平地とトレッドミル上の快適歩行速度比較と加速度計を用いた身体活動量測定について

Relationship between Gait Speed and Physical Activity at Preferred Gait Speeds on Flat Ground and Treadmill

齋藤 信夫¹⁾ 武井 圭一²⁾ 黒澤 和生³⁾

NOBUO SAITO, RPT¹⁾, KEIICHI TAKEI, RPT²⁾, KAZUO KUROSAWA, RPT, PhD³⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, School of Health Science, Health Science University: 7187 Kodachi Fujikawaguchikocho, Minamitsurugun Yamanashi 401-0380, Japan. TEL +81 555-83-5293. E-mail saito-no@kenkoudai.ac.jp

²⁾ Department of Rehabilitation, Saitama Medical Center, Saitama Medical University

³⁾ Department of Physical Therapy, School of Nursing and Rehabilitation at Odawara, International University of Health and Welfare

Rigakuryoho Kagaku 23(5): 653-657, 2008. Submitted Apr. 7, 2008. Accepted May 26, 2008.

ABSTRACT: [Purpose] It has been reported that the preferred gait speed on treadmills (PST) is much slower than the preferred gait speed on flat ground (PSF), although the gait speed on treadmills is perceived to be faster. In this study, we compared speeds and physical activities between gait on flat ground and gait on a treadmill. [Subjects] The subjects were 15 healthy persons aged 21-22 (mean: 21.1 ± 0.4). [Methods] PSF was determined from the measured time of 10 m gait. In each measurement, data were transmitted from small-sized, tri-axial accelerometers attached to the back of the subjects and connected to a PC via a dynamic strain measurement device and an AD converter. [Results] We measured the changes of gait speed and the physical activity of young healthy subjects on flat ground and a treadmill at their preferred gait speeds. The results suggest that the values of speed and activity at preferred gait speed may be higher in flat ground gait than in treadmill gait. [Conclusion] The results show that the amount of physical activity assessed using the accelerometer could be used clinically, if measured during gait on flat ground.

Key words: preferred gait speeds, tri-axial accelerometer, physical activity

要旨: [目的] トレッドミル上の快適歩行速度 (PST) は、平地での快適歩行速度 (PSF) より速く感じる。しかし、実測値はPSTはPSFより遅くなると報告されている。これまでに、その際の身体活動量を加速度計から求めた報告はない。本研究の目的は、PSTとPSFの速度と活動量の相違について、加速度計を用い、比較検討することである。[対象] 実験1は、若年健康者3名 (男性3名: 平均年齢20歳)、実験2は、若年健康者15名 (男性12名、女性3名: 平均年齢21歳) を対象とした。[方法] トレッドミル上で速度を変化させ、トレッドミル上歩行での酸素摂取量と加速度変化を求めた。また、PSFとPSTの速度と加速度変化の比較も行った。各測定の際、腰背部に装着した小型3軸加速度変換器から快適歩行時の3次元の加速度変化を解析した。加速度変化の積分値 (総力積) を求め活動量の指標にした。各条件の比較には1元配置の分散分析 (反復測定) を用い有意差を求めた。[結果] PSFとその活動量がPSTに比べ有意に高いことが示された。PSFに比べPSTは遅くなるという従来からの報告と同様の結果が得られた。活動量についてもPSFよりPSTが低下し、その差を加速度計より検出できることが確認できた。[結語] 加速度計から求めた活動量は、平地歩行に対しては臨床活用できることが示唆された。

