

財団法人 ミズノスポーツ振興会助成研究 研究報告書

日本国民を対象とした二重標識水法による身体活動量調査についての系統的レビュー
および統合データベースの構築とその解析

著者： 海老根 直之 1)、引原 有輝 2)、吉武 裕 3)

所属：

- 1) 同志社大学 スポーツ健康科学部
- 2) 千葉工業大学 工学部 教育センター
- 3) 鹿屋体育大学 体育学部

1. はじめに

本稿では、身体活動量の評価や食事摂取基準に関する研究において現在では広く用いられるようになった二重標識水 (doubly labeled water: DLW) 法の我が国での普及の歴史に着目し、導入の経緯から同法の運用によって研究がどのような広がりを見せてきたのかについてのレビューを行う。特に実験毎に単一の論文として完結を目指す場合には述べられることのない雑感や知られていない背景についても触れていく。これに加え、国内において方法論および分析技術の面において確立されていく過渡期の段階で、筑波大学体育科学系故齊藤慎一教授と著者らが共に取り組んだ研究について、データを再集積して解析を行うことで、エネルギー消費量測定における簡易推定法の精度についても言及する。

2. 二重標識水法について

エネルギー消費量や身体活動量を評価するために数多くの方法が考案、実用されているが、中でも本稿で取り上げる二重標識水 (doubly labeled water: DLW) 法は比較的新しい方法である。DLW 法では、対象者に水を飲んでもらう手続きと定期的に採尿をしてもらう手続きで日常生活下の総エネルギー消費量を正確に求めることが可能である。測定に際して被検者に機器を装着してもらう必要がなく、測定下にあることを意識させずに調査を実施することができる。このため、実験室外、いわゆるフィールドにおけるエネルギー消費量や身体活動量評価のゴールドスタンダードとして国際的に認知されている。

方法の詳細は紙面の制約により他所に委ねるが (齊藤ら, 1999; 海老根, 2002)、この方法は水 (H_2O) を構成する酸素と水素の原子に、それぞれの安定同位体である ^{18}O と重水素 (2H または D : deuterium) で標識した水を測定に用いることからこの名前がついている。初めての動物への応用は原理が確立されてから比較的早期に実現されており 1955 年の Lifson ら (1995) の研究にまでさかのぼるが、その後約 30 年間は ^{18}O が大変高価であったため、多量の投与が求められるヒトへの応用は見送られてきた。しかし、同位体比質量分析計 (isotope ratio mass spectrometer: IRMS) の改良により、同位体の投与量を減らしても解析が十分可能になったことから、1982 年に Schoeller と van Santen (1982) は 4 名の被検者を対象として初めてヒトに適用した。安定同位体は文字通り安定であり、放射線を発生する放射性同位体とは全く性質が異なる。しかしながら、被爆国である我が国においては“同位体”という言葉の響きが放射能を連想させてしまうためか、安全性についての危惧が拭い去れず、欧米各国の円滑な導入に比べ、我が国での利用が始まったのは最近のことである (Ebine et al., 2000)。

3. 二重標識水法の国内研究への導入

本邦において、日本人を対象とした初めての研究を実施したのは、筑波大学体育科学系 故齊藤慎一らのグループであった (Ebine et al., 2000)。これは、シンクロナイズド・スイミング選手の一日の総エネルギー消費量を測定した研究であった。高いレベルで競技に打ち込んでいるスポーツ選手にとっては、測定装置などによる身体活動の制限や心理的な圧迫は享受しがたいものである。トレーニングの現場から得られるデータの重要性に相反して、信頼のある方法でエネルギー消費量の測定が実施しにくいという状況を、DLW 法の測定期間中の日常生活への介入が最小限である利点をもって打破した画期的な研究であった。これによって、条件付きではあるものの日本国内でも DLW 法を用いた調査・研究が実施可能であることが証明された。当時は ^{18}O の供給が極端に細かったため、一人あたりの投与に要する DLW のコストは驚くほど高額であった (20 万円程度)。これに加えて、分析面においても国内の研究者には未知な部分が多く、その分析が行える実験室を探すことすら困難であった。

これは高価な IRMS を所有する研究機関が少なかったことに加え、基本的に低濃度の試料（たとえば天然の水や水道水）用に運用されている装置に、あえて同位体濃度を高めた試料を流すことが実験装置の管理の観点から現場的に受け入れ難かったからである。このような背景を受け、同位体の分析および DLW 法の運用についてはモンリオールに所在する McGill University の Peter JH Jones 教授と Jian-Ying Feng 研究員の協力のもとに実施された。共同研究が成り立った理由には、Jones 教授が栄養学分野の新進気鋭の研究者で、新規性の高いテーマに前向きであったことに加え、彼の研究室では IRMS を複数台所有しており日常的に同位体分析が行われていたことがあげられる。これにより実験手続きは全て国内で行い、試料の分析は海外で行うという特殊な形態で研究が実現した。

4. スポーツ選手のエネルギー必要量について

DLW 法の導入によるシンクロナイズド・スイミング選手を対象とした測定を皮切りにスポーツ選手のエネルギー必要量を導き出すためのエネルギー消費量、身体活動レベル*（physical activity level : PAL）（＝総エネルギー消費量÷基礎代謝量）の調査は、日常的に強度の高いスポーツ活動に従事するプロ選手ならびにそれに準じる選手の測定へと波及していった。

日本人プロ・サッカー選手を対象とした測定では、クラブの年間計画によって身体活動量が増減することに配慮し、同一のチームに対して試合期および合宿期と2回の測定が行われた (Ebine et al., 2002; 海老根, 2002)。この測定により、試合期の平均の PAL が 2.2 ± 0.4 （平均値±標準偏差）であるのに対し、合宿期においては総じて練習の量と強度の増加にともなって 2.5 程度にまで高められることが明らかとなった。後に実施された韓国リーグのプロ・サッカー選手を対象とした試合期の測定においても 2.2 程度の PAL が観察されているが、異なる組織で異なる試合スケジュールが課されているにもかかわらず、同程度の値が得られたことはたいへん興味深い (金ら, 2003)。

一方で、高強度のトレーニングによって PAL がどこまで高められるのかについて関心が寄せられ、長距離走選手の高所トレーニングに着目した研究も行われた (海老根, 2002)。これも、トレーニング活動を妨げることのない DLW 法の優位性があればこそその研究である。今日までに報告されている日本人のデータとしては最高値となる 3.0 程度の PAL が記録された。

ここまでで得られているスポーツ選手の PAL の結果の集積から、プロやエリート・スポーツ選手はトレーニング計画に応じて一般人に比較して多量のエネルギー供給が求められることが裏付けられた。その一方で試合日と休息日、練習日によって一週間を通じて活動量がコントロールされる通常の試合期や日常的なトレーニング実施時に限定して考えた場合、PAL は 2.2 前後であり、激しい身体活動が要求される他の職業、たとえば消防士 (2.2 ± 0.3) と大きな差が生じないのは興味深い結果である (東野ら, 2003)。

*身体活動レベル (PAL) は、年齢、性別、体格、体組成が異なる対象者であっても、生活活動の強度を公平に評価できる国際的な指標である (柏崎, 1997)

