

## OS2-2

## ロボットアシストによるステップング条件変更で生じる脊髄反射興奮性変化

## Modulation of Spinal Reflex Excitability by Changes of Robotic-Assisted Stepping Condition

○ 上林清孝 (筑波大学) 中島剛 (国立障害者リハビリテーションセンター) 中澤公孝 (東京大学)

Kiyotaka KAMIBAYASHI, University of Tsukuba

Tsuayoshi NAKAJIMA, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

Kimitaka NAKAZAWA, The University of Tokyo

**Abstract:** By using a robotic gait orthosis, we investigated how the spinal reflex excitability in the soleus muscle is modulated by changing stepping conditions such as stepping speed and motion of the lower limbs during passive stepping. The spinal excitability in the soleus muscle was assessed by amplitude of the Hoffmann reflex (H-reflex) evoked by an electrical stimulation to the posterior tibial nerve. At faster stepping speed, the pattern of the reflex modulation was not changed, but the reflex excitability was inhibited throughout the step cycle. When only contralateral leg was moved passively, the soleus H-reflex in the stationary one was inhibited and modulated phase-dependently. Therefore, it was indicated that the H-reflex excitability in the soleus muscle is down-regulated by somatosensory inputs, most likely from muscle spindle primary endings, both ipsi- and contralaterally.

**Key Words:** Hoffmann Reflex, Robotic Assistant, Locomotion, Sensory Input, Passive Stepping

## 1. はじめに

脊髄損傷や脳卒中などによって歩行に障害が生じた患者に対し、体重を免荷してトレッドミル上で歩行を繰り返す免荷式歩行訓練が歩行機能の再獲得に向けて実施されている<sup>(1-3)</sup>。重度の歩行機能障害者に対してはセラピストが患者の下肢を徒手で歩行様に動かすことで訓練が行われるが、歩行動作の安定性向上やセラピストに対する身体的負荷の軽減を目指し、近年ではロボットによる歩行支援装置が研究開発されている<sup>(4,5)</sup>。このような装置では歩こうと努力しなくても歩行動作が可能となり、受動ステップングとなる。その際には歩行に関わる上位中枢から指令がかなり減弱されている一方で、末梢の体性感覚からは歩行動作で生じる情報がフィードバックされているものと考えられる。これまで我々はこの受動ステップングを実験課題として用いることで、歩行における体性感覚入力から神経経路の興奮性変化に影響しているのか研究を進めてきた<sup>(6-8)</sup>。それらの神経経路の一つは、筋紡錘で筋の長さ・速度変化を感知して Ia 感覚神経線維によって脊髄運動ニューロンへ単シナプス接続する脊髄反射路である。この反射は感覚神経への経皮的電気刺激によっても誘発可能であり、Hoffmann reflex (H 反射) と呼ばれる<sup>(9)</sup>。通常歩行でのヒラメ筋における H 反射の興奮性は歩行の位相に依存して変化し、立脚期に比べて遊脚期に抑制されることが知られている<sup>(10-12)</sup>。先行研究において我々は、ロボットアシストによる受動ステップングにおいてもヒラメ筋 H 反射は遊脚期に抑制されることを観察し、ステップングで惹起された感覚入力によっても通常歩行と同様のパターンで H 反射興奮性が変調されることを報告した<sup>(7)</sup>。しかしながら、この反射変化にどのような感覚入力に関与しているのか、またステップング速度などの条件を変更することでどのような影響が生じるのか明らかではない。そこで本研究では、ロボットアシストによる受動ステップングの条件を変えることでヒラメ筋の H 反射興奮性変化を調べることにした。

## 2. 方法

## 2-1 被験者

神経疾患の既往歴のない健常成人 14 名が被験者として本実験に参加した。実験は倫理委員会の承認を受け、被験

者に対して実験内容を十分説明したうえ、参加同意書に署名を得た。

## 2-2 ステッピング条件

受動ステップングはロボット型歩行支援装置 Lokomat® (Hocoma 社製) によって行われた。受動ステップング中、被験者はできる限りリラックスし、ロボットアシストによる下肢の動きを妨げないよう指示された。ステップング速度による反射興奮性の変化を調べる実験 1 では、ステップング速度を 1, 2, 3 km/h の 3 段階に設定し、トレッドミル上で受動ステップングを実施した。実験 2 ではステップング速度を 1.5 km/h とし、両側肢ステップング (Bilateral)、計測肢のみの同側ステップング (Ipsilateral)、対側肢のみの対側ステップング (Contralateral) の 3 条件を設定した。この実験 2 では免荷装置で体重を完全免荷し、空中での受動ステップングとした。

