剛性変化のある路面における歩行動作が下腿筋冷却によって受ける影響

Difference of Gait on Stiffness Change Surface under Cooling Lower-leg Muscle

○学 小原 晃(東理大) 正 竹村 裕(東理大) 正 溝口 博

Akira OBARA, Tokyo University of Science

Hiroshi TAKEMURA, Tokyo University of Science

Hiroshi MIZOGUCHI, Tokyo University of Science

The purpose of this study was to examine effect of muscle spindle function in lower-leg muscles during walking on stiffness change surface. The subject were 10 healthy young adult males. We measured usual and high speed walking on even and stiffness change surface, and compared healthy state and reduced muscle spindle function state. This study adopted applying iced water over lower-leg muscles as a method of reducing the muscle spindle function. Stiffness change surface was made of sponge and acrylic plate. In high speed walking on stiffness change surface, step width standard deviation increase significantly. Additionally, in reduced muscle spindle function state, velocity increase after sponge and adjustment of step length retard significantly. Increasing step width standard deviation suggest unsteady gait. Therefore the muscle spindle function is important to walk on stiffness change surface. Increasing velocity after sponge and retarding adjustment of step length suggest that muscle spindle function is important to walk on other uneven surface.

Key Words : Perturbed Walking, Muscle Spindle, Motion Capture, Toe-gap Force

1.はじめに

歩行動作はヒトが生活していく上で基本的な動作であり, 日常生活の中で欠かすことのできない動作である. しかし, 歩行動作は常に転倒のリスクを抱える動作でもある. 若年者にとってはあまり大きな問題になることはないが, 高齢者にとっては大きな問題となる. 特に, 高齢者の 10%~40%は 1 年間の間に転倒を経験しており, さらに転倒のうち 5%は骨折を引き起こす重大な事故を引き起こしている[1]. 高齢化社会へ向かっている日本にとってこの問題は大きな問題である.

高齢者の転倒原因として感覚器官の鈍化があげられる. 特に足裏感覚に注目し様々な研究がおこなわれてきており, 静止立位などの静的安定性を保つために足裏感覚は重要であるとする報告がある[2]. また不安定な立位姿勢などの動的安定性についても同様に足底感覚が重要であるとしており[3], さらにそれを歩行についても研究した例もある. 本研究ではその研究の中の以下の 2 つに特に注目した. Suzuki らの研究によると表面形状の変化が起きるように凹凸を設けた歩行路において, 足底の触覚感度を鈍化させたうえで歩行を行わせた結果, 歩隔のばらつき(歩行の不安定化)が認められ, 足底の触覚感度は歩行に対して重要な役割を持つと報告している[4]. 一方それに対して, Höhne らの研究によると剛性変化が起きるように一部をスポンジにした歩行路を足底の触覚感度を鈍化させたうえで速度 1.9[m/s] (早歩き) で歩かせた結果, 有意な差は認められず, 足底の触覚感度は歩行に対して重要な役割があるとは言えないと報告している[5]. 本研究ではこの二つの研究に特に注目し, 足底感覚は歩行面の表面形状の変化に対して重要であることと, 歩行面の剛性変化に対しては重要でないことから, 別の器官が歩行面の剛性変化に対して重要であると考えた. ここで剛性は力学的にそれを求めるには, 力と物体の変位量から求め

るのが一般的である. 足裏感覚は圧力センサーから力を得ることができるが変位量を得られない. そこで, 歩行中の歩行面変形量を得るものの一つとして, 筋肉内に存在する筋紡錘機能, 特に歩行面の影響を受ける足関節まわりの筋肉の筋紡錘機能に注目した. このことから, 足底感覚は歩行面の形状に対して重要であり, 歩行面の剛性は筋紡錘機能が重要であるという仮説を立てた. この仮説を検証するために筋紡錘機能が低下した状態における剛性変化する歩行路での歩行実験を行った.

2.歩行実験

2.1 実験装置

実験を行う際に, いくつかの条件下における下腿筋の状態がどのようになっているかを観察するために足指間力(足の親指と人差し指でものを挟む力)の計測を行った. これは Yamashita らが述べている足指間力によって下肢筋力を推定できるとしているためである[6]. そこで, 冷却前後及び実験前後において下腿筋の状態を観察するために足指力の測定をチェッカーくん(日伸産業株式会社)を用いて計測する(図 1). 計測は非冷却時・冷却直後・歩行実験の開始前・終了直後の 4 条件においてそれぞれ 3 回行った.

また, 歩行動作の計測には光学式モーションキャプチャシステム(OptiTrack 社製)を用いた. 被験者の身体各部位に計 22 個のマーカを張り付け, このマーカを 16 台のカメラ(OptiTrack 社製, FLEX-V100R2)で追跡する. カメラのフレームレートは 100[fps]で, 計測可能エリアは, おおよそ奥行き(進行方向) 5800×幅 1200×高さ 2000[mm]である.

