

<研究課題> 転倒恐怖心が立位バランスを低下させる神経メカニズムの解明
～大脳皮質活動に着目して～

代表研究者 東京大学大学院総合文化研究科 大学院生 高橋 涼吾
共同研究者 東京大学大学院総合文化研究科 助教 金子 直嗣
高知工科大学大学院総合研究所 助教 Jeong Inhyeok

【抄録】

本研究は、転倒恐怖心に関わる情動系が立位姿勢制御に与える影響について、大脳皮質活動の観点から解明することを目的とした。情動は、一般的に快・不快を示す Valence と覚醒度を示す Arousal を軸とする二次元空間上で表現される。そこで、Arousal と Valence が立位姿勢制御における大脳皮質活動に与える影響を、脳波計を用いて検討した。その結果、Arousal が高いときには低いときと比較して、バランス調節に必要な感覚フィードバック処理と運動実行に関わる一連の皮質領域が賦活することが示された、また、Valence が不快である場合には快の場合と比較して、体性感覚処理と運動実行に関わる皮質領域が賦活することが示された。さらに、不快情動は姿勢動揺位相に依存した体性感覚処理と運動実行に関わる皮質領域の活動パターンを乱すことも示唆された。以上より、Arousal と Valence がそれぞれ立位姿勢制御に関わる大脳皮質活動に対して独自の影響を与えることが示された。

1. 研究の目的

1-1 背景

立位バランスが低下している高齢者の多くが、転倒恐怖心を抱いている。高齢者の転倒恐怖心は、将来的な転倒確率の予測因子であり、バランス低下に拍車をかけることが示されている [1]。転倒恐怖心が生じると、恐怖や不安といった情動系の影響に加えて、バランスの安定化を試みる随意的姿勢制御の影響がバランスに反映される。本研究では、純粋な情動系の立位姿勢制御への影響に着目する。

情動は、一般的に快・不快を示す Valence と覚醒度を示す Arousal を軸とする二次元空間上で表現される (図 1) [2]。恐怖心は Valence が「不快」、Arousal が「高」に対応することから、Valence と Arousal 両者が立位姿勢制御系に与える影響を解明することで、転倒恐怖心によるバランス低下の背後に潜むメカニズムの解明に繋がる可能性がある。

立位バランスは、視覚や体性感覚をはじめとする感覚フィードバックに基づいて適切な運動指令を発出する、中枢神経系の中でも高次の階層が関与する運動制御であり、大脳皮質が深く関与する [3]。実際、大脳皮質の広範な領域の神経活動が立位姿勢制御に関わること、さらに姿勢動揺の位相に応じた相動的な活動が存在することが報告されている [3]。このように、大脳皮質は立位姿勢制御の根幹を担う重要な領域であり、情動系による立位バランスへの影響の背後に大脳皮質活動の変調が関与している可能性がある。

✓ 情動を構成する2つの次元 (Russell, 1980)

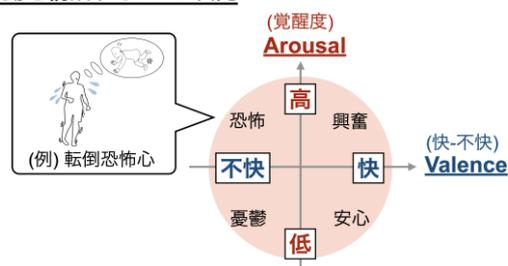


図 1 情動を構成する Arousal と Valence.

1-2 目的

本研究の目的は Arousal と Valence の次元に沿った立位中の大脳皮質活動の変調を明らかにすることである。

2. 研究方法と経過

2-1 被験者

健康成人男性 24 名 (24.5±2.4 歳, 66.0±7.2 kg, 174.3±5.2 cm) が参加した。実験に先立ち、被験者に対して実験の目的、方法、および危険性について説明し、実験参加への同意を得た。本研究は、東京大学の「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施された (課題番号: 792)。

2-2 実験条件

本研究では、情動を操作するために、立位中に情動惹起画像を注視する手法を採用した。実験条件は Arousal (高-低) と Valence (快-不快) から成る (1) 高-快, (2) 高-不快, (3) 低-快, (2) 低-不快の 4 条件を設けた。情動惹起画像は、International Affective Picture System (IAPS) を

