

身体バランスの不安定性における自己認知的側面から身体性の神経基盤を考える

The neural basis of self-recognition of whole body balance instability

跡見 友章^{*1,2} 則内 まどか^{*2} 大場 健太郎^{*3} 跡見 順子^{*4} 菊池 吉晃^{*2}
 Tomoaki Atomi Madoka Noriuchi Kentaro Oba Yoriko Atomi Yoshiaki Kikuchi

^{*1} 帝京科学大学 ^{*2} 首都大学東京大学院 ^{*3} 東北大学東北メディカル・メガバンク機構 ^{*4} 東京農工大学
^{*1} Teikyo University of Science ^{*2} Graduate School of Tokyo Metropolitan University
^{*3} Tohoku Medical Megabank Organization ^{*4} Tokyo University of Agriculture and Technology

二足での身体バランス制御の神経機構は、転倒回避など、ヒトの生存戦略において重要である。我々は、身体バランスの不安定性に応答する自己特異的な神経機構を検討するために、動作観察および自他比較の手法が有効であると考えた。本研究では、健常男性 13 名に対し 3 条件のバランス課題（動的不安定、動的安定、静的安定）を実施し、被験者自身と他者による刺激動画を作成し、機能的磁気共鳴画像法により脳活動を計測した。各課題での自他比較による解析の結果、動的不安定条件でのみ前庭関連領域、情動関連領域に自己に有意な脳活動が認められた。以上より、身体バランス不安定性認知における脳活動においては、明確な自他の差異が存在し、その脳活動は適応などの高次な神経機構と関連することが示唆された。

The neural basis of controllability of posture and behavior in the bipedal humans for avoiding/protecting falling is important as one of the human survival strategies. Here, we used functional magnetic resonance imaging (fMRI) to investigate the neural mechanism underlying whole body instability, based on the action-observation and self-recognition paradigm. We performed fMRI measurements while 13 healthy male subjects viewed video clips of their own and others, in the dynamically unstable, dynamically stable and statically stable conditions, respectively. Hence, the self-specific activity was observed only in the dynamically unstable condition; the vestibular and emotion related areas. This result showed that the neural substrate underlying self-recognition of one's own body instability consists of the vestibular, emotional, and adaptive systems.

1. はじめに

ヒトの身体バランス制御については様々なモデルが提示されており、視覚、前庭感覚、固有感覚などの感覚情報処理のみならず、より高次な認知系からの制御も受けているとされ、極めて複雑で動的なシステムであるとされている。近年では、ヒトの二足による姿勢・動作制御の神経機構について、運動イメージ (motor imagery) および動作観察 (action observation) の手法を用いて、歩行時や動的なバランス制御時の脳活動を機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: functional magnetic resonance imaging) により検討した研究がある一方で、身体バランスが不安定な状況に反応する神経機構を検討した脳科学的研究は少ない。Taube らは、身体バランスに外乱を加えた課題について、動作観察と運動イメージを組み合わせた手法により、身体バランスの不安定な状況の脳活動を推定し、バランス課題の難易度が上がるほど一次運動野や運動前野などの運動関連領域が活動することを示している。

一方で、身体バランスの不安定性が恐怖や不安と関連することが、動物実験およびヒトの実験から明らかにされている。従って、転倒などにつながる身体バランス制御に関わる神経機構は、前庭系や体性感覚、運動系の神経機構のみならず、恐怖や不安などの負の情動 (negative emotion) の基盤となる内受容性感覚 (interoception) や自律神経系の活動に関連する領域を含むと考えられる。加えて、高齢者においては、転倒に対する恐怖は社会的行動を抑制するなど、ヒトの行動戦略の企図にも影響を与えることから、身体バランスの危機的状況を制御する神経機構と高次認知機能との間には、ヒト特有の高度な社会性を含めた進化の過程を説明する際の重要な関係性を含む可能性が考えられる。しかしながら、転倒のようにヒトの身体バランス

が極めて不安定な状態を脳科学的に検討することは方法的に困難であり、情動系や内受容性感覚系に関する領域や高次認知領域が、身体バランスの危機においてどのように活動するかについては、知見が得られていない。

