

若年者における歩行速度, 歩行率を考慮した 歩行時の運動強度推定

藤原 誠助¹⁾, 鈴木 明宏²⁾, 石井 賢治³⁾,
門間 陽樹¹⁾, 長名シオン⁴⁾, 永富 良一¹⁾

Estimates of metabolic equivalents while walking based on walking velocity and step rate in young participants

Seisuke FUJIWARA¹⁾, Akihiro SUZUKI²⁾, Kenji ISHII³⁾,
Haruki MOMMA¹⁾, Shion OSANA⁴⁾, Ryoichi NAGATOMI¹⁾

Abstract

The present study measured associations between metabolic equivalents (METs) and the gait parameters of walking velocity and step rate to develop METs estimates while walking. Nineteen healthy participants aged 24.2 ± 1.9 y walked freely or with an adjusted step length (ASL; defined as step length divided by height) of 0.30 (only at 60 m/min), 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 or 0.60 (only at 100 m/min) on a level treadmill at a velocity of 60, 80 or 100 m/min. We then compared the mean METs calculated by oxygen intake and the coefficients of variance (CV) of METs while walking freely and with ASL. The homoscedasticity of METs while walking freely and with ASL was also confirmed using F-tests. Estimate equations and multiple regression coefficients (R^2) were determined by analyzing multiple regression models (M1, walking velocity; M2, step rate; M3, walking velocity and step rate, M4, walking velocity, step rate and physical characteristics). The root mean square (RMS) of estimate equations was calculated using Leave-one-out cross validation. The calculated METs were 3.3 ± 0.7 , 4.0 ± 0.8 and 5.2 ± 1.0 at a walking velocity of 60, 80 and 100 m/min, respectively. The METs increased with velocity while walking freely and with ASL ($p < 0.01$). However, the CV of METs at the same velocity during ASL walking was 1.5 - 2.1-fold greater than that while walking freely. The homoscedasticity of METs while walking freely and with ASL at the same walking velocity was not significant. The relationship between METs and step rate was U-shaped at all walking velocities tested. The R^2 value for the estimate equation generated from M3 was higher than those for M1 and M2, and the RMS and the ratio of the mean RMS was lower. The R^2 and RMS for M3 and M4 were similar. The accuracy of estimating METs while walking might be improved when walking velocity is combined with step rate.

Key words : Walking, Walking velocity, Step rate, METs, Estimate equation

1) 東北大学大学院医工学研究科 Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University, Sendai, JAPAN

〒980-8575 宮城県仙台市青葉区星陵町2-1 2-1 Seiryomachi, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8575, Japan

TEL : 022-717-8588 E-mail : seisuke_02@med.tohoku.ac.jp

2) 一関工業高等専門学校機械工学科 Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Ichinoseki College, Iwate, JAPAN

〒021-8511 岩手県一関市萩荘字高梨 Takashi, Hagisho, Ichinoseki-shi, Iwate 021-8511, Japan

3) 公益財団法人大原記念労働科学研究所 The Ohara Memorial Institute for Science of Labour

〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷1-1-12 桜美林大学内3F J.F.Oberlin University 3F 1-1-12, Sendagaya, Shibuya-ku, Tokyo 151-0051, Japan

4) 東北大学大学院医学系研究科 Graduate School of Medicine, Tohoku University, Sendai, JAPAN

〒980-8575 宮城県仙台市青葉区星陵町2-1 2-1 Seiryomachi, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8575, Japan

I. はじめに

運動不足に起因する非感染性疾患 (Non-communicable disease : NCD) による死者数は, 2008年は世界で530万人を超えていると推定され, 運動不足の割合を10 ~ 25%減らすことができれば年間の死者数は世界で53万 ~ 130万人減少し, 世界の平均余命は0.68年延びると試算されている¹⁾. 我が国でも身体活動・運動の不足は喫煙, 高血圧に次いでNCDによる死亡の3番目の危険因子であることが, 前向きコホート研究のメタ解析で示唆されている²⁾.

NCDの危険性は, 身体活動量の増加によって低下するといわれており³⁾, 複数の先行研究中強度以上の強度での運動の実施が死亡率の低下につながる事が報告されている^{4, 5)}. また, より多くの身体活動を行うことでNCD予防の効果が増す⁶⁾ という量反応関係も明確である. 我が国では, 関連文献のシステマティックレビューに基づき作成された「健康づくりのための身体活動基準2013」⁷⁾において, 18-64歳の身体活動の基準として「運動強度が3 METs以上の身体活動を23METs・時/週行う」と定めている. このような条件を満たす運動の中で, 場所や時間を選ばずに実施可能な歩行運動が推奨されている. 通常の歩行における運動強度はこの基準を満たし⁸⁾, 歩行は1日の生活の中で行われる活動の大部分を占めている. そのため, 日常生活における歩行時の身体活動量を把握することは, NCDを予防する上で重要であると考えられる.

