高校野球選手における簡易エネルギー消費量測定法の妥当性の検討

引 原 有 輝¹⁾ 齊 藤 慎 一²⁾ 吉 武 裕³⁾

VALIDITY OF METHODS TO MEASURE TOTAL ENERGY EXPENDITURE OF BASEBALL PLAYERS IN JAPANESE HIGH SCHOOL

YUKI HIKIHARA, SHINICHI SAITOH and YUTAKA YOSHITAKE

Abstract

The purpose of this study was to assess the validity of activity record (AR) accelerometer (AC) and heart rate (HR) methods in comparison with the doubly-labeled water (DLW) method as the criterion measure of total energy expenditure (TEE) in high school students undergoing vigorous activities. Twelve baseball players in Japanese high school (16.5 ± 0.5 yrs) were monitored for seven consecutive days. TEE values obtained over a 3-day-period by AR, AC and HR were simultaneously validated against TEE measured by DLW over a 7-day-period. TEE value measured by DLW was 4922 ± 391 kcal/day. The Physical activity level (PAL = TEE/BMR (basal metabolic rate)) was 2.66 ± 0.14 . TEE estimated by AR, AC and HR was significantly different from DLW, with mean differences of $-13.9 \pm 6.5\%$, $35.3 \pm 3.6\%$ and $31.6 \pm 23.9\%$, respectively. However, TEE estimated by AC and AR significantly correlated with that measured by DLW ($r = 0.73$, $r = 0.70$, $p < 0.05$, respectively). The limits of agreement between DLW and AR, AC and HR were from -1350 kcal/d to -21 kcal/d, -2293 kcal/d to -1192 kcal/d, and 3875 kcal/d to -797 kcal/d respectively. AC was superior to the other methods. However, the limits of agreement in AR were similar to AC. These data suggest that on accuracy and precision, AR would be superior to the other two for predicting TEE in high school students undergoing vigorous activities. However, AC has the advantages being able to examine patterns of activity over long periods of time without interfering with normal movement and the ability to store data continuously over long periods of time. Therefore, it was suggested that, simultaneously, the AR and AC methods are accurate predictors of TEE and patterns of activity while undergoing sports vigorous activities.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2005, 54 : 363~372)

key word : Total energy expenditure, doubly-labeled water, Accelerometer, Activity record, heart rate, young athlete

I . 緒 言

青少年にとってのスポーツ活動は、心身の健全な育成において重要であり、生涯を通してスポーツ活動に積極的に取り組むことは健康で活力のある生活を過ごす上で欠かせない要素である¹⁾。同時に、スポーツ活動に伴い消費するエネルギー量を食事で十分に補給することが競技力向上や心身の健康を維持する上で重要である。しかし、身体活動量が多い青少年アスリートはエネルギー消費量に見合ったエネ

ルギー量を食事によって補い切れず、エネルギーや栄養素の不足を引き起こしている可能性があると考えられている^{2,3)}。エネルギーや栄養素の不足が続けば競技力の低下だけでなく、健康を害する恐れがある。その予防策として、青少年アスリートに必要な食事摂取基準値とそれに基づく最適な栄養処方を提供することが重要課題である。そのためには、まず、1日の総エネルギー消費量 (Total energy expenditure : TEE) を正確に把握する必要がある。

¹⁾ 筑波大学人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

²⁾ 筑波大学体育科学系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

³⁾ 鹿屋体育大学体育学部スポーツライフスタイル・マネジメント系
〒891-2393 鹿児島県鹿屋市白水1番地

Doctoral Program of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Ibaraki 305-8574 JAPAN

Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Ibaraki 305-8574 JAPAN

Department for Interdisciplinary studies of Lifelong Sport and Physical Activity, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya, 1 Shiromizuchō, Kanoya, Kagoshima, 891-2393 JAPAN

これまでに, わが国では, ダグラスバッグや小型の携帯用酸素摂取量計を用いてスポーツ活動中のエネルギー消費量が評価されてきた^{4,5)}. しかし, 日常生活活動時の酸素消費量($\dot{V}O_2$)を連続的に計測することは困難であったため, TEE は推定法を用いて評価されることがほとんどである. これまでに用いられてきた TEE の推定法は, 主に生活時間調査 (Activity record: AR) 法や心拍数 (Heart rate: HR) 法である^{6,7)}. 近年では, 加速度計 (Accelerometer: AC) 法によるエネルギー消費量測定も行われるようになってきた⁸⁾. そこで我々のグループは, 成人男女を対象としてフィールドにおけるエネルギー消費量測定のゴールドスタンダードである二重標識水 (Doubly labeled water: DLW) 法を基準に, 簡易エネルギー消費量測定法 (以下, 簡易測定法と記す) の妥当性について検討してきた^{9~12)}.