キーワード: 快適歩行速度, 3軸加速度計, 身体活動量

¹⁾ 健康科学大学 健康科学部理学療法学科: 山梨県南都留郡富士河口湖町小立7187 (〒401-0380) TEL 0555-83-5293

²⁾ 埼玉医科大学 総合医療センターリハビリテーション科 ³⁾ 国際医療福祉大学 小田原保健医療学部理学療法学科

I. 緒 言

小型3軸加速度測定装置による身体活動量（エネルギー、カロリー消費量）の計測値は、歩行中の酸素摂取量と高い相関があることが報告されており、日常の運動量の把握に優れているといわれている¹⁾。特に、中高齢者の普段の生活レベルの活動の場合、その測定値はエネルギー代謝の指標基準といわれる二重標識水法（doubly labeled water）との相関が高く、生活習慣病などへの運動処方と実践、評価に使えると報告されている^{2,3)}。

しかし、一方で激しい運動や重力の影響を伴う運動、身体重心の動きを伴わない運動などの活動量測定には正確性を欠くとの報告がある^{4,5)}。

このように、正確性に欠ける欠点があるが、身体拘束性が少なく、簡便に大まかな概算値としての活動量がわかるため、臨床での使用頻度は、機械式万歩計以上に高くなっている。特に、肥満者、糖尿病患者を対象とした疫学研究や臨床分野での治療用モニタリング機器として利用されている^{6,7)}。

トレッドミルは、省スペース、定常的歩行設定が可能であり、平地歩行機能のある程度予測し、訓練効果を平地歩行へ応用できるものと期待されている機器である。

久保は、トレッドミル上快適歩行速度（Preferred Gait Speeds on Treadmills, 以下PST）は、知覚や慣れの影響から、平地快適歩行速度（Preferred Gait Speeds on Flat Ground, 以下PSF）に比べ有意に遅くなると報告している⁸⁾。人はトレッドミル上では、歩幅を短くし遊脚時間を短くすることでその歩行環境に適応し、その結果として重複歩時間が短縮し、両脚支持期割合が増加したためPSTがPSFより遅くなる、との報告もある⁹⁾。

酸素摂取量測定は、トレッドミル歩行の場合、被験者の移動がないため簡単である。しかし、平地歩行の場合は被験者の移動に伴って測定機器の移動が必要になる。例えば10 mの快適歩行速度計測では若年健常者なら10秒以内で終了することが多く、測定が困難である。一方、加速度計の場合、短時間の場合にも加速度計から求められる活動量は信頼できるものと考えた。

そこで次の2点についての実験を計画した。第1に、酸素摂取量（エネルギー消費量）と加速度計から求めた活動量（エネルギー消費量）との相関性の確認。第2に、PSTのPSFに対する速度減少に相当する活動量減少量の計測が加速度計から可能かどうかを確認することである。歩行では、速度とエネルギー消費の関係は曲線的に比例し、速度上昇に伴いエネルギー消費が曲線的に上昇する¹⁰⁾といわれている。

II. 対象と方法

1. 対象

実験1, 加速度計から求めた身体活動量と酸素摂取量との関係についての対象者は、若年健常男性3名、年齢20～21歳、身長162.0～172.5 [cm], 体重59.0～72.0 [kg]であった。

実験2, 平地とトレッドミル上の快適歩行における歩行速度と活動量との関係についての対象者は若年健常者15名（男性12名、女子3名）、年齢は21～22歳（平均21.1 ± 0.4 歳）、平均身長 166.83 ± 7.17 [cm], 平均体重 60.44 ± 5.76 [kg] であった。実験1と同様に対象者には、研究の趣旨と内容について説明し、理解を得た上で協力の承諾を得た。

2. 方法

実験1では、トレッドミル歩行において、種々の歩行速度に対する加速度計より求めた身体活動量と酸素摂取量との関係について、以下の方法で調べた。

トレッドミル（酒井医療社製 SPR-7050）上で歩行速度を0, 2, 3, 4, 5, 6 [km/h] に設定し、その時の酸素摂取量を呼気ガス分析装置（MINATO社製AE-300S）にて求めた。歩行中装着した加速度計より算出した総力積量との相関関係について先行研究との比較検討を行った。

実験2では、PSTはPSFと比べ、快適歩行速度が遅くなるという従来の報告を検証した。さらに、トレッドミルと平地歩行の違いを加速度計から速度減少分の活動量を検出することができるか、以下の方法で検証した。

