

機関番号：33938
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21700555
 研究課題名（和文） 転倒予防のための自転車運動を用いた新しいトレーニング方法の開発
 研究課題名（英文） Development of a new training using the bicycle for the fall prevention
 研究代表者
 越智 亮（OCHI AKIRA）
 星城大学・リハビリテーション学部・助教
 研究者番号：60410891

研究成果の概要（和文）：本研究では，高齢者に対する固定式自転車を用いた最大速度ペダリングトレーニングが，転倒回避で必要となる素早い前方ステップ動作の動作速度を改善させるかどうかを検証した．対象者16名のうち，5週間の上記トレーニングを行った8名のみ，トレーニング後に前方への踏み出し動作速度が平均20%向上し，また下肢の表面筋電図から得られた結果から，外乱に対する筋の応答性が改善していることが示された．高齢者の転倒予防に最大速度ペダリング運動が有効であることが明らかとなった．

研究成果の概要（英文）：This study was to ascertain whether maximum velocity training using the bicycle ergometer improved recovery abilities of subjects' compensatory stepping, which is necessary for fall prevention in the elderly. A five week training program of maximum velocity pedaling improved by 20% the stepping speed for the compensatory step in the eight elderly subjects of the training group. The experiment also included a wire and harness being attached to the subject. Releasing the wire caused the subject to lurch forward, i.e. be disturbed. The result for the thigh muscle EMG pattern during the compensatory step movement showed that the training improved the responsiveness of the muscle after the disturbance. This study revealed that maximum velocity training with pedaling was effective for fall prevention in the elderly.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：健康科学

科研費の分科・細目：人間移行学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：高齢者，転倒予防，敏捷性，自転車運動，踏み出し動作

1. 研究開始当初の背景

運動の力と速さを生み出す下肢筋は，つまずいた後の転倒回避のような日常生活活動において重要である．多くの場合，つまずきが生じた後，下肢を前方へ大きく踏み出すこ

とによって転倒を回避することが可能である．しかし，高齢者ではつまずいた後に実際の転倒へと発展してしまうケースが多くある．つまずくことが実際の転倒に発展する原因として，高齢者と若年者との間には転倒開始（つまずき）からの足を一步前に出す素早

いステップ反応に違いがあることが報告されている (Maki BE, et al. Age Ageing 35-S2: ii12-ii18, 2006). 若年者と比較して、高齢者ではこのステップ反応の速度が有意に遅いとされている。このことは、高齢者において、下肢筋力のみではなく下肢を素早く踏み出す能力が、転倒と密接に関わっていることを表していると考えられる。

転倒してしまう高齢者においては、日常生活において素早い下肢の踏み換えを行うような運動経験は少ないと思われる。それに加え、老化に伴う生理的・組織化学的変性によって特に速筋繊維の選択的萎縮と筋断面面積の減少が報告されている (Lexell J, et al. J Neurol Sci 84: 275-94, 1988)。さらに、神経レベルにおいても運動の基本的パターン形成に関わる神経機構の加齢変化が、高齢者にみられる筋協調活動の障害の要因となっている可能性も指摘されている。

そこで、研究代表者は、高齢者に対する素早い下肢の膝伸展と屈曲の切り替え運動として、低負荷高回転の自転車運動に着目した。これまで、固定式自転車を用いた高齢者に対するトレーニングによる脚筋力の改善が報告されているが (Macaluso A, et al. J Appl Physiol 95: 2544-53, 2003), 研究代表者は、自転車運動を行うことによる筋力の改善ではなく、敏捷性と下肢協調性の改善に着目している。ペダル負荷を重くすることで脚筋力は改善するが、むしろペダル回転数を増大させるためにペダル踏力を軽くし、ペダル回転数を最大発揮する運動 (以下、最大速度ペダリング) を行えば、下肢の敏捷性と協調性が改善すると考えた。

