

博士学位論文

思春期前期小児の日常生活における総エネルギー消費量と身体活動量との関連
: 二重標識水法および加速度計法を用いた検討

同志社大学大学院 スポーツ健康科学研究科
スポーツ健康科学専攻 博士課程（後期課程）
4F 15 0002 香村恵介

主査

同志社大学 スポーツ健康科学部 教授 石井 好二郎

副査

同志社大学 スポーツ健康科学部 教授 北條 達也
早稲田大学 スポーツ科学学術院 教授 岡 浩一郎

2017 年度

目 次

本研究に関連する研究論文	iii
第 1 章 序論	
第 1 節 総エネルギー消費量とは	1
第 2 節 二重標識水法による総エネルギー消費量の推定	3
第 3 節 推定式による小児の総エネルギー消費量の推定	4
第 4 節 加速度計による小児の総エネルギー消費量の推定	6
第 5 節 小児の身体活動レベル	7
第 6 節 本研究の目的	9
第 2 章 二重標識水法によって測定した 10-12 歳児の総エネルギー消費量およびその推定式の精度 (研究課題 1)	
第 1 節 背景と目的	10
第 2 節 方法	10
第 3 節 結果	13
第 4 節 考察	14
第 3 章 3 軸加速度計 Active style Pro を用いた小児の総エネルギー消費量の推定精度 (研究課題 2)	
第 1 節 背景と目的	17
第 2 節 方法	17
第 3 節 結果	19
第 4 節 考察	19
第 4 章 小児の身体活動レベルと各種身体活動従事時間の関連 (研究課題 3)	
第 1 節 背景と目的	22
第 2 節 方法	22
第 3 節 結果	25
第 4 節 考察	26

第 5 章 総括	
第 1 節 総合考察	29
第 2 節 結論	30
文献	32
図表	
第 1 章	41
第 2 章	42
第 3 章	48
第 4 章	55
謝辞	58

本研究に関連する研究論文

本博士論文は、以下の論文を基盤に加筆・修正して構成したものである。

1. **Keisuke Komura**, Satoshi Nakae, Kazufumi Hirakawa, Naoyuki Ebine, Kazuhiro Suzuki, Haruo Ozawa, Yosuke Yamada, Misaka Kimura, Kojiro Ishii. Total Energy Expenditure of 10- to 12-Year-Old Japanese Children: Measured using the Doubly Labeled Water Method. *Nutrition & Metabolism*, 14: 70, 2017. 査読有.
2. **香村恵介**, 石井好二郎. 児童における Lifecorder を用いた身体活動強度分析方法のまとめ. *健康支援*, 18(2): 1-8, 2016. 査読有.
3. **香村恵介**, 中江悟司, 平川和文, 海老根直之, 鈴木和弘, 小澤治夫, 山田陽介, 木村みさか, 石井好二郎. 小児における身体活動レベル別の身体活動量—二重標識水法および加速度計法を用いた検討—. *日本未病システム学会雑誌*, 22(2): 67-71, 2016. 査読有.
4. 青木拓巳, **香村恵介**, 石井好二郎. フィジカル・メンタルに及ぼす子どもの身体活動. *体育の科学*, 67(7): 444-448, 2017. 査読無.

第1章 序論

第1節 総エネルギー消費量とは

Fig. 1-1 は、総エネルギー消費量 (total energy expenditure: TEE) の構成要素および測定方法を示している。TEE は以下の3要素、安静時エネルギー消費量 (resting energy expenditure: REE)、食事誘発性熱産生 (diet-induced thermogenesis: DIT)、身体活動によるエネルギー消費量 (activity energy expenditure: AEE) から構成され、このうち AEE は運動によるエネルギー消費量 (Exercise energy expenditure: ExEE) および運動以外の身体活動によるエネルギー消費量 (non-exercise activity thermogenesis: NEAT) に分類される¹⁾。TEE に対して、REE (≡基礎代謝量; basal metabolic rate: BMR) は60%、DIT は10%、ExEE は0-10%、NEAT は20-30%を占める²⁾。ここで、身体活動は Caspersen et al.³⁾によって、「骨格筋の活動により (安静時よりも) エネルギー消費が高まるすべての活動」と定義され、日本においてもこの定義が使用されている。身体活動の強度によって、軽強度身体活動 (light-intensity physical activity: LPA) は3 METs (metabolic equivalents) 未満、中強度身体活動 (moderate-intensity physical activity: MPA) は3-6 METs、高強度身体活動 (vigorous-intensity physical activity: VPA) は6 METs 以上と定義され、この定義は身体活動に関わる専門家の間では常識的な知識としてコンセンサスが得られている⁴⁾。身体活動のうち、体力の維持・向上を目的として計画的・意図的に実施するものを「運動」、運動以外の日常生活における労働、家事、通勤・通学、趣味などの身体活動および職業活動上の身体活動を含むものを「生活活動」という⁵⁾。TEE の測定方法には、実験室下で行われるヒューマンカロリメーター法 (あるいはメタボリックチャンバー法) および自由生活下で行われる二重標識水 (doubly labeled water: DLW) 法があり、それぞれ実験室下および自由生活下のゴールドスタンダードとされている⁶⁾。しかし、ヒューマンカロリメーター法は国内でも限られた施設にしか設置されていないことに加え、生活の場所が約15 m²~20 m²の室内に限定されるため日常生活の実態を反映した TEE の評価は難しい²⁾。また、DLW 法は非常にコストがかかり、分析に専門性を有する⁷⁾ことから大規模な疫学調査等に使用することは難しい。このため、個人差の大きい AEE⁸⁾を加速度計法、間接熱量測定法、質問紙法などで推定し、DIT および REE を推定することで TEE を算出する方法も使用される¹⁾。さらに、身体組成、体格、年齢、身体活動レベル (physical activity level: PAL) などの変数を用いた推定式によって TEE を推定する方法も検討されている⁹⁻¹²⁾。

個人や集団の TEE を正確に評価することは、栄養評価や食事管理にとって重要である。特に、1日に必要な推定エネルギー必要量 (estimated energy requirements: EER) を決定する際に、TEE の正確な評価が求められる¹²⁾。EER は、世界保健機関 (World Health Organization: WHO) の定義に従い、「ある身長・体重と体組成の個人が、長期間に良好な健康状態を維持

する身体活動レベルの時、エネルギー消費量との均衡が取れるエネルギー摂取量」と定義される。短期間に体重が大きく変動しない場合、エネルギー摂取量とエネルギー必要量は同等だと仮定して、エネルギー摂取を食事記録から推定する方法があるが、この方法は EER を過小評価することが報告されている¹³⁾。そのため、エネルギー摂取量は TEE に等しいと考えて、TEE から EER を推定する方法が一般的である¹²⁾。成人とは異なり、小児の場合、TEE から EER を推定する際に、成長に必要なエネルギー蓄積量 (energy deposition) を加える必要がある (EER = TEE + エネルギー蓄積量)¹²⁾。現在の日本人の食事摂取基準では、DLW 法によって測定された TEE に基づいて、年齢ごとの EER が決定されている¹²⁾。

先述した TEE の構成要素のうち、BMR (≒REE) と DIT は個人の 1 日の行動で大きく変化するものではないため、TEE を左右するのは AEE の変化量によるところが大きい。BMR は性、年齢、身体組成 (筋、臓器重量など) の影響を受けるため、TEE を BMR で除した PAL を算出することによって、個人間の活動レベルを比較することが可能となる。成人にとって PAL を 1.7 以上とすることが不健康な体重増加を予防するために推奨されている¹⁴⁾。また、高齢者を平均 6.15 年追跡した研究では、DLW 法で測定したベースラインの AEE や PAL が高いことが、高齢者の死亡リスクの低下と関連すると報告されている¹⁵⁾。小児においては、肥満の予防・改善と合わせて、体力の向上も重要な課題の一つであり、その両面を期待するならば、ある程度強度の高い身体活動によって PAL 高める方策が望まれている¹⁶⁾。

整理すると、TEE は、EER を算出するために重要であり、様々な方法でその推定が試みられている。また、TEE を身体活動によって増加させること、つまり PAL を高いレベルに保つことが肥満の予防や体力向上にとって重要である。

第2節 二重標識水法による総エネルギー消費量の推定

DLW法の歴史や測定方法について、最近の報告では、Westerterp¹⁷⁾によってその概要がまとめられている。また、International Atomic Energy Agency (IAEA)¹⁸⁾は、測定方法に加えて、結果のクオリティチェックの方法など、よりDLW法の詳細を報告している。日本では、斎藤ほか¹⁹⁾が測定原理や応用方法について整理している。DLW法の歴史として、1995年に、Lifson et al.²⁰⁾が初めて小動物のエネルギー消費量を測定することに成功し、その後、1982年に、Schoeller & Vansanten²¹⁾がヒトでの応用に成功した。国内では、Ebine et al.がシンクロナイズド・スイミングの選手を対象とした研究で、初めてDLW法を導入した^{8,22)}。日本におけるDLW法の導入・発展の経緯については、海老根ほか⁸⁾に整理されている。測定原理について簡潔にまとめると、DLW法は、重水素 (heavy hydrogen: ^2H) および重酸素 (heavy oxygen: ^{18}O) の2つの安定同位体を用いて、身体組成とエネルギー消費量の両方を測定する。被験者が ^{18}O と ^2H で標識された水を体内に取り込んだ後、それらは4-5 h程度で体水分中に平衡となる。その後、 ^{18}O は水分および二酸化炭素 (carbon dioxide: CO_2) として、 ^2H は水分としてのみ、体外に失われていく。この2つの同位体の排出率 (elimination rate) の違いから、 CO_2 排出率 (rate of carbon dioxide production: rCO_2) を算出し、修正 Weir²³⁾の式を適用することで、TEEを求めることになる。

DLW法は、エネルギー消費量の真値 (6時間のアルコール燃焼試験の結果との比較) に対して $-0.2 \pm 0.5\%$ の測定精度を有するヒューマンカロリメーター法と比較して、2-8%の測定精度を有する²⁴⁾。数回の尿、唾液または血液の測定のみで、その他の制限を強いることなく自由生活下のTEEを精度高く評価することが可能である^{17,25)}。

しかしながら、分析に使用する ^{18}O の価格が高く、同位体比質量分析計 (isotope ratio mass spectrometry: IRMS) を用いた分析が簡単ではない⁶⁾ことが、大規模なデータ収集を困難にしている。Hoos et al.²⁶⁾のレビューによると、海外では30編以上に及ぶDLW法を用いた小児のTEEデータが蓄積されている一方、日本人の食事摂取基準2015年版¹²⁾に採用されている日本人小児を対象とした研究は、現在までに2編^{27,28)}しかない。このうち、小学生を対象とした研究は足立ほか²⁷⁾の1編のみ ($n=12$) である。従って、日本人小児のEERは、生活習慣や文化の異なる海外のデータに基づいて推定されている現状にある。DLW法を用いてTEEを実測した結果、国の推奨値よりも10%程度低かったというアジアの報告²⁹⁾も見られることから、日本人小児を対象としたDLW法によるTEEの基礎データの蓄積が望まれる。

第3節 推定式による小児の総エネルギー消費量の推定

栄養・健康指導の現場において、DLW法を用いたTEEの推定は、その手間やコストを考えると非現実的である。そのため、推定式によってTEE（≒EER）を計算する方法が用いられている。

現在使用されている代表的な推定式は、日本人の食事摂取基準¹²⁾に記載されている基礎代謝基準値を用いる式である。この式は、性別および年齢区分別の基礎代謝基準値に体重を乗じて基礎代謝量を算出し、その値にPALのレベル（3水準）ごとに定められた身体活動係数（physical activity coefficients: PA）を乗じてTEEを推定する。これまでに、肥満の日本人成人を対象として基礎代謝基準値を使用した場合、基礎代謝量を過大評価すると報告されている³⁰⁾。このため、その値にPALを乗じて算出するTEEも過大評価すると考えられる。しかし、小児を対象として、基礎代謝基準値を用いた推定式の精度を検討した報告は見られない。小児のTEE（≒EER）の推定は、給食の献立を立てる際だけでなく、肥満児や糖尿病患者の食事管理をする際にも使用されることから、現在の食事摂取基準で利用されているTEE推定式が体格に関わらずに推定可能かどうかを検討することは重要である。

他にも、TEEを推定する代表的な式として、米国医学研究所（IOM: Institute of Medicine）が公表しているアメリカ・カナダの食事摂取基準で用いられている式が挙げられる³¹⁾。この式は、PALの係数を正確に当てはめることができたことと仮定して、成人³²⁾では平均誤差が男性7.5%、女性5.9%、小児³³⁾では-5.8%の精度で推定すると報告されている。3-18歳用に開発された推定式は、身長に対する体重の分布がアメリカ人集団の5パーセンタイルから85パーセンタイル以下の者のデータに基づいている³⁴⁾ため、日本人小児にも利用できる可能性がある。しかし、その利用可能性については検討されていない¹²⁾。また、日本人の食事摂取基準の式、アメリカ・カナダの食事摂取基準の式のいずれにおいても、PALの係数を正しく選択することは難しい。

TEEの推定にPALを使用しない方法として、Food and Agriculture Organization of the United Nations（FAO）の式が開発されている¹¹⁾。この式は、アメリカ、イギリスを中心に12か国（アジアは含まれていない）の1歳から18歳、801名のTEEデータに基づいて作成されており、TEEはDLW法および心拍測定法から得られている。予測モデルの分析結果から、体重の変数を用いてTEEを予測する式が算出され、その推定誤差は男子で±1%以内、女子で±3%以内と報告されている。しかし、この推定式を利用して、日本人小児のTEEをどれほど精確に推定できるかは不明である。

除脂肪量（fat-free mass: FFM）とTEEの関連を検討した先行研究もいくつか報告されている。コーカサス人（Caucasian）およびアフリカ系アメリカ人（African-American）の4-10

歳の小児を対象とした研究では、人種に関わらず、FFMはTEEを約60%予測することが報告されている³⁵⁾。また、平均年齢10歳のアフリカ系アメリカ人と白人を対象とした研究³⁶⁾でも、同様にFFMはTEEを約60%推定することが報告されている。FFMはREEの最も大きな予測因子であることが日本人小児を対象とした研究³⁷⁾で報告されており、REE以外のTEEの大きな構成要素はAEEである^{1,2)}。このことから、FFMと身体活動量で、TEEの個人変動をある程度推定できる可能性がある。Ekelund et al.¹⁰⁾は、9歳児を対象としてDLW法と加速度計法を併用した測定から、FFMと加速度計（Computer Science and Applications; Computer Science and Application's Inc., Shalimar, FL）のカウント値を用いた予測式を開発した。日本では身体活動全体を表す指標として、国民健康・栄養調査に代表されるように歩数が頻用されることから、FFMと歩数を用いた推定式が開発できれば、PALの係数を用いることなく、TEEを推定することが可能になると考えられる。

第4節 加速度計による小児の総エネルギー消費量の推定

加速度計法は、日常生活の TEE を簡易に推定する方法の 1 つである³⁷⁾。加速度計法は、DLW 法よりも導入コストが低く、呼気ガス分析法よりも対象者の負担が小さいことに加え、歩数計法や質問紙法よりも妥当性および信頼性が高いため、ヒトを対象としたフィールド研究に導入しやすい³⁸⁾。海外の主な加速度計には ActiGraph (ActiGraph 社)、Actical (Philips Respironics 社)、GENE Activ (Activinsights 社)、activPAL (PAL Technologies 社) などがあり、国内の主な加速度計には Lifecorder (スズケン社)、Active style Pro (オムロンヘルスケア社)、Actimarker (パナソニック 電工社)、Activ Tracer (GMS 社)、ViM (マイクロストーン社) などがある³⁸⁾。各加速度計の妥当性については、笹井ほか³⁸⁾によって整理されている。近年、小児を対象とした加速度計による TEE の推定精度がレビューされ、加速度計法は DLW 法から求めた TEE の変動の 31%を説明し、0.56 の相関係数を示すことが報告されている³⁹⁾。一方、国内で主に使用されている加速度計を加えて、Murakami et al.⁴⁰⁾の研究グループは、21~50 歳の健康な日本人成人 19 名を対象に、12 機種 of 加速度計の妥当性をメタボリックチャンパーと DLW 法による自由生活下で調査した結果、自由生活下の TEE を概して過小評価することを報告している。それら 12 機種の中で最も高い推定精度を示したのは、Active style Pro であり、その推定誤差は平均で約-70 kcal/d であった。

Active style Pro は 32 Hz で加速度を検出しており、10 秒ごとの平均合成加速度から METs を推定する。生活活動 5 種類および歩行・走行活動 7 種類をアルゴリズムの開発に用い、各軸で検出された加速度をハイパスフィルターにかけて低周波数域 (0.7 Hz 未満) をカットし、フィルター前後での加速度の比が、生活活動と歩行・走行活動で異なる点 (歩行・走行活動 : 1.16 未満, 日常生活活動 : 1.16 以上) を応用している^{38,41)}。これにより、日常生活活動と歩行・走行活動を 98.7%の精度で判別可能であることが報告されている⁴²⁾。加速度計は、加速度と身体活動強度との間に相関がみられることを利用して活動強度を推定するが⁴³⁾、上記の判別方法を用いて行動を判別し、それぞれの活動様式に対応した推定式を用いることで、日常生活下の身体活動強度を精度高く推定することができる⁴¹⁾。