しかし, 青少年では安静時および身体活動時におけるエネルギー代謝率が成人のそれとは異なる^{13, 14)}と考えられていることから, AR 法や AC 法において METs (Metabolic equivalents) や RMR (Relative metabolic rate) などの成人を対象に用いられているエネルギー代謝率からエネルギー消費量を推定する場合には, TEE に誤差を生じさせる可能性があると考えられる. また, HR 法において, 青少年は成人と比較して間欠的な活動内容が多いと推察されることから, これまでの成人における妥当性の結果が青少年に該当するか否かについての疑問が残る.

そこで本研究は, 青少年アスリートの中で, 特に

練習時間が長く, 身体活動量が多いと推察される高校野球部員を対象に, DLW 法を妥当基準として AR 法, AC 法および HR 法の妥当性について検討することを目的とした.

Ⅱ. 方 法

A. 対象者

対象者は, 茨城県の高等学校野球部に所属する男子12名 (16.5 ± 0.5 yrs) とした. 対象者の身長, 体重, BMI および %Body fat は, 順に 169.0 ± 4.8 cm, 66.8 ± 7.2 kg, 23.4 ± 1.9 , $15.7 \pm 3.3\%$ であった. 本研究は, 対象者およびその保護者に対して, 実験の目的と内容について詳細な説明を実施し, 同意書に署名を得た上で測定を開始した. なお本研究は, 「筑波大学体育科学系研究審査委員会」の承認を得て実施した.

B. 実験の概要

本研究は, DLW を投与する日の day 0 を基準に, 測定を開始する日を day 1, 測定終了日を day 8 とし, 1 週間の TEE を測定した. 測定期間中は, 普段と変わらぬ生活を心がけるように対象者に指示した. また, この期間に AR 法, AC 法および HR 法の 3 つの簡易測定法によるエネルギー消費量測定を同時に行った. 測定期間は, 対象者の負担やそれによる生活活動内容の変容を考慮し, 平日 2 日, 休日 1 日の計 3 日間とした^{11, 15, 16)} (Figure 1).

Day	day-1	day0	day1	day2	day3	day8
Time	AM7:30	AM10:30	AM11:30			
DLW oral administration		●				
Urine sampling	●	●	●	●		●
Activity record			●	●	●	
Accelerometer			●	●	●	
Heart rate			●	●	●	

Figure 1. Experimental design.

C. 身体活動量の評価方法

1. 二重標識水(DLW)法

本研究では、ベースラインの尿サンプルを day-1 に採取した。対象者には、総体水分量(Total body water: TBW)を体重の60%と仮定し、DLW を day 0 に、 ^2H (99.75 atm%: 昭光通商(株))は 0.12 g/kg TBW の割合で、 ^{18}O (10.0 atm%: 日本酸素(株))は 2.5 g/kg TBW の割合で、経口摂取させた。DLW 摂取の3時間後および4時間後に尿を採取し、その尿中の ^{18}O の同位体比から TBW を算出した。また、day 1 および day 8 の2番目の尿を採取し、その尿から同位体の減少率を求め、TEE を算出した¹⁷⁾。採取された尿はすべてプラスチック製のボトルに保存し、パラフィルムで密封した後、分析までの間-20℃で冷凍保存した。尿サンプルの輸送に際しては、ドライアイスを含めた保冷箱を使用した。採取された尿の分析は、先行研究と同様の方法で行った¹⁷⁾。なお、試料の分析は3回繰り返して行ない、その際の標準偏差の平均値は、 ^2H で 1.71‰、 ^{18}O で 0.19‰ であった。

