



神経疾患から探る牽引力錯覚の機序

Exploring the Mechanisms of Illusory Pulling Sensation through Neurological Disorders

田辺健^{1),2)}, 山本哲²⁾, 山田亨¹⁾, 石井大典³⁾, 河野豊¹⁾

Takeshi TANABE, Satoshi YAMAMOTO, Toru YAMADA, Daisuke ISHII, and Yutaka KHONO

- 1) 茨城県立医療大学 (〒 300-0394 茨城県稲敷郡阿見町阿見 4669-2, t-tanabe@aist.go.jp, {yamamotos; kohno}@ipu.ac.jp)
2) 産業技術総合研究所 (〒 305-8566 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央事業所, toru.yamada@aist.go.jp)
3) 広島大学 (〒 734-8551 広島市南区霞一丁目 2 番 3 号, ishiid@hiroshima-u.ac.jp)

概要: 本研究では、さまざま神経疾患を有する参加者を対象に、牽引力錯覚の特性と振動閾値を評価し、その疾患の病態の違いから牽引力錯覚の機序に迫った。8 種類の神経疾患、計 18 名で評価を行った結果、脳卒中の参加者の患側および振戦を伴うパーキンソン病の参加者で、振動刺激は知覚できているが、牽引力錯覚が消失する傾向が確認された。牽引力錯覚には、感覚運動統合などのより高次な神経機能が関与している可能性が示唆された。

キーワード: 牽引力錯覚, 非対称振動, 神経疾患

1. はじめに

指先に対して、加速度が非対称に変化する振動刺激を提示されることで一方向に牽引される力を錯覚することが知られている(牽引力錯覚)[1]。近年では、牽引力錯覚の神経科学的な機序の解明に向けた研究が行われているが[2]、それは依然として明らかになっていない。本研究では、牽引力錯覚の機序解明に向けた探索的なアプローチとして、サンプルサイズは限られているものの、さまざま神経疾患を有する参加者を対象に、錯覚の特性の評価及び振動閾値の計測を行った。

2. 方法

2.1 参加者

神経疾患を有する 42-79 歳の 18 名の参加者(平均: 65.4 歳, 標準偏差: 9.6 歳, 女性: 10 名)が本実験に参加した。具体的な神経疾患の内訳は、末梢神経障害が 1 名、くも膜下出血が 1 名、脳出血が 5 名(内 4 名が片麻痺, 内 3 名が基底核出血, 2 名が視床出血), 脳梗塞が 2 名(両名が片麻痺, 1 名が前頭葉, 頭頂葉, 側頭葉を損傷, 1 名が前頭葉, 頭頂葉を損傷), 多系統萎縮症が 1 名, 脊髄小脳変性症が 2 名, パーキンソン病が 5 名(内 2 名が振戦あり), 筋ジストロフィー症が 1 名であった。重度な感覚運動障害を有すること、インフォームドコンセントに支障をきたす疾患であることを除外基準とした。本実験は、茨城県立医療大学研究倫理委員会から承認された(承認番号: 1107)。

2.2 装置

振動刺激を生成するために、2 チャンネルのボイスコイル型振動子(639897, Foster Electric Co., Ltd.)を並列に配置した振動デバイスを利用した。振動の制御信号は MATLAB

R2020b(MathWorks Inc.)によって生成され、オーディオインタフェース(PAA-U4P, MIYOSHI)から出力され、D 級アンプ(PAM8403DR, Diodes Inc.)を介して振動子に入力された。生成した振動を加速度計(NP-2110, Ono Sokki Co., Ltd.)を用いて計測し、データアキュイジション(DAQ)デバイス(USB-6003, National Instruments Co.)を用いて 20 kHz のサンプリング周波数で記録した。牽引力錯覚は非対称に振動する物体を指先でつまむことで生起するが、運動障害を有する参加者も含まれているため、振動デバイスと指先をポリウレタン製の柔らかいバンド(8197M, Medical Project Co., Ltd.)で固定した。また、張力が 14.0 gf に調整された定荷重ばね(4550, SAMINI Co., Ltd.)で振動デバイスを吊り上げることで、指先に加わる装置の自重を軽減させた。この固定は、運動障害の有無に関わらず、全参加者で行われた。

2.3 手続き

本研究では、牽引力錯覚の評価及び振動閾値の計測を全参加者の両側で行った。片麻痺を有する参加者については、健側から評価を行い、それ以外はランダムな順番で行った。

牽引力錯覚の特性は、錯覚の方向弁別の正答率によって評価された。本研究では、2 チャンネルの振動子から提示される 2 つの牽引力のベクトルを両者間で逆向きにすることで生じるトルクの錯覚を刺激として用いた。また、非対称振動刺激には、我々の過去の研究[3]と同じものを使用し、時計回り、または半時計回りの 2 方向のトルクの錯覚を誘発した。実験では、これらの錯覚を 1 秒間ランダムに提示し、参加者に回転したと感じた方向を強制二択で回答させ、各方向 20 試行、計 40 試行実施することで正答率を求めた。