上記を踏まえ、研究代表者は表面筋電計を用い、固定式自転車での高回転運動における若年者と 65 歳以上の高齢者の下肢筋活動様相を比較し、実際に両者のペダリングスキルが異なるかどうかを調査した (越智亮, 他: 理学療法学 35(2), 549, 2008suppl)。その結果、高齢者が若年者と比較して、低回転条件では下肢筋活動様相に明確な差はないが、高回転条件でその筋活動様相が大きく異なることが伺えた。ペダル負荷を軽度設定しても、高齢者は若年者と比較して素早い運動が困難で、膝屈伸筋活動の活動・非活動の切り替えに遜色があることが理解できた。次に、60 歳以上の健常高齢者 12 名を対象に、固定式電磁ブレーキ自転車を用い、軽負荷スプリントトレーニング (体重の 1%ペダル負荷で約 0.5~0.7kp, 最大回転のスプリントトレーニング, 5 秒間×10 回) を 5 週間行い、その前後で下肢機能パフォーマンスの計測を行った。その結果、膝伸展筋力は向上しなかったものの、最大ペダル回転数は向上し、TST (テンステップテスト: 10cm 台上に左右下肢で交互にステップを 10 回行う時間) のよ

うな下肢を素早く踏み変える能力が向上した。このように、高齢者においても高回転自転車運動に適応することで、下肢の敏捷性が向上するということが理解できた。

一方、これまでの経緯からは、最大速度ペダリングトレーニングによって高齢者の下肢敏捷性は向上することが分かってきたものの、どのようにして下肢の踏み替え動作が素早くなったか、その神経・筋レベルでのメカニズムは不明なままである。さらに、下肢の敏捷性向上が、実際の転倒予防にどのように貢献するかは明らかとなっていない。そこで、今回の目的として、上記の最大速度ペダリングトレーニングが、神経・筋レベルで下肢協調性の改善が可能であるかどうか、ならびに転倒時に反応として出現する素早い下肢の前方ステップ動作を素早くすることが可能かどうか検証する必要があると考えた。

2. 研究の目的

- (1) 60 歳以上の高齢者に対し、上述の固定式電磁ブレーキ式自転車を用いた軽負荷スプリントトレーニングを行い、その前後で自転車運動時の下肢筋活動がどのように変化するか明らかにすること。
- (2) 軽負荷スプリントトレーニングの前後で、後方から外乱刺激を加えた際に発生する、転倒予防のステップ反応時のステップ動作 (反応時間, 速度) や下肢筋活動がどのように変化するか明らかにすること。

3. 研究の方法

実験 最大速度ペダリングトレーニングが
高齢者の自転車運動時下肢筋活動パ
ターンに与える影響の検証

(1) 対象者

65 歳以上の高齢者 21 名 (男性 9 名, 女性 12 名, 年齢 70.3±3.6 歳) を対象とした。被験者はいずれも日常生活が自立しており、ペダリング動作に支障となる下肢の整形外科的、神経学的既往および高血圧症、糖尿病、その他の内科的既往を有していない者とした。被験者を男女別に無作為に 2 群に分け、男女の各群を無作為に組み合わせることで、トレーニング群 10 名 (以下, TR 群) とコントロール群 11 名 (以下, CO 群) を設定した。被験者全員から星城大学研究倫理委員会承認の文書 (2009C0001) によりインフォームドコンセントを得た。

(2) 介入期間のトレーニング内容

TR 群には、最大速度ペダリングトレーニングを実施した。自転車トレーニングには、

電磁ブレーキ式自転車エルゴメーター（CO MBI社製、パワーマックスV）を使用した。ペダリング肢位は、被験者をサドルに座らせ、ペダルがクランクサイクルの最下点に位置したときに、被験者の膝屈曲角度が $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ になるようサドル高を設定した。トレーニングおよび各種データ測定時には、通常のフロアシューズを着用させ、トゥクリップにて足部を固定した。

ペダル負荷は、各被験者体重の1%（約0.5~0.7kp）とした。内容は5秒間の最大速度ペダリング、25秒間の休止を1セットとし、1日に計10セットを実施するものである。トレーニングは5週間、週2回、計10回実施した。