Active style Pro を用いた小児の行動判別方法の妥当性も報告され⁴⁴⁾、開発された推定式を用いた小児の身体活動量研究も公表されている⁴⁵⁾。このため、成人を対象とした報告⁴⁰⁾と同様に、Active style Pro は小児を対象とした場合も、日常生活の TEE を精度高く推定する可能性がある。しかし、上述した小児の加速度計による TEE 推定の妥当性に関するレビュー³⁹⁾に、Active style Pro は含まれておらず、関連する研究も見られない。このため、Active style Pro が、自由生活下の小児の TEE をどれほどの精度で評価できるかは不明である。

第5節 小児の身体活動レベル

近年、平均年齢 5-17 歳の小児を対象としたシステマティックレビュー⁴⁶⁾によって、小児の身体活動は学業成績や心理面も含んだ様々な健康指標にポジティブに関連することが報告されている。また、小児期の PAL が低いことは、母親の精神疾患を含む様々な要因と独立して、成人期の非感情性精神病の発症を予測することも指摘されている⁴⁷⁾。これらのことから、小児の TEE を身体活動によって増加させ、PAL を高いレベルに保つことがフィジカル面・メンタル面の健康にとって重要である。

特に、肥満に着目すると、小児期の肥満の主要因は環境要因であり、食事摂取と身体活動の両面による慢性的なエネルギーバランスの不均衡によって引き起こされる⁴⁸⁾。日本人の小児肥満者の追跡研究によると、小児期に肥満であることは成人期の肥満に高い割合で関連し、様々な健康関連指標にネガティブな関連を示すことが報告されている。現在、小児(10歳児)の 10~12 人に 1 人が肥満傾向児であり⁴⁹⁾、体力・運動能力は、約 30 年前と比較して依然低い水準である⁵⁰⁾ことが、全国調査によって明らかにされている。また、日本人小児を対象とした全国規模の身体活動量調査は実施されていないものの、1999 年と 2009 年に行われた 11-12 歳の日本人小児 233 名を対象とした身体活動調査から、男子で約 8000 歩、女子で約 5000 歩の歩数の減少が認められ、外遊び時間や通学時間が減少していることも指摘されている⁵¹⁾。このような様々な調査・研究から、現代の小児の身体活動は低い水準にあることが推測される。小児(7-14 歳)のエネルギー摂取量の平均値は、統計データのある 1995 年の 2053 kcal/d から、2015 年の 1963 kcal/d まで、90 kcal/d (約 4.4%) 低下している⁵²⁾にも関わらず、依然、肥満の問題は解消されていない。小児肥満の予防に加えて、身体活動による健康の保持・増進のためには、食べ過ぎよりも動かなさ過ぎに着目すること、つまり、エネルギー消費量が低い状態を避けることで、エネルギー収支バランスを保つことが重要であろう。

エネルギー消費量が低い状態を避けるには、エネルギー消費量の増大に関連する身体活動を明らかにすることが重要である。小児の PAL に関して、Hoos et al.⁵³⁾は、8.6 歳の小児 20 人を対象に PAL と身体活動強度別の活動時間との関係を検討し、LPA と負の関連 ($r = -0.54$)、VPA と正の関連 ($r = 0.68$) を示したことを報告している。そして、高いレベルの PAL を獲得するために、VPA に従事すべきと結論している。Montgomery et al.⁵⁴⁾は、イギリスの幼児および小学 1 年生 104 名 (5.4 歳) の小児を対象として DLW 法で測定した PAL と各種身体活動との関連を分析した。その結果、座位行動時間は PAL と有意な負の関連 ($r = -0.33$) を示し、LPA は正の関連 ($r = 0.31$) を示したが、中高強度身体活動 (moderate- to vigorous-intensity physical activity: MVPA) ($r = 0.22$) は有意な関連を示さなかったと報告している。

性、年齢、BMI で調整した重回帰分析の結果でも、座位行動時間および LPA に PAL との有意な関連が認められたが、MVPA には認められなかった。対象とした小児の MVPA の従事時間の中央値が男子 4%、女子 3%であり、あまり活動的でない集団であったことは無視できないものの、Montgomery et al.は、この年代の小児の PAL を向上させるには、座位行動から LPA に移行させることが戦略となると述べている⁵⁴⁾。日本の小児を対象とした研究では、大島ほか¹⁶⁾が小学 6 年生 21 名を対象として、DLW 法で測定した PAL と加速度計で測定した各種身体活動(生活活動, 歩行・走行)との関連を分析し、生活活動と負の関連($r = -0.439$)、走行活動と正の関連 ($r = 0.615$) があったことを報告した。また、中江ほか⁵⁵⁾は、小児の PAL と不活動な時間 ($r = -0.506$)、歩行程度までの活動強度の時間 ($r = 0.450$)、および速歩から走行以上の活動強度の時間 ($r = 0.545$) の関連を示し、特に高強度の身体活動時間を増やすことが重要であると報告している。

このように、小児の PAL に関連する身体活動の強度に関する検討は行われてきたものの、統一した結論は得られていない。加えて、それらの身体活動をどのように蓄積すべきかといった知見は十分ではない。つまり、ある程度のまとまりをもった活動で身体活動を蓄積することが PAL に関連するのか、どの時間帯の活動が PAL に関連するのか関しては不明である。また、成人では日本人の食事摂取基準で示されている PAL の区分ごとの身体活動量⁵⁶⁾が報告されているが、小児においては、同様の検討は行われていない。これらの未解決問題を解決することは、PAL の低い小児の身体活動の特徴を理解し、PAL を高めるための効果的な介入につながると考えられる。

第6節 本研究の目的

本博士論文では、以下の3つの目的を設定した。

1. 二重標識水法を用いた小児の総エネルギー消費量の基礎データを明らかにし、国内外の推定式による推定精度を検証するとともに、新たな推定式の開発を行うこと。
2. 行動判別が可能な3軸加速度計 Active style Pro HJA-350IT を用いた小児の総エネルギー消費量の推定精度を明らかにすること。
3. 二重標識水法によって測定した小児の身体活動レベルごとの身体活動の特徴を明らかにすること。

第 2 章 二重標識水法によって測定した 10-12 歳児の総エネルギー消費量およびその推定式の精度（研究課題 1）

第 1 節 背景と目的

日本の食事摂取基準¹²⁾において、小児の EER の決定に関わるデータは 2 編^{27, 28)}しか含まれていない。このうち、小学生の児童を対象とした研究は足立ほか²⁷⁾のみであり、対象者は 12 名と限られている。このため、日本人小児の EER は、生活習慣や文化の異なる海外のデータに基づいて決定されている現状にある。日本人小児のデータに基づいた EER を確立していくために、TEE 測定のゴールドスタンダードとされる DLW 法を用いた小児のデータを蓄積していく必要がある。

一方、栄養管理や食事指導の現場では、対象者の食事量を決定するために TEE (≒EER) の推定式を利用する。現在の日本人の食事摂取基準では、基礎代謝基準値に体重を乗じ、その値に PAL のレベル (3 水準) ごとに定められた PA (身体活動係数) を乗じて TEE を推定する¹²⁾。しかし、この推定式を用いて小児の TEE を算出した場合の精度は検討されていない。加えて、他の TEE 推定式^{14, 31)}の日本人小児への利用可能性に関しても不明である¹²⁾。

小児の TEE の推定に PAL を使用しない式として、Ekelund et al.¹⁰⁾は FFM と身体活動から推定する式を作った。TEE の最も大きな要素は BMR¹⁾であり、それは身体組成、特に FFM によって決定される^{9, 32)}ため、FFM で調整後の TEE の個人間変動は、身体活動によるエネルギー消費量である。このため、身体組成に加えて、歩数という身体活動全体を表す簡易な指標を用いて、TEE は PAL を使用することなく、ある程度推定することができるかもしれない。

そこで、本章では、1) 日本人小児の DLW 法によって測定した TEE の基礎データを明らかにすること、2) 国内外で使用されている小児の TEE 推定式の精度を検討すること、そして、3) 身体組成と歩数から小児の TEE を推定する新しい式を開発することを目的とした。

第 2 節 方法

1. 対象者

日本人小児の身体活動量は、田舎と都市部で有意な差があり⁵⁾、DLW 法は分析にコストと専門性を要することから大規模な測定を行うことは難しい⁷⁾。そこで、我々は、日本の千葉県農漁村部および兵庫県都市部の小学校に通う健康な 5 年生および 6 年生 (10-12 歳) の男女 62 名を測定の対象者とした。5 年生 (n=38) の測定は、2006 年 11 月 (田舎, n=36) および 2007 年 11-12 月 (都市部, n=2) に行われ、6 年生 (n=24) の測定は、全て 2009 年 2 月 (都市部, n=24) に行われた。全ての測定は、通常授業のある典型的な 1 週間に実施

された。対象者の採択基準は、病気の診断を受けておらず健康な者、および親子の同意を得た者とした。本研究は北海道大学大学院教育学研究科の研究倫理委員会の承認（H18-04）を得た上で実施された。

我々は、測定時に DLW をこぼした者（ $n = 1$ ）、DLW の投与 24 時間後の安定同位体濃度が 4 時間後の値より高かった者（ $n = 3$ ）、採尿日に欠席した者（ $n = 2$ ）、そして歩数計の装着基準（DLW 測定を実施した 7 日間のうち、1 日 10 時間以上、平日 2 日以上、週末 1 日以上の装着）を満たさなかった者（ $n = 2$ ）を分析から除外した。最終的に、56 名（男子 33 名、女子 23 名）のデータが DLW および身体組成の分析に使用され、52 名（男子 31 名、女子 21 名）のデータが歩数を用いた分析に使用された。

2. 二重標識水法による総エネルギー消費量および身体組成の測定

TEE は、先行研究^{58,59}と同様の方法で、7 日間にわたって測定された。身長および体重の測定は、DLW 投与日に下着を着用した状態で行われた。対象者に投与された DLW は、 $^2\text{H}_2\text{O}$ (99.8 atom%; Taiyo Nippon Sanso, Tokyo, Japan) が ~ 0.18 g/kg BW、 H_2^{18}O (10.0 atom%; Taiyo Nippon Sanso) が ~ 3.6 g/kg BW であった。DLW の飲み残しを防ぐため、対象者が DLW を飲み終わった後の容器を市販のミネラルウォーター 50 ml で洗浄して服用させ、これを 2 回行った。分析に用いる尿サンプルは、DLW 投与前、投与 4 時間後、1 日後、4 日後、7 日後に採取された。最終的な分析に使用された 56 名は、研究者または教師の管理下で、全 5 回の尿サンプルを提供した。

採取された尿サンプル中の ^2H は白金を触媒として H_2 ガスで、 ^{18}O は CO_2 ガスで平衡法によって前処理を行った後、IRMS (Hydra 20-20, SerCon Ltd., Crewe, UK) を用いて分析された。分析は Iso-Analytical (Crewe, UK) に委託した。安定同位体濃度分析の精度をチェックするために、各対象者に対する ^2H および ^{18}O 反復分析 (2 回/3 回) の標準偏差 (SD) の平均値を算出した結果、それぞれ 0.25 ppm および 0.40 ppm であり、十分な精度を有していた。 ^2H および ^{18}O の希釈容積 (Nd および No) はプラトー法によって算出された^{18,19}。Nd/No の平均値 \pm SD は、 1.031 ± 0.008 (範囲, 1.004-1.059) であり、先行研究で許容されている範囲であった^{60,61}。総体水分量 (total body water: TBW) (g) は、Nd/1.041 および No/1.007 の平均値から算出した¹⁸。TBW (mol) は、TBW (g)/18.02 によって計算した (18.02 は 1 mol あたりの水の重さ)。そして、二酸化炭素排出率 (carbon dioxide production rate: rCO_2) (mol/d) は、同位体分別 (isotope fractionation) が呼気ガスのみで生じたと仮定した Schoeller et al.⁶² の A6 の式に、Racette et al.⁶⁰ の修正項を適用した以下の式によって算出した。 rCO_2 (mol/d) = $0.4554 \times \text{TBW (mol)} \times (1.007 \times ^{18}\text{O elimination rate [ko]} - 1.041 \times ^2\text{H elimination rate [kd]})$ 。対象

者の k_o および k_d の決定係数 (R^2) の平均値は、それぞれ 0.997 および 0.995 であった。 rCO_2 (L/d) は $22.4 \times rCO_2$ (mol/d) によって計算された。 TEE (kcal/d) は、呼吸商 (respiratory quotient: RQ) を 0.85 と仮定して⁶³⁾、以下の修正 Weir の式²³⁾を用いて算出した。 TEE (kcal/d) = $1.1 rCO_2 + 3.9 rCO_2/RQ$ 。 DLW 法のクオリティチェックのチェックリストについては、IAEA HUMAN HEALTH SERIES No.3 に詳細に記述されている。

FFM (kg) は、IAEA HUMAN HEALTH SERIES No.12⁶⁴⁾に示されている 11-12 歳の FFM の水和 (hydration of FFM, %) 係数 (男子 75.4%, 女子 76.6%) を適用して、TBW (kg) から算出した。 脂肪量 (fat mass: FM) および体脂肪率 (percent fat: % fat) は、FFM と体重から計算された。

PAL は、DLW 法によって測定された TEE (TEE_{DLW}) を、推定 REE³⁷⁾で除して算出された。 日本人小児から得られた REE の推定式³⁷⁾は以下の通りである。 男子： $14.4 \times BW$ (kg) + $5.09 \times height$ (cm) - $34.0 \times age$ (y) + 403, 女子： $7.64 \times BW$ (kg) + $4.22 \times height$ (cm) - $22.5 \times age$ (y) + 526。 5 年生の年齢には 10 歳、6 年生の年齢には 11 歳を当てはめた。

3. 歩数の測定

対象者の歩数を測定するために、2006 年の測定には Walking style HJ-720IT (Omron, Kyoto, Japan), 2007 年の測定には Active style Pro HJA-350IT プロトタイプ (Omron), 2009 年の測定には Active style Pro HJA-350IT (Omron) を、腰部に装着させた。 各測定年で装着した機種は異なるものの、全て同一の会社の製品であり、共通した歩数プロトコル (4 秒のマスク時間⁶⁵⁾) を有している。 Walking style⁶⁶⁾および Active style Pro⁶⁷⁾は、それぞれ歩数計測の妥当性が報告されている。 歩数計は、DLW 測定期間の 7 日間、水中活動 (風呂, シャワー, 水泳) および睡眠時を除いて、起床時から就床時まで装着するよう指示した。 1 日 10 時間以上、平日 2 日以上、週末 1 日以上 of 装着時間がある者を分析に使用した。

4. 総エネルギー消費量の推定式

小児の TEE 推定式として、Table 2-1 に示した 3 つの式を使用した。

5. 統計処理

性差の分析には、測定時期 (2006 年, 2007 年, 2009 年) を調整した共分散分析 (Analysis of covariance: ANCOVA) を適用した。 理由として、5 年生 ($n=38$) の測定は、2006 年 11 月 (田舎, $n=36$) および 2007 年 11-12 月 (都市部, $n=2$) に行われ、6 年生 ($n=24$) の測定は、全て 2009 年 2 月 (都市部, $n=24$) に行われたことから、測定時期をダミー変数にし

て共変量として投入することで、測定地域（田舎 vs. 都市部）、季節（10月から11月 vs. 2月）、および学年（5年生 vs. 6年生）を同時に調整できると考えたからである。また、TEEと関連する要因を検討するために、測定時期を調整した偏相関分析 (partial correlation analysis) を適用した。さらに、 TEE_{DLW} と各推定 TEE との差異および関連を分析するために、測定時期を調整した反復測定の ANCOVA (Bonferroni の調整) および偏相関分析を使用した。また各推定 TEE の精度は、Bland-Altman plots および平均二乗誤差 (root mean squared error: RMSE) によって評価された。 $RMSE = \sqrt{\Sigma(predicted\ TEE - measured\ TEE)^2/n}$ 。加えて、BMI と推定誤差 (推定 TEE - 実測 TEE) の関連は、測定時期を調整した偏相関分析によって検討された。TEE を FFM と歩数で予測する式を開発するために、重回帰分析を適用し、FFM と歩数を強制投入した。統計的有意水準は $p < 0.05$ に設定した。なお、統計処理には SPSS Statistics 23 software (IBM Inc., Japan, Tokyo) を使用した。

第3節 結果

Table 2-2 は、対象者の体格、身体組成、TEE、REE、PAL および歩数の基礎データを示している。対象者の平均身長および平均体重は、日本の食事摂取基準に示された 10-11 歳児の参照身長および参照体重⁶⁸⁾の 100%から 106%の範囲にあった。生体電気インピーダンス法を用いて同年齢の日本人小児の FFM を測定している先行研究³⁷⁾と比較して、対象者の FFM はわずかに高かった (男子 112%, 女子 106%)。1 日当たりの歩数は、本章の対象者と同様の機種を用いて測定した日本人小児のデータ⁶⁹⁾と同様であった (平均年齢: 8.9 ± 1.8 , 男子: 12152 ± 2804 steps/d, 女子: 10408 ± 1808 steps/d)。BMI カットオフ⁷⁰⁾により、男子 6 名および女子 1 名が過体重、男子 1 名が肥満と判定された。 TEE_{DLW} 、推定 REE および歩数は男子の方が女子よりも有意に高い値を示した一方、PAL には有意な性差が認められなかった。男女をまとめた全対象者 ($n = 56$) の PAL の平均値および標準偏差は、 1.58 ± 0.17 であった。過体重および肥満の小児を除外した TEE_{DLW} は、男子 2067 ± 230 kcal/d, 女子 1830 ± 262 kcal/d であった。

