

反復歩行運動と休息を組み合わせた練習が 24 時間後の運動学習効果に及ぼす影響

齋藤 恒一¹⁾，中俣 孝昭¹⁾，山口 和輝¹⁾，畠中 泰彦^{1), 2)}

¹⁾ 鈴鹿医療科学大学保健衛生学部理学療法学科，²⁾ 鈴鹿医療科学大学大学院医療科学研究科

原著論文

反復歩行運動と休息を組み合わせた練習が 24 時間後の
運動学習効果に及ぼす影響齋藤 恒一¹⁾, 中俣 孝昭¹⁾, 山口 和輝¹⁾, 畠中 泰彦^{1), 2)}¹⁾ 鈴鹿医療科学大学保健衛生学部 理学療法学科, ²⁾ 鈴鹿医療科学大学大学院医療科学研究科

キーワード： 歩行運動, 休息, 運動学習効果, 反復運動, 運動学解析

要 旨

目的) 本研究の目的は, 新規の歩行スキル獲得を目的とした反復歩行運動と休息を組み合わせた練習における 24 時間後の運動学習効果について検証することである。

方法) 対象は, 健康成人男性 (平均年齢 21.4 ± 1.0 [歳]) とした。被験者には, 背屈運動制限を目的とした器具を足部に装着した状態で 1000 歩の歩行運動を行った。さらに被験者には運動後, 4 時間の休息を指示した。計測は, 介入前, 介入後 4 時間 (4 時間後), 介入後 24 時間 (24 時間後) の裸足歩行とした。裸足歩行は 10 台の赤外線カメラからなる光学式標点位置計測装置 (VICON612) と床反力計 (AMTI: OR6-6) を用いて計測した。運動学データは, 逆動力学的手法を用いて計算した。なお, 統計処理には反復測定一元配置分散分析を用いて分析し, 主効果を認めた項目については, 多重比較として Bonferroni 法を用いて検定した。

結果) 足・股関節の関節運動パターンは, 介入前と比較し 4 時間後, 24 時間後において立脚初期における足関節底屈角度および股関節屈曲角度の有意な増加, 立脚終期における足関節背屈角度および股関節伸展角度の有意な低下, 遊脚期における足関節背屈角度の有意な低下および股関節屈曲角度の有意な増加を認めた。しかし, 膝関節の運動パターンおよび時間距離因子に関しては, 介入前と比較し有意差を認めなかった。

考察) 本研究により, 毎歩足関節背屈制限を一定に加える 1000 歩の歩行運動と 4 時間の休息を組み合わせた練習は, 24 時間後においても運動学習効果を示した。

1. はじめに

歩行や立ち上がり動作などの日常生活動作は、われわれが気づくことなく、膨大な数の繰り返しを行い、洗練されてきた動作である。また、スポーツ選手は、長い年月にわたりトレーニングを積み重ね、高度に洗練された様々なスポーツ固有の運動スキルを学習する。工藤¹⁾は、「運動スキルとは、スポーツ選手だけがもつ特殊な能力ではなく、日常生活動作の中にも含まれる」としている。

運動スキルに関与する中枢は、運動が高度に自動化されていくにしたがって、中枢神経系のより下位の階層へと引き継がれる。ヒトが用いる移動手段である二足歩行（以下、歩行）も例外ではない。歩行の基本的な運動パターンである下肢各関節の屈曲・伸展運動の繰り返しや肢間交互運動などのリズム運動は、代表的な運動スキルである。この自動化された運動は、中枢神経系の下位階層に属する脳幹と脊髄の神経機構において生成される。そして高位中枢が、下位の神経機構を制御・駆動するという関係性を基盤として、歩行は成り立っている²⁾。しかし、歩行は、自動性が非常に高い運動であるが、随意性が欠如している運動様式ではない。例えば、全く経験したことのない路面の状態や不意に起こる外乱に対し、すばやく対応し歩容をその状況に適応させるよう調節し新規の運動スキルを習得する。さらに、一度でも経験したことがある外乱であれば、その経験を基に歩容を調節し対応することが可能である。すなわち、歩行は、高度に自動化されているにもかかわらず、適応性や学習性を併せ持つ運動であると考ええる。

