

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16515

研究課題名(和文) ヒトの歩行と走行を区別する行動科学的決定要因の同定

研究課題名(英文) Identification of behavioral determinants distinguishing walking and running gait in humans

研究代表者

小川 哲也(Ogawa, Tetsuya)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：60586460

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの歩行と走行は通常、各々で獲得したトレーニング効果を共有しないが、これを決定づける行動科学的要因を同定し、今後、効果の共有を可能とする条件介入の可能性を検討した。分離型トレッドミル上において、歩行の学習では足の接地に伴う力調節が重要な役割を担い、離地時の後方へと蹴る力調節はほとんど影響しなかった。一方、走行では接地と離地の力調節がともに学習に関係した。ただ歩行時でも、後方から体幹部分を水平方向にけん引する力場を加えると、通常は走行にのみ認められた離地時の力調節に学習成分が観察された。この特性は、高い歩行速度に特異的だった。力場の付加により歩行の学習効果が走行に及び可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：We have previously reported that human walking and running do not share the training effect acquired in each mode. The present study attempted to reveal the possible determinant that identifies each locomotion mode from the behavioral aspects to allow consideration of possible intervention to enable sharing of the training effects in the future. By focusing on locomotor adaptation on a split-belt treadmill, while left-right force adjustments in the braking component of the ground reaction force played a significant role in the adaptation of walking, the propulsive component did not. However, an addition of force field to pull the trunk region of the subject backward enhanced the emergence of the adaptive behavior in the propulsive component that can be observed only in running gait and not in normal walking. The addition of the force field thus enhance an acquisition of the adaptive component in walking that resemble adaptation of running.

研究分野：運動神経生理学

キーワード：運動学習 ロコモーション

1. 研究開始当初の背景

ヒトの移動運動における主要なモードである歩行と走行は、ともに、下肢の各関節が固有のタイミングで屈曲と伸展を繰り返すことで実現する。従って、各関節の動きに関与する筋と、それらを支配する運動ニューロンも大部分がモード間で共有される。

一方で申請者らは近年、一見すると類似点の多い歩行と走行も、その制御機構に焦点をあてると、それぞれに独立性の高い神経基盤が内在する可能性を運動学習に基づいた行動科学研究手法によって明らかにしてきた (Ogawa et al. 2012; 2015; 2015)。左右分離型トレッドミル上における特殊な力学的制約下で生じる学習効果について、歩行、走行、それぞれのモードで獲得された学習効果はモード間で共有されず、互いに独立して保存されることを既に報告してきた。すなわち、歩行と走行は、単に速度が遅い (歩行) や速い (走行) 運動という区別でなく、中枢神経系はそれぞれの運動モードを、個別の運動として表現していることがわかった。この結果は、異なる移動運動モードが、各々に固有の神経基盤の活動によって実現する、という動物研究において明らかにされてきた神経制御メカニズムがヒトでも共有されている可能性を強固に支持するものである。すなわち、スポーツやリハビリなどのトレーニングを念頭に置くと、歩行機能向上のためのトレーニングは歩行でのみ成立し、走行の機能向上もまた、走行によってのみ実現する。各々で獲得されたトレーニング効果は他方に対して汎化しない。

ヒトの移動運動を司る神経基盤のモード特異性に関する研究では、歩行、走行の他、歩行内における異なる速度間 (Vasudevan and Bastian, 2010) や、異なる進行方向の歩行間で (Choi et al. 2007)、それぞれの課題条件に特異的な神経基盤が存在する可能性が示され、軒並み、国際的に評価の高い学術誌に報告されてきた。しかしながら、その一方で、各々の課題条件について、何の決定要因を以て独立性の高い神経基盤による制御となるのか、あるいは、何の要因を以て課題条件間で神経基盤は共有されるのか、といった議論はされてこなかった。そういった議論を深めることで、スポーツやリハビリでのトレーニング戦略の体系化が期待できると考えた。また、独立性が高いとみなされる課題条件間であっても、ある一定の要件を満たすことで他方へのトレーニング効果の汎化を可能とする新しい発想のトレーニング戦略構築につながることも期待できると考えた。

2. 研究の目的

従って、本研究では、申請者らがこれまで明らかにした、ヒトの歩行と走行の神経基盤について、これらを互いに個別の運動モードと決定する行動科学的要因を同定するとともに、今後、モード間でトレーニング効果の

共有を可能とする条件介入の可能性について左右分離型トレッドミル上の歩行や走行に生じる運動学習効果に基づいて検討することを目的とした。とりわけ、これらの運動により生じる地面反力と運動リズムの観点より検討した。