2.2 歩行路

本研究で用いる歩行路(奥行き 8400×幅 800×高さ 370[mm])の歩行面はアクリル製の板に反射防止素材を張り付けたものを使用した. 剛性変化歩行路には一か所をスポンジ素材(奥行き 600

×幅 400×高さ(厚み) 120[mm])に置き換えたもの(図2)を使用し、スポンジ面を成人男性が歩行した際には100[mm]程度足が沈むようにした。

2.3 下腿筋冷却

本研究では下腿筋の筋紡錘機能を低下させるために、下腿筋の氷水による冷却を行った。崎田らの研究によると30分の冷却の直後の下腿皮膚温度は20度以下であり、7分経過した状態では皮膚温が20度以上に戻り、その後冷却終了から30分までは皮下温が25度以下であり、冷却の直後からは筋収縮効率と筋紡錘機能が低下した状態で、皮膚温が20度以上の時を筋紡錘機能が低下した状態と仮定できるとの報告をしている[7]。本研究ではこの知見にのっとり端座位の状態から膝伸展位にて座面と同高になるように氷水の入ったポリ袋を上下に設置し、ヒラメ筋、前脛骨筋を30分間冷却したのち7分間の休憩をとり、歩行実験を行った。また、冷却の効果時間を考慮し、歩行実験は20分以内に行った。

2.4 歩行条件

本研究では以下に記述する8条件それぞれについて5試行ずつ行った。(歩行路を8m歩行することを1試行とする)条件は通常の歩行路での通常速度歩行(普段通りの歩行)と最大速度歩行(可能な限りの速い歩き)の2条件、不整地歩行路においても通常速度歩行と最大速度歩行の2条件、そしてこれらを下腿筋冷却した場合でも同様の4条件で、合計8条件となる。

3. 実験結果

事前に実験概要を説明し、同意を得た健康成人男性10名(22.6±0.66歳)を対象として行った実験の結果を以下に示す。ここで、図3~7のグラフは平均値を“—”で表し、ボックスの上下が標準偏差、棒の上下が最大・最小値を表す。足指間力を測定した結果を図3に示す。図3に示す足指間力はそれぞれの被験者の非冷却時における計測結果の平均値で正規化してある。この測定結果に対応のあるt検定を行い、p値が0.05で有意差の傾向あり、0.01で有意差ありとした。その結果、非冷却時と冷却直後・歩行実験の開始前・終了後すべてに対して有意差が見られた。また、冷却直後と歩行実験開始前に有意差の傾向が、歩行実験の終了後とは有意差が見られた。また、歩行実験の前後には有意な差は見られなかった。

歩行実験では歩幅・歩隔・歩行速度の3つのパラメータを算出した。歩幅・歩隔の算出には踝の外側に張り付けたマーカを、歩行速度の算出には首の付け根に張り付けたマーカを用いた。また、不整地における歩幅・歩隔はスポンジを踏んでから4歩とした。

これらによって得られたパラメータを非冷却時の平均値でそれぞれ正規化した。有意差はF検定を用いて両側確率が0.05より大きい場合を等分散としてt検定を行い、不等分散の場合にはWelchのt検定を行った。p値については足指間力と同様にした。その結果を図4に示す。整地上の自由速度歩行(図4(a))においては歩行に変化が見られなかったが、最大速度(図4(b))においては歩幅の減少傾向が見られた。また、不整地上では、自由速度・最大速度歩行(図4(c)(d))ともに、歩幅と歩行速度の有意な増加が見られた。さらに、各試行における歩幅・歩隔の標準偏差を冷却の有無で比較すると不整地上の最大速度歩行において歩隔のばらつきの増

Fig.1 Measuring machine of toe-gap force

Fig.2 Uneven surface road and Sponge

Fig.3 Toe-gap force

加傾向が見られた(図5)。さらに、スポンジを踏んだ後1歩ずつの歩幅をそれぞれの歩行速度における整地上の非冷却状態の歩幅で正規化を行った。その結果図6(a)に示すように自由速度歩行においてはスポンジを踏んだ後2歩目から、図6(b)に示すように最大速度歩行においては3歩目から冷却状態のほうが歩幅が有意に大きいまでであることが分かった。また、歩行速度については、各歩行速度におけるスポンジを踏む前で正規化を行い、スポンジの前後における歩行速度の変化を計測した。その結果、図7に示すように冷却状態においてスポンジの後に有意な速度上昇がみられた。

(a) Usual walking at even surface

(b) High speed walking at even surface

(c) Usual walking at uneven surface

(d) High speed walking at uneven surface

Fig.4 Walking experiment results

Fig.5 High speed walking at uneven surface
Step length and width S.D.