Table 2-3 は、TEE と体格、身体組成および歩数との偏相関係数である。測定時期を調整後、FFM は男女とも最も高い相関係数を示した。FFM を共変量に加えた後は、歩数のみが TEE と有意な関連を示した。この結果は、FM を共変量に加えても変わらなかった。

Table 2-4 は、 TEE_{DLW} と各推定 TEE との差異および関連を示している。 TEE_{J-DRI} および TEE_{FAO} は TEE_{DLW} と有意な差が認められた。 TEE_{IOM} は、男女とも最も推定誤差および RMSE が小さく、90%以上の対象者を $\pm 10\%$ 以内の誤差で推定した。偏相関分析の結果、 TEE_{DLW} と全ての推定 TEE の間に有意な関連が認められた。

Fig. 2-1 は、3つの TEE 推定式の Bland-Altman plots および BMI と推定誤差（推定 TEE – 実測 TEE）との関連を示している。IOM の推定式が TEE_{DLW} との差が最も小さく（42 kcal/d）、誤差の許容範囲（limits of agreement: LOA）は、-147 から 230 kcal/d であった。TEE_{J-DRI} には、推定誤差と BMI の間に強い正の関連が認められた一方、TEE_{IOM} および TEE_{FAO} には、男子において弱い正の関連、女子において有意な関連が認められなかった。TEE_{IOM} は、過体重または肥満の小児であっても、±10%の推定誤差で推定した。

Table 2-5 は、FFM と歩数で TEE を推定する式を検討するための重回帰分析の結果である。以下の TEE (kcal/d) の推定式が得られた。男子： $47.1 \times \text{FFM (kg)} + 0.0568 \times \text{step count (steps/d)} - 122$ 、女子： $55.5 \times \text{FFM (kg)} + 0.0315 \times \text{step count (steps/d)} - 117$ 。これらの式は、それぞれ TEE の変動の 68%、65%を予測した。推定値の標準誤差（standard errors）は、男子 277 kcal/d、女子 333 kcal/d であった。

第4節 考察

10-12 歳の DLW 法で測定した自由生活下の TEE は、現在の食事摂取基準の基準値¹²⁾よりも低かった。また、IOM の推定式³⁾は日本人小児に対しても適用可能であることに加え、TEE は FFM と歩数で、ある程度推定可能であることが示唆された。

日本の食事摂取基準で示されている TEE（EER - エネルギー蓄積量）は、10-11 歳児（5-6 年生）の男子 2210 kcal/d、女子 2070 kcal/d である¹²⁾。本章の対象者のうち、過体重および肥満の小児を除いた平均 TEE_{DLW} は、男子 2067 ± 230 kcal/d、女子 1830 ± 262 kcal/d であり、現在の食事摂取基準の方が男子で約 7%、女子で約 12%高い値を示した。さらに、TEE_{J-DRI} は TEE_{DLW} を過大評価した（Table 2-4）。同年齢の日本人小児を対象とした研究として、現在の食事摂取基準に唯一引用されている足立ほか²⁷⁾の報告では、平均年齢 11.2 ± 1.0 歳（男子 5 名、女子 7 名）の小児の TEE_{DLW} は、 1968 ± 299 kcal/d であった。この報告も同様に、現在の食事摂取基準に示されている基準値よりも低い。これらの結果から、現在の食事摂取基準は、10-12 歳の日本人小児の EER を過大評価している可能性が示唆された。

FFM は、TEE の分散の約 60%を予測することが、小児を対象とした先行研究^{35,36)}で報告されている。本章の対象者でも同様に、FFM は TEE と有意な関連を示し、TEE の分散の約 40-50%を説明した。TEE の説明力に先行研究と差が見られた理由は、本章で対象としている年齢層が先行研究とは異なることに加え、FFM の測定方法が先行研究では、Dual Energy X-Ray Absorptiometry (DXA) 法を使用していることが考えられる。体格の大きさは REE に影響を与えるだけでなく、身体活動の体重負荷コストを通して AEE にも影響することから、FFM と TEE にも関連あることが報告されている¹⁷⁾。これらの関係性は、小児の FFM は、

TEE, REE および AEE に関連することを報告した Sun et al.³⁵⁾によっても支持されている。本章の結果と先行研究の結果から、FFM は小児の TEE の主要な決定因子であることが示唆された。

我々は、先行研究と同様に、歩数を身体活動の指標とした^{71,72)}。歩数は、FFM および FFM + FM を調整後に、TEE と有意な関連を示した。この結果は、歩数は体格以外の TEE の個人差を説明することを示している。実際、FFM と歩数による TEE の推定式は、TEE の分散の 65%以上を説明した (Table 2-5)。先行研究では、非歩行活動 (non-locomotive activity) が PAL に影響すること⁷¹⁾、さらに、女子の歩数は PAL に有意に関連しないこと⁷²⁾が報告されている。このことから、本章で得られた FFM と歩数による TEE 推定式は、非歩行活動 (例えば、活動的な立位または組織的なスポーツ活動) を表す測定因子を加えることで、その推定力は向上する可能性がある。または、約 90%の非歩行活動は LPA であり、それは座位行動時間と強い関連を示すことが報告されている⁴⁵⁾ことから、座位行動時間に関する測定因子を推定に加えることも有効かもしれない。

アメリカ・カナダの食事摂取基準で使用されている IOM の推定式³⁴⁾は、PA が精確に決定された場合に、TEE を良好な精度で、かつ対象者の BMI の影響を小さく推定した。しかし、日本の食事摂取基準で使用されている基礎代謝基準値を用いた推定式¹²⁾は、PAL が DLW 法によって精確に得られた場合でも、約 30%の小児の TEE を過大評価した。これは、基礎代謝基準値は、体重を乗じることで参照体重児の BMR に一致するようになっており、推定式に切片をもたないことが原因であると考えられる。日本人成人を対象とした研究⁷³⁾によって、参照体重から離れる者ほど、基礎代謝基準値を用いた BMR 推定誤差が大きくなることが示されている。本章の結果から、小児を対象とした場合にも、基礎代謝基準値を用いた TEE 推定は、過体重者ほど過大評価し、やせている者ほど過小評価することが示唆された。

FAO の推定式¹¹⁾も同様に、日本人小児の TEE を平均値で約 10%過大評価した。男子の約 40%、女子の約 60%の TEE を過大評価 (+10%) することから、現場で使用する際には注意をする必要がある。一方、この推定式は、推定に PAL を利用しない点に利点がある。

IOM の 9-18 歳児用の推定式³⁴⁾は、DLW 法を用いて、BMI が 5-85 パーセントイルのアメリカ人小児 525 名を対象に測定したデータに基づいている。Bandini et al.³³⁾は、本章と同様に DLW から得られた PAL を IOM 推定式に利用して、8-12 歳の女子 161 名を対象として TEE の推定精度を検討し、推定誤差は $-5.8 \pm 7.9\%$ 、accurate estimation ($\pm 10\%$) は 70%であったと報告している。この推定式の日本人小児に対する利用可能性は、これまでに検討されていない¹²⁾。本章の結果から、 TEE_{IOM} と TEE_{DLW} の推定誤差は、平均で 2.0%、accurate estimation は 90%以上であった (Table 2-4)。加えて、対象者の TEE を、BMI の影響は小さ

く推定した (Fig. 2-1). これらの結果から, IOM の推定式は 10-12 歳の日本人小児の TEE 推定に利用可能であることが示唆された.

本章にはいくつか限界がある. 第一に, 我々は対象者の生年月日を調査していなかったため, REE および IOM の推定式に, 小学 5 年生は 10 歳, 小学 6 年生は 11 歳を当てはめた. 日本では, 5 年生は 10-11 歳, 6 年生は 11-12 歳の小児を含む. 仮に, 5 年生全員が 11 歳, 6 年生全員が 12 歳であったとすると, 本章で示した REE は男子で -34 kcal/d (-2.6% compared with present data), 女子で -23 kcal/d (-1.9%) となる. また, TEE_{IOM} は男子で -62 kcal/d (-2.9%), 女子で -31 kcal/d (-1.6%), さらに PAL は男子で +0.04 (+2.7%), 女子で +0.03 (+1.9%) となる. 第二に, DLW 法による TEE 推定において, RQ は食事記録による食物商から代用されることがあるが, 本章では一律に 0.85 を代用した. しかし, その場合の推定誤差はわずかであることが報告されている⁶³⁾. 第三に, PAL を算出する際に実測した BMR ではなく, 推定 REE を用いた. 推定誤差は小さいと考えられる³⁷⁾が, いくらかの誤差は存在する. 現在の日本の食事摂取基準は BMR を間接熱量測定などで実測した研究のみを引用している一方, アメリカ・カナダの食事摂取基準は BMR を推定した研究も含めている³⁴⁾. 第四に, 本章の対象年齢は 10-12 歳に限定されている. そのため, 得られた結果が他の年齢の小児に適用できるかどうかは不明である. 今後, 様々な年齢範囲の小児のデータを蓄積していく必要がある.

第3章 3軸加速度計 Active style Pro を用いた小児の総エネルギー消費量の推定精度（研究課題2）

第1節 背景と目的

加速度計による TEE の推定は一般的になりつつあるが、その妥当性に関するエビデンスは少ない^{74,75)}。近年のシステマティックレビューでは、加速度情報に、生体（心拍）や姿勢の情報を加えることで、TEE の推定精度が向上する可能性が指摘されている³⁹⁾。Murakami et al.は、成人を対象に加速度計 12 機種 of TEE 推定精度を検証し、自由生活下では Active style Pro（以下、ASP）が最も誤差が小さかったことを報告している⁴⁰⁾。ASP は、対象者の行動を非歩行活動（生活活動）と歩行活動に判別するアルゴリズムを有し⁴²⁾、活動様式ごとの推定式が開発されている⁴¹⁾ことから、高い TEE の推定精度を示したと考えられる。

近年、小児に対しても、ASP は 99.1%の確率で非歩行活動と歩行活動を判別することが確認され、各行動様式の METs 推定式が報告されている^{44,45)}。このため、ASP は小児の自由生活下の TEE を精度高く推定する可能性があるが、その推定精度に関してはこれまで検討されていない。

本章では、ASP を使用した自由生活下における小児の TEE の推定精度を、DLW 法との比較によって検討することを目的とした。

第2節 方法

1. 対象者

兵庫県都市部の小学校に通う小学6年生 24 名（男子 13 名，女子 11 名）を対象とした。これらの対象者は、第2章の小学6年生と同様の小児である。測定は、2009年2月、通常授業の行われる典型的な1週間に行われた。対象者の採択基準および倫理審査については、第2章2節に記述した通りである。加速度計の採択基準を満たさなかった9名を除外し、最終的な分析には15名（男子7名，女子8名）のデータを使用した。

2. 二重標識水法によるエネルギー消費量の測定

Fig. 3-1 に、実験の概要を示した。DLW 投与日を 0 日目とし、尿サンプルは、DLW 投与前、投与 4 時間後、1 日後、4 日後、7 日後に採取された。DLW 法の詳細については、第2章と同様である。PAL は、DLW 法によって測定した TEE (TEE_{DLW}) (kcal/d) を、推定 REE³⁷⁾ で除して算出した。

3. 身体活動量の測定

DLW 測定期間と同期間の身体活動量を、ASP を腰部に使用して測定した。水中活動（風呂、シャワー、水泳）および睡眠時を除いて、起床時から就床時まで装着するよう指示した。Table 3-1 は、ASP の出力データの例である。ASP は 10 秒ごとの平均 metabolic equivalents (METs) を算出するとともに、その活動を「計測なし (no acceleration)」、「生活活動 (non-ambulatory activities)」、「歩行活動 (ambulatory activities)」に分類する。我々は、加速度計の非装着時間を座位行動時間として誤って判定することを避けるため、「計測なし」を全て非装着時間として扱い⁷⁶⁾、1 日 10 時間以上、平日 2 日以上、週末 1 日以上 of 装着時間がある者を分析に使用した^{45, 77)}。

4. 加速度計のデータ解析手順

1) 小児用 METs 値への補正

ASP が 10 秒ごとに出力する METs は、成人のデータに基づいて算出される⁴¹⁾。Hikihara et al.⁴⁴⁾ は、小児を対象に非歩行活動および歩行活動の METs をダグラスバッグによって測定し、ASP の出力 METs を小児用に補正する式を開発した。我々は、先行研究⁴⁵⁾と同様に、以下に示した補正式を適用して ASP の METs 値を小児用に補正した。Ambulatory activities: $0.6237 \times \text{METs value of Active style Pro} + 0.2411$, Non-ambulatory activities: $0.6145 \times \text{METs value of Active style Pro} + 0.5573$ 。

2) 身体活動強度の評価

補正後の METs 値に従って、座位行動時間 (METs ≤ 1.5)、LPA (1.5 < METs ≤ 3.0)、MVPA (3.0 \leq METs) に分類した^{45, 69)}。

3) 総エネルギー消費量の推定

Fig. 3-2 は、ASP による TEE の推定方法について示している。図中の方法 a は、ASP が現在使用している推定方法である。つまり、TEE の構成要素のうち、REE を第 5 次改訂日本人の栄養所要量で使用されていた体表面積 (body surface area: BSA) による推定式⁷⁸⁾によって推定 (REE_{BSA}) し、DIT を TEE の 10%、REE を TEE の 60% と仮定して²⁾、REE_{BSA} に 6 分の 1 を乗じて算出し、AEE を REE_{BSA} \times 1.1 (座位での REE に補正) した上で ASP の出力 METs 値を乗じて TEE を推定する方法 (TEE_{ASP-BSA}) である。我々は、上記の ASP 従来の TEE 推定方法に加えて、REE に現在の日本人の食事摂取基準で使用されている方法¹²⁾ (REE_{DRI}) を用いて TEE を推定する方法 (TEE_{ASP-DRI})、および日本人小児の実測 REE に基づいて開発された Kaneko et al. の推定式³⁷⁾ (REE_{Kaneko}) を利用して TEE を推定する方法

($TEE_{ASP-Kaneko}$)を加えて、 TEE_{DLW} と比較した。 REE_{BSA} は12歳の基準値、 REE_{DRI} は10-11歳の基準値、 REE_{Kaneko} の年齢には12歳を当てはめた。

5. 統計処理

ASPによるTEEの推定精度を評価するために、 TEE_{DLW} と各推定TEEとの差を対応のあるt検定によって分析した。また、Bland-Altman plots およびピアソンの相関係数を算出し、 TEE_{ASP} と TEE_{DLW} の関連を検討した。加えて、TEEの推定誤差(推定TEE - 実測TEE)とBMI、座位行動時間および身体活動量との関連を、ピアソンの相関係数によって検討した。統計的有意水準は $p < 0.05$ に設定した。なお、統計処理にはSPSS Statistics 23 software (IBM Inc., Japan, Tokyo)を使用した。

第3節 結果

Table 3-2は、対象者の体格および身体活動の特徴を示している。平成28年度学校保健統計調査⁴⁹⁾によると、小学6年生(11歳児)の身長は男子145.2cm、女子146.8cm、体重の平均値は男子38.4kg、女子39.0kgであり、それらの値と比較すると、本章の対象者は4-6%程度BMIの低い集団であった。また、過体重または肥満者はいなかった⁷⁰⁾。日本人の食事摂取基準によるPALの基準値¹²⁾と比較すると、本章の男子のPALはレベルII(ふつう： $1.55 \leq PAL < 1.75$)、女子はレベルI(低い： $PAL < 1.55$)の範囲であった。

Table 3-3は、 TEE_{DLW} と TEE_{ASP} の推定誤差を示している。ASPによって推定したTEEは、DLW法で測定したTEEよりも有意に高い値を示した。推定に REE_{BSA} を使用するASPの従来の方法は、小児のTEEを平均で12.4%過大評価した。一方、推定に REE_{Kaneko} を使用する方法では、従来の方法よりも推定精度は向上(8.8%の過大評価)し、60%の小児のTEEを誤差10%以内で推定した。

Fig. 3-3は、ASPによる各TEE推定方法のBland-Altman plot および TEE_{DLW} と TEE_{ASP} の相関関係を示している。Kaneko et alのREE推定式を用いてTEEを推定した場合に、 TEE_{DLW} との差が最も小さく(146 kcal/d)、LOAは、-229 から521 kcal/dであった。 TEE_{ASP} は、REEの推定方法に関わらず、 TEE_{DLW} と有意な強い相関関係を示した。

Table 3-4は、推定誤差($TEE_{ASP} - TEE_{DLW}$)とBMI、座位行動時間および身体活動量との関連を示している。推定誤差とBMIには有意な関連は認められなかった。一方、座位行動時間が長い小児ほど、ASPによるTEE推定誤差は大きいという有意な関連が認められた。

第4節 考察

ASP は、機器が出力する METs に、小児用の METs の補正式を適用することで、DLW 法で測定した自由生活下の TEE を平均 12.4% 過大評価し、約 30% の小児の TEE を誤差 \pm 10% 以内で推定した。また、REE の推定に Kaneko et al. の方法を用いることで TEE の推定精度は向上することが示唆された。

成人を対象とした同様の研究⁴⁰⁾では、 TEE_{ASP} の平均値と TEE_{DLW} の平均値との差は、約 70 kcal/d で、有意な差は認められなかったと報告されている。小児においては、近年報告された REE 推定式を利用することで、TEE の推定精度はある程度向上することが示されたが、それでも成人の結果とは異なり、平均で 8.8% 過大評価した。この理由として、以下の 2 点が考えられる。

