

# フィードバックに対する予期が運動関連の脳活動に与える影響の評価

○ 篠原 凜<sup>\*1</sup> 温文<sup>\*1</sup> 濱崎 峻資<sup>\*1</sup> 前田 貴記<sup>\*2</sup> Qi An<sup>\*1</sup> 田村 雄介<sup>\*1</sup>  
山川 博司<sup>\*1</sup> 渋谷 賢<sup>\*3</sup> 大木 紫<sup>\*3</sup> 山下 淳<sup>\*1</sup> 浅間 一<sup>\*1</sup>  
(<sup>\*1</sup> 東京大学, <sup>\*2</sup> 慶應義塾大学, <sup>\*3</sup> 杏林大学)

**概要** 運動麻痺患者に対する効果的なリハビリ手法を構築するために、運動に関わる神経基盤を明らかにすることが重要である。本研究では、リハビリにおいて重要とされる運動主体感という感覚に着目し、その感覚を構成する要素の1つである“フィードバックに対する予期”が運動関連の脳活動に与える影響を調べることを目的とした。聴覚刺激のタイミングを操作することによりフィードバックに対する予期が異なる課題条件からなる実験を設計し、それぞれの条件に取り組む間の EEG を記録した。実験で得られた脳波信号から運動準備電位を算出し、比較検証を行った。現時点ではサンプル数の不足により統計的に有意な差は見られなかった。予期が同一な条件においては運動とそれに対するフィードバックの間の関係が学習され、その結果が立ち上がりの遅れとして反映されると考えられ、被験者の拡充による追加実験が求められる。

**キーワード:** 運動, 予期, EEG, 運動準備電位

## 1 序論

近年、超高齢化社会を迎えた日本では加齢による運動機能障害や脳卒中による運動麻痺の患者が増加している。この問題を解決するためには、効果的なリハビリシステムを構築する必要がある。そしてそのために、ヒトの運動に関わる神経基盤を明らかにすることが重要である。ヒトの運動の神経基盤に関する研究は EEG の計測を用いて過去に多くなされており、運動に関連する EEG の指標として、運動準備電位がよく知られている<sup>1)</sup>。運動準備電位とは能動的な運動の1秒から2秒前から観測される電位のことをいう。運動準備電位は運動の際の力や、運動を起こそうとする意図が強いほど大きな電位が得られることが分かっている<sup>2)</sup>。さらに、運動前の準備状態が運動準備電位の立ち上がりのタイミングに影響を与えることが知られている<sup>3, 4)</sup>。これらの研究から、ヒトが随意運動を始める前から脳活動が開始されること、及びその活動が EEG の信号として計測できること、さらには得られた信号が運動に対する意図の強さや運動前の準備状態等の側面を反映する指標であることが明らかになっている。

ヒトの運動に関する重要な概念として、運動主体感 (Sense of Agency) という運動の認知についての感覚がある。この感覚は Gallagher により提唱されたものであり<sup>5)</sup>、ヒトが行った運動に付随して何らかのフィードバック (身体運動, 身体以外の外界の変化) が返ってきたとき、「そのフィードバックは自分の運動により引き起こされた」という感覚のことをいう。ヒトは運動主体感を得やすい運動を好む傾向があることが報告されている<sup>6)</sup>。運動主体感は、運動麻痺患者のリハビリにおける重要な感覚として近年注目されてきており<sup>7)</sup>、脳卒中等の患者のリハビリにおいては、単に筋力の回復のみならず患者自身の思い通りに身体を動かせるようになることが重要だと考えられる。以上のことから、リハビリにおいて重要な概念である運動主体感と、運動に関連する脳活動との関係を明らかにすることは重要で、患者のリハビリの進行状態を把握する上で有用な知見を得られることが期待されるが、両者の関係については明らかにされていない。運動主体感

は、運動前に持つ運動に付随するフィードバックに対する予期と、実際のフィードバックとの比較により生じると言われており<sup>8)</sup>、本研究では異なるフィードバックが与えられることにより生じる、フィードバックに対する予期の違いに着目する。