CO群は5週間の実験介入期間を設け、その間、体幹と下肢のストレッチ運動、歩行による持久力運動は許可し、自転車エルゴメーターを使用する運動のみを禁止した。

TR群とCO群はともに介入期間の前後に以下の自転車運動のパフォーマンスと、自転車運動時の筋電図評価を受けた。

(3) 自転車運動のパフォーマンス

自転車運動のパフォーマンスとして、最大ペダル回転数とピークパワーを計測した。最大ペダル回転数は、各被験者に体重の1%（0.4~0.7kp）、1.0 kp、2.0 kp、3.0 kpの4つのクランク抵抗で最大速度によるペダリングを行わせ、その間に得られた最大ペダル回転数を記録したものである。

パワーは、力と速度の積であり、ここでいうピークパワーはクランク抵抗（力）とペダル回転数（速度）の関係から導き出す個人の最大パワーのことである。前述のペダリングから得られたクランク抵抗とペダル回転数との関係から最小二乗法により回帰直線を算出し、さらにその回帰式からピークパワー（最大ペダル回転数の50%×最大ペダル負荷抵抗の50%で得られるパワーに相当）を以下の計算式に当てはめ算出した。

$$\begin{aligned} & \text{(ピークパワー算出のための計算式)} \\ & \text{回帰式 } y=ax+b \text{ において,} \\ & \text{ピークパワー(watt)} = b/2a(\text{kp}) \times b/2(\text{rpm}) \end{aligned}$$

(3) 自転車運動時筋電図評価

前述のTR群トレーニングと同じ固定式自転車、同じペダリング肢位で、各被験者の体重の2%負荷で50rpm（以下、低回転条件）、および体重の1%負荷で100rpm（以下、高回転条件）の短時間のペダリング運動を行わせ、その間に右側のクランクサイクルの上死点からの信号測定（以下、TDC）と同側の右下肢外側広筋（以下、VL）と、右大腿二頭筋（以下、BF）から筋電図の記録を行った。

記録した筋放電は、各被験者の最大随意収

縮で正規化し（%MVC）、最も回転数が安定していた5回転分の波形を、TDC信号をトリガーに加算平均処理を行った。VLとBFの加算平均波形は、60msのRMSを用いて平滑化処理を行い、クランク角度 36° 毎の10位相の筋活動量を%RMSEMGとした。TR群、CO群とも介入期間の前後にVLとBFの筋活動パターンを比較した。

実験 . 最大速度ペダリングトレーニングが高齢者転倒予防のための前方ステップ動作に与える効果の検証

(1) 対象者

研究の参加に同意の得られた75歳以上の要支援女性高齢者16名を対象とした。被験者は全員、歩行が自立していた。被験者をランダムに8名ずつ、最大速度ペダリングを行う群（以下、HiTR群）（平均年齢 80.6 ± 5.2 歳）と快適速度ペダリングを行う群（以下、LoTR群）（平均年齢 81.6 ± 3.5 歳）に分けた。被験者全員から星城大学研究倫理委員会承認の文書（2010C0021）によりインフォームドコンセントを得た。

(2) ペダリングトレーニング

ペダリングトレーニングには、HiTR群、LoTR群ともに、実験のTR群で使用したものと同一自転車エルゴメーター、同じペダリング肢位とした。

HiTR群は、実験のTR群が行った最大速度ペダリングトレーニングを同じプロトコルで5週間計10回実施した。

LoTR群は、快適速度ペダリングトレーニングを行った。各被験者の体重の2%負荷（約1.0~1.2kp）で5秒間の快適速度ペダリング、25秒間の休止を1セットとし、1日に計10セット実施した。HiTRと同様に、トレーニングは5週間、週2回、計10回実施した。

HiTR群、LoTR群ともに、5週間のトレーニング介入期間前後に後述の前方転倒回避ステップの評価を行った。

(4) 前方転倒回避ステップの評価

前方転倒回避ステップの評価には、Tether-Release法を用いた（Hsiao-Wecksler ET, J Electromyogr Kinesiol 18: 179-87, 2008）。被験者にハーネス（サンコー社製、EHC-9A-S）を装着し、腰部背面に長さ2m、直径5mmのワイヤー（以下、牽引ワイヤー）、および胸部背面に転倒防止用のランヤード（サンコー社製、DJR-SA-RLS 24AP）を取り付けた。転倒防止用のランヤードは実験施設の天井に固定された支柱に取り付けた。ハーネスの腰部背面の固定用金具と牽引ワイヤー牽引機構との間に、牽引解除のトリガー信号を導出する目的、および被験者身体前傾時の