2. 生活時間調査(AR)法

本研究は、対象者に3日間(平日: 2日, 休日: 1日)の行動内容を1分間隔の目盛りが記された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に指示した。動作が複雑である場合には、その動作を行った際の状態、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。各動作のエネルギー消費量の算出は、記載された各動作が Ainsworth ら¹⁸⁾により作成された活動区分表に該当するか、もしくは、もっとも類似する動作の METs を選択し、体重および活動時間をそれに乗じて TEE を算出した。なお TEE の算出において、1 MET は $1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ とした。

3. 加速度計(AC)法

対象者には、1次元加速度計(ライフコーダ、(株)スズケン)を3日間(平日: 2日, 休日: 1日)連続で装着させた。その際、入浴時、睡眠時、着替え以外は常時、装着するように指示した。また、機器を取り外した時間は所定の用紙に記録させた。加速度計のセンサーの位置が加速度に影響する場合があるため、腰部に遊びがないように装着させた。

4. 心拍数(HR)法

日常生活の心拍数を心拍計(Accurex plus, Polar Electro, Finland)により、3日間(平日: 2日, 休日: 1日)連続で記録した。対象者には、心拍計を起床から就寝まで装着するように指示した。なお、睡眠時のエネルギー消費量は、実測した基礎代謝量(Basal metabolic rate: BMR)を採用した。本研究では、安静時と運動時の境界線を定めた FLEX HR 法を用いた¹⁹⁾。FLEX HR 値および $\text{HR} \cdot \dot{\text{V}}\text{O}_2$ 関係式を得るための運動負荷試験は、DLW 法による TEE の測定期間後に行った。運動負荷には自転車エルゴメータ(AEROBIKE 75 XL II, コンビ(株))を用いた。 $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ と二酸化炭素排出量はブレスバイブレス法を用いた呼気ガス分析器(AERO MONITOR AE 300 S, ミナト医科学(株))により測定した。エネルギー消費量の算出に際して、FLEX HR 値以下の心拍数が記録された場合には、一律に安静時(座位、立位)に測定した $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ の平均値をあてはめ、一方、この値を越える心拍数に対しては、運動負荷試験により得られた $\text{HR} \cdot \dot{\text{V}}\text{O}_2$ 関係式に活動時の心拍数を代入した。

D. 基礎代謝量(basal metabolic rate: BMR)の測定

対象者には、DLW 法による TEE の測定期間中のいずれかの日に、AM 7:30 に空腹状態で測定室に来室させた。その際、測定前日の PM 9:00 以降は飲食禁止とし、当日もできる限りゆっくりとした徒歩にて来室するように指示した。そして、研究室到着後、約20分以上の安静状態を保持させ、その後、仰臥位にて、呼気ガス分析器(AERO MONITOR AE 300 S, ミナト医科学(株))を用いて、ブレスバイブレス法により20分間の酸素消費量($\dot{\text{V}}\text{O}_2$)と二酸化炭素排出量を測定した。エネルギーへの換算は Weir²⁰⁾の間接熱量測定の式を用いた。

E. 身体活動レベル(Physical activity level: PAL)

対象者の生活活動強度の判定には、身体活動レベル(PAL)を用いた。この指数は、TEE を BMR で除して求められ、年齢、性別、形態に関係なく相対的に生活活動強度を評価できる国際的な指標である²¹⁾。

F. 統計処理

本研究の測定データは, 平均値±標準偏差で表した。DLW 法を基準とした各簡易測定法の測定精度について, 平均値の有意差の検定には Student's paired t-test を, 相関関係の検定には, Pearson 積率相関係数(r)を用いた。なお, これらの統計的解析には JMP 5.0.1 (株)SAS インスティテュートジャパン, 東京)を使用した。また, DLW 法を妥当基準にして, 各簡易測定法の正確度(平均値の差)と精密度(信頼限界値)について Bland & Altman²²⁾プロットを用いて検討した。いずれの場合も有意水準は 5%とした。

Ⅲ. 結 果

本研究の野球選手の BMR および DLW 法による

TEE はそれぞれ 1849 ± 96 kcal/d, 4922 ± 391 kcal/d であった。PAL は 2.66 ± 0.14 であり, この値を厚生労働省が発表した日本人の食事摂取基準(2005年版)で定められている PAL に照らし合わせると, 「高い(Ⅲ: 1.90~2.20)」を大きく上回っていた。

