

## 10

## エネルギー代謝の加齢変化

ヒトは、食物の三大栄養素（糖質、脂質、タンパク質）からエネルギーを摂取する。また、皮下や筋肉間・筋肉内、腹腔（大網、腸間膜など）に脂肪として、また肝臓や筋肉中にグリコーゲンとして、エネルギー源を蓄えている。これらから ATP を産生し、ATP を ADP に変換することによりエネルギーを発生させ、筋収縮（機械的エネルギー）、神経伝達（電気的エネルギー）、物質構成（化学的エネルギー）、体温調節（熱エネルギー）などに変換するプロセスを、エネルギー代謝という。熱力学の第一法則に従い、エネルギーは、その形態を変えることはあっても、減少することなく、受け継がれていく。

エネルギーの単位としては、「kJ（キロジュール）」が国際単位である。しかし日本では、現在も「kcal（キロカロリー）」が主に用いられている。なお、1 kcal=4.184kJ である。

## 1 総エネルギー消費量の構成要素

1日あたりの総エネルギー消費量（total energy expenditure : TEE）は、一般に以下の3つの構成要素に大別される（表 10.1）。

## ① 基礎代謝量

覚醒状態で必要な最小限のエネルギーが基礎代謝量（basal metabolic rate : BMR）である<sup>1,2)</sup>。一般に、以下の条件で測定される。

- ・約12時間以上の絶食
- ・安静仰臥位で、筋の緊張を最小限にした状態
- ・快適な室温（25℃程度）で、心身ともにストレスの少ない覚醒状態

BMR は、原則として測定前日から測定実施場所に宿泊して測定するが、実際は、当日の朝に測定実施場所へ移動し、十分な安静（一般に30分以上）を保った後に測定されることも多い<sup>1,2)</sup>。

TEE の中で最も大きな構成成分は、多くの人において BMR である。TEE を BMR で

表 10.1 ● 総エネルギー消費量の内訳とバラツキ

成分	割合 (%)	個人差 (kcal/日)	備考
基礎代謝量	60	50 ~ 100	割合は大きいですが、体格でおおよそ決定
食事誘発性体熱産生	10	50	割合も変動幅も小さいが、相対的な測定誤差が大きい
運動	0 ~ 5	50 ~ 100	日本人で週2日以上運動を実施している者は30%弱
運動以外の身体活動	25 ~ 30	200	PALの大きな個人差(1.4 ~ 2.2)を生じる主な原因

数値は、標準的な体格の日本人（スポーツ選手等は除く）における、おおよその値。  
個人差は、標準偏差あるいは推定の標準誤差からの概算。PALは身体活動レベル。

割って求める身体活動レベル (physical activity level: PAL) の成人における標準値は、「日本人の食事摂取基準 (2010年版)」においても、また、欧米人においても 1.75 程度と考えられている<sup>3,4)</sup>。ここから逆算すると、成人であれば、平均して BMR は TEE の約 60% 程度を占めると考えられる。

BMR は、性、年齢、体格 (身体組成)、甲状腺ホルモン、自律神経活動などによって決定される<sup>1,2)</sup>。中でも、体格の影響が大きいため、「日本人の食事摂取基準 (2010年版)」では、性・年齢階級別に、基礎代謝基準値 (kcal/kg 体重/日) が示されている (表 10.2)<sup>3)</sup>。ただし、基礎代謝基準値は、基準体位において推定値と実測値が一致するように決定されている。そのため、標準から大きく外れた体格においては、推定誤差が大きくなる。例えば、日本人でも、肥満者において基礎代謝基準値を用いると、BMR を過大評価する<sup>5)</sup>。またやせの場合、逆に BMR を過小評価することになる。

日本人成人を対象として作成された国立健康・栄養研究所の式<sup>6)</sup>は、以下のとおりである。

$$\text{BMR} = (0.1238 + 0.0481 \times \text{体重} [\text{kg}] + 0.0234 \times \text{身長} [\text{cm}] - 0.0138 \times \text{年齢} [\text{歳}] - 0.5473 \times \text{性別}^*) \times 1000/4.186 \quad (\text{性別}^* \text{ 男性: } 1 \text{ 女性: } 2)$$

BMR は体重よりも除脂肪量と強い相関がみられるため<sup>1,2)</sup>、除脂肪量を用いた推定式も数多く報告されている。さらに、安静時における各組織・臓器のエネルギー代謝率 (kcal/kg/日) に、各組織・臓器の重量を掛け合わせることによって、BMR に対する各組織・臓器の寄与がわかる<sup>7)</sup>。BMR は、筋肉の緊張を最小限にした状態で測定されるため、除脂肪組織の約半分を占める骨格筋が安静時に消費するエネルギーは 20% 程度である。その他、脳、肝臓、心臓、腎臓などの内臓も大きな割合を占めている (表 10.3)<sup>7)</sup>。逆に、各組織・臓器の重量を測定し、既知の各組織・臓器のエネルギー代謝率を掛けて足し合わせれば、一般健常人や運動選手においても、BMR が小さい誤差で推定できることが明らかとなっている<sup>8)</sup>。

表 10.2 ● 基礎代謝量 (厚生労働省, 2009)<sup>3)</sup>

性別	男性			女性			
	年齢 (歳)	基礎代謝基準値 (kcal/kg 体重/日)	基準体重 (kg)	基礎代謝量 (kcal/日)	基礎代謝基準値 (kcal/kg 体重/日)	基準体重 (kg)	基礎代謝量 (kcal/日)
1~2		61.0	11.7	710	59.7	11.0	660
3~5		54.8	16.2	890	52.2	16.2	850
6~7		44.3	22.0	980	41.9	22.0	920
8~9		40.8	27.5	1120	38.3	27.2	1040
10~11		37.4	35.5	1330	34.8	34.5	1200
12~14		31.0	48.0	1490	29.6	46.0	1360
15~17		27.0	58.4	1580	25.3	50.6	1280
18~29		24.0	63.0	1510	22.1	50.6	1120
30~49		22.3	68.5	1530	21.7	53.0	1150
50~69		21.5	65.0	1400	20.7	53.6	1110
70以上		21.5	59.7	1280	20.7	49.0	1010

表 10.3 ● 安静時における臓器別エネルギー消費量（体重 70kg の標準男性）(Eliа, 1992)<sup>7)</sup>

	重量 (kg)	エネルギー代謝率 (kcal/kg/日)	代謝量の割合 (%)
骨格筋	28.00	13	22
肝臓	1.8	200	21
脳	1.4	240	20
心臓	0.33	440	9
腎臓	0.31	440	8
脂肪組織	15.00	4.5	4
その他	23.16	12	16
計	70.00	—	100

体格のバラツキに伴い、BMR の個人差は非常に大きく、TEE の個人差の最大の原因でもある。一方で、体格が決まれば、BMR のバラツキはそれほど大きくないともいえる<sup>1,6)</sup>。

## ② 食事誘発性体熱産生

食後に、主として食物を消化・吸収・運搬するためにみられる熱産生は、タンパク質を摂取した後に顕著である（摂取したエネルギーの約 20～30%）。そのため、長年「特異動的作用」(specific dynamic action) とよばれてきた。しかし、糖質や脂質を摂取した場合にも観察される（それぞれ 5～10%、～5%）ことから、最近では「食事誘発性体熱産生」(diet-induced thermogenesis : DIT, あるいは thermic effect of food 〈あるいは meal〉 : TEF 〈あるいは TEM〉) とよばれることが多い。摂取エネルギーのおよそ 6～10% 程度が食事誘発性体熱産生として消費されると考えられている<sup>9)</sup>。

## ③ 活動時代謝量

身体活動によるエネルギー消費量（活動時代謝量）には、歩行や運動はもちろん、家事や仕事などにおける動作や姿勢の保持（座位を保つための筋の緊張なども含まれる）など、様々な筋活動を伴う広義の身体活動によるエネルギー消費量が含まれる。

TEE を BMR で割った PAL は、身体活動量の指標であり、スポーツ選手や重労働従事者でなくても、PAL は 1.4 から 2.2（～2.5）前後の広い範囲に分布する<sup>4,10)</sup>。BMR を 1400kcal/日、食事誘発性体熱産生を TEE の 10% とすると、この PAL のバラツキによる活動時代謝量の幅は、およそ 350～1400kcal/日に相当する。スポーツなどの運動は、せいぜい 300kcal/日前後か、多くの場合それ以下であると考えられるので、運動以外の身体活動による熱産生（nonexercise activity thermogenesis : NEAT）も大きく貢献していると考えられる<sup>11)</sup>。

## 2 エネルギー消費量の評価法

エネルギー消費量の評価法は、以下のように大別できる。

### ① 直接法

本来は被験者の仕事量あるいは熱量を直接測定・評価するのが直接法に相当する。測定室内の被験者の産熱に加え体温の変化も考慮し、これらの総和としてエネルギー消費量を

評価する。しかし、装置が大がかりで、活動内容も限定されるため、最近はほとんど使用されていない。

## ② 間接法

エネルギーを生み出す際、食物から取りこんだ栄養素が酸素と反応し、二酸化炭素を産生する。酸素摂取量と二酸化炭素産生量、および尿中窒素量が正確に得られれば、これらの化学式に基づいて、多くの場合1%程度かそれ以下の誤差でエネルギー消費量が推定できる。例えば、最もよく利用される Weir の式<sup>12)</sup>は、以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{エネルギー消費量 (kcal)} = & 3.941 \times \text{酸素摂取量} + 1.106 \times \text{二酸化炭素産生量} \\ & - 2.17 \times \text{尿中窒素排泄量} \end{aligned}$$

また、三大栄養素のうち、摂取エネルギーに占めるタンパク質の割合は比較的安定している。そこで、タンパク質の占める割合を12.5%と仮定すると、先の Weir の式は以下のようなになる。

$$\text{エネルギー消費量 (kcal)} = 3.9 \times \text{酸素摂取量} + 1.1 \times \text{二酸化炭素産生量}$$

