

審査の結果の要旨

論文題目 : Effects of Neuromuscular Electrical Stimulation on
Voluntary Motor Control in the Lower-limb Muscles
(神経筋電気刺激が下肢筋の随意制御に与える影響)

論文提出者氏名 山口 明子

本博士論文は、脳卒中片麻痺など神経疾患に起因する歩行障害のリハビリテーションへの還元を目指し、神経筋電気刺激 (NMES) が有する神経生理学的効果の解明をその最終目的としている。この最終目的に迫るために、本論文では、NMES が下肢筋の随意制御に与える影響を解明することを目標とした。この目標達成のために、まず随意運動単独時の下肢運動制御を、力調節とその背景にある神経機序の側面から検証し、次に、NMES の随意運動との併用による効果を、中枢神経興奮性の時系列変化と運動制御という二つの側面から検証している。

論文は、すべて健常被検者を対象とする 1 から 3 の研究により構成されている。

研究 1 では、足関節背屈の力調節課題における、両側同時運動および利き足の影響を検証した。その結果、両側同時運動時には一側運動時に比べて力発揮のエラーが増大し、力発揮が不安定となった。しかしそれは Tonic (5 秒間筋収縮を維持する) 課題のみであり、Ballistic (瞬間的に筋を収縮する) 課題では観察されなかった。また、力調節に利き足の影響はなかった。本研究から、一側運動時には半球間抑制によるパフォーマンスの向上が生じることが示唆された。また課題間での神経制御の違いが推察された。

研究 2 では、研究 1 を踏まえ、両側同時運動と一側運動の神経機構を解明すること、Tonic 課題と Ballistic 課題間に皮質脊髄路興奮性に違いがあるかを検証することを目的とした。本実験では経頭蓋磁気刺激 (TMS) を用いて、前脛骨筋から皮質脊髄路興奮性の指標である運動誘発電位 (Motor evoked potential: MEP) を記録した。条件は両側同時運動および一側運動とし、TMS を運動準備段階、筋収縮直後、筋収縮持続期 (Tonic 課題のみ) に施行し MEP の振幅値を評価した。その結果、運動の準備段階においてのみ、両側同時運動に比べ一側運動時に有意 ($p<0.05$) な皮質脊髄路興奮性の増大が観察された。

研究 3 では、これまでの研究を踏まえ、一側性に前脛骨筋に NMES 介入を行い、その最中の皮質脊髄路興奮性の時系列変化および、刺激終了後の足関節力調節への影響を調べた。課題は足関節背屈力発揮 (20%最大収縮力) とし、条件は、(1) NMES 単独、(2) NMES と随意運動の併用、(3) 随意運動単独とした。各 16 分間の介入最中および終了後の MEP 変化ならびに足関節の力調節を評価した。その結果、併用条件および随意運動単独条件では電気刺激開始直後から急激な MEP の増大を認め、介入終了まで持続した。一方 NMES 単

独では有意な変化は認められなかった。また先行研究と異なりその変調は持続せず、電気刺激が終了すると直ちにベースラインへと戻った。力調節の精度は全条件ともに変化を認めなかった。以上から NMES と随意運動の併用が速やかな脊髄上中枢神経興奮性の変調に有効であることが示された。おそらく随意運動における運動準備段階からの脳活動状態の賦活が、電気刺激による体性感覚入力が増大によりさらに修飾されることが上記した結果の背後にあると推察された。しかし短時間の介入では効果は一過性であったため、より長時間の介入の効果は異なることが示唆された。また健常人においては、今回用いたような低強度、短時間の電気刺激では固有感覚情報が変化しても運動遂行に影響を与える可能性は低いことが示された。これはおそらく求心性入力増大に伴う感覚運動統合の賦活によるものと考えられた。

研究 1,2 の結果から、両側運動時に比べ一側運動時により優れた力調節が可能であること、運動準備段階での皮質脊髄路興奮性増大することが推察された。また、下肢の力調節において利き足は影響しないことが明らかとなった。おそらく下肢の運動機能が歩行や階段など、左右対称性の運動制御を多く要するためと考えられる。研究 3 から、能動的な運動と電気刺激の組み合わせが中枢神経系の急激な変調をもたらすことが示された。中枢からの随意出力と、末梢からの感覚入力が増大が相互作用をもたらし、シナプス伝達が向上したためと推察された。研究 2 の結果から、随意出力に応じた運動準備段階での脳活動賦活も寄与していると思われる。また随意運動との併用が有効とするこれまでの定説を支持する結果が得られたが、より能動的かつ固有感覚情報入力を伴う運動が神経可塑性に有効と考えられる。更に、低刺激短時間の NMES が随意運動制御に影響する可能性は低いことが示唆されたが、電気刺激最中の効果に関しては不明であった。

以上、審査会ではいくつかの修正を要する点が指摘されたが、本質的結果の信頼性が高く、その価値が損なわれるものではないことから、結果の解釈にかかわる数箇所の修正が為されれば博士（学術）の学位に十分値することが全会一致で承認された。本論文の結果の一部は、既に主要な国際誌に原著論文として掲載されている。この事実は関連する学会からもその学術的価値が認められたことの証左であって、本論文の学術的意義をゆるぎないものとしている。

以上を総合的に審議した結果、本審査委員会は本論文が博士（学術）の学位を授与するにふさわしいと認定するものである。