1 点目は、低強度を過大評価する補正式の問題である。本章では Hikihara et al.⁴⁴⁾ が開発した ASP の METs 補正式を適用することで、ASP の出力 METs を小児用の METs に下方修正した。しかし、この補正式を適用すると、「非歩行活動」として出力されていた 1.0 METs から 1.4 METs までの活動は下方修正されず、むしろ上方に修正されてしまう (1.0 METs は 1.17 METs, 1.1 METs は 1.23 METs, 1.2 METs は 1.29 METs, 1.3 METs は 1.36 METs, 1.4 METs は 1.42 METs)。ASP は、成人を対象とした研究⁴⁴⁾ によって、合成加速度およびそのフィルター前後の比率から、座位活動、非歩行活動、歩行活動の 3 種類の METs 推定式を有している。しかし、小児用の METs 補正式は、非歩行活動および歩行活動の 2 種類しか開発されておらず、成人で適用されるような低強度の活動を補正する式がない。このため、強度の低い活動に対して補正式を適用することで TEE の過大評価につながったと考えられる。座位行動時間と TEE 推定誤差が有意な関連を示したことも (Table 3-4)、上述の推定式の問題点を示唆している。また、上記の補正式を適用すると、補正後に「歩行活動」で「METs \leq 1.5」となる問題も生じる (Table 3-2)。今後、小児用の補正式を再検討し、特に、低強度の活動の推定式を加えていくことが必要であろう。

2 点目として、AEE を算出する際の REE に対する 1.1 倍の補正 (Fig. 3-2) が過大評価の原因となっている可能性がある。ASP は、 REE_{BSA} の値に 1.1 を乗じることで、仰臥位での (12 時間以上の絶食状態の) REE (\equiv BMR) から座位での (食事制限はしていない) REE に補正している。しかし、小児の METs 表⁷⁹⁾によると、覚醒仰臥位 (lying awake) は 1.2 METs であるのに対して、座位での TV 視聴 (watching TV - sitting) も同様に 1.2 MET とされている。また、仰臥位で音楽/ラジオ聞く (listening to music/radio - lying) は 1.2 METs であり、それを座った状態で行った場合は 1.3 METs で約 1.08 倍に相当する。食事制限による REE に対する影響をどれくらい見積もるかにもよるが、小児の仰臥位と座位の姿勢変化によるエネルギー消費量の差は 10% に満たない可能性がある。BMR の測定は、食後 12 時間以上

経過した早朝空腹時の覚醒直後といった 1 日の中でも非常に限られた条件でしか得ることができないため、その多くは実験室までの歩行を許しており、REE といえることも指摘されている⁸⁰⁾。これらのことから、ASP によって AEE を算出する際の「METs × REE × 1.1」の式に 1.1 を乗じることが適切かどうかを慎重に検討する必要がある。

Sardinha and Judice³⁹⁾は、加速度計による小児の TEE 推定に関する研究をレビューし、これまで報告されている 4 つの加速度計の推定 TEE と実測 TEE の相関係数は平均で $r = 0.56$ であったことを報告している。本章の結果から、ASP の TEE_{DLW} との相関係数は、従来の方法 (REE_{BSA} を使用) では $r = 0.71$ 、Kaneko et al. の REE 推定式を利用した方法では $r = 0.79$ を示した (Fig. 3-3)。このことから、ASP はこれまでに精度が報告されている加速度計と比較しても、実測 TEE と強い関連を示すことが示唆された。

本章にはいくつか限界がある。第一に、サンプルサイズの小ささおよび対象とした年齢幅の狭さが挙げられる。DLW 法はその測定や分析にコストがかかるため^{7, 19)}、サンプル数を増やすことは難しく、他の同様の研究でも対象者は 20 から 30 名前後である^{40, 81, 82)}。本章では当初 24 名の対象者を確保していたが、加速度計の装着基準を満たすことができず、9 名を除外することとなった。特に週末のデータが不足している者が 7 名と多かったため、今後の検討ではコンプライアンスを高める工夫が必要である。第二に、加速度計の非装着時間の取り扱い方法が研究間で異なることが挙げられる。本章では、「20 分以上継続したゼロカウント」を非装着時間とした場合でも、結果に与える影響は非常に小さいこと⁷⁶⁾、そして、ASP のダイナミックレンジは 3 mG から 6 G と大きいことから、微小活動に対する反応性が他の機種より優れているため、ゼロカウントとみなされている時間の合計を非装着時間と定義しても問題ないと考えた。一方、ASP を使用した小児の研究の中には 60 分以上のゼロカウント (計測無し) が続いた場合を非装着と判定している報告もある^{45, 69)}。加えて、加速度計装着日数や 1 日当たりの最低装着時間の定義等も様々である⁸³⁾。小児の測定において統一された基準はみられないことから、他の研究結果と比較する際は、使用されている加速度計データの取り扱い方法に注意して結果を解釈する必要がある。

第4章 小児の身体活動レベルと各種身体活動従事時間の関連（研究課題3）

第1節 背景と目的

全国調査によると、小児（10歳児）の10～12人に1人が肥満傾向児（肥満度20%以上）であり^{49）}、体力・運動能力は、約30年前と比較して依然低い水準である^{50）}。肥満の予防・改善と合わせて、体力の向上も期待するならば、身体活動によってTEEを高める方策が望まれる^{16）}。TEEは体格の影響を大きく受けるため、TEEをBMRで除したPALが個人間の活動レベルを比較する際に用いられる。

Ishikawa-Takata et al.^{56）}は、食事摂取基準の分類に従って日本人成人のPALを3階級（レベルI-III）に分類し、各階級の身体活動の特徴を明らかにした。この研究は、EERを推定する際に、対象者のPALをより適切に選択するための情報を与えただけでなく、PALが低い状態にある者の身体活動状態を明確にした。一方、小児を対象としてPALのレベル別に身体活動の特徴を分析した報告は見られない。また、先行研究^{16, 53-55）}では小児のPALと身体活動強度の関連は報告されているものの、それらの身体活動をどのように蓄積することがPALに関連するかについては十分に検討されていない。小児のPALに応じた身体活動の特徴を明らかにすることは、EERの推定に役立つ情報を与えることに加え、PALの低い小児の現状を理解してPALを高いレベルに移行させていくための具体的な目標を検討する際に有用である。

本章では、DLW法によって測定した小児のPALごとに身体活動強度別の活動時間を比較検討することを目的とした。

第2節 方法

1. 対象者

千葉県農漁村部（田舎）および兵庫県都市部（都市部）の小学校に通う5年生57名（10-11歳）を対象者とした。測定にあたり対象者の小学校の校長および担当教諭に対してインフォームドコンセントを得た上で研究参加者の募集を行った。また、研究への参加を希望した対象者とその両親にも研究の目的および内容、危険性についての説明を十分に行うと共に、安全性を示すため校長自らが対象者の前でDLWを摂取した。その上で、対象者本人およびその両親の同意を得られた者を対象とした。測定は2006年11月（田舎、n=36）および2007年11-12月（都市部、n=21）に行われた。全ての測定は、北海道大学大学院教育学研究科（H18-04）および同志社大学（1034）の研究倫理委員会の承認を得た上で、通常授業のある典型的な1週間に実施された。

我々は、測定時にDLWをこぼした者（n=1）、DLWの投与24時間後の安定同位体濃度

が4時間後の値より高かった者 (n=3), 採尿日に欠席した者 (n=2), そして加速度計の装着基準を満たさなかった者 (n=9) を分析から除外した。最終的に, 42名 (男子26名, 女子16名) のデータが DLW および身体活動量の分析に使用された。

2. 身体活動レベルの測定および分類

TEE の測定には, フィールド測定ゴールドスタンダードとされている DLW 法を用いた (TEE_{DLW})。DLW 法の詳細については, 第2章に記述した通りである。対象者の PAL は, TEE_{DLW} を推定 REE³⁷⁾ で除して算出した。REE 推定式の年齢には11歳を当てはめた。

日本人の食事摂取基準2015年版¹²⁾の10~11歳の基準によると, PALのレベルI(低い), レベルII(標準), レベルIII(高い)に該当するPALは, それぞれ1.45, 1.65, 1.85である。小児の年齢別のPALを推定するHoos et al.²⁶⁾の回帰式; $PAL = 0.025 \times \text{age} + 1.40$, においても, 10歳児のPALの標準値は1.65となり上記の基準と一致する。この基準を参考に, 対象者を以下の3群に分類した。PAL I ($PAL < 1.55$, 低い), PAL II ($1.55 \leq PAL < 1.75$, 標準), PAL III ($1.75 \leq PAL$, 高い)。

3. 身体活動量の測定

1) Lifecorder の特徴

身体活動量の測定には, Lifecorder PLUS (スズケン社製, 以下 LC) を使用した。LC は 0.06 G から 1.94 G (1.00 G が自由落下と同等の加速度) の範囲の加速度信号を 32 Hz で検出する1軸加速度計である。加速度信号はアナログバンドパスフィルターによって処理され, 計数化される⁸⁴⁾。LC は以下に挙げる4つの垂直加速度の閾値を有する; threshold 1 (TH1): 0.06 G, TH2: メーカーの固有値, TH3: メーカーの固有値, TH4: 1.94 G。そして, 加速度センサが4秒以内に3回以上の加速度信号を検出した場合, その活動は身体活動と判断され, 1-9のLC独自の身体活動強度(LC強度)に分類される。このLC1-9は歩数の頻度と垂直加速度の大きさという2つの要因によって決定される。一方, LC1に満たないが, 加速度センサが0.06 G以上の体動を感知した場合, LC0とはカウントされず, LC0.5(微小運動)として出力される⁸⁵⁾。つまり, LCを装着した状態における活動は, 4秒ごとに11段階(LC0, 0.5, 1-9)のいずれかに分類される。LCは4秒毎に記録した各LC強度の時間の他に, 2分毎のLC強度の時系列データも出力できる。

2) 身体活動強度の分析

これまで, 成人^{84, 86)}および中学生⁸⁷⁾を対象として, LCを装着した状態でトレッドミル漸

増負荷テスト中の酸素摂取量が測定され、LC 強度と METs との関係が報告されている。身体活動強度に関して、中強度身体活動は 3-6 METs、高強度身体活動は 6 METs 以上、LPA は 3 METs 未満の座位行動を除く身体活動（1.5 METs を超える身体活動）と定義され、この定義は身体活動に関わる専門家の間では常識的な知識としてコンセンサスが得られている⁴⁾。LC を使用した研究の多くは、Kumahara et al.⁸⁴⁾を参考に、LC 1-3 を軽強度、LC 4-6 を中強度、LC 7-9 を高強度として身体活動強度別の分析を行っている。しかし、小児を対象とした場合にも成人と同様の各活動強度に対応する LC 強度の範囲を使用して身体活動強度別の時間を評価している研究も見られる⁸⁸⁾。体重当たりの REE および運動中のエネルギー消費量は、小児の方が成人よりも高いため⁸⁹⁾、成人の LC 強度と METs の定義を補正無しでそのまま小児に適用して良いかは慎重に判断する必要がある。実際、海外で頻用されている ActiGraph の較正研究では、小児^{90,91)}は成人⁹²⁾よりも高い中強度の閾値が必要であることが示されている。

そこで、LC を用いて児童の身体活動強度をいくつかに分類して評価している研究をレビューし、その分類方法を整理した⁹³⁾。そのレビューの中で、McClain et al.⁹⁴⁾の研究では、ActiGraph と LC を比較し、LC 5 以上を MVPA の基準とした時に ActiGraph で測定した MVPA の値と比較可能であったことが報告されている。また、笹山・足立⁹⁵⁾は、平均年齢 10.3 歳の男子を対象として、LC を装着した状態でトレッドミルによる歩・走行の多段階漸増運動負荷テストを行い、安静時およびテスト中の酸素摂取量を測定した結果、LC 5 以上の時に MVPA を評価できることを報告している。そのため、本研究では LC 5-9 を MVPA (≥ 3 METs) と判断した。そして、非装着と判定されない LC 0 および LC 0.5 を微小運動、微小運動と MVPA の間の強度の活動を LPA (LC 1-4) として分類した。

Cliff et al.⁹⁶⁾によると、20-30 分の連続的な座位行動を示す小児はほとんどいなかったため、あまり厳格ではない（60 分のような）基準をもとに非装着と定義してしまうと、本来は非装着な時間にも関わらず座位行動と判断してしまうなど、誤分類をする可能性もあると指摘されている。そのため、LC 装着の有無を検討するために、20 分以上の無信号（LC 0）が続いた場合を非装着とした^{96,97)}。装着時間は 24 時間から非装着時間を減じて算出した。装着時間が 8 時間未満のデータは除外し、少なくとも 4 日以上（平日 3 日以上、週末 1 日以上）のデータを有する者を分析対象とした⁹⁸⁾。

3) 身体活動パターンの分析

連続的に（まとめて）身体活動を蓄積するパターンは、主に bout と表現されるのに対し、散発的に（細切れに）蓄積するパターンは sporadic と呼ばれる。小児の MVPA bout に

ついて、先行研究⁹⁹⁻¹⁰¹⁾では5分や10分が閾値として用いられていることに加え、6-19歳の小児の40%が15分以上のMVPA boutを有していないことから¹⁰⁰⁾、本章ではMVPA boutの最大の基準を10分以上とした。MVPAの蓄積パターンは、Mark and Janssen⁹⁹⁾を参考に、sporadic (< 4 min), short bouts (≥ 4 and < 10 min), medium-to-long bouts (≥ 10 min)の基準で分類した。LCは、身体活動を4秒毎にLC 1-9のいずれかに分類し、2分間で頻度の最も高かったLC強度を出力する。そこで、MVPA (≥ LC 5)以上の出力が続いた場合にまとまった活動(bout)が行われたと判断し、その継続時間に応じて上記の基準に従って分類した。

4. 統計処理

PALの階級別に身体活動の特徴を明らかにするために、PALを3群に分類した結果、レベルⅢ(高い)に該当する小児が7名と少なかったため、レベルⅡとⅢを合わせて、PALⅡ・Ⅲ群(標準以上、PAL ≥ 1.55, n = 21)とした。対象者の基礎データにおける男女差の検定には、正規性(Shapiro-Wilk test)が確認された場合はt検定、確認されなかった場合はMann-WhitneyのU検定を適用した。また、性別によって各PAL群の割合に差があるかを独立性の検定によって分析した。次に、PALⅠ群とPALⅡ・Ⅲ群の身体活動量の比較は、正規性が確認された場合はt検定、確認されなかった場合はMann-WhitneyのU検定を適用した。さらに、1日の時間帯を15時前(起床から学校時間帯)と15時以降(授業後)に分類した分析も行い、PALの各群における身体活動量の比較には上述と同様の統計解析を用いた。なお、統計的有意水準は $p < 0.05$ に設定し、統計処理にはSPSS Statistics 23 software (IBM Inc., Japan, Tokyo)を使用した。

第3節 結果

Table 4-1は、対象者の基礎データを示している。TEE_{DLW}は、男子が女子よりも有意に高い値を示したが、PALには有意な性差は認められなかった。また、PALⅠ群およびPALⅡ・Ⅲ群に分類された男女の割合に、有意な差は認められなかった。身体活動量に関しては、男子の方が女子よりも有意に微小運動時間が少なく、MVPAが多かった。MVPAの構成要素を見ると、散発的に蓄積したMVPAには有意な男女差は認められなかったものの、4分以上の連続的な活動として蓄積されたMVPAは男子の方が有意に高い値を示した。

Table 4-2は、PALの群別のBMI、TEEおよび身体活動量の特徴を示している。BMIはPALⅠ群が、PALⅡ・Ⅲ群よりも有意に高い値を示した。身体活動量に関して、微小運動時間およびLPAにはPAL群間で有意な差は認められなかった一方、歩数およびMVPAには有意な差が認められ、PALⅠ群の方が歩数およびMVPAが少なかった。また、MVPAの蓄積パタ

ーンをみると、4分未満の散発的に蓄積した MVPA には有意な差が認められなかったものの、4分以上の連続的に蓄積した MVPA は PAL II・III群が有意に多かった。さらに、4分以上の連測的に蓄積した MVPA の活動強度は、PAL II・IIIが有意に高かった。

Table 4-3 には、15時までと、15時以降に分類した場合の PAL 群ごとの身体活動量を示した。週末の身体活動の蓄積パターンには、PAL 群間に有意な差は認められなかった一方、平日の15時以降の MVPA は、PAL II・III群の方が有意に高い値を示した。MVPA の構成要素をみると、PAL II・III群は、散発的ではなく、連続的に蓄積した MVPA が有意に多かった。

第4節 考察

小児の PAL には、低強度よりも中強度以上の身体活動が関連していることが示唆された。また、PAL の低い小児は、標準以上の小児に比べて、歩数および平日授業後の MVPA が有意に低く、特に連続的に蓄積した MVPA に差がみられた。