歩行時の運動強度を推定するものとして代表的なのは, アメリカスポーツ医学会 (American College of Sports Medicine : ACSM) で提唱されているACSM式である⁹⁾. この式では, 歩行時の速度, 路面の傾斜角度に比例して運動強度が増大することが示されている. しかしながら, ACSM式は少数の米国人成人男性のデータを基に作成されたものであり, 多様な体格や幅広い年齢層に対しても適用可能かは明らかでない.

速度以外に歩行時の運動強度に影響を与える要因としては, 歩行率と歩幅が考えられる. 先行研究では, 一定速度条件下で歩行率を変化させて歩くことにより運動強度が変動することが報告されている¹⁰⁻¹²⁾. また, 身長が高い人あるいは脚が長い人は歩幅が広がる¹³⁾ など, 体格の違いが歩容に影響を及ぼすことも明らかとなっている. そのため, 歩行速度に加えて身体特性を用いて, より個人に最適な推定式を作成しようとする試みもなされている¹⁴⁻¹⁶⁾. 体格以外にも性差¹⁷⁾ や加齢^{18, 19)}, 民族差²⁰⁾ などが歩容に影響を及ぼし, さらに歩容は個人内でも1日の生活の中で変動することが報告されていることから²¹⁾, より正確に歩行時の運動強度を推定するために

表1 被験者の身体特性

人数 (人)	19
男性 (%)	63.2
年齢 (歳)	24.2±1.9
身長 (cm)	167.7±7.7
体重 (kg)	63.1±9.9
BMI (kg/m ²)	22.4±2.9

(平均±標準偏差)

は直接的に歩容を評価することが望ましいと考えられる. 最近ではトレッドミルや位置情報 (GPS) を使うことで歩行速度を比較的容易に把握でき²²⁾, 歩数計や加速度計を用いることで歩行率を計測することが可能となっている²³⁾. 歩容の情報から歩行時の身体活動量をより正確に推定することができれば, 個人の身体活動量の管理や今後の疫学調査において有益であると考えられる.

そこで本研究では, 様々な歩容における歩行時の運動強度の計測を行い, 歩行速度, 歩行率が運動強度にどのような影響を与えるのか確認した上で, 歩行時の運動強度を推定する最適な推定式を提案することを目的とした.

II. 方法

1) 対象

健康な20代の男性12名, 女性7名の計19名を対象とした(表1). 事前に本研究の趣旨を十分に説明した上で, 測定参加の承諾を得た. 被験者には測定値への影響を避けるため, 前日の激しい運動, 飲酒, および測定開始3時間前からの食事を禁止した. 本測定は, 東北大学大学院医学系研究科倫理委員会の承認を得て行った.

2) 測定内容

被験者は測定室に来室後, 身長および体重の測定を行った. その後, 呼気ガス分析装置 (AE300, ミナト医科学社製) へと繋がるマスクと, 試技中の歩行率 (Step Rate : SR) を測定するためのストライドセンサー (ポラールs3ストライドセンサー W.I.N.D, ポラール・エレクトロ社製) を装着させた.

①安静時の酸素摂取量測定

被験者の呼吸を整えるために, 10分間の座位安静をとった. この時の後半5分間に, 運動強度の算出に必要な座位安静時の酸素摂取量の測定を行った.

②歩行時の酸素摂取量および歩行率の測定

60m/分, 80m/分, 100m/分の歩行速度 (Walking Velocity : WV) でトレッドミル (バリエーション, Load社製) 上を10分間歩行させ, 酸素摂取量および歩行率の測定を行った. 試技内容は, 歩き方を特に指示しない歩行 (自由歩行) に加え, 80m/分では歩幅 (Step Length :

SL) を身長で除したAdjusted step length (ASL=SL / 身長) がそれぞれ0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55に相当する歩行率での歩行 (ASL歩行) の合計6条件, 60m/分では0.30, 100m/分では0.60を加えた計7条件とした。ASL歩行の際は, $SR = WV / SL$ の関係を利用して, 試技条件であるASLに相当する歩行率をその場で算出し, そのテンポのメトロノーム音に合わせて歩行させた。