5. エネルギー消費量の簡易推定法についての検討

DLW 法は非拘束的条件下で比較的長期に総エネルギー消費量を正確に測定可能な方法であり、ヒトのエネルギー必要量を求める上で広範囲に応用が可能である。しかしながら、それと同時にいくつか取り扱いに理解を要する点がある。一つは、測定の対象者の身体活動の内容（時間や強度など）についての詳細な情報が取得できない点である。また、測定にかかる費用が高額であることに加え、分

析完了までに時間を要すことで被検者に対しての即時のフィードバックが難しく、運動指導などの場面では運用が難しい。そこで、DLW 法に代わるもしくは併用可能なエネルギー消費量、身体活動量の簡易推定法の開発が精力的に進められている。田中・吉武・齊藤らの研究班ではこの課題に早期から取り組んできた（海老根ら，2002）。本章では、簡易推定法のうち現段階で広く普及している加速度計法および活動記録（activity record : AR）法について、その総エネルギー消費量測定における精度を明らかにすることを目的とし、我々のグループが個々の研究として取り組んだデータを改めて再集積し、年齢および運動習慣に着目してそれらを解析することとした。

5. 1. 簡易推定法の精度検証にまつわる背景

本邦では、生活習慣病のリスクファクターの1つである肥満の問題が、幼児期や児童期、青年期などの若年層にも波及している（Matsushita et al., 2004）。若年期の肥満問題は、成人期以降の肥満問題、さらにはそれに関連する代謝疾患に関与することから（Hancox et al., 2004）、現代人には肥満の早期予防・改善が必要である。肥満の発生要因は、エネルギー出納の不均衡によるため、肥満に対するアプローチとしては、まず一日の総エネルギー消費量（total energy expenditure : TEE）に応じた適切な食事量を見直すことが重要となる。ヒトの TEE は、主に基礎代謝量（basal metabolic rate : BMR）、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（physical activity energy expenditure : PAEE）により構成されており、さらに子どもの場合、成長に伴う組織増加分のエネルギー量が付加される。これらの構成要素のうち、PAEE は個人差が大きく、また推定誤差も生じやすいことから、PAEE の推定精度を高めることは、TEE の評価において重要な課題であると認識されている（Leenders et al., 2003 ; Mathews, 2005）。TEE の精度の高い評価方法には、DLW 法に加えダグラスバッグおよび小型の携帯用酸素摂取量計を用いた間接熱量測定法などがあるが、日常生活活動時の連続計測の困難さから、加速度計や AR 法などの推定法を用いることが一般的である。

加速度計としては、1 軸または 3 軸のものが開発、市販されており、活動時に生じる衝撃加速度から独自のアルゴリズムを介してエネルギー消費量を算出する。本邦では、1 軸加速度計ライフコーダ（Kenz Lifecorder EX : LC, スズケン社製）が広く普及しており、幅広い年齢層で TEE を評価するツールとして利用されている。これまでの報告では、DLW 法を基準とした場合、LC による成人の TEE は過小評価されるが、個人差を評価できることが統一的な知見として示唆されている（Rafamantanantsoa et al., 2002 ; 東野ら，2003）。しかしながら、元来、このツールは成人の生活習慣病の予防改善をねらいとして製作されていること、さらに活動時の出現加速度からエネルギー消費量へ変換するアルゴリズムは、歩行、走行活動時の加速度と酸素消費量との関係により導かれたものであるという特徴を有している（野村ら，1986 ; 山田と馬場，1990）。これらの点に留意すると、幼児期から青年期までの子どもを対象にした場合、成人を対象として得られた妥当性に関する知見とは必ずしも合致しない可能性が考えられる。

一方、AR 法では、対象者自身が所定の用紙に生活活動を記録し続けるため、推定精度は対象者の課題遂行能力に依存する。特に子どもへの適用に留意すべき点は、成人よりも多様かつ短時間の断続的な行動内容で構成される活動（Bailey et al., 1995）を定期的に記録することが可能となる対象年齢および、各活動内容をエネルギー代謝等量（METs）に変換し、1METs（座位安静時）を 3.5ml/kg/min として各自の体重を乗じるエネルギー消費量の算出方法についてである。この場合、子どもの体重あたりの安静時代謝量（ml/kg/min）は、成人でのそれとは異なると考えられていることから（Harrell et al., 2005）、成人で用いられる算出式では TEE の大きな推定誤差を誘発する原因になりかねない。

これらのことを踏まえて、本章では AR 法および加速度計 (LC) の評価特性に留意し、対象年齢 (検討課題 I : 若齢者を対象とした TEE の妥当性に関する検討) および対象者の活動特性 (検討課題 II : 運動習慣の有無による TEE の妥当性の差異に関する検討) と関連づけて、これらの推定法の評価精度について検討していく。

5. 2. 解析の方法

5. 2. 1. 対象者

小学生男女 12 名 (男子 : 6 名、女子 : 6 名) および高校生 1 年生から大学 1 年生までの男女 31 名 (男子 : 22 名、女子 : 9 名) を対象とした。高校生、大学生の対象者 31 名のうち、男子 14 名は週 3 日以上の運動習慣を有していたが、残りの男子 8 名、女子 9 名については定期的な運動習慣はなかった。なお、女子については、エネルギー代謝の亢進を配慮して月経期間中を避けて測定を行った。対象者の身体的特徴は、それぞれ Table 1 と 2 に示す通りである。対象者および保護者には調査の目的と内容について十分な説明を行い、同意書への署名を得た上で測定が行われている。

5. 2. 2. 総エネルギー消費量の測定

①二重標識水 (DLW) 法

DLW 法による TEE の測定期間は 1 週間とし、詳細の方法については Ebine ら (2000) の方法に従った。なお、小学生については、同位体の体内平衡時間を求めるための尿採取のタイミングを、DLW 投与後の 2 時間後と 3 時間後に設定した (Delany et al., 1995)。

②活動記録法

対象者には、DLW 法の測定期間中の 3 日間 (平日 : 2 日、休日 : 1 日) の行動内容を所定の記録用紙に記載させた。その際、動作中の姿勢、内容、強度をできるだけ正確に記入するよう指示した。動作が複雑である場合には、その動作を行なった際の状態、例えば、歩行、走行、仰臥位、座位、立位を明記させ、その行動の占める割合についても記載させた。特に小学生の場合には、帰宅後に学校での活動内容の記録について再度確認し、必要に応じて加筆修正することを保護者に依頼した。各身体活動時のエネルギー消費量は、記載された各動作が Ainsworth ら (2000) により報告された身体活動の METs Compendium のいずれかに該当するか、もしくは、もっとも類似する内容を選択し、体重およびその所要時間を乗じて各身体活動別に算出した。また、TEE はそれらの 24 時間の合算値として扱った。なお、各身体活動のエネルギー消費量の算出の際には、1MET を 1kcal/kg/h と仮定している (AR 法)。ただし、小学生については、上記の算出方法に加えて、実測した 1 分間あたり BMR を 1.2 倍した座位での安静時代謝量 (resting energy expenditure : REE) を求め、各活動の相当する METs 値と所要時間を乗じてエネルギー消費量を算出した (AR measure : ARme 法)。

③ライフコーダ (LC)