使用した。各条件には 12 枚の画像が含まれていた。

2-3 手続き

被験者はフォースプレート上で立位姿勢を保持し、前方 1 m に配置されたモニターを 102 秒間注視する課題を 4 条件下で行った。前半 30 秒間はモニター上に注視点が表示され、後半 72 秒間は情動画像が表示された。情動画像は、同条件内の 12 枚の画像が 6 秒間隔で連続提示された。条件間では 2 分間の座位休憩を設けた。

2-4 計測

課題中、63ch 脳波計を使用して脳活動を計測した。また、フォースプレートを使用して地面反力・モーメントを計測した。

2-5 脳波解析

2-5-1 前処理

脳波計から直接計測された信号には、脳活動とは関係の無いノイズ成分が含まれており、これらを除く必要がある。一連の解析フローを図 1 に示す。フィルタリング処理を経た後、不良チャンネルを除去した。残ったチャンネルに対して独立成分分析 (ICA) を適用し、脳活動と関係のない成分 (例: 筋活動、瞬き、眼球運動) を除外した。残った独立成分に対してダイポール推定を行い、信号源 (脳部位) を推定した。次に、全被験者の独立成分について、信号源を主とする *k*-means 法によって大脳皮質に局在する 6 つの脳部位クラスターに分類した。推定された 6 つの脳部位は、前帯状皮質 (Anterior cingulate cortex), 左感覚運動野 (Left sensorimotor cortex), 右感覚運動野 (Right sensorimotor cortex), 後帯状皮質 (Posterior cingulate cortex), 楔前部 (Precuneus), 視覚野 (Visual cortex) であった (図 2)。

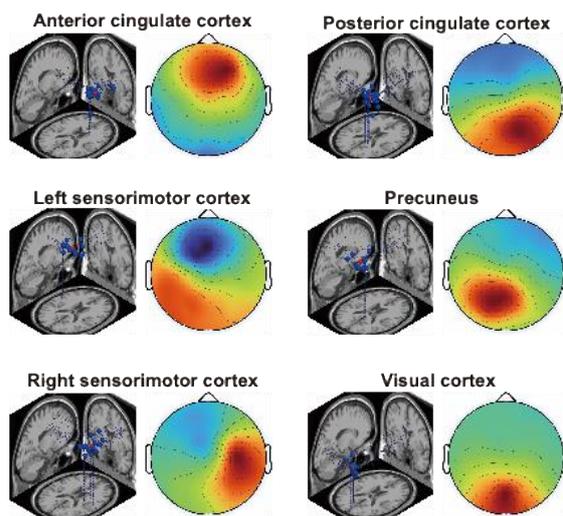


図 2 推定された 6 つの脳部位の信号。各脳部位について信号源と頭皮電位分布が示されている。

2-5-2 パワースペクトル密度 (PSD)

推定された 6 つの脳部位クラスターの独立成分に対して、パワースペクトル密度 (PSD) を算出した (図 3 左)。 θ 帯 (4–8 Hz), α 帯 (8–12 Hz), 低 β 帯 (12–20 Hz), 高 β 帯 (20–30 Hz), 低 γ 帯 (30–40 Hz)。

2-5-3 事象関連スペクトラム摂動 (ERSP)

姿勢動揺位相に応じた大脳皮質活動の変調を調べた (図 3 右)。まず、地面反力とモーメントから足圧中心を算出し、立位姿勢を倒立振り子で近似したモデルを使用して身体重心 (COM) を推定した。次に、COM 前後位置と速度から、最も身体が前傾する「前傾後期」と最も後方に近づく「回復後期」を定義した。

6 つの脳部位クラスターの独立成分に対してウェーブレット変換を行い、前傾後期と回復後期における平均パワーについて、 θ 帯, α 帯, 低 β 帯, 高 β 帯, 低 γ 帯で算出した。

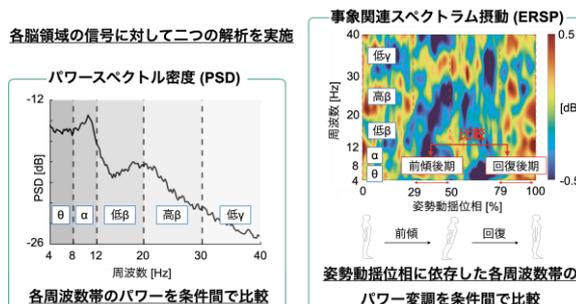


図 3 脳波解析。

3. 研究の成果

以下、主要な結果について報告する。

3-1 パワースペクトル密度 (PSD)

反復測定 2 要因分散分析 (Arousal×Valence) の結果, 左感覚運動野, 右感覚運動野, 楔前部, 視覚野において, α 帯または低 β 帯のパワーに対する Arousal の有意な主効果がみられ, Arousal が高い時にパワーが減少した ($p < 0.05$, 図 4). α 帯と低 β 帯のパワー減少は, その皮質部位の神経活動が増強したことを意味する [4]. 上述の皮質領域の立位姿勢制御における機能的役割から, Arousal の上昇は立位バランスの維持に関わる感覚情報の処理・統合と運動実行のための皮質活動を活性化させると考えられる.

