

[研究助成 (C)]

歩行動作の観察とイメージの併用における脳活動の解明と BMI 応用に向けたモデル構築

Elucidation of brain activity during action observation combined with motor imagery of walking
and construction of a model for BMI application

2197003



研究代表者	東京大学大学院 総合文化研究科	博士後期課程	金子直嗣
共同研究者	東京大学大学院 総合文化研究科	教授	中澤公孝
	東京大学大学院 総合文化研究科	助教	横山光

[研究の目的]

本研究の目的は、歩行動作を客観的に観察する歩行観察と、脳内で歩行を再現する歩行イメージを併用した際の脳活動を解明すること、ブレイン・マシン・インターフェースへの応用を目指したモデルを構築することである。

[研究の内容]

本研究では、歩行観察と歩行イメージを併用した際（観察＋イメージ）における脳活動を明らかにするために、64 ch の脳波計を用いて脳波測定を行った（図1）。健常成人12名がこの実験に参加した。被検者は座位姿勢で、以下3つの条件を実施した（図1）：歩行動作を客観的に観察しつつ、自身が歩いているイメージをするように指示された（観察イメージ条件）、歩行イメージを行わずに歩行動作を客観的に観察する条件（観察条件）、観察もイメージもせずに開眼で安静にしている条件（安静条件）。観察イメージ条件、観察条件はそれぞれ1分間を6セット実施して、合計6分間の各条件における脳波データを記録した。安静条件は2分間を1回実施した。

得られた脳波データから、どの脳部位でどの

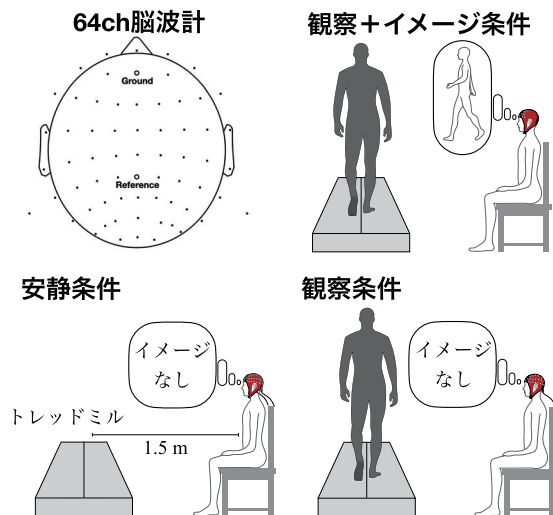


図1 脳波計と3つの実験条件

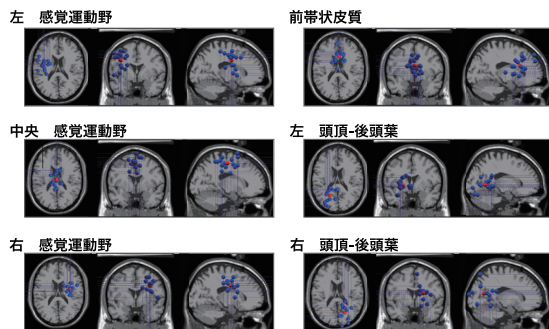
ような活動の変調が起きているかを明らかにしようと試みた。解析はプログラミングソフトウェア MATLAB と EEGLAB を用いて行った。まず、フィルター処理を行った後、観察していた歩行の一周期ごとに脳波データを分割した。次に独立成分分析を行った。独立成分分析は、一つの脳波計電極から得られる信号は複数の脳領域から出る信号の総和、という仮定のもと脳波信号を独立成分に分析して、瞬き、眼球運動、筋電位、脳活動を示す独立成分を抽出できる。次に、ダイポール推定により導電率を考慮した皮膚、頭蓋骨、脳の3層頭部モデルから信号源

を推定した。これらの解析により、アーチファクト成分を除去して、どの脳部位でどのような活動が起きているか推察できる。

脳活動の解析として、パワースペクトル密度 (Power spectral density: PSD) と事象関連スペクトラム摂動 (Event-related spectral perturbation: ERSP) を算出した。高速フーリエ変換により θ , α , β , γ の周波数帯の PSD を算出する。この解析により、それぞれの条件で引き起こされた周波数成分の変調を調べた。ERSP は、観察している歩行位相に合わせた変調を調べるための時間周波数成分の解析である。各周波数の平均をベースラインとして、歩行位相の時間成分を合わせた周波数パワーの増減を算出する。これにより観察+イメージ条件、観察条件における歩行位相に合わせた脳活動を可視化できる。PSD, ERSP, ダイポール推定の結果をもとにクラスタリングを行い、脳部位における活動を平均して条件間で比較した。

