

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：34415

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19305

研究課題名（和文）ヒトの重力空間知覚に関わる神経基盤の解明 -新たな介入方法の開発を目指して-

研究課題名（英文）Elucidation of the neural basis of human gravity perception

研究代表者

谷 恵介（TANI, KEISUKE）

追手門学院大学・心理学部・特任助教

研究者番号：20824741

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、脳形態解析を用いて重力・身体軸方向の知覚に関わる脳領域を探索し、経頭蓋電気刺激（transcranial magnetic stimulation: TMS）によりその因果関係を調べた。また、TMSを用いて重力方向知覚に関する視覚依存性と小脳の関係性を検討した。その結果、右中後頭回の灰白質量と身体軸方向知覚パフォーマンスが相関すること、右中後頭回へのTMSにより身体が傾いた際の身体軸方向知覚のパフォーマンスが変化すること、小脳虫部へのTMSは重力知覚における視覚依存性を変化させることが示された。これらの知見は、ヒト重力空間知覚に関わる神経基盤の理解を促進する可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力空間の知覚に関わる神経基盤について因果関係性まで調べた研究はほとんど存在しなかった。本研究課題で得られた成果は、脳と重力空間知覚の関係性の詳細な理解に寄与するだけでなく、スポーツなどにおける重力空間知覚トレーニングの開発につながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this project, we explored the brain regions involved in the perception of the direction of gravity or body axis using voxel-based morphometry, and examined the causal relationship between brain region and the perception of the body axis direction using transcranial magnetic stimulation (TMS). Additionally, the relationship between visual dependence regarding the perception of gravitational direction and the cerebellum was examined using TMS. We found that 1) gray matter volume of the right middle occipital gyrus correlated with the performance in the perception of body axis direction, 2) TMS to this region significantly altered the performance of body axis direction perception when the body tilted, and 3) TMS to the cerebellar vermis changed visual dependency in the gravity perception. These findings may facilitate our understanding of the neural basis underlying the perception of gravitational space.

研究分野：実験心理学

キーワード：重力知覚 身体軸 神経基盤 脳 脳形態解析 経頭蓋磁気刺激 身体傾斜 空間知覚

1. 研究開始当初の背景

重力下で生活する我々にとって、重力の方向や身体の方を正確に認識(知覚)することは、適切な運動の遂行に極めて重要である。ヒトは、視覚や前庭感覚、体性感覚などの様々な感覚情報を脳内で統合・処理することにより重力方向や自己身体軸の方を知覚する。近年では、視覚刺激や身体の方斜といった心理物理学的手法を用いた実験検証が多数行われ、脳内での感覚統合処理プロセスは徐々に明らかになりつつあるが、この感覚統合処理が脳のどの領域で行われているかについては未だ明らかではなかった。過去の研究では、一部の脳領域が重力空間の知覚に関与する可能性が示唆されている(Kheradmand et al. 2015)ものの、脳全体を対象として詳細に検討した研究は全く存在せず、その実態は不明であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、①脳形態解析を用いて、ヒトの重力空間知覚に寄与する脳領域の特定すること、②脳刺激を用いて、特定の脳領域と重力空間知覚の因果関係性を明らかにすることであった。

3. 研究の方法

(1) 脳形態解析を用いた重力・身体軸方向の知覚に関わる脳領域探索

健常成人 50 名(女性 25 名、20 歳—46 歳)を対象に、重力方向及び身体軸方向を推定させる課題を身体が様々な姿勢で行わせ、そのパフォーマンスを評価した。具体的には、参加者は身体の方斜椅子に座位をとり、身体が直立(0°)、左または右 10°の方斜した姿勢で、ディスプレイ上の 1 本の線分を重力軸(Subjective visual vertical: SVV)または身体軸(Subjective visual body axis: SVBA)と平行になるように合わせる課題を 10 施行ずつ行った(図 1)。パフォーマンス評価として、tilt-dependent error (TE 値)を用いた。TE 値は、各身体の方斜位における各課題での平均誤差角を算出した後、身体の方斜位での平均誤差角から直立位での平均誤差角を差し引くことで算出した。これはすなわち、身体の方斜によって生じる SVV または SVBA の変化量を指す。上記の行動実験に加えて、各参加者の頭部の構造磁気共鳴画像(MRI)および脳形態解析の 1 つである Voxel-based morphometry (VBM) を用いて、それらのパフォーマンスと灰白質容積が相関する脳領域を探索した。

