

携帯型加速度計を用いた運動強度の計測

— 加速度波形と運動強度の関係 —

谷川智宏*¹ 品川佳満*¹ 藤谷恭信*¹ 太田 茂*² 長尾光城*³

要 約

携帯型加速度計は人間の前後、上下2方向の体動を計測することが可能である。本論文は、携帯型加速度計を用いて、その出力波形と運動強度がどのような関係にあるのかを明らかにするものである。

被験者は右腰に加速度計を取り付け、トレッドミル上で歩行・走行を行った。その際に運動強度に対応する心拍数に達したときの加速度波形を計測した。その結果、運動強度は前後・上下方向の加速度波形のそれぞれと相関関係にあることが明らかになった。中でも前後・上下両軸に対する加速度波形の振幅を2歩毎の所要時間で除算した正規化振幅の平均値とより相関があった。さらに両軸の正規化振幅の平均値からなるベクトル和の大きさを算出すると運動強度と強い相関関係があることが判った。このことは、携帯型加速度計を用いて加速度を求めることにより運動強度の推測ができる可能性を示唆している。

はじめに

世界有数の長寿少子国である我が国において、独居高齢者の増加は避けられない事態であるが、高齢者は予期せぬ疾病や事故に見舞われる危険性が高い。そのため、健康状態を常時把握して、生活上の不安を軽減する仕組みが不可欠である。

そこで、我々は高齢者の居室に赤外線センサを設置して宅内行動をモニタリングすることによって健康状態を推測するシステムの開発に取り組んできた。このような家屋内に固定するセンサは測定洩れが少ないという意味での信頼性は高いが、熱源の移動を検知するという原理上の制約から精密な身体動作の把握は無理で、これだけに頼って急激な健康状態の変化を検知する事は難しい。そこで、我々は歩行状態等が定量的に把握できる携帯型の加速度計を使用して、健康状態を推測する手がかりを得るため、昨年から一連の基礎実験を行っている。昨年度は転倒検出の可能性を探る実験を行った¹⁾が、本年度は、歩行・走行時の運動量に関する実験を行った。

一般に人は体調が良ければ日常的な行動をとる。つまり、健康状態と運動の強さや量は密接な関係にあると考えられる。しかし、運動強度や運動量という概念は曖昧である。そこで、本論文では%最大酸

素摂取量をもって運動強度と定義する。それらを日常生活において常に把握できれば健康状態推定の可能性も出てくる。そこで加速度計を用いて運動強度を計測する方法について検討した。この計測結果から異常兆候が検出できれば、疾病の予防や早期発見に役立てることができる。また、健康状態の推測が可能になれば独居高齢者の日常生活上における不安軽減の効果も期待できる。

研究目的

独居高齢者をモニタリングする最大の目的は緊急事態の発生を迅速に検知することである。本研究の目的も、健康状態と運動強度などの間には密接な関係があるという前提の基に、日常生活における運動量を加速度計を用いて計測し、この変化量から健康状態の推移を察知して、疾病や怪我等の緊急事態を検出する方法を見つけることである。

運動生理学の分野で用いられる%最大酸素摂取量はエネルギー消費量を表す尺度であり運動強度の指標でもある。そこで、歩行および走行時の加速度計の出力を%最大酸素摂取量に換算することによって、加速度計を用いて運動強度を求めることの生理学的正当性を確保する。

運動強度が連続的に計測できれば健康状態の推定

*1 川崎医療福祉大学大学院 医療技術学研究科 医療情報学専攻 *2 川崎医療福祉大学 医療技術学部 医療情報学科

*3 川崎医療福祉大学 医療技術学部 健康体育学科

(連絡先) 谷川智宏 〒701-0193 倉敷市松島288 川崎医療福祉大学

が容易になる。しかしながら、これまで運動強度、特に、%最大酸素摂取量の計測はトレッドミルや自転車エルゴメーター等の特殊な測定環境と、それに対する被験者の慣れを要し一般的ではない。こうした環境で、例えば、80代の高齢者の運動強度を求めることは不可能に近く、強行すれば怪我の発生や生命の危険すらありうる。それに対し、加速度は極めて容易かつ安全に計測が可能である。

研究方法

1. 実験装置

加速度計としては、Analog Devices 社製の2軸加速度計 ADXL202を搭載した基板を12×6×2 cmのプラスチックケースに収めたものを使用した。このケースはクリップ金具でベルトに固定でき、右腰に装着すると直立状態で前後方向がX軸、上下方向がY軸に一致する。このセンサの出力信号をノートパソコン（富士通 FMV-BIBLO NE3/500L）にRS-232C インタフェースを介して送信しファイルに記録した。今回の実験では、運動中、一定速度を保つ必要があったため、トレッドミル運動負荷装置（SAKAI Woodway）を用いて一定の運動負荷を加えた。また、心拍数の計測にはポラールハートレートモニターを使用した。

