

Split-belt トレッドミルにおける免荷歩行時の運動学習

Gait adaptation during body weight support walking in split-belt treadmill

○ 佐藤浩司（芝浦工大） 横山光（東大） 山本紳一郎（芝浦工大） 河島則天（国リハ研）

Koji SATO, Shibaura Institute of Technology  
Hikaru YOKOYAMA, University of Tokyo  
Shin-ichiro YAMAMOTO, Shibaura Institute of Technology  
Noritaka KAWASHIMA, National Rehabilitation Center for persons with Disabilities

**Abstract:** Split-belt treadmill walking has been recently used as a tool to investigate the process of learning during walking. The experimental paradigm consists of baseline, gait on two independently controlled belts drive at two deferent speed (adaptation), and then walking on the treadmill with tied belt speed (washout). In the present study, we aimed to determine whether aftereffects following the body weight support (Normal) walking adaptation will transfer to normal (body weight support) walking. Results shows that step length symmetry was garadually changed time during adaptation period, and then, occurred aftereffect both conditions in catch trials. But, aftereffects size were larger at the same condition that was used during adaptation period in both conditions. Our results suggest that learning effect is interfer between normal and body weight support walking. It is likely that nurvus system is not shared between normal and body weight support walking.

**Key Words:** gait, motor learning, locomotor adaptation, body weight support

1. 背景

近年，歩行運動の学習プロセスを検討する手段として，左右2枚のベルト速度を独立に制御可能な Split-belt トレッドミルが用いられている<sup>(1)</sup>。一方のベルト速度が反対のベルト速度より2倍速い環境下で歩行をさせると，初めは歩容が著しく乱れるが，時間経過に伴い徐々に安定した歩行運動が獲得される。その後，左右のベルト速度を対称に戻した際には，一時的に歩容が乱れる。この現象は後効果と呼ばれ，左右非対称なベルト速度への学習の程度を反映することが先行研究で明らかにされている。また，後効果の大きさは学習した運動や環境に依存するため，関連性のある運動への学習の転移の度合いを，後効果の大きさから推察することができる。例えば，トレッドミル上での学習後に平地歩行を行うと後効果が表れるもののその程度は小さく（部分的に学習転移が起きる）<sup>(2)</sup>，また，前歩きでの学習後に後歩きを行っても後効果が生じない（双方の学習は転移しない）<sup>(3)</sup>，という結果が報告されている。

体重を部分的に免荷した状態での歩行は，リハビリテーション現場で行われる有効な方法である。免荷が歩行動作に及ぼす影響を検討した研究では，通常歩行と比較して免荷40%歩行のステップ長は短くなる<sup>(4)</sup>との報告がある。もし，免荷40%歩行と通常歩行が異なる運動パターンなら，学習効果の転移に重要な条件の一つと考えられる。

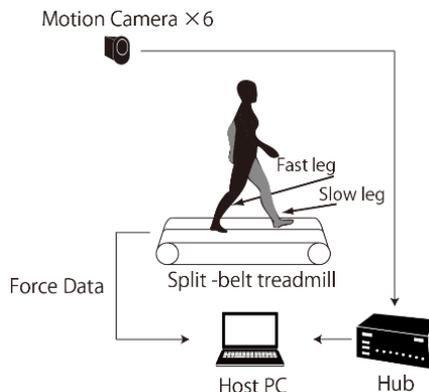


Fig.1:experimental set-up

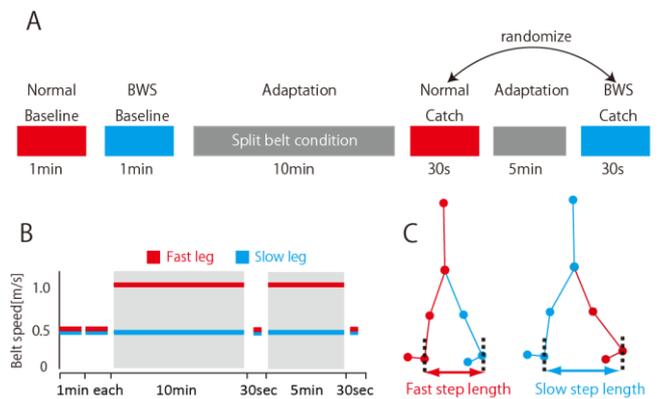


Fig.2. A:experimental protocol, B:Speed change for experiment, C: slow and fast step lengths during early adaptation.

