

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：82404

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23700658

研究課題名（和文）「運動学習」を基盤とした脳卒中片麻痺後の歩行訓練プログラムの開発

研究課題名（英文）Development of locomotion training program in stroke hemiplegia based on “motor learning”

研究代表者 小川 哲也（OGAWA TETSUYA）

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・流動研究員

研究者番号：60586460

研究成果の概要（和文）：脳卒中罹患後に生じる左右非対称な歩行パターンの改善に注目し、中枢神経系に生じる学習を基盤として、いかに対称性を操作的に調節できるか検討した。特殊な力学的環境の利用により、通常では左右対称な運動パターンを呈する健常者の歩行や走行を、操作的に、左右非対称な運動パターンへと導くことができた。とりわけ、本研究では力の左右差に着目し、左右非対称な力発揮に導くことに成功した。将来的には、同様のプロトコルを片麻痺患者に適用し、左右対称な運動パターンの再獲得と、結果としてより大きな移動速度の獲得につながるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The present study focused on asymmetrical gait patterns in patients after stroke and possible intervention to restore symmetry based on motor learning in the central nervous system. With exposure to unusual physical constraints, gait patterns in healthy subjects that are usually symmetry were systematically modified into asymmetrical patterns, especially in terms of force exerting on the ground. In future studies, an application of similar procedures in hemiplegic patients may play role in restoring symmetrical gait patterns that in turn results in larger gait speed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学

キーワード：歩行、リハビリテーション、学習、非対称性、脳卒中

1. 研究開始当初の背景

脳卒中罹患後では、主に片側性の麻痺によって日常生活動作に著しい左右非対称性が生じることが一般的によく知られている。ヒトの最も代表的な移動動作である歩行もまた、健側の立脚時間の増加や (Brandstater et al. 1983)、患側のステップ長の減少 (Olney et al. 1994)、両脚支持時間の著しい左右非対称性 (Olney et al. 1994) などが生じ、結果、歩行速度の減少といった移動手段としての機能低下や片側麻痺の更なる重度化などの二次的障害につながる可能性も指摘されている。

一方で、ヒトの運動遂行に関わる中枢神経機構には、身体の内外部環境と外部環境双方の変化に応じて適切に運動出力を調整することのできる「学習」が成立することが上肢の単純な動作を対象にモデル化されてきた。新規に課された力学的制約下で運動を試みると、その初期では通常の運動遂行が困難であるものの、繰り返しの練習を通して一定の運動遂行が実現できる。その上で不意に力学的制約を取り払うと、元通りの運動を実現することができない。制約のある環境下で最適な運動を実現すべく学習した運動出力がその後の通常条件下でも顕在化した結果と捉え

られる。

歩行においても近年、類似の学習の成立に導くことのできる可能性が示されてきた。力学的制約を課された条件下で一定時間の歩行運動を繰り返すと、制約を取り除いた後の一定時間にわたって正常の歩行パターンに著しい変調が起こるものである。このような学習の成立を見込むことができるのであれば、では、脳卒中により左右非対称に変調した歩行パターンもまた、リハビリテーショントレーニングを通してより左右対称に近い運動パターンに導くことが可能ではないかと考えた。

学習の成立するメカニズムについて言及した先行研究では、例えば上肢の到達運動における学習の成立では、小脳機能との関連が古くからモデル化されてきた。また歩行でも、小脳疾患患者では健常者と同様の学習の成立が見込めないことや、小脳機能を実験的に減衰させたネコでは学習が成立しないことなどから、やはり小脳が極めて重要な役割を果たしていることがわかる。従って、少なくとも小脳機能が正常であれば、脳卒中患者であっても学習を通じた歩様の獲得は十分に可能であると推察された。

2. 研究の目的

特殊な力学的環境下において一定時間（10分から15分程度）におよぶ歩行トレーニングの実施し、歩行の遂行に関わる中枢神経機構の学習を促進する。結果、歩行における左右両脚の運動パターンの対称性を系統的に変化させることにより、脳卒中罹患によって生じた歩行の左右非対称性を改善するためのリハビリテーションにおけるトレーニング方法の提案を行うこととした。

歩行における下肢の運動パターンについて、左右非対称性の観点から研究された例は過去10年ほどの期間に一定数存在するが、これらのすべては、主として歩行の時間的、空間的運動パターンに代表される「見かけ上」の非対称性について解析したものであった。本研究では、より機能面に焦点をあてるために、時間的調節に加え、特に、下肢の筋活動や地面反力などの指標に重点をおいた解析および議論を行うことを目的とした。健常歩行では時間的、空間的側面ともに左右それぞれの脚が限りなく左右対称な運動パターンを有することで知られる。まずは健常成人において、左右の対称性を系統的に変化させられることを確認し、その上で、非対称な運動パターンを有する脳卒中患者に対して、左右がより対称に近い運動パターンへの系統的な変化を促すことができないかと考え、そのための資料となる基礎的なデータの収集を目的とした。

