

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

1) 基礎的検討

小熊祐子, 山本哲史, 木下訓光, 勝川史憲, 大西祥平, 山崎 元

はじめに

身体活動量低下と摂取エネルギー（特に脂肪）の増加に伴う肥満は深刻な社会問題である。米国では特に深刻であり、肥満者減少プロモーションが10年以上前から国をあげて行われてきた。1990年には、運動に関する指針として、アメリカスポーツ医学会より、トレーニングによるフィットネスの向上を根拠に、「週3から5日、中等度から強度の強さで、20から60分の有酸素運動を行う」という勧告¹⁾が出され、これに基づき指導がすすめられた。しかし、フィットネスレベルが低く、身体活動量の少ない米国民には、達成できたものがほとんどなかった。その後の検討で、疾患リスクの減少のためには、身体活動量を増やし消費エネルギーを増大させることも重要であることがわかり、「ほぼ毎日中等度の身体活動を、断続的でもいいので合計で30分以上行うこと」という形で勧告が1995年にだされた²⁾。1990年の勧告の運動は、多くの場合、疾患リスクは軽減するのだが、実際リスクをかかえているフィットネスレベルの低い対象では長期に継続して実行することが困難であり、かつ、このような運動でなくても、身体活動量を増やしトータルとして消費エネルギーを増大させれば、リスクの減少は可能であることが実証されたため、より現実的な勧告として追加されたわけである。

日本でも、食生活の欧米化、身体活動量の低下とともに肥満者は増加傾向にある。国民栄養調査の結果をみると³⁾摂取エネルギーは昭和50年以降

はむしろ減少傾向であり、身体活動量の低下がより深刻であることが伺える。実際同調査によると、運動習慣（運動を週2回、1回30分以上、1年以上継続している人）の割合は男性25.5%、女性24.4%と約1/4にすぎず、1日の平均歩数は男性8071歩、女性7392歩であった。日本においても身体活動量アップの啓蒙は必須であり、今後益々重要となることは間違いない。

しかしながら、身体活動の健康（ないし疾患の予防・治療）への効果として、必要十分な量と強度を見極めるのは困難である。上記の米国の肥満度の高い人を対象とした勧告がそのまま日本人にあてはまるかも疑問である。これらを明らかにしていくためには、各種集団での、きめ細かい運動強度およびトータルの活動量の検討が必要である。また、個々人においても、現状評価や介入効果を確かめモチベーションを高めるためにも定量的検討が望まれる。

身体活動量の測定、評価には数多くの方法が試みられてきた。表1に身体活動量評価法の古典的分類ともいえる、Laporteの分類を示した。1のカロリーメトリーにより実際の消費エネルギーを測定する方法は、正確ではあるが、代謝チェンバーに入るなど、日常生活を反映しない形となり、短期的な実験以外では非現実的である。2の職業分類や3の調査は客観的とは言いがたいが大人数で行うことができるため、疫学的な身体活動量の調査では主流となる。客観的に身体活動量やその変化をみることのできる満足いく調査法がないため、客観性を重視し心肺フィットネスの指標を身体活動量の指標として用いることもある⁴⁾⁵⁾。

実際身体活動量の評価がしっかりとした研究ほどフィットネスと身体活動量の相関はよい⁶⁾。二重標識水法 (doubly labeled water) は、日常生活での身体活動量を1-2週間というタームでみる事が可能であり、精度も高く、身体活動量の評価のゴールドスタンダードとなっている。しかしながら、コストが大変高く、特に日本では使用困難である。また、トータルの活動量評価は可能であるが個々の身体活動の強度をみることは不可能である⁷⁾。

表1 身体活動量の評価法の分類 (Laporte)

1. カロリメトリー a) 直接法 b) 間接法
2. 職業分類
3. 調査 (survey) a) 間接カロリメトリー b) 作業別日誌 c) 思い出し法によるアンケート d) 定量記録 (quantitative history)
4. 生理学的指標 a) 心肺フィットネス b) 二重標識水法 (doubly labeled water)
5. 行動観察
6. 機械的・電気的モニター a) 脈拍 b) 姿勢計 (stabilometers) c) Horizontal Time Monitors d) 歩数計 e) 歩行評価 f) 電気的動作センサー g) 加速度計
7. 食事調査

