAnatomy toolboxが分別可能な領域のみ結果には示し、また各脳領域別にBOLD信号の変化の統計値が一番高かった座標のみ結果の表に示した。表の座標については、前交連(0 0 0)とし、前交連―後交連を結んだ線に対し左右がx座標(右が正)、前後がy座標(前が正)、上下がz座標(上が正)となっている。

結果

4.1 研究1

4.1.1 跳躍試技の成否の判断課題における正答率

競技者15名の正答率の平均は57.6%、未経験者15名の正答率の平均は53.5%となり、両群間に正答率の有意差が認められた($p < 0.05$)。

4.1.2 競技者が未経験者より有意に大きい活動を示した脳領域と未経験者が競技者より有意に大きい活動を示した脳領域

競技者が未経験者よりも活動の増大を示した領域には、内側の帯状皮質、下前頭回、島、小脳外側半球部であった(表2)。

表2 競技者が未経験者より有意に大きい活動を示した脳領域

Athelete ＞ Control	定位座標 / Z score							
	R				L			
	x	y	z	Z	x	y	z	Z
middle cingurate cortex					0	−2	32	3.4785
inferior frontal gyrus					−30	28	−4	3.2632
insula	38	22	−8	3.1062				
cerebellum lobule 6					−14	−72	−24	3.4754

未経験者が競技者よりも有意に大きい活動を示した脳領域は、楔前部であった(表3)。

表3 未経験者が競技者より有意に大きい活動を示した脳領域

Control ＞ athlete	定位座標 / Z score							
	R				L			
	x	y	z	Z	x	y	z	Z
Precuneus					−16	−54	64	3.22

4.2 研究2: 動作を表す言葉がけと映像提示後の脳活動領域の比較

表 4 には、動作を表す言葉がけの Action 条件おいて、映像提示の Movie 条件においてよりも有意に活動が増加した脳領域とその定位座標を示した。Action 条件において、有意に活動が増加した脳領域は、下前頭回(左:眼窩部)、下頭頂葉(右)、角回(左)、中心後回(左)、上前頭回(右)、中前頭回(左、右)、前帯状皮質(右)、補足運動野(左)、眼窩回中央部(右)、中側頭回(左)、下側頭回(左)、側頭極(左)、小脳皮質(左:8 葉、crus 2 、右:4 葉-5 葉、小脳虫部)であった。主な脳活動領域の機能画像は、図 2 に示す。

表 4 動作を表す言葉がけ後において、映像提示後においてよりも有意に活動が増加した脳領域

(Action 条件 > Movie 条件)

L					R			
定位座標/Z score/				脳領域	定位座標/Z score/			
x	y	z	Z		x	y	z	Z
-26	14	-16	3.41	Inferior frontal gyrus (orbitalis)				
				Inferior parietal lobule	52	-58	48	3.49
				Angular gyrus	44	-64	56	3.68
-48	-18	60	3.37	Postcentral gyrus (area 1)				
				Superior frontal gyrus	12	42	56	4.48
-36	54	20	4.17	Middle frontal gyrus	38	26	48	4.51
				Superior medial gyrus	8	46	30	5.45
				Anterior cingulate cortex	6	44	20	4.03
-2	8	54	3.85	Supplemental motor area				
				Mmiddle orbital gyrus	36	46	-10	4.48
-62	-18	-14	3.35	Middle temporal gyrus				
-56	-24	-18	3.46	Inferior temporal gyrus				
-34	10	-20	3.65	Temporal pole				
				Cerebellum (lobule 4-5)	16	-44	-24	3.88
-42	-56	-50	4.06	Cerebellum (lobule 8)				
-38	-76	-46	5.63	Cerebellum (crus 2)	32	-80	-36	4.65
				Cerebellar vermis (lobule 10)	2	-52	-26	3.89