そこで本研究では，免荷／非免荷条件下での学習効果が非免荷／免荷条件下での歩行に転移するかを検討することを目的とした。

2. 実験方法

本実験では，健康成人男性8名(23.9±2.30歳)を対象に左右のベルト速度を独立に制御可能な Split-belt トレッドミルを用いて，左右非対称な環境に対する歩行の学習実験を行った。実験は非免荷（Normal条件）と免荷40%（BWS条件）での学習実験を2条件行った。実験の影響が出ないように二日間に分けて実施した。

2.1 実験システム

Split-belt トレッドミル(Bertec社製)を用いて歩行課題を行い，トレッドミルに内蔵されている床反力計から得られたデータをサンプリング周波数1000Hzで計測した(Fig.1)。三次元動作解析システムを用いて，身体標点10カ所のマーカ座標をサンプリング200[Hz]で取得した。

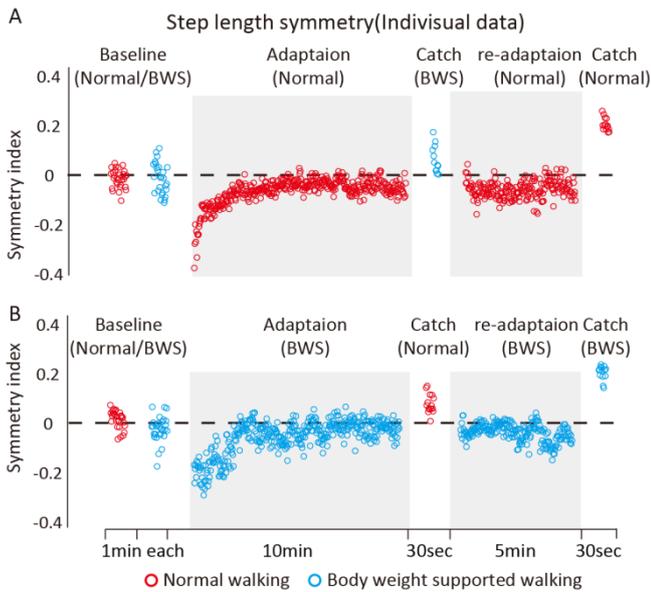


Fig.3. Single participant step-by-step plots of changes in step length symmetry. 0 value indicate perfect symmetry. A: Normal split condition B: BWS split condition.

2.2 実験手順

Baseline として、Normal, BWS 条件でのトレッドミル歩行をそれぞれ 1 分間行った後、歩行学習のための adaptation 期として片側のベルトに対して、一方のベルト速度が 2 倍速い歩行環境での歩行を Normal, BWS 条件それぞれ、10 分間行った。本研究では、両条件間の転移を検討する必要氏江から、10 分間の adaptation 期の直後に一方の条件の後効果を検証する catch trial①を、さらに再学習のための re-adaptation 期を 5 分間行った後に、他方の条件の後効果を検証する catch trial②を実施した。catch trial での両条件の順序効果が影響しないように免荷の有無はランダムに行った (Fig.2A)。

2.3 分析方法

歩行周期の同定には床反力鉛直成分を用いた。ステップ長は踵接地時の左右肢の外踝マーカーの距離から算出し、ベルト速度が速い側の肢を Fast step length, 遅い側を Slow step length と定義した (Fig.2C)。学習効果を定量的に評価するために左右非対称性の指標である symmetry index を用いた (Eq.1)。正值は Fast step length が長く、負値は Slow step length が長いことを示す。0 は左右対称を示す。catch trial の最初 5 歩を定量値として算出した。

$$\text{Symmetry index} = \frac{(\text{Fast leg} - \text{Slow leg})}{(\text{Fast leg} + \text{Slow leg})} \quad (\text{Eq.1})$$