測定は被験者の疲労の影響を考慮し, 歩行速度条件毎に1日につき3もしくは4試技ずつ2日間に分けて行った。この2日間の測定開始時刻は, 両日とも同じ時間帯になるよう調整した。試技は先行動作による影響を考慮して自由歩行を一番初めに行わせ, その後に各ASL条件での歩行を被験者毎にランダム of 順序で実施した。各試技後には, 10分間の休憩を挟んでから次の試技を行わせるようにした。

3) データ処理

測定した酸素摂取量と歩行率について, 歩行開始7分後から試技終了までの3分間の平均値を算出した。歩行時の酸素摂取量を座位安静時に得られた酸素摂取量で割ることで運動強度を求めた。なお, 測定中に明らかにASLの試技条件を満たしていない試技については分析対象から除外し, 分析対象は60m/分で90試技, 80m/分で83試技, 100m/分で90試技であった。

4) 統計解析

各速度での歩行時の運動強度を比較するため, 運動強度を従属変数, 歩行速度 (60, 80, 100m/分) を独立変数とする一元配置分散分析を行った。得られた運動強度は正規性および等分散性が認められなかったため, 条件の効果が有意であったパラメータについては, Games-Howell法によるPost-hoc testを行い速度間の運動強度の比較を行った。

また, 各速度において自由歩行とASL歩行の条件に分けて運動強度の平均値と標準偏差を求め, その値から変動係数 (CV) を算出した。さらに, 同様の条件でF検定を行い等分散性の確認を行った。

続けて, 運動強度と歩行速度, 歩行率, 身体特性それぞれの関係を確認するため, 従属変数を運動強度, 説明変数を条件①: 歩行速度 (WV, WV^2), 条件②: 歩行率 (SR, SR^2), 条件③: 歩行速度と歩行率 (WV, WV^2, SR, SR^2), 条件④: 条件③+身体特性 (年齢, 性別, 身長, 体重, BMI) の4条件として, ステップワイズ法 (変数増減法) を用いた重回帰分析を行い, 重回帰式と決定係数

(R^2) を算出した。さらに, 重回帰分析により得られた回帰式についてLeave-one-out cross validation法を用いた交差検証 (cross validation) を行った。これは, 全データ数 n から1つのデータを抜き出した $n-1$ 個のデータでモデルを構築した上で残りの1データを用いて検証を行い, それを計 n 回繰り返し検証するという方法である²⁴⁾。この方法によって, n 個の推定値から予測誤差を最小二乗平均 (root mean square : RMS) として算出した。

$$RMS = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{(\hat{x}_n - x_n)^2}{N}}$$

ここで, \hat{x}_n は測定値, x_n は推定値である。算出したRMSの大きさ, およびRMSの平均値に対する割合を比較することで, それぞれの回帰式の中で最も妥当性が高い数式を決定した。

統計解析はSPSS® Statics Version 21 (IBM社製) を用い, 算出した値はすべて平均値 ± 標準偏差で示し, 全ての統計分析において危険率5%未満を有意水準とした。

III. 結果

各速度における全試技条件での運動強度の分布と平均値を図1に示した。運動強度の平均値および標準偏差は, 60m/分で 3.3 ± 0.7 METs, 80m/分で 4.0 ± 0.8 METs, 100m/分で 5.2 ± 1.0 METsであり, 速度の増加に伴う運動強度の有意な増加が認められた ($p < 0.01$)。

各速度でのCVは, ASL歩行の60m/分で22.0, 80m/分で20.2, 100m/分で18.6であり, それぞれ自由歩行条件の約2.1倍, 1.5倍, 1.5倍と, 自由歩行と比較してASL歩行ではいずれの速度でも運動強度のばらつきが大きく