## 2-3 測定

反射を測定する右下肢にて、表面電極による筋電図を大腿直筋、大腿二頭筋、ヒラメ筋、前脛骨筋の 4 筋で、関節角度を股関節、膝関節、足関節の 3 関節で、踵接地のタイミングを圧センサで計測し、全信号をサンプリング周波数 2 kHz で A/D 変換した。

## 2-4 H 反射計測

ヒラメ筋 H 反射は、右下肢の後脛骨神経への経皮的電気刺激 (1 ms 矩形波) によって誘発した。実験 1 の速度変更条件では 1 ステップサイクルを 8 分割し、各フェーズで H 反射を記録した。また、トレッドミル上での立位姿勢でも H 反射を計測した。実験 2 では空中での立位姿勢と受動ステップングの 6 つの歩行フェーズにて反射を計測した。両実験とも、立位姿勢やステップングの各フェーズで、最大上刺激によって最大 M 波 (Mmax) 振幅を計測した後、Mmax の 10% に相当する M 波振幅を誘発する刺激強度にて H 反射を計測した。この 10% Mmax に相当する M 波振幅によって、刺激強度の一致性を確認した。各フェーズで 10 回以上の H 反射を誘発した。

## 2-5 解析

電気刺激によって誘発された M 波と H 反射は、peak-to-peak 振幅で評価し、各フェーズでの Mmax 振幅値で正規化した。刺激前 50 ms 間での筋電信号の root mean

square 値を背景筋活動レベルとして求めた。実験 1 では 3 段階のステップング速度と 8 つのステップフェーズの 2 要因で、実験 2 では 3 種の下肢ステップング条件（両側、同側、対側）と 6 つのステップフェーズの 2 要因で、反復測定による分散分析を行った。分散分析で有意差がみられた場合には多重比較を行った。有意水準は  $p = 0.05$  とした。値はすべて平均  $\pm$  SE で示した。

### 3. 結果

6 名の被験者が参加した実験 1 の受動ステップングにおいて、大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋の筋活動はほとんど観察されなかったが、ヒラメ筋では立脚期後半に筋活動がみられた（図 1）。M 波振幅は一定であることから条件間に刺激強度の相違は生じていなかったが、H 反射は立脚中期を除いて立位時よりも抑制され、先行研究<sup>(7)</sup>と同様に 3 つの速度条件ともに遊脚初期に抑制が強くあらわれた（図 1）。1 歩行周期を通じて、3 つの速度条件は同様の反射変調パターンを示したが、速度が速いほど全体的に反射振幅が小さく、ステップング中により抑制されていた。H 反射に対する分散分析では、速度 ( $p < 0.01$ ) とフェーズ ( $p < 0.05$ ) の各要因で有意な差がみられた。

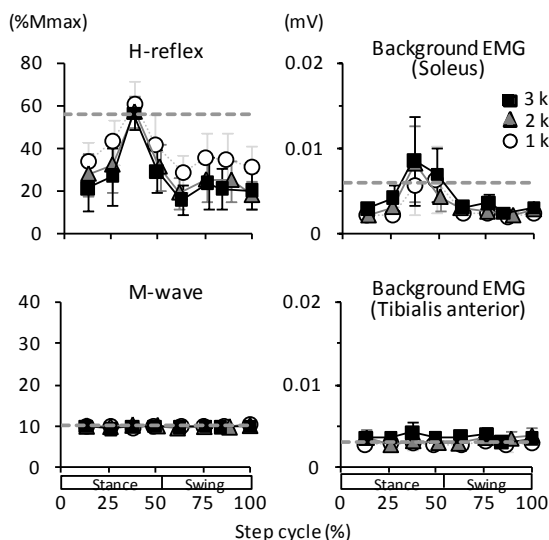


Fig. 1 Averages of the soleus M-wave and H-reflex amplitudes and background EMG levels of the soleus and tibialis anterior muscles at 8 phases of passive stepping at 3 different speeds. Horizontal dashed lines represent mean values during standing.