2. 計測方法

心拍数と酸素摂取量との間にはリニアな関係があることが知られている^{2,3)}。そこで、酸素摂取量と心拍数との相関関係が既知である5名を被験者とした。本来の趣旨からいえば高齢者を含めるべきであるが、今回は評価方法を決定するための実験であり、かつ、トレッドミルを使うこともあり、安全性重視の観点から表1に示す20歳代4名と40歳代1名の健康な男性を選んだ。歩行については最大酸素摂取量の30, 40, 50, 60%, 走行については50, 60, 70, 80, 90%に相当する心拍数に達するまで負荷を加え、その心拍数に達した状態での30秒間の加速度計の出力を計測した。以下、この最大酸素摂取量に対する百分比を運動強度の指標として使用する。

なお、加速度計を右腰に装着する際、クリップ金具だけでは運動中の揺れが大きいため、粘着テープも併用して身体にしっかりと固定した。

表1 被験者

被験者	年齢	性別
A	20	Male
B	21	Male
C	20	Male
D	21	Male
E	47	Male

3. 評価解析方法

計測したデータはまず波形として表示し、その形状を目視によって評価する。この方法でも多くの情報が得られるが定性的なので、以下に述べる方法で定量的に評価した。

(1) 振幅による評価

X, Y 両軸の出力値から、最大加速度変化量、つまり振幅を読み取り、この値の一定時間内の平均値を求める。加速度計を右腰に装着した関係で、右足の着地時の衝撃は一般に左足よりやや大きく現れ、振幅は1歩毎に大小を繰り返す。用いた加速度計は微小な揺れも検知するため、衝撃が大きくなるにつれて右足の加速度波形にはノイズがのり判読がし難い。そこで左足に対応する加速度変化を基準にすることとした。そのため振幅の決定は原則として2歩単位で行っている。

今回の実験では、一定時間内の加速度波形について歩行と走行の相違や運動強度の増加による影響について観察した。

(2) 正規化振幅による評価

振幅の場合と同様に、X, Y 両軸の波形データから、加速度振幅と2歩に要した時間を求め、前者を後者で除算して正規化した振幅の30秒間の平均値を求めた。

4. 倫理面への配慮

今回の実験は実験室内におけるものでプライバシー等に触れる要素はない。また、実験に先立ち被験者全員に趣旨を説明して同意を得た。トレッドミル運動負荷装置の使用には多少の危険が伴うが、全員これに習熟しており、相互に補助しあって実験を行った。以上、倫理面における問題は特でない。

実験結果

1. 歩行時の加速度波形

歩行については最大酸素摂取量の30, 40, 50, 60%相当時の加速度を計測した。実際には、%最大酸素摂取量の測定は容易ではないので、目的の項で述べた%最大酸素摂取量と心拍数とのリニアな相関関係を前提として、心拍数をパラメータとし運動強度を規定している。

ある被験者の歩行時の最大酸素摂取量の30%と50%相当時の加速度変化を図1に示す。図から分かるように、歩行時の加速度振幅は運動強度の増大に応じて増大するので、加速度振幅から逆に運動強度を推測することは十分可能と思われる。

