

歩行中の脳活動から筋活動制御情報を解読  
～脳は一個一個の筋ではなく「筋シナジー」の制御に関与する～

1. 発表者

横山 光 (東京大学 大学院総合文化研究科広域科学専攻 博士課程(研究当時)/東京農工大学  
日本学術振興会特別研究員 PD(現在) )

金子 直嗣 (東京大学 大学院総合文化研究科広域科学専攻 博士課程1年生)

小川 哲也 (東京大学 大学院総合文化研究科広域科学専攻 助教)

河島 則天 (国立障害者リハビリテーションセンター研究所 運動機能系障害研究部 神経筋機能  
障害研究室 室長)

渡邊 克己 (早稲田大学 大学院基幹理工学研究科表現工学専攻 教授)

中澤 公孝 (東京大学 大学院総合文化研究科広域科学専攻 教授)

2. 発表のポイント

- ◆ヒトの歩行中の脳活動から、筋活動制御情報を解読することに成功しました。
- ◆ヒトの脳活動は一個一個の筋の活動より、複数筋の同時収縮「筋シナジー」との関連が強いことを示しました。
- ◆この成果は脊髄損傷患者など、脳信号を筋にうまく伝達することのできない患者の歩行動作をサポートするブレイン・マシン・インターフェース(注1)の開発につながる可能性があると考えられます。

3. 発表概要

我々が歩行するときには、個々の筋が独立に活動するのではなく、複数の筋の協調した活動「筋シナジー」(注2)という複数の筋の同時活動が見られることが報告されています。また、歩行は一度始めると特に動作に意識をせずとも行えるため、脳は歩行の制御にあまり関与しないと考えられてきましたが、近年、歩行中の脳波(注3)計測が可能となり、歩行に関連した脳活動の存在が徐々に示されてきました。しかしながら、その歩行時にみられる脳活動と筋制御の関係性はこれまで明らかにされてきませんでした。

今回、東京大学大学院総合文化研究科の中澤公孝教授および東京農工大学の横山光研究員(元東京大学博士課程学生)らの研究グループは、脳情報デコーディング技術(注4)を用いることにより、歩行時に計測した脳活動から筋活動パターンを予測することに成功しました。また、個々の筋の独立した活動と、筋シナジー活動をそれぞれ脳活動から予測した結果、筋シナジー活動の方が予測精度が高い、すなわち脳活動と関連性が高いことが示されました。さらに驚くべきことに、個々の筋活動の予測は、筋シナジーに関連した脳情報の組み合わせにより説明できることが示されました。本研究成果は、ヒトの歩行中に計測した脳活動と筋シナジー活動間における強固な関連性を世界で初めて示したものです。

従来、私たちは意識せずとも歩けるため歩行の制御に脳は重要でないと考えられてきましたが、本研究成果はヒトの歩行制御において脳が不可欠な役割を担うことを強く示唆するものです。加えて、脊髄損傷患者など脳信号を筋にうまく伝達することのできない患者を対象とした、脳活動から歩行制御信号を汲み取りロボットにより身体をサポートする、ブレイン・マシン・インターフェース

構築のための重要な基礎知見となるなど、リハビリテーション分野への応用が期待されます。

この本研究は、JST戦略的創造研究推進事業チーム型研究(CREST)の研究課題名「潜在アンビエント・サーフェス情報の解読と活用による知的情報処理システムの構築」(研究代表者:渡邊克己)の一環として行われ、学際的分野の重要な論文の掲載を目的とする米国の学術誌「*iScience*」(Cell Press)に掲載されました。

#### 4. 発表内容

##### <研究の背景>

二足直立歩行はヒト特有の動作で我々の日常生活に不可欠な基本動作です。一見単純に見える歩行動作ですが、一方の脚には50以上の筋肉が存在し、歩行を遂行するためには多くの筋を巧みに制御する必要があります。ヒトは膨大な数の筋を制御するという複雑な運動課題を、筋シナジーとよばれる複数筋の同時収縮により簡略化することで、特に意識せずにスムーズに歩行動作を遂行することを可能にしていると考えられています。