特に、歩行という自動性の高い（すなわち、

より随意性が低い）動作の特性上、随意的な要求を過度に高めないための力学的制約の提示方法を系統的に検討し、また、実験ではトレッドミル上における歩行動作を対象とするが、実際の社会生活場面を想定すると、トレッドミル上で学習した歩行動作を地面歩行に対していかに汎化が可能か（⇔否か）という点も含めて検証したいと考えた。

3. 研究の方法

歩行中の左右両脚の運動パターンを操作的に対称または非対称に変調させることのできる手段として、左右2枚のベルトがそれぞれ独立のモーターによって制御される「分離型トレッドミル」を用いた歩行学習課題を採用した。被験者は、左右のベルトの動作速度が互いに異なる力学的制約に一定時間（10分程度）にわたって曝露された。曝露前後における運動パターンを比較することによって学習の成立の有無や、また、どのような学習が成立するか検討した。

（1）健常成人22名を対象に測定を実施し、学習条件として、一方のベルトが他方に対して2倍の速度で動作する速度条件下で歩行を行なった（図1を参照）。運動の遂行に伴って生じる地面反力の鉛直成分より各ストライドサイクルを同定し、その上で以下の各指標についてストライドごとに解析した。

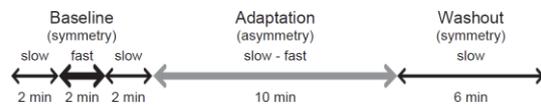


図1 採用した実験プロトコル。左右のベルト速度が異なる力学的制約条件への適応（Adaptation）後における歩行（Washout）が、適応前（Baseline）と比較していかに変化するか解析することにより学習の有無や程度について判定する。

- ①鉛直方向の地面反力より算出される歩行の時間的調節（ストライド、ステップ立脚、遊脚、両脚支持の各時間）
- ②各ストライドにおける地面反力（内外、前後、鉛直の各方向）ピーク値
- ③表面筋電により記録される立脚および遊脚の各位相における下肢の筋活動（左右両側の前脛骨筋、腓腹筋内側頭、大腿直筋、大腿二頭筋）

（2）上記（1）における歩行に加え、これとは異なる速度下での歩行および走行動作における学習の有無や程度について検討した。実際の社会生活の場面を想定し、当初は、トレッドミル上で学習した歩行の運動パターンがいかにその後の地面歩行に対して有効か検討する予定であったが、ヒトの社会生活において用いられる主要な移動機能として捉えると、異なる速度の歩行や、歩行とは時空間的調節が根本的に異なる走行につい

て検討することもまた重要であると考えた。延べ48名の健康成人を対象に、上記(1)とは異なる((1)の3倍に相当する)速度の歩行と、走行における学習の成立について検討した。またその上で、歩行と走行の2種類の移動運動モード間において、学習の成立がいかに共有されるか(されないか)検討した。指標には地面反力を採用した。

4. 研究成果

(1) 図2に、左右異なる速度下における10分間の歩行によって成立した学習について時間的調節に関するデータ(22名の平均値)を示す。学習(Adaptation)期では、左右の時間的調節が著しく異なり、課された力学的制約によって通常の歩行とは運動パターンが著しく異なることが見て取れる。一方で、学習の成立が見込まれた後(Washout)における歩行について、一部にごく短時間にわたって通常歩行(Baseline)とは異なる時間的調節が観察されたものの、これらを除いては特に大きな変化はなかった。この結果のみ考慮すると、本研究において採用した力学的制約条件では、「見かけ上」は歩行パターンの変化を促すことはできないものと位置づけられるかもしれない。

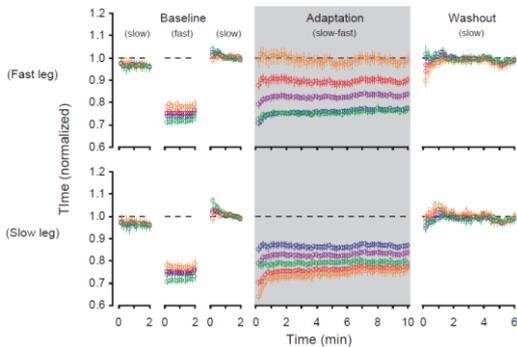


図2 歩行の時間的調節にみる左右異なる速度下の歩行(Adaptation)によって成立した学習(Washout)。上段: 学習中における速いベルト側の脚、下段: 遅い側。紫: ストライド時間、赤: ステップ時間、青: 立脚時間、橙: 遊脚時間、緑: 両脚支持時間