牽引力を導出する目的でロードセル (NORAXON 社製, EM554) を介在させた。ワイヤー牽引機構の離脱スイッチは、被験者の 2m 後方の壁の手すりに固定した。牽引ワイヤーを固定したスイッチは、ボタン操作によってロックを解除することが可能である。ステップ時の踵離地および接地時のトリガー導出のため、踏み出し脚の足底踵部にフットスイッチ (NORAXON 社製, EM556) を装着した。筋電図 (NORAXON 社製, Telemetry240 OT) の導出筋は、踏み出し脚の大腿直筋 (以下, RF), 外側広筋 (以下, VL), 大腿二頭筋 (以下, BF) とし、前述のロードセル, フットスイッチと同期させた。踏み出し脚のステップ長を計測するために、被験者の側方 3 m の位置に筋電図と同期された動作解析用のビデオカメラ (Victor 社製, GR-DF590-S) を設置した。

ステップ動作は、まず牽引ワイヤーで被験者の背部を、体重の $20 \pm 2\%$ の力で牽引した状態で身体を前傾させた。被験者に対し、牽引が解き放たれた瞬間にあらかじめ設定された踏み出し脚を、なるべく速やかに一步前に踏み出し、かつ一步で踏みとどまるよう指示した。牽引解除のタイミングは、被験者が前傾姿勢をとってから、ロードセルの値が安定してから 5 秒以降で検査者の任意の時間とした。被験者の中には、牽引解除から一步で踏みとどまらず、対側下肢の 2 歩目など複数回のステップが生じる場合があったが、解析対象は最初の一步目のみとした (図 1)。

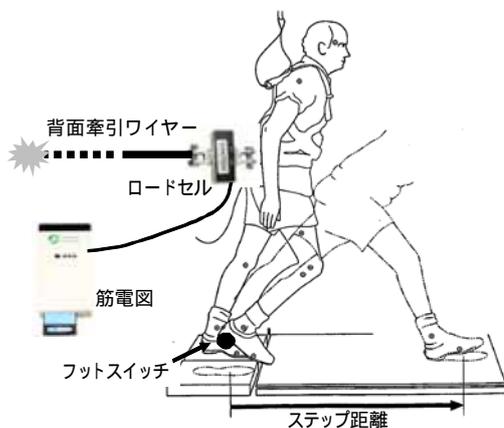


図 1 . 転倒回避ステップ動作の評価方法

(5) データ分析

筋電図の解析には NORAXON 社製 Myoresearch ver 2.1 を用い、ビデオ画像の解析には画像解析ソフト ImageJ ver. 1.44 を用いた。牽引解除から踏み出し脚の踵離地までの時間は反応時間とした。踏み出し脚の踵離地から再び同側下肢の踵が接地するまでの時間をステップ時間とした (時間変数の単位は全て ms)。ステップ長は各被験者の身長で除

すことで正規化を行った (%height)。また、ステップ時間とステップ長から、ステップ速度 (m/sec) を算出した。

ステップ動作の下肢筋活動の分析は、筋活動潜時およびステップ動作後の筋活動量で評価した。得られた筋活動は全波整流を行った。筋活動潜時は、牽引解除から筋活動の立ち上がりまでの時間である。筋活動開始は牽引解除前 1 秒間のベースラインの平均値を標準偏差の二倍上回った時刻として定義した。ステップ動作後の筋活動量をみる目的で、RF と VL の踏み出し脚のステップ終了後 (踏み出し脚接地直後) から 0.5 秒間の筋活動を抽出した。この筋活動を積分し、各被験者の膝伸展における 0.5 秒間の最大随意収縮時の積分値で除して正規化を行い、VL 筋活動量 (%iEMG) とした。