2. 走行時の加速度波形

走行についても、歩行時と同じ被験者、同じ条件下で最大酸素摂取量の50, 60, 70, 80, 90%相当時

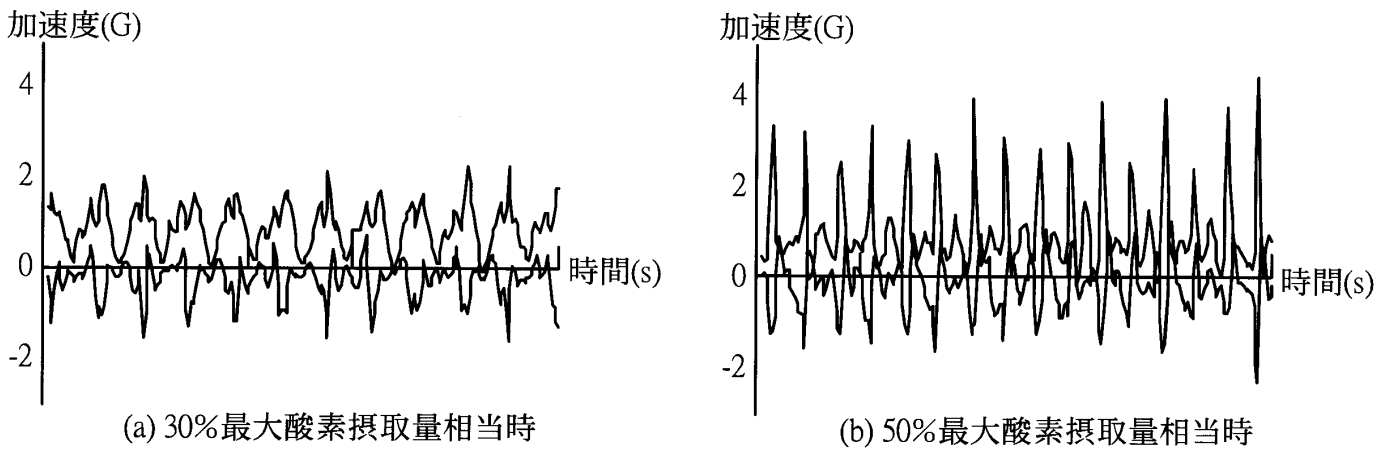


図1 歩行時の加速度波形

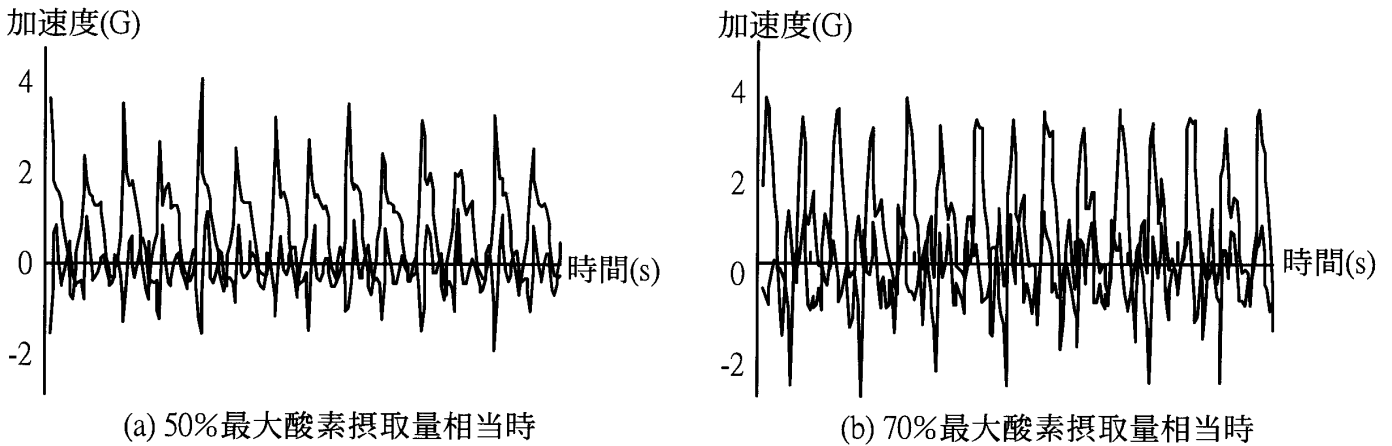


図2 走行時の加速度波形

の加速度変化を計測した。心拍数をパラメータとして運動強度を規定する点は歩行時と同じである。

歩行時と同一の被験者の走行時の最大酸素摂取量の50%と70%相当時の加速度変化を図2に示す。

3. 上下軸の加速度振幅

3名の被験者についての上下軸に関する運動強度と平均振幅の関係を図3の(a)、同じく正規化平均振幅との関係を(b)に示す。各図の下に記入したAからCまでの英字が各被験者に対応している。横軸は全て%最大酸素摂取量である。縦軸の単位は、図3の(a)ではG(重力加速度=9.8m/s²)であり、(b)ではG/sである。全ての図において、歩行時と走行時のデータを同一平面上に記入した。

被験者数が少ないので断定は難しいが、歩行に関しては、図3の(a)でも運動強度と平均振幅の間に単調増加傾向が認められるが、(b)では比例に近い関係が認められる。走行に関しても、(a)でも単調増加の傾向が認められる被験者もいるが、運動強度が上がると平均振幅は一定、あるいは低下する例も見られる。これに対し、(b)では運動強度の増大に呼応して増大する傾向が強い。特に、図3の(b)では歩行と走行のデータが整列する被験者が多く見受けられ、振幅の正規化には大きな意味があることが視われる。