タンパク質の占める割合が20%を大きく越えるような極端に偏った食事であったり、激しい運動中に限定したりしなければ、尿中窒素排泄量を考慮しないことによる誤差の影響は1%未満であり、呼気分析だけでもエネルギー消費量を十分に正確に測定することができる。

間接法は、直接法と比べて簡便に実施できる上に、ずれの小さい仮定に基づいており、直接法による測定と非常によく一致する。しかも、エネルギー基質（糖質・脂質）の消費の評価が可能である。したがって、しっかりとした呼気分析が行われるのであれば、非常に正確かつ有用な方法である。

## 3 総エネルギー消費量 (TEE) の評価法

1日あるいはそれ以上の長時間にわたるエネルギー消費量を推定するには、以下のような方法がある。

### ① エネルギー代謝測定室

ヒューマンカロリメーターあるいはメタボリックチャンバーなどともよばれる。人が数時間～数日生活できる部屋（机やベッド、トイレなど）と、ガス濃度や流量などの測定機器を備えた設備である。室内の酸素および二酸化炭素の濃度などから得られる酸素消費量および二酸化炭素産生量よりエネルギー消費量を推定する。被験者は、マスクなどを装着することなく、室内で自由に、あるいは一定の実験計画にしたがって過ごすことができる。測定機器を含む設備全体が十分に管理されれば、既存の設備の中では、数時間以上に及ぶエネルギー消費量を、最も正確に測定することができる。

ただし、生活の場所が室内に限定されるため、個人の生活実態を反映した日常の TEE とは異なる。したがって、実験的に再現した特定の条件下（活動内容、食事、その他の室内環境など）におけるエネルギー消費量を測定したり、他の方法の妥当性を検討したりするのに利用される。

## ② 二重標識水法

二重標識水（doubly labeled water：DLW）法は、水素（O）と酸素（H）の安定同位体を用いてエネルギー消費量を測定する方法である。現時点では、日常生活におけるエネルギー消費量の測定法のうち最も正確であるとされている<sup>13)</sup>。アメリカ/カナダや日本における食事摂取基準のエネルギー必要量は、DLW法により測定されたエネルギー消費量の値を基準に策定されている。

DLW法では、原子核が安定し放射性をもたない安定同位体である<sup>18</sup>Oと<sup>2</sup>Hを、自然界に存在する比率よりも多く含む水（二重標識水）を摂取する。身体の水分の一部（尿、唾液など）を採取して得られたそれらの排出率から二酸化炭素の産生量を、さらに摂取した食物の基質構成比などから推定した呼吸商を用いて酸素摂取量を求め、エネルギー消費量を算出する。

DLW法では、測定される対象者は二重標識水（DLW）を摂取し、尿や唾液などのサンプルを採るのみで、活動の制約がまったくないため、乳幼児や妊産婦、高齢者など幅広い対象への適用が可能である。一方で、1～2週間の平均のエネルギー消費量を測定する方法であり、それより短期間のエネルギー消費量を測定するには適さない。また、<sup>18</sup>Oの価格が高く、質量比分析計を用いた分析が簡単ではないことから、多数の対象者の測定や保健指導などの現場での測定にはそぐわない。TEEの推定精度は、エネルギー代謝測定室を基準とした場合、確度・精度ともに一般に±5%程度である<sup>13)</sup>。

## ③ 心拍数法

心拍数は、特に中～高強度の活動において、エネルギー消費量と正の相関がみられる。そこで、小型の心拍計モニターを使って1日以上にわたって心拍数を測定し、あらかじめ個人別に作成しておいたエネルギー消費量と心拍数との関係式を用いて1日のエネルギー消費量を推定することができる。心拍数と酸素消費量、エネルギー消費量とは、中程度かそれ以上の活動強度であれば、かなり強い相関がみられる。しかし、その一方で、日常生活の大部分を占める低強度の活動時においては、エネルギー消費量と心拍数の関係式は異なるとともに、相関は弱いため、推定誤差が生じる。また、常に電極を装着し小型のモニターを腰部のベルトなどに携帯することによる不快感や、活動を多少制限する可能性があるという問題もある。さらに心拍数法は、分析にもかなりの手間を要する。

## ④ 加速度計法

加速度の大きさはエネルギー消費量と正の相関があることを利用して、エネルギー消費量を推定する方法である。一般に腰部に装着し、その多くは数十グラムなので、不快感は少ない。歩数計の一部および活動量計の多くは上下方向だけ（1次元）の加速度計であるが、3次元の加速度計もある。ただし、比較的低強度の活動をはじめ、重い物を持ってじっと立っている場合や、坂道を昇り降りする場合など、加速度の大きさは、必ずしもエネルギー消費量と対応しないことがある<sup>14)</sup>。そのため、活動量を相対的に評価するには有効な手段となるが、一般に1日のエネルギー消費量を過小評価する傾向にある<sup>15～17)</sup>。例えば、3次元の合成加速度と身体活動強度の関係を示したグラフを見ると、ボール投げや

階段昇降は歩行などと異なる直線上に存在する（図 10.1）<sup>18)</sup>。ただし垂直方向と水平方向の加速度の比を用いて活動の種類を判別することによって、推定精度をある程度改善することができる（図 10.2）<sup>18)</sup>。また、加速度計の種類によって推定の方法、ひいては推定精度に大きな違いがあるとともに、子どもには独自の推定式が必要である<sup>19, 20)</sup>。そのため、使用する際には、対象集団や活動をどの程度正確に捉えることができるのか、事前に確認する必要がある。

### ⑤ 生活活動記録法

活動内容を本人または観察者が記録し、それぞれの活動時のエネルギー消費量を、メッツ値<sup>21, 22)</sup>などを用いて推定し、それらを加算することによって、長時間におけるエネルギー消費量を推定する。

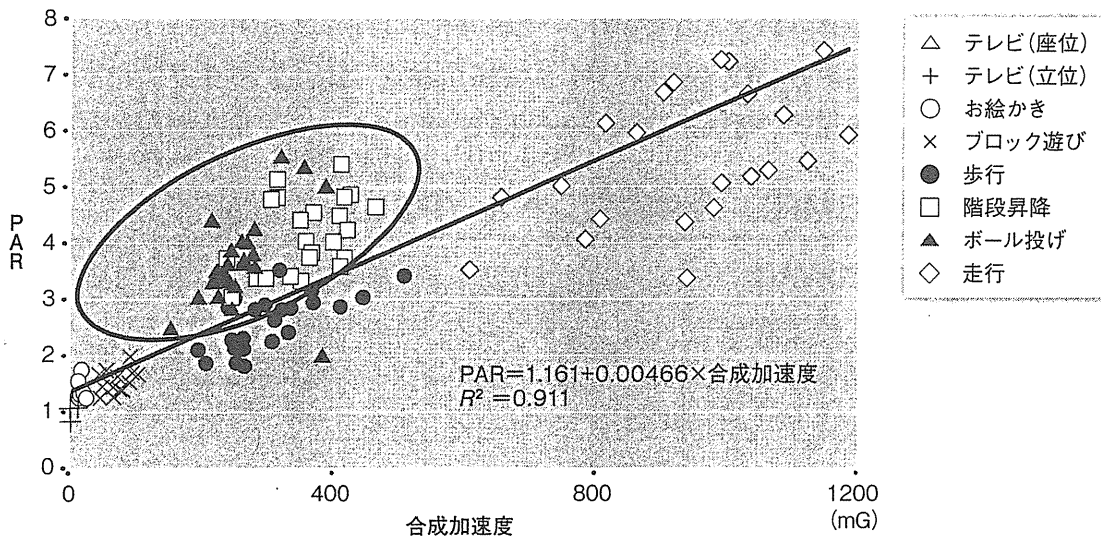


図 10.1 ⑤ PAR と合成加速度との関係 (Tanaka et al., 2007)<sup>18)</sup>  
 PAR (physical activity ratio) は活動強度を表す指標で、基礎代謝量を 1 とした場合に、その何倍にあたるかを示す。

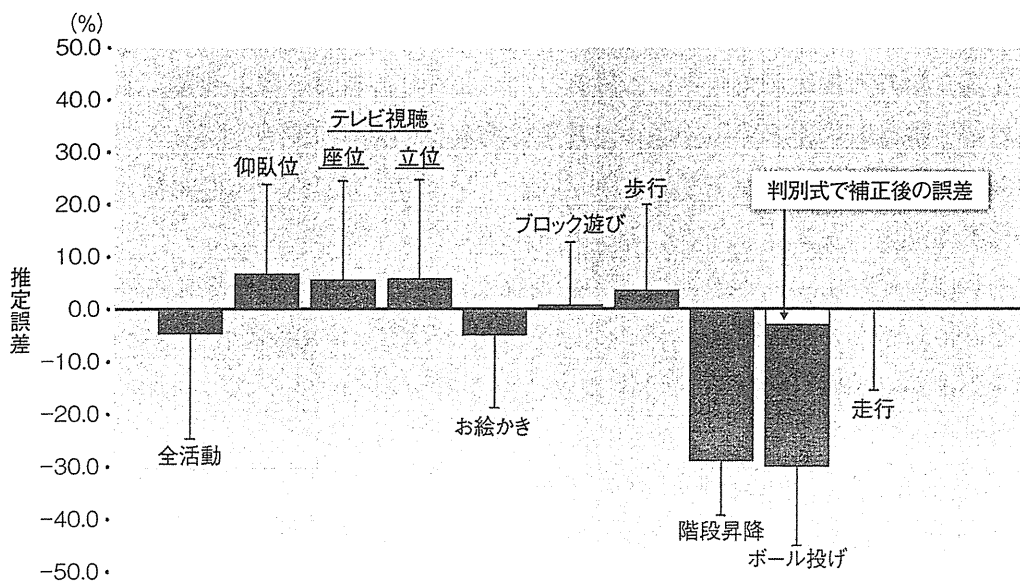


図 10.2 ⑤ 様々な活動における推定値と実測値の誤差 (% difference) (Tanaka et al., 2007)<sup>18)</sup>  
 合成加速度と線形モデルを用いて推定した。