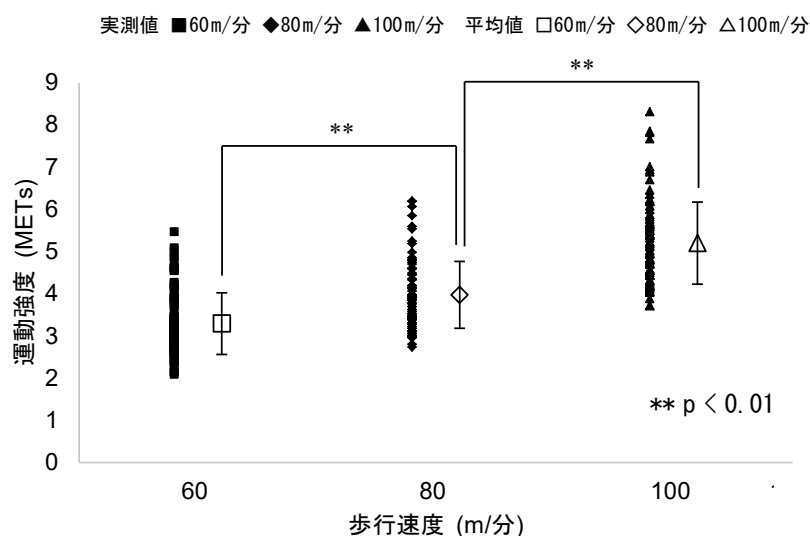


図1 各歩行速度における全試技条件での運動強度の分布と平均値

なっていた。F検定の結果、いずれの速度においても自由歩行とASL歩行の運動強度の分散には有意差が認められ、等分散性は確認できなかった ($p < 0.01$)。

図2に、全対象者における速度別の歩行率と運動強度の関係について示した。いずれの速度でも歩行率が低いと運動強度は高く、歩行率の増加とともに一旦減少して自由歩行時の歩行率 (Preferred step rate : PSR) あたりで最小となり、再度増加するU字曲線の関係 (U-shaped relationship) となっていた。このU字曲線の関係は個人毎にみた場合でも、すべての対象者において認められた。

ステップワイズ重回帰分析の結果、歩行速度のみを説明変数とした条件①では、 WV^2 のみが、歩行率のみを説明変数とした条件②では、SR, SR^2 が選択された。

また、歩行速度と歩行率を説明変数とした条件③では、 WV^2 , SR, SR^2 が選択され、さらに身体特性を変数に加えた条件④では、 WV^2 , SR, SR^2 , BMIが選択された。これらの変数を用いた重回帰分析による運動強度推定式を表2に示した。推定式の決定係数は、条件①で0.47, 条件②で0.09, 条件③で0.64, 条件④で0.65であり、それぞれの式に対応するRMSは0.84, 1.11, 0.70, 0.69, RMSに対する平均値の割合は20.3, 26.6, 16.8, 16.6であった。