振動閾値の計測については、牽引力錯覚を誘発するため

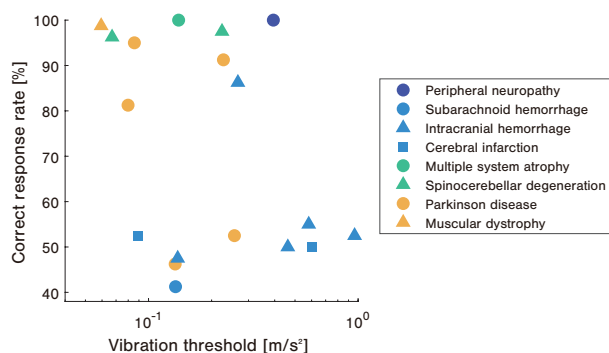


図 1: 振動閾値と牽引力錯覚の方向弁別の正答率の散布図

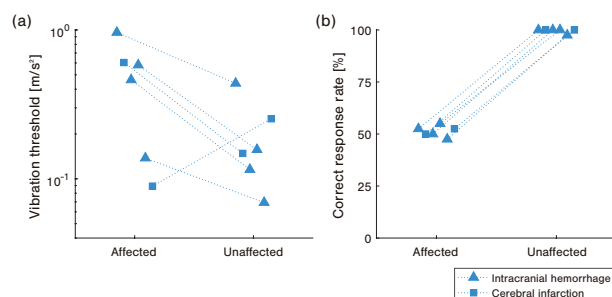


図 2: 片麻痺を有する参加者の健側-患側の比較 (a) 振動閾値 (b) 錯覚の正答率

の非対称振動刺激の基本波の周波数である 75 Hz の正弦波振動に対する閾値を計測した。閾値の計測方法は極限法が用いられ、各周波数につき、上昇・下降系列それぞれ 2 試行ずつ行い、計 4 試行の加速度計で計測した振動の振幅値の平均を絶対閾とした。

3. 結果

図 1 に振動閾値と牽引力錯覚の方向弁別の正答率の散布図を示す。なお、片麻痺を有する参加者は患側のデータ、それ以外は両側の平均値をプロットしている。本実験では、強制二択で方向を回答させているため、チャンスレベル 50% は錯覚が生起していないことを意味する。散布図は、大きく 2 つのグループに分類でき、1 つが正答率が 100% に近いグループで、もう一方がチャンスレベルに近いグループである。両グループとも、横軸に沿って分布しているため、振動閾値が錯覚に影響した可能性が低いことを示唆しており、実際に両者には有意な相関は認められなかった ($r = -0.17, p = 0.34$)。

次に、片麻痺を有する脳卒中(脳出血、脳梗塞)の参加者 6 名を対象に健側-患側を Wilcoxon の符号付き順位検定によって比較した(図 2)。その結果、振動閾値は患側の方が高い傾向はあったが、有意差は認められなかった ($p = 0.09, r = 0.81$)。一方で、錯覚の正答率では認められ ($p < 0.05, r = 1.00$)、健側では 100% に近い正答率であるのに対して、患側はチャンスレベル付近だった。

4. 考察

多系統萎縮症や脊髄小脳変性症の参加者では、比較的高い正答率で錯覚が誘発されることが確認された。これらの疾患では、小脳が病変の主座であり、小脳性運動失調を臨床症状として呈するとともに、頭部 MRI によって小脳の萎縮が認められる。よって、今回の結果から、牽引力錯覚における小脳の寄与は小さいと推察される。一方、パーキンソン病は基底核に障害を持つ疾患である。パーキンソン病の参加者 5 名のうち 3 名は高い正答率を示したが、残りの 2 名はチャンスレベル付近であった。興味深いことに、正答率が低かった 2 名はいずれも振戦を伴っており、振戦の有無が牽引力錯覚に影響を及ぼす可能性が示唆された。

片麻痺を有する脳卒中の参加者においては、患側ではチャンスレベル付近であったのに対して、健側では 100% に近い正答率であった。この結果は、本実験の片麻痺を有する脳卒中の参加者は、錯覚そのものに対して、感度が低いわけではないことを示唆する。また、患側での振動閾値の有意な上昇は認められず、振動閾値と錯覚の正答率に相関が認められないことから、感覚障害が錯覚を誘発されづらくしているとは言い難い。また、重要な点としては、錯覚を誘発するための非対称振動刺激の強度 [3] は、振動閾値に対して 10–100 倍程度であることを考慮すると、非対称振動刺激の振動自体は刺激として知覚できていることが示唆される。そのため、牽引力錯覚のみが消失していると考えられる。また、片麻痺を有する脳卒中の参加者の損傷領域は、主に基底核、視床、前頭葉、頭頂葉などの随意運動制御に関連する領域であった。錐体外路系の障害で発症するパーキンソン病の参加者の一部で錯覚が生起しづかったことを考慮すると、牽引力錯覚の生起には、感覚運動統合などの高次な神経機能が寄与している可能性がある。

なお、本研究は、さまざまな疾患を対象に、探索的に牽引力錯覚の特性を評価したものであり、各疾患ごとのサンプルサイズは限られていることに留意すべきである。そのため、ここで説明した仮説は暫定的であり、今後は、片麻痺を有する脳卒中の参加者やパーキンソン病の参加者を対象に、サンプルサイズを増やして、より詳細に検証していく必要がある。

参考文献

- [1] T. Amemiya, H. Ando, and T. Maeda, “Lead-me interface for a pulling sensation from hand-held devices,” *ACM Trans. Appl. Perception*, vol. 5, no. 3, pp. 15:1–15:17, 2008.
- [2] J. De Havas, S. Ito, S. Bestmann, and H. Gomi, “Neural dynamics of illusory tactile pulling sensations,” *iScience*, vol. 25, no. 9, 105018, 2022.
- [3] T. Tanabe, S. Yamamoto, T. Yamada, D. Ishii, and Y. Kohno, “Age-Related Impact in Illusory Torque Cues Induced by Asymmetric Vibrations,” *IEEE Trans. Haptics*, 2025 (Early Access).