8 人の被験者が参加した実験 2 では、空中でのステップングであることから、立脚期に相当するフェーズでヒラメ筋の筋活動はみられなかった。そのため、実験 1 のような立脚後期でのヒラメ筋 H 反射振幅の増加はみられなかったが、両側肢ステップングや同側肢ステップングでは立位時に比べてステップング中に強く抑制された（図 2）。両側肢ステップングと同側肢ステップングでは対側肢がステップング様に動かされているか否かの相違となるが、抑制度合いはほぼ同様であった。一方、測定肢が静止しており、対側肢のみが受動ステップングを行っている対側肢条件で、静止している肢の H 反射は立位条件よりも低下し、対側肢から抑制性的影響が観察された（図 2）。なかでも対側肢が遊脚中期に相当する位相で最も反射が抑制された。H 反射の分散分析結果から、ステップング条件 ( $p < 0.05$ ) およびステップング条件  $\times$  フェーズの交互作用 ( $p < 0.05$ ) で有意差が認められた。

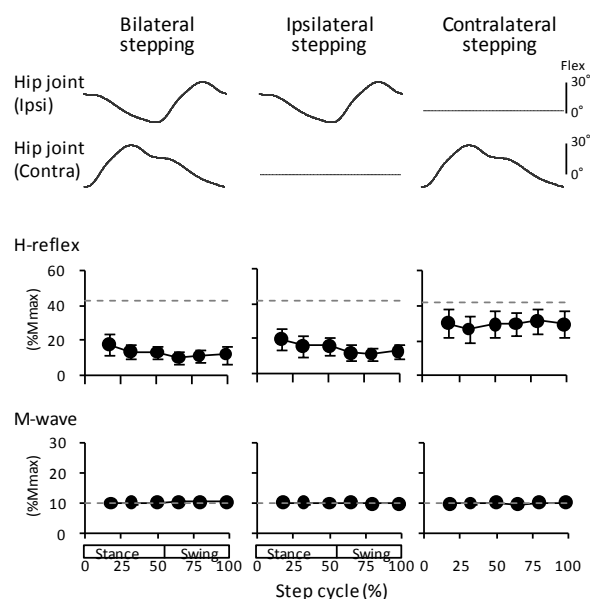


Fig. 2 Hip joint trajectories of ipsilateral and contralateral limbs to a stimulated limb and mean H-reflex amplitude in the soleus muscle at 6 phases. Horizontal dashed line represents mean H-reflex amplitude during standing.

### 4. 考察

ロボットアシストによる受動ステップング時に、大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋では筋活動がみられず、ステップングに対する上位中枢からの下行性指令はかなり弱められていたと思われる。ヒラメ筋では実験 1 のトレッドミル上でのステップングで筋活動がみられたが、実験 2 の空中でのステップングでは生じていなかったことから、この筋では荷重関連の感覚入力や筋伸張の感覚入力による反射由来の筋活動が生じたものと思われる<sup>(13-14)</sup>。

ヒラメ筋 H 反射は受動ステップング中に歩行の位相に依存した変化を示し、その反射振幅は立脚中期に増加し、遊脚初期に低下した。このステップ位相に応じた反射の変化パターンは通常歩行時と同様であった<sup>(10-12)</sup>。ステップング速度の違いによって変調パターンに変化は生じなかったが、速度が速いほど全体的に反射が抑制される傾向であった。したがって、ステップング速度の増加による体性感覚入力の付加がヒラメ筋 H 反射を抑制したものと考えられる。ステップングにおける関節の可動範囲は 3 つのステップング速度間で同じであったことから、筋長自体よりも筋伸張の速度変化がステップング速度増加による反射抑制に関与したものと推察される<sup>(15)</sup>。実験 2 では、両側肢条件と測定肢のみが動いている同側肢条件で反射の変化に大きな相違はみられず、受動ステップングでの反射抑制は主に同側肢からの感覚入力由来と考えられる。しかしながら、反射を測定する肢が静止し、対側肢のみが受動的に動かされた受動ステップング条件においても、H 反射は立位条件に比べて低下していたことから、対側肢からの体性感覚入力による抑制性的影響も生じているようである。同側肢からの感覚入力がすでに強く反射を抑制しているため、同側肢のみのステップングにおいて対側肢が静止している影響がみられなかったのであろう。このように、通常歩行でみられるヒラメ筋 H 反射の変調には、末梢性の体性感覚入力強く関連しているものと考えられ、反射抑制度合いには主に同側肢からの体性感覚入力が強く影響するようである。

