

## 運動記憶にかかわる脳活動をとらえることに成功

スポーツなどで経験したことがあるように、私たちは、練習をすることにより、それまでできなかった新しい動作ができるようになります。そして、いったん習得してしまえば、その動作をその後、簡単に再現することができます。これは、まさに我々の脳のもつ運動学習機能、すなわち、新たな運動の記憶を“形成”し、それを“想起”する能力によりなせる技です。しかし、そういった私たちの日常の行動を支えている運動記憶の形成と想起が、実際、どのような脳の活動によって成立しているのかは明らかとなっていませんでした。

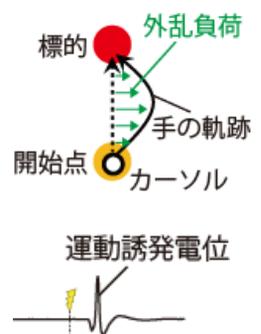
高知工科大学総合研究所・情報学群の門田宏講師、東京大学大学院教育学研究科の平島雅也助教（現所属：脳情報通信融合研究センター主任研究員）、野崎大地教授による研究チームは、運動記憶の形成と想起にかかわる脳活動が一次運動野とよばれる脳領域で生じていることを、ロボットマニピュランダムという特殊な装置を使った運動学習実験（注1）と経頭蓋磁気刺激法（注2）を組み合わせることで突き止めました。

今回の研究成果を応用・発展させていくことで、スポーツトレーニングやリハビリテーションの効果を脳信号のレベルで評価できるようになったり、動作をおこなう前にその動作が成功するか失敗するかを予測するヒューマンエラー防止システムの開発や、脳の情報を使って機械を動かすブレインマシンインターフェイス技術への貢献など、身体運動のかかわる教育・医療・情報技術の発展へつながることが期待されます。

### ◆用語解説：

（注1）ロボットマニピュランダム：ハンドルを操作することで画面上のカーソルを開始点から標的に動かす課題をおこなった。外乱負荷を加えることができ、本研究では動作方向と垂直な向きに、動作速度に比例した大きさの力を与えた。外乱負荷が加わると、最初は動作が乱されるが、しばらく外乱負荷のある環境を学習していくと、外乱を打ち消すように標的までまっすぐに手を動かせるようになる。

（注2）経頭蓋磁気刺激法：一次運動野とよばれる脳領域を磁気刺激すると末梢の筋肉から運動誘発電位と呼ばれる電気的反応が記録できる。この反応の大きさを調べることによって、筋肉の活動を支配する一次運動野の活動の高まり具合（興奮性）を評価することができる。



### ◆著者

門田 宏（高知工科大学総合研究所、情報学群 講師）  
平島 雅也（脳情報通信融合研究センター 主任研究員）  
野崎 大地（東京大学大学院教育学研究科 教授）

#### 【研究に関するお問い合わせ】

公立大学法人 高知工科大学 総合研究所、情報学群 講師 門田 宏  
TEL.0887-57-2237 FAX.0887-57-2238  
E-mail : kadota.hiroshi@kochi-tech.ac.jp  
東京大学大学院教育学研究科 教授 野崎 大地  
TEL.03-5841-3983 E-mail : nozaki@p.u-tokyo.ac.jp

#### 【取材に関するお問い合わせ】

公立大学法人 高知工科大学 入試・広報部 福田、宮林  
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185  
TEL.0887-53-1080 FAX.0887-57-2000  
E-mail : kouhou@ml.kochi-tech.ac.jp

## ◆発表雑誌

雑誌名：The Journal of Neuroscience (2014年)

論文タイトル：Functional modulation of corticospinal excitability with adaptation of wrist movements to novel dynamical environments

著者：Hiroshi Kadota\*, Masaya Hirashima, Daichi Nozaki\*

## ◆研究手法 および成果

研究チームは3つの実験を行いました。それぞれの実験で、被験者の手はロボットマニピュランダムとつながっており、手首を動かすことで画面上に表示されるカーソルを操作します（図1左）。課題はカーソルを開始点から標的にまっすぐ動かすというものです。実験中にロボットマニピュランダムから外乱負荷（被験者の意図とは関係なく、通常では経験しえない特殊な負荷）が与えられました。外乱負荷のある環境での動作を学習することによって、一次運動野とよばれる脳領域の活動がどのように変化しているのか、磁気刺激を使って動作を開始する前の脳活動の変化を調べました。