ではその上で、他の評価指標に注目したい。以下、図3および図4に、下肢の筋活動と地面反力の時系列変化を、図2と同じ時間軸で示す。

筋活動(図3)において先に示した時間的調節との比較でまず注目すべきは、その変化の大きさや変化動態だろう。例えば、学習期における速度の遅いベルト側の立脚期の筋活動(図3(A)の下段)では、その初期において、前脛骨筋や大腿直筋の特定の筋において顕著に大きな活動が観察できる。これらの活動は時間経過とともに徐々に低下している。これらの筋活動の変化動態には、中枢神経系に

における適応の要素が反映されていることが推察される。結果、学習前のベルト速度に戻った後では(Washout)学習前とは著しく異なる筋活動が起こっていることが見て取れる。それぞれの脚間で言えば、学習成立後では、筋の種類によるが、一方の脚における筋の活動が他方に対して相対的に高まっている、すなわち、非対称な運動パターンを獲得したと言える。

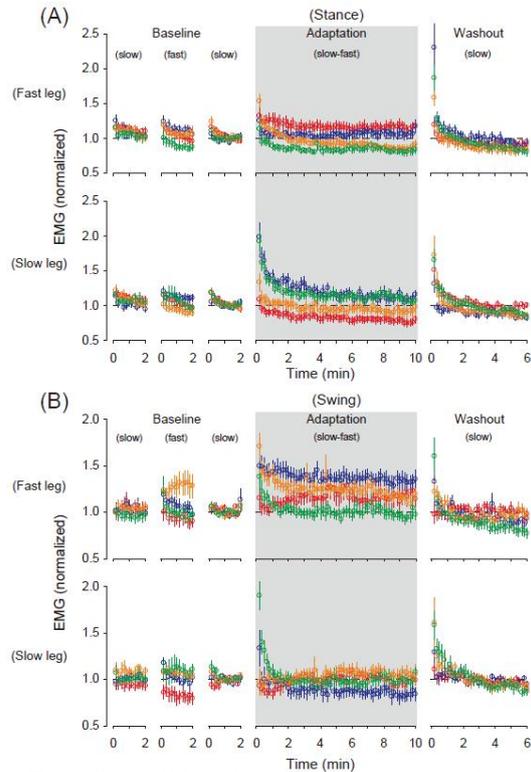


図3 下肢の筋活動の変化にみる左右異なる速度下の歩行(Adaptation)によって成立した学習(Washout)。(A)立脚期、(B)遊脚期、(以下、A、B共通)上段: 学習中における速いベルト側の脚、下段: 遅い側、青: 前脛骨筋、赤: 腓腹筋内側頭、緑: 大腿直筋、橙: 大腿二頭筋

では次に、地面反力の変化に注目したい。地面反力についてもまた筋活動と同様に、その成分ごとに変化動態が大きく異なった。まず、前方方向の成分(C)に着目する。この成分は、踵接地にとまなう前方への制動の要素を反映するとされる。学習の経過とともにその値は順応曲線を描き、最終的にはあるレベルに収束している。結果、学習前と同じベルト速度では、歩様が変調し値が左右で著しく異なっている(非対称である)。すなわち、この成分には学習の要素が強く反映されていることが推察される。

一方で、他の成分の変化を見てみると、鉛直方向(B)や後方向成分(D)では、異なる速度条件への曝露とともに、両脚においても一過性に大きな変化が観察されるものの、少なくとも10分間の適応期において適応様の変化は観察されず、その後の通常の歩行条件下でも学習前との比較において特に変化

はみられなかった。

各被験者による内省報告からすれば、本研究で採用した適応課題ではいずれの被験者も一定の適応効果と、その結果として後効果の出現を認めている。その一方で、時間的調節と筋活動、地面反力の結果を総合すると、これらの効果の出現を反映するか否かは指標により様相が異なる。この結果は、歩行の速度変化に対する時間的調節、空間的調節の双方に対する個人間の運動戦略の違いや、歩行サイクル中における位相に応じて中枢神経系による制御戦略が異なるといったことが要因として挙げられるだろう。