機械的・電気的モニターの中でも加速度計は、比較的安価であり、日常生活動作に制限を加えることなく、身体活動の量および強度を評価できるため、開発がすすんでいる⁸⁾。今回我々は、日本で開発された心拍同時記録3次元加速度計Activtracer AC300 (GMS社, 東京) について、各種運動時の精度を検討したので報告する。

方法

心拍同時記録3次元加速度計 (Activtracer AC300, GMS社, 東京) は77×51×15mm, 約87gと小型で軽量であり、ポケットベルなどと同様、ベルトでウエスト位に固定し、日常生活が可能で

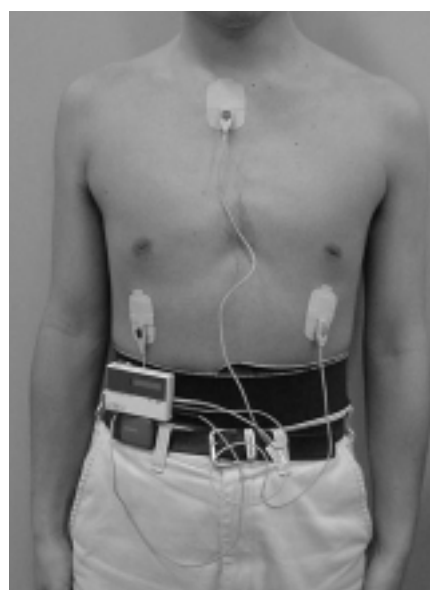
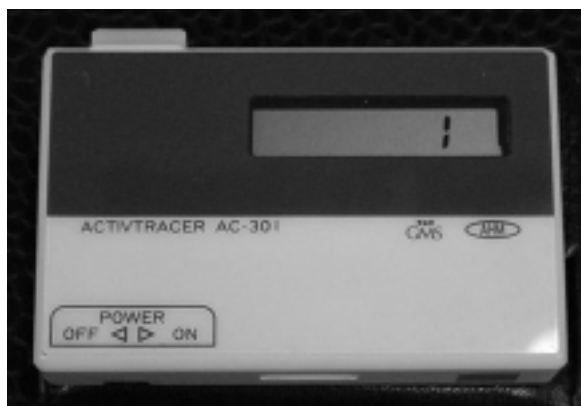


図1 Activtracerの外観と、装着図

ある(図1)。圧電効果を利用した加速度センサー(ピエゾ発音体7BB-20-6)が上下,左右,前後3方向に内蔵されており,運動によってその方向に生ずる応力を受け,素子が歪むことによって電圧が発生する機構になっている。その出力電圧は歩行などの運動によって生ずる加速度に比例して増加する。そのため,体動によって生ずる0.01秒毎の加速度の形で出力可能である。分解能は0.002G,測定範囲は0-4.0Gである。設定測定時間(1-300秒)の平均値の形で本体にメモリー(1チャンネルで20160×1,4チャンネルで5040×4)し,測定終了後パーソナルコンピューターに接続し指定のソフトでダウンロードし解析が可能となる。例えば24時間装着したときの出力結果を図2に示した。

以下の検討では,いずれもActivtracerはウエストの高さで腹部中央にベルトで固定し,前胸部に心拍モニター用電極を3カ所貼付(図1)した。重力加速度は(x,y,z方向およびその合成)を0.05秒毎に測定し,30秒の平均値を本体に記憶するように設定し,定常運動期間の各加速度の平均値を各々Gx, Gy, Gz, $G (= [Gx^2 + Gy^2 + Gz^2]^{1/2})$ とし,以降の検討に用いた。

a. Validity

定常運動時にかかる体動の加速度と酸素摂取量,脈拍との関係を検討する。

(1) 平地歩行~走行(2-12km/h)