歩行の学習性は、リハビリテーション医療においても重要である。疾病等による内部環境の変化が原因で病前と異なる運動制御や補装具等を使用せざるを得ない場合がある。その際には、新規の運動スキルを習得させ、歩行等の日常生活動作を再獲得させる必要がある。以上のことから、歩行における学習性を理解することは、リハビリテーション医療における歩行等の動作の再獲得方法の開発、日常生活動作能力低下の予

防、あるいは健康維持増進のためのウォーキング方法の開発に有用であると考ええる。

近年、健常者を対象に分離型トレッドミルを用いた歩行における肢間協調運動の適応学習課題において、歩行の学習性が明らかにされた^{3) 4)}。肢間協調運動に関与する変数に関しては、後効果を認めたが、肢内協調運動に関する変数には後効果を認めなかったと報告している。また、歩行時に特定のタイミングで外乱を与え、その外乱除去後の歩行における筋活動の短期適応学習を検証した研究⁵⁻⁸⁾においても、外乱に依存した筋活動のパターンに短期の学習効果があったことを報告している。

これらを背景に、歩行運動により新規歩行スキルを獲得するためには、外乱を毎歩一定の部位に一定の強さで加えることが重要であると考ええる。しかし、新規歩行スキルを獲得するための反復回数などの具体的な介入方法については、確立されていない。

我々は、先行研究⁹⁾において、歩行運動により新規歩行スキルを習得するための反復回数を検証した。具体的には、健常者の左足関節の足関節背屈運動を制限し、1000歩の歩行練習を実施した。その結果、足関節の固定を除去した練習1時間後の裸足歩行において練習前に比較し足関節背屈角度が減少する歩行パターンを認めた。この実験により、新規歩行スキルを獲得するために必要な反復回数は最低限500回必要ということが明らかになった。一方で、これらの検証は、短期の運動学習効果を検証したものが多く、長期の運動学習効果の検証は散見する程度⁷⁾である。リハビリテーションにおける運動頻度を考慮すれば、得られた運動学習効果が、最低限24時間持続することが重要であると考ええる。

運動学習効果を24時間以上持続させることについて、先行研究¹⁰⁾では、上肢を用いたロボットアーム操作学習において、運動後2.5～4時間後は、運動スキルの定着が脆弱な期間があるため、この期間に類似の運動を行うと運動技能が定着されにくいとしている¹¹⁾。この報告を根拠に、新規の歩行スキル学習においても運動後4時間以内に類似の運動課題を行わな

ければ、運動学習効果は 24 時間後でも持続するのではないかという仮説を立てた。

そこで、本研究では、健常者において足関節背屈運動を制限し、1000 歩の歩行運動と 4 時間の休息を組み合わせた練習が、24 時間後まで運動学習効果が持続するかを運動学的に検証し、得られた結果を効果的な歩行の再獲得方法の開発に活用することを目的とした。

2. 方 法

2. 1 対象

対象は、特に運動習慣がなく、骨関節疾患および神経学的疾患の既往を有しない健常男性 10 名（平均年齢 21.4 ± 1.0 [歳]，身長 171.4 ± 7.0 [cm]，体重 65.4 ± 11.9 [kg]）とした。なお、研究計画に関しては、鈴鹿医療科学大学臨床試験倫理審査委員会の承認（平成 24 年度 123）の下、被験者には事前に研究の目的及び実験方法を十分に説明し、書面による同意と協力を得た。

2. 2 介入方法

左足関節背屈運動を制限した装具装着下にて連続して 1000 歩（片側 500 歩）歩行運動することとした。さらに、被験者には、歩行運動終了後から 4 時間後の計測を実施するまで、計測以外で歩行を行わないよう（休息）指示した。また介入 4 時間後から 24 時間後までは、運動制限を設けなかった。

2. 3 背屈運動制限装具

歩行運動中に左足関節背屈運動制限をする目的で、足関節底屈 20 [deg] より背屈運動を制限した装具を作成した。なお、事前に予備実験として、歩行時での装具の有効性を確認するために、装具装着下における歩行時足関節角度を計測し、装具による背屈運動制限の有効性を確認した。