ギー消費量を推定する方法である。生活内容に関する情報さえあれば利用できることから、エネルギー消費量・必要量の推定などに、幅広く利用されてきた。ただし、一般に集団の平均値には大きな誤差はないものの、個人における推定誤差はかなり大きいことに留意する必要がある<sup>23)</sup>。

#### ⑥ 乳児の総エネルギー消費量 (TEE)

乳児 (0～24 か月) の TEE に関して、FAO/WHO/UNU (国際連合食糧農業機関/世界保健機関/国際連合大学) は、DLW 法を用いた先行研究で報告された結果に基づき、性、年齢 (月齢)、体重、身長と TEE との関係を検討した。その結果、母乳栄養児の乳児期の TEE は、体重だけを独立変数とする次の回帰式で説明でき、それ以外の変数を加えても推定精度はほとんど変わらなかったと報告している<sup>24)</sup>。

$$\text{母乳栄養児: TEE (kcal/日)} = 92.8 \times \text{体重 (kg)} - 152.0$$

$$\text{人工乳栄養児: TEE (kcal/日)} = 82.6 \times \text{体重 (kg)} - 29.0$$

一般的に人工乳栄養児は、母乳栄養児よりも TEE が多いことも留意する必要がある。

## 4 基礎代謝量 (BMR)、身体活動レベル (PAL) の年齢変化

基礎代謝 (BMR) 基準値は、女性より男性、高齢者より若年者の方が大きい (表 10.2)。除脂肪量で補正すると、差はかなり小さくなるものの、この傾向は維持される。この点について、組織・臓器重量とそれらのエネルギー代謝率を用いた検討がある。その結果によると、高齢者と若年成人との間に差はみられなかった (図 10.3)<sup>25)</sup>。このように、成人における性・年齢による差は、組織・臓器重量の違いでおおよそ説明がつく。すなわち、各組織・臓器の代謝率の個人差はそれほど大きくないと考えられる。

一方、基準値は乳児期から成人に向けて大きく減少し、成人は幼児の半分以下となっている。子どもにおいて基礎代謝基準値が大きい点に関して、Hsu らが組織・臓器重量を考慮した検討を行っている<sup>26)</sup>。それによると、子ども (9.3 ± 1.7 歳) の場合は成人 (26.0 ± 1.8 歳) と比較して、除脂肪量に対して安静時代謝量が非常に大きかった。その原因の 1 つは、肝臓や脳の重量比が大きいことであった。しかし、組織・臓器重量、および先に述べた各組織・臓器の代謝率から安静時代謝量を推定した場合、成人と異なり、実測値の方が 299kcal/日も大きかった (図 10.4)<sup>26)</sup>。以上より、子どもにおける各組織・臓器のエネルギー代謝率は成人と異なっていることがうかがえる。

身体活動レベル (PAL) は、厳密には身体活動量だけでなく、食事誘発性体熱産生 (DIT) の影響も受ける。しかし、DIT は総エネルギー消費量 (TEE) の 10% 程度とされるように、身体活動量が多いと DIT も大きくなる。また、DIT は食事のバランス (タンパク質の割合など) の影響は受ける一方で、年齢変化に関する知見は少ない。そこで、以下に述べる PAL の年齢変化は、主に身体活動量の年齢変化と考えられる。

「日本人の食事摂取基準 (2010 年版)」では、子どもの PAL を決定するにあたって、DLW 法で測定した報告に関する系統的レビューが行われている (図 10.5)<sup>3)</sup>。原則として BMR を実測した報告に限定して値が決定されているが、そのような文献がなかった 5

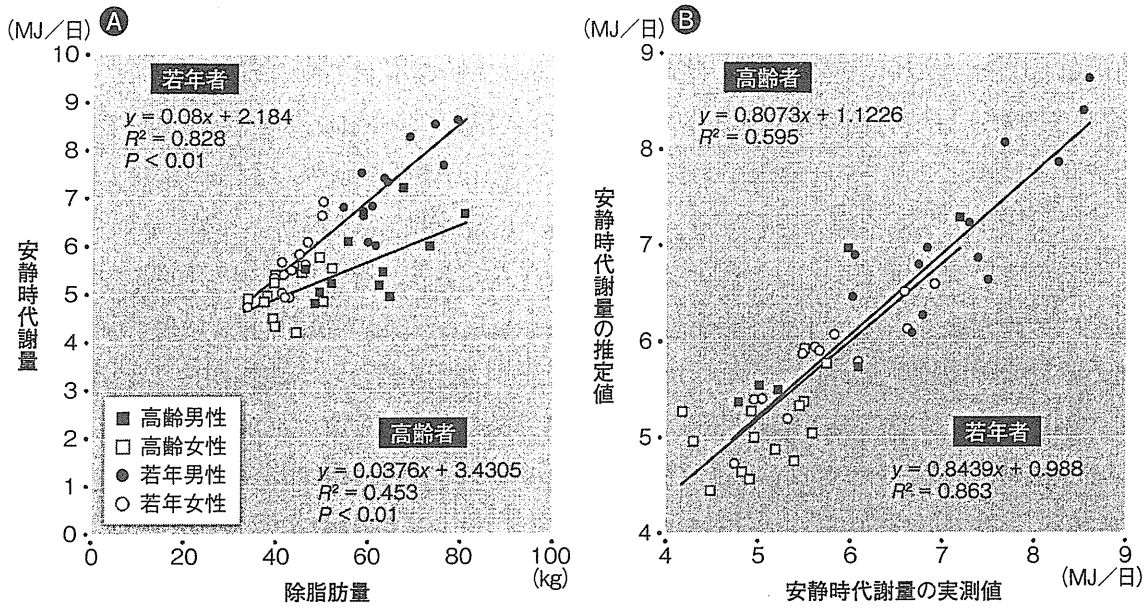


図 10.3 ● 安静時代謝量の実測値と推定値の関係 (Bosy-Westphal et al., 2003)<sup>25)</sup>  
 除脂肪量 (A), 各組織・臓器重量 (B) から推定。

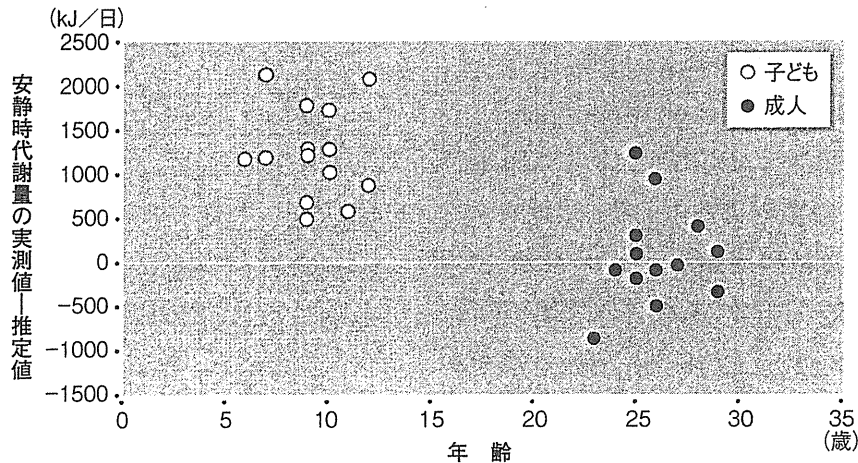


図 10.4 ● 安静時代謝量の実測値と推定値との差 (Hsu et al., 2003)<sup>26)</sup>  
 各組織・臓器重量から推定した。

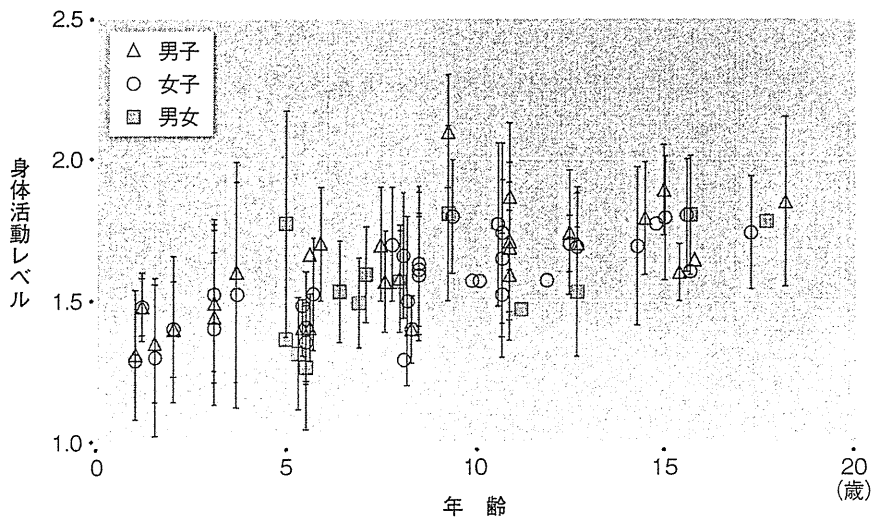


図 10.5 ● 子どもにおける身体活動レベル (厚生労働省, 2009)<sup>3)</sup>



歳未満の幼児においては、BMRの推定値を用いてPALを推定した報告も利用している。その結果、PALの平均値は、1～2歳：1.36、3～5歳：1.47、6～7歳：1.57、8～9歳：1.59、10～11歳：1.63、12～14歳：1.66、15～17歳：1.76で、年齢とともに増加する傾向を示した。これらの値に基づいて、子どものPALは表10.4<sup>3)</sup>のようになっている。

6歳以降は、PALの個人差を考慮するために、成人と同じ3区分となっている。ただし、これらのデータのほとんどは、欧米で得られたものであり、通学状況や、体育の授業を含む学内での活動、スポーツを含む習い事や部活動など、日本の子ども特有の生活状況が考慮されたものではない。