IV. 考察

本研究では、一定速度で歩容を様々に変化させた歩行時の運動強度を測定し、重回帰分析により運動強度と歩容、身体特性との関連性を検討した。歩容の条件は身長

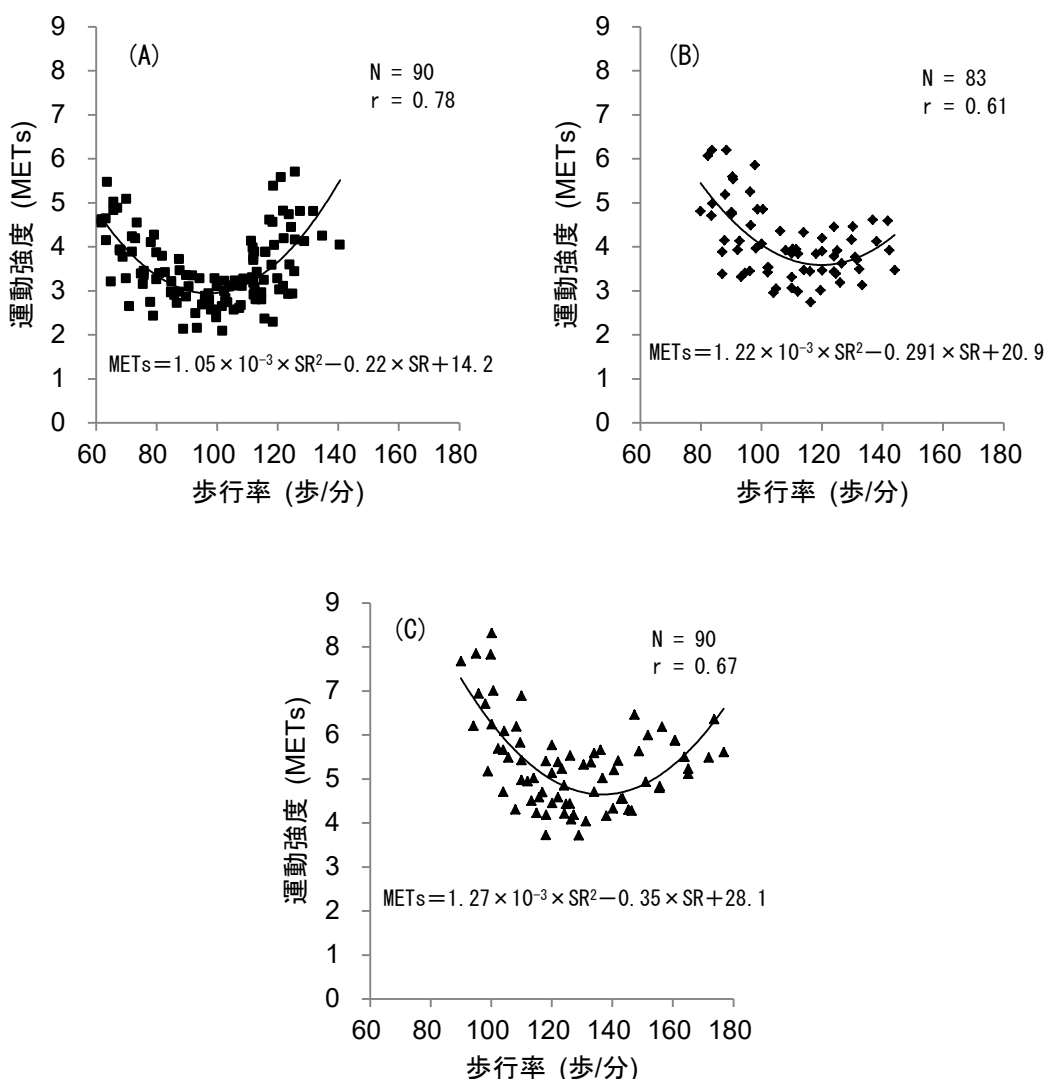


図2 歩行速度毎の運動強度と歩行率の関係。(A) 歩行速度60m/分, (B) 歩行速度80m/分, (C) 歩行速度100m/分.

表2 重回帰分析の結果

説明変数	運動強度推定式	R ²	RMS (METs)	vs 平均値 (%)
条件①	$3.00 \times 10^{-4} \times WV^2 + 2.16$	0.47	0.84	20.3
条件②	$-0.07 \times SR + 3.53 \times 10^{-4} \times SR^2 + 7.25$	0.09	1.11	26.6
条件③	$4.19 \times 10^{-4} \times WV^2 - 0.12 \times SR + 4.31 \times 10^{-4} \times SR^2 + 8.69$	0.64	0.70	16.8
条件④	$4.19 \times 10^{-4} \times WV^2 - 0.12 \times SR + 4.37 \times 10^{-4} \times SR^2 + 0.04 \times BMI + 7.82$	0.65	0.69	16.6

WV : 歩行速度, SR : 歩行率, BMI : Body Mass Index

を考慮した歩幅から算出した歩行率に基づいて設定した。しかしながら、歩行率が速くてついていけない、遅くてバランスを崩してしまうなどの理由で試技条件を満たしていないデータについては分析対象から除外した。

その結果、説明変数が歩行速度のみや歩行率のみとした場合と比較して、歩行速度と歩行率を組み合わせると、歩行時の運動強度の推定精度をより高められることが示唆された。

1) 歩行速度と運動強度の関係について

歩行速度と運動強度の関係を確認したところ、速度の増加に伴って運動強度も増大することが確認された。先行研究では、速度の増加に伴うエネルギー消費量の変化は、25-100m/分では歩行速度の二次関数として表わされることが多い²⁵⁻²⁷⁾。本研究の測定範囲もこの中に含まれていることから、同様の傾向が得られたと考えられる。

2) 自由歩行とASL歩行の違いについて

自由歩行とASL歩行の各条件に分けた時、CVはいずれの速度においても自由歩行時よりもASL歩行時に大きな値となっており、等分散性についても確認できなかった。これらのことから、自由歩行に対してASL歩行では同一歩行速度での運動強度のばらつきが大きくなることが分かった。一定速度での歩行時に歩行率の増減に伴って運動強度にばらつきが生じた要因としては、以下のことが挙げられる。

まず、歩行率が小さくなると、歩行速度=歩行率×歩幅の関係性があるため、歩幅が広がる。歩幅が広がると重心が大きな垂直振動を起こすことで、重心の移動に必要な外的力学的仕事が増加する^{11, 28)}。また、筋が短縮性収縮を行っている限られた時間だけ利用できる弾性エネルギー²⁹⁾を通常の歩行では利用することができるが、歩幅が増大すると1歩行周期における片足支持時間が増加することで利用できなくなってしまう、エネルギー消費量を増大させる要因になり得る¹¹⁾。さらには、速度を変えずに歩幅を大きくすると歩行安定性が悪化する