3. 研究の方法

左右分離型トレッドミル上における左右のベルト速度が互いに異なる力学的環境下で 10 分程度歩行や走行をすると、課された条件下でスムーズな運動を実現するための運動パターンが新規に獲得される。すなわち、学習が成立する。結果、その後の通常の運動環境 (左右のベルト速度が同じ) において左右非対称性の運動パターンが顕在化する (図 1 に実験条件の概要)。

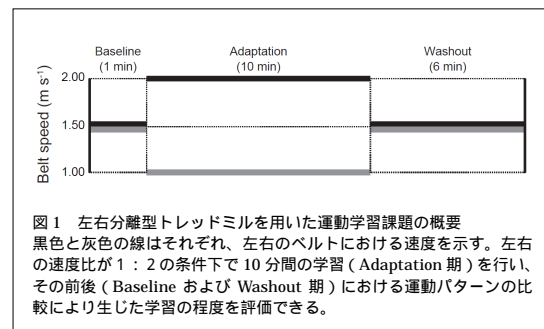


図 1 左右分離型トレッドミルを用いた運動学習課題の概要
黒色と灰色の線はそれぞれ、左右のベルトにおける速度を示す。左右の速度比が 1 : 2 の条件下で 10 分間の学習 (Adaptation 期) を行い、その前後 (Baseline および Washout 期) における運動パターンの比較により生じた学習の程度を評価できる。

力学的要素に関する検討

その際、左右脚の踏み込みにより生じる地面反力を詳しく調べると、歩行では足の接地に伴う左右の脚における力調節が重要な役割を担い、離地時の後方へと蹴る力調節は学習に対してほとんど影響が認められない一方で、走行時では接地と離地の両方の局面における力調節がともに学習に関係していた。

その上で、歩行であっても走行に特異的であった離地時の後方へと蹴る力調節における学習への関与を促す試みを行った。歩行時における体幹部分を後方からけん引する力場を加えることで、走行の学習において顕著だった後方へ蹴るための力調節に対しより注意を必要とする学習課題を行った。

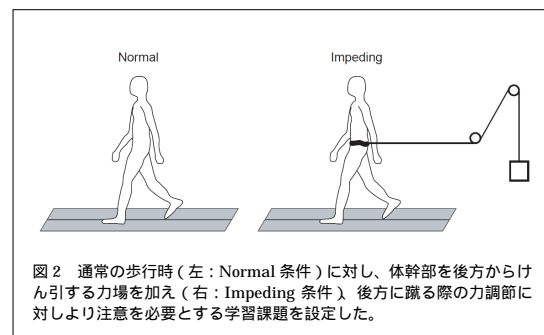


図 2 通常の歩行時 (左: Normal 条件) に対し、体幹部を後方からけん引する力場を加え (右: Impeding 条件) 後方に蹴る際の力調節に対しより注意を必要とする学習課題を設定した。

課題は、図 1 に示した学習 (Adaptation) 時の速度条件として、左右のベルトがそれぞれ 2.0 m/s および 1.0 m/s で動作する非対称速度を用い、また学習前後の通常歩行では左右がともに 1.5 m/s の対称速度とした実験 1 (Normal および Impeding 条件、各 12 名) と並行して、

学習時におけるベルト速度が左右それぞれ 1.0 m/s および 0.5 m/s (非対称) また、学習前後の通常歩行は 0.5 m/s (対称) とした実験 2 (Normal および Impeding 条件、各 9 名) をそれぞれ行った。

運動リズムに関する検討

歩行と走行を互いに区別する決定要因としての運動リズムの影響について検討した。申請者らは以前に、歩行と走行における異なる速度間での学習効果の転移について報告している (Ogawa et al. 2015)。実験条件として 2.0 m/s および 1.0 m/s で動作する非対称速度で歩行と走行の学習を別々に行い、その後、左右の速度が対称である 0.75 m/s、1.5 m/s、2.25 m/s の速度下で通常歩行または走行を行い、学習効果の汎化の程度を調べた (歩行学習課題および走行学習課題、各 16 名)。この実験で得られたデータより、新たに歩行と走行間の運動学習効果の汎化の程度と、運動リズムの関連性について検討した。

4. 研究成果

力学的要素に関する検討

後方からの体幹部のけん引を伴わない通常の歩行学習条件 (Normal 条件) では、申請者らのこれまでの報告と相容れるように、足の接地に伴って生じる前方への踏み込みに関連した地面反力成分に顕著な学習効果が確認でき (図 3 の黒線) 実際には 10 分間の学習後では、学習前との比較で左右非対称な踏み込み (すなわち、運動パターン) が起こっていることが見て取れる。また、後方への蹴りに伴って生じる地面反力成分では、学習の前後で大きな違いは確認できない (図 4 の黒線)。一方で、後方からの体幹部のけん引を伴う Impeding 条件では、前方への踏み込みの力について、学習に関連した変化が顕在化するこれまで通りの結果が確認できた (図 3 の赤線) ことに加えて、通常の歩行学習条件で

