

運動誘発電位変動抑制のための脳波コヒーレンス解析を用いた 経頭蓋磁気刺激システムに関する基礎的検討†

佐々木圭輔*

A Basic Study on Transcranial Magnetic Stimulation System Using EEG Coherence Analysis for Suppression of Motor Evoked Potential Fluctuation†

Keisuke Sasaki*

This paper presents a basic study of an online stimulation system using electroencephalography analysis to suppress the amplitude of motor evoked potential (MEP) fluctuations caused in peripheral muscles by electrical stimulation of the primary motor cortex. However, the amplitude of MEP fluctuates depending on various factors, which hinders the evaluation of neural functions. Therefore, we developed a system that can measure brain potentials in the cerebral cortex as neural activities and stimulate them in specific brain states using coherence analysis, which shows the correlation between channels in the frequency domain. To confirm the usefulness of this system, we analyzed the amplitude of MEPs evoked by transcranial magnetic stimulation (TMS), which can stimulate the cerebral cortex non-invasively, and showed that the fluctuations tended to be suppressed.

Key words : Transcranial Magnetic Stimulation, Motor Evoked Potential, Coherence

1 はじめに

医療機器の操作・管理を担当する臨床工学技士は、脳外科手術や整形外科手術において術中神経モニタリングと呼ばれる業務を担当する。この業務は術中に脳神経機能をモニタすることによって、神経損傷を回避したり脳神経を同定したりする目的で実施される。術中神経モニタリングの主なものに、運動誘発電位（MEP）、体性感覚誘発電位（SEP）、聴性脳幹反応（ABR）などがある。その中でも、術中での MEP（以下、術中 MEP）は手術操作以外の様々な要因によって変動し、同一条件下で得られた MEP でも振幅が不安定で変動することが報告され、偽陽性を生じる原因となっている[1]。そのため神経機能の評価がばらつき、患者の予後に影響を及ぼしている。しかし、この問題を解決する有効なガイドラインや規定は未だ策定されておらず、現状各施設の判断に委ねられている。そこで、偽陽性の原因となる術中 MEP の変動を抑制することができれば、術中合併症の回避に寄与し、手術成績の向上に貢献できると考えた。

術中 MEP での刺激方法は通常電気刺激が用いられるが、全身麻酔下で実施されるため患者は苦痛を感じない。本研究において覚醒下の被験者で検証するにあたり、電気刺激を用いることは苦痛を与えるため適さない。そこで、リハビリテーションやうつ病治療などに適用がある経頭蓋磁気刺激（TMS）は、コイルによる磁気刺激のため低侵襲かつ安全性が高く覚醒下での使用に適すること、また大脳皮質一次運動野（M1）へ TMS を与えた場合に末梢筋から MEP を誘発可能であることから、本研究の実験時は TMS を用いて MEP の変動に関する検証を行った（Fig. 1）。

術中 MEP の変動要因として、刺激電極の位置や室温・環境音などの外的要因と患者の血圧・心拍数・呼吸状態などの内的要因が考えられる。Kiers らの先行研究では、MEP の変動要因が大脳皮質の興奮性にあることを示唆した[2]。そこで、TMS による刺激部位が M1 であることから刺激直前の脳電位に着目し、脳電位と MEP 振幅の変動との相関について検証を行い、臨床応用につ

† 原稿受理 令和4年2月28日 Received February 28, 2022

* 環境・生命工学専攻(Department of Environment and Life Engineering)

ながら MEP 変動抑制システムの開発を目的とした。

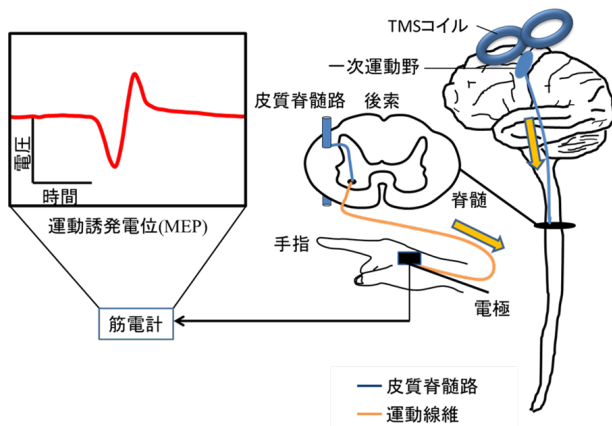


Fig. 1 Outline of inducing MEP using TMS

2 TMS システムの開発

2・1 TMS システムの構成

最初に、MEP の変動を検証する TMS システムの開発を行った。TMS を与える際の脳電位の変化による MEP への影響を取り除くため、脳電位が特定の状態の時に TMS を与えて MEP を誘発できるシステムを構築した。脳電位の相似性を指標とした脳波コヒーレンス解析を用いて、指定した脳の状態になったタイミングでトリガを送り、TMS が出力されることを確認した (Fig. 2)。

