■研究論文

高齢女性の自由歩行における立脚中の膝屈曲角度、 膝伸展力、歩行パラメータとの関係

Relationships among Knee Flexion in Stance, Knee Extension Torque and Gait Parameters during Normal Walking for Elderly Women

河合 恒¹⁾ 西原 賢²⁾ 比企 静雄³⁾

HISASHI KAWAI¹⁾, KEN NISHIHARA²⁾, SHIZUO HIKI³⁾

¹⁾ Graduate School of Human Sciences, Waseda University: 2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama 359-1192, Japan.

TEL +81 4-2949-8113 (3626) e-mail hkawai@toki.waseda.jp

²⁾ Department of Physical Therapy, Saitama Prefectural University

³⁾ Waseda University

Rigakuryoho Kagaku 20(4): 273-277, 2005. Submitted May 25, 2005. Accepted Jun. 29, 2005.

ABSTRACT: Relationships among knee flexion in stance, knee extension torque and gait parameters were examined for normal walking. Participants were healthy female subjects aged 41 to 82 years. Maximal knee flexion angle in stance (Kflx) and gait parameters such as stance, swing and walking speed were recorded with video and analyzed for normal walking. Knee extension isokinetic torque at Kflx and peak torque were measured using a Cybex 340 at 60°/s. Although peak torque was significantly different, knee extension torque at Kflx did not differ with age. Peak torque was significantly correlated with only the swing ratio, however knee extension torque at Kflx was significantly correlated with the swing ratio, swing/stance ratio, and the double stance phase and its ratio in the gait parameters. As a result, the usefulness of maximal knee extension torque at the near flexion angle used during walking, and swing and double stance were suggested for assessment of gait on the basis of muscle strength.

Key words: elderly, walking, knee extension torque

要旨: 本研究では、高齢者の自由歩行における立脚期の膝屈曲角度、膝伸展力、歩行パラメータとの関係を検討した。被験者は41～82歳の健康女性24名であった。被験者の自由歩行における立脚期の最大膝屈曲角度 (Kflx)、立脚期、遊脚期、歩行速度などの歩行パラメータをビデオ解析により測定した。Kflxでの膝伸展力、最大膝伸展力は、等速性回転力測定装置 (Cybex 340) を用いて60°/sの速度で測定した。最大膝伸展力には有意な加齢による低下が認められたが、Kflxでの膝伸展力については差がなかった。最大膝伸展力と有意な相関があった歩行パラメータは、遊脚率のみであったが、Kflxでの膝伸展力は、遊脚率、遊脚/立脚比、両脚支持期、両脚支持率との間に有意な相関があった。本研究の結果から、筋力に基づいた歩行評価について、歩行で使用される屈曲に近い角度での膝伸展力と、遊脚期や両脚支持期に関するパラメータの有用性が示唆された。

キーワード: 高齢者、歩行、膝伸展力

¹⁾ 早稲田大学大学院人間科学研究科：埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15 (〒359-1192) TEL 04-2949-8113 (3626)
e-mail hkawai@toki.waseda.jp

²⁾ 埼玉県立大学理学療法学科 ³⁾ 早稲田大学

受付日 2005年5月25日 受理日 2005年6月29日

I. 緒 言

近年、高齢者を対象として、身体機能向上や転倒予防を目的とした運動指導が盛んに行われている^{1,3)}。運動指導や筋力トレーニングなどの介入の効果は、最大歩行速度や膝伸展力などを用いて評価される^{3,4)}。これらの基礎データは、トレーニングプロトコルや介入後の目標値の検討において不可欠であり、これまでにボランティアや地域高齢者を対象として広範囲なデータが採取されてきた⁵⁻⁸⁾。