ため³⁰⁾、バランスを取る姿勢維持のための筋肉が動員されることも要因として考えられる¹¹⁾。

一方、歩行率が大きくなると、身体各部分を速く動かす必要があるため内的力学的仕事が増加し、その結果としてエネルギー消費量も増加することが考えられる³¹⁾。また、歩行やランニングにおけるエネルギー消費量は片足支持期の接地時間に反比例することを示唆する報告もある³²⁾。

これらの要因によって、一定の歩行速度であっても意図的に歩行率を変化させることで運動強度の値にばらつきが生じたと考えられる。

3) 一定速度での歩行率と運動強度の関係について

各速度における歩行率と運動強度の関係を確認したところ、いずれの速度でも歩行率が低いと運動強度は高く、歩行率の増加とともに一旦減少してPSRあたりで最も低くなり、再度増加するU字曲線の関係となっていた。今回と同様の方法で歩行率と運動強度の関係を検討した先行研究においても、PSRで運動強度が最小となるU字曲線の関係が得られている¹⁰⁻¹²⁾。一定の速度で歩行率を変えたときにPSRで運動強度が最も低くなる明確な根拠は未だ明らかにされていないが、人は自己最適化の原則(Self-optimization)³³⁾により自由歩行時に運動強度が最も低くなると考えられており、本測定でも先行研究と同様の結果となることが確認された。

4) 歩行速度、歩行率、体格を考慮した運動強度の推定式

重回帰分析の結果、説明変数を歩行速度のみとした条件①や歩行率のみとした条件②と比較して、歩行速度と歩行率を組み合わせた条件③では重回帰式の決定係数が大きく、RMSおよびRMSに対する平均値の割合が小さくなる結果が得られた。先行研究で運動強度は、歩行速度の二次関数で表されている²⁵⁻²⁷⁾。これを方程式で表した場合、以下のようになる。

$$\text{METs}_{\text{wv}} = \alpha_0 \times \text{WV}^2 + \alpha_1 \times \text{WV} + \alpha_2 \quad (1)$$

(α_n は実数定数かつ $\alpha_0 \neq 0$)

また、先行研究¹⁰⁻¹²⁾と同様に一定速度では歩行率と運動強度の間にU字曲線の関係が認められた。そのため、一定速度の条件下では歩行率を用いた以下の方程式により、運動強度を推定できると考えられる。

$$\text{METs}_{\text{SR}} = \beta_0 \times \text{SR}^2 + \beta_1 \times \text{SR} + \beta_2 \quad (2)$$

(β_n は実数定数かつ $\beta_0 \neq 0$)

この2つの要因を考慮した推定式が条件③による重回帰式であり、方程式は以下ようになる。

$$\text{METs} = \gamma_0 \times \text{WV}^2 + \gamma_1 \times \text{WV} + \gamma_2 \times \text{SR}^2 + \gamma_3 \times \text{SR} + \gamma_4 \quad (3)$$

(γ_n は実数定数かつ $\gamma_0 \neq 0$, $\gamma_2 \neq 0$)

これまで、歩行時の運動強度は主に歩行速度から推定されてきたが⁹⁾、すでに示した通り歩容を様々に変化させると一定速度での運動強度のばらつきは大きくなる。そのため、歩行時の運動強度を推定する際には、(1)式のように歩行速度のみでは不十分となることが考えられる。同一速度でも運動強度がばらつく主な要因は歩行率変化によるものであるため、(1)式に(2)式を組み合わせた(3)式を用いることで両要因の運動強度変化をより正確に捉えることができたと考えられる。実際に本研究で重回帰分析を実施した結果、条件③では条件①や条件②と比較して重回帰式の決定係数が大きく、RMSおよびRMSに対する平均値の割合は小さくなる結果が得られた。このように、歩行速度のみではなく歩行率を組み合わせることによって、歩行時の運動強度の推定精度が高められる可能性が示唆された。

また、条件③に身体特性を付与した条件④では、説明変数としてBMIのみが追加される結果となり、決定係数やRMSは条件③とほぼ同等の値であった。先行研究において身体特性を考慮した推定式が検討されているが¹⁴⁻¹⁶⁾、いずれも歩行率などの歩容を考慮した検討はなされていない。一方で、健常な20代男女を対象とした本研究の結果では、選択された身体特性はBMIのみであり、さらに条件③との比較でも大きな違いが確認できなかった。このことから、歩行速度、歩行率といった歩容が歩行時の運動強度に大きく寄与していると考えられる。

歩容は、個人内でも1日の生活の中で変動することが報告されている²¹⁾。歩行速度と歩行率の変化により運動強度は変動するため、1日の生活の中で様々に歩容が変

化したときには、歩行速度のみや歩行率のみでは十分な推定が行えない可能性がある。そのため、今回得られた歩行速度と歩行率の組み合わせによって歩行時の運動強度を推定することは、日常生活における歩行時の運動強度の推定精度を高めることに対して有用であると考えられる。