また、従来、私たちが歩くときは特に歩行動作に意識せずとも行えること、動物研究における脳を切除した四足動物でも歩行が行える知見などに基づき、歩行動作の制御に脳はあまり関わらないと考えられてきました。しかしながら、近年、脳に障害を負った患者に見られる歩行障害、脳が未成熟な子供に見られる不安定な歩行動作などの間接的な証拠から、ヒトの二足直立歩行には脳活動が関与することが示唆されてきています。実際に、ここ数年の脳波の測定・解析技術の著しい向上により歩行時の脳波測定が可能となり、歩行時に活動する脳部位の特定が進んできました。しかしながら、歩行時に特定された脳活動がどのように筋制御に関わるか、特に「歩行時の脳活動が筋シナジー制御に関わるのかどうか」ということはわかっていませんでした。

##### <研究の内容>

本研究では、歩行制御に関する脳活動と筋シナジー活動(また単一筋の活動)との関係性を調べるために、脳活動に潜む運動情報を解読する技術として利用されている機械学習による脳情報デコーディングを用いました。

被験者にはトレッドミルの上を歩行してもらい、その時の脳波と脚の筋の筋電図(注5)を計測しました。筋電図から、単一筋の活動と筋シナジーの活動を評価しました。そして、脳波パターンから筋シナジー活動パターン(もしくは単一筋活動パターン)を推測する脳情報デコーダーを機械学習手法により作成しました(図1)。もし、脳波情報に筋シナジー制御情報が含まれているなら、ブレインデコーダーに脳波情報を入力すると高精度に筋シナジー活動を推測可能であると想定されます。結果として、脳波情報から筋シナジー活動と単一筋活動の両方を予測することができました(図2)。この際の筋シナジーの平均予測精度と筋活動の平均予測精度を比較すると、筋シナジーの方が予測精度が高いことがわかりました(図3)。このことは、脳活動は単一筋活動に比べ筋シナジー活動との関連性が高いことを意味しています。さらに、脳情報デコーダーがどのような情報に基づいて筋シナジーまたは単一筋の活動を予測するか、すなわち筋シナジー活動と単一筋活動の脳内表象を詳しく調べてみると、単一筋活動の脳内表象は筋シナジーの脳内表象の組み合わせで説明できることを発見しました(図4)。この結果は、ヒトの脚には多くの筋が存在しますが、筋一個一個を個別に制御するのではなく、筋シナジーという協働筋活動のレベルで脳が筋制御に関わることを強く示唆しています。

##### <本研究成果の意義>

従来、大脳皮質を取り除かれた四足動物でも歩行動作を行うことができること、私たちヒトは意

識せずとも歩けることなどから、歩行の制御に脳はあまり重要でないと考えられてきましたが、本研究の結果はヒトの歩行制御において脳が不可欠な役割を担うことを強く示唆するものです。本研究結果が示した歩行時における脳活動の個々の筋ではなく筋シナジーという複数筋の同時収縮活動への強い関与は、歩行という最も基本的で不可欠な動作を効率よく制御するための神経制御システムを反映していると想定されます。この新たに示された脳と筋シナジーの間の強い関連性は、未だ多くのことが未解明であるヒト二足歩行における脳による歩行制御機序を紐解くための重要な基礎知見といえます。

このような神経科学的意義に加えて、脳波から筋シナジー制御情報を予測する技術は、脊髄損傷患者など自分の思った通りに体を動かせない患者に対して脳活動から歩行制御情報を汲み取りロボットにより身体をサポートする、ブレイン・マシン・インターフェイス構築のための重要な基礎知見となるなど、リハビリテーション分野への応用が期待されます。

## 5. 発表雑誌

雑誌名： *iScience* (Cell Pressの出版する学際的科学雑誌)

論文タイトル： Cortical correlates of locomotor muscle synergy activation in humans: an electroencephalographic decoding study

著者： Hikaru Yokoyama, Naotsugu Kaneko, Tesuya Ogawa, Noritaka Kawashima, Katsumi Watanabe, Kimitaka Nakazawa.