対象は6名の健常成人(平均年齢41 [30-56]歳, BMI 23.6 [19.5-29.2] kg/m²)。1周400mのグラウンドトラックを利用し,一定のペースで歩行~走行し,各々定常状態で呼気ガスをダグラスバッグに採集した。採集した呼気ガスについて,換気量は双胴ドラム型レスピロメーターで計量,酸素・二酸化炭素濃度は質量分析計(Westron,東京)を用いて計測し,酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を算出した。

(2) 階段・坂道

傾斜のある,階段や坂道を一定の速度で昇降したときの,酸素摂取量,脈拍とGの関連を4名の健常者で検討した。階段は計177段,140秒で上

昇・下降した。坂道は傾斜約1.5度であり,速度を約4km/hから12km/hまで変えてそれぞれ上昇・下降した。(1)と同様定常状態でダグラスバッグに呼気ガスを採集し,酸素摂取量を算出した。

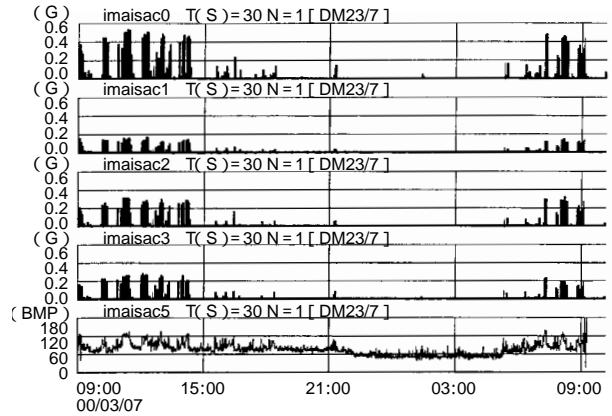


図2 24時間記録時の加速度(上から合成加速度,左右,上下,前後方向)と脈拍(最下段)

(3) トレッドミル漸増運動負荷時(速度アップ)

対象は国体のメディカルチェックのため最大運動負荷試験を施行した健常男性23名(平均46 [40-58]歳, BMI 25.5 [19.8-21.1] kg/m²)。トレッドミル運動負荷試験は,角度が一定の1.5%であり,スピードが2分ごとに漸増するプロトコルで施行した。運動負荷試験中呼気ガスはbreath by breath法で採集し,酸素・二酸化炭素濃度は質量分析計(Westron,東京)を用いて計測し,酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を算出した。検討にはオールアウトする前のステージまでの値を用い,各ステージの後半1分間を定常運動期間として平均値を算出し以降の検討に用いた。

b. Reliability

2つの加速度計で同様に測定可能か

Activtracer 2個をウエスト位に装着(やや右側と,左側)し,24時間の身体活動を記録し両者の測定間の信頼性を検討した。

結果

a. Validity

(1) 平地歩行～走行(2-12km/h)

各方向の加速度および合成加速度(G_x , G_y , G_z および G) と歩行～走行速度, 酸素摂取量, 脈拍とは, いずれも相関係数0.88～0.99と良好な相関を示した(表2)。中でも合成加速度 G と運動速度および体重当たりの酸素摂取量($\dot{V}O_2/kg$)の相関が最も強かった。合成加速度 G を独立変数, 運動速度および $\dot{V}O_2/kg$ を各々従属変数とすると,

$$\text{速度} = 0.008 \times G + 1.77 \quad (R^2 = 0.967)$$

$$\dot{V}O_2/kg = 0.024 \times G + 5.218 \quad (R^2 = 0.972)$$

と回帰された(図3, 4)。

(2) 階段・坂道

検討(1)より, 加速度のなかでは G が最も運動強度の指標を反映していることがわかったので, 以降の検討では原則として G のみを使用した。

G と速度の関係は上り坂・下り坂でも平地とほとんど変化なかった(図5)。 G と $\dot{V}O_2/kg$ の関係は, 平地とは大きく異なり, 上り(特に階段)では G に比し $\dot{V}O_2/kg$ が高値となり, 下り(階段・坂とも)では $\dot{V}O_2/kg$ は低値となった(図6)。個人のばらつきも大きかった。