小児の PAL と身体活動との関連を報告した先行研究では、本章の結果と同様に、中強度以上の身体活動が PAL と有意に関連することを報告しているものが多い^{16, 53, 55)}。一方、MVPA と PAL には有意な関連が認められず、座位行動時間と LPA に有意な関連が認められたという報告もみられる⁵⁴⁾。この研究では、他の研究で報告されている8歳⁵³⁾、10-11歳⁵⁵⁾、11-12歳¹⁶⁾と比較して、より低年齢の平均年齢5.4歳の小児を対象としている点で異なる。Ishii et al.は¹⁰²⁾、小学校低学年よりも高学年の小児の方が、座位行動時間が多く、MVPA が少ないこと、さらに、幼児は小学生と比較して MVPA が少なく、LPA が多いことを報告している。つまり、小児の年齢段階に応じて身体活動量の蓄積の仕方が変化している。このことから、小児の発達段階によって、PAL と関連する身体活動は異なると考えられる。先行研究と本章の結果から、小学校低学年の時期は強度の高い身体活動よりも低い身体活動の方が PAL に関連し、思春期前期では強度の高い身体活動が PAL に関連してくることが示唆された。

思春期前期小児の PAL が低い状態 (PAL I) と標準以上の状態 (PAL II・III) を決定する主要因は、平日15時以降の、ある程度連続的に蓄積した MVPA の時間であった。日本人小児は、学校授業で行動が制限される平日よりも、むしろ自由な時間の多い週末の方が MVPA が少ないと報告されている¹⁰²⁾。本章で対象とした小学5年生も同様に、PAL I群および PAL II・III群のどちらも、週末の MVPA は平日の45-60%に減少していた。両群ともに MVPA が低い状態であったため、PAL の差につながったのは、平日の学校後の時間帯における身体活動であったと考えられる。特に、この時間帯の散発的に蓄積する MVPA には有意差が認められなかった一方で、まとまって蓄積した MVPA に有意な差が認められ、その活動強度が

有意に高かったことから、これらは意図的に行う活動的な遊びや運動・スポーツ活動によって蓄積されたと推測される。身体活動量が減少する週末への介入や学校時間帯への介入も、もちろん重要であると考えられるが、PALの低い状態から標準以上にしていくためには、平日の授業後の身体活動量を高めるような方策が有効かもしれない。そのためには、Ishii et al.¹⁰²⁾が述べているように、学校だけでなく、家庭や近隣環境などの社会的支援が必要であろう。

Ishikawa-Takata et al.⁵⁶⁾は、日本人成人を対象にDLW法と質問紙による身体活動調査から、PAL I, II, IIIの各群における身体活動の特徴を明らかにした。この研究結果は、現在の食事摂取基準¹²⁾に引用され、EERの算出に必要なPALを推定する際に参考にされている。本研究は、加速度計を使用することで、より客観的に身体活動量を測定したことに加え、小児でこれまで検討されていなかったPALの階級ごとの身体活動内容を明らかにした点で新規性がある。本章の結果から、思春期前期小児のPAL IとII以上を分けている身体活動は、学校外の運動・スポーツ活動である可能性が示唆されたことから、今後、PALの推定に運動・スポーツ活動に関する項目を加えていくことで推定精度は向上する可能性がある。

本章にはいくつかの限界がある。第一に、PAL III群のサンプルサイズが少なく ($n = 7$)、PAL II群とIII群の小児を合わせて検討した点が挙げられる。参考データとして、PAL III群の平均歩数は 14924 ± 3501 steps/d、微小運動時間は 433 ± 92 min/d、LPAは 337 ± 55 min/d、MVPAは 59 ± 21 min/dであった。PAL II群と比較してMVPAはほぼ同様である一方、LPAが多い傾向を示したことから、本章で示唆されたPAL IとII以上を決定する要因と、PAL IIとIIIを決定する要因は異なる可能性がある。今後、さらにデータを蓄積して検討する必要がある。第二は、本章では2分間隔で測定した加速度データを使用している点である。加速度を記録する時間間隔 (epoch length) は、間欠的な活動が多い小児において、5秒から60秒程度の短い時間が推奨されている^{97, 103)}。Edwardson and Gorely⁹⁷⁾は、epoch lengthが5秒から60秒に長くなるにつれ、MVPAおよびLPAは長く、安静状態 (=座位行動時間) は短くなると報告している。本章で使用したLCは、1日あたりの身体活動量を4秒のepoch lengthで出力できるが、時系列データは2分のepoch lengthでしか出力できない。分析対象とした42名の4秒epochで測定した1日あたりの微小運動時間と、それらを2分epochで測定した時間を比較すると、先行研究と同様に、MVPAおよびLPAは2分epochで長く (1.5-3.6倍)、微小運動時間は短く (0.7倍) 算出された。また、boutの頻度や長さにも影響するという報告¹⁰⁴⁾みられる。一方、4秒epochと2分epochのデータ間には、強い相関係数 (微小運動時間 : $r = 0.93$, LPA : $r = 0.87$, MVPA : $r = 0.88$) が認められたことから、各強度の所要時間の絶対量については研究間で比較することは難しいものの、個人間における相対関係や

アウトカムへの影響をみる上では、どちらの `epoch length` を使用しても大きな違いはないと考えられる。

第5章 総括

第1節 総合考察

本研究は、日本人小児の自由生活下の TEE を DLW 法で測定し、同期間の身体活動量を加速度計を用いて測定した。第2章では、日本人小児の TEE の現状を明らかにするとともに、既存の推定式の精度について検討した。その結果、現在の食事摂取基準で示されている10-11歳児の EER は、過大評価している可能性が示唆された (Table 2-2)。また、日本の食事摂取基準で使用されている基礎代謝基準値に基づく TEE 推定式は、標準的な体格から離れる小児の TEE ほど過大評価することから (Table 2-4, Fig. 2-1)、食事管理の現場で使用するには注意が必要である。TEE 推定に最も高い精度を示したのは、アメリカ・カナダの食事摂取基準で使用されている推定式であった (Table 2-4, Fig. 2-1)。体格の影響を小さく、かつ、90%以上の小児の TEE を誤差 10%以内で推定することから、今後、日本人小児を対象としても利用できると考えられる。しかし、いずれの推定式を使用する場合でも、個人や集団の PAL の係数を適切に選択することは難しい。そこで、本研究では TEE の推定に PAL を使用しない、FFM と歩数による推定式を開発した (Table 2-5)。歩数はスマートフォンやウェアラブルデバイスなどの身近な機器を使って簡易に測定できることから、食事管理や栄養指導の現場で利用することが可能である。この式では 10-12 歳児の TEE の個人間変動を約 65-70%説明した。今後、異なる集団で推定式の妥当性が検討される必要がある。また、今後さらに TEE の推定精度を上げていくには、歩数では捉えることが難しい非歩行活動(生活活動など)またはそれとトレードオフの関係にある座位行動を変数に加えることが有効かもしれない。さらに、第4章で、PAL I と PAL II 以上を分ける決定要因として強度の高いまとまった身体活動が挙げられたように、運動・スポーツ活動も TEE の変動を説明する重要な変数である可能性がある。今後、小児の TEE の推定式を改善していく上で、上述の変数を加えた検討を行っていくことが有効であろう。

第3章では、加速度計 (ASP) を用いた TEE の推定精度について検討した。その結果、ASP は 10 秒ごとに出力される METs を小児用に補正することで、小児の TEE を平均 12% 過大評価した。そして、加速度計の内部で計算されている REE の推定方法を、近年、日本人小児を対象として開発された Kaneko et al. の式を使用する方法に置き換えた場合、推定精度は向上する (誤差 9%) ことが示唆された (Table 3-3, Fig. 3-3)。ただし、座位行動時間が多い小児の TEE を過大評価する (Table 3-4) といった、補正式の問題点も明らかとなった。第2章で検討した推定式による TEE の推定精度と、加速度計による TEE の推定精度を比較すると、推定に PAL を使用しない FAO の推定式よりも、加速度計の方が平均で 2-3% 程度推定誤差が小さかった。他の推定式は DLW 法によって得られた PAL の精確な仮定を置い

ているため、単純な比較はできないものの、加速度計で TEE を推定した場合でも推定式によって推定した場合でも、それほど大きな推定精度の差は見られなかった。加速度計によって TEE を推定する場合、TEE の構成要素の 30%程度を占める AEE を精確に推定するだけでなく、約 60%を占める BMR の推定精度を上げることも重要となる。この最も大きい BMR の要素の推定には、いずれかの推定式を使用していることから、その推定式の精度が加速度計による TEE の推定精度にも大きく影響する。そのため、たとえ加速度計を用いても小さな推定精度の向上にとどまると考えられる。今後、推定式の改善や加速度計のデータ採用条件（装着／非装着の判定基準、最低測定日数、1 日当たりの必要装着時間など）を統制した検討が必要である。

第 4 章では、小児の PAL に関連する身体活動を検討し、PAL が低い状態の小児と標準以上の小児の差は、平日授業後の、ある程度まとまった活動で蓄積した中強度以上の身体活動量の差であることが示唆された（Table 4-2, Table 4-3）。成人を対象とした研究では MVPA は 1 日覚醒時間のわずか 5%程度であり、大半の時間が LPA（35～40%）や座位行動時間（55～60%）に費やされており¹⁰⁵⁾、座位行動は MVPA ではなく、LPA とトレードオフの関係にあることが明らかにされている¹⁰⁶⁾。そのため、成人においては、1 日の大半を占める座位行動に費やす時間を減らして、低強度の身体活動時間をいかに増やすかが重要な視点となっている。一方、本研究の結果や先行研究の報告から考えると、小児のエネルギー消費量を増加させるためには、低強度よりも中強度以上の身体活動に注目する視点を持ち、成人とは異なったアプローチをしていく必要があるのかもしれない。

第 2 節 結論

本博士論文では、1) 小児の EER 推定を促進すること、2) 小児の PAL を向上させるための方策を検討することを目的として、日本では極めてデータの限られる DLW 法と、身体活動量の客観的測定法である加速度計法を併用することで、以下の検討を行った。

1. 日本人小児の TEE の実態を明らかにし、国内外の推定式による TEE 推定精度を検証するとともに、新たな推定式をつくること。
2. 加速度計を用いた小児の TEE の推定精度について検討すること。
3. PAL の階級ごとの各種身体活動従事時間を明らかにすること。

上記の検討から、以下の結論を得た。

1. DLW 法で測定した 10-12 歳児の TEE は、日本人の食事摂取基準で示されている TEE よりも男子で約 7%、女子で約 12%低いことから、現在の EER は過大評価している可能性がある。

2. IOM の TEE 推定式は、現在の日本人の食事摂取基準の基礎代謝基準値を用いた推定式よりも、BMI の影響を小さく、かつ高い精度で 10-12 歳の日本人小児の TEE を推定する。
3. FFM と歩数で、10-12 歳の日本人小児の TEE を約 65% 推定することができる。開発された推定式は以下の通りである。男子： $47.1 \times \text{FFM (kg)} + 0.0568 \times \text{step count (steps/d)} - 122$ ，女子： $55.5 \times \text{FFM (kg)} + 0.0315 \times \text{step count (steps/d)} - 117$ 。
4. 3 軸加速度計 Active style Pro HJA-350IT は、小児用 METs の補正式を適用し、Kaneko et al. の安静時エネルギー消費量の推定式に基づいて推定することで、小児の自由生活下の TEE を体格に関わらず平均誤差 8.8% で評価する。ただし、座位行動時間が長い小児の TEE ほど過大評価することに注意が必要である。
5. PAL の低い小児は、標準以上の小児に比べて、平日授業後の、特に連続的に蓄積した MVPA が少ないことが示唆された。PAL を標準以上にしていくためには、平日の授業後に身体活動量を高めるような方策が有効かもしれない。

文献

- 1) Hills AP, Mokhtar N, Byrne NM. 2014. Assessment of physical activity and energy expenditure: an overview of objective measures. *Front Nutr* 1: 5.
- 2) 田中茂穂. 2006. 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: 527-532.
- 3) Caspersen CJ, Powell KE, Christenson GM. 1985. Physical activity, exercise, and physical fitness: definitions and distinctions for health-related research. *Public Health Rep* 100: 126-131.
- 4) 岩佐翼, 井上茂. 2013. 世界と日本の身体活動指針 (特集 運動基準・指針から身体活動基準・指針へ). *体育の科学* 63: 933-939.
- 5) 厚生労働省. 2013. 健康づくりのための身体活動基準 2013. [Online]. Available: <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple.html> [accessed Nov.11, 2017].
- 6) 田中茂穂. 2009. エネルギー消費量とその測定方法. *静脈経腸栄養 : 日本静脈経腸栄養学会機関誌* 24: 1013-1019.
- 7) Park J, Kazuko IT, Kim E, Kim J, Yoon J. 2014. Estimating free-living human energy expenditure: Practical aspects of the doubly labeled water method and its applications. *Nutr Res Pract* 8: 241-248.
- 8) 海老根直之, 引原有輝, 吉武裕. 2009. 日本国民を対象とした二重標識水法による身体活動量評価についての系統的レビューおよび総括データベースの構築とその解析. *財団法人ミズノスポーツ振興会助成研究報告書*: 1-17.
- 9) Cunningham JJ. 1991. Body composition as a determinant of energy expenditure: a synthetic review and a proposed general prediction equation. *Am J Clin Nutr* 54: 963-969.
- 10) Ekelund U, Sjostrom M, Yngve A, Poortvliet E, Nilsson A, Froberg K, Wedderkopp N, Westerterp K. 2001. Physical activity assessed by activity monitor and doubly labeled water in children. *Med Sci Sports Exerc* 33: 275-281.
- 11) Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004. Human energy requirements, Food and Nutrition Report Series, Rome.
- 12) 厚生労働省. 2014. 日本人の食事摂取基準 2015. 1-1-1. エネルギー.
- 13) Okubo H, Sasaki S, Rafamantanantsoa HH, Ishikawa-Takata K, Okazaki H, Tabata I. 2008. 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: 1343-1350.
- 14) Saris WH, Blair SN, van Baak MA, Eaton SB, Davies PS, Di Pietro L, Fogelholm M, Rissanen A, Schoeller D, Swinburn B, Tremblay A, Westerterp KR, Wyatt H. 2003. How much physical

activity is enough to prevent unhealthy weight gain? Outcome of the IASO 1st Stock Conference and consensus statement. *Obes Rev* 4: 101-114.

- 15) Manini TM, Everhart JE, Patel KV, Schoeller DA, Colbert LH, Visser M, Tylavsky F, Bauer DC, Goodpaster BH, Harris TB. 2006. Daily activity energy expenditure and mortality among older adults. *JAMA* 296: 171-179.
- 16) 大島秀武, 中江悟司, 山田陽介, 木村みさか, 小澤治夫, 鈴木和弘, 平川和文, 石井好二郎. 2013. 子どもの各種身体活動従事時間と身体活動レベルとの関係. *体力科学* 62: 391-397.
- 17) Westerterp KR. 2017. Doubly labelled water assessment of energy expenditure: principle, practice, and promise. *Eur J Appl Physiol* 117: 1277-1285.
- 18) International Atomic Energy Agency. 2009. IAEA HUMAN HEALTH SERIES No.3, Vienna, Austria.
- 19) 齊藤慎一, 海老根直之, 島田美恵子, 吉武裕, 田中宏暁. 1999. 二重標識水法によるエネルギー消費量測定の原理とその応用 生活習慣病対策からトップスポーツ選手の栄養処方まで:生活習慣病対策からトップスポーツ選手の栄養処方まで. *栄養学雑誌* 57: 317-332.
- 20) Lifson N, Gordon GB, Mc CR. 1955. Measurement of total carbon dioxide production by means of D₂O¹⁸. *J Appl Physiol* 7: 704-710.
- 21) Schoeller DA, van Santen E. 1982. Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 53: 955-959.
- 22) Ebine N, Feng JY, Homma M, Saitoh S, Jones PJ. 2000. Total energy expenditure of elite synchronized swimmers measured by the doubly labeled water method. *Eur J Appl Physiol* 83: 1-6.
- 23) Weir JB. 1949. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109: 1-9.
- 24) Schoeller DA. 1988. Measurement of energy expenditure in free-living humans by using doubly labeled water. *J Nutr* 118: 1278-1289.
- 25) Speakman JR. 1998. The history and theory of the doubly labeled water technique. *Am J Clin Nutr* 68: 932s-938s.
- 26) Hoos MB, Gerver WJ, Kester AD, Westerterp KR. 2003. Physical activity levels in children and adolescents. *Int J Obes Relat Metab Disord* 27: 605-609.
- 27) 足立稔, 笹山健作, 引原有輝, 沖嶋今日太, 水内秀次, 角南良幸, 塩見優子, 西牟田守,

- 菊永茂司, 田中宏暁, 齋藤慎一, 吉武裕. 2007. 小学生の日常生活における身体活動量の評価 : 二重標識水法と加速度計法による検討. *体力科学* 56: 347-355.
- 28) Ishikawa-Takata K, Kaneko K, Koizumi K, Ito C. 2013. Comparison of physical activity energy expenditure in Japanese adolescents assessed by EW4800P triaxial accelerometry and the doubly labelled water method. *Br J Nutr* 110: 1347-1355.
- 29) Zhuo Q, Sun R, Gou LY, Piao JH, Liu JM, Tian Y, Zhang YH, Yang XG. 2013. Total energy expenditure of 16 Chinese young men measured by the doubly labeled water method. *Biomed Environ Sci* 26: 413-420.
- 30) Tanaka S, Ohkawara K, Ishikawa-Takata K, Morita A, Watanabe S. 2008. Accuracy of Predictive Equations for Basal Metabolic Rate and Contribution of Abdominal Fat Distribution to Basal Metabolic Rate in Obese Japanese People. *Anti-Aging Medicine* 5: 17-21.
- 31) Institute of Medicine of the National Academies (US). 2002. Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids (Macronutrients).
- 32) Tooze JA, Schoeller DA, Subar AF, Kipnis V, Schatzkin A, Troiano RP. 2007. Total daily energy expenditure among middle-aged men and women: the OPEN Study. *Am J Clin Nutr* 86: 382-387.
- 33) Bandini LG, Lividini K, Phillips SM, Must A. 2013. Accuracy of Dietary Reference Intakes for determining energy requirements in girls. *Am J Clin Nutr* 98: 700-704.
- 34) Brooks GA, Butte NF, Rand WM, Flatt JP, Caballero B. 2004. Chronicle of the Institute of Medicine physical activity recommendation: how a physical activity recommendation came to be among dietary recommendations. *Am J Clin Nutr* 79: 921s-930s.
- 35) Sun M, Gower BA, Nagy TR, Trowbridge CA, Dezenberg C, Goran MI. 1998. Total, resting, and activity-related energy expenditures are similar in Caucasian and African-American children. *Am J Physiol* 274: E232-237.
- 36) DeLany JP, Bray GA, Harsha DW, Volaufova J. 2002. Energy expenditure in preadolescent African American and white boys and girls: the Baton Rouge Children's Study. *Am J Clin Nutr* 75: 705-713.
- 37) Kaneko K, Ito C, Koizumi K, Watanabe S, Umeda Y, Ishikawa-Takata K. 2013. Resting energy expenditure (REE) in six- to seventeen-year-old Japanese children and adolescents. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)* 59: 299-309.
- 38) 笹井浩行, 引原有輝, 岡崎勘造. 2015. 加速度計による活動量評価と身体活動増進介入

への活用. *運動疫学研究* 17: 6-18.