4. 前後軸の加速度振幅

3名の被験者についての前後軸に関する運動強度と平均振幅の関係を図4の(a)、同じく正規化平均振幅との関係を(b)に示す。図3と同じく、各部分図の下に記入した英字が被験者を表し、横軸は全て%最大酸素摂取量で、縦軸の単位は、(a)ではG、(b)ではG/sである。歩行時と走行時の計測データを同一平面上に並べたことも図3と同様である。

図4の(a)でも、全体的印象としては運動強度の増大に伴い平均振幅が増大する傾向が認められるが、これに反する傾向を示す被験者もあり断定はしにくい。一方、(b)の正規化平均振幅は運動強度の増大に対し比例はしないまでも単調増加傾向にあることは明らかである。この傾向は特に歩行時に顕著で正規化による効用が認められる。また、正規化によって歩行と走行のデータが整列する傾向も図3ほど顕著ではないが見受けられる。

5. 両軸加速度振幅のベクトル和の大きさ

図3(b)や図4(b)の各構成要素についてベクトル和の大きさを求めた結果を図5に示す。図3や図4と同じく、各部分図の下に記入した英字が被験者を表し、横軸は全て%最大酸素摂取量、縦軸の単位はG/sで、歩行時と走行時の計測データを同一平面上に並べた。これまで述べた運動強度に対し、比