### 実験1：運動学習にともなって脳活動は変化する

被験者は8方向のいずれかにランダムに表示される標的に向かってカーソルを動かします。手首の橈屈（とうくつ）-尺屈（しゃくつ）動作がカーソルの上下方向の動き、屈曲-伸展動作が左右方向の動きに対応しています（図1右）。外乱負荷がない環境では標的に向かってまっすぐにカーソルを動かすことができます（図2左）。右方向の外乱負荷が加わると動作は大きく右方向に乱されますが（図2中）、学習が進むと標的までほぼまっすぐにカーソルを動かすことができるようになります（図2右）。

このとき運動学習にともなって脳の活動がどのように変わっているか調べると、例えば橈側手根屈筋（とうそくしゅこんくつきん）という筋肉の場合、負荷のない環境では屈曲動作を行うときに最も反応が大きかったのに対し、負荷のある環境での動作を学習すると、その反応は全体的に橈屈側へと右回りに回転しました（図3）。

つまり、新しい環境下での運動を学習すると、学習した環境に応じた活動を脳は新たに形成し、動作を開始する前に、その運動記憶が想起されることが明らかになりました。

### 実験2：複数の環境を同時に学習できるとき脳活動は状況に合わせて変化する

右手は同じ動作をしていても、左手を動かす（両手運動）、あるいは動かさない（片手運動）という違いがあると、右方向の外乱負荷と左方向の外乱負荷を同時に学習できることが知られています（図4左）（Nozaki et al. Nat Neurosci 2006）。この知見と実験1の結果を合わせて考えると、異なる2つの外乱を学習できるときには、脳活動パターンも外乱方向に応じて異なる回転をすると考えられます（図5A左）。例えば、図5Aの黄色で示している上（橈屈）方向の動きで考えると、右方向の外乱負荷を学習すると脳の反応は大きくなりますが、左方向の外乱を学習しても反応は大きくならないと考えられます。そして、実際に、脳活動を調べると予測通りの結果となりました（図5B左）。つまり、ヒトが複数の環境での運動を学習できているときは、個々の環境に応じて柔軟に運動記憶を切り替えていることが明らかになりました。

### 実験3：複数の環境を同時に学習できないとき脳活動は状況に合わせて変化しない

一方、標的の色の違いなどの知覚情報を手がかりに、複数の外乱負荷を同時に学習することは困難であることが知られています。標的が水色のときに右方向の負荷、赤紫色のときに左方向の負荷が学習できるかどうか検討したところ、被験者は、標的の色に応じた運動の切り替えを行なうことはできませんでした（図4右）。このような学習が困難な環境では、脳活動はあまり変化しないと考えられます（図5A右）。実際に、このトレーニングを繰り返しても、前後で脳活動に変化は見られませんでした（図5B右）。

## ◆結果の意義・今後の展望

研究チームは、ロボットマニピュランダムを用いた運動学習と経頭蓋磁気刺激法を組み合わせることで、運動学習にともなう脳活動の変化をとらえることに成功しました。そして、脳活動の変化は運動学習ができること・できないことに関係していることが示されました。これらの結果は、運動学習のメカニズムの理解や、効率的な運動スキルの獲得手法の開発などに貢献すると期待されます。

今回の研究成果によって、リハビリテーションやスポーツ選手のトレーニングの効果を脳信号のレベルで評価できるようになる可能性があり、効果的な運動学習が望まれている医療、教育など幅広い臨床現場への貢献につながっていくと考えられます。

さらに今回の成果は、想起された運動記憶を知ることができれば、動作をおこなう前に、その動作が成功するか失敗するかあらかじめ予測できる可能性を示しており、ヒューマンエラー防止システムの開発や、脳情報をもとに機械を操作するブレインマシンインターフェイス技術への発展が期待されます。