## 参考文献

- (1) Wernig A, Müller S, Nanassy A, Cagol E, Laufband therapy based on 'rules of spinal locomotion' is effective in spinal cord injured persons, *Eur. J. Neurosci.*, vol. 7, 4, pp. 823-829, 1995.
- (2) Barbeau H, Fung J, The role of rehabilitation in the recovery of walking in the neurological population, *Curr. Opin. Neurol.*, vol. 14, 6, pp. 735-740, 2001.
- (3) Dobkin B, Barbeau H, Deforge D, Ditunno J, Elashoff R, Apple D, Basso M, et al, The evolution of walking-related outcomes over the first 12 weeks of rehabilitation for incomplete traumatic spinal cord injury: the multicenter randomized Spinal Cord Injury Locomotor Trial, *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 21, 1, pp. 25-35, 2007.
- (4) Colombo G, Joerg M, Schreier R, Dietz V, Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis, *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 37, 6, pp. 693-700, 2000.
- (5) Wirz M, Zemon DH, Rupp R, Scheel A, Colombo G, Dietz V, Hornby TG, Effectiveness of automated locomotor training in patients with chronic incomplete spinal cord injury: a multicenter trial, *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 86, 4, pp. 672-680, 2005.
- (6) Kamibayashi K, Nakajima T, Takahashi M, Akai M, Nakazawa K, Facilitation of corticospinal excitability in the tibialis anterior muscle during robot-assisted passive stepping in humans, *Eur. J. Neurosci.*, vol. 30, 1, pp. 100-109, 2009.
- (7) Kamibayashi K, Nakajima T, Fujita M, Takahashi M, Ogawa T, Akai M, Nakazawa K, Effect of sensory inputs on the soleus H-reflex amplitude during robotic passive stepping in humans, *Exp. Brain Res.*, vol. 202, 2, pp. 385-395, 2010.
- (8) Nakajima T, Kamibayashi K, Takahashi M, Komiyama T, Akai M, Nakazawa K, Load-related modulation of cutaneous reflexes in the tibialis anterior muscle during passive walking in humans, *Eur. J. Neurosci.*, vol. 27, 6, pp. 1566-1576, 2008.
- (9) Pierrot-Deseilligny E, Mazevet D, The monosynaptic reflex: a tool to investigate motor control in humans. Interest and limits, *Neurophysiol. Clin.*, vol. 30, 2, pp. 67-80, 2000.
- (10) Capaday C, Stein RB, Amplitude modulation of the soleus H-reflex in the human during walking and standing, *J. Neurosci.*, vol. 6, 5, pp. 1308-1313, 1986.
- (11) Simonsen EB, Dyhre-Poulsen P, Amplitude of the human soleus H reflex during walking and running, *J. Physiol.*, vol. 515, 3, pp. 929-939, 1999.
- (12) Schneider C, Lavoie BA, Capaday C, On the origin of the soleus H-reflex modulation pattern during human walking and its task-dependent differences, *J. Neurophysiol.*, vol. 83, 5, pp. 2881-2890, 2000.
- (13) Dietz V, Müller R, Colombo G, Locomotor activity in spinal man: significance of afferent input from joint and load receptors, *Brain*, vol. 125, 12, pp. 2626-2634, 2002.
- (14) Lünenburger L, Bolliger M, Czell D, Müller R, Dietz V, Modulation of locomotor activity in complete spinal cord injury, *Exp. Brain Res.*, vol. 174, 4, pp. 638-646, 2006.
- (15) Brooke JD, Cheng J, Collins DF, McIlroy WE, Misiaszek JE, Staines WR, Sensori-sensory afferent conditioning with leg movement: gain control in spinal reflex and ascending paths, *Prog. Neurobiol.*, vol. 51, 4, pp. 393-421, 1997.