HiTR 群、LoTR 群ともに介入期間の前後で前方転倒回避ステップの時空間パラメータと大腿筋活動パターンを比較した。

4 . 研究成果

実験 . 最大速度ペダリングトレーニングが高齢者の自転車運動時下肢筋活動パターンに与える影響の検証

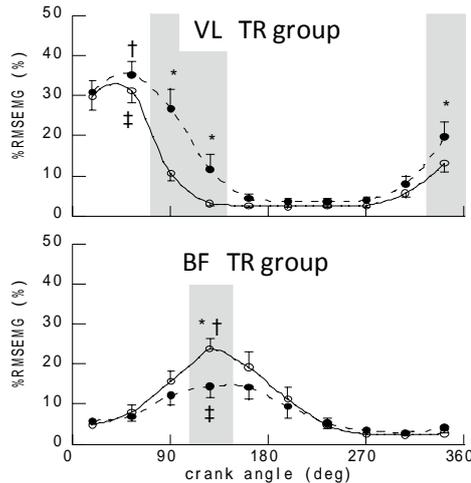
トレーニング後に TR 群では、ペダリング運動で評価した無酸素パワー ($332.3 \pm 64.7 \rightarrow 427.2 \pm 106.8$ Watt, $p < 0.01$), 最大ペダル回転数 ($142.1 \pm 16.6 \rightarrow 156.3 \pm 19.1$ rpm, $p < 0.01$) が有意に上昇した。

筋電図の解析では、TR 群の高回転条件 (100rpm でペダリングする) のみ変化があった。トレーニング後、VL ではクランク角度 $72^\circ \sim 143^\circ$, および $324^\circ \sim 359^\circ$ の位相において筋活動量が減少し (全て $p < 0.05$), ピーク位置は変化しなかった (図 2 上段)。BF では、筋活動のピーク位置はクランク角度 $108^\circ \sim 143^\circ$ の位相においてトレーニング前後で変化はなかったものの、TR 後にはピーク筋活動量が増大した ($p < 0.05$) (図 2 下段)。C 群では、介入期間前後で全ての結果について有意な変化はなかった。

このように、最大速度ペダリングトレーニングによって自転車運動で評価した下肢パワーと最大ペダル回転数が向上する結果となった。また最大ペダル回転数向上の要因が高回転ペダリング中の筋活動パターンに反映された。トレーニング後の大腿筋活動様相の変化は、1 サイクルにおける VL の筋活動時間が短縮され、筋活動の立ち上がりが早くなり、またより早い段階で脱力が行えるようになったことを示す。言い換えれば、筋活動の切り替えが無駄なく素早く行えるようになったことを示していると考えられる。BF の 1 サイクル中の筋活動は、トレーニング後

にピーク筋活動のみが増加した。自転車運動時のBFの活動には個人差があるとされているため (Ryan MM, et al. J Electromyogr Kinesiol 2: 69-80, 1992), この変化をトレーニング効果とするか否かは判断が難しいが, TR 後には, 瞬間的なペダル引き上げ動作において積極的な膝屈曲を行っていた可能性がある。

結論として, 本研究は高齢者に対する最大速度ペダリングトレーニングが下肢敏捷性を高める一つの有用なトレーニング法となることを示した。



トレーニング前(●と破線), トレーニング後(○と実線)のデータは全て平均±SEで示す。トレーニング期間前後で統計学的に有意差を認めた範囲を*($p < 0.05$)と灰色で示す。†はVLの, ‡はBFの, それぞれのピーク筋活動を示した位置を示す。