それに対して、成人後しばらくは、PALに大きな変化がみられるわけではない。Blackらによると、PALは女性の場合は、13～64歳についてはほぼ一定で、それ以前とそれ以後は低くなり、男性の場合は、18～29歳がピークで、その後は減少する、としている<sup>27)</sup>。Robertsらは、平均すると、10年でPALが0.07ずつ減っているが、20歳から40～50歳くらいについてはかなり一定とみてよいと考えている<sup>28)</sup>。さらに、Speakmanらは、52歳からPALが減少するという結果を得ている(図10.6)<sup>29)</sup>。

PALは、単に年齢という生物学的な要因よりは、生活状況によって大きな違いがあることも確かである。そのため、「日本人の食事摂取基準」においても、60歳代までは、一定のPALを与えている(表10.4)。ただし、70歳以上の値が70歳未満とそれほど異ならないのは、自立した70歳代前半を中心としたデー

表 10.4 ● 年齢階級別にみた身体活動レベルの群分け (男女共通) (厚生労働省, 2009)<sup>3)</sup>

年齢(歳)	レベルⅠ	レベルⅡ	レベルⅢ
1～2	—	1.35	—
3～5	—	1.45	—
6～7	1.35	1.55	1.75
8～9	1.40	1.60	1.80
10～11	1.45	1.65	1.85
12～14	1.45	1.65	1.85
15～17	1.55	1.75	1.95
18～29	1.50	1.75	2.00
30～49	1.50	1.75	2.00
50～69	1.50	1.75	2.00
70以上	1.45	1.70	1.95

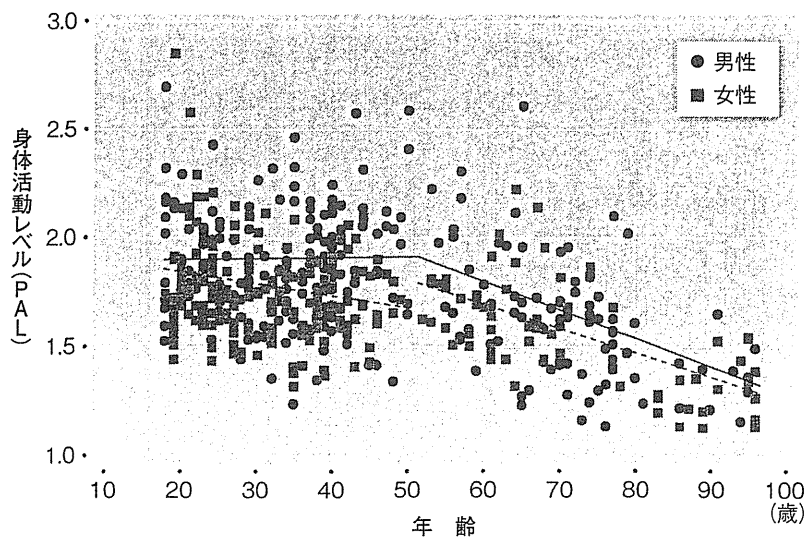


図 10.6 ● 身体活動レベル (PAL) の加齢変化 (Speakman and Westerterp, 2010)<sup>29)</sup>

タから算出していることに留意する必要がある。先にあげたようなレビューによると、少なくとも60～70歳かそれ以降は明らかにPALが減少するとしている。しかし、90歳代に関してPAL平均値が報告された文献は1件のみで非常に少なかった<sup>30)</sup>。それによると、90歳代のPALは低い傾向がみられた。また、自立した高齢者のPALは平均1.6であったのに対し、施設入居者は1.4と低くなっていた<sup>31)</sup>。

## 5 エネルギー必要量

### ① エネルギー必要量とは

エネルギー必要量は、主に「エネルギー消費量」から得られる。子ども、妊婦、授乳婦の場合は、さらに発育や授乳などに要する付加量加わる。エネルギー摂取量でないのは、以下の2つの理由による。

- ・健康な状態であれば、消費した分だけのエネルギーを摂取して、体重を維持する必要があるため

- ・エネルギー摂取量は、一般に過小評価されるため<sup>32,33)</sup>

成人では、体重が適正な場合、エネルギー消費量と等量のエネルギーを摂取することが望ましく、それが真のエネルギー必要量となる。それに対し、発育期である子ども・乳児では、総エネルギー消費量(TEE)に加えて、自己の発育に必要な組織増加分に相当するエネルギー(エネルギー蓄積量:energy deposition)と、その形成のためのエネルギーが必要である。それらのうち、組織形成のためのエネルギーはTEEに含まれるが、エネルギー蓄積量はTEEには含まれない。そのため、エネルギー必要量を決めるには、TEEにエネルギー蓄積量を加える必要がある。

妊婦では、そのTEE(胎児のエネルギー消費量や胎児の組織形成のためのエネルギーを含む)に加えて、胎児の発育に伴う組織の増加分(≒体脂肪やタンパク質の増加分)に相当するエネルギーを考慮する。また、授乳婦では、授乳婦のTEE(母乳を合成するためのエネルギーなどを含む)に加えて、母乳のエネルギーや体重減少に相当するエネルギーを、考慮する必要がある<sup>3,34)</sup>。そのため、妊婦や授乳婦のエネルギー必要量を決めるにあたっては、TEEに加えて、組織の増減に相当するエネルギーを考えなければならない。

エネルギー必要量 = TEE + 組織の増減に相当するエネルギー

### ② 推定エネルギー必要量

「日本人の食事摂取基準」では、アメリカ/カナダの食事摂取基準<sup>34)</sup>と同様に、推定エネルギー必要量(estimated energy requirement: EER)という概念が適用されている。

個人の推定エネルギー必要量とは「当該年齢、性別、身長、体重、および健康な状態を損なわない身体活動量を有する人において、エネルギー収支(成人の場合、エネルギー摂取量-エネルギー消費量)がゼロ(0)となる確率が最も高くなると推定される、習慣的なエネルギー摂取量の1日あたりの平均値」と定義される。当該個人のエネルギー摂取量が推定エネルギー必要量の場合、その個人のエネルギー摂取量が真のエネルギー必要量より不足する確率が50%、過剰になる確率が50%となる。エネルギー摂取量が推定エネルギー

ギー必要量より少なくても多くても、エネルギー収支が不適正である確率は同程度に増加する。

成人の場合、DLW法により測定された日本人の習慣的な TEE から計算された身体活動レベル (PAL) を用いて、

$$\text{推定エネルギー必要量 (kcal/日)} = \text{BMR (kcal/日)} \times \text{PAL}$$

として算定している。

### ③ エネルギー蓄積量の発育による変化

実際に増加した組織分のエネルギーも、蓄積量として考慮する必要がある。組織・臓器重量の増加は、体脂肪や筋肉、内臓などのタンパク質の他、水分、ミネラルなどで構成される。これらのうち、エネルギーを有するのは、体脂肪とタンパク質である。糖質については、発育とともに筋や肝臓に貯蔵される量が若干多くなるものの、その量は成人でさえ 500g 弱 (2000kcal 弱) と非常に小さいため、考慮する必要はほとんどない。そこで、各年齢における体重と、その中に占める体脂肪やタンパク質の重量から、発育に伴う体重増加 1g 分のエネルギー密度 (kcal/g) を求めた<sup>34)</sup>。そして、基準体重から計算した 1 日あたりの体重増加量との積から、1 日あたりのエネルギー蓄積量を求めたのが表 10.5<sup>3)</sup> である。

エネルギー蓄積量の値をみると、生後間もなくは 100kcal/日を超え、非常に大きな値となっており、エネルギー必要量の中に占める割合も大きい。しかし、半年後くらいまでには、急激に減少し、その後は、思春期に 40kcal/日程度まで増加するのを除くと、大きな変動はない。ただし、この値は、発育のスパートが異なる個人を平均したものであるため、実際には、発育のスパート時にはもう少し大きな値ではないかと考えられる。

表 10.5 ● 発育に伴う組織増加分のエネルギー (エネルギー蓄積量) (厚生労働省, 2009)<sup>3)</sup>

年齢	男性				女性			
	基準体重 (kg)	体重増加量 (kg/年)	組織増加分		基準体重 (kg)	体重増加量 (kg/年)	組織増加分	
			エネルギー密度 (kcal/g)	エネルギー蓄積量 (kcal/日)			エネルギー密度 (kcal/g)	エネルギー蓄積量 (kcal/日)
0~5 (月)	6.4	9.5	4.4	120	5.9	8.7	5.0	120
6~8	8.5	3.4	1.5	15	7.8	3.4	1.8	15
9~11	9.1	2.4	2.7	15	8.5	2.5	2.3	15
1~2 (歳)	11.7	2.1	3.5	20	11.0	2.1	2.4	15
3~5	16.2	2.1	1.5	10	16.2	2.2	2.0	10
6~7	22.0	2.5	2.1	15	22.0	2.5	2.8	20
8~9	27.5	3.4	2.5	25	27.2	3.1	3.2	25
10~11	35.5	4.5	3.0	35	34.5	4.1	2.6	30
12~14	48.0	4.2	1.5	20	46.0	3.1	3.0	25
15~17	58.4	2.0	1.9	10	50.6	0.8	4.7	10

## 6 子どもの身体活動の特徴

低年齢の子どもや、運動・スポーツを定期的に行っていない子どもでは、成人と比較して、ジョギングやウォーキングのような一定の運動を長時間連続的に行うことは少ない。6～10歳の子どもを対象に、観察法により日常生活における活動時間の分布を検討した報告によると、最頻値は3秒であり、活動が間欠的であった(図10.7)<sup>35)</sup>。そのため、例えば加速度計を用いて子どもの身体活動量を把握する場合には、なるべく短い時間間隔でデータをとっておいたほうが、身体活動の特徴をより詳細に捉えることが可能となる。また、子どもの場合は、改まって運動するわけではなくても、遊びその他によって、比較的高強度の身体活動を伴うことがある。その点も、なるべく正確に評価する必要がある<sup>36)</sup>。