歩行速度と膝伸展力との関係について、山崎ら⁹⁾は、高齢患者を対象として、最大膝伸展力と最大歩行速度との関係を報告しているが、 1.2 Nm/kg よりも最大膝伸展力が低い被験者では高い相関が見られるが、それよりも高い被験者ではばらつく。これは、自立した歩行が行える指標としては 1.0 Nm/kg くらいの最大膝伸展力が必要となるが¹⁰⁾、自立歩行が可能な被験者では、最大膝伸展力に対して余裕を持った動作をしているためであると考えられる。自由歩行ではその傾向がさらに顕著に現れ、やはり最大膝伸展力との相関は見られない^{11,12)}。

以上のことから、自立歩行が可能な比較的健康な高齢者では、介入の結果、最大膝伸展力が向上しても歩行速度に反映されない場合が多くなる。しかし、実際に介護予防などの介入の対象となるのは自立歩行できる高齢者が多いので、最大膝伸展力の向上が歩行にどのような改善をもたらしたかを評価することが困難である。介護予防や自立歩行できる高齢者の理学療法においては、歩行速度よりも膝伸展力の影響を反映しやすく、簡便に測定可能なパラメータが使用されることが望ましいと考えられる。また、それらのパラメータが自由歩行においても膝伸展力の影響を反映するものであれば、高齢者の歩行テストをより安全に行える。

ところで、歩行において膝関節が最大の伸展モーメントを発揮するのは、立脚中の最大膝屈曲時である立脚中期の膝屈曲 20° 付近¹³⁾であるのに対して、最大膝伸展力の測定は、等尺性収縮の場合には膝屈曲 $45^\circ \sim 60^\circ$ と、より屈曲した状態で行われる^{14,15)}。また、等速性収縮の場合にも同様の範囲で最大膝伸展力は発揮される。この点にも最大膝伸展力と歩行速度とが対応しない理由があると考えられる。

そこで本研究では、高齢者の自由歩行における立脚中期の膝屈曲角度、膝伸展力、歩行パラメータとの関係を調べるため、健康高齢女性の自由歩行での立脚中期の最大膝屈曲角度と、その角度での膝伸展力を等速性回転力測定装置 (Cybex 340) によって測定し、最大膝伸展力、

歩行パラメータとの関係を検討した。歩行パラメータには簡便に測定が可能な、足と床の接触から得られる、立脚期、遊脚期、両脚支持期、歩行周期、ストライド幅、歩行速度などのパラメータを用いた。

II. 方 法

1. 被験者

被験者は、大学の公開行事で行われた体力測定の企画に参加した41歳から82歳までの健康女性24名であった。年齢、身長、体重の平均値と標準偏差はそれぞれ、 61.3 ± 13.6 歳、 $152.9 \pm 5.4 \text{ cm}$ 、 $52.2 \pm 6.4 \text{ kg}$ であった。被験者には、測定データは研究で使用するものであることを十分に説明した。

被験者には、約10 mを壁に沿って普通の速さで歩くように指示した。被験者の履物は、普段履き慣れた靴であった。

2. ビデオ解析

被験者の歩行の記録には、30フレーム/sのデジタルビデオカメラ (Digital Handycam DCR-VX1000, SONY) を使用し、最も安定した1ストライドが収まるように、歩行路の中央付近の横幅2.5 mの範囲を撮影した。

このビデオ録画を14インチのモニタ (横幅27.4 cm) 上でコマ送り再生し、視察によって約1 mmまでの分解能 (実際の約1 cmに相当) で、左右の踵接地、つま先離地、次の踵接地のフレームを検出し、立脚期、遊脚期、歩行周期、両脚支持期 (離地側の足のつま先離地-接地側の足の踵接地) を全て左右の平均で算出した。歩行周期に占める割合も算出した。足の動きは、1フレームで1.5~2.0 cmぐらいと速く、その瞬間のフレームを検出できないこともあるので、その場合にはフレームの中間の時点であるとして、フレーム間隔の1/2の精度で記録した。