(3) トレッドミル漸増運動負荷時

(速度アップ)

各ステージのデータ数と運動強度の指標を表3に示した。

個人の各ステージの値を使用し(トータルで $n=149$), G と運動強度の指標との関係を検討した。速度, $\dot{V}O_2/kg$, $\dot{V}O_2$, 脈拍と G との相関係数は順に0.90, 0.93, 0.89, 0.89(いずれも $p<0.0001$)と高い相関を示した。検討(1)と同様 G を独立変数, 運動速度および $\dot{V}O_2/kg$ を各々従属変数とすると,

$$\text{速度} = 0.008 \times G \quad (R^2 = 0.938)$$

$$\dot{V}O_2/kg = 0.021 \times G + 7.133 \quad (R^2 = 0.861)$$

と回帰された(図7, 8)。

表2 加速度と運動強度指標との相関係数(検討1)

	G_x	G_y	G_z	G
速度	0.92	0.97	0.96	0.99
体重当たりの酸素摂取量	0.92	0.97	0.96	0.99
酸素摂取量	0.88	0.89	0.87	0.92
脈拍	0.96	0.93	0.95	0.96

加速度

G_x : 左右方向

G_y : 上下方向

G_z : 前後方向

G : G_x , G_y , G_z の合成値

いずれも $P < 0.000$

b. reliability

2つの加速度計で測定した G (G_1 , G_2)は $r=0.996$ ($n = 2884$)と高い相関を示し,

$$G_2 = 0.938 \times G_1 + 0.905 \quad (R^2 = 0.992)$$

と傾き 1, y 切片 0であった。

考案

心拍同時記録3次元加速度計(activtracer)を用いて, 各種定常運動時の精度について検討した。

平地での歩行～走行時 G と速度および, 酸素摂取量は直線回帰された。歩行といった比較的慣れた一定の動作にさいしては, G は運動強度をよく反映すると考えられた。また, 前後, 左右, 上下方向のみで加速度を評価した場合より, 合成加速度で評価した方が相関はよかった。文献的には, Boutenらは歩行時には前後方向の加速度と, 身体活動によるエネルギー消費は $r=0.96$ と相関が高いが, 活動量の少ない動作中では $r=0.76$ となり, 3次元の合成加速度との相関の方が $r=0.82$ と高く⁹⁾, 日常生活や不規則な動作などでは, 3次元加速度計の方が有利と思われる。

検討(1)では歩行～走行にかけて, 直線回帰されたが, 検討(2)では歩行から走行に移行するところで, 直線というよりは折れ線となった。また, G と速度の関係は個人のばらつきが大きかった。個々人で G と運動強度との関係をみると, 回帰直線は $R^2 = 0.95 \sim 0.98$ 前後と高く直線回帰された。トレッドミル上では歩行時に特に加速度に比し酸素摂取量が高い傾向, 走行時はかなり個人差がみ

られ、走りの上手い下手、トレッドミルに慣れているかどうかなどが影響すると思われた。

データには示さなかったが、トレッドミル上で、速度を一定とし、傾斜をあげたときはほとんどGは変化せず、これまでの検討結果と合致する結果であり¹⁰⁾、また、(2)の検討とも合致する結果だった。Gに傾斜の変化が反映されないのは問題ではあるが、日常生活での身体活動のみを主眼

に考えると、速度の変化が精度高く反映されることの方が重要であろう。

坂道や階段になると、平地以上にGと $\dot{V}O_2$ の関係には、ばらつきが大きくなる。しかしながら、上りと下りを平均すると、概して平地相当となり、日常生活では上りがあれば下りがあるのが普通であるので、大きなlimitationにはならないと考えた。