一方で、Northoff らは、自己には参照すべき自己の基盤として、最小単位の自己 (proto self) または身体的自己 (bodily self) があり、自己の最小単位が身体性と強く関連するとしている。また、自己認知の研究においては、他者の視覚刺激に比較して、自己または自己に近い存在の視覚的情報は、運動関連領域に加え、皮質下における情動関連領域を含めた神経機構を活性化させるという知見が多く得られている。従って、身体バランスが危機的な状況に反応する神経機構を自己特異的に活性化させることにより、動画として提示された身体からの情報が、自己の基盤となる神経機構にどう影響を与えるかについて検討することが可能になると考えた。実験では、3 種類の異なる難易度のバランス課題を実施している際の動画を被験者に提示することにより、最も難易度の高いバランス課題において自己特異的な脳活動が観測されるのではないかと仮説を立て、fMRI を用い、課題提示時の脳活動について自他比較を実施した

2. 方法

2.1 対象者

健常右利き男性 13 名 (平均年齢 24.7 ± 4.3 歳, Chapman 利き手テスト 13.3 ± 0.6 点)。実験について説明を行い、書面上で研究協力の承諾を得た。本研究は首都大学東京荒川キャンパス研究安全倫理委員会の承認を得て実施した。

2.2 刺激動画

3 種類のバランス課題 (動的不安定条件: Dynamically Unstable: DU, 動的安定条件: Dynamically Stable: DS, Dynamically Stable: DS) を実施している際の様子を刺激動画とした。被験者自身の動画にはマーク (白丸) を提示した。刺激動

連絡先: 跡見友章, 帝京科学大学医療科学部理学療法学科
 〒409-0193 山梨県上野原市八ツ沢 2525, Tel: 0554-63-4411, e-mail: atomi@ntu.ac.jp

画は、バランス課題 3 条件について自己・他者とした。鏡を通してスクリーン上にプロジェクターから映像を投影し、刺激動画をランダムに提示した際の脳活動を fMRI にて計測した(図 1)。

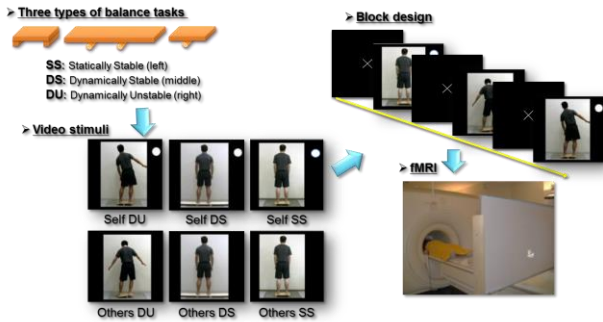


図 1. 実験デザイン

2.3 fMRI 撮像

1.5TMR 装置(Signa Horizon LX, GE 社), GRE 型, EPI 法にて鏡を通してスクリーン上に刺激動画を提示した。撮像パラメータは, [TR] = 4000 msec, [TE] = 90.5 msec, flip angle = 80°, 128 matrix, field of view [FOV] = 24 × 24 cm², スライス厚 7.0 mm, スライス枚数 20 枚で, 小脳から頭頂までを撮像した。

2.4 脳画像解析

脳画像解析は SPM2 を用い, 個人解析後, 変量効果 (random effects) による集団解析を行った ($p < 0.001$, uncorrected, $k > 10$). 本研究では, 最も不安定な DU 条件において, 自己と他者による応答の相違を検討するため, 自己 DU > 他者 DU, 他者 DU > 自己 DU のコントラストについて解析を実施した。

3. 脳画像結果

3.1 自己 DU > 他者 DU

自己 DU > 自己 DS の比較からは, 両側前前頭前野, 右側頭頂接合部(頭頂島前庭皮質), 右上側頭回, 右上後頭回, 左島距溝, 右島皮質前部, 両側島皮質後部, 左後帯状回, 右小脳, 左尾状核, 左被殻, 右淡蒼球内節, 右視床下部, 右視床背内側核に活動が認められた(図 2)。一方で, 他者 DU > 自己 DU では優位な脳活動は認められなかった。