## 7 身体活動量の変動要因

### ① 年次推移

小林らは、100名以上の小学校高学年の集団を対象として報告された歩数の年次推移を検討している<sup>37)</sup>。それによると、1980年代に得られた値が14000歩前後～21000歩台と、かなり大きかったのに対し、1990年代の半ば以降は、10000歩強の平均値がいくつか得られている。一定の対象集団ではないため、個々の集団の特性を反映している面があること、および、歩数計にも機種によって系統的なずれがあること<sup>38)</sup>に留意する必要がある。そのため、結論付けることはできないが、ここ何十年かで歩数が減少している傾向が疑われる。

### ② 歩数による評価と週間変動

客観的な方法を用いて評価した日本人幼児の身体活動量に関する研究は、これまで複数なされているが、その多くは歩数を用いたものである。歩数を用いても、中強度以上の活動時間をかなり正確に推定することができるが、強度が高くなると、相関関係はやや弱くなる(図10.8)<sup>39)</sup>。一方、幼児において、3次元加速度計を用いて日常における中～高強

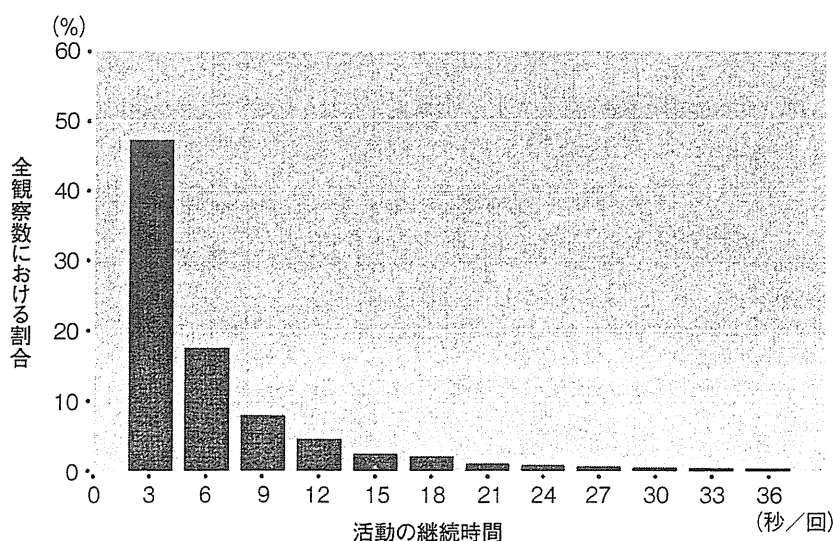


図10.7 ◎子どもにおける活動の継続時間の分布 (Bailey et al., 1995)<sup>35)</sup>

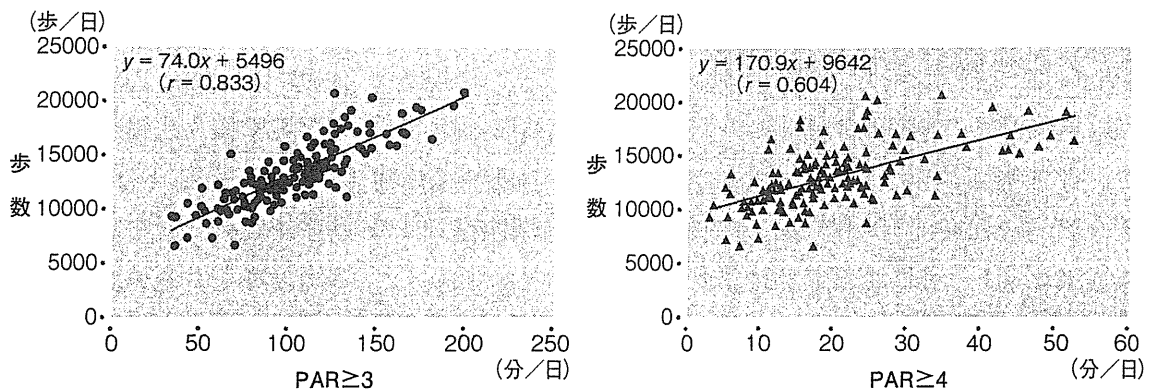


図 10.8 歩数と強度活動時間の評価精度 (Tanaka and Tanaka, 2009)<sup>39)</sup>

度活動の実施時間を検討した研究<sup>40)</sup>によると、中強度以上の活動に要した時間の最頻値は、平日が 80～89 分/日と 90～99 分/日であった。それに対し、休日でも、80～89 分/日が最頻値であったものの、休日は 79 分/日以下の幼児が平日に比較して多かった。また、幼稚園と保育所を比較すると、平日ではなく休日において保育所へ通う幼児の活動時間が少なくなっていた。その原因は不明であるが、保育所の場合、保護者は共働きである場合が多く、それによって休日の幼児の活動に影響があることが推察される。

### ③ 子どもの身体活動レベル (PAL) に影響を及ぼす高強度活動

成人を対象とした 3 軸加速度計 (Tracmor) を用いた報告によると、成人の PAL は中強度活動の時間とのみ正の相関を示していた<sup>41)</sup>。それに対し、オランダ人の子ども (8.6 ± 3.3 歳の男女) における日常生活での活動強度分類を検討した結果、成人より高強度活動の時間が長いことが報告されている<sup>42)</sup>。また、子どもの PAL は、低強度活動時間と負の相関関係を、また、高強度活動時間と正の相関関係を示していた。(田中茂穂)

#### 参考文献

- 1) 柏崎 浩：エネルギー所要量の歴史と現状。栄養所要量・基準量と食生活ガイドライン (小林修平編著)，pp.61-125，建帛社，1997。
- 2) 田中茂穂：人の基礎代謝量。実験医学，27 (増刊 肥満・糖尿病の病態を解明するエネルギー代謝の最前線)：1058-1062，2009。
- 3) 厚生労働省：日本人の食事摂取基準 (2010 年版)，日本人の食事摂取基準策定検討委員会報告書，2009。
- 4) Westterterp, K.R.: Impacts of vigorous and non-vigorous activity on daily energy expenditure. *Proc. Nutr. Soc.*, 62 (3): 645-650, 2003.
- 5) Tanaka, S. et al.: Accuracy of predictive equations for basal metabolic rate and contribution of abdominal fat distribution to basal metabolic rate in obese Japanese people. *Anti-Aging Med.*, 5 (1): 17-21, 2008.
- 6) Ganpule, A.A., Tanaka, S., Ishikawa-Takata, K., et al.: Interindividual variability in sleeping metabolic rate in Japanese subjects. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 61 (11): 1256-1261, 2007.
- 7) Elia, M.: Organ and tissue contribution to metabolic rate. *Energy Metabolism. Tissue Determinants and Cellular Corrolaries* (Kinney, J.M. and Tucker, H.N. eds.), pp.61-77, Raven Press, 1992.
- 8) Müller, M. J. et al.: Metabolically active components of fat-free mass and resting energy expenditure in humans: Recent lessons from imaging technologies. *Obes. Rev.*, 3 (2): 113-122, 2002.
- 9) Van Zant, R.S.: Influence of diet and exercise on energy expenditure—a review. *Int. J. Sport Nutr.*, 2 (1): 1-19, 1992.
- 10) Ishikawa-Takata, K. et al.: Physical activity level in healthy free-living Japanese estimated by doubly-labelled water method and International Physical Activity Questionnaire. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 62 (7): 885-891, 2008.
- 11) 田中茂穂：日常生活における生活活動評価の重要性。日本公衛誌，55 (7)：474-477，2008。

- 12) Weir, J.B.D.V.: New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. Physiol.*, 109 (1) : 1-9, 1949.
- 13) Speakman, J.R.: The history and theory of the doubly labeled water technique. *Am. J. Clin. Nutr.*, 68 (4) : 932S-938S, 1998.
- 14) Matthews, C.E.: Calibration of accelerometer output for adults. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 37 (11 Suppl.): S512-S522, 2005.
- 15) 田中茂穂: 間接熱量測定法による1日のエネルギー消費量の評価. 体力科学, 55 (5): 527-532, 2006.
- 16) 田中茂穂: 身体活動レベル (PAL) とエネルギー必要量. 臨床スポーツ医学, 24 (8): 847-853, 2007.
- 17) Plasqui, G. and Westerterp, K.R.: Physical activity assessment with accelerometers: An evaluation against doubly labeled water. *Obesity* (Silver Spring), 15 (10) : 2371-2379, 2007.
- 18) Tanaka, C. et al.: Triaxial accelerometry for assessment of physical activity in young children. *Obesity* (Silver Spring), 15 (5) : 1233-1241, 2007.
- 19) de Vries, S.I. et al.: Validity and reproducibility of motion sensors in youth: A systematic update. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 41 (4) : 818-827, 2009.
- 20) 田中千晶, 田中茂穂: 加速度計と幼児の身体活動量評価. 臨床スポーツ医学, 26 (9): 1079-1087, 2009.
- 21) Ainsworth, B.E. et al.: 2011 Compendium of Physical Activities: A second update of codes and MET values. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 43 (8) : 1575-1581, 2011.
- 22) Ridley, K., Ainsworth, B.E. and Olds, T.S.: Development of a compendium of energy expenditures for youth. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.*, 5: 45, 2008.
- 23) 山村千晶ほか: 身体活動量に関する質問票の妥当性について. 栄養学雑誌, 60 (6) : 265-276, 2002.
- 24) Butte, N.F. and King, J.C.: Energy requirements of infants. *Public Health Nutr.*, 8 (7A) : 953-967, 2005.
- 25) Bosy-Westphal, A. et al.: The age-related decline in resting energy expenditure in humans is due to the loss of fat-free mass and to alterations in its metabolically active components. *J. Nutr.*, 133 (7) : 2356-2362, 2003.
- 26) Hsu, A. et al.: Larger mass of high-metabolic-rate organs does not explain higher resting energy expenditure in children. *Am. J. Clin. Nutr.*, 77 (6) : 1506-1511, 2003.
- 27) Black, A.E. et al.: Human energy expenditure in affluent societies: An analysis of 574 doubly-labelled water measurements. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 50 (2) : 72-92, 1996.
- 28) Roberts, S. and Dallal, G.E.: Energy requirements and aging. *Public Health Nutr.*, 8 (7A) : 1028-1036, 2005.
- 29) Speakman, J.R. and Westerterp, K.R.: Associations between energy demands, physical activity, and body composition in adult humans between 18 and 96y of age. *Am. J. Clin. Nutr.*, 92 (4) : 826-834, 2010.
- 30) Rothenberg, E.M. et al.: Resting energy expenditure, activity energy expenditure and total energy expenditure at age 91-96 years. *Br. J. Nutr.*, 84: 319-324, 2000.
- 31) Fuller, N.J. et al. Components of total energy expenditure in free-living elderly men (over 75 years of age) : measurement, predictability and relationship to quality-of-life indices. *Br. J. Nutr.*, 75 (2) : 161-173, 1996.
- 32) Livingstone, M.B. and Black, A.E.: Markers of the validity of reported energy intake. *J. Nutr.*, 133 (3) : 895S-920S, 2003.
- 33) Okubo, H. et al.: Validation of self-reported energy intake by a self-administered diet history questionnaire using the doubly labeled water method in 140 Japanese adults. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 62 (11) : 1343-1350, 2008.
- 34) Institute of Medicine of the National Academies: Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids, pp.107-264, The National Academies Press, 2005.
- 35) Bailey, R.C. et al.: The level and tempo of children's physical activities: An observational study. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27 (7) : 1033-1041, 1995.
- 36) 田中千晶: 子どもの日常生活における身体活動評価の重要性. 日本公衛誌, 56 (8) : 525-529, 2009.
- 37) 小林博隆ほか: 生活活動の運動量. 子どもと発育発達, 6 (2) : 81-86, 2008.
- 38) Nakae, S. et al.: Accuracy of spring-levered and piezo-electric pedometers in primary school Japanese children. *J. Physiol. Anthropol.*, 27 (5) : 233-239, 2008.
- 39) Tanaka, C. and Tanaka, S.: Daily physical activity in Japanese preschool children evaluated by triaxial accelerometry: The relationship between period of engagement in moderate-to-vigorous physical activity and daily step counts. *J. Physiol. Anthropol.*, 28 (6) : 283-288, 2009.
- 40) 田中千晶, 田中茂穂: 幼稚園および保育所に通う日本人幼児における日常の身体活動量の比較. 体力科学, 58 (1): 123-129, 2009.
- 41) Westerterp, K.R.: Pattern and intensity of physical activity. *Nature*, 410 (6828) : 539, 2001.
- 42) Hoos, M.B. et al.: Physical activity pattern of children assessed by triaxial accelerometry. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 58 (10) : 1425-1428, 2004.

