

機能訓練ロボットを用いた前脛骨筋の遠心性収縮トレーニングによる臨床的効果の検証

Verifying the clinical effect of the eccentric muscle contraction training to Tibialis anterior muscle by training robot

○ 久保田圭祐（埼玉大、埼玉県立大） 伊藤翔太（埼玉大） 尾形邦裕（産総研） 辻俊明（埼玉大）

Keisuke KUBOTA, Saitama University, Saitama Prefectural University

Shota ITO, Saitama University

Kunihiro OGATA, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Toshiaki TUJI, Saitama University

Abstract: We focused on the characteristics of eccentric muscle contraction of the tibialis anterior muscle during walking. We developed a training robot for eccentric muscle contraction and evaluated the results in a clinical site. The subjects were 6 elderly in a local day care service. The total number of training, which was held twice a week, was 8 times. Timed up and go Test (TUG) and Functional Reach Test (FRT) were used as indices of the functional evaluation. The results showed a significant improvement in TUG. Some previous studies have shown strong correlation between TUG and fall. Hence, the results in our study suggest a positive beneficial effect of eccentric muscle contraction training of tibialis anterior muscle on reduction of fall risk.

Key Words: eccentric muscle contraction, tibialis anterior muscle, training robot, Timed up and Go Test

1. 背景

現在、我が国では高齢者人口の急速な増加が大きな問題とされている。総務省のまとめ⁽¹⁾によると、団塊の世代が全て75歳以上となる2025年には、75歳以上が全人口の18%になる。高齢者人口の増加に伴い社会保障にかかる費用の増大も見込まれ、財源の確保・社会保障制度の充実に對してなにかしらの対策を講じる必要がある。

平成18年4月の介護保険改正において介護予防に対するアプローチが導入され、予防重視型のシステムの確立が必要とされ始めた。これは、高齢者が要支援、あるいは要介護状態になることを防ぎ、地域で自立して生活することができるようにすることを目的としている。また、医療・介護費を含めた社会保障費の削減という観点からも非常に重要な政策であると考えられている。

平成25年度の国民生活基礎調査⁽²⁾では、介護が必要になった原因として、要支援者では高齢による衰弱が15.4%、骨折・転倒が14.6%であり、要介護者では高齢による衰弱が12.6%と上位3位以内を占めていると報告された。これらは主に身体機能の低下、活動量の低下に起因する要素であり、身体機能の維持・改善は介護予防において必要不可欠なアプローチ方法であると考えられる。身体機能の維持に対する代表的な治療方法としては、関節可動域訓練や筋力増強訓練、バランス訓練、動作訓練などが存在する。その中でも、高齢者の理学療法において、筋力増強訓練は社団法人日本理学療法士協会ガイドライン特別委員会理学療法診療ガイドライン部会⁽³⁾にて推奨グレードA、エビデンスレベル2と分類され、現時点では科学的根拠のある治療法であると考えられている。

身体機能・活動量の維持において、移動手段の確保は重要である。その中でも歩行という動作は、人間の移動において無意識に行われる動作である。ペリーら⁽⁴⁾は、歩行動作における3つのロッカー機能の重要性について説明している。そのロッカー機能のひとつにヒールロッカーが存在する。ヒールロッカーとは、ヒールコンタクト時に身体重量が立脚側下肢の上に落下する際に生成される運動量を保存するために重要な機能である。足部の落下速度を制限す

るために前脛骨筋の遠心性収縮が必要となる。その中でも、ヒールロッカーは歩行速度に関連性があると報告する研究⁽⁵⁾が存在し、円滑な歩行動作の実現には、このヒールロッカー機能に着目する必要があると考えられる。しかし、臨床的な視点から、筋の遠心性収縮のトレーニングはセラピストの主観が含まれ、抵抗力・抵抗を加える方向等は一定にして行うことが困難である。より再現性の高い評価・治療を行うとなると大型な機器が必要となるため、地域の施設で容易に実施することは困難である。