2. 4 実験手順

図 1 に実験手順を示す。まず、歩行運動を実施する前の歩行時関節運動パターンを検証するために裸足歩行を計測した（以下、介入前）。その後、介入として装具装着下にて連続して 1000 歩（片側 500 歩）歩行運動を行った。歩行運動終了後、装具を着脱し、4 時間の休息時間を取った。運動学習効果を検証するために歩行運動後 4 時間後（以下、4 時間後）と 24 時間後における裸足歩行を計測した（以下、24 時間後）。なお、介入前、装具装着下での歩行、4 時間後および 24 時間後の歩行は、歩調を 108 [steps/min] での歩行とした。

2. 5 計測及び解析方法

図 2 に計測環境を示す。裸足歩行計測のために三次元動作解析装置（VICON 社；VICON612）と 10 台の赤外線カメラにて各身体標点の空間座標を求めた。各身体標点位置は、被験者の左右の肩峰、股関節、膝関節、足関節、第 5 中足骨とし、計 10 個の直径 14mm の赤外線反射マーカを貼付した。なお、サンプリング

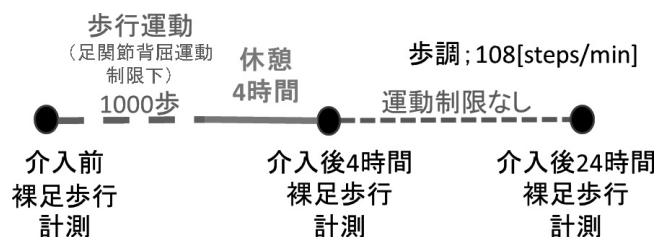


図 1 実験手順

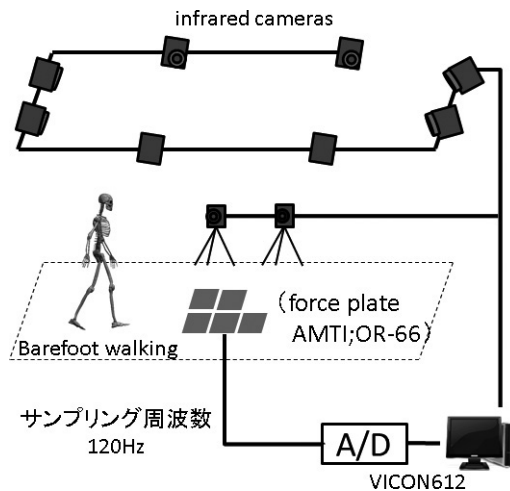


図2 計測環境

周波数は 120Hz とした。得られた空間座標データより，剛体リンクモデルに空間座標を代入し，逆動力学的手法を用いて下肢関節角度を算出した。同時に，1 歩行周期における時間距離因子の算出および歩行周期の相分けをする目的で，床反力測定装置 OR-66 (AMTI 社製) により，床反力を計測した。なお，解析時間は，初期接地を開始とする 1 歩行周期を 100% とし時間正規化した。

2. 6 運動学習効果の評価項目

評価項目は，介入前，4 時間後および 24 時間後における 1 歩行周期での「下肢関節角度の時間変化（股関節，膝関節，足関節）」，「時間距離因子（単脚支持時間，遊脚期時間，両脚支持期時間，左右ステップ長，ストライド長）」および「足関節の初期接地時角度，最大背屈角度（立脚期，遊脚期），最大底屈角度，膝関節最大角度（立脚期の屈曲および伸展角度，遊脚期屈曲角度），股関節最大角度（立脚期の屈曲および伸展角度，遊脚期屈曲角度）」とした。