踵接地から次の踵接地までの踵と踵の間の距離をストライド幅として測定した。ストライド幅/歩行周期によって歩行速度を算出した。

さらに、踵、膝関節、股関節中心を同様のビデオから検出し、立脚期の最大膝屈曲角度 (Kflx) を、膝最大伸展時を 0° として測定した。

3. 膝伸展力の測定

等速性回転力測定装置Cybex 340を用いて、最大膝伸展力を測定した。回転速度は高齢者が十分ついていける速度として $60^\circ/\text{s}$ に設定した。測定は右足、左足の順序で、それぞれ3回ずつ行い、全体を通しての最大値を最大膝伸

展力として、体重あたりの値で算出した。最大膝伸展力が発揮される角度もKflxと同様の定義で記録した。Kflxでの膝伸展力も同様に算出した。

統計解析

各測定値の高齢者の特徴を調べるために、被験者を65歳以上の高齢群（68～82歳，n = 11）と64歳以下の若年群（41～63歳，n = 13）の2群に分け、対応のないt検定を行った。歩行パラメータと膝伸展力との関係を調べるためには相関係数を用いた。いずれも有意水準は5%未満とした。

解析にはJMP4（SASインスティテュートジャパン社製）を用いた。

III. 結 果

1. 歩行パラメータ

高齢群と若年群の平均値と標準偏差を表1に示す。歩行パラメータは先行研究^{16, 17)}と同様に高齢群で衰退する傾向があったが、高齢群と若年群の間で有意な差が認められたパラメータはなかった。

2. 立脚期の最大膝屈曲角度

最大膝伸展力の発揮される膝関節角度、および立脚期の最大膝屈曲角度（Kflx）膝伸展力の高齢群と若年群の平均値と標準偏差を表2に示した。最大膝伸展力の発揮される膝関節角度は、高齢群 $45 \pm 10^\circ$ 、若年群 $47 \pm 12^\circ$ で有意な差はなかったが、Kflxの平均値と標準偏差は高齢群 $23 \pm 9^\circ$ 、若年群 $17 \pm 4^\circ$ で有意な差が認められた（ $p < 0.05$ ）。

3. 膝伸展力

最大膝伸展力の平均値と標準偏差は高齢群が 1.35 ± 0.18 Nm/kg、若年群が 1.88 ± 0.28 Nm/kgで有意な差があった（ $p < 0.01$ ）。Kflxでの膝伸展力が高齢群が 1.06 ± 0.28 Nm/kg、若年群が 1.21 ± 0.25 Nm/kgで有意な差は見られなかった（表2）。

4. 歩行パラメータと膝伸展力との関係

歩行パラメータと膝伸展力との相関を表3に示した。最大膝伸展力と有意な相関のあった歩行パラメータは遊脚率だけであった（ $p < 0.05$ ）。Kflxでの膝伸展力と有意な相関のあった歩行パラメータは両脚支持期、遊脚率、両脚支持率、遊脚/立脚比であった（ $p < 0.05$ ）。

表1 歩行パラメータの高齢群と若年群の平均値と標準偏差

パラメータ (単位)	高齢群 平均± SD n=11	若年群 平均± SD n=13
立脚期 (s)	0.66 ± 0.07	0.61 ± 0.04
遊脚期 (s)	0.41 ± 0.04	0.40 ± 0.03
両脚支持期 (s)	0.12 ± 0.03	0.11 ± 0.02
歩行周期 (s)	1.06 ± 0.10	1.01 ± 0.06
遊脚率 (%)	38 ± 2	39 ± 1
両脚支持率 (%)	12 ± 2	11 ± 2
遊脚/立脚比 (%)	62 ± 5	65 ± 4
ストライド幅 (m)	1.12 ± 0.13	1.18 ± 0.08
歩行速度 (m/s)	1.06 ± 0.17	1.18 ± 0.12