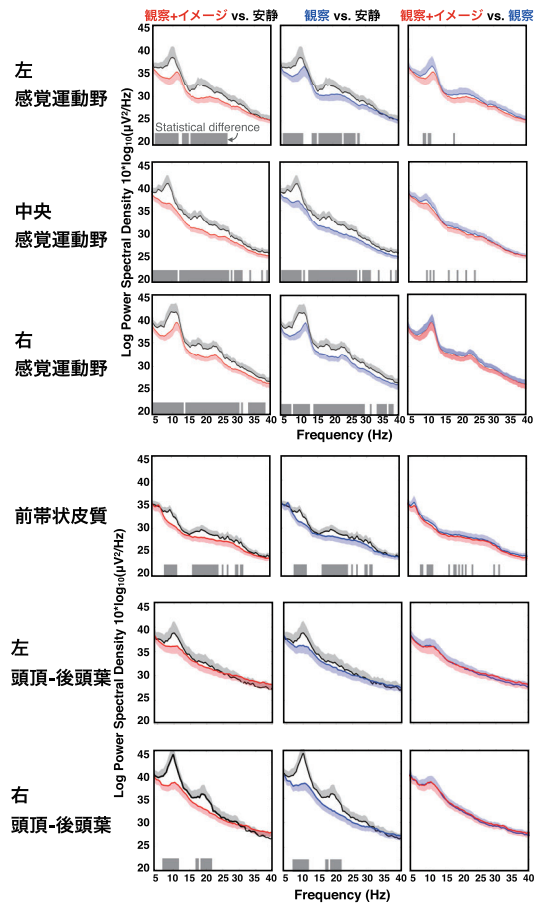
6つのクラスターが左・中央・右の感覚運動野、前帯状皮質、左・右の頭頂後頭葉に確認された (図2)。

図3に各独立成分のクラスター (各脳領域) における PSD の結果を示す。左, 中央, 右の感覚運動野において、観察+イメージ条件と観察条件における θ 帯 (4-7 Hz), α 帯 (8-12 Hz), β 帯 (15-30 Hz) の PSD は、安静条件と比較して、有意に低いことが認められた ($p < 0.05$)。また、左, 中央の感覚運動野において、観察+



各クラスターはモンリオール神経学研究所の標準脳に上面図, 冠状図, 矢状図で可視化されている。青色の球は、一人の被験者の単一のダイポールの位置を示し、赤色の球はクラスタの中心を示す。

図2 独立成分クラスターのダイポールの位置

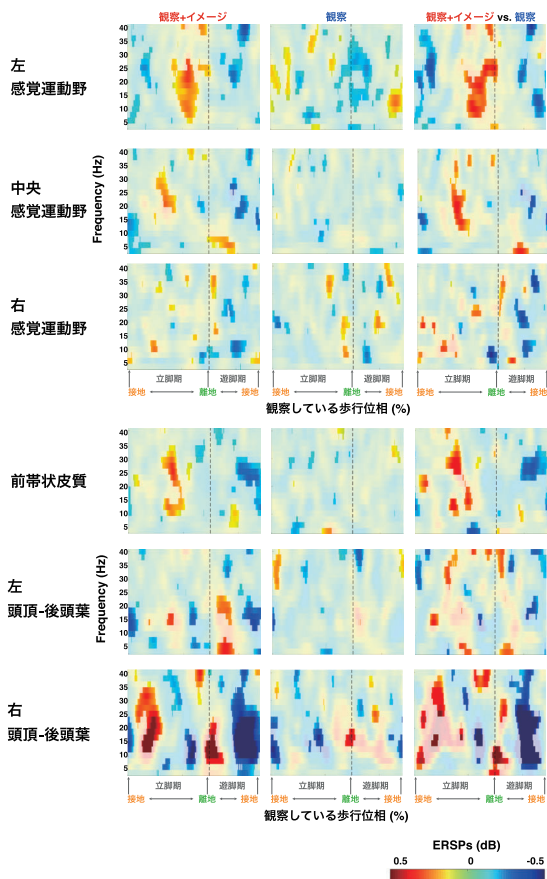


各条件 [黒: 安静, 赤: 観察+イメージ, 青: 観察] ごとに、クラスターごとの平均 PSD (線) とその標準誤差 (網掛部分) を示した。上から、それぞれ左, 中央, 右の感覚運動野, 前帯状皮質, 左, 右の頭頂-後頭皮葉に位置するクラスターの PSD を示す。左の列から順に、観察+イメージと安静の条件, 観察と安静の条件, 観察+イメージと観察の3つの条件間で PSD を比較した。アンダーバー(グレー)は有意差のある周波数領域を示す (False discovery rate-corrected p 値 < 0.05)。