2. 7 統計処理

統計処理には，計測時期を要因とする一元配置分散分析を行い，主効果が有意の場合には，多重比較検定

として Bonferroni 法を実施した。なお，統計学的有意水準は 5% 未満とした。

3. 結 果

3. 1 下肢関節角度の時間変化

図 3～5 に介入前，4 時間後および 24 時間後における 1 歩行周期中の足・膝・股関節角度変化の典型例を供覧する。介入前に比較し 4 時間後および 24 時間後ともに，立脚初期における足関節底屈角度および股関節屈曲角度の増加，立脚終期における足関節背屈角度および股関節伸展角度の低下，遊脚期における足関節背屈角度の低下および股関節屈曲角度の増加を示す運動パターンとなった。一方，膝関節角度の変化において介入前と比較し 4 時間後および 24 時間後に大きな変化はみられなかった。

3. 2 運動療法効果の評価項目の比較

表 1 に介入前，4 時間後および 24 時間後における評価項目の比較を示す。足・股関節角度における 4 時間後および 24 時間後の運動学習効果については，足関節における初期接地時底屈角度の有意な増加（以下，4 時間後，24 時間後： $p < 0.01$ ， $p < 0.05$ ），立脚

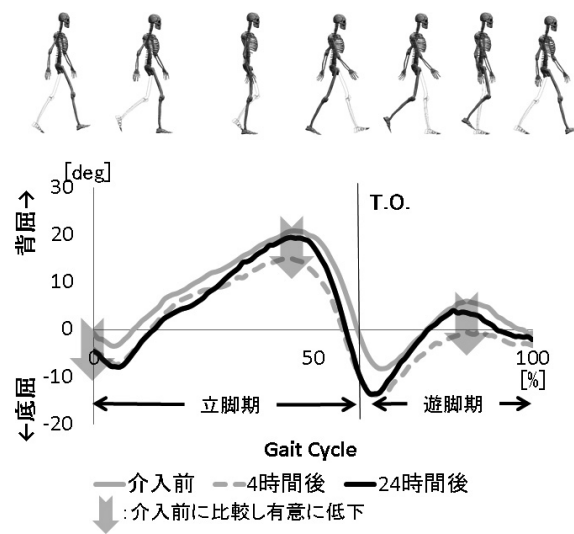


図 3 足関節角度の時間変化の比較

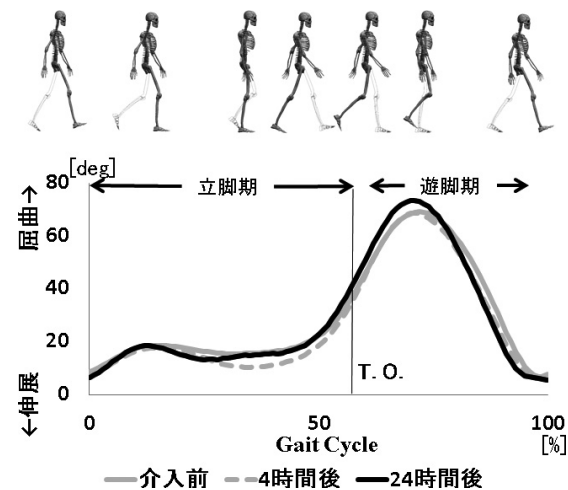


図 4 膝関節角度の時間変化の比較

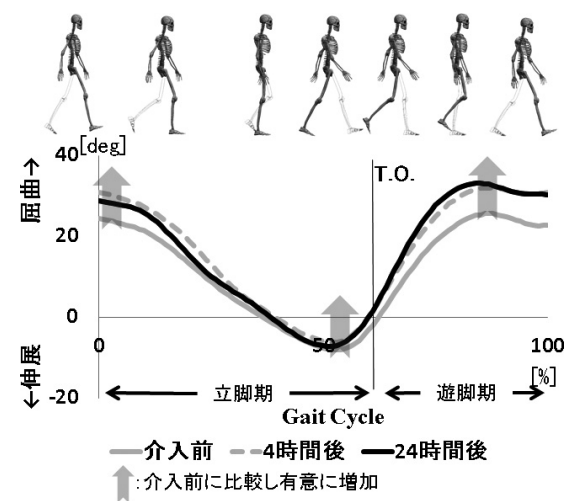


図 5 股関節角度の時間変化の比較

期最大背屈角度の有意な低下 ($p < 0.05$, $p < 0.05$), 遊脚期最大背屈角度の有意な低下 ($p < 0.01$, $p < 0.01$) を認めた。また, 股関節における立脚期最大屈曲角度の有意な増加 ($p < 0.01$, $p < 0.01$), 立脚期最大伸展角度の有意な低下 ($p < 0.01$, $p < 0.01$), 遊脚期最大屈曲角度の有意な増加 ($p < 0.01$, $p < 0.01$) を認めた。一方, 時間距離因子および膝関節の最大角度については, 介入前, 4 時間後および 24 時間後の比較において, すべての項目に関して有意な差を認めなかった。

4. 考 察

本研究では, 健常者に対し足関節背屈運動を制限した装具装着下において歩行運動とその後 4 時間の休息を組み合わせた練習により, 4, 24 時間後の運動学習効果を計測した。その結果, 運動学習効果は, 4, 24 時間後の歩行とともに足, 股関節運動パターンにおいて認められた。具体的には, 立脚初期における足関節底屈角度および股関節屈曲角度の増加, 立脚終期における足関節背屈角度および股関節伸展角度の低下, 遊脚期における足関節背屈角度の低下および股関節屈曲角度の増加が認められた歩行パターンとなった。

先行研究¹⁰⁾では, 上肢を用いたロボットアーム操作学習において, 反復運動後 2.5 ~ 4 時間後は, 運動スキルの定着が脆弱な期間があるため, この期間に類似の運動を行うと運動技能が定着されにくいとしている¹¹⁾。本研究では, 反復歩行運動と休息を組み合わせた練習をすることで, 練習した新規歩行パターンの記憶が安定し, 運動記憶の固定化を促したため, 運動学習効果が 24 時間後まで持続したと考えた。