## ◆添付資料:

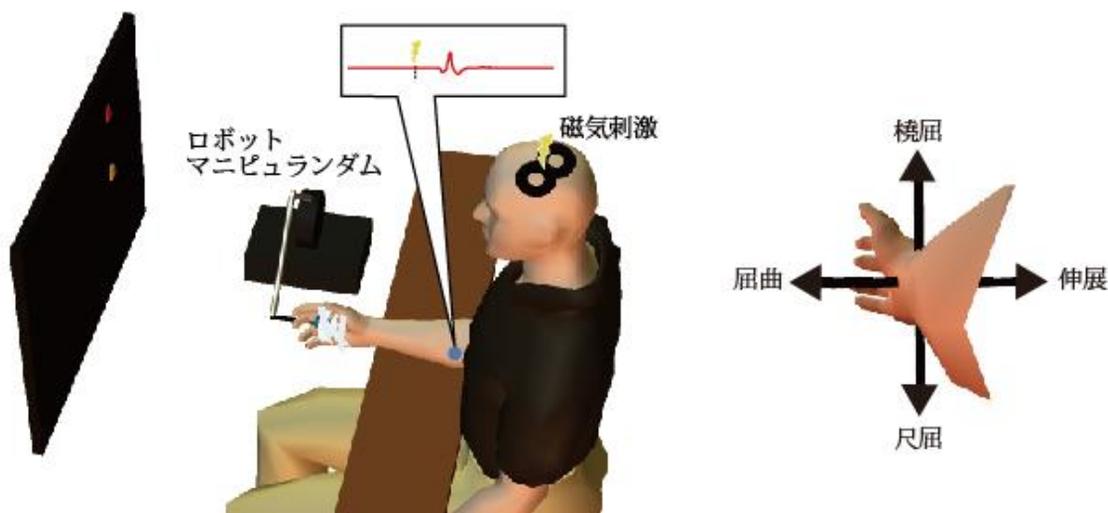


図1. 実験1の設定

(左) 被験者は手首でロボットマニピュランダムを操作し、カーソルを開始点から標的に動かす。動作を開始する前に磁気刺激をあたえて、筋肉から反応（運動誘発電位）を記録した。

(右) 手首の腕屈-尺屈動作がカーソルの上下方向の動き、屈曲-伸展動作が左右方向の動きに対応している。

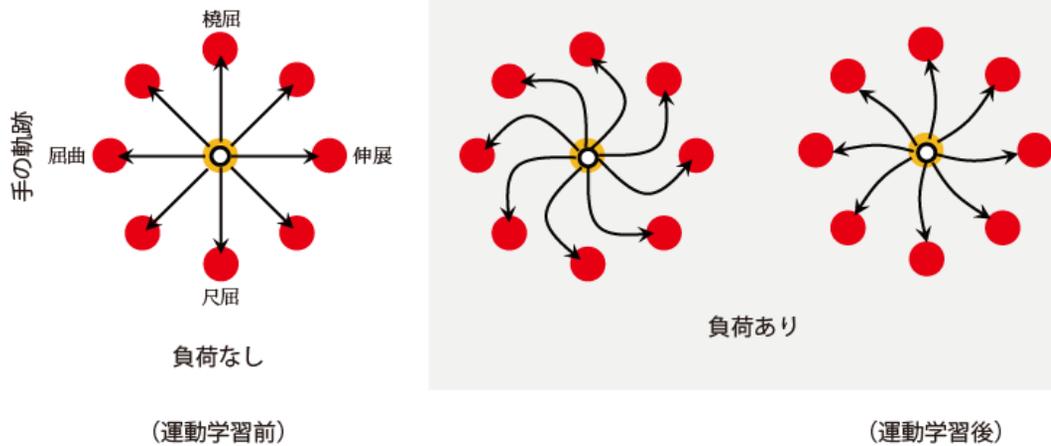


図2. 実験1のパフォーマンス (模式図)

8方向のいずれかに標的が表示されるので、開始点から標的に向かってカーソルを動かす。負荷がない環境では標的に向かってまっすぐにカーソルを動かすことができる(左)。動作方向に対して右方向の負荷が加わると、手の軌跡は力の方向に曲げられるが(中)、試行数を重ねて運動学習が進むと徐々に手はまっすぐに軌跡になっていく(右)。

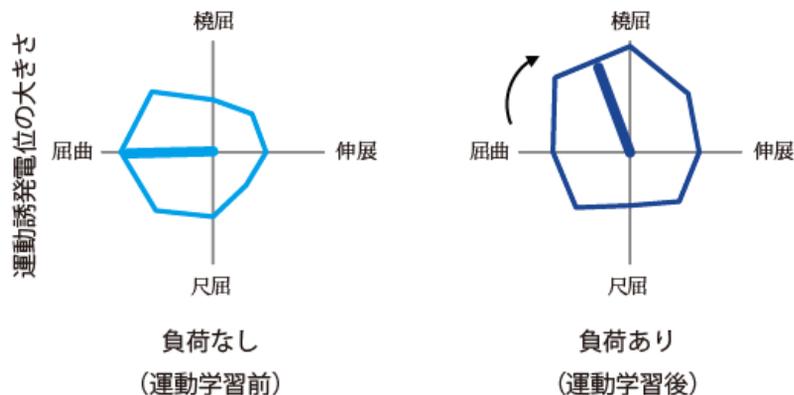


図3. 学習にともなう脳活動の変化

8方向のいずれかに向かって動作を開始する前に磁気刺激をあたえたときの反応(運動誘発電位)を手首の筋(橈側手根屈筋)から記録した。負荷がない環境では屈曲動作を行うときに最も反応が大きい。右方向の負荷のある環境での動作を学習すると、その反応も全体的に橈屈側へと右回りに回転する。太い線は全体の方向性(合成ベクトル)をあらわしている。