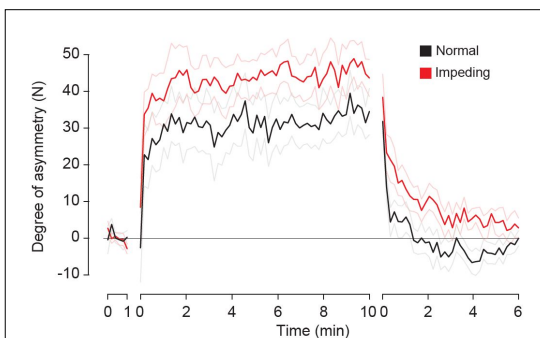


図 3 左右分離型トレッドミル上での 10 分間の歩行によって生じる足接地に伴う前方への踏み込みに関連した地面反力の時系列変化。力場の付加を伴わない Normal 条件 (黒線) と、伴う Impeding 条件 (赤線) の双方で顕著な学習効果が確認できる。

は現れない、後方への蹴りによって生じる地面反力成分でも学習に関連した変化が確認できた (図 4 の赤線)。これまで、走行のみ確認できた学習を反映した地面反力成分の変化を、本研究で用いた力場を付加する介入方法の採用により新たに歩行でも顕在化できることが示された。すなわち、この方法

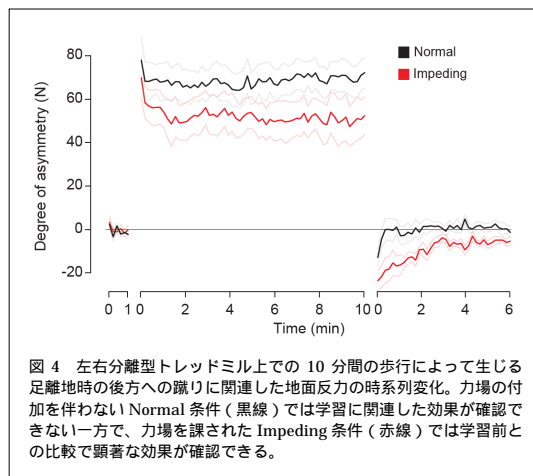


図 4 左右分離型トレッドミル上での 10 分間の歩行によって生じる足離地時の後方への蹴りに関連した地面反力の時系列変化。力場の付加を伴わない Normal 条件 (黒線) では学習に関連した効果が確認できない一方で、力場を課された Impeding 条件 (赤線) では学習前との比較で顕著な効果が確認できる。

により歩行で得られるトレーニング効果を、走行で得られるトレーニング効果に近づけることのできる可能性が明らかとなった。

このような結果は、トレッドミルのベルト速度に特異的に観察された。図 1 に示した、学習時の速度が左右各 2.0 m/s と 1.0 m/s であり、また、学習前後の通常歩行を 1.5 m/s の対称速度に設定した実験 1 (Normal および Impeding 条件) では前述の結果が認められた一方で、学習時におけるベルト速度を左右各 1.0 m/s と 0.5 m/s (非対称) とし、学習前後の通常歩行では 0.5 m/s (対称) と設定した実験 2 では、力場の付加による学習効果の違いは顕在化しなかった。すなわち、速度に対して特異的である可能性が示唆された。

運動リズムに関する検討

歩行と走行間での異なる速度間における学習効果の汎化の程度について調べた申請者らの報告では、実験条件として 2.0 m/s および 1.0 m/s で動作する非対称速度で歩行と走行の学習を別々に行い、その後、左右の速度が対称である 0.75 m/s、1.5 m/s、2.25 m/s の速度下で通常歩行または走行を行い、学習効果の汎化の程度を調べた。この実験で得られたデータより、新たに各々の運動実行時の運動リズムを算出し、運動学習効果における汎化の程度との関連性を調べた。歩行と走行はともに、速い速度 (2.25 m/s) 下では同等の運動リズムを示した (歩行学習条件後において 159.9 steps/min (歩行) vs. 165.3 steps/min (走行)、走行学習条件後では 158.4 steps/min (歩行) vs. 170.6 steps/min (走行)) 一方で、顕在化した学習効果はこれらの運動リズムの結果とは関係が認められなかった。ゼブラフィッシュの泳ぎ動作やマウスのステッピングを対象とした先行研究では、運動モードの違いは、運動のリズム (周波数) と対応づけて説明されてきたが、本研究の結果を受けてのヒトの歩行と走行間の運動モード違いは運動のリズムでは必ずしも決定されない可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計6件)