## 2 研究目的

運動に関連する脳活動についてこれまで数多くの研究がなされてきているが、フィードバックに対する予期がどのような影響を与えるかについては、まだ明らかにされていない。そこで本研究の目的を、フィードバックに対する予期が運動関連の脳活動に与える影響の検証とする。本研究では、運動準備電位が予期の違いにより影響を受け、条件内で被験者の運動と与えられるフィードバックの間の時間的な順序関係が同一でない場合の方が、同一な場合に比べて運動準備電位が早く立ち上がるという仮説を立てた。この仮説の根拠としては高澤の研究がある<sup>4)</sup>。この先行研究では運動の強さを被験者が練習を通して学習する実験課題が組まれ、運動の学習に伴い運動準備電位の立ち上がり開始地点が遅くなることが報告されている。この研究から運動そのものについての慣れ、学習が運動準備電位の立ち上がりに影響を与えることが明らかになっている。「自分の運動によりフィードバックを起こせるか」という運動前の心理的な要因についても、与えられるフィードバックに対する慣れや学習が生じやすい場合においては運動準備電位に同様の影響が観測されると考えられ、予期と運動準備電位に関して以上の仮説を得た。本研究では、以上に述べた仮説の検証を行う。

## 3 手法

### 3.1 手法設計

前章に述べた仮説を検証するための手法を設計する。仮説を検証するためには、被験者が行う運動に対してフィードバックが返ってくる実験系において、被験者が持つフィードバックに対する予期が異なる実験系を作る必要がある。このような実験系を実現するために、本研究では運動へのフィードバックのタイミングを操作した。この操作により、「自分が行う運動がフィードバックを起こせるか」についての予期が異なる条件か

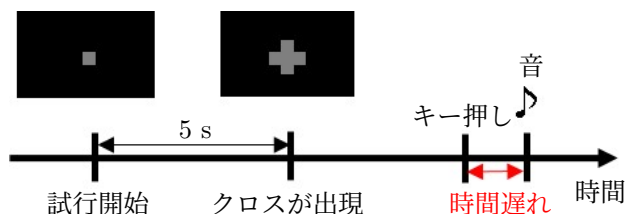


Fig. 1: 試行 1 回の模式図

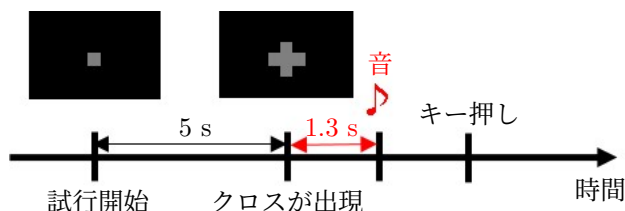


Fig. 2: 音が先に鳴る試行の模式図

らなる課題を設計した。設計された課題に取り組んでいる間の被験者の脳活動を記録して運動準備電位を算出し、比較検証を行った。以降の節で本研究で設計した課題と、用いた評価手法について述べる。

### 3.2 課題

被験者は脳波計、およびイヤホンを装着した状態でディスプレイ上のウィンドウを注視しながら課題を行う。Fig. 1 は 1 つの試行についての流れを模式的に示したものである。Fig. 1 に示すように、試行が始まるとまず黒色のウィンドウが表示され、画面中央には灰色の注視点が表示され、被験者にはその点を見つめるように教示する。試行が始まって 5 秒経過すると、中央の点 crosses のマークに変わる。被験者は、眼球が動かないように注意しながら十字のマークに変わった後数呼吸置いた 5 秒以内程度の任意のタイミングでキーボードのスペースキーを押す。被験者のキー押し操作に伴いフィードバックとして周波数 400 Hz のビープ音を 200 ms 提示したが、被験者にはこのビープ音が被験者もしくは隣に座っている実験者のいずれかの操作により鳴ると教示した。このビープ音のタイミングに関して、下記の 2 つの条件を用意した。

#### 3.2.1 同一条件

被験者がキーを押すと、100 ms, 300 ms, 600 ms のいずれかの時間遅れの後にビープ音が鳴り、その時間遅れの長さは試行ごとに異なる。この条件内では、全ての試行で被験者のキー操作の後にフィードバックが与えられる。