PSFは10 mの歩行時間を3回測定しその平均値で求めた。PSTは、速度を0から上昇させながら測定したものと、各被験者の快適歩行速度より約1 [km/h] 速い速度から速度を下降させながら測定する2種類を行い、平地と同様に3回の施行の平均値を採用した。各測定の際、腰背部に装着した小型3軸加速度計（KYOWA社製AS-2TG）から、動ひずみ測定器（KYOWA社製DPM-700B）を経て、ADコンバータ（ADInstruments社製PowerLabシステム8）を介しパソコン上でサンプリングタイム100

図1 速度が速い時と遅い時の加速度変化と力積変化量の比較

Hzにて3次元の加速度変化を分析した(図1, 2)。各条件の比較には, 1元配置の分散分析(反復測定)を用いた。

ここでは, 以下に加速度計と活動量の算出方法について述べる。

小型3軸加速度計: KYOWA社製, 型式名 AS-2TG, ひずみゲージ式変換機, x, y, z 3方向同時測定, 定格容量 $\pm 19.61 \text{ m/s}^2$ ($\pm 2\text{G}$)

小型3軸加速度測定装置をベルトで, 推奨されている腰背部中央に固定し, 歩行時の身体加速度を三次元的に計測する。この三方向それぞれの加速度を積分した値により, エネルギー消費量を推定した。

速度が v から v' に変化した時の力学的運動量の変化は, 力積に等しい, という力学法則から活動量指標を求めた。

$$m v' - m v = \int F dt = m \int a dt$$

$$I_x = \int a_x dt, \quad I_y = \int a_y dt, \quad I_z = \int a_z dt$$

$$I = I_x + I_y + I_z$$

m : 質量 [kg]

t : 時間 [sec]

I : 総力積量 [$\text{N} \cdot \text{min}/\text{kg}$]

v : 速度 [m/sec]

F : 力 [N]

a : 加速度 [m/sec^2]

体重で除したものを各成分の力積量とする。歩行速

図2 加速度計の腰背部への装着

小型3軸加速度計

KYOWA社製AS-2TG

定格容量: 2G

応答周波数範囲: 0~68 Hz

($\pm 5\%$ 以内, 23°C にて)

度が定常状態に達したと思われる5秒間について上記積分を行い体重で除した値を各成分(x, y, z方向)ごとに求め, 各成分の総和を総力積量 I [$\text{N} \cdot \text{min}/\text{kg}$]とした。 I は酸素摂取量 $\dot{V}\text{O}_2$ [$\text{ml}/\text{min}/\text{kg}$]と高い相関関係にあるといわれている¹⁻³⁾。

III. 結 果

実験1の結果を図3に示した。酸素摂取量($\dot{V}\text{O}_2$)と活動量指標(総力積)との相関係数 r は0.963であった。歩行速度を変化させた時のエネルギー消費状態において, 実測の酸素摂取量と加速度計からの活動量指標の間に相関関係がみられた。

実験2の結果を表1に示した。

図3 酸素摂取量と総力積の関係

$$r=0.963, \quad n=3$$

表1 各条件における快適歩行速度と活動量の平均値 (n=15)

	平地	トレッドミル 上昇	トレッドミル 下降
速度 [km/h]	4.98 ± 0.70*	3.85 ± 0.79	4.00 ± 0.56
身体活動量 [N · min/kg]	379.9 ± 49.2*	292.1 ± 56.3	311.5 ± 61.1

* トレッドミル上昇と下降との間に有意差あり (p<0.05)

平均PSFは4.98 ± 0.70 [km/h]、トレッドミル速度上昇時の平均PSTは3.85 ± 0.79 [km/h]、トレッドミル速度下降時の平均PSTは4.00 ± 0.56 [km/h] であり、平地とトレッドミルの間に有意差がみられた (p<0.05)。PSTがPSFよりもおよそ1.0 [km/h] 程度、最大で23%遅く、言い換えるとPSFはPSTよりも最大で1.3倍速いことが明らかになった。