Tetsuya Ogawa, Hiroki Obata, Hikaru Yokoyama, Noritaka Kawashima, Kimitaka Nakazawa (2018) Velocity-dependent transfer of adaptation in human running as revealed by split-belt treadmill adaptation. *Experimental Brain Research*, 236(4): 1019-1029. (査読あり)

Hiroki Obata, Tetsuya Ogawa, Matija Milosevic, Noritaka Kawashima, Kimitaka Nakazawa (2018) Short-term effects of electrical nerve stimulation on spinal reciprocal inhibition depend on gait phase during passive stepping. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 38:151-154. (査読あり)

Hikaru Yokoyama, Kohtaroh Hagio, Tetsuya Ogawa, Kimitaka Nakazawa (2017) Motor module activation sequence and topography in the spinal cord during air-stepping in human: Insights into the traveling wave in spinal locomotor circuits. *Physiological Reports*, 5(22), e13504. (査読あり)

Hiroki Obata, Tetsuya Ogawa, Motonori Hoshino, Chiho Fukusaki, Yohei Masugi, Hirofumi Kobayashi, Hideo Yano, Kimitaka Nakazawa (2017) Effects of aquatic pole walking on reduction of spastic hypertonia in a patient with hemiplegia: a case study. *International Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 5: 401. (査読あり)

Hikaru Yokoyama, Tetsuya Ogawa, Masahiro Shinya, Noritaka Kawashima, Kimitaka Nakazawa (2017) Speed dependency in α -motoneuron activity and locomotor modules in human locomotion: indirect evidence for phylogenetically conserved spinal circuits. *Proceedings of the Royal Society B*, 284: 20170290. (査読あり)

Hikaru Yokoyama, Tetsuya Ogawa, Noritaka Kawashima, Masahiro Shinya, Kimitaka Nakazawa (2016) Distinct sets of locomotor modules control the speed and modes of human locomotion. *Scientific Reports*, 6: 36275. (査読あり)

(学会発表)(計3件)

Hikaru Yokoyama, Tetsuya Ogawa, Kimitaka Nakazawa, Noritaka Kawashima (2017) Cortical processing underlying split-belt treadmill gait adaptation: an EEG study. *International Society for Posture and Gait Research 2017 World Congress*, Lauderdale, FL, United States

Hikaru Yokoyama, Tetsuya Ogawa, Noritaka Kawashima, Kimitaka Nakazawa (2017) Decoding of muscle synergy activations from EEG signals in human walking. 22nd Annual Congress of the European College of Sport Science, MetropolisRuh, Germany

Hiroki Obata, Tetsuya Ogawa, Taku Kitamura, Noritaka Kawashima, Kimitaka Nakazawa (2016) Short-term effect of repetitive electrical nerve stimulation on spinal reciprocal inhibition depends on the phase of passive stepping. The 46th Annual Meeting of the Society for Neuroscience, San Diego, United States

(招待講演)(計4件)

中枢神経系の適応からみたトレーニング効果の特異性 東京大学スポーツ先端科学研究拠点・立命館大学スポーツ健康科学研究センター 協同ワークショップ 健康長寿社会をつくる革新的運動プログラムの創出 第2弾企画「トレーニング研究の最新知見 × 若手研究者」, 2018年3月29日, 東京大学

ノルディックウォークの神経制御戦略—新規の力学的環境への適応の観点から— 第6回日本ノルディック・ウォーク学会学術大会, 2017年11月11日, 倉敷市

ヒトのロコモーションに内在する神経機構の課題特異性—行動科学的側面からの考察— 第24回身体運動科学シンポジウム—若手研究者による身体運動科学研究、現在から未来—, 2017年6月3日, 東京大学

バイオメカニクスで紐解くロコモーションの神経制御機構 バイオメカニクス学会企画「バイオメカニクス研究法への招待」(東京大学編), 2017年3月22日, 東京大学

6. 研究組織

研究代表者

小川 哲也 (OGAWA, TETSUYA)
東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号: 60586460

研究協力者

中澤 公孝 (NAKAZAWA KIMITAKA)
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号: 90360677

河島 則天 (KAWASHIMA NORITAKA)
国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所 運動機能系障害研究部・室長
研究者番号: 30392195

小幡 博基 (OBATA, HIROKI)
九州工業大学・教養教育院・准教授
研究者番号: 70455377