#### 3.2.2 非同一条件

試行内で被験者が行うこと、及び被験者に対する教示は同一条件と同様であるが、非同一条件においては被験者のキー操作の前にビープ音が鳴る試行を用意し (Fig. 2 を参照)、同一条件の試行群に混ぜた。先に鳴る試行においてはビープ音はクロスが出現した 1.3 秒後に提示された。この条件内では音が先に鳴る場合があり、フィードバックに対する予期が非同一になると考えられる。運動に対するフィードバックのタイミングについて、条件間で以上のような操作を行うことで、予期の異なる 2 つの条件を設計した。

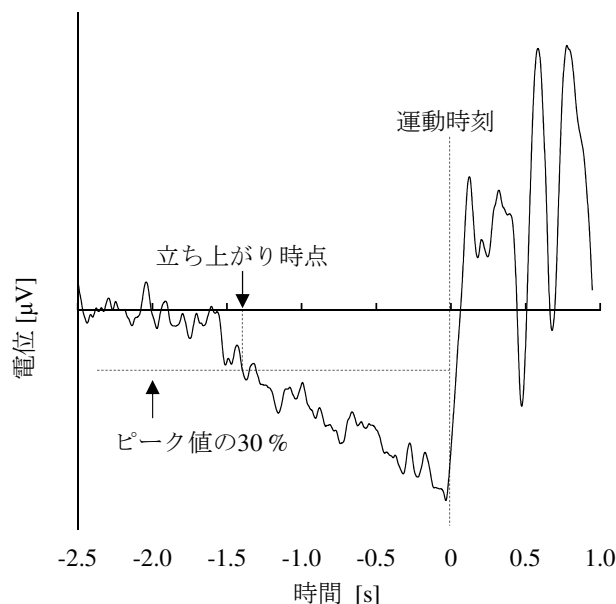


Fig. 3: 運動準備電位の概念図

#### 3.2.3 試行回数

両条件において、フィードバックに時間遅れが生じる試行の試行回数は 40 回ずつとした。非同一条件については、同一条件と同じ時間遅れの試行群に音がキー操作より先に鳴る試行を加え、先に鳴る試行が試行全体の 3 分の 1 になるようにした。つまり被験者は同一条件では計 120 回の試行、非同一条件ではそれに 60 回音が先に鳴る試行を加えた 180 回の試行に取り組み、実験全体を通して計 300 回の試行に取り組んだ。なお、最初の条件を開始する前に、10 回の試行練習を行った。

### 3.3 運動準備電位の評価

本節では、仮説を検証するための評価手法について述べる。運動準備電位とは、能動的な運動に先立って観測される EEG の指標である。一般に運動準備電位は、同じ条件下で複数回運動を行い、その際に得られる信号を加算平均し背景ノイズを排除することにより算出され、負方向に立ち上がる電位として観測される。Fig. 3 に、運動準備電位の概念図を示す。

2 条件間の運動準備電位の立ち上がり時点の評価については、閾値による検出方法を用い<sup>10)</sup>、立ち上がりの閾値を電位の負のピーク値の 30% に達した時点として評価を行った。Fig. 3 に示すように、立ち上がり時点の閾値は負の値として算出される。また立ち上がり時点を統計的に比較する際には、Miller らにより提案されたジャックナイフ法を用いた<sup>11)</sup>。この手法では立ち上がり時点に関する統計量を、被験者  $n$  人のうち 1 名を除いた  $n-1$  人分の加算平均波形を平均したものを各被験者を 1 度ずつ除いて  $n$  個作成し、そのデータをもとに計算する。この手法を用いることで、個々の被験者から得られた加算平均波形に残っている背景ノイズの影響を小さくすることができる。