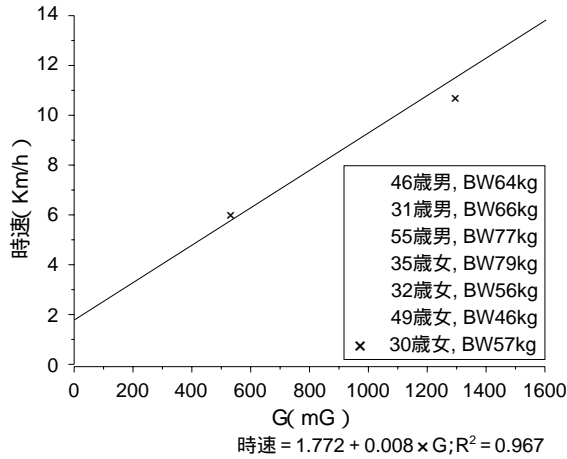


図3 平地歩行～走行時の速度と体動の加速度との関係
G：体動の前後，左右，上下方向の加速度のベクトル合成値の平均値

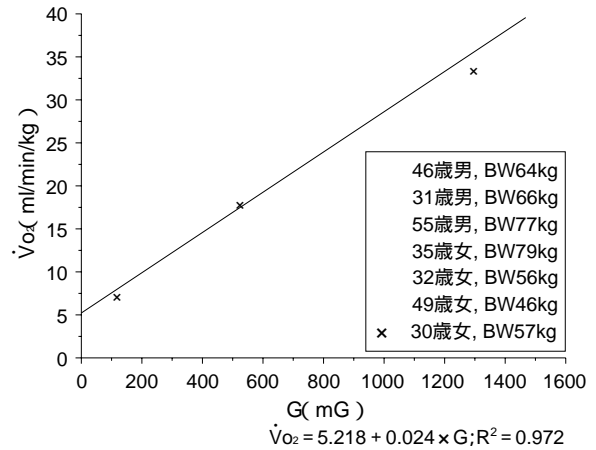


図4 平地歩行～走行時の加速度と酸素摂取量との関係
G：体動の前後，左右，上下方向の加速度のベクトル合成値の平均値
 $\dot{V}O_2$ ：間接カロリーメトリー（ダグラスバック法）で測定した体重当たりの分時酸素摂取量