DOI番号： 10.1016/j.isci.2019.04.008

アブストラクトURL：

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004219301051>

## 6. 問い合わせ先

東京大学大学院総合文化研究科

教授 中澤 公孝 (なかざわ きみたか)

中澤公孝研究室ウェブサイト: <http://www.neuro-reha-sport-lab.com>

東京農工大学大学院工学研究院

日本学術振興会特別研究員 横山 光 (よこやま ひかる)

## 7. 用語解説

### 注1 ブレイン・マシン・インターフェイス

脳波などヒトの脳から生成される信号を使用して、ロボットのような機械の動作を制御すること。運動障害を持つ患者の意図を脳情報デコーディング技術で汲み取って、機械により動作をサポートする取り組みが行われている。

### 注2 筋シナジー

多数の筋が決まった組み合わせで協調して活動する。

### 注3 脳波

脳の活動に伴う電気信号。頭皮上の電極からでも無侵襲に計測でき、計測機器の小型化が進んでおり動作中でも計測することができる。

#### 注4 脳情報デコーディング

主に画像や映像などから感じた内容を脳活動から解読する技術として開発された。本研究では脳活動に潜む運動制御情報の解読を行なった。

#### 注5 筋電図

皮膚表面に貼り付けた電極によって、筋肉の収縮度合いに応じて変化する微弱な電位を計測する手法のこと。筋肉の収縮活動を電気信号として計測することができる。

8. 添付資料