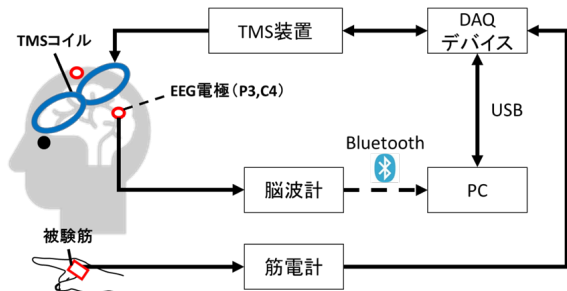


Fig. 2 Outline of TMS System using EEG coherence analysis

2・2 脳波コヒーレンス解析

脳波コヒーレンス解析は、2つの脳電位信号間の周波数領域における類似性を検出する目的で行われ、コヒーレンス値は次の式を用いて算出される。

$$Coherence(f) = \frac{|P_{P3-C4}(f)|^2}{P_{P3}(f)P_{C4}(f)}$$

ここで α 波帯域、 β 波帯域での平均コヒーレンス値を、それぞれ $Coh(\alpha)$ 、 $Coh(\beta)$ とし、TMS がトリガされる際の条件として使用した。

3 開眼時・閉眼時における MEP 振幅の変動

開発した TMS システムを使用するにあたり、被験者の開眼・閉眼の違いによる MEP 振幅の変動の比較をおこない、システム使用時の被験者の状態を決定した。安静閉眼状態より安静開眼状態で MEP を誘発した場合に、

測定条件が定常化されることで MEP 振幅の変動が抑制されることを確認した。

4 MEP 振幅の変動抑制条件の検討

安静閉眼状態で、TMS システムを用いたランダム間隔の刺激により MEP を誘発させ、各被験者から得られた 100 組のデータセットから MEP 振幅の変動抑制に寄与する刺激時の条件を調査した。その結果、安静閉眼状態で誘発された MEP 振幅の変動は閾値条件を統制するほど抑制されやすく、またコヒーレンス値の高さが寄与する可能性を示した。

5 TMS システムによる MEP 振幅の変動抑制

実際に TMS システムをオンラインで用いて、MEP 振幅の変動抑制に有用であるか否かを検証した。安静閉眼状態で検証した結果、トリガ閾値である $Coh(\alpha)$ を低値かつ $Coh(\beta)$ を高値に設定した場合に、MEP 振幅の変動が減少傾向を示した。

6 フィードバック型 TMS システムによる MEP 振幅の変動抑制

トリガ閾値次第では測定時間が長くなるため、被験者の状態の変化などにより得られる MEP データの精度が低下している可能性が考えられた。そこで、TMS システムにトリガ閾値を自動変更できる機能を追加したフィードバック型 TMS システムをオンラインで用いて、MEP 振幅の変動抑制に有用であるか否かを検証した。その結果、安静閉眼状態で $Coh(\beta)$ を高値に設定した場合に、各刺激に要する実験時間を制御し、かつ MEP 振幅の変動を抑制するシステムとしての有用性が示された。

7 まとめ

左右脳電位の相似性を指標とした脳波コヒーレンス解析を用いた TMS システムは、MEP 振幅の変動抑制に有用であることがわかった。術中 MEP への応用を想定した場合、フィードバック型 TMS システムは測定時間の非効率な延長を回避しながら MEP 振幅の変動を抑制可能であることから、神経機能評価の精度向上に寄与すると思われる。本研究により、慌ただしく変化する手術進行に合わせた、精度の高い MEP 導出を可能にする臨床応用への道筋を示した。

8 参考文献

- [1] Pellegrini M, Zoghi M, Jaberzadeh S. The effect of transcranial magnetic stimulation test intensity on the amplitude, variability and reliability of motor evoked potentials. Brain Res. 2018, 1700, 190-198.
- [2] Kiers L, Cros D, Chiappa K, Fang J. Variability of motor potentials evoked by transcranial magnetic stimulation. Electroencephalogr clin Neurophysiol. 1993, 89(6), 415-423.