#### さらに学習したい読者のために推薦する文献

- ・ Malina, R.M., Bouchard, C. and Bar-Or, O.: Growth, Maturation, and Physical Activity (2nd ed.), Human Kinetics, 2004.
- ・ R. M. マリーナ, C. ブシャール (高石昌弘, 小林寛道監訳): 事典 発育・成熟・運動, 大修館書店, 1995. (上書の初版の訳書)

## Validation and Comparison of 3 Accelerometers for Measuring Physical Activity Intensity During Nonlocomotive Activities and Locomotive Movements

Yuki Hikiyara, Shigeho Tanaka, Kazunori Ohkawara,  
Kazuko Ishikawa-Takata, and Izumi Tabata

**Background:** The current study evaluated the validity of 3 commercially-available accelerometers to assess metabolic equivalent values (METs) during 12 activities. **Methods:** Thirty-three men and thirty-two women were enrolled in this study. The subjects performed 5 nonlocomotive activities and 7 locomotive movements. The Douglas bag method was used to gather expired air. The subjects also wore 3 hip accelerometers, a Lifecorder uniaxial accelerometer (LC), and 2 triaxial accelerometers (ActivTracer, AT; Actimarker, AM). **Results:** For nonlocomotive activities, the LC largely underestimated METs for all activities (20.3%–55.6%) except for desk work. The AT overestimated METs for desk work (11.3%) and hanging clothes (11.7%), but underestimated for vacuuming (2.3%). The AM underestimated METs for all nonlocomotive activities (8.0%–19.4%) except for hanging clothes (overestimated by 16.7%). The AT and AM errors were significant, but much smaller than the LC errors (23.2% for desk work and –22.3 to –55.6% for the other activities). For locomotive movements, the 3 accelerometers significantly underestimated METs for all activities except for climbing down stairs. **Conclusions:** We conclude that there were significant differences for most activities in 3 accelerometers. However, the AT, which uses separate equations for nonlocomotive and locomotive activities, was more accurate for nonlocomotive activities than the LC.

**Keywords:** algorithm, metabolic equivalents, daily activity

It is well known that physical fitness and activity confer numerous health benefits in the prevention of lifestyle-related diseases.<sup>1,2</sup> Physical activity energy expenditure (PAEE) can be divided into exercise-related activity thermogenesis and nonexercise activity thermogenesis (NEAT), with the latter consisting mainly of energy expenditure (EE) of low-to-moderate intensity during lifestyle activities.<sup>3</sup> Levine et al suggested that the EE due to NEAT, including nonlocomotive activity, is much larger than EE due to exercise throughout the day and may be an important factor in the prevention of obesity.<sup>4</sup> Therefore, it is important to estimate EE of daily activities, including locomotive movements and nonlocomotive activities such as household tasks and occupational activities. As Westerterp indicates, PAEE

of nonlocomotive activities accounts for more than 50% of total PAEE.<sup>5</sup>

Recently, various types of small and lightweight accelerometers have become available for assessing the amount and intensity of physical activity (PA). However, these devices use different algorithms, which depend on the number of axes (uni- or triaxial) and predictive equations for PAEE and intensity.<sup>6</sup> The usefulness of the Kenz Lifecorder EX (LC; SUZUKEN Co., Ltd., Nagoya, Japan), a uniaxial accelerometer widely used in Japan, for assessing PA intensity and PAEE during locomotive movements such as walking and jogging has been reported.<sup>7,8</sup> However, total energy expenditure (TEE) calculated from the LC data significantly underestimated by 20%–35% the TEE measured by the doubly labeled water method in Japanese men.<sup>9,10</sup> We speculate that the most important reason for this underestimation is related to the algorithm of the LC accelerometer, which was designed to assess PA intensity during ambulation. The LC device determines PA intensity from the frequency of steps and the degree of vertical acceleration.<sup>11</sup> However, if some PA such as household work does not involve a sufficient number of steps, the LC instrument may not be able to accurately assess PA intensity.

Triaxial accelerometers have also become popular devices for assessing PA intensity.<sup>12–14</sup> Nevertheless,

---

Hikiyara is with the Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, Narashino, Japan. Tanaka is with the Dept of Nutritional Science, National Institutes of Health and Nutrition, Tokyo, Japan. Ohkawara is with the Faculty of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications, Chofu, Japan. Ishikawa-Takata is with the Dept of Nutritional Education, National Institutes of Health and Nutrition, Tokyo, Japan. Tabata is with the Faculty of Sport and Health Science, Ritsumeikan University, Kusatsu, Japan

Hendelman et al indicated that the regression equation used to predict metabolic equivalent (MET) values based on locomotive movements had a different slope and intercept compared with regression equation based on nonlocomotive activities.<sup>12</sup> Thus, when an equation based on locomotive movements is used to predict MET values for nonlocomotive activities and ambulation, there could be large prediction errors. Midorikawa et al tried to resolve this discrepancy by separating nonlocomotive activities from locomotive movements using the ratio of vertical to horizontal acceleration.<sup>13</sup> That approach contributed to a small difference between predicted EE for 10.5 h and EE measured with a metabolic chamber. As observed above, accelerometers are gradually being developed with new specific algorithms. To date, numerous epidemiological studies on physical activity have been performed. Some studies used several different types of accelerometers to assess PA.<sup>15,16</sup> Since each accelerometer has a specific algorithm for estimating PA, it is difficult to compare the results obtained from different accelerometers.<sup>17</sup>

The current study examined the validity of 3 commercially-available accelerometers to predict MET values focusing specifically on nonlocomotive activities in field conditions. The accelerometers included the LC device, a triaxial accelerometer that uses 2 separate regression equations for nonlocomotive and locomotive activities, and a triaxial accelerometer that uses a single regression equation for all activities. We believe that these discussions might help us understand data of various accelerometers accumulated in epidemiology.

## Methods

### Subjects

All subjects were recruited through public applications and had no physical impairments that could affect household and locomotion activities. All subjects were fully informed of the purpose of the study and written informed consent was obtained from all subjects before the beginning of the study. This study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki, and all procedures involving human subjects were approved by the Ethical Committee of the National Institutes of Health and Nutrition.

### Anthropometry

Body weight was measured to the nearest 0.1 kg using a digital balance, and height was measured on a stadiometer to the nearest 0.1 cm. Body mass index ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) was calculated as body weight divided by the square of body height.

### Instruments

**Lifecorder EX (LC).** The LC (size:  $72.5 \times 41.5 \times 27.5$  mm; mass: 60 g, including a battery) was worn on the hip with an attached belt. This device was a uniaxial accelerometer with a sampling interval of 32 Hz. The

LC output was a PA intensity score that consisted of a scale from 0–9 (level 0: rest; level 0.5: micro activity; level 1–9: movement). The intensity of PA (level 1–9) was determined from the frequency of steps and the magnitude of vertical acceleration that was categorized into 4 parts with 4 thresholds [threshold 1 (TH1): 0.06 g, TH2: manufacturer's fixed values, TH3: manufacturer's fixed values, TH4: 1.96 g]. The LC device registered steps when the vertical acceleration signal exceeded the second threshold or when the gap between the pulses was  $\leq 1.5$  s.<sup>7,11</sup> An activity eliciting 3 acceleration signals during a 4-s sampling interval was recognized as PA, which caused the grade (level 1–9) to be computed. If this condition was not satisfied and vertical acceleration did not exceed TH2, activities were considered by the LC to be micro activities (level 0.5). The LC intensity data output (level 1–9) were entered into a previously published equation to predict the MET value.<sup>7</sup> The equation was as follows:

$$\text{MET} = 0.043 \times a^2 + 0.379 \times a + 1.361$$

where  $a$  is the LC intensity.