表2 最大膝伸展力発揮角度、Kflx、最大膝伸展力、Kflxでの膝伸展力の高齢群と若年群の平均値と標準偏差

パラメータ (単位)	高齢群 平均± SD n=11	若年群 平均± SD n=13
最大膝伸展力発揮角度 (°)	45 ± 10	47 ± 12
Kflx (°)	23 ± 9	17 ± 4*
最大膝伸展力 (Nm/kg)	1.35 ± 0.18	1.88 ± 0.28**
Kflxでの膝伸展力 (Nm/kg)	1.06 ± 0.28	1.21 ± 0.25

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

表3 歩行パラメータと膝伸展力との相関

パラメータ (単位)	最大膝伸展力 (Nm/kg)	Kflxでの膝伸展力 (Nm/kg)
立脚期 (s)	- 0.22	- 0.28
遊脚期 (s)	0.07	0.15
両脚支持期 (s)	- 0.34	- 0.41*
歩行周期 (s)	- 0.11	- 0.13
遊脚率 (%)	0.41*	0.47*
両脚支持率 (%)	- 0.39	- 0.46*
遊脚/立脚比 (%)	0.37	0.50*
ストライド幅 (m)	0.29	0.06
歩行速度 (m/s)	0.27	0.11

* $P < 0.05$

IV. 考 察

本研究の被験者の歩行速度を、女性の歩行を広範に調べたHimannら¹⁸⁾の報告と比較すると、本研究の若年群に相当するデータの平均値が1.27 m/s、高齢群に相当するデータが0.89 m/sと、若年群では速く、高齢群では遅い。これは若年群については身長の違いが影響したと考えら

れ、平均身長で補正をするといずれも0.77となる。高齢群についてはHimmanらの研究では、より高齢の被験者を含めていたことが理由と考えられる。年代区分はやや異なるが、ほぼ同じ年齢の高齢者を測定したKanekoら¹⁷⁾の報告と比較すると、高齢群が0.99m/sと近い値となっている。しかし、若年群では1.42 m/sと本研究の被験者が遅い。その他の歩行パラメータについても同様に若年群は低い傾向があった。

一方、最大膝伸展力については、女性の60°/sの等速性最大膝伸展力を大規模に測定したWeldonら¹⁹⁾の報告における、本研究の被験者の平均体重と同程度のデータと比較すると、高齢群が1.32 Nm/kg、若年群が1.47 Nm/kgで高齢群では同様の傾向であったが、若年群では先行研究よりも高かった。これらのことから、本研究の若年者は、最大膝伸展力は標準と比べて高く、Kanekoらの研究と比べると余裕のある歩行を行ったことが推察されるが、全体的には標準的な傾向を抽出できている。

最大膝伸展力が発揮される角度は、高齢群と若年群の間に差がないのに対し、立脚期の最大膝屈曲角度 (Kflx) は、高齢群では若年群と比較して、ばらつきも大きいが大きくなる傾向があった。歩行における膝伸展とCybexによる膝伸展力の測定とは、力が発揮される方向や股関節の屈曲角度などの条件は異なるが、高齢者では大きな膝伸展力を発揮しやすい角度で離地を行うことで、加齢による下肢の筋力の低下を補う傾向があることが考えられる。その結果として、Kflxでの膝伸展力に差が認められなくなり、最大膝伸展力に顕著な差があるにもかかわらず、歩行速度に影響しない。これは、若年者が余裕のある歩行を行ったことが関係している可能性もあるが、筋力低下にともなう高齢者の適応として注目される。

膝伸展に作用する筋は、大腿直筋、中間広筋、内側広筋、外側広筋から構成される大腿四頭筋群であり、深部筋である中間広筋以外は表面筋電図による筋活動の観測が可能である²⁰⁾。等尺性最大膝伸展における、それらの筋活動レベルの膝屈曲角度による変化を表面筋電図によって観測した報告によると²¹⁾、最大の膝伸展力が発揮される膝屈曲60°付近での大腿四頭筋群の各筋の活動レベルが同じで全て100%とすると、膝屈曲10°では大腿直筋、内側広筋、外側広筋の活動レベルはそれぞれ、90%、60%、80%である。一方、それらの筋の平均断面積の比は、およそ1:3:3であるので²²⁾、活動レベルと筋断面積との積から大腿直筋、内側広筋、外側広筋の発揮張力の比を近似的に算出すると、1:2:2.7くらいと考えられる。