AR 法, AC 法および HR 法による TEE はそれぞれ 4237 ± 451 kcal/d, 3180 ± 226 kcal/d, 6461 ± 1187 kcal/d であった(Table 1)。DLW 法と各簡易測定法の TEE の相関関係を検討した結果, DLW 法と AC 法($r=0.73$, $p<0.05$)および AR 法($r=0.70$, $p<0.05$)との間に有意な相関関係が認められたが, HR 法($r=0.21$, ns)との間には認められなかった(Figure 2)。

また, DLW 法を妥当基準にして, 各簡易測定法の正確度(平均値の差)と精密度(信頼限界値)につ

Table 1. Mean total energy expenditure assessed by four methods(DLW, AR, AC and HR) and respective percentage difference and correlation coefficient compared to DLW method.

Method	TEE(kcal/d)		Difference(%)			Correlation coefficient	
	Mean	SD	Mean	SD	P value	r	P value
DLW	4922	391	—	—	—	—	—
AR	4237	451	-13.9	6.5	<0.05	0.70	<0.05
AC	3180	226	-35.3	3.6	<0.05	0.73	<0.05
HR	6461	1187	31.6	23.9	<0.05	0.21	ns

Figure 2. Relationship between the measured total energy expenditure(TEE)from doubly labeled water(DLW)and the estimated TEE from activity(AR), accelerometer(AC)and heart rate(HR) methods.

▲: activity record; ■: accelerometer; ●: heart rate

いて検討した。その結果, DLW 法の TEE の平均値に対する各簡易測定法のその差は, AR 法で $-13.9 \pm 6.5\%$, AC 法で $-35.3 \pm 3.6\%$ そして HR 法で $+31.6 \pm 23.9\%$ となり, すべての方法において有意な差が認められた(Table 1)。また, 成人を対象としたこれまでの研究報告と比較したところ, AC 法は AR 法に比べて対象者の PAL が高値を示すほど DLW 法の TEE に対する平均値の差が大きくなった(Table 2)。さらに, 本研究の対象者においても PAL の増加に伴い DLW 法の TEE に対する平均値の差が大きくなることが明らかになった(Figure 3)。

信頼限界値は, AR 法, AC 法および HR 法ではそれぞれ -1350 kcal/d ~ -21 kcal/d, -2293 kcal/d ~ -1192 kcal/d, 3875 kcal/d ~ -797 kcal/d であり, AC 法がもっとも優れていた(Figure 4)が, AR 法の信頼限界値は AC 法のそれと大きな差が認めら

Table 2. The comparison of present study with previous study in Japanese subjects.

Author	Subjects	Age	TEE [#]	PAL	% difference			Correlation coefficient		
					AR	AC	HR	AR	AC	HR
Present study	Baseball player, man, n=12	16.5±0.5	4922±391	2.66±0.14	-13.9±6.5	-35.3±3.6	+31.6±23.9	0.70*	0.73*	0.21
Peng et al. ⁹⁾	middle age, female, untrained, n=10	49.3±5.9	1889±182	1.60±0.12	+0.3	-13	—	0.55	0.24	—
	middle age, female, trained, n=14	50.0±4.8	2570±326	2.06±0.18	-6.5	-25.3	—	0.68*	0.10	—
Tono et al. ¹⁰⁾	Fire fighter, n=10	30.0±2.8	4009±611	2.2±0.3	-6.3	-36.8	—	0.88*	ns	—
Rafamantanatsoa et al. ¹¹⁾	middle age, man, n=24	48.0±10.0	2724±396	—	-12.2	3day:-12.2 14day:-20.7	+2.0	0.76*	3day:0.76* 14day:0.67*	ns
Ebine et al. ¹²⁾	Young man, n=10	24.2±1.8	2910±524	1.63±0.28	-3.9	-7.1	+3.0	ns	0.87*	ns

*p<0.05, vs DLW method. # ; measured by DLW method. TEE : total energy expenditure ; PAL : physical activity level ; AR : activity record ; AC : accelerometer ; HR ; heart rate

Figure 3. Relationship between physical activity level and the percentage of difference between DLW and AC.