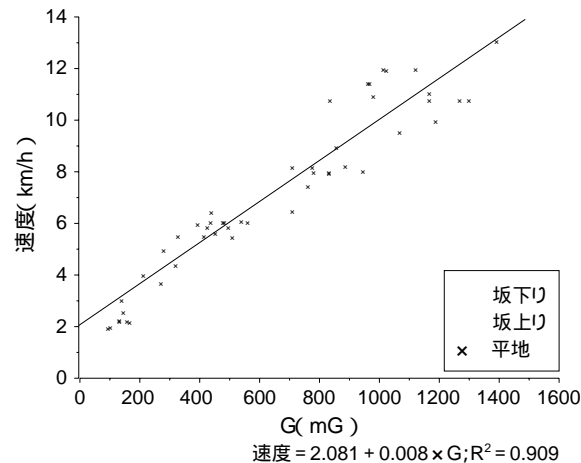


図5 上り坂・下り坂・平地での歩行～走行時の速度と体動の加速度との関係
G：体動の前後，左右，上下方向の加速度のベクトル合成値の平均値

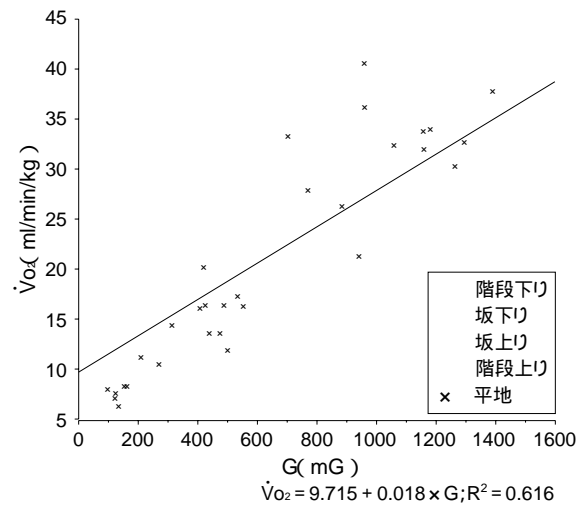


図6 上り坂・下り坂・階段・平地での歩行～走行時の加速度と酸素摂取量との関係
G：体動の前後，左右，上下方向の加速度のベクトル合成値の平均値
 $\dot{V}O_2$ ：間接カロリーメトリー（ダグラスバック法）で測定した体重当たりの分時酸素摂取量

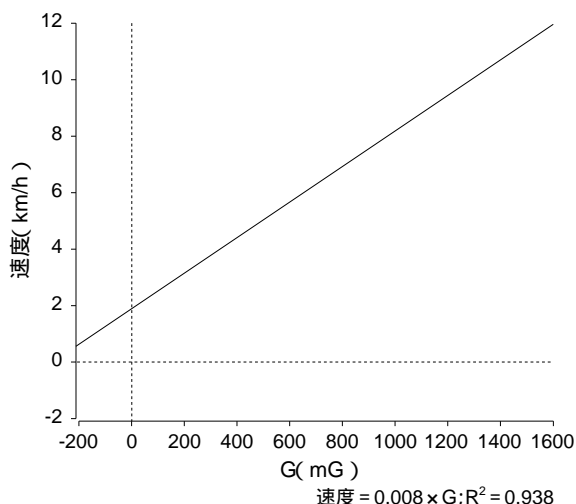


図7 トレッドミル歩行～走行時の速度と体動の加速度との関係
G：体動の前後，左右，上下方向の加速度のベクトル合成値の平均値

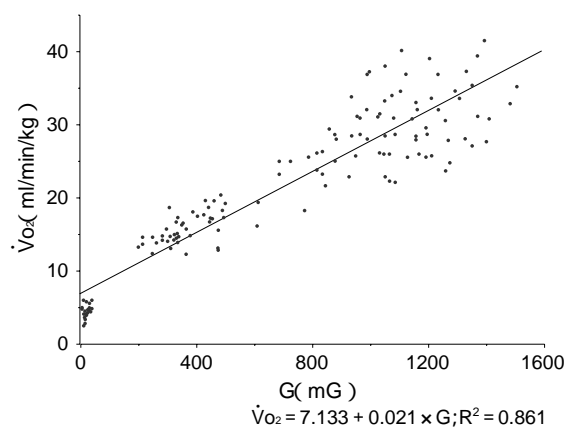


図8 トレッドミル歩行～走行時の加速度と酸素摂取量の関係
G：体動の前後，左右，上下方向の加速度のベクトル合成値の平均値
 $\dot{V}O_2$ ：間接カロリーメトリー（breath by breath法）で測定した体重当たりの分時酸素摂取量

表3 各ステージのデータ数と運動強度の指標の平均値

stage	0	1	2	3	4	5	6	7
speed (m/min)	0	80	100	120	140	160	180	200
n	23	23	23	23	22	19	12	4
$\dot{V}O_2$ (ml/min/kg)	4.7 ± 0.9	14.3 ± 1.1	17.8 ± 1.4	25.0 ± 2.1	28.7 ± 2.2	32.8 ± 3.1	36.2 ± 2.8	40.2 ± 1.9
脈拍 (bpm)	72 ± 9	96 ± 10	109 ± 11	136 ± 15	150 ± 15	161 ± 12	174 ± 11	173 ± 5
G (mG)	15 ± 11	312 ± 76	448 ± 106	965 ± 189	1119 ± 172	1186 ± 160	1222 ± 171	1221 ± 157