対象者には、休日 (土・日曜日) 2 日を含む 3~7 日間 (小学生 : 7 日間、高校生、大学生 : 3 日間) にわたり、LC (32g, 50×31×11mm) の装着を依頼した。装着条件として、睡眠および入浴時を除いた日常生活において、左右のどちらかの腰部に装着させ、常時、機器の水平状態を保つように指示した。LC には 1 軸の加速度センサーが内蔵されており、身体の移動に伴い生じる鉛直方向上の衝撃加速度とその頻度を感知し、エネルギー消費量、活動強度に要した時間および歩数を評価することが可能である。その際には、安静時 (運動強度 0 および 0.5) と身体活動時 (運動強度 1-9) を含め、身体活動を計 11 段階に強度分類しており、各段階でのエネルギー消費量は、事前に入力した性、年齢、身

長、体重に基づいて算出される仕組みになっている。TEE は、各段階のエネルギー消費量の合算値に DIT (TEE の 10%として推定) と体表面積を介して推定される BMR を加算したものである。

$$\text{PAEE (kcal)} = \text{Ka} \times \text{Weight (kg)} \dots (1)$$

$$\text{Inactive EE (kcal)} = \text{Kx} \times \text{BMR} \dots (2)$$

$$\text{TEE (kcal)} = \text{BMR} + 0.1\text{TEE} + \text{PAEE} + \text{Inactive EE} \dots (3)$$

PAEE : 活動時のエネルギー消費量 ; Ka, Kx : 係数 ; Inactive EE : “微小運動”時のエネルギー消費量

5. 2. 3. 基礎代謝量の測定

①小学生の場合

BMR は、TEE の測定期間中もしくは測定期間後 2 週間以内の休日早朝に対象者の自宅で測定した。空腹状態の対象者を仰臥位安静にさせ、ダグラスバッグを用いて呼気ガスを 15 分間採取し、換気量を乾式ガスメーター (DC-5A : 株式会社シナガワ製) で測定した。その後、O₂濃度と CO₂濃度を質量分析計 (ARCO-1000 : アルコシステム社製) により分析し、Weir (1949) の式を用いて BMR を算出した。また、測定の際には、対象者のマスクに対する順応状態を考慮し、装着 10 分後に測定を開始した。

②高校生、大学生の場合

対象者には、前日の夕食後より 12 時間以上絶食した状態で、早朝に実験室へ来室すること、また、来室の際は激しい動作を避けできる限りゆっくり移動することを指示した。実験室にて仰臥位で 20 分間の安静状態を維持させた後、呼気ガス分析器 (AERO MONITOR AE300S : ミナト医科学社製) を用いて、安静状態における 20 分間の呼気量および呼気ガス中の O₂濃度と CO₂濃度から酸素消費量 ($\dot{V}O_2$) および二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) を測定した。なお、安定した呼吸下での呼気量を測定するために、測定開始後の 5 分間のデータを分析から除外し、6 分目以降、20 分目までの 15 分間のデータにもとづき、Weir (1949) の式を用いて BMR を算出した。

5. 2. 4. 統計処理

測定値は、平均値±標準偏差 (Mean±SD) で表した。各変数間の平均値の有意差には Student's paired t-test を、各変数間の関係性については、サンプルの分布に正規性を確認できた場合は、ピアソンの積率相関分析を、正規性を確認できなかった場合は、スピアマンの順位相関分析を用いて検定した。いずれの統計解析にも、JMP 5.0.1 (SAS インスティテュートジャパン, 東京) を用いた。また、DLW 法に対する各推定法の正確度 (平均値誤差 : mean difference) と精密度 (信頼限界幅 : ±2SD) についても検定した。有意水準はいずれの場合も危険率 5%未満で判定した。

5. 3. 解析結果

5. 3. 1. 小学生における解析結果

それぞれの方法による小学生の TEE の平均値はそれぞれ 1991±279kcal/d (DLW 法)、1413±295kcal/d (AR 法)、2083±304kcal/d (ARme 法) および 1836±223 kcal/d (LC) であった (Table 3)。DLW 法での TEE と各推定法によるそれとの関係性を検討した結果、いずれも有意な相関関係 (AR : r=0.70、ARme : r=0.69、LC 法 : r=0.71) が認められた (Figure 1)。

DLW 法を基準として、各推定法の正確度 (平均値誤差) と精密度 (信頼限界幅) を検討した結果

を Figure 2 に示した。DLW 法および各推定法による TEE の平均値の差は、AR 法が $-578\pm 222\text{kcal/d}$ ($-29\pm 10\%$)、ARme 法が $+92\pm 231\text{kcal/d}$ ($+5\pm 12\%$)、LC 法が $-155\pm 196\text{kcal}$ ($-7\pm 10\%$) であり、それぞれ有意差が認められた。一方、信頼限界幅は AR 法が $-134\text{kcal/d}\sim -1021\text{kcal/d}$ 、ARme 法が $554\text{kcal/d}\sim -371\text{kcal/d}$ 、LC 法が $236\text{kcal/d}\sim -546\text{kcal/d}$ であった。

5. 3. 2. 高校生および大学生における解析結果

DLW 法、AR 法および LC 法による対象者の TEE の平均値はそれぞれ Table 4 に示したとおりである。DLW 法により評価した TEE と各推定法により評価したそれとの間には、それぞれ有意な正の相関関係 (AR : $\rho=0.84$ 、LC : $\rho=0.92$) が認められた (Figure 3)。運動習慣の有無により群分けを施した場合において、DLW 法による TEE と各推定法によるそれとの関係性を検討すると、運動群 (AR : $r=0.73$ 、LC : $r=0.81$) および非運動群 (AR : $r=0.60$ 、LC : $r=0.78$) とともにそれぞれ有意な正の相関関係が認められた。

一方、DLW 法を妥当基準として、各推定法の正確度 (平均値の差) と精密度 (信頼限界値) を検討した結果 (Figure 4)、DLW 法と各推定法による TEE の平均値の差は、AR 法で $-463\pm 378\text{kcal/d}$ ($-12\pm 9\%$ 、ただし運動群 : $-14\pm 8\%$ 、非運動群 : $-10\pm 10\%$)、LC 法で -1081 ± 643 ($-28\pm 9\%$ 、ただし運動群 : $-35\pm 4\%$ 、非運動群 : $-22\pm 7\%$) であり、それぞれ有意な差が認められた。信頼限界値は AR 法で $293\text{kcal/d}\sim -1219\text{kcal/d}$ 、LC 法で $205\text{kcal/d}\sim -2236\text{kcal/d}$ であった (Figure 4)。