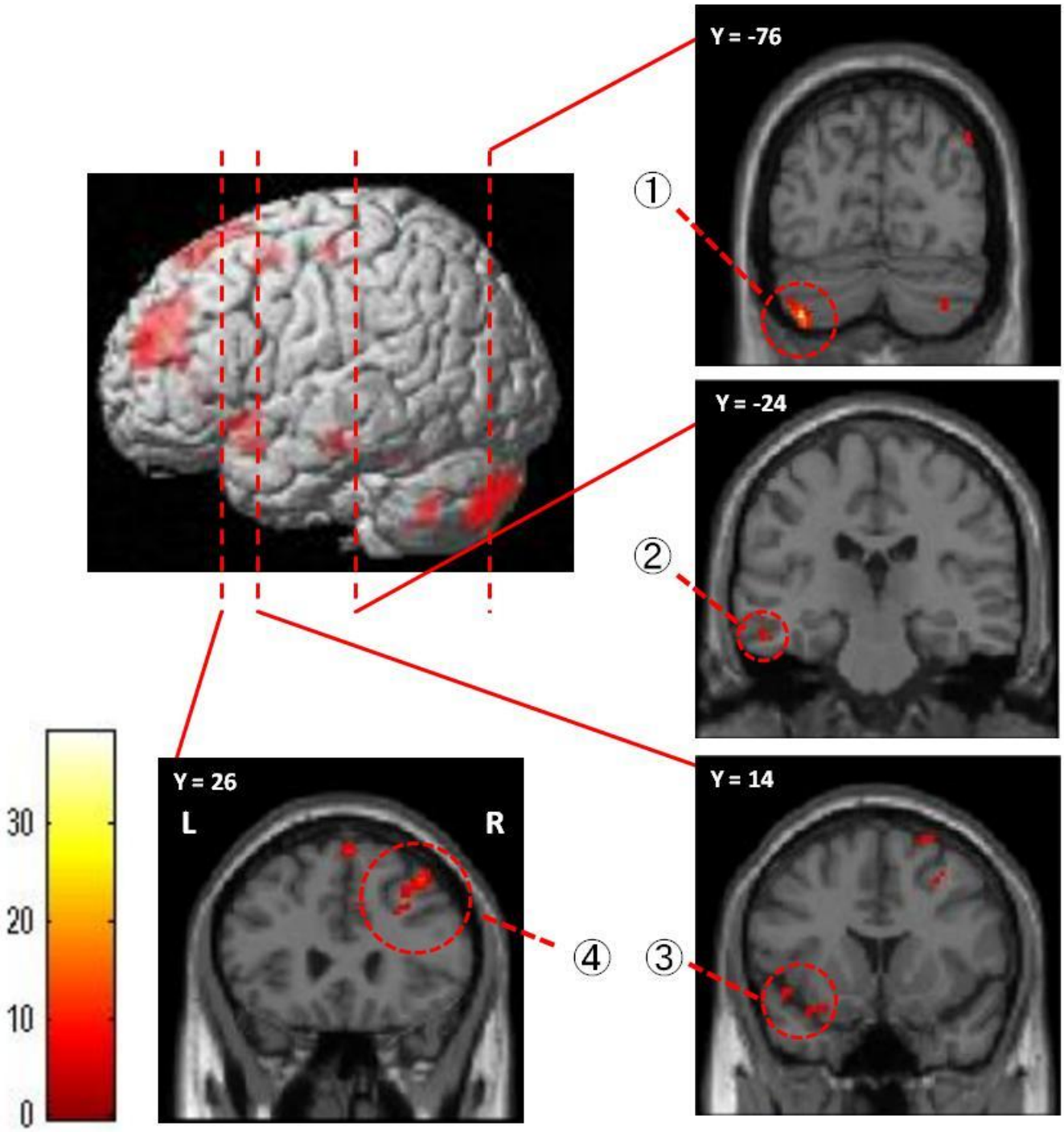

図 2　動作を表す言葉がけ後において、映像提示後においてよりも有意に活動が増加した脳領域典型例

考察

本研究では、走り高跳びの跳躍の将来の状態の予測に関わる脳活動に走り高跳びの競技経験の有無により差異が生じるのかについて fMRI を用いて調べた。競技者と未経験者を対象に、走り高跳びの跳躍の助走から踏切までの動画を提示し、その跳躍が結果として成功するか失敗するか予測・判断している際に、脳活動と関連のある酸化ヘモグロビン濃度の変化（BOLD 信号）を調べ、BOLD 信号により推定される脳賦活領域に差異が見られた。競技者群では、下前頭回および小脳皮質外側半球部に有意な活動の増大が認められた。下前頭回はミラーニューロンシステムの一部として観察した動作の表象に関係していると示唆されている領域である。また、小脳皮質には内部モデルが生成されていると考えられている。一方、未経験者では下肢の動作に関連した表象があると考えられている楔前部に活動の増大が認められ、競技経験の有無により脳賦活領域に差異があることが判明した。

さらに、本研究では、指導者からの言葉がけを受けた際に競技者の脳活動を fMRI を用いて調査した。その結果、動作を表す言葉がけを受けた際に、動作を表さない言葉がけや、映像の提示よりも、小脳皮質外側半球部において活動の増大が認められた。この結果は、指導者からの言葉がけが担う役割である運動の学習や運動の中枢性プログラムの一種としての内部モデルの生成に関連する小脳皮質や下前頭回などの脳領域が、競技者が指導者から言葉がけを受けることによって、実際に、活性化するということを示したものである。

現在まで、指導者から競技者、学習者に対しての教示（言葉がけ）は、そのほとんどが一方通行的なものであり、指導者は競技者、学習者が教示された内容を正しく理解しているのかどうかについては、その後のパフォーマンスによって判断せざるを得ないのが当然であった。本研究をさらに進めることにより、実際のスポーツ指導の現場において、指導者が競技者、学習者に対して、いつ(When)、どのように(How)、どのような(What)教示（言葉）を行うのが有効であるのかどうかについて、脳の活動を基にして客観的に判断できる可能性も高いことが示唆された。さらに将来には、学習者の技能レベルに相応な言葉がけについても知見が得られると期待される。