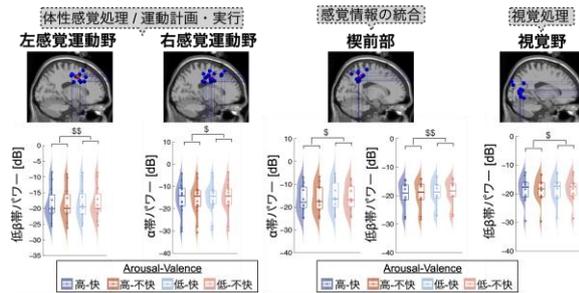


図 4 左右感覚運動野, 楔前部, および視覚野における α 帯または低 β 帯パワーに対する PSD の結果. #: Arousal の有意な主効果 ($p < 0.05$). ##: Arousal の有意な主効果 ($p < 0.01$).

また, 左感覚運動野の低 γ 帯のパワーに対する Valence の有意な主効果が認められ, 不快時に快時と比較してパワーが有意に増大した ($p < 0.05$, 図 5). 低 γ 帯のパワー増大は, その皮質部位の神経活動が増強したことを意味する [5]. したがって, Valence が不快になると, 体性感覚・運動実行に関わる皮質活動を活性化させることが示された.

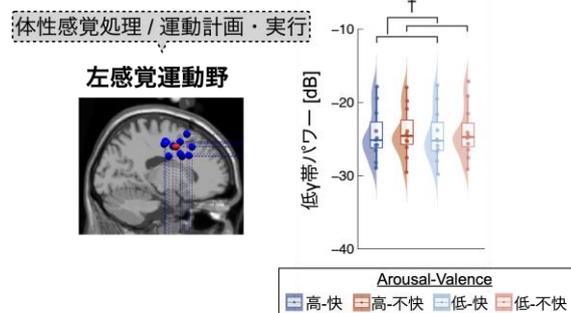


図 5 左感覚運動野における低 γ 帯パワーに対する PSD の結果. †: Valence の有意な主効果 ($p < 0.05$).

3-2 事象関連スペクトル摂動 (ERSP)

反復測定 3 要因分散分析 (Arousal×Valence, Phase) の結果, 左感覚運動野の α 帯のパワーに対する Phase の有意な主効果がみられ, 前傾後期にて回復後期と比較してパワーが減少した ($p < 0.05$, 図 6). この結果は, 左感覚運動野の活動が前傾後期において回復後期と比較して増大していることを示している. さらにこの変調は, 前傾後期における下腿三頭筋の活動増大と回復後期における活動減少に対応した脳活動である可能性が考えられる [6].

また, 左感覚運動野の α 帯のパワーに対する Valence と Phase の有意な交互作用が確認され, 事後検定の結果, Valence が快の際には, 前傾後期にて回復後期と比較してパワーが減少した ($p < 0.05$). 一方で, このような変調は Valence が不快の際には確認されなかった. 以上より, 不快情動は姿勢動揺位相依存性的な左感覚運動野の活動変調を乱すことが示唆された.

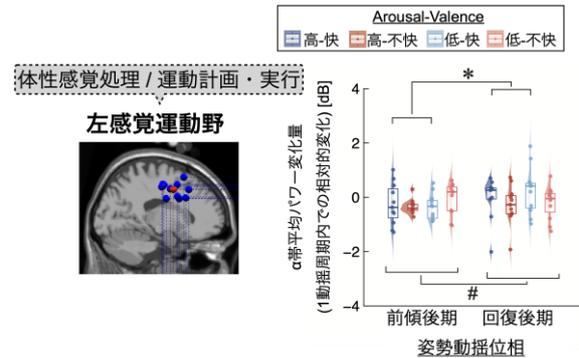


図 6 左感覚運動野における α 帯パワーに対する ERSP の結果. #: Phase の有意な主効果 ($p < 0.05$), *: Valence×Phase の有意な交互作用 ($p < 0.05$).