5. 4. 考察

5. 4. 1. 小学生を対象とした活動記録法について

成人を対象にした場合では、AR 法による TEE は、DLW 法のそれと比較して、平均値の差が $+0.3\%\sim -12.2\%$ の範囲内にあることが報告されている (Schulz et al., 1989 ; 海老根ら, 2002 ; Rafamantanantsoa et al., 2002 ; 東野ら, 2003 ; 彭ら, 2004)。本研究では、成人の METs を参照して、1MET (3.5ml/kg/min) は 1kcal/kg/h に相当するという仮定した算出式 (AR 法) を用いた場合において TEE が有意に過小評価された。この式によりエネルギー消費量の算出においては、体重が比例 (直線) 的に関与していると仮定しているため、対象者の体重差が直接的に結果に反映される。しかし、Roemmich ら (2000) は、青少年の体重あたりの REE は成人と比較して高値を示すことや、思春期前の子どもの REE は思春期中の子どものそれと比較して高値であることを報告しており、METs への性、年齢、体格の影響については今後の検討が必要である。一方、個々の実測した REE に基づいて、METs とその所要時間を乗じて求めた TEE (ARme 法) は、DLW 法によるそれと比較しておよそ 5%程度過大に評価された。Harrell ら (2005) は、sedentary activity ($1.5\text{METs}\sim 2.3\text{METs}$)、low-moderate intensity activity ($2.5\text{METs}\sim 5.0\text{METs}$)、high intensity activity ($3.8\text{METs}\sim 8.0\text{METs}$) に相当する各身体活動中のエネルギー消費量を実測した REE で除して METs を算出し、これらを Ainsworth ら (2000) により報告された成人の METs と比較している。その結果、成人の METs と比較して子どもの実測した METs は sedentary および low-moderate intensity activity では過小評価され、high intensity activity では過大評価される傾向にあったことを報告している。体育やクラブ活動などの運動習慣を有する児童では一般の成人と比較して、high intensity activity の頻度が多くなることが予想され、これが TEE を過大評価した要因の 1 つではないかと推察される。また、児童の場合、身体活動内容の詳細な記録が煩雑になり易く、例えばスポーツ活動の際には、休憩や着替えなどのような必ずしも運動に該当しない時間帯についても、記録用紙上では一括りにスポーツ活動と記録されてしまうような可能性がある。したがって、外遊びやスポー

ツ活動などのような活発な身体活動中のエネルギー消費量は過大評価される可能性が高いと推察する。

5. 4. 2. 高校生および大学生を対象とした活動記録法について

対象者全体をまとめた場合および運動習慣の有無で群分けした場合のいずれにおいても、AR 法による TEE は、DLW 法によるそれとの間に有意な相関関係が認められた。また、DLW 法による TEE に対する平均値の差は $-12\pm 9\%$ であり、成人を対象として報告されたこれまでの結果の範囲内にあった。また、これまでに Roemmich ら (2000) は、BMR (kcal/kg/h) が成人と近似する年齢を 16 歳と考え、それよりも低い年齢では有意に高値を示すことを報告している。さらに Harrell ら (2005) は、グループ 1 (男子: 8-12 歳、女子: 8-11 歳)、グループ 2 (男子: 13-15 歳、女子: 12-14 歳) と比較して、グループ 3 (男子: 16-18 歳、女子: 15-18 歳) は、複数の身体活動における実測した METs が成人のそれに対してより近似することを報告している。これらの知見から、少なくとも 16 歳以上であれば、成人の METs に基づいて TEE を推定することは可能であると推察される。しかしながら、これまでの成人を対象とした多くの報告では、AR 法により推定した TEE と DLW 法のそれとの誤差は、個人差が大きいと考えられている (山村ら, 2002)。このことは、少なからず METs が他の要因、例えば年齢、体格、エネルギー効率などの影響を受けている可能性を推察させる (Spadano et al., 2003; Masse et al., 2004)。一方、運動群に分類された運動習慣を有する者の場合には、特に運動中のエネルギー消費量が低強度から高強度にわたり複数の活動で構成され、それを正確に記載する上では記録が煩雑にならざるを得ないものと考えられる。DLW 法による TEE が高値を示すほど、AR 法による TEE は過小評価される ($\rho=0.66$, $p<0.01$, Figure 4)、あるいは非運動群よりも運動群 ($-10\pm 10\%$ vs. $-14\pm 7\%$) で過小評価の程度が大きいという解析結果には、その点が関与しているものと推察される。特に、本研究の運動群の場合、運動中のエネルギー消費量を概算すると 2174 ± 247 kcal に達する。これは TEE の $51\pm 4\%$ を占めており主要な構成要素の 1 つであることを示唆している。したがって、運動実践者の場合、運動中のエネルギー消費量をいかに厳密に評価できるかが、TEE を正確に評価するために重要であることは間違いない。

5. 4. 3. 小学生を対象としたライフコーダ法について

DLW 法による TEE に対して LC 法によるそれは、 -155 ± 196 kcal/d ($-7\pm 10\%$) であり、これまでの成人の報告と比較すると推定誤差は小さい。彭ら (2004) は、TEE が低い者ほど DLW 法と LC 法による TEE の誤差が小さくなることを報告しているが、本研究の対象者の DLW 法による TEE および PAL は 1991 ± 279 kcal/d、 1.48 ± 0.13 であり、これまでの成人での報告と比較して活動的でない。また、LC は座位や立位での歩行走行を伴わない低強度活動に要する時間が多い対象者では、エネルギー消費量を過小評価するという Kumahara ら (2004) や引原ら (2007) の報告がみられるが、本研究の対象者は PAL が 1.48 ± 0.13 程度に留まったにも関わらず、歩数が比較的高値 (11733 ± 2446 歩) であり、歩行と走行による PAEE への貢献が大きかったことが良好な精度が得られた原因の 1 つと推察される。LC の測定原理では、運動強度を決定する際に歩数と加速度の大きさから決定されることがわかっている (Kumahara et al., 2004; McClain et al., 2007)。その際、歩数は 1 歩目の加速度を検出後、1.5 秒以内に 2 歩目の加速度が検出されない場合、1 歩目を歩数として認識しないという「しっかり歩行」のみを評価するねらいで LC は製作されている。エネルギー消費量を算出するアルゴリズムには歩数の要素が加味されることは先に述べたとおりであるが、このことを踏まえると、一般成人と比較すると歩数が高値を示した本研究の対象者は、LC の測定原理に則した生活活動内容を有していたとも考えられよ

う。今後、対象者の活動内容に着目した更なる検討を実施することで LC の長所ならびに短所がより鮮明になるであろう。

5. 4. 4. 高校生および大学生を対象としたライフコーダ法について

LC 法の TEE は DLW 法のそれと比較して、有意に過小評価された (-28±9%, Figure 4)。この点に関しても、DLW 法やメタボリックチャンバー法による TEE に対して LC 法によるそれは過小評価されるというこれまでの報告 (Rafamantanantsoa et al., 2002 ; 東野ら, 2003 ; 彭ら, 2004 ; Kumahara et al., 2004) と一致している。本研究では、DLW 法による TEE が高値を示すほど、LC 法による TEE は過小評価される傾向 ($\rho = -0.93$, $p < 0.01$) が示された (Figure 4)。AR 法も同様の傾向を示したものの、回帰直線の傾きを比較すると LC 法がより高値を示している (AR : -0.21 vs. LC : -0.51)。しかしながら、LC 法における過小評価の傾向がより強い直線的 ($\rho = 0.93$, $SEE = 161.7$ vs. $\rho = 0.84$, $SEE = 280.8$) な関係にあることから、加速度からエネルギー消費量への換算過程において適切な補正を加えることで、その有用性を高められる可能性も考えられる。