図3 独立成分クラスター (各脳領域) のパワースペクトル密度 (PSD)

イメージ条件における α 帯と β 帯の PSD は、観察条件と比較して、有意に低いことが認められた ($p < 0.05$)。

前帯状皮質, 右の頭頂後頭野において、観察+イメージ条件と観察条件における α 帯と β 帯の PSD は、安静条件と比較して、有意に低いことが認められた ($p < 0.05$)。また、前帯状皮質において、観察+イメージ条件における α 帯と β 帯の PSD は、観察条件と比較して、有意に低いことが認められた ($p < 0.05$)。左の頭頂後頭葉では条件間での差は認められなかった。以上の結果から、観察+イメージは広範な脳領域の活動を変調することが明らかとなった。



左, 中央, 右の感覚運動野, 前帯状皮質, 左, 右頭頂後頭葉について, 観察+イメージ (左列) と観察 (中央列) のにおける平均 ERSF を示した。さらに, 観察+イメージから観察を引いた条件の平均 ERSF (右列) では, これらの条件の間に有意な差があることがわかる。縦軸は周波数帯域を示す。横軸の歩行位相は, 観察された歩行の右足接地で始まり, 次の右足接地で終了する。点線は, 立脚期から遊脚期への移行タイミングである, 右足の離地を示す。カラースケールは, デシベルパワー (dB) の値を示す。有意でない値は白でマスクされている (False discovery rate-corrected p 値 < 0.05)。

図4 独立成分クラスター (各脳領域) の事象スペクトル摂動 (ERSP)

図4に各独立成分のクラスター (各脳領域) における ERSF の結果を示す。観察+イメージ条件では, 左と中央の感覚運動野, 前帯状皮質, 左と右の頭頂-後頭葉において, 観察していた歩行位相に依存した変調が認められた。観察条件では, 左の感覚運動野において, 歩行位相依存性の変調が認められた。観察+イメージ条件と観察条件を比較した結果, 左と中央の感覚運動野, 前帯状皮質, 右の頭頂-後頭葉における位相依存性の変調は2条件間で有意に異なることが明らかとなった。

本研究結果と先行研究の知見から, 歩行観察

とイメージの併用における脳活動と実歩行時における脳活動の類似性について考察する。我々の研究グループは, 実歩行中の脳活動に関する知見を既に報告している [2]。本研究において確認された, 観察+イメージ条件における感覚運動野の $\alpha \cdot \beta$ 帯域の周波数パワーの減少は, 実歩行時においても認められている。運動イメージ時における感覚運動野の活動は, 実際の運動と類似することが, 他の動作を対象とした研究で明らかとなった (Neuper et al., 2005)。本研究では, 観察+イメージ条件における $\alpha \cdot \beta$ 帯域の周波数パワーの減少が, 観察条件におけるパワーの減少よりも大きかった。したがって, 歩行観察と歩行イメージを併用することで, 実歩行時にも認められる感覚運動野の活動をより高めることが示唆された。本研究では, 観察している歩行位相に合わせた脳活動の変調についても調べた。左の感覚運動野において, 立脚初期と遊脚中期における β 帯域のパワーの減少, 立脚終期における $\alpha \cdot \beta$ 帯域のパワーの増大が認められた。驚くべきことに, この歩行位相依存性の変調についても実歩行時と類似していた。運動イメージ, 観察と実際の動作を比較した先行研究のほとんどは, 活動した脳部位に着目しており, 動作の位相との関連性は未解明な部分が多かった。本研究では, 歩行観察と歩行イメージを併用することで, 賦活する脳部位だけでなく, 歩行位相に合わせた感覚運動野の活動においても, 実歩行中と類似することを示した。以上の結果をまとめた論文は, 既に Neuroimage 誌に受理されている [1]。他の脳活動についての詳細な考察についても, 論文内に記載してある。