- 39) Sardinha LB, Judice PB. 2017. Usefulness of motion sensors to estimate energy expenditure in children and adults: a narrative review of studies using DLW. *Eur J Clin Nutr* 71: 331-339.
- 40) Murakami H, Kawakami R, Nakae S, Nakata Y, Ishikawa-Takata K, Tanaka S, Miyachi M. 2016. Accuracy of Wearable Devices for Estimating Total Energy Expenditure: Comparison With Metabolic Chamber and Doubly Labeled Water Method. *JAMA Intern Med* 176: 702-703.
- 41) Ohkawara K, Oshima Y, Hikiyara Y, Ishikawa-Takata K, Tabata I, Tanaka S. 2011. Real-time estimation of daily physical activity intensity by a triaxial accelerometer and a gravity-removal classification algorithm. *Br J Nutr* 105: 1681-1691.
- 42) Oshima Y, Kawaguchi K, Tanaka S, Ohkawara K, Hikiyara Y, Ishikawa-Takata K, Tabata I. 2010. Classifying household and locomotive activities using a triaxial accelerometer. *Gait Posture* 31: 370-374.
- 43) 熊谷秋三, 田中茂穂, 岸本裕歩. 2015. 三軸加速度センサー内蔵活動量計を用いた身体活動量, 座位行動の調査と身体活動疫学研究への応用. *運動疫学研究* 17: 90-103.
- 44) Hikiyara Y, Tanaka C, Oshima Y, Ohkawara K, Ishikawa-Takata K, Tanaka S. 2014. Prediction models discriminating between nonlocomotive and locomotive activities in children using a triaxial accelerometer with a gravity-removal physical activity classification algorithm. *PLoS One* 9: e94940.
- 45) Tanaka C, Tanaka M, Okuda M, Inoue S, Aoyama T, Tanaka S. 2017. Association between objectively evaluated physical activity and sedentary behavior and screen time in primary school children. *BMC Res Notes* 10: 175.
- 46) Poitras VJ, Gray CE, Borghese MM, Carson V, Chaput JP, Janssen I, Katzmarzyk PT, Pate RR, Connor Gorber S, Kho ME, Sampson M, Tremblay MS. 2016. Systematic review of the relationships between objectively measured physical activity and health indicators in school-aged children and youth. *Appl Physiol Nutr Metab* 41: S197-239.
- 47) Sormunen E, Saarinen MM, Salokangas RK, Telama R, Hutri-Kähönen N, Tammelin T, Viikari J, Raitakari O, J H. 2017. Effects of childhood and adolescence physical activity patterns on psychosis risk—a general population cohort study. *npj schizophrenia* 3: 5.
- 48) Moreno LA, Bel-Serrat S, Santaliestra-Pasias AM, Rodriguez G. 2013. Obesity prevention in children. *World Rev Nutr Diet* 106: 119-126.
- 49) 文部科学省. 2017. 平成 28 年度学校保健統計調査. [Online]. Available: http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/chousa05/hoken/kekka/k_detail/1380547.htm

[accessed Nov.9, 2017].

- 50) スポーツ庁. 2017. 平成 28 年度体力・運動能力調査結果調査報告書. [Online]. Available: http://www.mext.go.jp/sports/b_menu/toukei/chousa04/tairyoku/kekka/k_detail/1396900.htm [accessed Nov.9, 2017].
- 51) Itoi A, Yamada Y, Nakae S, Kimura M. 2015. Decline in objective physical activity over a 10-year period in a Japanese elementary school. *J Physiol Anthropol* 34: 38.
- 52) 厚生労働省. エネルギー摂取量の平均値・標準偏差の年次推移 (性・年齢階級別) . [Online]. Available: http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryoku/kenkou/kenkounippon21/eiyouchousa/keinen_henka_eiyou.html [accessed Nov.9, 2017].
- 53) Hoos MB, Kuipers H, Gerver WJ, Westerterp KR. 2004. Physical activity pattern of children assessed by triaxial accelerometry. *Eur J Clin Nutr* 58: 1425-1428.
- 54) Montgomery C, Reilly JJ, Jackson DM, Kelly LA, Slater C, Paton JY, Grant S. 2004. Relation between physical activity and energy expenditure in a representative sample of young children. *Am J Clin Nutr* 80: 591-596.
- 55) 中江悟司, 山田陽介, 木村みさか, 鈴木和弘, 小澤治夫, 平川和文, 石井好二郎. 2013. 小児の日常生活中におけるエネルギー消費量と体格・体力との連関 : 二重標識水法および加速度計法を用いた検討. *体力科学* 62: 353-360.
- 56) Ishikawa-Takata K, Naito Y, Tanaka S, Ebine N, Tabata I. 2011. Use of doubly labeled water to validate a physical activity questionnaire developed for the Japanese population. *J Epidemiol* 21: 114-121.
- 57) Itoi A, Yamada Y, Watanabe Y, Kimura M. 2012. Physical activity, energy intake, and obesity prevalence among urban and rural schoolchildren aged 11-12 years in Japan. *Appl Physiol Nutr Metab* 37: 1189-1199.
- 58) Namba H, Yamaguchi Y, Yamada Y, Tokushima S, Hatamoto Y, Sagayama H, Kimura M, Higaki Y, Tanaka H. 2012. Validation of Web-based physical activity measurement systems using doubly labeled water. *J Med Internet Res* 14: e123.
- 59) Sagayama H, Hamaguchi G, Toguchi M, Ichikawa M, Yamada Y, Ebine N, Higaki Y, Tanaka H. 2017. Energy Requirement Assessment in Japanese Table Tennis Players Using the Doubly Labeled Water Method. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 27: 421-428.
- 60) Racette SB, Schoeller DA, Luke AH, Shay K, Hnilicka J, Kushner RF. 1994. Relative dilution spaces of 2H- and 18O-labeled water in humans. *Am J Physiol* 267: E585-590.

- 61) Sagayama H, Yamada Y, Racine NM, Shriver TC, Schoeller DA. 2016. Dilution space ratio of ²H and ¹⁸O of doubly labeled water method in humans. *J Appl Physiol (1985)* 120: 1349-1354.
- 62) Schoeller DA, Ravussin E, Schutz Y, Acheson KJ, Baertschi P, Jequier E. 1986. Energy expenditure by doubly labeled water: validation in humans and proposed calculation. *Am J Physiol* 250: R823-830.
- 63) Black AE, Prentice AM, Coward WA. 1986. Use of food quotients to predict respiratory quotients for the doubly-labelled water method of measuring energy expenditure. *Hum Nutr Clin Nutr* 40: 381-391.
- 64) International Atomic Energy Agency. 2010. IAEA HUMAN HEALTH SERIES No.12.
- 65) 大島秀武, 北村裕美, 関和俊. 2015. マスク時間が異なる加速度センサ方式の歩数計の評価. *健康支援* 17: 15-22.
- 66) De Craemer M, De Decker E, Santos-Lozano A, Verloigne M, De Bourdeaudhuij I, Deforche B, Cardon G. 2015. Validity of the Omron pedometer and the actigraph step count function in preschoolers. *J Sci Med Sport* 18: 289-293.
- 67) Park J, Ishikawa-Takata K, Tanaka S, Mekata Y, Tabata I. 2011. Effects of walking speed and step frequency on estimation of physical activity using accelerometers. *J Physiol Anthropol* 30: 119-127.
- 68) Minister of Health, Labour and Welfare, Japan. 2014. Overview of Dietary Reference Intakes for Japanese (2015).
- 69) Tanaka C, Reilly JJ, Tanaka M, Tanaka S. 2016. Seasonal changes in objectively measured sedentary behavior and physical activity in Japanese primary school children. *BMC Public Health* 16: 969.
- 70) Cole TJ, Bellizzi MC, Flegal KM, Dietz WH. 2000. Establishing a standard definition for child overweight and obesity worldwide: international survey. *BMJ* 320: 1240-1243.
- 71) Ohkawara K, Ishikawa-Takata K, Park JH, Tabata I, Tanaka S. 2011. How much locomotive activity is needed for an active physical activity level: analysis of total step counts. *BMC Res Notes* 4: 512.
- 72) Park JH, Ishikawa-Takata K, Lee SJ, Kim EK, Lim KW, Kim HR, Lee IS, Tanaka S. 2016. Association between daily step counts and physical activity level among Korean elementary schoolchildren. *J Exerc Nutrition Biochem* 20: 51-55.
- 73) Miyake R, Tanaka S, Ohkawara K, Ishikawa-Takata K, Hikiyama Y, Taguri E, Kayashita J, Tabata I. 2011. Validity of predictive equations for basal metabolic rate in Japanese adults. *J*

Nutr Sci Vitaminol (Tokyo) 57: 224-232.

- 74) Plasqui G, Bonomi AG, Westerterp KR. 2013. Daily physical activity assessment with accelerometers: new insights and validation studies. *Obes Rev* 14: 451-462.
- 75) Lee JM, Kim Y, Welk GJ. 2014. Validity of consumer-based physical activity monitors. *Med Sci Sports Exerc* 46: 1840-1848.
- 76) 中田由夫. 2012. 3 軸加速度計 HJA-350IT を用いた身体活動量評価における設定条件と採用データ数. *体育測定評価研究* 11: 57-62.
- 77) Penpraze V, Reilly JJ, MacLean CM, Montgomery C, Kelly LA, Paton JY, Aitchison T, Grant S. 2006. Monitoring of Physical Activity in Young Children: How Much Is Enough? *Pediatr Exerc Sci* 18: 483-491.
- 78) 厚生省保健医療局健康増進栄養課. 1994. 第 5 次改訂日本人の栄養所要量, p 46-47. 第一出版株式会社, 東京.
- 79) Ridley K, Ainsworth BE, Olds TS. 2008. Development of a compendium of energy expenditures for youth. *Int J Behav Nutr Phys Act* 5: 45.
- 80) 山本茂, 小松龍史. 2001. 日本人の基礎代謝資料の評価. *栄養学雑誌* 59: 51-59.
- 81) Plasqui G, Joosen AM, Kester AD, Goris AH, Westerterp KR. 2005. Measuring free-living energy expenditure and physical activity with triaxial accelerometry. *Obes Res* 13: 1363-1369.
- 82) Brazeau AS, Beaudoin N, Belisle V, Messier V, Karelis AD, Rabasa-Lhoret R. 2016. Validation and reliability of two activity monitors for energy expenditure assessment. *J Sci Med Sport* 19: 46-50.
- 83) Ward DS, Evenson KR, Vaughn A, Rodgers AB, Troiano RP. 2005. Accelerometer use in physical activity: best practices and research recommendations. *Med Sci Sports Exerc* 37: S582-588.
- 84) Kumahara H, Schutz Y, Ayabe M, Yoshioka M, Yoshitake Y, Shindo M, Ishii K, Tanaka H. 2004. The use of uniaxial accelerometry for the assessment of physical-activity-related energy expenditure: a validation study against whole-body indirect calorimetry. *Br J Nutr* 91: 235-243.
- 85) Hikiyama Y, Tanaka S, Ohkawara K, Ishikawa-Takata K, Tabata I. 2012. Validation and comparison of 3 accelerometers for measuring physical activity intensity during nonlocomotive activities and locomotive movements. *J Phys Act Health* 9: 935-943.
- 86) 樋口博之, 綾部誠也, 進藤宗洋, 吉武裕, 田中宏暁. 2003. 加速度センサーを内蔵した歩数計による若年者と高齢者の日常身体活動量の比較. *体力科学* 52: 111-118.
- 87) 足立稔, 笹山健作, 沖嶋今日太, 角南良幸, 塩見優子. 2009. 加速度センサー付歩数計

- を用いた中学生の日常生活での身体活動量評価の検討. *体力科学* 58: 275-284.
- 88) 森村和浩, 清永明, 進藤宗洋, 田中宏暁. 2014. 身体活動を促す短時間の取り組みと体力・身体活動水準の関係 ～小学生を対象とした横断研究～. *体力科学* 63: 455-461.
- 89) Harrell JS, McMurray RG, Baggett CD, Pennell ML, Pearce PF, Bangdiwala SI. 2005. Energy costs of physical activities in children and adolescents. *Med Sci Sports Exerc* 37: 329-336.
- 90) Puyau MR, Adolph AL, Vohra FA, Butte NF. 2002. Validation and calibration of physical activity monitors in children. *Obes Res* 10: 150-157.
- 91) Treuth MS, Schmitz K, Catellier DJ, McMurray RG, Murray DM, Almeida MJ, Going S, Norman JE, Pate R. 2004. Defining accelerometer thresholds for activity intensities in adolescent girls. *Med Sci Sports Exerc* 36: 1259-1266.
- 92) Freedson PS, Melanson E, Sirard J. 1998. Calibration of the Computer Science and Applications, Inc. accelerometer. *Med Sci Sports Exerc* 30: 777-781.
- 93) 香村恵介, 石井好二郎. 2016. 児童における Lifecorder を用いた身体活動強度分析方法のまとめ. *健康支援* 18: 1-8.
- 94) McClain JJ, Craig CL, Sisson SB, Tudor-Locke C. 2007. Comparison of Lifecorder EX and ActiGraph accelerometers under free-living conditions. *Appl Physiol Nutr Metab* 32: 753-761.
- 95) 笹山健作, 足立稔. 2016. 青少年男子の歩・走行時における一軸加速度計の活動強度と metabolic equivalents との関連. *体力科学* 65: 265-272.
- 96) Cliff DP, Jones RA, Burrows TL, Morgan PJ, Collins CE, Baur LA, Okely AD. 2014. Volumes and bouts of sedentary behavior and physical activity: associations with cardiometabolic health in obese children. *Obesity (Silver Spring)* 22: E112-118.
- 97) Edwardson CL, Gorely T. 2010. Epoch length and its effect on physical activity intensity. *Med Sci Sports Exerc* 42: 928-934.
- 98) Comte M, Hobin E, Majumdar SR, Plotnikoff RC, Ball GD, McGavock J. 2013. Patterns of weekday and weekend physical activity in youth in 2 Canadian provinces. *Appl Physiol Nutr Metab* 38: 115-119.
- 99) Mark AE, Janssen I. 2009. Influence of bouts of physical activity on overweight in youth. *Am J Prev Med* 36: 416-421.
- 100) Holman RM, Carson V, Janssen I. 2011. Does the fractionalization of daily physical activity (sporadic vs. bouts) impact cardiometabolic risk factors in children and youth? *PLoS One* 6: e25733.
- 101) Coombes E, van Sluijs E, Jones A. 2013. Is environmental setting associated with the intensity

and duration of children's physical activity? Findings from the SPEEDY GPS study. *Health Place* 20: 62-65.

- 102) Ishii K, Shibata A, Adachi M, Nonoue K, Oka K. 2015. Gender and grade differences in objectively measured physical activity and sedentary behavior patterns among Japanese children and adolescents: a cross-sectional study. *BMC Public Health* 15: 1254.
- 103) McClain JJ, Abraham TL, Brusseau TA, Jr., Tudor-Locke C. 2008. Epoch length and accelerometer outputs in children: comparison to direct observation. *Med Sci Sports Exerc* 40: 2080-2087.
- 104) Ayabe M, Kumahara H, Morimura K, Tanaka H. 2013. Epoch length and the physical activity bout analysis: an accelerometry research issue. *BMC Res Notes* 6: 20.
- 105) Dunstan DW, Howard B, Healy GN, Owen N. 2012. Too much sitting--a health hazard. *Diabetes Res Clin Pract* 97: 368-376.
- 106) Owen N, Sparling PB, Healy GN, Dunstan DW, Matthews CE. 2010. Sedentary behavior: emerging evidence for a new health risk. *Mayo Clin Proc* 85: 1138-1141.