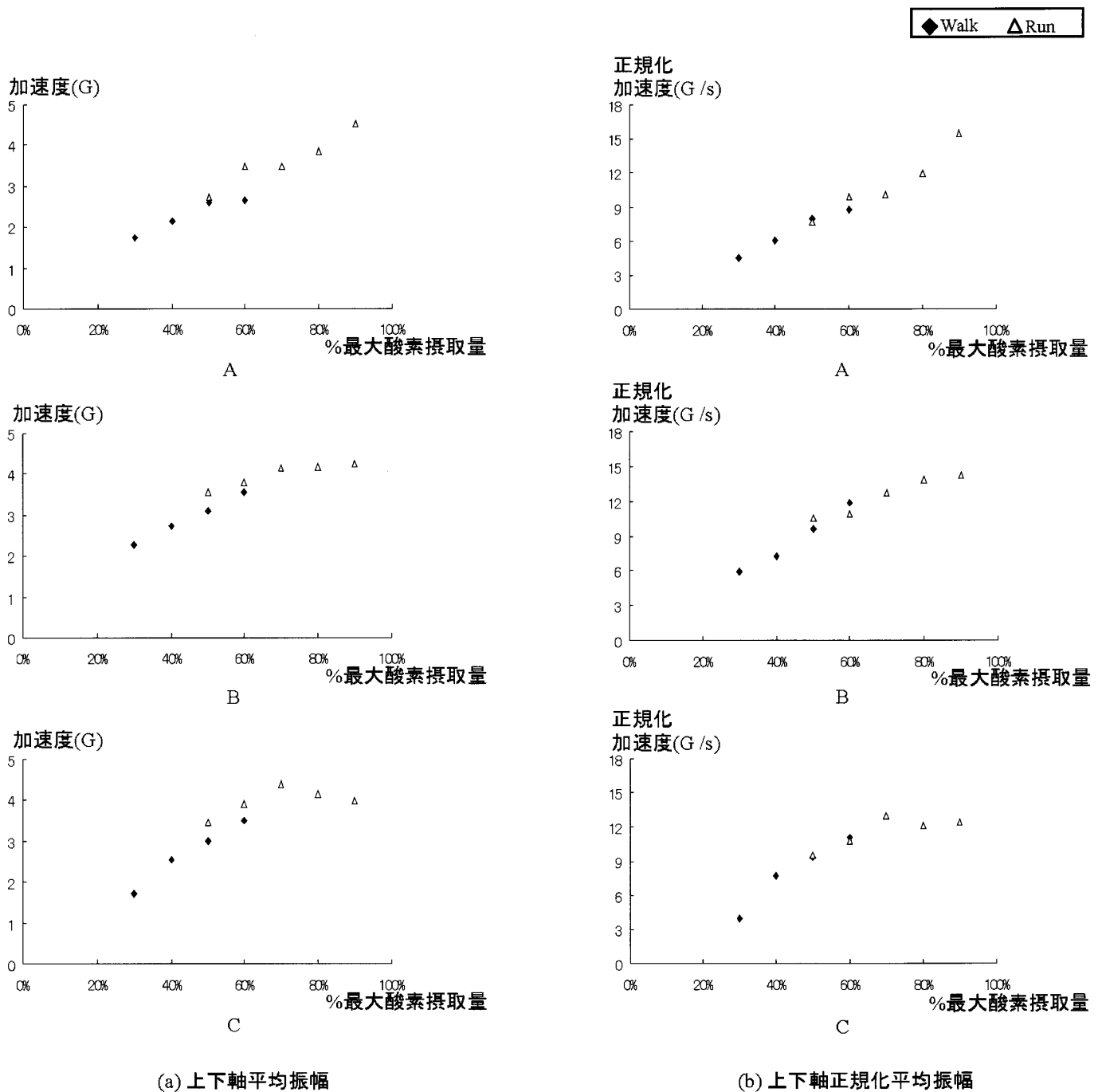


図3 運動強度と上下方向の加速度振幅の関係

例に近い程の単調増加傾向や、歩行と走行のデータが整列する傾向が顕著に現れており、総合的な指標としての優位性が伺われる。

考 察

図6の(a)と(b)および(c)は、それぞれ、被験者全員の上下軸正規化平均振幅、前後軸正規化平均振幅および両軸の正規化平均振幅のベクトル和の大きさを同一平面上にプロットしたもので、単位は図3~5と同様である。各図に書き添えた近似直線あるいは近似曲線から、加速度振幅の正規化が計測結果の評価を容易にする効果が認められる。図6(a)は上下軸正規化平均振幅が歩行時の運動強度の指標として優れていることを示している。この理由は、

運動強度の増大は一般に移動速度の増大を意味するが、特に歩行中に速度を上げるためには足を高く上げて歩幅を伸ばす必要があり、必然的に上下軸加速度振幅が増大することに由来していると思われる。

これに対し、図6(b)は走行時には運動強度の増大に対して前後軸正規化平均振幅が二次曲線的に増大する傾向を示しており、この値が走行時の運動強度の指標として有用であることを示している。この理由は、既に高速で走行中の場合、更に加速するためには高く跳ぶより、足を強く前へ踏み出し、かつ、後ろに蹴り出す方が有利であるためと考えられる。