4. 1 下肢関節運動パターン

下肢関節運動パターンに関しては, 介入前に比較し, 4 時間後および 24 時間後ともに, 立脚初期における足関節底屈角度および股関節屈曲角度の有意な増加, 立脚終期における足関節背屈角度および股関節伸展角度の有意な低下, 遊脚期における足関節背屈角度の有意な低下および股関節屈曲角度の有意な増加を示した。足関節運動に 24 時間後にまで, 運動学習効果が残存した原因は, 足関節背屈運動制限した装具を装着した歩行を繰り返し実施したために, 歩行周期全般にわたって足関節背屈運動を制限した運動パターンを学習したと考えた。すなわち, 足関節背屈運動制限した装具を装着し, 毎歩足関節背屈制限を一定に加える

表 1 介入前, 4 時間後および 24 時間後における分析項目の比較

分析項目	介入前 Mean (SD)	4時間後 Mean (SD)	24時間後 Mean (SD)	介入前 vs 4時間後	介入前 vs 24時間後	4時間後 vs 24時間後
時間距離因子						
単脚支持期[%]	37.0 (2.7)	37.2 (2.5)	37.3 (1.7)	NS	NS	NS
遊脚期[%]	38.0 (2.0)	38.2 (2.2)	37.5 (2.5)	NS	NS	NS
両脚支持期[%]	25.0 (2.3)	24.6 (1.5)	25.2 (3.0)	NS	NS	NS
ストライド長[cm]	120.2 (6.4)	114.4 (7.8)	118.5 (9.3)	NS	NS	NS
ステップ長[cm]	左 61.9 (2.9)	58.1 (5.4)	60.1 (5.3)	NS	NS	NS
	右 58.7 (4.0)	56.8 (3.7)	58.8 (4.3)	NS	NS	NS
足関節						
初期接地時角度[deg]	-0.4 (0.6)	-3.7 (2.6)	-2.4 (1.8)	**	*	NS
立脚期最大背屈角度[deg]	14.6 (5.1)	12.5 (4.4)	12.7 (5.0)	*	*	NS
最大底屈角度[deg]	-9.6 (5.1)	-10.8 (6.2)	-13.1 (5.5)	NS	NS	NS
遊脚期最大背屈角度[deg]	6.9 (2.7)	3.1 (2.9)	3.7 (1.8)	**	**	NS
膝関節						
立脚期最大屈曲角度[deg]	17.3 (7.1)	17.3 (3.8)	16.3 (4.5)	NS	NS	NS
立脚期最大伸展角度[deg]	8.8 (5.2)	8.4 (4.2)	8.0 (3.7)	NS	NS	NS
遊脚期最大屈曲角度[deg]	61.9 (4.5)	63.4 (3.9)	62.9 (5.4)	NS	NS	NS
股関節						
立脚期最大屈曲角度[deg]	25.1 (2.5)	28.1 (2.1)	27.8 (2.3)	**	**	NS
立脚期最大伸展角度[deg]	-9.8 (3.3)	-6.0 (2.5)	-6.4 (2.4)	**	**	NS
遊脚期最大屈曲角度[deg]	26.5 (2.3)	30.5 (1.9)	29.3 (2.6)	**	**	NS