図表

第1章

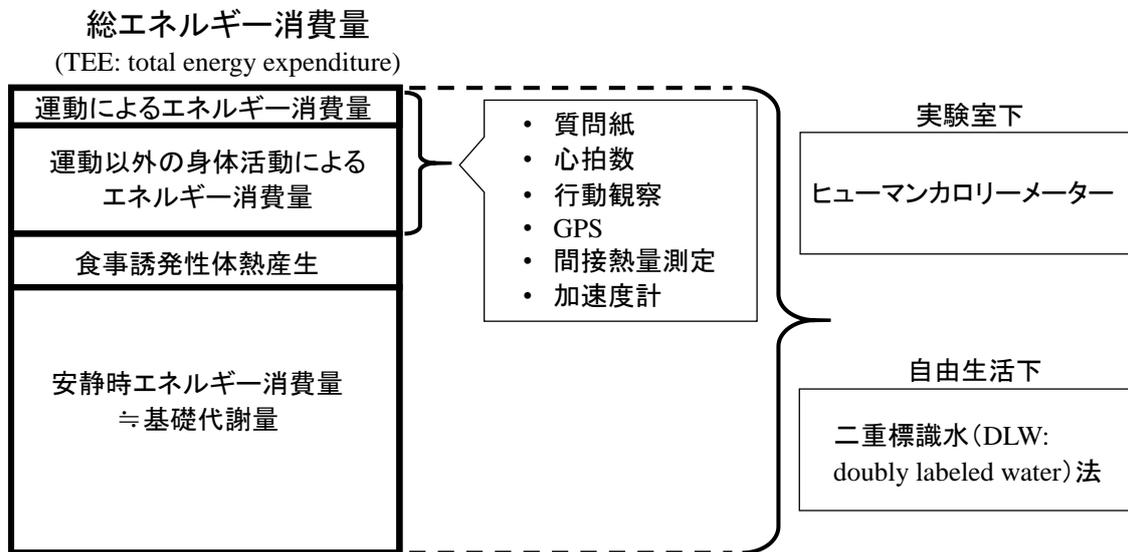


Fig. 1-1. 総エネルギー消費量の内訳および測定方法

Hills et al.¹⁾および田中²⁾を基に作図.

第 2 章

Table 2-1. Predictive equations of total energy expenditure (TEE).

	Predictive equations
TEE _{J-DRI} (kcal/d) ^a	BMR standard ^d (kcal/kg/d) × body weight (kg) × PA _{J-DRI} ^e
TEE _{IOM} (kcal/d) ^b	For boys aged 9-18 y: 88.5 - 61.9 × age ^f (y) + PA _{IOM} ^g × [26.7 × body weight (kg) + 903 × height (m)] For girls aged 9-18 y: 135.3 - 30.8 × age ^f (y) + PA _{IOM} ^g × [10.0 × body weight (kg) + 934 × height (m)]
TEE _{FAO} (kcal/d) ^c	For boys aged 1-18 y: 310.2 + 63.3 × body weight (kg) - 0.263 × body weight (kg) ² For girls aged 1-18 y: 263.4 + 65.3 × body weight (kg) - 0.454 × body weight (kg) ²

^a TEE estimated by equation of Dietary Reference Intakes (DRI) for Japanese¹²⁾.

^b TEE estimated by equation of Institute of Medicine (IOM)³¹⁾.

^c TEE estimated by equation of Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)¹¹⁾.

^d BMR standard is 37.4 kcal/kg/d for boys and 34.8 kcal/kg/d for girls¹²⁾.

^e Physical activity coefficients (PA) determined by PAL in Japan-DRI (PA_{J-DRI})¹²⁾ are as follows: if PAL < 1.55, PA = 1.45 (level I); if 1.55 ≤ PAL < 1.75, PA = 1.65 (level II); and if 1.75 ≤ PAL, and PA = 1.85 (level III) for both boys and girls.

^f We assumed an age of 10 years for 5th graders and 11 years for 6th graders.

^g PA used in the DRI for the United States and Canada developed by the IOM (PA_{IOM})³¹⁾ are as follows: boys, sedentary (1.0 ≤ PAL < 1.4, PA = 1.00), low activity (1.4 ≤ PAL < 1.6, PA = 1.13), active (1.6 ≤ PAL < 1.9, PA = 1.26), and very active (1.9 ≤ PAL < 2.5, PA = 1.42); girls, sedentary (PA = 1.00), low activity (PA = 1.16), active (PA = 1.31), and very active (PA = 1.56).

Table 2-2. Characteristics of the subjects.

	Boys		Girls		<i>p</i> ⁱ
	n	Mean ± SD	n	Mean ± SD	
Height (cm)	33	142.6 ± 6.9	23	145.5 ± 6.6	0.265
Body weight (kg)	33	37.9 ± 6.7	23	36.7 ± 6.3	0.458
BMI ^a (kg/m ²)	33	18.6 ± 2.8	23	17.2 ± 1.9	0.092
overweight [n (%)]		6 (18%)		1 (4%)	
obesity [n (%)]		1 (3%)		0 (0%)	
FFM ^b (kg)	33	31.9 ± 4.3	23	29.6 ± 4.0	0.110
FM ^c (kg)	33	6.0 ± 3.7	23	7.1 ± 4.5	0.609
% fat (%)	33	15.1 ± 7.2	23	18.6 ± 9.4	0.387
TEE _{DLW-1} ^d (kcal/d)	33	2107 ± 273	23	1847 ± 269	0.002
REE ^e (kcal/d)	33	1321 ± 113	23	1185 ± 69	0.000
PAL ^f	33	1.60 ± 0.16	23	1.56 ± 0.19	0.626
Step count (steps/d) ^g	31	12823 ± 2945	21	10526 ± 2493	0.009
TEE _{DLW-2} ^h (kcal/d)	26	2067 ± 230	22	1830 ± 262	0.004

^a Subjects were classified based on BMI cutoffs⁷⁰).

^b FFM: fat-free mass.

^c FM: fat mass.

^d Total energy expenditure measured by doubly labeled water of all subjects.

^e Resting energy expenditure was predicted by equation of Kaneko et al.³⁷).

^f Physical activity level was calculated as TEE_{DLW} / predicted REE³⁷).

^g We excluded the data of two boys and two girls because of insufficient pedometer wearing time.

^h TEE_{DLW} excluding overweight and obese subjects on the basis of BMI cutoffs⁷⁰).

ⁱ Analysis of covariance on each characteristics, adjusting for measurement timing.

Table 2-3. Partial correlation between TEE (kcal/d) and height, body weight (BW), body composition and step count.

Covariates	Subject	n	Height	BW	FFM ^a	FM ^b	% fat	Steps
none	Boys and girls	52	0.365 **	0.521 **	0.702 **	0.088	-0.091	0.430 **
	Boys	31	0.513 **	0.609 **	0.618 **	0.379 *	0.276	0.447 *
	Girls	21	0.517 *	0.425 *	0.767 **	-0.089	-0.314	0.129
MT ^c	Boys and girls	52	0.385 **	0.535 ***	0.673 ***	0.178	0.006	0.388 **
	Boys	31	0.356	0.619 ***	0.637 ***	0.381 *	0.245	0.375 *
	Girls	21	0.735 ***	0.675 **	0.771 ***	0.311	0.038	0.075
MT ^c and FFM	Boys and girls	52	-0.155	-0.065	-	-0.065	-0.054	0.695 ***
	Boys	31	-0.128	0.185	-	0.185	0.184	0.708 ***
	Girls	21	0.107	0.049	-	0.049	0.054	0.546 *
MT ^c , FFM and FM	Boys and girls	52	-0.153	-	-	-	0.040	0.707 ***
	Boys	31	-0.123	-	-	-	0.012	0.696 ***
	Girls	21	0.097	-	-	-	0.023	0.548 *

^a Fat-free mass derived from total body water.

^b Fat mass calculated by subtracting FFM from body weight.

^c Measurement timing

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

Table 2-4. Differences and correlations between the predicted and measured total energy expenditure (TEE).

	TEE Mean (SD) kcal/d	Bias Mean [95% CI] %	RMSE ^e kcal/d	Accurate estimation ^f %	Under estimation ^g %	Over estimation ^h %	Correlation coefficient
Boys (n = 33)							
TEE _{DLW} ^a	2107 (273)						
TEE predicted							
TEE _{J-DRI} ^b	2264 (470) *	6.8 [2.6, 11.1]	302.8	63.6	3.0	33.3	0.885 †
TEE _{IOM} ^c	2153 (321)	2.0 [0.3, 3.7]	110.2	93.9	0.0	6.1	0.944 †
TEE _{FAO} ^d	2320 (279) *	10.9 [6.7, 15.0]	319.9	57.6	0.0	42.4	0.635 †
Girls (n = 23)							
TEE _{DLW} ^a	1847 (269)						
TEE predicted							
TEE _{J-DRI} ^b	2007 (401) *	8.6 [2.9, 14.2]	297.8	69.6	4.3	26.1	0.854 †
TEE _{IOM} ^c	1882 (271)	2.0 [0.1, 3.9]	90.0	100.0	0.0	0.0	0.941 †
TEE _{FAO} ^d	2031 (183) *	11.5 [5.7, 17.4]	308.2	34.8	4.3	60.9	0.654 †

^a TEE measured by doubly labeled water (DLW) method.

^b TEE estimated by equation of Dietary Reference Intakes (DRI) for Japanese¹²⁾.

^c TEE estimated by equation of Institute of Medicine (IOM)³¹⁾.

^d TEE estimated by equation of Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)¹¹⁾.

^e Root mean squared error.

^f Percentage of the subjects predicted by equation within $\pm 10\%$ of measured TEE.

^g Percentage of the subjects predicted by equation $< 90\%$ of measured TEE.

^h Percentage of the subjects predicted by equation $> 110\%$ of measured TEE.

* Significantly different from TEE_{DLW}, $p < 0.05$ (repeated measures analysis of covariance with Bonferroni correction, adjusting for measurement timings).

† Significantly correlate with TEE_{DLW}, $p < 0.05$ (Partial correlation coefficient, adjusting for measurement timings).

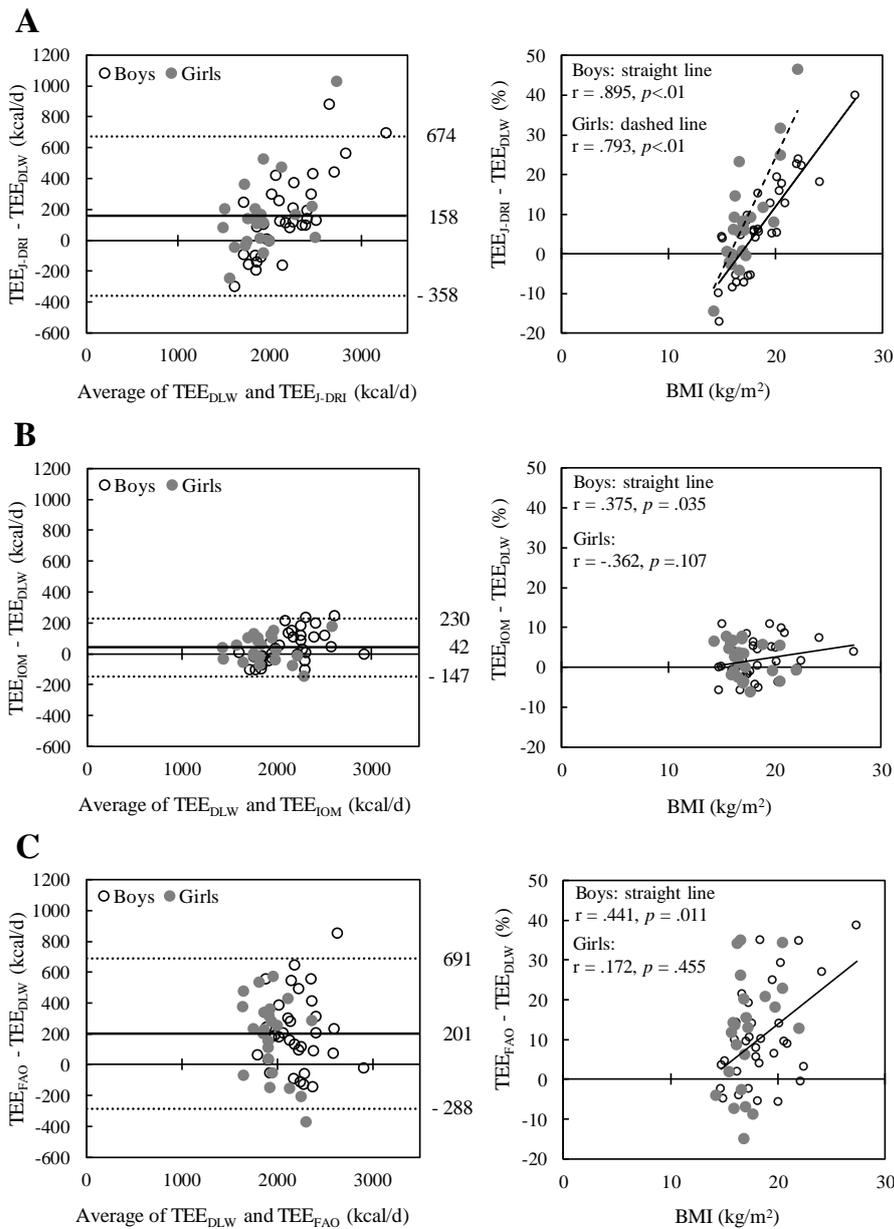


Fig. 2-1. Bland-Altman plots (left column) and relationship between bias of total energy expenditure (TEE) and BMI (right column).

In the graph on the left column, the thick straight line represents mean and dashed lines represent the lower and upper limits of agreement (2 standard deviations). (A) TEE estimated by equation of Dietary Reference Intakes (DRI) for Japanese¹²⁾. (B) TEE estimated by equation of Institute of Medicine (IOM)³¹⁾. (C) TEE estimated by equation of Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)¹¹⁾. In the graph on the right column, the relationship between bias (predicted minus measured TEE) and BMI was examined using partial correlation analysis, adjusting for measurement timing.

Table 2-5. Multiple linear regression analysis for predicting total energy expenditure (kcal/d) in 10- to 12-year-old children.

Predictor variables	Boys and girls (n = 52)			Boys (n = 31)			Girls (n = 21)		
	B	β	<i>p</i>	B	β	<i>p</i>	B	β	<i>p</i>
FFM (kg)	51.1	0.74	0.000	47.1	0.73	0.000	55.5	0.83	0.000
Steps	0.0505	0.51	0.000	0.0568	0.61	0.000	0.0315	0.28	0.049
Constant	-177	-	0.000	-122	-	0.664	-117	-	0.729
	Adjusted R ² = 0.712			Adjusted R ² = 0.679			Adjusted R ² = 0.654		

FFM: fat-free mass, B: partial regression coefficient, β : standardised partial regression coefficient.

All predictor variables were entered into the regression equation simultaneously.

第 3 章

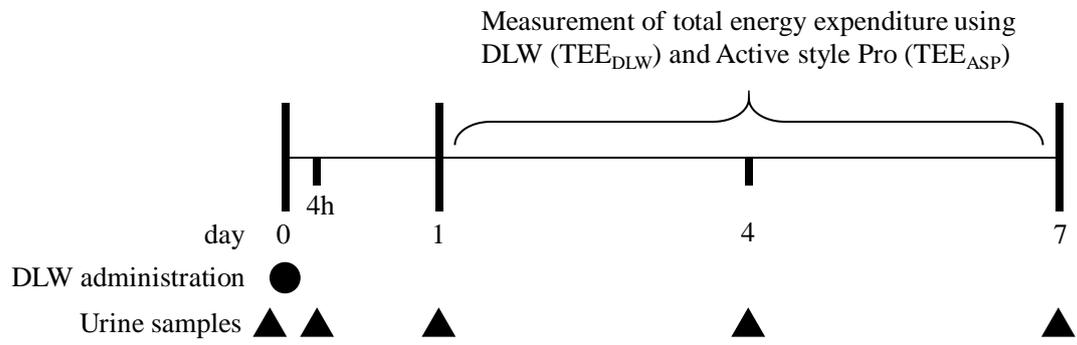


Fig. 3-1. Experiment design.

Table 3-1. Example of data output of Active style Pro.

Time	Physical activity intensity (METs)	discrimination of physical activity
⋮	⋮	⋮
7:25:00	0	no acceleration
7:25:10	0	no acceleration
7:25:20	2.2	non-ambulatory
7:25:30	5.2	non-ambulatory
7:25:40	2.1	ambulatory
7:25:50	4.9	ambulatory
7:26:00	3.6	ambulatory
⋮	⋮	⋮

Ambulatory: ambulatory activities.

Non-ambulatory: non-ambulatory activities.

METs: metabolic equivalents.