図6(a)と(b)のまとめとなる図6(c)は、運動強度と両軸正規化平均振幅のベクトル和の大きさと歩行・走行を問わず強い相関関係を示している。

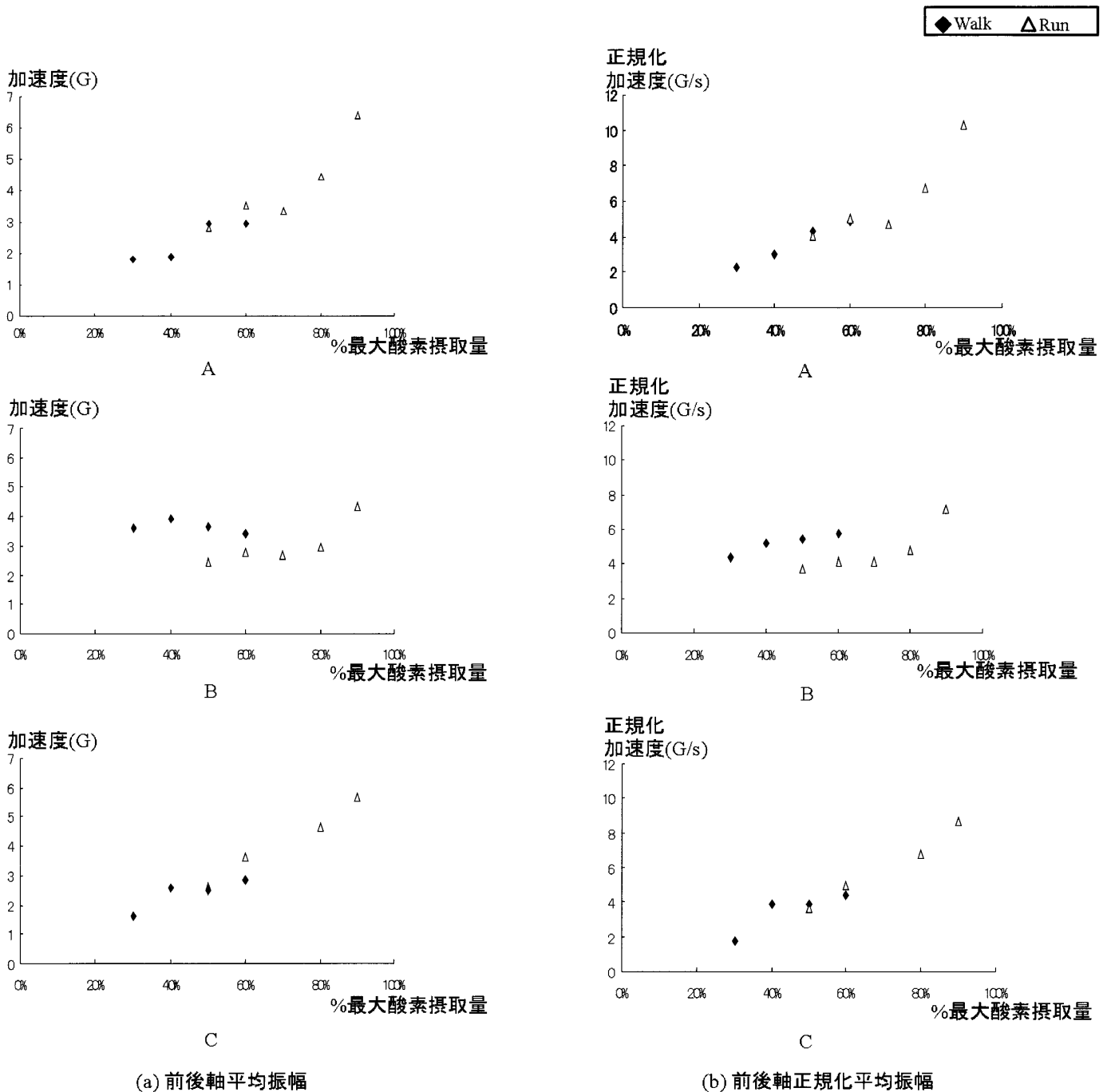


図4 運動強度と前後方向の加速度振幅の関係

つまり、この値は歩行を含む低速移動時から走行を含む高速移動時まで一貫した運動強度の指標として利用可能である。

結 論

今回の実験によって、歩行・走行を問わず、%最大酸素摂取量で表される運動強度と両軸正規化平均振幅のベクトル和の大きさとの間には強い相関が見られることが明らかになった。従って、2軸以上の加速度計を適切に用いれば、日常生活における幅広い場面において運動強度を推測することができる。

運動強度と加速度振幅の関係については、垂直方向の加速度振幅からエネルギー消費量が推定出来るという報告²⁾が既にある。この報告は歩行時に関し

ては我々の結論に近い。しかし、我々は単なる加速度振幅よりも正規化した加速度振幅が重要と考えており、また、上下軸のみならず前後軸の加速度振幅にも有用な情報が含まれていると考えている。

結論として、前後・上下両軸の正規化振幅の平均値からなるベクトル和の大きさと運動強度との間には強い相関関係があることが判った。つまり、運動強度を推測する指標としては、前後・上下両軸の正規化平均振幅のベクトル和の大きさが最善と思われる。