(a) Usual walking

(b) High speed walking

Fig.6 Step length after tread sponge underfoot

Fig.7 Walking velocity under cooling

Fig.8 Gap between prediction and fact

4.考察

下腿筋の冷却については非冷却状態とそのほかの3条件に付いて足指間力の有意な現象がみられたことと冷却直後と実験の前後について足指間力の優位な増加がみられていることから、非冷却状態・冷却の直後・実験の前後の3つに分けて考えることができる。崎田らによれば下腿筋の冷却について冷却後は筋収縮効率と筋紡錘機能の低下状態と筋紡錘機能のみの低下状態に分けられるとしている[7]ので、今回の3つのうち冷却後は2つに分けられる。これと合わせて考えると実験中は筋紡錘機能の低下状態であるといえる。

歩行動作の変化は、まず整地最大速度歩行において歩幅に有意な減少が見られた。Suzuki さんも足裏感覚鈍化により有意に減少しているとしており、これは感覚情報低下に対する防衛反応と捉えている[3]、さらに歩幅の減少は高齢者の特徴でもある[1]。今回についても同様の防衛反応であり、高齢者の感覚機能低下の一部を取り出して再現することができたといえる。また、不整地上の最大速度歩行において歩幅のばらつきが冷却により増加した。これはHöhne らと同等の早歩きにおいて変化がなかったこと[5]に対し、Suzuki らと同様の結果を得ていることから剛性変化歩行路において筋紡錘機能が低下したことにより歩行が不安定になったことが示された。よって筋紡錘機能は剛性変化に対して重要であることが実証され、本研究における仮説を検証することができた。

さらに、不整地歩行については自由・最大速度ともに歩幅と歩行速度の上昇がみられた、これは不整地であるスポンジを踏んだ時に重心が前に移動し、その影響が筋紡錘機能の低下により長く続いたものと捉えられる(図8)。具体的にスポンジの後の歩幅を1歩ずつ比較した結果、スポンジの直後では冷却による違いが見られないが自由速度では2歩目、最大速度では3歩目から冷却状態のほう歩幅が大きくなっていることと、スポンジを踏んだ後に冷却状態のみで歩行速度上昇が見られたことから不整地による影響が長く続いたといえる。この影響が長く続いたことは歩行の不安定化のみを示すだけでなく、姿勢修正の遅延とも捉えられ、今回のような

剛性変化のある歩行面だけでなく、そのほかの摂動を与える不整地の影響からの修正に対しても影響がある可能性が示唆される。

5.おわりに

本研究では足底感覚は歩行面の形状に対して重要であり、歩行面の剛性は筋紡錘機能が重要であるという仮説を立て、その検証を行った。筋紡錘機能の低下方法として、氷水による冷却を利用した。その氷水による冷却は足指間力の変化から筋紡錘機能のみの低下状態を実現したことが示された。さらに、冷却状態における歩行動作計測を行い、剛性化する不整地上の歩行動作を計測した。その結果、冷却状態での歩行動作の不安定化を計測することができた。よって、歩行面の剛性は筋紡錘機能が重要であるという今回の仮説を実証した。それに加え筋紡錘機能低下による前傾姿勢からの修正が遅れていることが計測され、剛性変化以外の不整地においても筋紡錘機能の重要性がある可能性が示唆された。

参考文献

- [1] 古名丈人, 島田裕之, "高齢者の歩行と転倒-疫学的調査から-" バイオメカニズム学会誌, Vol.30, No.3,(2006), pp.132-137.
- [2] 浅井仁, 奈良勲, 立野勝彦, 藤原勝夫, 山下美津子, "極低温空気による足底冷却が安静時立位姿勢及び有効支持基底面の広さに及ぼす影響", 理学療法学, Vol.18, No.1,(1991), pp.19-25
- [3] Peter F.Meyer, Lars I.E.Oddsson, Carlo J.De Luca, "The role of plantar cutaneous sensation in unperturbed stance", Exp Brain Res,(2004), pp.505-512
- [4] Shinichiro Suzuki, Akira Chaki, Kentaro Sekiguchi, Ming Ding, Hiroshi Takemura and Hiroshi Mizoguchi, "Influence of Reduced Plantar Sensation for Human Gait in Various Terrain", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.2, (2011), pp.258-265.
- [5] Angela Höhne, Christian Stark, Gert-Peter Büggemann, Adamantios Arampatjis, "Effect of reduced plantar cutaneous afferent feedback on locomotor adjustments in dynamic stability during perturbed walking", Journal of Biomechanics Vol.44, (2011), pp.2194-2200.
- [6] Kazuhiko Yamashita, Jun Umezawa, Yohei Nomoto, Shuichi Ino, Toru Ifukube, Hironori Koyama, Masashi Kawasumi and Masao Saito, "Evaluation of Falling Risk by Toe-gap Force on Aged", EMBEC2005,(2005).
- [7] 崎田正博, 熊谷秋三, 河野一郎, 高杉紳一郎, "足底, 下腿筋個別冷却後の立位姿勢制御に関する研究 - 閉眼での静的, 動的立位姿勢制御の筋活動と重心総軌跡長比較 -", 理学療法学, Vol.22 No.4,(2006), pp.341 - 347.