LC 法による TEE が過小評価された原因としては、以下のことがあげられる。まず、運動群 (-35±4%) においては、第一に LC の機器のセンサー感度の上限閾値 (2G) の問題である。山田と馬場 (1990) は、時速 8km 以上の走行時では、衝撃加速度がセンサー感度の上限閾値を越え、速度の増加に伴う加速度の追従がみられないことを、また同様に樋口ら (2003) は、成人を対象として LC の加速度センサーが感知できる上限はおおよそ 10METs 程度の歩・走行運動までであることを報告している。さらに、Suzuki ら (1997) はアスリートを対象とした検討において、鉛直方向にのみ反応する LC は、横方向の動きが多い種目の選手の TEE を過小評価すると報告している。このような過小評価の要因となる身体活動は、運動群においてより顕著に出現する。実際に、活動記録に基づいて運動内容を確認したところ、スプリントトレーニング、サイドステップなどの敏捷性トレーニング、あるいは上体中心のウェイトトレーニングなどの LC では評価不可能な身体活動が含まれていた。第二に、激しいトレーニング後には運動後余剰酸素消費量 (excess post-exercise oxygen consumption : EPOC) により、運動習慣のない者ではみられないエネルギー消費量の亢進が生じていたことも予想される。EPOC とは、運動後に生じる無酸素性代謝産物である乳酸の除去、交感神経系活動の亢進、脂肪酸利用の亢進、グリコーゲンおよびクレアチンリン酸の再合成などの生体内での代謝応答 (Maehlum et al., 1986 ; 内田ら, 1999) である。DIT を評価する際は TEE のおおよそ 10%とする固定値を用いるが、EPOC は運動の時間や強度などに依存するため固定値を付加することは難しい。これまでの報告に基づく EPOC は、運動中のエネルギー消費量の 3-5%、あるいは安静時代謝量の 5-10%程度に相当すると考えられている (Speakman and Selman, 2003)。EPOC が LC により推定される TEE に及ぼす影響は数%程度であると推察されるが、運動の実施頻度、実施時間が長ければ、それに応じて推定誤差も生じやすいことになる。

一方、非運動群 (-22±7%) では、運動群 (-35±4%) と比較して過小評価の程度は小さかったものの、運動群同様に有意に過小評価された。その要因には、対象者の特性として日常生活における屋外での移動手段の多くが自転車であり、その際のエネルギー消費量を過小評価していることがあげられる。また、本研究で用いた加速度計とは異なるが、歩走行以外の低中強度活動時において他社製の 4 種類の加速度計から推定されたエネルギー消費量は、実測したエネルギー消費量と比較するといずれも有意に過小評価されることが報告されている (Matthews, 2005)。本研究の非運動群の場合、PAL が 1.86±0.16 であり、平均的な日本人成人の PAL (1.75) と比較してもやや活動的である。一般的に、PAL

が 1.75 の場合、1 日の平均歩数は 7000 歩～10000 歩程度であるとされているが、非運動群では 5838±2568 歩であり、歩行以外の活動が多かったことが推察される。したがって、歩走行を伴わない低中強度活動をいかに精度良く評価できるかが妥当性の向上への必要条件としてあげられよう。

ところで、LC は TEE を推定する上では幾つかの課題を有しているものの、活動特性に相違がみられる対象者であっても、日常生活中に身体活動がある程度含まれる集団であれば、個人間の大小関係を評価することが可能であることが示唆された（全体： $\rho=0.92$ ，運動群： $r=0.81$ ，非運動群： $r=0.78$ ）。

5. 5. 解析のまとめ

本章においては、AR 法および加速度計 (LC) による TEE の評価精度について、若齢者での適用や運動習慣実践者と非習慣者との精度比較について検討を行った。

活動記録に基づく方法では、小学生、高校生と大学生の運動習慣実践者および非習慣者のいずれの集団においても DLW 法による TEE と比較して 10%程度の推定誤差であった。このことから、集団の平均的な TEE を把握する場合に有用性が高いことが明らかになった。ただし小学生の場合には、成人で使われている一般的な算出式を用いると享受しがたい過小評価が生じるため、個人の安静時代謝量に基づいた算出方法が必要となる。

LC については、小学生の場合、これまでの成人での報告と比較すると良好な推定精度が認められた。また、運動習慣実践者と非習慣者ともに TEE は有意に過小評価されたが、その度合いは運動群で顕著であった。集団によって推定精度に差異が生じた理由には、歩行の評価における LC の特徴的なアルゴリズムが関与している可能性が考えられた。しかしながら、いずれの集団においても DLW による TEE と LC によるそれとの間に有意な相関関係が認められたことから、個人間差をある程度評価できることも明らかになった。

6. おわりに：国内での二重標識水法利用の広がり

本邦における DLW 法でのエネルギー消費量の測定は、1998 年に齊藤らによって初めて日本人スポーツ選手の調査・研究に導入され (Ebine et al., 2000)、これを契機に国立健康・栄養研究所を中心に、生活習慣病予防対策の一環として「エネルギー消費量の評価法および基準値作成に関する研究 (厚生科学研究費補助金 (田中、齊藤、吉武) : 平成 11 年度～平成 13 年度)」によりエネルギー消費量推定法の検討が実施され、一般人へ DLW 法の導入が図られ、さらには我が国初のヒューマン・カロリメータ (メタボリックチャンバー) が平成 12 年に国立健康・栄養研究所に設置された。それ以降、10 年の時間経過と共に国内の研究においても新たな展開を見せている。最近、国立健康・栄養研究所のグループは、厚生労働省の支援を受け日本人を対象とした大規模な調査を実施している (Ishikawa-Takata et al., 2007)。世界的な流れにおいて、エネルギー必要量は、DLW 法により求められた TEE によって定められるところとなっており、本邦においても 2005 年版の食事摂取基準から同様の手続きが行われるようになってきている。先行して実施されてはいたものの、小規模な研究として取りまとめられることの多かった齊藤らのデータに、国立健康・栄養研究所のグループによって取得されたまとまりのあるデータが付加されたことで、日本人の食事摂取基準はより強固なものになりつつある。

また、京都府立医科大学の木村らのグループでは、これまでに世界的にも研究が数例しか報告されていない、高齢者を対象とした活動量の調査を行っている (Yamada et al., 2009)。この研究で特筆すべきは、新規に開発された 3 軸の加速度計で求められた TEE が DLW 法と比べて極めて良好な結果を

得ていることである。また、希少なデータを取得する試みとして、同志社大学の石井らのグループでは子どもを対象とした調査を精力的に行っている。上述の研究グループはいずれも DLW 法を調査手法に組み込んでいることで共通しているが、学会等での情報交換を積極的に行うことで、部分的に協働していると言える。今後、日本人を対象とした調査結果に根ざして日本人の食事摂取基準における各年齢帯のエネルギー必要量が導き出されるのもそう遠い日のことではないように思われる。

謝辞

稿を終えるにあたり、研究の主旨に賛同し調査に御参加下さいました被検者の皆様ならびに保護者の皆様に心より御礼申し上げます。今日の国内における二重標識水法の普及の礎を築き、海老根、引原らの指導教官として研究の完遂までご指導下さいました筑波大学体育科学系 故齊藤慎一先生の御冥福を心よりお祈り申し上げます。