加速度計より求めた平地の平均活動量は379.9 ± 49.2 [N · min/kg]、トレッドミル速度上昇時の平均活動量は292.1 ± 56.3 [N · min/kg]、トレッドミル速度下降時の平均活動量は311.5 ± 61.1 [N · min/kg] であった。平地とトレッドミルの間には有意差がみられた (p<0.05)。PST時の活動量がPSF時の活動量に比べ、およそ80.0 [N · min/kg] 程度、最大で23%減少し、言い換えるとPSF時の活動量の方がPST時の活動量より最大で1.3倍高いことが明らかになった。

速度、活動量ともにトレッドミルの値より平地の値が有意に高くなった。

IV. 考 察

加速度計を利用して身体活動量を測定する目的で2つの実験を行った。実験1では、加速度計から求めた活動量と酸素摂取量との相関性の追試確認を、実験2では、PSF時活動量とPST時活動量を求めその差を検出した。

実験1について

Iwashitaらは、健常中高齢者(49~74歳、平均62歳、男性13名、女性27名)の平地歩行速度漸増歩行運動時の酸素摂取量($\dot{V}O_2$)と総力積の関係を実験から以下の回帰式を求めた⁸⁾。

$$y = 0.056x + 2.49 \quad (r=0.958 \quad n=40)$$

y: 酸素摂取量 [ml/min/kg]

x: 総力積(活動量) [N · min/kg]

本実験結果からは、若年健常者で少ない被験者数であったが、平地歩行において、以下のような高い相関関係が認められた。以下に本実験結果から求めた単回帰直線の方程式を示した。

$$y = 0.057x + 0.52 \quad (r=0.963 \quad n=3)$$

これまでの歩行中の活動量と $\dot{V}O_2$ には高い相関があるという報告を支持する結果が得られた。つまり、高齢者だけでなく若年者においても加速度計を利用した活動量指標が酸素摂取量と相関が高いことから、概算値としての活動量・エネルギー消費、の目安として加速度計の利用は有効である可能性がある。

実験2について

今回用いた加速度計からPSF時の活動量とPST時の活動量の差を検出できた。久保は、同じ速度に感じられる歩行(快適歩行速度)でも、床上ではトレッドミル上より歩行速度が1.5倍ほど速くなり、その違いの要因として次のように検討している⁸⁾。①床上は能動的であるのに対しトレッドミル上は受動的であること。②床上では、自己の移動に加え、視覚的情報から周囲の風景も動いているのに対し、トレッドミル上では、自己の移動のみで周囲の風景は固定して動かないこと。③床上とトレッドミル上では慣れの程度に差があること。歩行は最も高度に自動化した全身的運動であるが、トレッドミル上では、床上と比べ不慣れなこともあり、自動化の程度としては低くなっている。また、大塚らは、トレッドミル上歩行では、遊脚時間を短くすることによりその歩行環境に適応しており、結果として重複歩行時間が短くなり、両脚支持期割合が増加すると報告している⁷⁾。

本実験の結果から、快適歩行速度は、平地の方が1.3倍ほど速くなり、その際の活動量も平地の方が1.3倍大きくなった。床上、トレッドミルの快適歩行速度の違いは、久保らの報告とほぼ同様の結果であった。トレッドミル上歩行の受動性、視覚性、自動化の低下、両脚支持期割合の増加、等の影響が歩行速度を低下させたと推察される。不慣れで特殊な歩行環境であるトレッドミル上では、安定性を求め遊脚時間を短くし、歩行速度を落としているものと考えられた。歩行の安定性を求め遊脚時間を短くすると、歩行時の重心の上下・左右・前後動揺を制御してエネルギー消費を減じ、加速度計にその差が測定されたものと推察した。トレッドミル上歩行については、速度0から上昇させながらのものと被験者のPSFより速めの速度から速度を下降させながらその快適歩行速度を被験者に選択させる2つの計測を行った。速度、活動量ともに、下降時に変動が大きくなる傾向がみられたが、上昇時と下降の間には統計的な有意差はなかった。これは速度変化に対する感覚の違いがあるために一致しなかったのではないかと考えた。