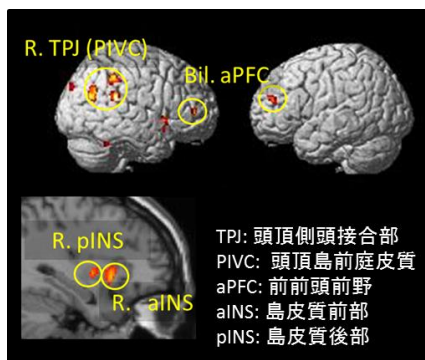


図 3. 自己 DU にて活動した領域

4. 身体性を伴う自己認知に関連する脳領域

自己の身体バランスが不安定な状況を表す刺激動画が, 前庭-運動関連領域を基盤とした身体バランス制御の神経機構だけでなく, 交感神経活性や homeostatic emotion の惹起に関

連する皮質下領域も活性化させ, さらに, ヒトの適応的行動の基盤となる高次な神経機構をも, 自己特異的に活性化させることが示された。この結果は, 前庭-運動系および交感神経系の活性化によって, limbic system に表象される身体バランスの状態を, 評価・制御し, 行動を適応させるシステムが存在することを示唆している。言い換えると, これらの領域で構成される神経機構は, 直面した身体の危機を表す入力に対して, 無意識的に, 自己の生命を守るという基本的な戦略に基づき, 最適な行動を出力するための神経機構であると考えられる。

また, 身体に生じた危機的状況を認知する神経メカニズムは, 自他で明確に区別されていることが示され, 自己の場合には, 内受容性感覚や固有受容感覚, 前庭感覚などの身体機能を統合する領域である島皮質が右優位に活動することが示された。Northoff らは, 身体の内外に由来する身体情報を統合する過程が, 自己と他者の身体を明確に区別するために重要であり, 自己の基盤となると主張している。本研究において, 身体バランスが不安定となる状況の認知に対して自己特異的に活動が得られた島皮質は, 自己の最小単位である身体的自己の重要領域である可能性が考えられる。また右島皮質と前前頭前野との連絡は, 身体的自己の危機的状況に対して, 適応的な行動戦略を企図する神経機構であると考えられる。以上より, 二足による不安定な身体バランス制御の神経機構が, proto self や bodily self に代表される, 身体性を伴う自己の基盤となる神経機構の形成においても重要な役割を果たしている可能性が示唆された。ヒトの意志, 意欲をつかさどり, 環境適応的な行動の中核とされる前頭葉皮質領域は, 島皮質と直接的な連絡を有しており, 言わば, 「身心が不安定な状態」を制御し, どのように行動すべきかの選択を行うと考えられる。すなわち, 生命維持のために, 重力に抗して姿勢や動作を保持し, 身体バランスの不安定性を制御しようとする最も原始的な原則が, 危機回避や情動にも関与し, ヒトの適応的な行動選択の基盤となっている可能性が考えられた(図 4)。

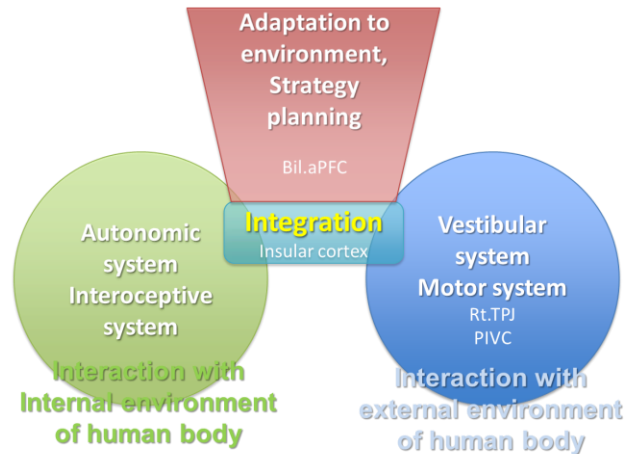


図 4. ヒトの身体性と proto self に関する神経機構モデル。

参考文献

- Mergner T, Maurer C, Peterka RJ : A multisensory posture control model of human upright stance. Prog Brain Res, 142:189-201, 2003.
- Taube W, Mouthon M, Leukel C, et al. : Brain activity during observation and motor imagery of different balance tasks: an fMRI study. Cortex. 64:102-14, 2015.
- Northoff G, Heinzel A, de Greck M, et al. : Self-referential processing in our brain-a meta-analysis of imaging studies on the self. Neuroimage, 31(1):440-57, 2006.