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$ NS: 有意差なし

ことで、新規の足関節運動パターンを習得できたと考えた。股関節運動に関しては、足関節背屈運動制限下での歩行を繰り返すことにより、足関節の影響を代償した歩行における股関節運動パターンを学習したと考えた。すなわち、立脚期においては、初期接地時、足関節角度は、底屈方向に変位していることから、ロッカー機能が不十分となり、前進推進力が阻害される。さらに立脚終期における足関節背屈角度、および股関節最大伸展角度の低下がおこり、このような歩行パターンとなったと考えた。遊脚期においては、足関節背屈運動が低下することから、歩行時の足尖引っ掛かり (toe drag) がおこり、この引っ掛かりを代償するために股関節の屈曲角度を増加し、つま先と床のクリアランスを保ため、初期接地時の股関節屈曲角度増加をもたらす。一方、膝関節運動は、介入前に比較し、4, 24時間後に後効果を認めなかった。この原因として、膝関節に関しては、装具装着下の歩行の際、膝関節運動は、立脚期と遊脚期それぞれ2種類の運動戦略を観察した。具体的には、立脚期においては、屈曲位もしくは伸展位を保持した戦略が観察された。遊脚期においては、足尖の引っ掛かりの代償動作として、股関節の過屈曲運動に伴い、膝関節も過屈曲運動する戦略または、股関節を屈曲・外転・回旋する複合運動であるいわゆる分回し歩行を呈し、膝関節の屈曲運動を減少させる戦略を観察した。以上のことから、学習した膝関節運動パターンに個人差が大きく一様な運動パターンを示さなかったためだと考えた。

4. 2 時間距離因子

時間距離因子に関しては、運動療法効果が得られなかった。一般に歩行では、1歩行周期に占める歩行周期各相の比率および距離因子 (ストライド長, ステップ長) は、左右対称に保たれることが知られている。すなわち、この項目に関しては、下肢関節運動パターンの影響だけを受けるわけではなく、対側下肢関節運動パターンおよび体幹の影響などを含めた総合的な評価項目である。つまり、ヒトの運動は冗長性に富んでい

ることから他の下肢関節および体幹運動で代償した結果、運動学習効果を認めなかったと考えた。

5. 結 論

本研究では、健康成人男性 (平均年齢 21.4 ± 1.0 [歳]) を対象に、三次元動作解析装置を用いて、1000歩の歩行運動と4時間の休息を組み合わせた練習前後および24時間後の裸足歩行を計測した。その結果、毎歩足関節背屈制限を一定に加える1000歩の歩行運動と4時間の休息を組み合わせた練習は、立脚初期における足関節底屈角度の増加、立脚終期および遊脚期における足関節背屈角度を減少させ、その運動学習効果は24時間後まで持続することが示された。