本研究は、財団法人ミズノスポーツ振興会の 2008 年度研究助成の支援ならびに文部科学省 科学研究費補助金 若手 (B) の一部助成を得て実施された。

参考文献

- Ainsworth BE, Haskell WL, Whitt MC, Irwin ML, Swartz A M, Strath SJ, O'Brien WL, Bassett DR, Schmitz KH, Emplainscourt PO, Jacobs DR JR, Leon AS: Compendium of Physical Activities: an update of activity codes and MET intensities. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32: 498-516, 2000.
- Bailey R.C, Olson J, Pepper SL, Porszasz J, Barstow TJ, Cooper DM: The level and tempo of children's physical activities: an observational study. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27: 1033-1041, 1995.
- DeLany JP, Harsha DW, Kime JC, Kumler J, Melancon L, Bray GA: Energy expenditure in lean and obese prepubertal children. *Obes. Res.*, 3 (Suppl 1) : 67-72, 1995.
- Ebine N, Feng JY, Homma M, Saitoh S, Jones PJ: Total energy expenditure of elite synchronized swimmers measured by the doubly labeled water method. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 83: 1-6, 2000.
- Ebine N, Rafamantanantsoa HH, Nayuki Y, Yamanaka K, Tashima K, Ono T, Saitoh S, Jones PJH: Measurement of total energy expenditure by the doubly labelled water method in professional soccer players. *J. Sports Sci.*, 20: 391-397, 2002.
- Hancox RJ, Milne BJ, Poulton R: Association between child and adolescent television viewing and adult health: a longitudinal birth cohort study. *Lancet*, 364: 257-62, 2004.
- Harrell JS, McMurray RG, Baggett CD, Pennell ML, Pearce PF, Bangdiwala SI: Energy costs of physical activities in children and adolescents. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 37: 329-336, 2005.
- Ishikawa-Takata K, Tabata I, Sasaki S, Rafamantanantsoa HH, Okazaki H, Okubo H, Tanaka S, Yamamoto S, Shirota T, Uchida K, Murata M: Physical activity level in healthy free-living Japanese estimated by doubly labelled water method and International Physical Activity Questionnaire. *Eur. J. Clin Nutr.*, 1-7, 2007.
- Kumahara H, Schutz Y, Ayabe M, Yoshioka M, Yoshitake Y, Shindo M, Ishii K, Tanaka H: 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, 2004.
- Leenders NY, Nelson TE, Sherman WM: Ability of different physical activity monitors to detect movement during treadmill walking. *Int. J. Sports Med.*, 24: 43-50, 2003.
- Lifton N, Gordon GB, McClintock R: Measurement of total carbon dioxide production by means of D₂¹⁸O. *J.*

- Appl. Physiol., 7: 704-710, 1955.
- Maehlum S, Grandmontagne M, Newsholme EA, Sejersted OM: Magnitude and duration of excess postexercise oxygen consumption in healthy young subjects. *Metabolism*, 35: 25-9, 1986.
- Mâsse LC, Fulton JE, Watson KL, Mahar MT, Meyers MC, Wong WW. Influence of body composition on physical activity validation studies using doubly labeled water. *J. Appl. Physiol.*, 96: 1357-1364, 2004.
- Matsushita Y, Yoshiike N, Kaneda F, Yoshita K, Takimoto H: Trends in childhood obesity in Japan over the last 25 years from the national nutrition survey. *Obes. Res.*, 12: 205-14, 2004.
- Matthews: Calibration of accelerometer out for adults. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 37: S512-S522, 2005.
- McClain JJ, Sisson SB, Washington TL, Craig CL, Tudor-Locke C: Comparison of Kenz Lifecorder EX and ActiGraph accelerometers in 10-yr-old children. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39: 630-638, 2007.
- Rafamantanantsoa HH, Ebine N, Yoshioka M, Higuchi H, Yoshitake Y, Tanaka H, Saitoh S, Jones PJH: Validation of three alternative methods to measure total energy expenditure against the doubly labeled water method for older Japanese men. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 48: 517-523, 2002.
- Roemmich JN, Clark PA, Walter K, Patrie J, Weltman A, Rogol AD: Pubertal alterations in growth and body composition. V. Energy expenditure, adiposity, and fat distribution. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 279: E1426-1436, 2000.
- Schoeller DA and van Santen E: Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method. *J. Appl. Physiol.*, 53: 955-959, 1982.
- Schulz S, Westerterp KR, Bruck K: Comparison of energy expenditure by the doubly labeled water technique with energy intake, heart rate, and activity recording in man. *Am. J. Clin. Nutr.*, 49: 1146-1154, 1989.
- Spadano JL, Must A, Bandini LG, Dallal GE, Dietz WH: Energy cost of physical activities in 12-y-old girls: MET values and the influence of body weight. *Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord.*, 27: 1528-1533, 2003.
- Speakman JR, Selman C: Physical activity and resting metabolic rate. *Proc. Nutr. Soc.*, 62: 621-634, 2003.
- Suzuki I, Kawakami N, Shimizu H: Accuracy of Calorie Counter method to assess daily energy expenditure and physical activities in athletes and nonathletes. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 37: 131-136, 1997.
- Yamada Y, Yokoyama K, Noriyasu R, Osaki T, Adachi T, Itoi A, Naito Y, Morimoto T, Kimura M, Oda S. Light-intensity activities are important for estimating physical activity energy expenditure using uniaxial and triaxial accelerometers. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 105: 141-152, 2009.
- Weir JBDV: New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. Physiol.*, 109: 1-9, 1949.
- 内田和宏, 今村裕行, 宮本徳子, 城田知子: 運動強度が女性の運動後余剰酸素摂取量 (EPOC) に及ぼす影響. *日本栄養・食料学会誌*, 52, 129-134, 1999.
- 海老根直之: スポーツ選手のエネルギー所要量に関する基礎研究-二重標識水法による総エネルギー消費量測定-. 平成 13 年度筑波大学大学院体育科学研究科博士論文, 筑波大学, 茨城, 2002.
- 海老根直之, 島田美恵子, 田中宏暁, 西牟田守, 吉武裕, 齊藤慎一, Peter JH Jones: 二重標識水法を用いた簡易エネルギー消費量推定法の評価-生活時間調査法, 心拍数法, 加速度計法について-. *体力科学*, 51: 151-163, 2002.
- 金亨烈, 李相直, 朴鍾薫, 海老根直之, 山中邦夫, 田嶋幸三, 齊藤慎一: 試合期の韓国プロサッカー選手の二重標識水法による総エネルギー消費量測定. *体育学研究*, 48: 717-723, 2003.
- 柏崎浩: 第四章 エネルギー所要量の歴史と現状, 小林修平編, 健康栄養選書, 栄養所要量・基準量と

食生活ガイドライン. 建帛社, 東京, 61-62, 1997.

齊藤慎一, 海老根直之, 島田美恵子, 吉武裕, 田中宏暁: 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. 栄養学雑誌, 57 :
317-332, 1999.

東野政貴, ラファマンタナンツー ウビハシナ, 彭雪英, 海老根直之, 吉武裕, 田中宏暁, 齊藤慎一:
通常勤務体制下の消防官の二重標識水法による総エネルギー消費量測定. 体力科学, 52 : 265-274,
2003.