Fast leg; ベルト速度が速い側 Slow leg; ベルト速度が遅い側

3. 結果

Fig.3A に Normal 条件におけるステップ長 symmetry index の典型例を示す。Adaptation 初期に左右非対称性が増加し、時間経過に伴い左右対称に近づく変化がみられた。続いて、catch trial として BWS 条件での歩行させると後効果が生じた。再学習した後の Normal 条件での catch trial でも後効果がみられ、BWS での後効果に比べて大きい傾向がみられた。Fig.3B に BWS 条件におけるステップ長 symmetry index の典型例を示す。Normal 条件と同様に

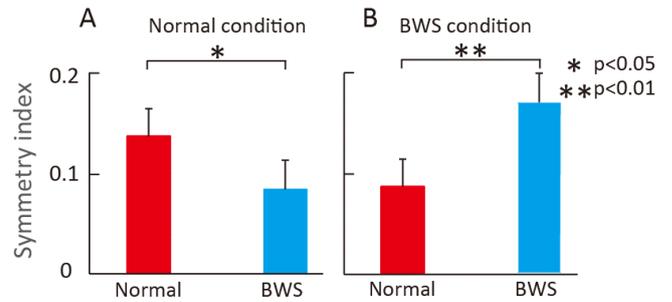


Fig.4: Comparison of the step length symmetry between catch trials. A: Normal split condition. B: BWS split condition. Asterisk indicate statistically significant differences between catch trials.

Adaptation 初期に左右非対称性が増加し、時間経過に伴い左右対称に近づく変化がみられた。続いて、catch trial として Normal 条件における歩行時に後効果が生じた。再学習後の BWS 条件での catch trial でも後効果がみられ、Normal 条件での後効果に比べて大きい傾向がみられた。

Fig.4A には、Normal 条件における catch trial での後効果、B には BWS 条件における catch trial の群間平均データを示す。いずれの条件においても、adaptation 期の免荷状態と同様の catch trial 時の後効果が有意に高値を示した。

4. 考察

本研究では免荷、非免荷条件において学習された歩行が学習環境とは異なる歩行環境に対する影響を後効果を用いて検討した。

BWS 条件で学習された歩行では、Normal に対しての後効果が有意に低値を示した。同様に、Normal 条件で学習された歩行は BWS に対しての後効果が有意に低値を示した。すなわち、学習環境と同一の環境で歩行した場合には学習効果の転移が大きくなり、異なる場合には学習効果の転移が小さくなることを示された。本実験の結果はトレッドミル上での学習効果は平地歩行に対して部分的な転移が生じる<sup>(2)</sup>という報告と類似した。また、学習時の環境や運動に依存した後効果が生じることを支持する結果を示した。これより、免荷の有無が学習時の詳細な条件因子に含まれることが示唆された。

参考文献

- (1) Reisman, D. S., H. J. Block, and A. J. Bastian, Interlimb coordination during locomotion: what can be adapted and stored? *J Neurophysiol*, Vol. 94, No.4, pp.2403-15,2005.
- (2) Torres-Oviedo, G. & A. J. Bastian, Natural error patterns enable transfer of motor learning to novel contexts. *J Neurophysiol*, Vol. 107, No. 1, pp346-56, 2012
- (3) Choi JT, Bastian AJ. Adaptation reveals independent control networks for human walking. *Nat Neurosci*, Vol. 10, No.8, pp.1055-62, 2007.
- (4) Lewek, M. D, The influence of body weight support on ankle mechanics during treadmill walking. *J Biomech*, Vol. 44, No.1, pp. 128-33, 2011
- (5) Choi, J. T., P. Jensen, J. B. Nielsen, and L. J. Bouyer. Error signals driving locomotor adaptation: Cutaneous feedback from the foot is used to adapt movement during perturbed walking. *J Physiol*. 2016. In press.