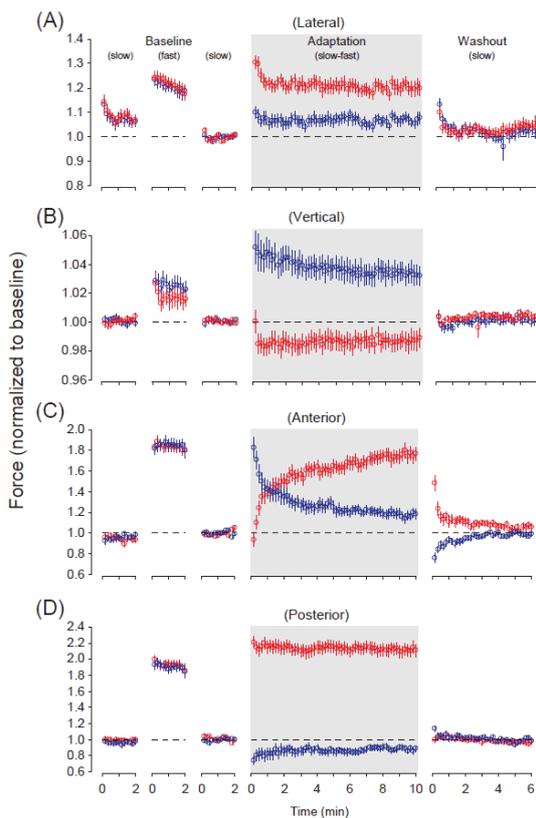


図4 左右異なる速度下の歩行 (Adaptation) の前、中、後における地面反力の変化。(A) 側方、(B) 鉛直方向、(C) 前方向、(D) 後方向 赤：学習中における速いベルト側の脚、青：遅い側

(2) 前述の結果において顕著な適応効果の出現が認められた地面反力の前方向成分を解析対象とし、また別の速度 ((1) の3倍に相当) の歩行条件と、さらに、ヒトにおけるもう一つの主要な移動運動モードである走行について、適応効果の出現の有無を検討した。速い歩行と走行の双方において、顕著な適応効果とその後の後効果の発現が認められた。

両者に適応効果と後効果が認められた上で、実際の社会生活場面を想定した歩行と走行間の適応効果の共有について検討したところ、それぞれの運動モードにおいて獲得し

た適応効果は互いにほとんど共有されず、すなわち、歩行と走行は運動制御の観点からすれば互いに独立の運動モードである可能性が示唆された。すなわち、重複した関節や筋を使用し、一見すると類似した運動と捉えられる歩行と走行も、実はまったく別々の神経機構を基盤としている可能性があり、従って、リハビリテーションの過程においてもこれらは個別のトレーニングの下にトレーニング効果を見込むことが適切だろう。

結論として、左右異なるベルト速度を用いた歩行学習課題の採用によって操作的に歩様の変化を促すことは可能と考えられる。一方で、評価指標により適応効果の発現に対する「見え方」は大きく異なる可能性があり、従って、適切な指標を以て対称性の評価をすることが望ましいだろう。本研究で得られた結果からすれば、地面反力の前方向への(制動)成分がこれに相当する。

本研究において、異なる歩行速度や、また歩行とは時空間的調節が異なる走行においても適応効果の発現が認められたこと、また、歩行、走行のモード間では適応効果が共有されないこと、が確認できたことは本研究における大きな収穫であり、リハビリテーションにおけるトレーニング戦略の構築に対して大きな示唆を与える結果と捉えられる。

最後に本研究では、健常者を対象とした系統的な測定が実施できた一方で、直接的に患者に対する介入を実施することはできなかった。また、細かな条件探索(力学的制約と対称性の変調の両者の程度に関する対応関係)についてもまた本研究では迫ることができず、今後の課題としたい。

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2件)

(1) Tetsuya Ogawa, Noritaka Kawashima, Toru Ogata, Kimitaka Nakazawa (2012) Limited transfer of newly acquired movement patterns across walking and running in humans. PLoS ONE 7(9): e46349. 査読有
DOI:10.1371/journal.pone.0046349

(2) Tetsuya Ogawa, Noritaka Kawashima, Shuji Suzuki, Kimitaka Nakazawa (2012) Asymmetrical neural adaptation in lower leg muscles as a consequence of stereotypical motor training. Journal of Motor Behavior 44(1): 63-68, Taylor & Francis 査読有
DOI: 10.1080/00222895.2011.645912

[学会発表] (計4件)

① 小川 哲也「異なる移動運動モード間の学習転移」ヒューマンパフォーマンス研究会, 2013年2月2日, 大阪大学(大阪市)(招待による)

② 小川 哲也「ロボティクスを用いた歩行トレーニングの現状」生活生命医療福祉工学系学会連合大会2012, 2012年11月2日~4日, 名古屋大学(名古屋市)(招待による)

③ 小川 哲也「神経系の適応にみるロコモーション動作の特異性」ヒトの随意運動制御研究会, 2012年7月27日, 筑波大学(つくば市)(招待による)

④ 小川 哲也「中枢神経系の適応にみる歩行、走行動作の特異性」生理学若手研究者フォーラム, 2012年6月30日, 順天堂大学(東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 哲也 (OGAWA TETSUYA)

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・流動研究員

研究者番号: 60586460

(2) 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

緒方 徹 (OGATA TORU)

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・部長

研究者番号: 00392192

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