## 4 実験

### 4.1 実験参加者

被験者 7 名 (平均年齢  $25.1 \pm 9.9$  歳) について、前章に示した 2 つの条件からなる課題を静かな部屋の中で

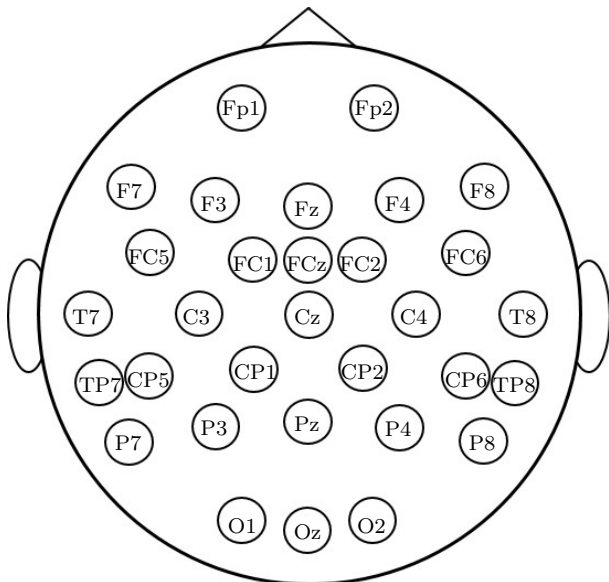


Fig. 4: EEG 計測箇所

行った。

#### 4.2 実験手順

本実験は東京大学大学院工学系研究科倫理委員会の承認を受けて実施された。両条件は連続して行い、各条件の試行群に取り組む際には取り組んでいる条件の試行が半分終わった段階で1分間の休憩を設け、条件間には5分間の休憩を設けた。両条件において、各試行の音が鳴るタイミングはランダムに設定し、取り組む条件の順番は被験者間でカウンターバランスを取った。

#### 4.3 脳波の計測及び解析

脳波の計測は、eemagine社製の脳波計 eegosports を用いて行った。計測部位については拡張 10-20 法に基づき、Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FC5, FC6, FC1, FCz, FC2, T7, C3, Cz, C4, T8, TP7, CP5, CP1, CP2, CP6, TP8, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, O2 の 31 点を計測した (Fig. 4 を参照)。Fig. 4 は頭部を上から見た図で、図の上部の突起が鼻、左右の突起が耳を示しており、Cz が頭頂に位置する。加えて、1つのチャンネルと電極を利用して右目の眼球運動、瞬目により生じる電位 (EOG) を計測した。記録時のリファレンスとしては FCz を用いた。全ての電極についてサンプリング周波数は 1024 Hz とした。得られた EEG について解析の前処理として、リファレンスを左右の乳様突起に変更し、0.1 Hz-30 Hz のバンドパスフィルタをかけた。

運動準備電位の算出には Cz 電極で得られた信号を使用した。計測した Cz 以外の他チャンネルの信号は、ノイズによる影響を除外、補正するために使用された。以下に具体的な算出処理を示す。各条件のキー押しの後に音が鳴る全ての試行中 (それぞれ 120 試行) の、被験者がキーを操作した瞬間の 2.5 秒前から 1.0 秒後の信号を用いた。それぞれの試行から得られた信号について、初めの 200 ms の信号の平均振幅が  $0 \mu\text{V}$  になるように基線調整を行った。基線調整を行った段階でいずれかの電極での計測信号が試行中に  $-100 \mu\text{V}$  を下回る、もしくは  $100 \mu\text{V}$  を上回る活動を記録しており、かつそれが瞬目による影響を受けたものでないと判断され

る場合はアーチファクトとし、これが含まれる試行は除外した。瞬目を受けたかどうかの判断については、計測した EOG の信号をもとに行った。瞬目によるアーチファクトについては、独立主成分分析 (ICA) を用いて除去した<sup>12)</sup>。以上の解析処理は EEGLAB を用いて行われた<sup>13)</sup>。

### 5 実験結果・考察

被験者 7 名についての加算平均結果を Fig. 5 に示す。運動準備電位の立ち上がり時刻の平均値はそれぞれ同一条件ではキー押し時刻の 1,495 ms 前、非同一条件で 1,701 ms 前であった。運動準備電位の立ち上がり時刻について  $t$  検定を用いて統計解析を行ったが、2 条件の間に有意な差は見られなかった ( $t(6) = 0.602, p > .05, 1-\beta = 0.071$ )。