そこで、我々はヒールロッカー機能に関わる前脛骨筋に着目して、独自に考案した小型の訓練機器を開発した。本機器は筋力を可視化して提示しながら遠心性収縮トレーニングを行うことにより、適切な負荷でのトレーニングを実施するものである。そして地域のデイサービスへ通っている高齢者を対象に本訓練機器を使用したトレーニングを行った。Itoら⁽⁶⁾の報告は、本実験機器の開発方法と信頼性、臨床試験の結果について述べている。今回は、これら臨床試験による結果を理学療法という視点から解釈し、考察していくことを目的として研究を行った。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、地域のデイサービスへ通っている歩行可能な高齢者、男女8名（男性2名、女性6名、年齢:86.9±5.6歳、身長:149.3±7.2cm、体重:52.0±6.0kg）とした。下肢の疼痛を有するもの、過去に重篤な既往歴のあるものは除外した。被験者とその家族には、あらかじめ研究内容を説明し、同意を得て計測を行った。評価・計測の実施期間に、訓練の拒否を訴えた2名の被験者は除外し、最終的には6名が計測に参加した。

2.2 訓練機器

今回使用した訓練機器はItoらの報告と同様の物を使用した。また、本訓練機器による訓練時の前脛骨筋の筋活動データを用いて、同一被験者内の試行間と各被験者間でのIEMGの相関係数を算出した。その結果、いずれにおいて

も高い相関が示され、本訓練機器は再現性の高い訓練が実施可能であることが証明された。



Fig.1 Ankle training robot

1.3 評価・訓練回数

評価・訓練期間は約1カ月間とし、週2回、合計8回訓練を実施した。そのうち、1,3,5,7回目は訓練と評価を行い、最終日は評価のみを行った。

Table.1 The number of times of execution of training and evaluation in each subject.

Day in gray shaded were carried out both evaluation and training.

| day No | Train ing | | | | |
|-----------|--------------|------|------|-------|-------|
| | 10/30 | 11/3 | 11/6 | 11/10 | 11/13 |
| Subject1 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Subject2 | ○ | × | ○ | × | ○ |
| Subject3 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Subject4 | × | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Subject5 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Subject6 | ○ | ○ | × | × | ○ |

| day No | Evaluation | | | | total |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|
| | 11/17 | 11/20 | 11/24 | 11/27 | |
| Subject1 | ○ | ○ | × | × | 7 |
| Subject2 | × | × | × | ○ | 3 |
| Subject3 | ○ | ○ | ○ | ○ | 8 |
| Subject4 | ○ | ○ | ○ | ○ | 7 |
| Subject5 | ○ | ○ | ○ | ○ | 8 |
| Subject6 | ○ | ○ | ○ | ○ | 6 |

1.4 訓練方法

訓練時の姿勢は椅子座位とし、足部を機器のフットプレート上にバンドで固定した。訓練開始時、足部を背屈位としてフットプレートに垂直に底屈方向へと一定の力が加えられた。被験者は訓練機器の前方に取り付けられたディスプレイを見ながらトレーニングを実施した。力の大きさに比例して半径が大きくなる円が、指示された力の大きさを表す円に一致するよう、自身で力を発揮させた。負荷の強

さは40Nとした。

1.5 評価方法

機器による訓練効果に対する評価方法として、Timed up and Go Test(以下、TUG)と Functional Reach Test(以下、FRT)を行った。

(1)Timed up and Go Test⁽⁷⁾

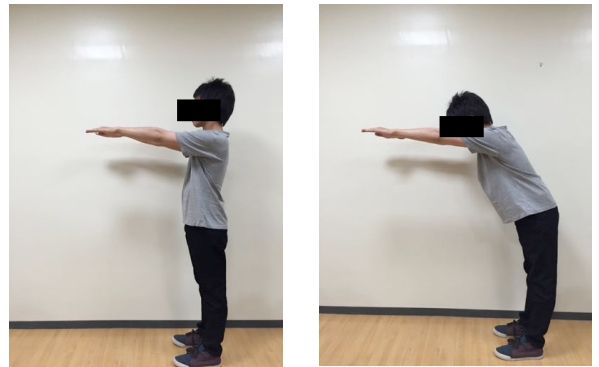
TUG は、肘掛け椅子から立ち上がり、3m 前方のポールを回り、再度椅子へ座るまでの時間を計測した。一度練習を行い、その後2回計測を実施し、最大値を採用した。