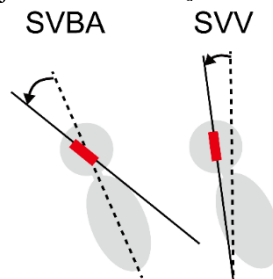


図 1 SVBA・SVV 課題

(2) 脳刺激を用いた rMOG と身体軸方向知覚の因果関係性評価

連発経頭蓋磁気刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation: rTMS)を用いて、rMOG と身体軸知覚の因果関係性を検証した。健常成人 20 名(女性 5 名、19—25 歳)が対象として、(1)の研究と同様に、SVBA 課題を身体直立または左右 10°の方斜位で行わせ、TE 値を算出した。その後、1Hz の rTMS を rMOG または右側頭頭頂接合部(right occipitotemporal junction: rTPJ)直上に 15 分間付加した。その後、再 SVBA 課題のパフォーマンスを評価し、rTMS 前後での TE 値の変化量(ΔTE 値 = 刺激後 TE 値 - 刺激前 TE 値)を算出した。統制条件として、sham 条件(rMOG 条件と同様の頭部位置にコイルを位置するが、脳実質は刺激されず音のみ付加される)を設定し、sham 条件と rMOG または rTPJ 条件の ΔTE 値を比較した。

(3) 重力知覚に関わる視覚依存性に対する小脳の関与の検証

脊髄小脳変性症(Spinocerebellar degeneration: SCD)患者を対象とした研究では、SCD 患者は健常者に比べて、重力方向を推定する際に視覚情報に依存している可能性が示唆されているが(Dakin et al. 2018)、視覚依存性と小脳との直接的な関係性を調べた研究は存在しなかった。そこで、rTMS を用いて、それらの因果関係を検証する実験を実施した。

健常成人 22 名(女性 10 名、19—23 歳)を対象に、小脳虫部(Vermis)または 1 次視覚野(V1)に対して rTMS を実施する前後で、重力方向を推定する SVV 課題(身体直立位のみ)を実施し、rTMS の効果を観察した。SVV 課題は、線分の周辺に配置された背景画像(多数のドット)が回転しない条件または左または右に回転する状況下で行われた。視覚依存性(視覚背景に影響される程度)は、背景回転条件での主観的重力方向(SVV)から背景回転無し条件での SVV を差し引くことで定量した(Background effect: BE)。rTMS による BE の変化量(ΔBE)を算出し、線形混合モデルを用いて、Vermis 条件または V1 条件と Sham 条件間で ΔBE を比較した。

4. 研究成果

(1) 脳形態解析を用いた重力・身体軸方向の知覚に関わる脳領域探索

図 2A に各課題の推定誤差(°)の結果を示す。①SVV および SVBA の両課題において、身体が直立位の場合は推定誤差が非常に小さいこと、②身体の方斜時には SVV・SVBA とともに身体の方斜側に傾くこと、③SVBA は SVV に比べて身体の方斜側に大きく偏倚すること(つまり、TE 値が

大きい) が明らかとなった。また、VBM 解析の結果、SVV パフォーマンスと有意に相関する脳領域は検出されなかったが、SVBA 課題では TE 値が大きい参加者ほど、右中後頭回 (right middle occipital gyrus: rMOG) の灰白質容積が増大していることが明らかとなった (図 2B)。この結果より、身体軸方向知覚に rMOG が重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

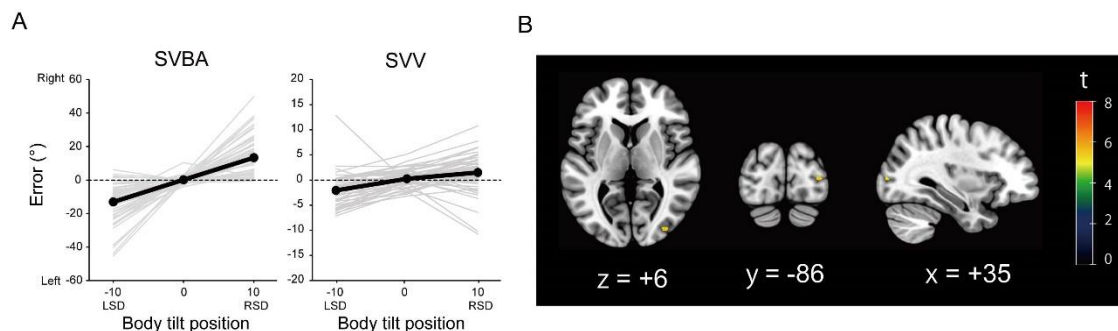


図 2 各課題の推定誤差 (A) と SVBA 推定誤差と灰白質容積が相関した脳領域 (B)