**ActivTracer (AT).** This device (AC-210; size:  $48 \times 67 \times 16$  mm; mass: 57 g; GMS Co., Ltd., Tokyo, Japan) is a triaxial accelerometer for detecting movement in 3 dimensions. It was able to obtain 3-dimensional accelerations every 4 s with a sensitivity of 2 mG and using a band-pass filter of 0.3–100 Hz. We calculated the synthetic accelerations from the following equation:

$$\text{Synthetic acceleration} = (x^2 + y^2 + z^2)^{0.5}$$

where  $x$  is anteroposterior acceleration,  $y$  is mediolateral acceleration and  $z$  is vertical acceleration. The synthetic acceleration was inserted into the formula reported by Midorikawa et al to calculate the physical activity ratio (PAR).<sup>13</sup> The PAR was then divided by 1.1 to convert it to a MET value because resting metabolic rate (RMR) in the sitting position without a meal was 1.1 times the basal metabolic rate (BMR) (RMR:  $0.99 \pm 0.177$  kcal/min; BMR:  $0.89 \pm 0.19$  kcal/min) in the current study. Although Midorikawa et al adapted their formula for sleeping metabolic rate (SMR; ie, average metabolic rate over an 8-h sleeping period),<sup>13</sup> we confirmed that SMR for adults was approximately equal to BMR.<sup>18</sup> The equations of Midorikawa et al were as follows<sup>13</sup>:

$$\text{PAR} = 0.0123 \times b + 1.7208 \text{ (House work)}$$

$$\text{PAR} = 0.0081 \times b + 0.9234 \text{ (Walk)}$$

$$\text{MET} = \text{PAR} / 1.1$$

where  $b$  is the synthetic acceleration in mG detected by the AT. Midorikawa et al reported that this device could differentiate the activity level from "housework" to "walk" based on the ratio of vertical to horizontal acceleration (housework  $< 0.750$ ; walk  $> 0.751$ ). Therefore, we followed this procedure and predicted MET values from these equations.<sup>13</sup>

**Actimarker (AM).** The AM (test model; size:  $60 \times 35 \times 13$  mm; mass: 24 g; Matsushita Electric Works, Ltd.,



Osaka, Japan) was another triaxial accelerometer. It obtained 3-dimensional acceleration every 12 s with a sensitivity of 40 mG at a sampling rate of 20 Hz. We calculated the synthetic acceleration from the following equation:

$$\text{Synthetic acceleration} = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{0.5}$$

where  $X$  is anteroposterior acceleration,  $Y$  is vertical acceleration, and  $Z$  is mediolateral acceleration. A predictive equation was obtained from the relationship between 3-dimensional synthetic acceleration and oxygen uptake during sedentary to vigorous PA, including nonlocomotive activities and locomotive movements.<sup>19-21</sup> The following equations were used to convert 3-dimensional synthetic acceleration to EE:

$$\begin{aligned} \text{Kcal (min)} &= c \times d \times \text{BMR (kcal/day)} + \text{RMR (kcal/min)} \\ \text{MET} &= \text{kcal (min)} / \text{RMR (kcal/min)} \end{aligned}$$

where  $c$  is the coefficient and  $d$  is synthetic acceleration. BMR was estimated using predicted body surface area ( $\text{cm}^2$ ). BMR was calculated from body weight (kg), height (cm), sex, and age using a formula for the Japanese population standardized by multiplying by a standard value ( $\text{kcal}/\text{m}^2/\text{h}$ ) corresponding to age (5th edition of Recommended Allowances Dietary Reference Intake in Japan).<sup>22</sup> Moreover, BMR ( $\text{kcal}/\text{day}$ ) was multiplied by 1.2, which is the ratio of sitting RMR to BMR in AM and includes diet-induced thermogenesis, and then divided by 1440 min to estimate RMR per minute in the sitting position several hours after a meal.

## Procedures

The subjects visited the laboratory early in the morning in a fasted state. After the study protocol was explained, anthropometric measurements were done. Next, they were asked to rest in the supine position for 30 min, and then BMR was measured in the supine position and RMR in the sitting position. The subjects performed 12 physical activities that included nonlocomotive activities such as desk work, vacuuming, hanging clothes, washing dishes, and moving a small load (5 kg), and locomotive activities such as climbing down stairs, climbing up stairs, slow walk (55 m/min), normal walk (70 m/min), brisk walk (100 m/min), walk with 3-kg baggage (70 m/min), and jogging [male (140 m/min), female (120 m/min)]. These activities were chosen as representative activities of daily life and were based on our preliminary 3-day observations in free-living conditions. The preliminary study was performed using the activity records of 93 subjects who lived in the Tokyo metropolitan area. MET values were measured during all activities. All subjects wore the AM on the right waist and the AT on the left waist symmetrically. Furthermore, the LC was placed diagonally forward right of the waist according to the instructions of the manufacturer. These accelerometers were tightly attached with a belt during each activity. According to our unpublished data, such a small difference in the position of placement does not systematically affect the results.

Before the experiment started, the accelerometers were synchronized using a wave clock for reference.

## Measurement of BMR and RMR

After we verified that the subjects had fasted, each subject was fitted with a facemask and breathed into a Douglas bag twice for 10 min; the bag concentrations of oxygen and carbon dioxide were analyzed by a mass spectrometer (ARCO-1000; Arco System Inc., Kashiwa, Japan). Oxygen consumption ( $\text{VO}_2$ ) and carbon dioxide production ( $\text{VCO}_2$ ) at rest and during activity were measured using the Douglas-bag method. Expired gas volume was measured using a certified dry gas meter (DC-5; Shinagawa Co., Ltd., Tokyo, Japan). EE was calculated from  $\text{VO}_2$  and  $\text{VCO}_2$  using Weir's equation<sup>23</sup>:

$$\text{EE (kcal)} = 3.9 \times \text{VO}_2 + 1.1 \times \text{VCO}_2$$

## Measurement of PA intensity

Measurement of each activity began after a preliminary period that was needed for subjects to reach a steady-state condition. The times needed to collect expired gas, which differed between activities, are shown in Table 1. The method for calculating the EE of each activity was the same as the method used for BMR and RMR. To calculate the MET value, EE during each activity was divided by the measured value of RMR.

## Statistics

Statistical analysis was performed using JMP version 6.0 for Windows (SAS Institute, Tokyo, Japan). All results are shown as mean  $\pm$  standard deviation (SD). Pearson's correlation coefficient was used to evaluate the relationships between variables. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to compare measured and predicted MET values, and Tukey's HSD test was used for post hoc comparisons when the ANOVA was significant. Midorikawa's discriminative method was used to discriminate data produced by nonlocomotive activities from that produced by locomotive movements.<sup>13</sup>  $P < .05$  was considered statistically significant.

## Results

The participants were 33 men (age:  $41.8 \pm 14.0$  years, height:  $169.9 \pm 6.2$  cm, weight:  $67.3 \pm 14.1$  kg, body mass index (BMI):  $23.2 \pm 3.9$   $\text{kg}/\text{m}^2$ ) and 32 women (age:  $43.1 \pm 12.8$  years, height:  $158.0 \pm 5.2$  cm, weight:  $55.6 \pm 9.6$  kg, BMI:  $22.2 \pm 3.5$   $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

We examined the effects of sex and age on measured MET values using a general linear model before statistical analysis because of the large age range of the subjects. As a result, there was no effect ( $R^2 = .003$ ,  $P = 0.23$ ) of age ( $F$  value = 2.35,  $P = .13$ ) or sex ( $F$  value = 0.55,  $P = .46$ ) on the measured MET values. Therefore, the relationships between measured and predicted PA intensities were examined without adjustment for age and sex.

**Table 1** Duration for Measurement of Physical Activity Intensity

	Content of activity	Steady state (min)	Measurement of expired gas (min)
Desk work	Typewriting using personal computer with sitting in a chair	3.0	7.0
Vacuuming	Vacuuming clean in a room (about 17m <sup>2</sup> ) while moving	3.0	3.0
Hanging clothes	Hanging out washing then and there	3.0	3.0
Washing dishes	Washing dishes with standing position	3.0	3.0
Moving a small load	Moving a small load (5kg) from one place to the other place (between about 3 meters), repeatedly	3.0	2.0
Climbing down stairs	Climbing down stairs according to the leader	2.0	1.0
Climbing up stairs	Climbing up stairs according to the leader	1.0*	0.8
Slow walk	Walk according to pace leader machine (55m/min) on ground	3.0	3.0
Normal walk	Walk according to pace leader machine (70m/min) on ground	3.0	2.0
Brisk walk	Walk according to pace leader machine (100m/min) on ground	3.0	2.0
Walk with a baggage	Walk with a baggage (3kg) according to pace leader machine (70m/min) on ground	3.0	2.0
Jogging	Jogging according to pace leader machine (male: 140m/min, female: 120m/min) on ground	3.0	1.0

\* Average time; the measurement for climbing up stairs was performed with a very short interval after climbing down stairs.

The differences between predicted and measured MET values are shown in Figure 1 (nonlocomotive) and Figure 2 (locomotive). Predicted MET values of nonlocomotive activities estimated by the AT and AM moderately agreed with measured MET values, whereas the LC systematically underestimated measured MET values. In contrast to nonlocomotive activities, the 3 accelerometers tended to have similar validity for locomotive movements.

The percentage difference between predicted and measured MET values is shown in Table 2. In all nonlocomotive activities except desk work, MET values were significantly underestimated by 20.3%–55.6% using the LC data. Using the AT data, MET values were significantly underestimated by 11.0% for moving a small load and by 2.3% for vacuuming, whereas MET values were overestimated by 11.3% for desk work and 11.7% for hanging clothes. Using the AM data, the MET values during all activities except for hanging clothes (overestimated by 16.7%) were significantly underestimated by 8.0%–20.0%. Although MET values during locomotive movements except for climbing down stairs were significantly underestimated by all 3 accelerometers, there were no differences among the 3 devices with the exception that high-intensity PA such as jogging was underestimated more by the LC (25.7%) than by the 2 other devices.

