

第14回杏林医学会研究奨励賞受賞報告

松 嶋 真 哉

保健学部リハビリテーション学科 理学療法学専攻

この度は杏林医学会研究奨励賞を賜り、大変光栄に存じます。ご選考いただきました選考委員の先生方ならびに杏林医学会の先生方、事務局の皆様にご心より御礼申し上げます。また、本研究の計画立案・遂行、発表に際し、熱心にご指導いただきました柴田茂貴教授、木村雅彦教授、そしてご協力いただいた共著者の皆様に深く感謝申し上げます。

受賞対象論文は「Effect of low-frequency neuromuscular electrical stimulation combined with passive cycle ergometry on hemodynamics in healthy adults (Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2025; 328: R81-R89)」です。本研究は、低周波数神経筋電気刺激 (low-frequency neuromuscular electrical stimulation: LF-NMES) と受動的自転車運動 (passive cycle ergometry: PCE) を組み合わせた際の循環動態への影響を検討したものです。LF-NMESは、随意運動が困難な患者に対して筋収縮を誘発し、筋量や代謝機能の維持を目的に広く応用されていますが^{1,2)}、その循環応答、特に心拍出量 (cardiac output: CO) や末梢血流動態への影響は十分に明らかにされていませんでした。

これまでの先行研究では、NMESは骨格筋ポンプを介して静脈還流を促進し、心拍出量を増加させ得ることが報告されています^{3,4)}。一方で、刺激頻度や出力の設定、筋収縮のタイミングによっては心臓が血液を拍出するタイミングで過剰な筋収縮が引き起こり、末梢血管抵抗が上昇して循環効率が低下する可能性も指摘されています⁵⁾。すなわち、NMESによる循環反応は「筋ポンプ作用による前負荷の増加」と「筋収縮による後負荷の増大」という相反する生理作用のバランス上に成り立っており、その最適化は未解明の課題でした。さらに、臨床応用においては、安静時でも安全かつ安定した循環負荷を得る刺激条件や補助手段を確立する必要があります。

そこで本研究では、NMESに受動的下肢運動 (PCE) を組み合わせることにより、静脈還流の増加が心拍出量に

与える影響を定量的に検証しました。健康成人13名を対象に、同一酸素摂取量 (14 mL/kg/min) 条件下でLF-NMES単独、LF-NMES+PCE、随意的自転車運動 (voluntary cycle ergometry: VCE) の3条件を比較し、CO、一回拍出量 (SV)、左室拡張末期容量 (LVEDV)、動静脈酸素較差 (A-V O₂ 差) などを詳細に解析しました。その結果、LF-NMES単独ではLVEDV、SVおよびCOが低く、A-V O₂ 差と血中乳酸値が高値を示し、末梢循環不全の状態が示唆されました。一方、PCEを併用することでLVEDV、SV、COはいずれも有意に増加し、血中乳酸濃度は低下しました。これは、受動的運動による機械的ポンプ作用が前負荷を高め、LF-NMES単独でみられた循環効率の低下を補正することを示しています。

本研究の着眼点は、NMESを単なる筋活動補助ではなく、「循環調節を目的とした生理刺激」として再定義した点にあります。従来の研究は筋量維持や代謝促進を主目的としていましたが、本研究では心拍出量の構成要素である一回拍出量と末梢酸素利用能の両面から、NMESとPCE併用の循環生理学的メカニズムを定量的に明らかにしました。これにより、NMESを基盤とした受動的有酸素運動の新たな概念を提示し、重症患者などに使用する際の刺激設定や介入方法を検討する一助となる知見を得ました。また、従来のNMES療法では筋収縮強度や疼痛耐性に制約がありましたが、より良い循環反応を得つつ十分な筋収縮を引き出す刺激条件の確立が今後の課題であり、その最適化が安全かつ効果的な臨床応用につながると考えられます。

今後は、患者群を対象とした臨床応用の検証に加え、心拍と筋収縮の同期制御による血流促進効果の最適化、さらに長期臥床や微小重力環境下における心筋萎縮予防などへの展開を目指します。本研究の成果が、電気刺激を基盤とした新たなリハビリテーション戦略の確立に寄与することを期待しております。

参考文献

- 1) Trethewey SP, Brown N, Gao F, Turner AM: Interventions for the management and prevention of sarcopenia in the critically ill: a systematic review. *J Crit Care* 50: 287-295, 2019.
- 2) Wageck B, Nunes GS, Silva FL, Damasceno MCP, de Noronha M: Application and effects of neuromuscular electrical stimulation in critically ill patients: systematic review. *Med Intensiva* 38: 444-454, 2014.
- 3) Man IO, Lepar GS, Morrissey MC, Cywinski JK: Effect of neuromuscular electrical stimulation on foot/ankle volume during standing. *Med Sci Sports Exerc* 35: 630-634, 2003.
- 4) Williams KJ, Ravikumar R, Gaweesh AS, Moore HM, Lifshitz AD, Lane TRA, Shalhoub J, Babber A, Davies AH: A review of the evidence to support neuromuscular electrical stimulation in the prevention and management of venous disease. *Adv Exp Med Biol* 906: 377-386, 2017.
- 5) Sasaki KI, Matsuse H, Akimoto R, Kamiya S, Moritani T, Sasaki M, Ishizaki Y, Ohtsuka M, Nakayoshi T, Ueno T, Shiba N, Fukumoto Y: Cardiac cycle-synchronized electrical muscle stimulator for lower limb training with the potential to reduce the heart's pumping workload. *PLoS One* 12: e0187395, 2017.