5) 研究の限界

本研究では被験者数が19名と少なく、体格、年齢の影響について考慮されていない。体格¹³⁾、年齢^{18, 19)}の違いは歩容に影響を及ぼすという報告があるため、身体特性の情報が歩行時の運動強度にどの程度影響を与えているかについては、今後、より多くの人数、幅広い年齢、体格の被験者を募り検討する必要がある。また、本研究では速度と歩行率を規定するためにトレッドミルを用いて歩行を行わせた。トレッドミル歩行では床上での歩行と比較して、歩行パターンやエネルギー代謝量に違いが観察されている³⁴⁻³⁶⁾。そのため、実際に臨床の現場で応用するためには、床上で計測した歩行時の運動強度と本研究で得られた運動強度推定式からの推定値と比較するなど、さらなる検討が必要である。

V. まとめ

本研究では、歩容を様々に変化させた条件で歩行時の運動強度を測定し、歩行速度、歩行率が運動強度にどのような影響を与えるのかを確認した。その上で、歩行速度、歩行率、身体特性を考慮した重回帰式を求め、歩行時の運動強度を推定する最適な推定式を作成した。その結果、歩行速度や歩行率のみによる推定式と比較して歩行速度、歩行率を組み合わせた推定式のほうが、重回帰式の決定係数は大きく、RMSおよびRMSに対する平均値の割合は小さくなった。以上のことから、歩行時における運動強度を推定する際には、歩行速度と歩行率を組み合わせることでより精度よく歩行時の運動強度を推定できることが分かった。

謝辞

本研究は知的クラスター創成推進事業(第II期)(広域仙台地域)の一環として実施したものである。本研究の実施に際しまして、研究にご協力いただいた被験者の方々に深謝いたします。

利益相反

著者に開示すべき利益相反関係にある企業などはありません。

引用文献

- 1) Lee I-M, Shiroma EJ, Lobelo F, Puska P, Blair SN, Katzmarzyk PT : Effect of physical inactivity on major non-communicable diseases worldwide : an analysis of burden of disease and life expectancy. *Lancet*, 2012 ; 380 : 219-29.
- 2) Ikeda N, Inoue M, Iso H, et al. : Adult mortality attributable to preventable risk factors for non-communicable diseases and injuries in Japan : a comparative risk assessment. *PLoS Med*, 2012 ; 9 : e1001160.
- 3) Pate RR, Pratt M, Blair SN, et al. : Physical activity and public health. A recommendation from the Centers for Disease Control and Prevention and the American College of Sports Medicine. *JAMA*, 1995 ; 273 : 402-7.
- 4) Paffenbarger RS Jr, Hyde RT, Wing AL, Lee IM, Jung DL, Kampert JB : The association of changes in physical-activity level and other lifestyle characteristics with mortality among men. *N Engl J Med*, 1993 ; 328 : 538-45.
- 5) Lee IM, Paffenbarger RS Jr : Associations of light, moderate, and vigorous intensity physical activity with longevity. The Harvard Alumni Health Study. *Am J Epidemiol*, 2000 ; 151 : 293-9.
- 6) Zheng H, Orsini N, Amin J, Wolk A, Nguyen VTT, Ehrlich F : Quantifying the dose-response of walking in reducing coronary heart disease risk : meta-analysis. *Eur J Epidemiol*, 2009 ; 24 : 181-92.
- 7) 厚生労働省運動基準・運動指針の改定に関する検討会 : 健康づくりのための身体活動基準2013. 2013. <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple-att/2r9852000002xpqt.pdf>
- 8) Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, et al. : 2011 Compendium of Physical Activities : a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc*, 2011 ; 43 : 1575-81.
- 9) American College of Sports Medicine : ACSM' s Guidelines for Exercise Testing and Prescription 9th edition. 2013 : 173.
- 10) Zarrugh MY, Radcliffe CW : Predicting metabolic cost of level walking. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1978 ; 38 : 215-23.
- 11) Holt KG, Hamill J, Andres RO : Predicting the minimal energy costs of human walking. *Med Sci Sports Exerc*, 1991 ; 23 : 491-8.
- 12) Bertram JE : Constrained optimization in human walking : cost minimization and gait plasticity. *J Exp Biol*, 2005 ; 208 : 979-91.
- 13) 山崎昌廣, 佐藤陽彦 : ヒトの歩行—歩幅, 歩調, 速度およびエネルギー代謝の観点から—. *人類学雑誌*, 1990 ; 98 : 385-401.
- 14) Ludlow LW, Weyand PG : Energy expenditure during level human walking : seeking a simple and accurate predictive solution. *J Appl Physiol*, 2016 ; 120 : 481-94.
- 15) Weyand PG, Smith BR, Schultz NS, Ludlow LW, Puyau MR, Butte NF : Predicting metabolic rate across walking speed : one fit for all body sizes? *J Appl Physiol*, 2013 ; 115 : 1332-42.
- 16) Pandolf KB, Givoni B, Goldman RF : Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *J Appl Physiol*, 1977 ; 43 : 577-81.
- 17) Yamasaki M, Sasaki T, Torii M : Sex difference in the pattern of lower limb movement during treadmill walking. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1991 ; 62 : 99-103.
- 18) Yamada T, Maie K, Kondo S : The characteristics of walking in old men analyzed from the ground reaction force. *J Anthropol Soc Nippon*, 1988 ; 96 : 7-15.
- 19) Himann JE, Cunningham DA, Rechnitzer PA, Paterson DH : Age-related changes in speed of walking. *Med Sci Sport Exerc*, 1988 ; 20 : 161-6.
- 20) 今野道勝, 吉水浩, 安永誠, 大坂哲郎, 千綿俊機, 増田卓二 : 日本人とネパール人の歩行に関する健康科学的比較研究. *健康科学*, 1980 ; 2 : 33-9.
- 21) Sato H, Ishizu K : Gait patterns of Japanese pedestrians. *J Hum Ergol (Tokyo)* , 1990 ; 19 : 13-22.
- 22) 隅田麻由, 今津眞也, 水本旭洋, 安本慶一 : 健康指向歩行ナビゲーションのためのスマートフォンによる身体的負担度の推定. *電子情報通信学会技術研究報告*, 2012 ; 112 : 157-64.
- 23) 鈴木明宏, 石井賢治, 永富良一 : 腰部身体加速度を用いた歩行速度・歩幅推定法 : ウォーキング及びノルディックウォーキング. *生体医工学*, 2011 ; 49 : 957-61.
- 24) Allen DM : Mean square error of prediction as a criterion for selecting variables. *Technometrics*, 1971 ; 13 : 469-75.