6. 引用文献

- 1) 工藤和俊：学習された運動行動の制御．運動行動の学習と制御．(麓信義 編)．杏林書院，東京，61-85．2006．
- 2) 河島則天：正常歩行の神経制御，理学療法，**26**，19-26，2009．
- 3) Reisman DS, Block HJ, Bastian AJ：Interlimb coordination during locomotion：what can be adapted and stored? *Journal of neurophysiology*, **94**，2403-2415，2005．
- 4) Choi J T, Bastian AJ：Adaptation reveals independent control networks for human walking. *Nature neuroscience*, **10**，1055-1062，2007．
- 5) Lam T, Anderschitz M, Dietz V：Contribution of feedback and feedforward strategies to locomotor adaptations. *Journal of Neurophysiology*, **95**，766-773，2006．
- 6) Kao PC, Ferris DP：Motor adaptation during dorsiflexion-assisted walking with a powered orthosis. *Gait & posture*, **29**，230-236，2009．
- 7) Fortin K, Blanchette A, McFadyen B et al：Effects of walking in a force field for varying durations

- on aftereffects and on next day performance. *Experimental brain research*, **199**, 145-155, 2009.
- 8) Blanchette A, Lambert S, Richards CL : Walking while resisting a perturbation : effects on ankle dorsiflexor activation during swing and potential for rehabilitation. *Gait & posture*, **34**, 358-363, 2011.
- 9) 齋藤恒一, 前川遼太, 伊藤和寛, 他 : 歩行時足関節運動パターンの変化を目的とした反復歩行トレーニングの後効果, バイオメカニズム学術講演会予稿集, **33**, 247-250, 2012.
- 10) Okamoto T, Endoh S, Shirao T, et al : Role of cerebellar cortical protein synthesis in transfer of memory trace of cerebellum-dependent motor learning. *Journal of Neuroscience*, **31**, 8958-8966, 2011.
- 11) Brashers-Krug T, Shadmehr R, Bizzi E : Consolidation in human motor memory. *Nature*, **382**, 252-255, 1996.

Effects of repetitive gait exercise and a break is on the motor learning effect after 24 hours

Koichi SAITO¹⁾, Takaaki NAKAMATA¹⁾, Kazuki YAMAGUCHI¹⁾,
Yasuhiko HATANAKA^{1), 2)}

¹⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Suzuka University of Medical Science,

²⁾ Graduate School of Medical Science, Suzuka University of Medical Science

Key Words: Gait exercise, Break, Motor learning effect, Repetitive exercise, Kinematics

Abstract

Purpose: The aim of this study was to compare the motor learning effects in kinematic patterns at 24 hours after gait exercise for the purpose of acquisition of novel motor skills.

Method: Ten healthy male volunteers participated in this study. Subjects were fitted with a dorsiflexion block affecting the ankle and underwent gait exercise of 1000 steps (500 steps for each leg). A break of 4 hours after gait exercises was taken. Measurements were made barefoot walking before exercise (pre-test), walking at 4 hours after exercise (4h-test), and walking at 24 hours after exercise (24h-test). Their walking was measured using an optoelectronic motion capture system with ten infrared cameras (VICON612) and a ground reaction force platform (AMTI: OR6-6). Kinematic data were calculated using the inverse-dynamics method. Retention effects were analyzed using the one-way analysis of variance with repeated measures. Significance between-group differences were determined using Bonferroni post-hoc test.

Results: Kinematic pattern of the ankle and hip (at initial contact, in terminal stance phase and in swing phase) showed significant differences when comparing the 4h-test and 24h-test to the pre-test. However, there were no significant differences in kinematic pattern of the knee and spatio-temporal parameters.

Discussion: This study showed that there were motor learning effects at 24 hours after gait exercise of 1000 steps and a break of 4 hours for the purpose of acquisition of novel motor skills.

略 歴

齋藤 恒一（保健学修士） 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部 理学療法学科 助手

学 歴：

平成 12 年 吉備国際大学 保健科学部 理学療法学科 卒業

平成 23 年 岡山大学 保健学研究科 博士前期課程 保健学専攻 修了

職 歴：

平成 12 年 医療法人社団医聖会 八幡中央病院 リハビリテーション科 理学療法士

平成 17 年 CAC 医療技術専門学校（現 朝日医療専門学校福山校）理学療法学科 専任教員

平成 22 年 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部 理学療法学科 助手（現在に至る）

主な研究内容：

運動学習理論に基づいた運動療法の開発に関する研究