Fig2. Scene of the TUG

(2)Functional Reach Test⁽⁸⁾

FRT は、立位にて両上肢を90°前方挙上した地点から可能な限り前方へリーチを行った地点までの距離を計測した。一度練習を行い、その後2回計測を実施し、最大値を採用した。



Start position

End position

Fig3. Scene of the FRT

(3)フットスイッチを用いた歩行評価

右側の屋内用シューズの靴底の踵骨部と前足部（母趾のMP 関節部に相当）にフットスイッチを貼付し、踵とつま先がそれぞれ床面に接地するタイミングを計測した。踵のスイッチが on になるタイミングとつま先のスイッチが on になるタイミングの差分を算出し、ヒールコンタクトからフットフラットになるまでの経過時間を計測した。また、1歩行周期において、ヒールコンタクトからフットフラットまでの経過時間が占める割合を算出した。踵のスイッチが on になるタイミングからつま先のスイッチが on になるタイミングが近いほど、足底全体での接地に近づいていると考え、ヒールロッカー機能が消失しているものと定義した。

この評価は TUG の計測と同時に計測を実施した。



Fig4. Attachment of the foot switch

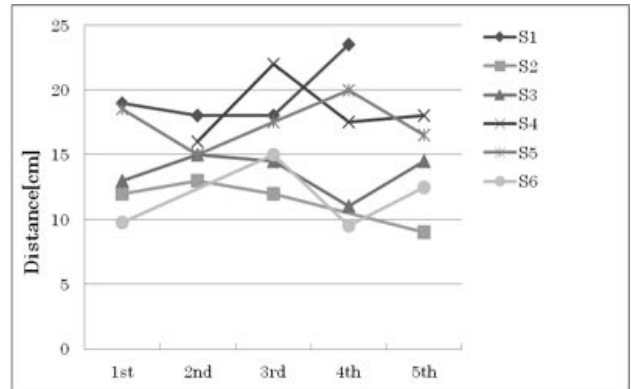


Fig6.FRT-changes over time

3. 結果

(1) TUG

初期評価時からの各被験者の結果を評価日ごとに示す。Sumway-Cook ら⁽⁹⁾の先行研究を参考にカットオフ値を 13.5 秒と定義した。その結果、初期評価時は 6 人中 1 人がカットオフ値を下回ったのに対して、最終評価時は 6 人中 5 人がカットオフ値を下回った。また、初期評価と比較した最終評価時の改善率は、6 人中 5 人に被験者で改善が認められ、遂行時間が短縮する傾向が多くの場合に認められた。1 名の被験者は改善が認められなかった。

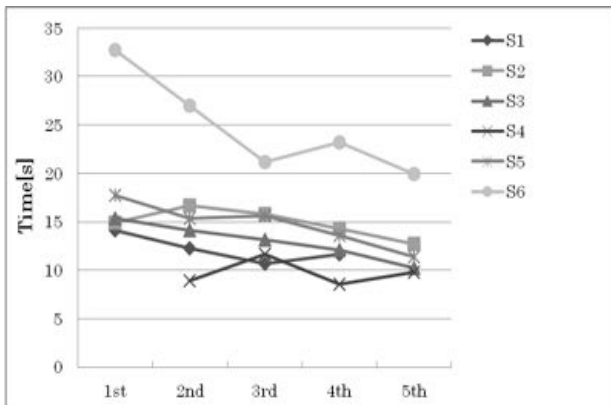


Fig5.TUG-changes over time

Table2. Improvement rate between the first and last evaluation.

| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
|---------------------|------|------|------|-------|------|------|
| First evaluation[s] | 14.1 | 14.9 | 15.3 | 8.9 | 17.8 | 32.8 |
| Last evaluation[s] | 11.7 | 12.7 | 10.2 | 9.8 | 11.4 | 19.9 |
| Improvement rate[%] | 17.2 | 14.5 | 33.2 | -10.3 | 36.1 | 39.2 |

(2) FRT

初期評価時からの各被験者の結果を評価日ごとに示す。また、初期評価と比較した最終評価時の改善率を示す。FRT 距離の短縮を認めたのは、6 人中 2 人であった。

Table3. Improvement rate between the first and last evaluation.

| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
|----------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| First evaluation[cm] | 19 | 12 | 13 | 16 | 18.5 | 9.75 |
| Last evaluation[cm] | 23.5 | 9 | 14.5 | 18 | 16.5 | 12.5 |
| Improvement rate[%] | -23.7 | 25.0 | -11.5 | -12.5 | 10.8 | -28.2 |

(3) フットスイッチを用いた歩行評価

今回は、データ抽出可能であった 1 名のデータを代表値として使用した。初期評価時はヒールコンタクトからフットフラットまでの経過時間が 0.046 秒であったのに対して、最終評価時は 0.057 秒であった。1 歩行周期に占める割合においては、初期評価時 4.0%であったのに対して、最終評価時は 5.7%と、いずれにおいてもヒールコンタクトからフットフラットまでの経過時間の延長が認められた。なお、初回評価時はフットスイッチの不具合によりデータ抽出が困難であったため、2 回目の評価からの計 4 回分のデータを抽出した。

Table4. Duty ratio of heel contact

Δt is the difference on the foot switch of the heel and the forefoot. T is the time from the foot switch of the heel to the foot switch for the next heel.

| | 1st | 2nd | 3rd | 4th |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Δt | 0.046 | 0.046 | 0.050 | 0.057 |
| T | 1.160 | 1.128 | 1.076 | 1.008 |
| $\Delta t/T$ | 4.0% | 4.1% | 4.6% | 5.7% |

4. 考察

今回、我々は前脛骨筋の遠心性収縮トレーニングを目的とした訓練機器を用いた臨床試験において、歩行時の訓練効果を検証することを目的に研究を実施した。

結果より TUG において、6 人中 5 人の被験者で遂行時間の短縮を認め、さらに 6 人中 5 人がカットオフ値を下回る結果となった。また、フットスイッチの結果より、1 人の被験者にてヒールコンタクトからフットフラットまでの時間の延長を認め、ヒールロッカー機能の出現を認めた。ヒールロッカー機能は、前脛骨筋の活動によって下腿の前傾を促し、その後大腿の前進運動を可能にし、下肢全体の前進運動を行うと考えられている。つまり、遊脚から立脚への移行時に生じる身体重心の下方への落下を、前方への運動量として変換する役割を担っている。このことを踏まえ

ると TUG の遂行時間の短縮は、足部機能の改善にてヒールロッカー機能が出現し、ヒールコンタクト時のエネルギーを効率的に前進歩行のエネルギーに変換できたためである可能性が示唆された。また、他の要因としては、TUG は椅子からの立ち上がりも計測に含む複合的な動作を評価するテストバッテリーである。立ち上がり動作では、体幹前傾と下腿前傾による重心位置の前下方への移動の原動力として前脛骨筋が重要な役割を果たし⁽¹⁰⁾、それ以降立位へと移行していくと言われている。今回の結果より、前脛骨筋エクササイズが立ち上がり動作速度の向上、円滑性の向上に寄与した可能性も考えられる。島田らは⁽¹¹⁾、TUG と転倒、外出頻度、運動習慣に有意な関係を認めたと報告した。今回の結果より、各被験者で TUG の改善が認められたため、本機器を用いたトレーニングが転倒リスクの軽減につながる可能性が示唆された。TUG の遂行時間の短縮が認められなかった 1 名の被験者に関しては、初期評価時よりカットオフ値を下回っており、身体機能の高い被験者と考えられるため、今回のトレーニングでは著明な効果が示されなかったと考える。

FRT に関しては、訓練前後にて改善を認められなかった。先行研究において、前後重心移動課題では、前脛骨筋と腓腹筋の筋活動を高める同時収縮が強くなったと報告がなされている⁽¹²⁾。身体重心を前方へ移動させるほど、足関節周囲には大きなトルクが生じる。本来、その姿勢を保持するためには、そのトルクに耐える力が必要とされているが、今回の訓練時の負荷量では、足関節のトルクに耐えうる筋力増強には至らなかったと考えられる。また、前方リーチ時の主動筋は腓腹筋である。高齢者は腓腹筋を含む下腿三頭筋の筋力低下を招き、結果的に歩行パフォーマンスが低下することが知られている。前方リーチ時による主動筋の筋力低下もこの結果に影響している可能性が考えられる。また、今回の被験者の大半は円背姿勢を呈しており、脊柱の変形により体幹の伸展が困難であった。そのため、前方リーチ時の股関節屈曲に伴って体幹の屈曲傾向が増強し、両上肢が前下方へ向かってしまった。高齢者特有の全身的な骨格の変形、あるいは筋を含む軟部組織の短縮や関節拘縮も訓練効果を認めなかった要因であると考えられる。