おわりに

運動強度と加速度振幅の関係は複雑な解析を待たずとも直観的で分かり易い。しかし、歩行・走行動

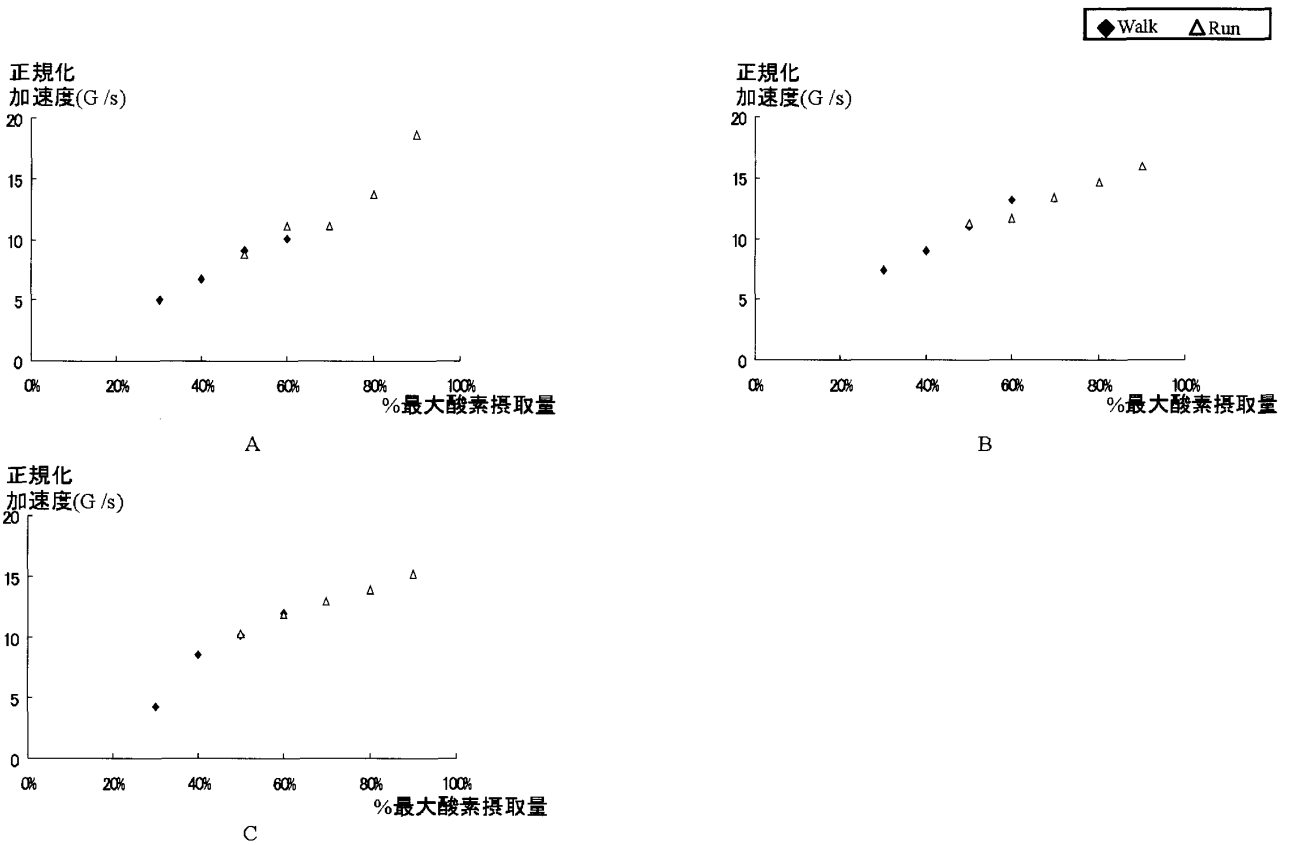


図5 運動強度と両軸加速度振幅のベクトル和の大きさの関係

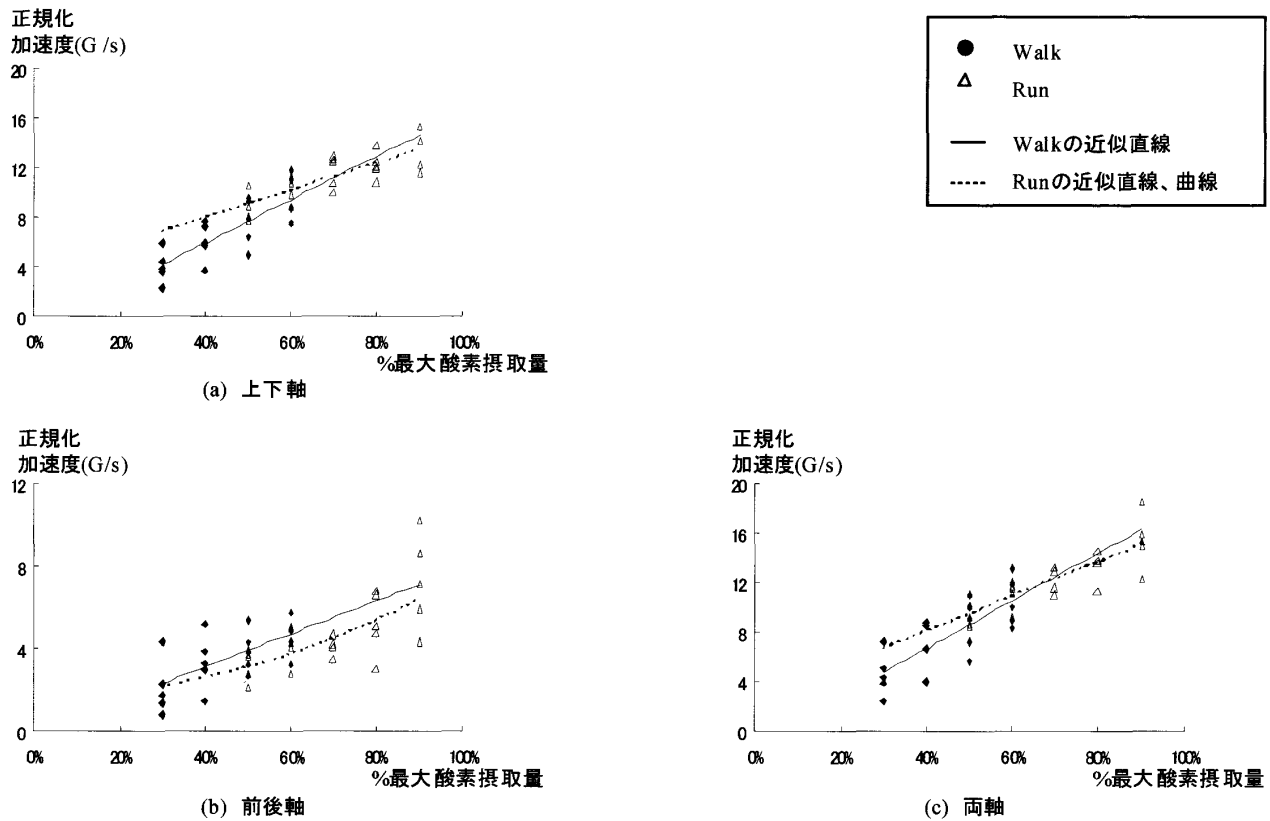


図6 運動強度と正規化平均振幅の関係

作は個人差が大きい上に動作環境の影響も受けやすいので、今後、より多くの被験者を対象に計測を実施する必要がある。また、本研究は高齢化社会への対応を念頭においたものであるため使い易さや安全性などへの配慮が不可欠である。しかし、今回用い

たトレッドミルを高齢者に適用することは安全面などの理由から問題が多い。従って、高齢者の健康評価という目的を果たすには、手軽で安全な計測方法を確立し普通の場所で気楽に実施できるようにする必要がある。この趣旨から、精度が低下することに

なっても酸素摂取量に依存しない運動指標の導入を考える必要がある。また、屋内外を問わず利用できるセンサを開発し計測の自由度も確保したいと考えている。こうした課題に留意しながら、今後も研究を進め、健康で豊かな高齢化社会の確立に貢献できるものに仕上げたい。

本研究は平成12年度川崎医療福祉大学総合研究の助成金によるものであることを付記して感謝の意を表します。また、実験の遂行にご協力頂いた川崎医療福祉大学健康体育学科の馬淵氏をはじめとする同学科の学生の皆様、および川崎医療短期大学臨床工学科（当時）の北島氏に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 品川佳満, 谷川智宏, 太田 茂 (1999) 加速度センサを用いた人間の歩行・転倒の検出. 川崎医療福祉学会誌, **9**(2), 243-250.
- 2) 山地啓司 (1981) 運動処方のための心拍数の科学. 大修館書店, 東京, 19-20.
- 3) 山地啓司 (1982) 心臓とスポーツ—心拍数による健康法—. 共立出版, 東京, 66-67.
- 4) 信友浩一 (1993) 新しい加速度センサを用いた体動, 姿勢の無拘束計測とエネルギー消費推定への応用. 長寿科学総合研究 No. 8, 318-323.

(平成13年 5月24日受理)

Measurement of the Intensity of Exercise Using an Portable Accelerometer

Tomohiro TANIKAWA, Yoshimitsu SHINAGAWA, Yasunobu FUJITANI,
Shigeu OHTA and Mitsushiro NAGAO

(Accepted May 24, 2001)

Key words : ACCELEROMETER, INTENCITY OF EXERCISE, AMPLITUDE, VECTOR SUM,
CORRELATION

Abstract

The portable accelerometer can measure both the horizontal and vertical vibration of a person's body in motion. This thesis aims to make clear the relation between the intensity of the exercise and the waveform as recorded on the portable accelerometer.

The subject attached an accelerometer to the right waist and did walking / running on a treadmill. During this exercise we measured the acceleration waveform when heart rate reached heart rate corresponding to the intensity of the exercise. As a result, it was clarified that exercise intensity was in correlation with the waveforms in both horizontal and vertical directions. Especially, exercise intensity had a greater correlation between amplitudes which was normalized by dividing the time for taking each step. In addition, it was found that exercise intensity is closely related to the size of vector sum of horizontal and vertical amplitudes of acceleration. This suggests the possibility that exercise intensity can be estimated by observing the acceleration with a portable accelerometer.

Correspondence to : Tomohiro TANIKAWA Doctoral Program in Medical Informatics, Graduate School of Medical Professions, Kawasaki University of Medical Welfare Kurashiki, 701-0193, Japan
(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.11, No.1, 2001 99-105)