各ステージは2分
オールアウトする前のステージまでのデータを使用
 $\dot{V}O_2$ ：体重当たりの分時酸素摂取量
G：体動の合成加速度

ただし、今回データとしては示さなかったが、自転車こぎでは、ウエスト位につけた場合Gは運動強度に比し10分の1程度にしか上昇しなかった。
 $\dot{V}O_2/kg = 0.243 \times G(mG) + 7.964 (R^2 = 0.802)$
(自転車エルゴメーターでの運動負荷試験のデータ) 行動記録や脈拍を参考に、結果を検討する必要がある。

Reliabilityについては、同時装着の2つの加速度計間では $r = 0.996$ と非常に相関が強く、両者の散布図は、傾き 1, y切片 0の直線 ($R^2 = 0.992$) に近似できた。これは、これまでに検討された加速度計でのデータで $r = 0.7 \sim 0.9$ 前後であること⁸⁾ を考えると、遜色のない結果である。ベルトが弛

んだりといった装着方法さえ間違わなければ器械間での誤差は問題ないと思われる。

以上まとめると、Gは平地での定常歩行～走行については非常に精度高く運動強度を反映した。検査室を越えた日常生活での身体活動を測定するという意味では、加速度計は非常に便利であり、使用法が簡単であり、生活制限も少なく（耐水性はないので、水泳、入浴などはだめである）、現実的に使用可能なツールの中では精度高く、身体活動量を反映すると考えられた。特に、臨床の場合では、数値だけでなく、図2に示したようなグラフを提示することにより、行動のパターンや運動

強度を客観的にみることができ、患者教育・動機づけといった意味でも大変有意義である。行動記録のみでは実際には運動していない時間も含めて運動の記録になることが多く、強度は客観性に乏しいなど、制限が多々あり、加速度計はこれらの欠点を補うことが可能である。ただし逆に、自動車運転中に必要以上にGがかかること、ウエスト装着では自転車走行中などはGが低値であるなど制限はいくつかあり、行動記録や脈拍も参考にする必要がある。

今後、定常運動だけでなく、日常生活などある程度長い期間の身体活動を行った際の他の評価法との比較検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) American College of Sports Medicine. The recommended quality and quantity of exercise for developing and maintaining healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 1990, 22: 265 - 274.
- 2) Pate RR, Pratt M, Blair SN, et al. Physical activity and public health; a recommendation from the Centers for Diseases Control and the American College of Sports Medicine. *JAMA* 1995, 273: 402 - 407.
- 3) 国民栄養の現状. 平成10年国民栄養調査結果 健康・栄養情報研究会編 東京: 第一出版, 2000.
- 4) Blair SN, Khol H, W, III, Paffenbarger R, S, Jr., Clark D, G, Cooper K, H, Gibbons L, W. Physical fitness and all-cause mortality. A prospective study of healthy men and women. *JAMA* 1989, 262: 2395 - 2401.
- 5) Oguma Y, Ishida H, Katsukawa F, Kinoshita N, Onishi S, Yamazaki H. A new treadmill protocol for the elderly to evaluate their physical fitness and to do prescription exercise. *J Jap Soc Clinical Sports Medicine* 2000, 8: 252 - 259.
- 6) Paffenbarger R, S. Jr., Blair S, N., Lee I-M, Hyde R, T. Measurement of physical activity to assess health effects in free-living populations. *Med Sci Sports Exerc* 1992, 25: 60 - 70.
- 7) Henry RR, Genuth S. Forum One: Current recommendations about intensification of metabolic control in non-insulin-dependent diabetes mellitus. *Ann Intern Med* 1996, 124: 175 - 177.
- 8) Montoye H, J., Kemper H, C. G., Saris W, H. M., Washburn R, A. Movement assessment devices. In: Fowler M. E., Basic M. eds. *Measuring physical activity and energy expenditure*. Champaign: Human kinetics 1996, 72 - 96.
- 9) Bouten CV, Westerterp KR, Verduin M, Janssen JD. Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer. *Med Sci Sports Exerc* 1994, 26: 1516 - 1523.
- 10) Fehling PC, Smith DL, Warner SE, Dalsky GP. Comparison of accelerometers with oxygen consumption in older adults during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc* 1999, 31: 171 - 175.