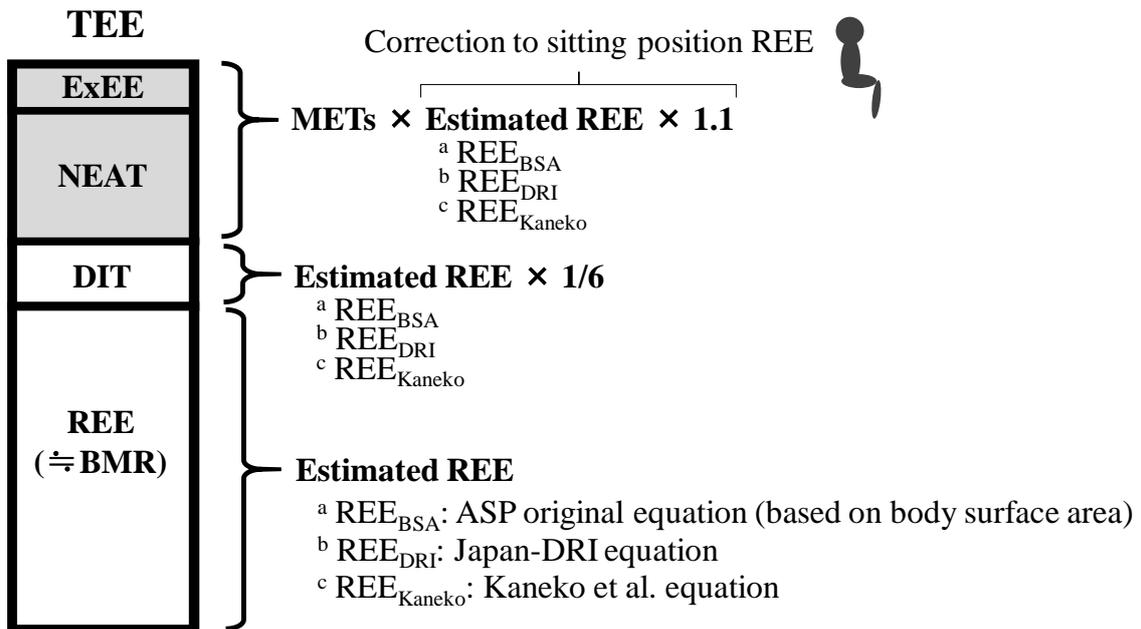


Fig. 3-2. TEE estimation by Active style Pro HJA-350 IT.

TEE: total energy expenditure, ExEE: Exercise energy expenditure, NEAT: non-exercise activity thermogenesis, DIT: diet-induced thermogenesis, REE: resting energy expenditure, BMR: basal metabolic rate, METs: metabolic equivalents, ^a REE_{BSA}: estimated by equation of Recommended Dietary Allowances for the Japanese fifth revision⁷⁸⁾. ^b REE_{DRI}: estimated by equation of Dietary Reference Intakes (DRI) for Japanese¹²⁾. ^c REE_{Kaneko}: estimated by equation of Kaneko et al.³⁷⁾.

Table 3-2. Characteristics of the subjects' physique and physical activity.

	Boys	Girls	Total
n	7	8	15
Height (cm)	148.0 (7.0)	146.6 (4.0)	147.3 (5.4)
Body weight (kg)	38.1 (2.9)	36.6 (4.6)	37.3 (3.9)
BMI (kg/m ²)	17.4 (1.6)	17.0 (1.5)	17.2 (1.5)
PAL	1.70 (0.18)	1.49 (0.14)	1.59 (0.18)
SED (min/d)			
Ambulatory	43 (10)	33 (10)	38 (11)
Non-ambulatory	254 (42)	377 (60)	320 (81)
Total	298 (40)	410 (55)	358 (75)
LPA (min/d)			
Ambulatory	113 (14)	96 (14)	104 (16)
Non-ambulatory	278 (34)	259 (54)	268 (45)
Total	391 (37)	355 (55)	372 (50)
MVPA (min/d)			
Ambulatory	42 (22)	29 (8)	35 (17)
Non-ambulatory	21 (4)	19 (5)	20 (5)
Total	63 (23)	48 (13)	55 (19)

PAL: physical activity level, SED: sedentary behavior, LPA: light-intensity physical activity, MVPA: moderate- to vigorous-intensity physical activity, Ambulatory: ambulatory activities, non-ambulatory: non-ambulatory activities.

Table 3-3. Evaluation of Active style Pro (ASP) based total energy expenditure (TEE).

	Total (n=15)					
	Mean (SD)	bias (SD)	bias (SD)	Accurate estimation ^a	Under estimation ^b	Over estimation ^c
	kcal/d	kcal/d	%	%	%	%
TEE _{DLW}	1946 (297)					
TEE predicted						
TEE _{ASP-BSA}	2157 (176) **	211 (212)	12.4 (12.5)	33	7	60
TEE _{ASP-DRI}	2302 (275) **	356 (227)	19.5 (13.2)	27	0	73
TEE _{ASP-Kaneko}	2092 (190) **	146 (187)	8.8 (11.0)	60	7	33

TEE_{DLW}: TEE measured by doubly labeled water (DLW) method, TEE_{ASP-BSA}: TEE predicted by ASP using resting energy expenditure (REE) equation of Recommended Dietary Allowances for the Japanese fifth revision (based on body surface area)⁷⁸⁾, TEE_{ASP-DRI}: TEE predicted by ASP using REE equation of Dietary Reference Intakes (DRI) for Japanese¹²⁾, TEE_{ASP-Kaneko}: TEE predicted by ASP using REE equation of Kaneko et al.³⁷⁾, ^a: Percentage of the subjects predicted by equation within $\pm 10\%$ of measured TEE, ^b: Percentage of the subjects predicted by equation $< 90\%$ of measured TEE, ^c: Percentage of the subjects predicted by equation $> 110\%$ of measured TEE, **: Significantly different from TEE_{DLW}, $p < 0.01$ (paired t-test).

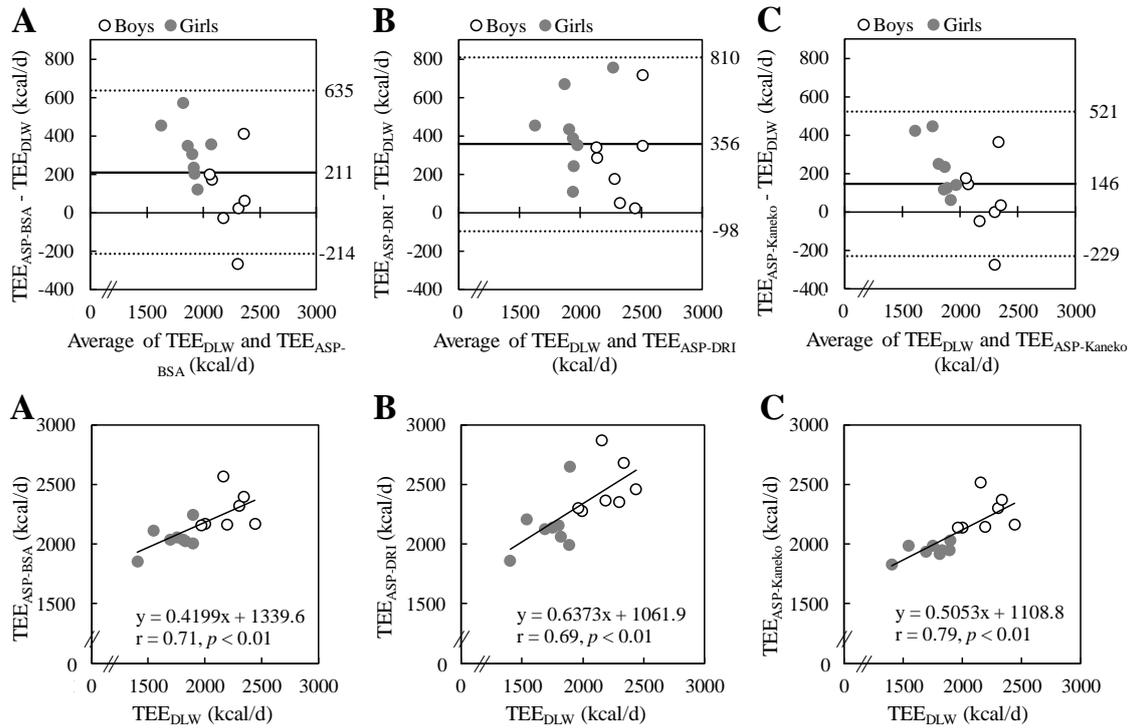


Fig. 3-3. Bland-Altman (upper) and correlation plot (under) for evaluation of Active style Pro (ASP).

In the upper graph, the thick straight line represents mean and dashed lines represent the lower and upper limits of agreement (2 standard deviations). (A) TEE predicted by ASP using resting energy expenditure (REE) equation of Recommended Dietary Allowances for the Japanese fifth revision (based on body surface area)⁷⁸⁾. (B) TEE predicted by ASP using REE equation of Dietary Reference Intakes (DRI) for Japanese¹²⁾. (C) TEE predicted by ASP using REE equation of Kaneko et al.³⁷⁾. In the under graph, the relationship between TEE measured by doubly labeled water (DLW) method and TEE predicted by ASP.

Table 3-4. Relationship between accelerometer estimation bias and BMI, sedentary behavior, and physical activity.

	BMI (kg/m ²)	SED (min/d)	LPA (min/d)	MVPA (min/d)
Bias (predicted TEE - TEE _{DLW})				
TEE _{ASP-BSA} (%)	-0.27	0.67 **	-0.37	-0.40
TEE _{ASP-DRI} (%)	0.03	0.71 **	-0.38	-0.50
TEE _{ASP-Kaneko} (%)	-0.34	0.53 *	-0.27	-0.30

TEE_{DLW}: TEE measured by doubly labeled water (DLW) method, TEE_{ASP-BSA}: TEE predicted by Active style Pro (ASP) using resting energy expenditure (REE) equation of Recommended Dietary Allowances for the Japanese fifth revision (based on body surface area)⁷⁸⁾, TEE_{ASP-DRI}: TEE predicted by ASP using REE equation of Dietary Reference Intakes (DRI) for Japanese¹²⁾. TEE_{ASP-Kaneko}: TEE predicted by ASP using REE equation of Kaneko et al.³⁷⁾, SED: sedentary behavior, LPA: light-intensity physical activity, MVPA: moderate- to vigorous-intensity physical activity, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, significantly correlated with bias (Pearson's Correlation Coefficient).

第 4 章

Table 4-1. Characteristics of the subjects.

	Boys (n = 26)		Girls (n = 16)		<i>p</i>
	Mean	(SD)	Mean	(SD)	
Height (cm)	140.3	(5.9)	142.7	(7)	0.24
Body weight (kg)	36.9	(7.0)	34.6	(4)	0.26
BMI (kg/m ²)	18.7	(3.1)	17.0	(2)	0.02 *
TEE _{DLW}	1995	(263)	1804	(264)	0.01 ^a **
pREE (kcal/d)	1274	(118)	1145	(59)	0.00 **
PAL	1.57	(0.15)	1.57	(0.20)	0.89
I (n)	12		9		0.53 ^b
II · III (n)	14		7		
Accelerometer wearing time (h/d)	13.3	(1.6)	13.9	(2)	0.26
Step count (steps/d)	13789	(2296)	11172	(2928)	0.00 **
Micro activity (LC 0-0.5) (min/d)	428	(76)	480	(80)	0.04 *
LPA (LC 1-4) (min/d)	312	(50)	298	(57)	0.41
MVPA (LC 5-9) (min/d)	59	(17)	47	(16)	0.04 *
MVPA components (min/d)					
Sporadic (< 4 min)	24	(5)	22	(4)	0.36
Short bouts (4-10 min)	24	(10)	21	(10)	0.36
Medium-to-long bouts (≥ 10 min)	11	(8)	4	(6)	0.00 ^a **
Total bouts (≥ 4 min)	38	(21)	25	(14)	0.02 ^a *

TEE_{DLW}: total energy expenditure measured by doubly labeled water (DLW) method. pREE: resting energy expenditure predicted by equation of Kaneko et al.³⁷. PAL: physical activity level. LPA: light-intensity physical activity. MVPA: moderate- to vigorous-intensity physical activity. ^a: Mann-Whitney U test, otherwise t-test was used. ^b: Chi-squared test, *: *p* < 0.05, **: *p* < 0.01, significant difference between boys and girls.

Table 4-2. BMI, total energy expenditure (TEE), and physical activity among groups by physical activity level.

	Physical activity level (PAL)		<i>p</i>
	I Sedentary	II · III Moderately active and Active	
BMI (kg/m ²)	18.8 (3.0)	17.3 (2)	0.04 ^a *
TEE _{DLW}	1785 (182)	2060 (290)	0.00 ^a **
PAL	1.44 (0.07)	1.70 (0.14)	0.00 ^a **
Step count (steps/d)	11395 (2514)	14188 (2449)	0.00 **
Micro activity (LC 0-0.5) (min/d)	457 (65)	438 (95)	0.69 ^a
LPA (LC 1-4) (min/d)	296 (52)	318 (52)	0.17
MVPA (LC 5-9) (min/d)	48 (17)	60 (16)	0.01 ^a *
MVPA components (min/d)			
Sporadic (< 4 min)	23 (6)	23 (4)	0.17
Short bouts (4-10 min)	20 (10)	26 (9)	0.03 ^a *
Medium-to-long bouts (≥ 10 min)	6 (6)	11 (8)	0.02 ^a *
Total bouts (≥ 4 min)	26 (14)	40 (22)	0.01 ^a *
MVPA components (LC intensity)			
Sporadic (< 4 min)	6.7 (0.4)	6.7 (0.4)	0.76
Short bouts (4-10 min)	7.0 (0.5)	7.3 (0.6)	0.06
Medium-to-long bouts (≥ 10 min)	7.2 (0.9)	7.3 (0.9)	0.71 ^a
Total bouts (≥ 4 min)	7.0 (0.5)	7.3 (0.5)	0.02 *

All values are mean (SD). TEE_{DLW}: TEE measured by doubly labeled water (DLW) method.

LPA: light-intensity physical activity. MVPA: moderate- to vigorous-intensity physical

activity. ^a: Mann–Whitney U test, otherwise t-test was used. *: *p* < 0.05, **: *p* < 0.01, significant

difference between PAL I and PAL II · III group.

Table 4-3. Weekday and weekend physical activity before and after 15 p.m. among groups by physical activity level.

	From 0 a.m. to 15 p.m.			From 15 p.m. to 24 p.m.		
	PAL I	PAL II · III	<i>p</i>	PAL I	PAL II · III	<i>p</i>
	Mean (SD)	Mean (SD)		Mean (SD)	Mean (SD)	
Weekday (min/d)						
Micro activity (LC 0-0.5)	259 (49)	244 (52)	0.34	209 (53)	189 (68)	0.64 ^a
LPA (LC 1-4)	184 (32)	198 (39)	0.21	123 (27)	131 (33)	0.39
MVPA (LC 5-9)	36 (13)	40 (14)	0.27 ^a	19 (9)	29 (10)	0.00 ^{**}
MVPA components						
Sporadic (< 4 min)	16 (4)	16 (4)	0.87	9 (3)	10 (2)	0.68
Short bouts (4-10 min)	16 (7)	18 (8)	0.51	7 (6)	13 (5)	0.00 ^{a **}
Medium-to-long bouts (≥ 10 min)	4 (6)	6 (7)	0.21 ^a	2 (4)	7 (6)	0.00 ^{a **}
Total bouts (≥ 4 min)	20 (11)	24 (12)	0.16 ^a	9 (7)	20 (9)	0.00 ^{**}
Weekend (min/d)						
Micro activity (LC 0-0.5)	210 (82)	234 (110)	0.43	222 (62)	219 (65)	0.88
LPA (LC 1-4)	140 (67)	165 (78)	0.27	128 (49)	127 (62)	0.94
MVPA (LC 5-9)	19 (20)	24 (21)	0.35 ^a	12 (9)	13 (15)	0.61 ^a
MVPA components						
Sporadic (< 4 min)	10 (7)	11 (9)	0.67 ^a	7 (4)	6 (5)	0.63
Short bouts (4-10 min)	7 (8)	9 (10)	0.45 ^a	4 (6)	5 (6)	0.96 ^a
Medium-to-long bouts (≥ 10 min)	3 (7)	5 (7)	0.25 ^a	1 (4)	3 (6)	0.22 ^a
Total bouts (≥ 4 min)	10 (14)	14 (13)	0.16 ^a	5 (7)	7 (12)	0.92 ^a

All values are mean (SD). LPA: light-intensity physical activity. MVPA: moderate- to vigorous-intensity physical activity. ^a: Mann–Whitney U test, otherwise t-test was used. **: *p* < 0.01, significant difference between PAL I and PAL II · III group.

謝辞

本博士論文をまとめる上で、本当に多くの方々のご支援、ご協力を賜りました。特に、同志社大学スポーツ健康科学部教授石井好二郎先生には、研究データのまとめ方はもちろん、研究者としての心構えに至るまで、多大なるご指導を賜りました。心から感謝申し上げます。また、副査としてご指導いただきました同学部教授北條達也先生、並びに、早稲田大学スポーツ科学学術院教授岡浩一朗先生に感謝いたします。

二重標識水法を日本人に初めて導入された同志社大学スポーツ健康科学部准教授海老根直之先生からは、貴重なご助言をいただきました。また、国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所の山田陽介氏および同研究所の中江悟司氏からも専門的な立場からの貴重なご助言をいただきました。さらに、京都学園大学健康医療学部教授平川和文先生、同学部教授木村みさか先生、山形大学地域教育文化学部教授鈴木和弘先生、静岡産業大学経営学部教授小澤治夫先生からはデータの収集・分析に関して多大なるご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

石井研究室に所属する博士後期課程の青木拓巳さん、博士前期課程の福田宗孝さん、湯澤章さんには、毎週の大学院ゼミの中で有益なご討論ご助言をいただきました。ここに感謝いたします。

本博士論文は JSPS 科研費 JP18300197, JP20300219 の助成を受けたものです。