本研究ではフィードバックに対する予期が運動準備電位に与える影響を検証するために、フィードバックに対する予期が異なるタスク課題を設計し、課題実行中の EEG を計測した。サンプル数の不足により検定力が小さく、統計的に有意な差は見られなかったが、Fig. 5、及び立ち上がり時点の平均から、予期が非同一な条件の方が予期が同一条件より運動準備電位が早く立ち上がることが示唆された。

以上の結果から、運動準備電位がフィードバックに対する予期を反映していることが示唆された。予期が同一な条件では被験者が運動を行った後に必ずフィードバックが返ってきたため、運動とフィードバックの関係が条件内で同一なものとして学習されたと考えられる。今回の結果で見られた立ち上がり時点の遅れは、この学習を反映したものと考えられるが、本研究の仮説を検証するために、より多くのサンプル数が必要である。

本研究の仮説が支持されれば、運動主体感を構成する要素と、運動準備電位との関係が明らかになる。運動主体感の生起と関連がある他の EEG の指標としては事象関連電位が知られている。これはフィードバックの知覚に伴って現れる指標であり、運動後のフィードバックについて実際に運動主体感を感じたかどうかと関連がある指標とされている<sup>14)</sup>。運動主体感が運動前のフィードバックに対する予期と運動後のフィードバックとの比較により生じることは第 1 章に述べた。本研究によって明らかになる予期に関連する脳活動の知見と、先行研究により明らかにされているフィードバックに関連する脳活動の知見を組み合わせることで、患者の状態をより正確に把握でき、効率的なりハビリシステムの構築に貢献できると考えられる。

運動主体感を構成する要素であるフィードバックに対する予期と、運動に関連する脳活動を明らかにする研究は本研究が初めてであり、運動の神経基盤の新たな側面の解明、及び運動に障害を抱える患者の効率的なりハビリシステムの構築の一助となることが期待される。今後さらに被験者を拡充し、傾向を観察する必要がある。

### 6 結論

本研究では、フィードバックに対する予期が運動準備電位に与える影響を検証した。現段階ではサンプル数が少ないために検定力が小さく統計的に有意な差は見られなかったが、本研究が運動の神経基盤の解明、そ