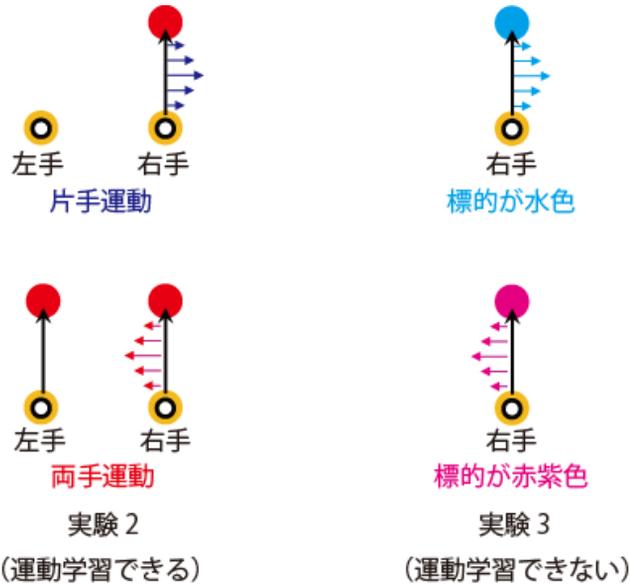


図4. 実験2 (左)、実験3 (右) の設定 (模式図)

右方向と左方向の負荷が交互に与えられる。実験2 (左) では片手運動のときは右方向の、両手運動のときは左方向の負荷が与えられた。実験3 (右) では標的が水色のときに右方向の、赤紫色のときは左方向の負荷が与えられた。実験2の条件では、負荷のある環境を学習することができるが、実験3の条件では学習することができない。

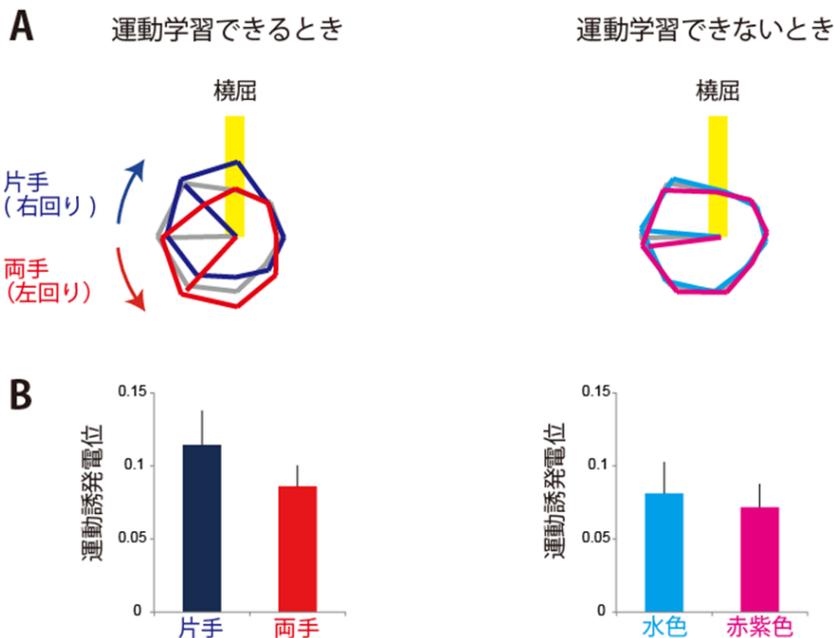


図5. 複数の運動の学習にともなう変化

(A) 実験1の結果より、右方向の負荷を学習すると、脳活動の反応も右回りに回転する。同様に、左方向の負荷を学習すると、脳活動も左回りに回転すると考えられる。片手運動と両手運動の組み合わせにより、二つの負荷を学習すると脳活動もそれぞれ学習前 (灰色) から右回り (青)、左回り (赤) に回転すると考えられる (左)。黄色で示した上 (橈屈) 方向に着目すると、片手 (右回り) のときに反応が大きくなると考えられる。一方、運動学習ができない組み合わせである標的の色と負荷を対応づけた場合 (水色のときに右方向、赤紫色のときに左方向) では、違いが見られないと考えられる (右)。

(B) 予想通り、運動学習ができる条件では片手のときに反応が大きくなった (左) が、運動学習できない条件では違いが見られなかった (右) (本研究のデータより作成)。