研究限界として、運動学習による効果を排除しきれなかったことが挙げられる。TUG のような普段の生活では行わない新規のタスクにおいて、評価を繰り返すことで徐々に運動学習が行われ、遂行時間が短縮した可能性が考えられる。歩行能力の改善を示すためには、直線歩行など普段の生活から行う機会の多い方法を用いて、各歩行パラメーターをトレーニング前後で比較する必要がある。そのため今後は、直線歩行時の時間、歩幅、歩数から歩行による要素と足底部へのフットスイッチからの情報に関してより詳細に評価を行う予定である。また、歩行速度の算出が困難であった為、歩行の要素、あるいは立ち上がりの要素のどちらによる効果なのか詳細には明らかにはできなかったため、その点も合わせて計測を行っていく。

5. 結論

今回、筋力可視化機能を持つ機器での遠心性収縮トレーニングを実施し、その訓練効果を検証した。その結果、TUG において有用な訓練効果を認めたが、FRT に対しては認めなかった。神山ら⁽¹³⁾は、運動介入が医療費の上昇抑制効果をもたらす可能性を報告した。また、地域全体の健康増進を考えた場合、より手軽な運動を日常生活に取り入れた医

療費抑制効果の検討が必要であると述べている。今回用いた訓練機器は、視覚的にも運動方法がわかりやすく、また抵抗の強さを調節できるというメリットを持つ。今後、さらなる臨床試験を重ね、効果の実証を行う予定である。

参考文献

- (1) 総務省統計局，高齢者の人口，(<http://www.stat.go.jp/data/topics/topi721.htm>), 2016/6/24
- (2) 厚生労働省,平成 25 年 国民健康基礎調査の概況, pp31, 2013
- (3) ガイドライン特別委員会 理学療法診療ガイドライン部会, 理学療法診療ガイドライン 第 1 版 身体性虚弱 (高齢者), pp1004-1037, 2011
- (4) Jacquelin Perry, 歩行分析 正常歩行と異常歩行, 医歯薬出版株式会社, pp19, 1992
- (5) Dorsch.S, Ada L, et al, The strength of the ankle dorsiflexors has a significant contribution to walking speed in people who can walk independently after stroke: an observational study, Arch Phys Med Rehabil, Vol.93, No.3, pp1072-1076, 2012
- (6) S.Itoh, K.Kubota, K.Ogata, and T.Tsuji, Exercise system for eccentric tibialis anterior contraction to improve ambulatory function, EMBC, 2016
- (7) Podsiadlo.D, Richardson,S, The timed up & go: A Test of basic functional mobility for frail elderly persons, J Am Geriatr Soc39, pp.142-148, 1991
- (8) Duncan.PW, Studenski.S,et al, Functional reach,predictive validity in a sample of elderly male veterans, J Gerontol, Vol.47, pp.93-98, 1992
- (9) Shumway-Cook.A, Brauer.S,et al,Predicting the probability for falls in community-dwelling older adults using the Timed Up & Go Test, Phys Ther, Vol.80, pp.896-903, 2000
- (10) 星文彦, 山中雅智ら, 椅子からの立ち上がり動作に関する運動分析, 理学療法学, Vol.19, No.1, pp.43-48, 1992
- (11) 島田裕之, 古名丈人ら, 高齢者を対象とした地域保健活動における Timed Up & Go Test の有用性, 理学療法学, Vol33, No3, pp105-111, 2006
- (12) 相馬優樹, 衣笠隆ら, 重心移動課題における足関節筋の同時収縮に及ぼす加齢の影響, 体力科学, Vol59, pp143-156, 2010
- (13) 神山吉輝, 川口毅ら, 高齢者の筋力系トレーニングによる医療費抑制効果, 体力科学, Vol53, pp205-210, 2004