図2. 最大速度ペダリングトレーニング前後の高回転条件(100rpm)ペダリング時大腿筋活動パターンの比較

実験 . 最大速度ペダリングトレーニングが高齢者転倒予防のための前方ステップ動作に与える効果の検証

HiTR 群におけるトレーニング期間中のトレーニング毎の最大ペダル回転数の推移をみると, 介入期間中に全ての被験者が早い時

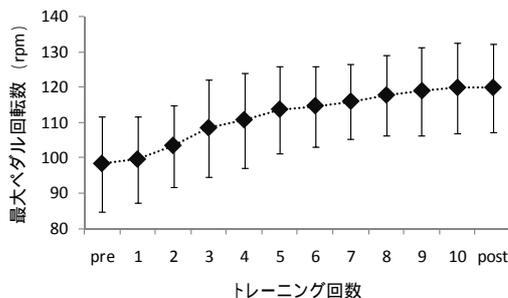


図3. HiTR 群の最大ペダル回転数の推移

期から増大していた(図3)。このように, 高齢者が普段経験することが少ない最大速度のペダリング運動によって, 下肢敏捷性の機能は比較的早期に獲得されるものと考えられる。

前方転倒回避ステップについて, 介入期間後に, ステップ時間, ステップ長, ステップ速度に変化が現れ, 反応時間には変化がなかった(HiTR; $297 \pm 67\text{msec} \rightarrow 266 \pm 49\text{msec}$, LoTR; $306 \pm 76\text{msec} \rightarrow 311 \pm 73 \text{msec}$, $p > 0.05$). ステップ時間は, HiTR 群のみ, トレーニング後にステップ時間の短縮が認められた($p < 0.01$)(図4A). ステップ長は, HiTR 群と LoTR 群ともに有意に増加した($p < 0.05$)(図4B). ステップ速度は, HiTR 群のみ有意に増加した($p < 0.05$)(図4C).

ステップ時の筋活動パターンの分析では, HiTR 群のみ, トレーニング期間後に BF 潜時が有意に短くなり($p < 0.01$), RF($p < 0.01$)と VL($p < 0.01$)の筋活動量が減少した(表1). HiTR 群の RF 潜時, VL 潜時, LoTR 群の項目は介入期間前後で変化を認めなかった。

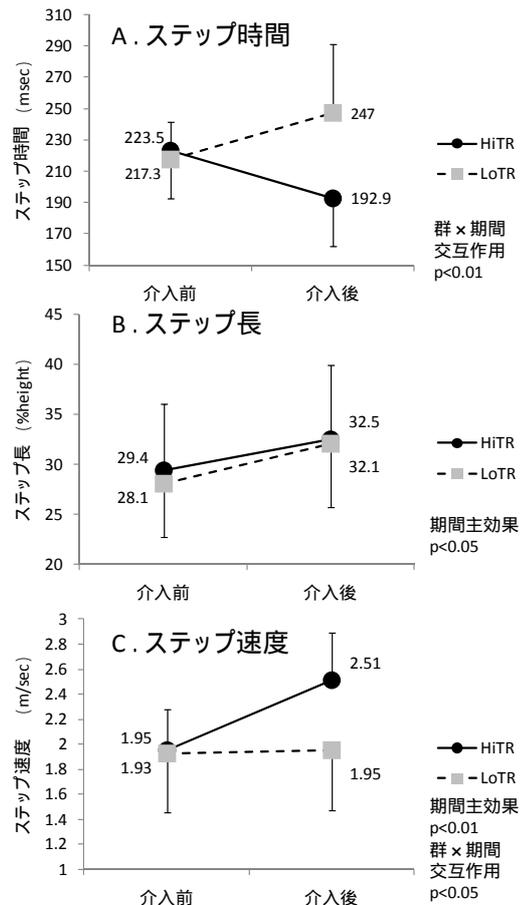


図4. 介入期間前後における転倒回避ステップ動作の各パラメータ

	HiTR群		LoTR群	
	介入前	介入後	介入前	介入後
RF潜時 (msec)	120.6 ± 30.9	105.5 ± 25.5	114.1 ± 33.4	115.6 ± 39.1
VL潜時 (msec)	101.9 ± 18.9	81.1 ± 12.6	100.9 ± 15.6	102.0 ± 20.0
BF潜時 (msec)*	96.8 ± 12.4	84.8 ± 12.3	92.1 ± 10.9	95.4 ± 13.9
RF活動量 (%MVC)*	65.3 ± 16.5	47.2 ± 13.3	62.6 ± 20.1	64.9 ± 19.8
VL活動量 (%MVC)*	62.6 ± 17.5	49.2 ± 17.3	58.9 ± 21.7	60.1 ± 23.3

