○令和3年度奨励研究

# 「頭部形状の個別性に応じた経頭蓋磁気刺激コイル固定具の製作と精度検証」

理学療法学科　助教　山本　哲

## 1. 研究目的

反復経頭蓋磁気刺激（rTMS）は非侵襲的に脳機能を修飾し，脳卒中運動麻痺に対する麻痺改善効果が示されている．rTMSの刺激コイルは，頭皮上の正確な位置に刺激時間の30分程度，5mm以内の精度で保持することが必要であるため，その使用は，装置に熟達した者に限られる．一般的にコイルの位置合わせは，頭部に刺激位置をペンで記した布製の帽子を使用しコイル手持ちで刺激を行う．しかしこの方法は，コイルの中心点が安定的に合わせ続けることが難しい．正確にコイル位置合わせを行うことができるシステムとして開発されたTMSナビゲーションシステムは，赤外線反射マーカーと赤外線カメラを用いるシステムであり，0.1mm単位でコイルの位置合わせが可能で，コイルの傾きや回旋も0.1度単位で統制が可能である．ただしこのシステムは非常に高額であり広く導入することが困難である．

近年，3Dプリンタが安価に流通するようになり，状況に応じた形状作成および工作が可能となった．rTMS刺激においては，3Dプリンタを用いることができれば，研究協力者の頭部形状に応じた頭部モデルを基に精密なコイルホルダを作成することができると考えられる．このコイルホルダは研究協力者の頭部と密着しずれることがないので，常に正確な刺激を行うことができるメリットを持つと考えられる．また，プリントに用いるプラスチックフィラメントは安価であり，1つの頭部モデル当たり数百円程度と非常に安価である．一方，3Dプリンタを用いたコイルホルダの作成は一般的に行われておらず，正確な作成パラメーターは不明である．

そこで本研究は3Dプリンタを用いたコイルホルダの作成を行い，コイルスタンドを用いた方法・ナビゲーションシステムを用いた方法および頭部ランドマークを用いてコイルを手持ちする従来法との比較を行い，その精度検証を行う．本研究は将来的にrTMSを県内複数施設で行い効果的に脳卒中運動麻痺に対する新たな介入を広く行うことのできる環境を整えるための基盤研究となる．

## 2. 研究方法

3Dスキャナを用いた頭部形状モデリングとコイルホルダの印刷；頭囲20cmのマネキンヘッド(Neverland Beauty社)に対し，3Dスキャナ（Scaniverse, iPhone 13 Pro, Apple）を用いて頭部表面データの作成を行った．この頭部表面データを基に，頭部形状に応じたコイルホルダデータの作成を行った（Fusion 360, Autodesk社）．コイルホルダデータの印刷は，3Dプリンタ(DREAMER MX, Flashforge社）を用いた．

上記で作成したコイル固定具の精度検証を行った．1名の実験者が各条件20回，反復経頭蓋磁気刺激コイル（MagPro, MagVenture社）をマネキンヘッドのC4（10-20法）に対し可能な限り正確に設置することとした．比較条件は，(1)コイルホルダを使用(Headset)，(2)ナビゲーションシステムを使用（Navigation），(3)コイルスタンドを使用（Coil stand），(4)コイル手持ち（Hand held）の4つとした．コイル設置時のコイル位置は，ナビゲーションシステムを用いて記録した．データの解析は，基準（C4，各条件のコイル平均位置）からのコイル距離とした．統計は一元配置分散分析を施行した（SPSS version 28, IBM社）．有意水準は5%とした．分散分析の結果が有意の場合，多重比較（Bonferroni法）を行いて各条件の比較を行った．

## 3. 研究結果

各条件のコイル平均位置を基準とした際の距離（ばらつきの指標）について，一元配置分散分析の結果は有意であった（$F(3,76) = 140.691$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.847$）．多重比較の結果，Hand heldは，Coil stand ($p < 0.001$)，Headset ($p < 0.001$)，Navigation ($p < 0.001$)と比較して有意に距離が大きかった．また，Navigationと比較してCoil stand($p < 0.001$)およびHeadset($p = 0.030$)は，有意に距離が小さかった．

各条件のコイル中心とターゲットであるC4の距離について，一元配置分散分析の結果は有意であった（$F(3,76) = 252.585$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.909$）．多重比較の結果，Coil standは，Hand held ($p < 0.001$)，Headset ($p < 0.001$)，Navigation ($p < 0.001$)と比較して有意に距離が大きかった．また，Navigationと比較してHand held($p < 0.001$)およびHeadset($p < 0.001$)は，有意に距離が大きかった．また，Headsetは，Hand heldと比較して有意に距離が小さかった（$p < 0.001$）．また，HeadsetとC4の距離は平均9.89±0.06mmであり，Headsetの厚さは7mmであった．