実験1より、活動量は平地の歩行速度に依存し追従することがわかった。また実験2からは、加速度計を用いて10 mの平地歩行とトレッドミル歩行の活動量の差を検出できた。酸素摂取量計測は通常定常状態を2～3分測定する必要があり、短い区間の平地歩行の活動量測定は難しい。加速度計を用いれば、身体拘束性も少なくなり、平地歩行においては行動指標になりえるものと確認できた。

加速度計から平地における歩行時のエネルギー消費を高い精度で測定できることは報告されている¹¹⁾。しかし、傾斜のある場合や装着部位による加速度計測の限界などから、歩行以外のデータの信頼性は明らかでない^{5,12)}。今後、広範な運動状態におけるデータ集積と装着部の工夫、他の補正手段の検討などで、エネルギー消費測定の信頼性と妥当性を検証していくことが必要と考える。

今回、加速度計から求めた身体活動量と酸素摂取量の相関関係の確認と歩行速度の違いによる活動量の差異が計測できた。このような短期間、短時間の測定から活動量が求まるということは、酸素摂取量測定より簡便な方法であり、臨床上の概算値としての活動量・エネルギー消費を知る指標として、平地歩行に対しては活用できることが示唆された。

引用文献

- 1) Bouton CV, Westerterp KR, Verduin M, et al.: Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer. *Med Sci Sports Exerc*, 1994, **26**: 1516-1523.
- 2) Westerterp KR: Physical activity assessment with accelerometers. *Int J Obes Relat Metab Disord*, 1999, **23**(Suppl 3): s45-s49.
- 3) 岩下 聡: 身体活動量の測定—携帯型3軸加速度測定装置による方法—. *理学療法*, 2005, **22**(1): 144-148.
- 4) Freedson P, Pober D, Janz KF: Calibration of accelerometer output for children. *Med Sci Sports Exerc*, 2005, **37**(11 Suppl): s523-s530.
- 5) 小熊祐子, 山本哲史, 木下訓光・他: 心拍同時記録3次元加速度計を用いた活動強度と身体活動量の評価. *慶應義塾大学スポーツ医学研究センター紀要*, 1999, 25-31.
- 6) 渋谷孝裕: 地域高齢者の健康づくりにおける1日平均歩数の有用性について. *日老医誌*, 2007, **44**: 726-733.
- 7) 津下一代, 新実光朗, 岡本秀樹・他: 多メモリー加速度計側装置付歩数計を用いた糖尿病患者の身体活動量評価. *糖尿病*, 1999, **42**: 289-297.
- 8) 久保 晃: トレッドミルの歩行速度の知覚について. *運動生理*, 1991, **6**(1): 33-38.
- 9) 大塚 圭, 才藤栄一, 岡田 誠・他: 平地歩行とトレッドミル歩行における時間因子の比較. *総合リハ*, 2003, **29**(6): 549-556.
- 10) 中村隆一, 齋藤 宏, 長崎 浩: 基礎運動学第6版. 医歯薬出版, 東京, 2005, pp383-385.
- 11) Iwashita S, Takano Y, Okazaki K, et al.: Triaxial accelerometry to evaluate walking efficiency in older subjects. *Med Sci Sports Exerc*, 2003, **35**: 1766-1772.
- 12) Nichols JF, Morgan CG, Sarkin JA, et al.: Validity, reliability, and calibration of the Tritrac accelerometer as a measure of physical activity. *Med Sci Sports Exerc*, 1999, **31**: 908-912.