(2) 脳刺激を用いた rMOG と身体軸方向知覚の因果関係性評価

図 3 に各条件における TE 値 (rTMS 前・後) および ΔTE 値を示す。(1) の研究と同様に、いずれの条件でも身体傾斜側に大きく SVBA が傾くことが明らかとなった。また、dunnnett 検定を用いて統計解析を行った結果、rMOG の ΔTE 値は sham 条件に比べ有意に小さくなる (すなわち、TE が有意に減少、 $p=0.04$) 一方で、sham 条件と rTPJ 条件間には有意な差が観察されなかった ($p=0.15$)。この結果は(1)の研究結果を支持し、rMOG は身体軸方向の知覚に直接的に寄与していることが示唆された。

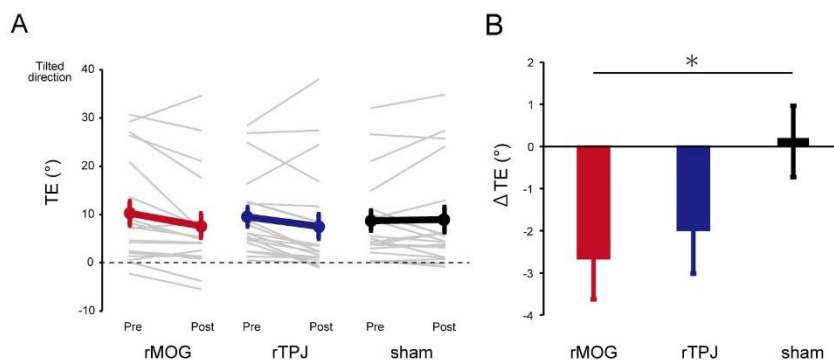


図 3 各 TMS 条件の TE (A) と ΔTE 値 (B)

(3) 重力知覚に関わる視覚依存性に対する小脳の関与の検証

実験の結果、Vermis 条件 ($-0.73 \pm 0.59^\circ$) では、sham 条件 ($0.74 \pm 0.51^\circ$) に比べて重力方向推定における ΔBE が有意に小さくなる一方 ($p=0.02$) で、V1 条件 ($0.10 \pm 0.46^\circ$) と sham 条件間に有意な違いは観察されなかった。

上記の実験の Vermis 条件の TMS コイル配置では、小脳虫部だけでなく、小脳半球をも強く刺激するため、Vermis 条件で観察された視覚依存性の変化は半球刺激による可能性も考えられる。そこで、健常成人 20 名を対象として、小脳右半球を刺激する条件 (Hemisphere 条件) と sham 条件で視覚依存性の変化量を評価し、比較する追加実験を実施した。その結果、視覚依存性は条件間で ΔBE の有意な差が検出されなかった (Hemisphere 条件: $-0.31 \pm 0.51^\circ$, sham 条件: $-0.77 \pm 0.66^\circ$; $p=0.51$)。これらの結果より、小脳虫部が重力空間知覚における視覚依存性に特異的に関与していることが示唆された。

引用文献

Kheradmand, A., Lasker, A., & Zee, D. S. (2015). Transcranial magnetic stimulation (TMS) of the supramarginal gyrus: a window to perception of upright. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 25(3), 765–771.