野村幸史, 斎藤茂, 池田義雄: Kenz カロリーカウンターの使用経験. 糖尿病治療研究会報, 7 : 49-53,
1986.

引原有輝, 田中茂穂, 大河原一憲, 高田和子, 三宅理江子, 田栗恵美子, 田畑泉: 加速度計を用いた
身体活動強度の評価の妥当性 (生活・健康, 第 62 回日本体力医学大会). 体力科学, 56 : 79, 2007.

樋口博之, 綾部誠也, 進藤宗洋, 吉武裕, 田中宏暁: 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, 2003.

彭雪英, 吉武裕, 齊藤慎一: 中年女性における簡易エネルギー消費量推定法の検討: 二重標識水法と
の比較. 肥満研究, 10 : 163-172, 2004.

山田誠二, 馬場快彦: 運動強度を加味したカロリーカウンターによる運動時消費エネルギー量の測定.
産業医科大学雑誌, 12 : 77-82, 1990.

山村千晶, 田中茂穂, 柏崎浩. 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 : 265-276,
2002.

Table 1 Physical characteristics of subjects

	Boys (n=6)		Girls (n=6)	
	Mean	SD	Mean	SD
Age (yrs)	10.3	2.3	11.3	1.0
Height (cm)	139.9	13.2	144.0	5.2
Weight (kg)	35.5	13.0	37.7	1.9
Body fat (%)	14.0	9.9	19.1	3.4

Percent of body fat were determined from total body water measured using isotope dilution.

Table 2 Physical characteristics of subjects

	Boys (n=22)		Girls (n=9)	
	Mean	SD	Mean	SD
Age (yrs)	17.4	1.3	18.9	0.33
Height (cm)	168.4	5.0	156.5	4.9
Weight (kg)	63.1	7.5	53.3	7.0
Body fat (%)	15.7	2.8	30.7	6.4

Percent of body fat were determined from total body water measured using isotope dilution.

Table 3 Total energy expenditure, basal metabolic rate, and physical activity level using each methods

	Total (n=12)		Boys (n=6)		Girls (n=6)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
DLW TEE (kcal/d)	1991	279	2054	349	1928	200
BMR (kcal/d)	1348	186	1360	251	1336	112
PAL (TEE/BMR)	1.48	0.13	1.52	0.17	1.44	0.06
AR TEE (kcal/d)	1413	295	1423	418	1404	127
ARme TEE (kcal/d)	2083	304	2278	263	1887	204
LC TEE (kcal/d)	1836	223	1873	316	1800	80

DLW; doubly labeled water, TEE; total energy expenditure, BMR; basal metabolic rate, PAL; physical activity level, AR; activity record, ARme; activity record measure, LC; lifecorder

Table 4 Total energy expenditure, basal metabolic rate, and physical activity level using each methods

	Total (n=31)		Trained (n=14)		Untrained (n=17)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
DLW TEE (kcal/d)	3587	1223	4838	498	2556	326
BMR (kcal/d)	1577	280	1810	135	1385	215
PAL (TEE/BMR)	2.22	0.44	2.67	0.15	1.86	0.16
AR TEE (kcal/d)	3124	1004	4135	493	2291	241
LC TEE (kcal/d)	2506	621	3120	257	2000	259

DLW; doubly labeled water, TEE; total energy expenditure, BMR; basal metabolic rate, PAL; physical activity level, AR; activity record, ARme; activity record measure, LC; lifecorder

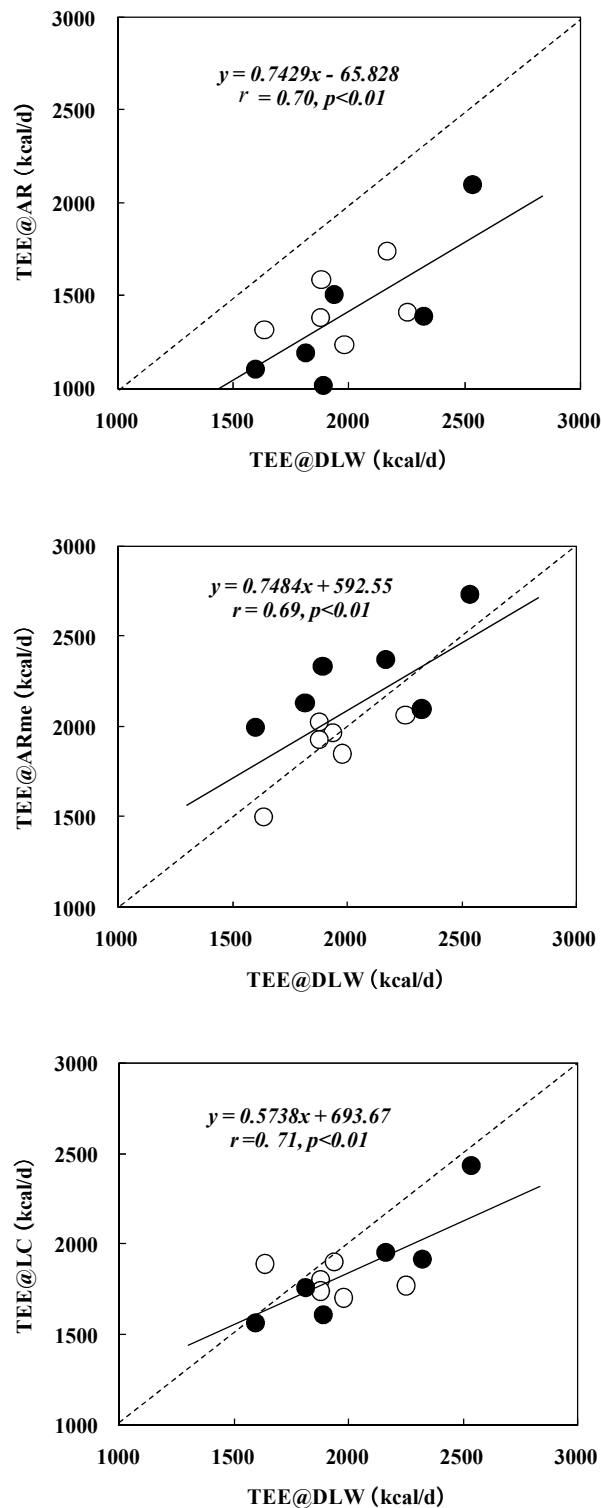


Figure 1 Relationships between TEE measured from DLW method and each of TEE estimated from AR, ARme and AC methods. ●; boys, ○; girls.