全て平均 ± 標準偏差。*潜時は牽引が解除されてから筋活動が立ちあがるまでの時間。*活動量はステップ直後の膝伸展筋の0.5秒間の活動量を示す。
*は期間要因と群要因のそれぞれで交互作用がp<0.01で認められた項目

表1. 介入期間前後におけるステップ動作時の大腿筋活動パターンの変化

研究の結果、快適速度ペダリングに対して、最大速度ペダリングトレーニングは、転倒のきっかけが生じた後の転倒回避時に必要な前方ステップの動作速度を向上させることが明らかとなった。本研究で用いたステップ動作において、BFの活動は、牽引が解除されてから、下肢を踏み出す際に膝を屈曲させる作用がある。ステップ動作時の活動順序をみると、RF、VL、BFの3筋の中で最も最初に活動する筋であり、HiTR群のBF潜時が短縮されたことは、外乱に対する筋の応答性が向上したと考えられる。すなわち、つまり等、転倒のきっかけが生じた直後の反応性が早くなることを示している。ステップ動作接地直後のRFやVLの活動は、前方に倒れていく身体の体重と重心の前方移動を止めるために膝の伸展動作が必要となる。HiTR群のトレーニング後に筋活動量が減少したことは、ステップ速度が向上したことで、身体が大きく前方へ倒れる前に踏み出しが完了することで、身体に加わる前方への運動エネルギーが小さいため、少ない筋活動で踏みとどまれたものと考えられる。

本研究を通じ、研究代表者は、つまずきによる転倒を防止するには、つまずき直後の姿勢の崩れが大きくなる前に下肢を踏み出すことが重要であると考えた。そのために、転倒予防訓練においては、筋力増強のみではなく、全身反応性や、動作速度を改善させるトレーニングが必要であると考えた。

高齢者にとって下肢筋力を向上させるトレーニングは国内外で多くの研究報告があるものの、素早い踏み替え動作のような敏捷性を向上させるトレーニングにターゲットを絞った研究報告は少ない。さらに、転倒予防の報告はいずれも“つまずかない”“ふらつかない”など、予防する視点の報告が多いが、本研究はその次の転倒回避動作に焦点をあてているため、転倒予防に意義深い内容であると考えた。

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2件)

- (1) 越智 亮、高石鉄雄、下野俊哉：高齢者の下肢敏捷性向上のための自転車運動

を用いたトレーニングの開発。星城大学リハビリテーション・システム開発研究所紀要4: 39-44, 2009. 査読無

- (2) 越智 亮、對馬 明、高石鉄雄：高ペダル回転数の自転車トレーニングが高齢者の敏捷性に与える効果。総合リハビリテーション 39(5): 483-489, 2011. (2010年度で既に掲載決定) 査読有

[学会発表](計4件)

- (1) 越智 亮、高石鉄雄、下野俊哉：高齢者に対する下肢敏捷性向上のための自転車を用いた軽負荷トレーニングの効果。第44回日本理学療法学会大会, 2009年5月28日, 東京都
- (2) 越智 亮、高石鉄雄：トレーニング前後におけるペダリング時外側広筋筋活動様相に対する量的分析と時間的分析。第14回理学療法の医学的基礎研究会, 2009年5月30日, 東京都
- (3) 越智 亮、對馬 明、高石鉄雄：高齢者の敏捷性向上のための高ペダル回転数自転車運動の効果—高回転ペダリング中の大腿筋活動に着目して—。第11回JSEK, 2009年11月7日, 京都府
- (4) 越智 亮、古川公宣、下野俊哉：転倒防止時の補償的ステップ動作は支持面や注意干渉によって影響を受ける。第15回理学療法の医学的基礎研究会学術集会, 2010年5月26日, 愛知県

6. 研究組織

- (1)研究代表者

越智 亮 (OCHI AKIRA)

星城大学・リハビリテーション学部・助教
研究者番号：60410891

- (2)研究分担者

()

研究者番号：

- (3)連携研究者

()

研究者番号：