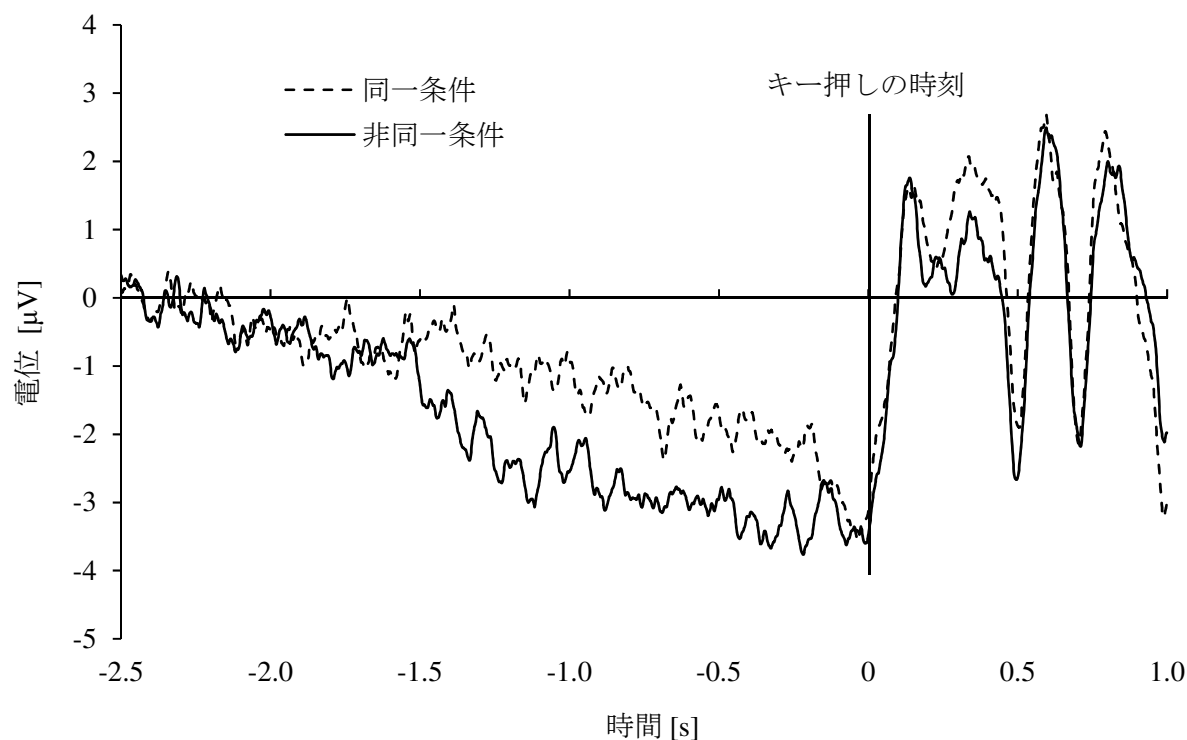


Fig. 5: 被験者 7 名分の加算平均波形の平均結果

して効率的なりハビリシステム構築の一助となることが期待され、今後さらに結果の検定力を上げるため被験者拡充による追加実験が求められる。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費新学術領域研究「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」(課題番号 26120005) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) H. H. Kornhuber and L. Deecke: Hirnpotentialänderungen beim Menschen vor und nach Willkurbewegungen, dargestellt mit Magnetband-Speicherung und Rückwärtsanalyse, Pflügers Arch, Vol. 281, p. 52, (1964)
- 2) S. Slobounov, M. Hallet and K. M. Newell: Perceived Effort in Force Production as Reflected in Motor-related Cortical Potentials, Clinical Neurophysiology, Vol. 115, pp. 2391-2402, (2004)
- 3) H. Shibasaki and M. Hallet: What is Bereitschaftspotential?, Clinical Neurophysiology, Vol. 117, pp. 2341-2356, (2006)
- 4) 高澤則美: 準備電位に及ぼす構えの効果, Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology, Vol. 7, No. 1, pp. 1-10, (1989)
- 5) S. Gallagher: Philosophical Conceptions of the Self: Implications for Cognitive Science, Trends in Cognitive Sciences, Vol. 4, pp. 14-21, (2000)
- 6) N. Karsh and B. Eitam: I Control therefore I Do: Judgments of Agency Influence Action Selection, Cognition, Vol. 138, pp. 122-131, (2010)
- 7) N. Takeuchi, S. Izumi, J. Ota, J. Ueda: Neural Plasticity on Body Representations: Advancing Translational Rehabilitation, Neural Plasticity, Vol. 2016, Article ID 9737569, (2016)
- 8) P. Haggard and B. Eitam: The Sense of Agency, Oxford University Press, (2015)
- 9) P. Alexander, A. Schlegel, W. Sinnott-Armstrong, A. L. Roskies, T. Wheatley and P. U. Tse: Readiness Potentials driven by Non-motoric processes, Consciousness and Cognition, Vol. 39, pp. 38-47, (2016)
- 10) J. T. Mordkoff and P. J. Gianaros: Detecting the Onset of the Lateralized Readiness Potential: A Comparison of Available Methods and Procedures, Psychophysiology, Vol. 37, pp. 347-360, (2000)
- 11) J. Miller, T. Patterson and R. Ulrich: Jackknife-based Method for Measuring LRP Onset Latency Differences, Psychophysiology, Vol. 35, pp. 99-115, (1998)
- 12) T. P. Jung, S. Makeig, C. Humphries, T. W. Lee, M. J. Mckeown, V. Iragui and T. Sejnowski: Removing Electroencephalographic Artifacts by Blind Source Separation, Psychophysiology, Vol. 37, pp. 163-178, (2000)
- 13) A. Delorme and S. Makeig: EEGLAB: an Open Source Toolbox for Analysis of Single-trial EEG Dynamics including Independent Component Analysis, Journal of Neuroscience Methods, Vol. 134, No. 1, pp. 9-21, (2004)
- 14) S. Kühn, I. Nenchev, P. Haggard, M. Brass, J. Gallinat and M. Voss: Whodunnit? Electrophysiological Correlates of Agency Judgements, PLoS ONE, Vol. 6, Issue 12, e28657, (2011)