3-1 結果のまとめ

Arousal と Valence が立位姿勢制御における大脳皮質活動に与える影響が明らかとなった. 主要な結果を以下にまとめる.

(1) Arousal が高くなると, 立位姿勢制御における感覚情報の処理・統合と運動実行のための皮質活動を活性化する.

(2) Valence が不快になると, 立位姿勢制御における体性感覚処理・運動実行に関わる皮質活動を活性化する. さらに, 不快時には立位姿勢動揺位相に依存した上述の皮質活動が乱される. 以上より, 転倒恐怖心による情動変化を Arousal と Valence という二つの次元に分解すると, 各々が異なる影響を大脳皮質活動に対して与えていることが明らかとなった.

4. 今後の課題

今後の方針として、まずは若年健常者を対象として、転倒恐怖心が脳皮質活動に与える影響の解明を目指す。その後、高齢者を対象に同様の検証を行う。

5. 研究成果の公表方法

上述の成果について、国際学会 (Neural Control of Movement 2026) にて発表し外部の研究者から意見を受けた後、2026年中に国際雑誌 (Journal of Neurophysiology) への投稿を行う。

参考文献

- [1] T.J. Ellmers, J.P. Ventre, E. Freiburger, K. Hauer, D.B. Hogan, M.L. Lim, et al., Does concern about falling predict future falls in older adults? A systematic review and meta-analysis, *Age Ageing*. 54 (2025). <https://doi.org/10.1093/AGEING/AFAF089>.
- [2] J.A. Russell, A circumplex model of affect, *J Pers Soc Psychol*. 39 (1980) 1161–1178. <https://doi.org/10.1037/h0077714>.
- [3] B.W. Dijkstra, E.M.J. Bekkers, M. Gilat, V. de Rond, R.M. Hardwick, A. Nieuwboer, Functional neuroimaging of human postural control: A systematic review with meta-analysis, *Neurosci Biobehav Rev*. 115 (2020) 351–362. <https://doi.org/10.1016/J.NEUBIOREV.2020.04.028>.
- [4] C. Neuper, G. Pfurtscheller, Event-related dynamics of cortical rhythms: frequency-specific features and functional correlates, *International Journal of Psychophysiology*. 43 (2001) 41–58. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(01\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(01)00178-7).
- [5] N.E. Crone, D.L. Miglioretti, B. Gordon, R.P. Lesser, Functional mapping of human sensorimotor cortex with electrocorticographic spectral analysis. II. Event-related synchronization in the gamma band., *Brain*. 121 (1998) 2301–2315. <https://doi.org/10.1093/BRAIN/121.12.2301>.
- [6] A. Nakamura, R. Miura, Y. Suzuki, P. Morasso, T. Nomura, Discrete cortical control during quiet stance revealed by desynchronization and rebound of beta oscillations, *Neurosci Lett*. 814 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2023.137443>.

Neural Mechanisms by which Fear of Falling Worsens Standing Balance - Focusing on Cortical Activity -

Primary Researcher: Ryogo TAKAHASHI
PhD student, Graduate School of Arts and Sciences,
The University of Tokyo

Co-researchers: Naotsugu KANEKO
Assistant professor, Graduate School of Arts and Sciences,
The University of Tokyo
Inhyeok JEONG
Assistant professor, Research Institute,
Kochi University of Technology

The purpose of this study was to elucidate, from the perspective of cortical activity, how emotion-related processes associated with fear of falling influence standing postural control. Emotion is generally represented within a two-dimensional space defined by valence, which reflects pleasantness–unpleasantness, and arousal, which reflects the level of activation. Accordingly, we examined the effects of arousal and valence on cortical activity during standing postural control using electroencephalography. The results showed that, compared with low arousal, high arousal was associated with increased activation of a series of cortical regions involved in sensory feedback processing and motor execution required for balance regulation. In addition, unpleasant valence, compared with pleasant valence, was associated with increased activation of cortical regions related to somatosensory processing and motor execution. Furthermore, unpleasant emotional states were suggested to disrupt phase-dependent activity patterns in cortical regions involved in somatosensory processing and motor execution during postural sway. Taken together, these findings demonstrate that arousal and valence exert distinct influences on cortical activity related to standing postural control.