例えるならば、競技者あるいは学習者の中にはある動作を想起（イメージ）するのに、四肢の末端の動きからのみ考える者もいるだろうし、むしろ体幹の筋から遠位の筋の活動レベルを一種の勘としてイメージする者もいるであろう。その際に、指導者が与える言葉は同じでも、競技者の受け止め方にはかなりの差異が生じると考えられる。指導者、コーチが行ってきた指導方法、コーチングの技法はまさにお家芸的なものであり、その経験知ともいえる知識体系を脳科学・神経生理学のエビデンスを基にして理解することにより、競技者のみならず現場で指導している指導者、コーチの指導方法および練習の効率化に重要な貢献をすることが予想される。

参考文献

1. Wolpert, D. M. and Kawato, M.: Multiple paired forward and inverse models for motor control. Neural Networks 11, 1317-1329, 1998.

2. Ramnani, N.: The primate cortico-cerebellar system: anatomy and function. Nat. Rev. Neurosci., 7, 511-522, 2006.

3. Hanakawa, T., Dimyan, M. A., and Hallett, M.: Motor planning, imagery, and execution in the distributed motor network: a time-course study with functional MRI. Cerebral Cortex 18, 2775-2788, 2008.

謝辞

本研究は、第7回（2009年度）上月スポーツ・教育財団「スポーツ研究助成事業」の支援を受けて行われた。また、この研究の一部は、2011年11月に米国ワシントンDCにて開催されたSociety for Neuroscience 41th annual meetingにおいて、学会発表「Mochinaga, S., Kotajima, H., Hanakawa, T., Yanagihara, D. : Neural activity during predicting the performance of high jump in athletes」を行った。ここに記して感謝いたします。