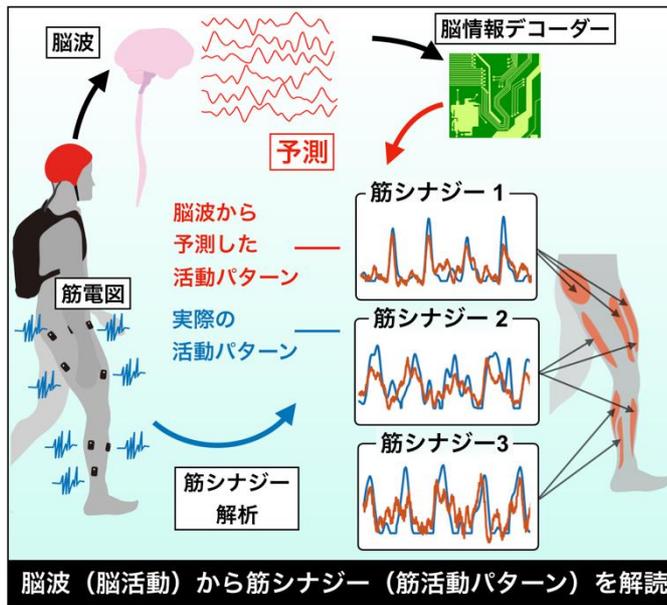


図1 実験概要

歩行時の脳波から筋シナジー活動パターンを解読。歩行中の被験者から脳波と筋電図を計測し、脳活動に潜む筋シナジー活動パターン情報を脳情報デコーダーにより解読した。

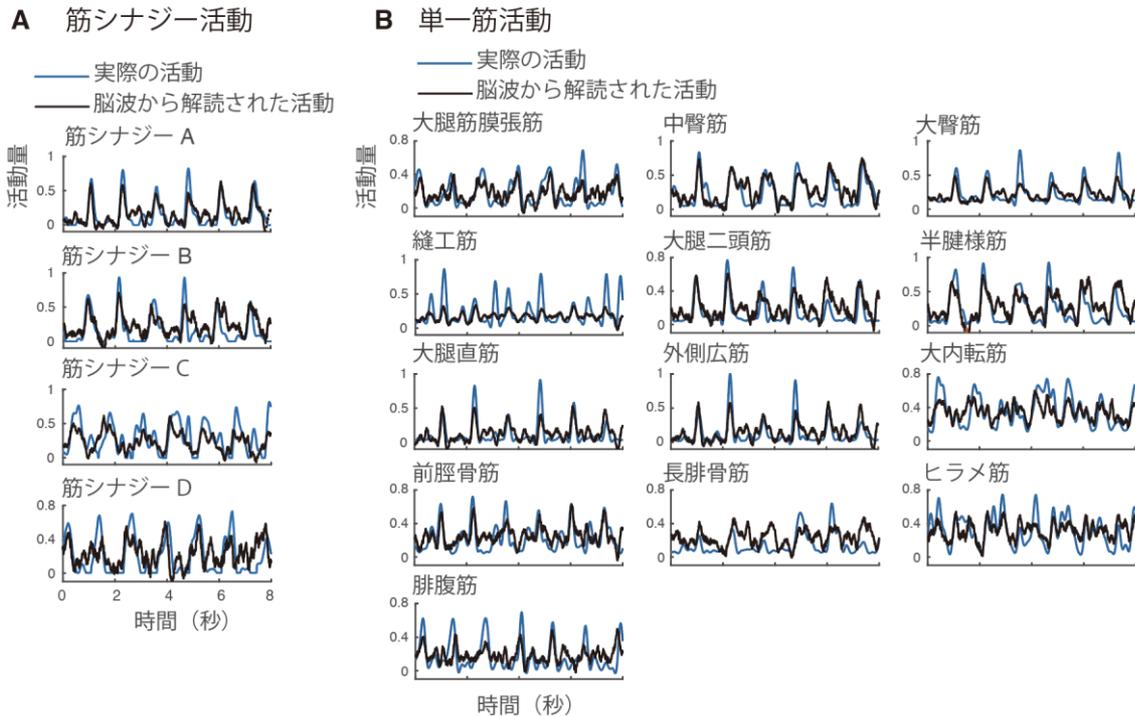


図2 脳波から筋活動情報を解読した結果の典型例（ある被験者1名）

(A) 筋シナジー活動のデコーディング結果。(B) 単一筋活動のデコーディング結果。青線（白黒印刷の場合は灰色）は実際の筋シナジー（または単一筋）活動、黒線は脳波から解読された筋シナジー（または単一筋）活動を示している。

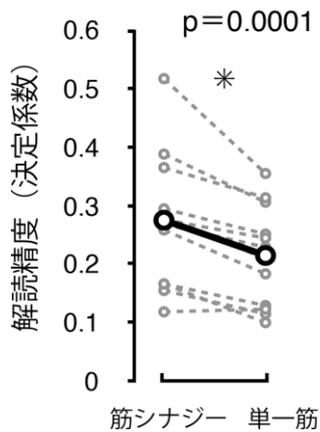
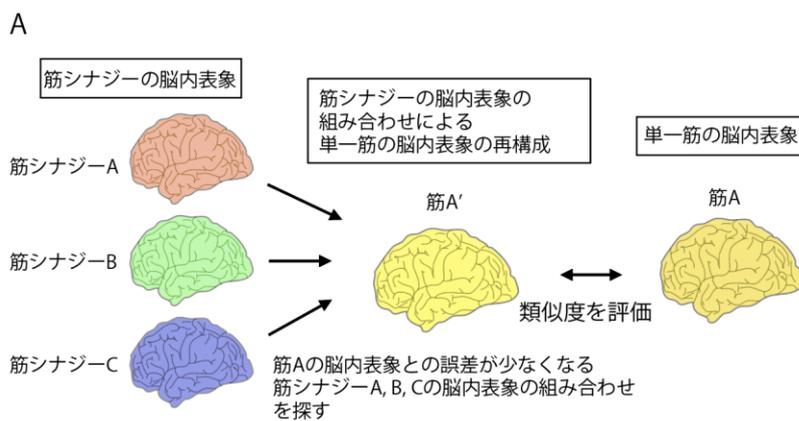


図3 筋シナジー活動と単一筋活動の平均解読精度の比較

グレーの各プロットは各被験者の値、黒のプロットは被験者間平均値を示している。



B 再構成された単一筋の脳内表象と元の単一筋の脳内表象の類似度

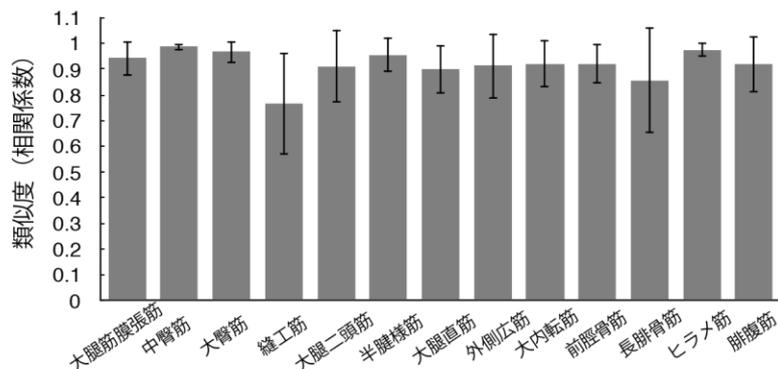


図4 単一筋の脳内表象の筋シナジーの脳内表象の組み合わせによる再構成

(A) 解析の概念図。(B) 各単一筋における筋シナジーの脳内表象から再構成された脳内表象と実際の脳内表象との類似度。1に近いほど筋シナジーの脳内表象から再構成された単一筋の脳内表象は実際の単一筋の脳内表象と似ていることを意味する。