筋活動レベルは膝屈曲30°では、大腿直筋が約5%、内

側広筋が約40%、外側広筋が約5%上昇し²¹⁾、それぞれの活動レベルは95%、85%、85%になる。同様に、発揮張力の比は1:2.7:2.7くらいであると推定される。

このように、膝屈曲角度が歩行で使用されるような範囲で変わっても、大腿四頭筋群のそれぞれの筋の発揮張力の比がそれほど変化しないことは、若年者と高齢者との間で、膝屈曲角度の違いによる各筋の活動レベルの変化特性が同じであると仮定すると、膝屈曲の大きい歩行を行う高齢者が、特定の筋を優先的に使用する傾向はそれほどなく、高齢者において大腿四頭筋群は全体的に衰退し、選択的に萎縮することはないというTrappeら²²⁾のMRIによる結果を支持する。しかし、5週にわたって、片脚だけで体重を支えて生活した場合の筋萎縮について報告したTeschら²³⁾の研究では、負荷をかけなかった側の大腿四頭筋群全体の萎縮は約9%であるが、大腿直筋は他の筋と比較して全く萎縮が見られない。また、高齢女性を対象として、21週の筋力トレーニングによる大腿四頭筋群の各筋の肥大の特性を調べた研究では²⁴⁾、各筋の肥大する部分に有意差が認められ、それぞれの筋の肥大特性には違いがあることが報告されているように、個人においては、それらの筋について選択的な萎縮の可能性があることも十分に考えられる。

したがって、膝屈曲の大きい歩行において、わずかに内側広筋の貢献が他の筋に比べて高くなる傾向があることは、膝屈曲が大きい歩行を行う高齢者では、大腿直筋や外側広筋の筋力低下が進行しやすい可能性もある。このような高齢者では、筋力の偏りによる転倒への影響も考えられる。

さらに、歩行パラメータと膝伸展力との相関については、最大膝伸展力よりもKflxでの膝伸展力のほうが有意な相関があった歩行パラメータが多かった。それらのパラメータと、最大膝伸展力、Kflxでの膝伸展力との相関係数の差はわずかで、被験者数を増やした場合には差がなくなることも考えられる。しかし、それらのパラメータの全てにおいて、Kflxでの膝伸展力のほうが高い相関係数を示しており、膝伸展力の歩行パラメータへの影響を見るうえでのKflxでの膝伸展力の有用性が示唆された。

膝伸展力の影響を反映するパラメータはとくに遊脚期や両脚支持期に関するもので、歩行速度よりも顕著であった。これは、歩行速度が同じでも筋力に余裕がある場合には、遊脚期の股関節、膝関節の屈曲が大きくなり、遊脚率などが増大する傾向があることを示していると考えられる。

V. 結 語

本研究の結果から、比較的健康な高齢者においては、筋力トレーニングの歩行に対する効果を評価するうえでは、Kflxにできるだけ近い角度で膝伸展力を測定し、歩行に関しては、遊脚期、両脚支持期に関するパラメータを測定することが望ましいことが示唆された。これらのパラメータは、本研究で用いた汎用のビデオカメラによって、比較的簡便に測定可能である。