- 25) Zarrugh MY, Todd FN, Ralston HJ : Optimization of energy expenditure during level walking. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1974 ; 33 : 293-306.
- 26) Yamasaki M, Torii M, Yamamoto S, Sasaki T : Nomogram for Predicting Energy Expenditure during Treadmill Walking. *Ann Physiol Anthropol*, 1988 ; 7 : 207-13.
- 27) Pearce ME, Cunningham DA, Donner AP, Rechnitzer PA, Fullerton GM, Howard JH : Energy cost of treadmill and floor walking at self-selected paces. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1983 ; 52 : 115-9.
- 28) Donelan JM, Kram R, Kuo AD : Mechanical and metabolic determinants of the preferred step width in human walking. *Proc Biol Sci*, 2001 ; 268 : 1985-92.
- 29) Asmussen E, Bonde-Petersen F : Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise. *Acta Physiol Scand*, 1974 ; 92 : 537-45.
- 30) Espy DD, Yang F, Bhatt T, Pai Y-C : Independent influence of gait speed and step length on stability and fall risk. *Gait Posture*, 2010 ; 32 : 378-82.
- 31) Saibene F, Minetti AE : Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans. *Eur J Appl Physiol*, 2003 ; 88 : 297-316.
- 32) Kram R, Taylor CR : Energetics of running : a new perspective. *Nature*, 1990 ; 346 : 265-7.
- 33) Wilke JT : Ultradian Biological Periodicities in the Integration of Behavior. *Int J Neurosci*, 1977 ; 7 : 125-43.
- 34) Murray MP, Spurr GB, Sepic SB, Gardner GM, Mollinger LA : Treadmill vs. floor walking : kinematics, electromyogram, and heart rate. *J Appl Physiol*, 1985 ; 59 : 87-91.
- 35) Saito N, Takei K, Kurosawa K : Relationship between Gait Speed and Physical Activity at Preferred Gait Speeds on Flat Ground and Treadmill. *Rigakuryoho Kagaku*, 2008 ; 23 : 653-7.
- 36) Watt JR, Franz JR, Jackson K, Dicharry J, Riley PO, Kerrigan DC : A three-dimensional kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy elderly subjects. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* , 2010 ; 25 : 444-9.