[今後の研究の方向, 課題]

先の研究から, 歩行観察と歩行イメージを併用することで, 位相依存性脳活動の変調を惹起できることが明らかとなった。したがって, 歩行観察と歩行イメージの併用時の脳活動から,

立脚期や遊脚期といった歩行位相を分類できる可能性が示された。本研究のもう一つの目的は、脳活動から機械を操作するブレイン・マシン・インターフェースへの応用に繋がるモデルを構築することである。本研究の実験時では観察＋イメージ条件と観察条件における脳波データと、対応する歩行位相のデータを測定している。今後の方針として、得られた脳波データから、歩行位相を分類するモデルを構築する。その際の課題として、位相分類の正確性を向上させること、計算時間を短縮することが挙げられる。将来的には、本研究で作成されたモデルを用いて、実際の脳波データからリアルタイムで機械を操作することで、運動機能の代替や回復を目指す。その上で誤作動が起きないために正確性を上げる必要がある。また、脳波データから機械を操作する際に、計算時間が長すぎると操作に支障がでる。したがって、複数の分類モデルを試して、分類の正確性を向上させるとともに、分類における計算処理をできるだけ簡単にしようとする試行錯誤していく。

本研究遂行にあたり、立石科学技術財団より2年間の助成をいただいた。立石科学技術財団関係者をはじめとして本研究にご理解とご支援をいただいた方々、ならびに本研究に携わった共同研究者全員に厚く御礼を申し上げる。

[成果の発表, 論文等]

学術雑誌等に発表した論文 (本人に下線)

- [1] Naotsugu Kaneko, Hikaru Yokoyama, Yohei Masugi, Katsumi Watanabe, Kimitaka Nakazawa. "Phase dependent modulation of cortical activity during action observation and motor imagery of walking: an EEG study". *Neuroimage* 2021; 225, 117486. 【査読有】
- [2] Hikaru Yokoyama, Naotsugu Kaneko, Tetsuya

Ogawa, Katsumi Watanabe, Kimitaka Nakazawa. "Gait phase dependent and gait phase independent cortical activity across multiple regions involved in voluntary gait modifications in humans". *European Journal of Neuroscience* 2020; 00: 1-14.

- [3] Atsushi Sasaki, Naotsugu Kaneko, Yohei Masugi, Matija Milosevic, Kimitaka Nakazawa. "Interlimb neural interactions in corticospinal and spinal reflex circuits during preparation and execution of isometric elbow flexion". *Journal of Neurophysiology*, 2020; 124(3): 652-667.
- [4] Kai Lon Fok, Naotsugu Kaneko, Atsushi Sasaki, Kento Nakagawa, Kimitaka Nakazawa, Kei Masani. "Motor point stimulation in spinal paired associative stimulation can facilitate spinal cord excitability". *Frontiers in Human Neuroscience*, 2020; 14: 593806.

国際会議における発表 (本人に下線)

- [5] Naotsugu Kaneko, Hikaru Yokoyama, Yohei Masugi, Katsumi Watanabe, Kimitaka Nakazawa. "Changes in cortical networks during motor imagery and action observation of walking". COGSCI 2020 VIRTUAL MEETING, the Cognitive Science Society, Online, July, 2020. 【本人がポスター発表・査読有】
- [6] Naotsugu Kaneko, Hikaru Yokoyama, Yohei Masugi, Katsumi Watanabe, Kimitaka Nakazawa. "Activity in the sensorimotor cortex during action observation of walking combined with motor imagery". 2019 World Congress, International Society of Posture and Gait Research, Edinburgh, Scotland, July, 2019. 【本人がポスター発表・査読有】

国内学会・研究会における発表 (本人に下線)

- [7] 金子直嗣, 横山 光, 一寸木洋平, 渡邊克巳, 中澤公孝. "歩行観察と歩行イメージの併用における位相依存的な脳活動の変調". 第74回日本体力医学会大会, 茨城, 2019年9月. 【本人が口頭発表・査読有】
- [8] 金子直嗣, 横山光, 一寸木洋平, 渡邊克巳, 中澤公孝. "歩行観察とイメージにおける実動作と類似した脳活動の変調". 生理学研究所研究会「脳神経ダイナミクスの可視化と制御」, 愛知, 2019年7月. 【本人がポスター発表・査読無】