We described the relationship between LC intensity and MET values in Figure 3. For nonlocomotive activities, the LC intensities were within a narrow range (0.5 to 1.5), in spite of the finding that the MET values during each activity were significantly different.

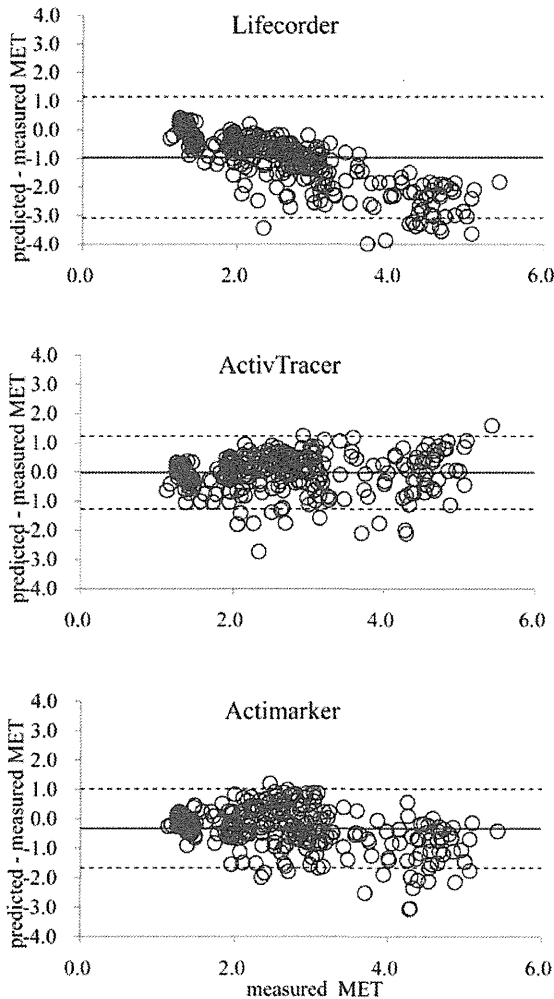
Table 3 indicates that the rate of walking evaluated by the LC device, which was calculated from dividing

the total number of steps during each activity by the length of that activity period, was considerably less during nonlocomotive activities than during locomotive movements.

## Discussion

The purpose of this study was to compare the validity of 3 accelerometers equipped with specific algorithms to measure PA intensity during nonlocomotive activities and locomotive movements.

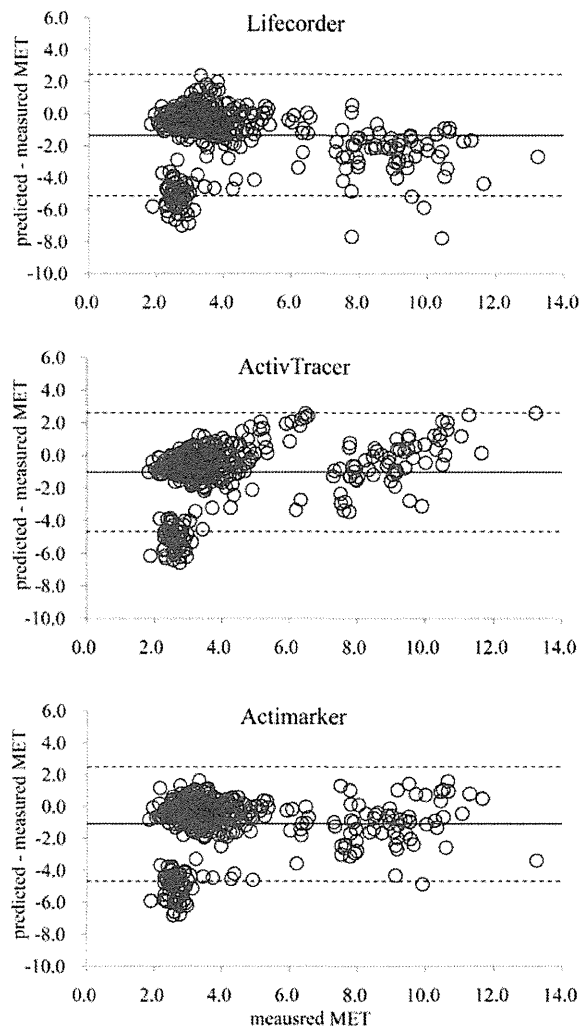
Figure 1 and Figure 2 show the differences between predicted MET values and measured MET values. We found that the LC instrument had difficulty evaluating PA intensity during nonlocomotive activities (Figure 1, Table 2). One of the reasons for this is that the equations for the LC device were specific for walking and running on a treadmill in the laboratory.<sup>7</sup> In addition, although the LC intensity (output data) was determined from the number of steps and vertical acceleration, the steps per minute were considerably less in nonlocomotive activities than in locomotive movements (Table 3). The LC device registered movement when the vertical acceleration signal exceeded the second threshold or when the gap between pulses was  $\leq 1.5$  s.<sup>7,11</sup> Therefore, it is possible that most steps taken during nonlocomotive activities were not detected by the LC device because the acceleration signals were not regular but rather intermittent. For example, during vacuuming, the LC accelerometer could not detect movements because the interval between them was often  $> 1.5$  s (Table 3). We confirmed that nonlocomotive activities such as vacuuming and moving a small load corresponded to LC intensities “0.5–1.5,”



**Figure 1** — Mean differences of each accelerometer between predicted and measured METs for nonlocomotive activities using Bland and Altman plots.

even when these MET values were comparable to slow walk and normal walk (Figure 3).

In contrast, the differences between measured and predicted MET values obtained using AT and AM data were less than those obtained using LC data, although there were also significant differences between MET values by triaxial accelerometers and measure MET values for several nonlocomotive activities (Table 2). The predictive equations for the AT and AM devices were obtained for both locomotive movements and nonlocomotive activities.<sup>13,21</sup> This might explain why the differences between predicted and measured MET values were better with the AT and AM accelerometers compared with the LC accelerometer. Moreover, the AT equations tended to have better predictive ability than the AM equations because the suggested discrimination



**Figure 2** — Mean differences of each accelerometer between predicted and measured METs for locomotive movements using Bland and Altman plots.

method of Midorikawa et al was applied for discriminating between the MET values of nonlocomotive activities and locomotive movements.<sup>13</sup> An advantage of the AT over other devices is that it can evaluate complex motions such as moving a small load, which consist of both types of activity like ambulatory movement, bending forward (unloading) and standing up (catching up load). However, since the AT as well as the other accelerometers could not detect the weight that an individual was carrying, it is not surprising that the MET values predicted by the AT underestimated the actual values by 11.0%.

Meanwhile, we confirmed that the accuracy of 3 accelerometers in locomotive movements was similar (Figure 2, Table 2). However, the underestimation of MET values for jogging was greater with the LC device than with the 2 other devices. Based on the original

**Table 2 Percent of Differences Between Measured and Predicted METs**

	Measured METs		Predicted METs						Percent of difference						Statistics	
			Lifecorder		ActivTracer		Actimarker		Lifecorder		ActivTracer		Actimarker			
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	P	Post hoc test
Desk work	1.1	0.1	1.4	0.0	1.3	0.0	1.0	0.1	23.2	7.9	11.3	7.9	-8.0	7.6	<0.0001	LC > AT > ME > AM
Vacuuming	2.9	0.7	1.6	0.0	2.7	0.4	2.3	0.3	-44.0	11.1	-2.3	24.9	-20.0	14.1	<0.0001	ME > AT > AM > LC
Hanging clothes	2.3	0.4	1.5	0.0	2.5	0.4	2.6	0.4	-32.6	10.6	11.7	21.8	16.7	20.4	<0.0001	AM,AT > ME > LC
Washing dishes	1.8	0.4	1.4	0.1	1.8	0.3	1.6	0.3	-20.3	13.5	0.2	23.6	-12.0	19.5	<0.0001	ME,AT > AM > LC
Moving a small load	4.4	0.7	1.9	0.1	4.2	0.6	3.5	0.3	-55.6	7.3	-11.0	7.3	-19.4	13.8	<0.0001	ME,AT > AM > LC
Climbing down stairs	3.2	0.5	3.4	0.8	3.0	0.4	3.3	0.4	9.6	30.3	-3.2	20.1	8.6	22.4	0.0003	LC,AM > AT
Climbing up stairs	7.6	0.8	2.5	0.3	2.8	0.5	2.7	0.3	-66.4	5.1	-63.8	8.0	-64.5	5.6	<0.0001	ME > AM,AT,LC
Slow walk	3.1	0.4	2.7	0.3	2.8	0.7	2.8	0.3	-12.7	13.2	-11.3	19.7	-9.0	12.8	<0.0001	ME > AT,AM,LC
Normal walk	3.6	0.5	3.2	0.4	3.3	0.7	3.3	0.3	-10.5	12.8	-7.3	20.4	-8.0	13.1	<0.0001	ME > AT,AM,LC
Brisk walk	4.6	0.7	4.0	0.5	4.2	0.7	4.0	0.6	-12.9	12.6	-9.1	18.3	-11.7	13.8	<0.0001	ME > AT,AM,LC
Walk with a baggage	4.2	0.6	3.5	0.5	3.7	0.8	3.6	0.4	-16.1	12.3	-12.8	20.3	-14.5	12.6	<0.0001	ME > AT,AM,LC
Jogging	9.5	1.1	6.8	1.5	9.0	1.3	8.1	1.8	-25.7	14.6	-4.0	14.8	-10.7	14.6	<0.0001	ME > AT < AM < LC

Abbreviations: ME; measured, LC; Lifecorder, AT; ActivTracer, AM; Actimarker.

Note. Post hoc test was adapted by Tukey's HSD test.