Dakin, C. J., Peters, A., Giunti, P., & Day, B. L. (2018). Cerebellar Degeneration Increases Visual Influence on Dynamic Estimates of Verticality. *Current biology : CB*, 28(22), 3589–3598.e3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Tani Keisuke, Uehara Shintaro, Tanaka Satoshi | 4. 巻 36 |
| 2. 論文標題 Association Between Body Tilt and Egocentric Estimates Near Upright | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Multisensory Research | 6. 最初と最後の頁 367 ~ 386 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1163/22134808-bja10097 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Tani Keisuke, Uehara Shintaro, Tanaka Satoshi | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Psychophysical evidence for the involvement of head/body-centered reference frames in egocentric visuospatial memory: A whole-body roll tilt paradigm | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Vision | 6. 最初と最後の頁 16 ~ 16 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1167/jov.23.1.16 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 谷恵介 | 4. 巻 72 |
| 2. 論文標題 重力下における空間知覚と身体運動の相互作用 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 体育の科学 | 6. 最初と最後の頁 763-767 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Tani Keisuke, Yamamoto Shinji, Kodaka Yasushi, Kushiro Keisuke | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Dynamic arm movements attenuate the perceptual distortion of visual vertical induced during prolonged whole-body tilt | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 PLOS ONE | 6. 最初と最後の頁 e0250851 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0250851 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Tani Keisuke, Tanaka Satoshi | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Neuroanatomical correlates of the perception of body axis orientation during body tilt: a voxel-based morphometry study | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 14659 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-93961-8 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Tani Keisuke, Iio Shintaro, Kamiya Masato, Yoshizawa Kohei, Shigematsu Takashi, Fujishima Ichiro, Tanaka Satoshi | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Neuroanatomy of reduced distortion of body-centred spatial coding during body tilt in stroke patients | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 11853 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-38751-0 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 谷 恵介 | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 重力下における身体軸知覚の特性とその神経基盤 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 基礎理学療法学 | 6. 最初と最後の頁 36~41 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24780/jjptf.JJPTF_2023-S02 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Tani Keisuke, Naito Eiichi, Mizobe Koji, Hirose Satoshi | 4. 巻 2024.03.07 |
| 2. 論文標題 Role of the right middle occipital gyrus in egocentric spatial orientation in reference to gravitational information: Evidence from a pre-registered rTMS study | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 bioRxiv | 6. 最初と最後の頁 584011 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2024.03.07.584011 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tani K, Iio S, Kamiya M, Yoshizawa K, Shigematsu T, Fujisima I, Tanaka S. |
| 2. 発表標題 Neural substrate underlying body-centered spatial coding during whole-body tilt: a neuropsychological study |
| 3. 学会等名 Neuro 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年～2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 谷惠介、飯尾慎太郎、神谷将人、吉澤康平、重松孝、藤島一郎、田中悟志 |
| 2. 発表標題 脳卒中患者における重力・身体軸方向知覚の特性 - 身体傾斜時に着目して - . |
| 3. 学会等名 第20回日本神経理学療法学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 谷惠介 |
| 2. 発表標題 重力下におけるヒトの身体軸知覚の特性と神経基盤 |
| 3. 学会等名 第27回基礎理学療法学会学術大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 谷惠介、奥内壮馬、久代恵介 |
| 2. 発表標題 身体傾斜で生じる上肢到達運動パフォーマンスの変調 |
| 3. 学会等名 第18回空間認知・運動制御研究会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 谷恵介 |
| 2. 発表標題 空間認知と小脳 |
| 3. 学会等名 第4回小脳リハビリテーション研究セッションセミナー（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 谷恵介、田中悟志 |
| 2. 発表標題 頭部の傾きに依存した自己中心視空間記憶の変調 |
| 3. 学会等名 日本基礎心理学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Keisuke Tani, Shintaro Iio, Masato Kamiya, Kohei Yoshizawa, Takashi Shigematsu, Ichiro Fujishima, Satoshi Tanaka |
| 2. 発表標題 Neural substrate underlying body-centered spatial coding during whole-body tilt: A neuropsychological study |
| 3. 学会等名 日本神経科学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 谷恵介 |
| 2. 発表標題 ヒト空間識に関する基礎研究の紹介 |
| 3. 学会等名 基礎理学療法学会 第5回若手研究者ネットワークシンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keisuke Tani, Eiichi Naito, Koji Mizobe, Satoshi Hirose |
| 2. 発表標題 A role of right middle occipital gyrus in egocentric spatial orientation when the body is tilted: Evidence from a pre-registered rTMS study |
| 3. 学会等名 Neuroscience 2023 (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 谷恵介、田中宏明、平田晃正、Jose Gomez-Tamez、森信彦、細見晃一、松木明好 |
| 2. 発表標題 重力知覚における視覚依存性に対する小脳の寄与 -低頻度経頭蓋磁気刺激による検証- |
| 3. 学会等名 第28回基礎理学療法学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|