引用文献

- 1) 小松泰喜：転倒予防に対する理学療法。理学療法科学，2004，**19**(3): 183-188.
- 2) 金 憲経：地域における介護予防の街づくり 転倒予防。体育の科学，2004，**54**(11): 878-880.
- 3) 新井武志，大淵修一，柴 喜崇・他：高負荷レジスタンストレーニングを中心とした運動プログラムに対する虚弱高齢者の身体機能改善効果とそれに影響する身体・体力要素の検討。理学療法科学，2003，**30**(7): 377-385.
- 4) 木藤伸宏，井原秀俊，三輪 恵・他：高齢者の転倒予防としての足指トレーニングの効果。理学療法科学，2001，**28**(7): 313-319.
- 5) 衣笠 隆，長崎 浩，伊東 元・他：男性（18～83歳）を対象にした運動能力の加齢変化の研究。体力科学，1994，**43**(5): 343-351.
- 6) 古名丈人，長崎 浩，伊東 元・他：都市および農村地域における高齢者の運動能力。体力科学，1995，**44**(3): 347-356.
- 7) 杉浦美德，長崎 浩，古名丈人・他：地域高齢者の歩行能力—4年間の縦断的变化—。体力科学，1998，**47**(4): 443-452.
- 8) 宮原洋八，竹下寿郎，西三津代：地域住民（17歳～92歳）を対象とした運動能力。理学療法科学，2004，**19**(4): 285-290.
- 9) 山崎裕司，黒沢保寿，山田純生・他：高齢患者の膝伸展筋力と歩行速度，独歩自立との関連。総合リハビリテーション，1998，**26**(7): 689-692.
- 10) 山崎裕司，横山仁志，青木詩子・他：膝伸展筋力と歩行自立度の関連—運動器疾患のない高齢患者を対象として。総合リハビリテーション，2002，**30**(1): 61-65.
- 11) Judge JO, Underwood M, Gennosa T: Exercise to improve gait velocity in older persons. Arch Phys Med Rehabil, 1993, **74**(4): 400-406.
- 12) Burnfield JM, Josephson KR, Powers CM, et al.: The influence of lower extremity joint torque on gait characteristics in elderly men. Arch Phys Med Rehabil, 2000, **81**(9): 1153-1157.
- 13) 江原義弘，山本澄子：関節モーメントによる歩行分析。臨床歩行分析研究会，医歯薬出版，東京，2001，pp19-22.
- 14) Rantanen T, Era P, Heikkinen E: Maximal isometric strength and mobility among 75-year-old men and women. Age Ageing, 1994, **23**(2): 132-137.
- 15) Ringsberg K, Gerdhem P, Johansson J, et al.: Is there a relationship between balance, gait performance and muscular strength in 75-year-old women? Age Ageing, 1999, **28**(3): 289-293.
- 16) Murray MP, Kory RC, Clarkson BH: Walking patterns in healthy old men. J Gerontol, 1969, **24**(2): 169-178.
- 17) Kaneko M, Morimoto Y, Kimura M, et al.: A kinematic analysis of walking and physical fitness testing in elderly women. Can J Sport Sci, 1991, **16**(3): 223-228.
- 18) Himann JE, Cunningham DA, Rechnitzer PA, et al.: Age-related changes in speed of walking. Med Sci Sports Exerc, 1988, **20**(2): 161-166.
- 19) Weldon G, Snouse LS, Shultz S: Normative strength values for knee, shoulder, elbow and ankle for females ages 9-73 as determined by isokinetic testing. Athletic Training, 1988, **23**(4): 326-331.
- 20) 中村隆一，斎藤 宏：基礎運動学 第4版。医歯薬出版，東京，1994，pp219-224.
- 21) Pincivero DM, Salfetnikov Y, Campy RM, et al.: Angle- and gender-specific quadriceps femoris muscle recruitment and knee extensor torque. J Biomech, 2004, **37**(11): 1689-1697.
- 22) Trappe TA, Lindquist DM, Carrithers J: Muscle-specific atrophy of the quadriceps femoris with aging. J Appl Physiol, 2001, **90**(6): 2070-2074.
- 23) Tesch PA, Trieschmann JT, Ekberg A: Hypertrophy of chronically unloaded muscle subjected to resistance exercise. J Appl Physiol, 2004, **96**(4): 1451-1458.
- 24) Hakkinen K, Pakarinen A, Kraemer WJ, et al.: Selective muscle hypertrophy, changes in EMG and force, and serum hormones during strength training in older women. J Appl Physiol, 2001, **91**(2): 569-580.