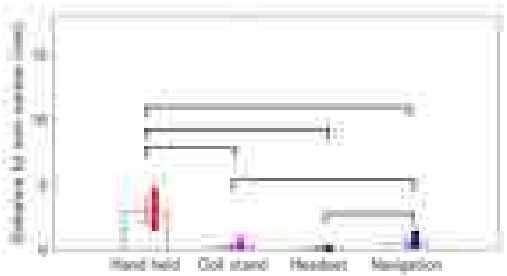

図. コイル平均位置を基準とした際の距離

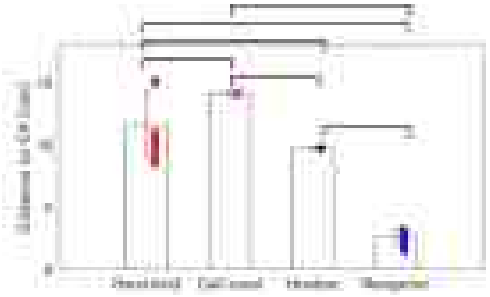

図. 各条件におけるコイル中心とC4の距離

4. 考察（結論）

本研究により，3Dプリンタを用いたコイルホルダは，他の条件と比較して最もコイル位置のばらつきが小さいことが示された．rTMSは一定の刺激位置を保つことが必要となるため，本研究で用いた手法はrTMS刺激上，有用な性質を持つことなる．また，本研究で作成したコイルホルダは，コイル手持ちやコイルスタンドを用いた条件よりも，C4に対するコイル位置の設定精度が良好であることが示された．一方，同一の領域を刺激する際には5mm以内の精度が必要とされるが，3Dプリンタを用いたコイルホルダとC4との距離は平均9.89±0.06mmであった．現在のモデルでは厚みを7mmで作成しているが，今後コイルホルダモデルの形状を再検討することにより，C4から5mm以内の位置に対し，安定的にコイルを設置することが可能と思われる．

3Dプリンタを用いたコイルホルダを用いる臨床場面としては，rTMS刺激を同じ対象に複数回，同一のターゲットに刺激を行う際に有用であることが示唆される．今後，検証対象をヒトとし，3Dプリンタを用いたコイルホルダを用いることによる運動誘発電位の安定化についての検討が必要と考える．

5. 成果の発表


1. Endo N, Ishii D, Ishibashi K, Yamamoto S, Takeda K, Kohno Y. A study on the immediate effects of neuromuscular electrical stimulation on the corticospinal tract excitability of the infraspinatus muscle. J Back Musculoskelet Rehabil. 2021;34(4):631-37.
2. Ishibashi K, Yoshikawa K, Koseki K, Aoyama T, Ishii D, Yamamoto S, et al. Gait training after stroke with wearable robotic device: A case report of further improvements in walking ability after a recovery plateau. Progress in Rehabilitation Medicine. 2021.
3. Ishii D, Ishibashi K, Takeda K, Yuine H, Yamamoto S, Kaku Y, et al. Interaction of the Left–Right Somatosensory Pathways in Patients With Thalamic Hemorrhage: A Case Report. Frontiers in Human Neuroscience. 2021;15.
4. Okada Y, Ohtsuka H, Kamata N, Yamamoto S, Sawada M, Nakamura J, et al. Effectiveness of Long-Term Physiotherapy in Parkinson's Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. J Parkinsons Dis. 2021 Aug 4.
5. Okamoto Y, Ishii D, Yamamoto S, Ishibashi K, Wakatabi M, Kohno Y, et al. Relationship Between Motor Function, DTI, and Neurophysiological Parameters in Patients with Stroke in the Recovery Rehabilitation unit. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases. 2021;30(8).
6. Sako R[#], Yamamoto S[#], Takeda K, Wakatabi M, Daira M, Hondera T, et al. A patient with bilateral medial medullary infarction: Clinical and magnetic resonance imaging findings. Interdisciplinary Neurosurgery. 2021;25. ([#]Contributed equally to this research)
7. Tanamachi K, Izawa J, Yamamoto S, Ishii D, Yozu A, Kohno Y. Experience of After-Effect of Memory Update Reduces Sensitivity to Errors During Sensory-Motor Adaptation Task. Frontiers in Human Neuroscience. 2021;15:602405.
8. Yamamoto S, Ishii D, Kanae K, Endo Y, Yoshikawa K, Koseki K, et al. The Progress of the Gait Impairment and Brain Activation in a Patient with Post-stroke Hemidystonia. Physical Therapy Research. 2021;24(2):176-86.


6. 参考文献


Farrokh Mansouri 1, Arsalan Mir-Moghtadaei, Vanathy Niranjan, Jian Shu Wu, Daniyar Akhmedjanov, Mishael Nuh, Terri Cairo, Peter Giacobbe, José Zariffa, Jonathan Downar. Development and validation of a 3D-printed neuronavigation headset for therapeutic brain stimulation. J Neural Eng. 2018; Aug:15(4):046034.