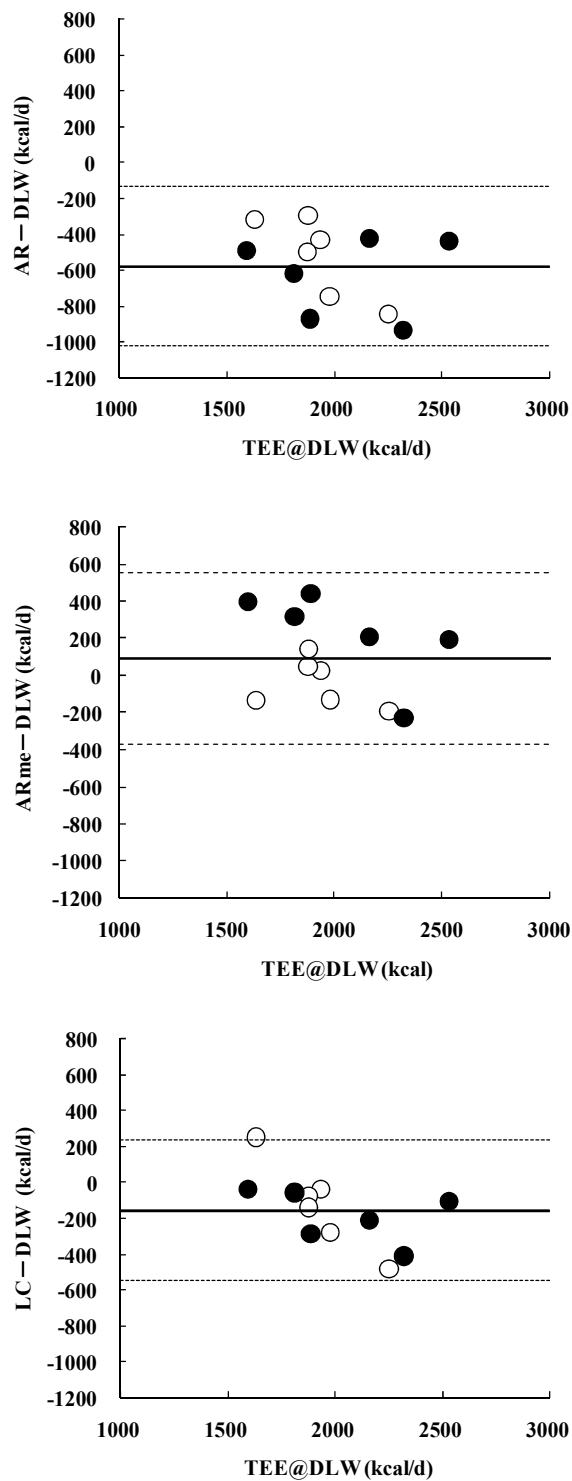


Figure 2 The difference between TEE measured from DLW method and the estimated from AR, ARme and LC methods.

Solid line represents the mean difference between the measured and estimated TEE. The 2 dashed lines represent upper and lower limits of agreement, calculated as the mean difference $\pm 2SD$. ●; boys, ○; girls.

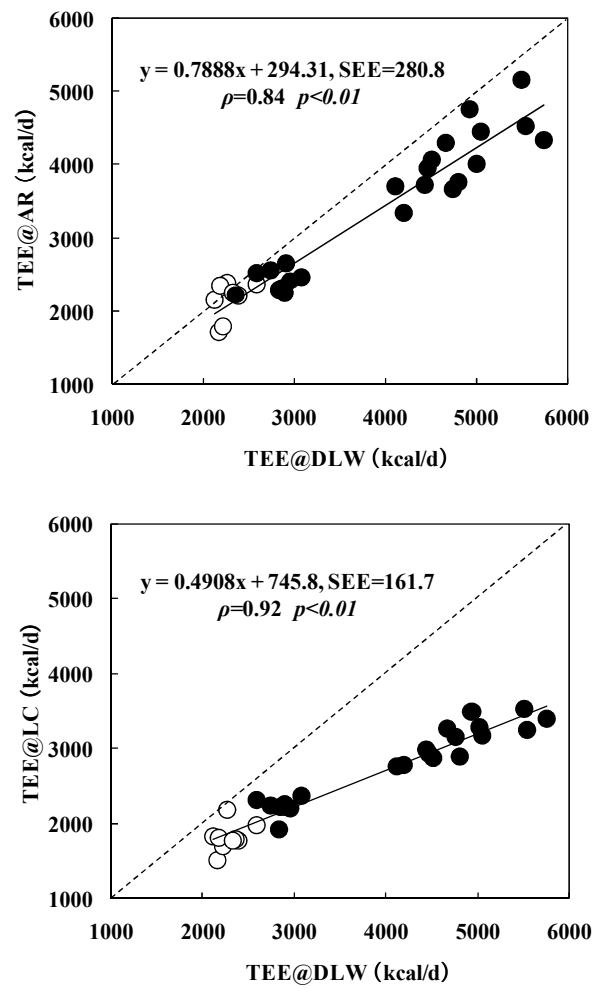


Figure 3 Relationships between TEE measured from DLW method and both TEE estimated from AR and AC methods. ●; boys, ○; girls.

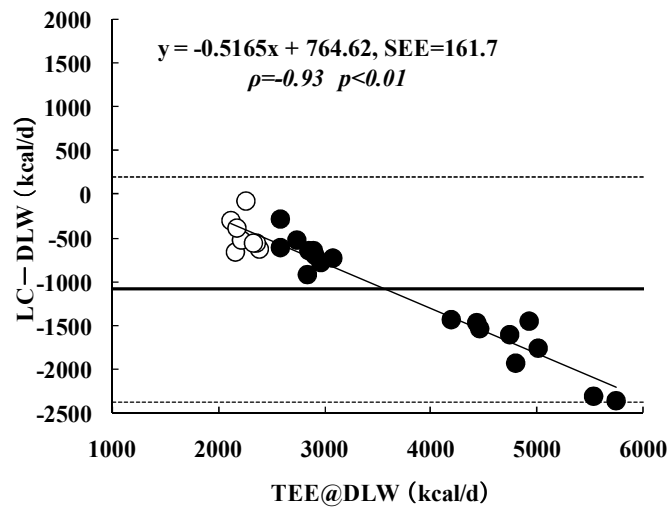
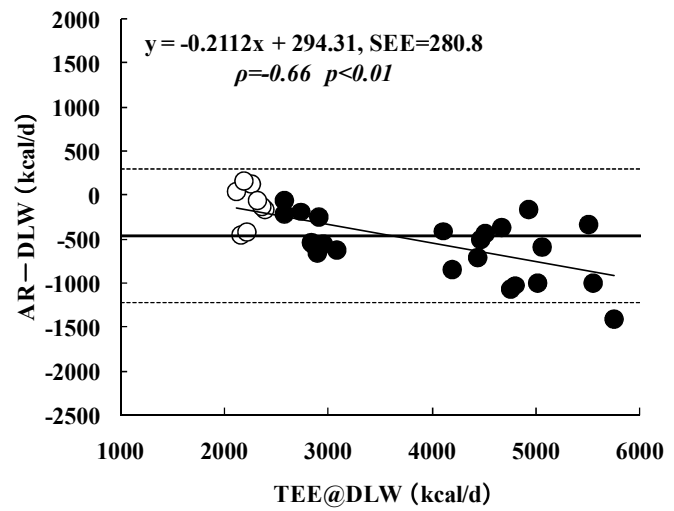


Figure 4 The difference between TEE measured from DLW method and the estimated from AR and AC methods. Solid line represents the mean difference between the measured and estimated TEE. The 2 dashed lines represent upper and lower limits of agreement, calculated as the mean difference $\pm 2SD$. ●; boys, ○; girls.