れなかった。

本研究ではAR法により3日間の対象者のトレーニング内容を分類し、それに費やした時間をTable 3に示した。その結果、野球の専門的なトレーニングだけでなく、一般的なトレーニングである持久的トレーニング、スプリントトレーニング、ウェイトトレーニングなど、多岐にわたる運動内容を行っていることが示された。また、休日は平日のおよそ2倍のトレーニング時間であることも明らかになった。

Ⅳ．考 察

A．高校野球選手の1日の総エネルギー消費量 (TEE)

本研究の高校野球選手のTEEは、これまでわが国で報告されたJリーグのプロサッカー選手²³⁾や重労働の代表的な職業である消防隊員¹⁰⁾のTEEを大きく上回っていた。また、海外においても、DLW法により測定したジュニアスケート選手のTEEが4037±693kcal/dであったことが報告²⁴⁾されており、本研究の結果を含め、ジュニア期におけるアスリートの身体活動量の多さが再確認された。また、Westerterpら²⁵⁾によると、PALが2.5を超えると、エネルギーの消費と摂取のバランスを維持できなく

Figure 4. Bland and altman plots showing difference between the TEE measured from DLW method and the one predicted from AR, AC and HR methods. Solid line represents the mean difference between the measured and predicted TEE values. Two dashed lines represent upper and lower limits of agreement, calculated as the mean difference ± 2 SD.

なる可能性が報告されており, 本研究の対象者はこの境界線を超えていることが明らかになったことから, 高校野球選手に対する食事内容の適切な配慮や指導が必要であると考えられる.

B. 各簡易測定法の妥当性

1. 生活時間調査(AR)法

本研究では, DLW法のTEEとAR法のそれとの平均値の差において-14%の過小評価が認められた. 日本人を対象とした先行研究^{9~12)}でも, AR法は, 集団を対象としたエネルギー消費量の測定法として比較的優れた推定法であることが報告されている(Table 2). また海外における成人を対象とした報告において, その誤差はおよそ7.9%~-25.9%程度である^{12,26)}とされており, 本研究の結果はこれまで報告の範囲内であった. また, 信頼限界値は, -1350 kcal/d~-21 kcal/d(精密度: $\pm 7\%$)であり, AC法に次いで良好な結果を示した.

山岡ら²⁷⁾により, 野球試合時におけるポジション別のエネルギー代謝率は報告されているが, 「野球」の多様な動作に相当するエネルギー代謝率を報告したものは見当たらない. そこで本研究では, Ainsworthら¹⁸⁾のMETsの行動分類における「野球」の5.0 METsを野球の専門的な練習のすべてに当てはめた. その結果, 野球の練習中のエネルギー消費量は 2174 ± 247 kcalであり, AC法の 1261 ± 106 kcal/dより高く, HR法の 3805 ± 689 kcal/dより低い傾向であった. また, AR法, AC法, HR法のそれぞれのTEEに占める野球練習中のエネルギー消費量の割合は, それぞれ $51 \pm 4\%$, $40 \pm 1\%$ および $58 \pm 4\%$ であり, TEEの大半を占める主要な構成要素であることが示唆された. 本研究における野球のトレーニング内容は, キャッチボール, ケースバッティング(試合を想定したバッティング練習), バント練習, 守備練習など多岐にわたっており, また, それらの中に打つ, 走る, 捕球する, 投げるなどの上肢の動きを伴う立位動作や歩・走行動作が混在している(Table 3). そのため, 実質的に動作内容を正確に記述することは難しく, これが平均値の差および信頼限界値にばらつきが生じた原因と推察される. したがって, スポーツ活動中のエネルギー消費量をより正確に評価することはTEEを把握する上で重要な課題であると考えられよう.

さて, AR法で重要な点は, 対象者が記述する行動内容とその行動時間における正確性である. これまでもAR法の有用性についての報告は多くあり, 行動内容の記述形式は多様である. 例えば, 行動記録時間において, 本研究が用いた1分毎, ある

Table 3. Training menus and times expended for those which were calculated from activity record.

Training menus	Times(min)		
	weekday1	weekday2	weekend
Warming-up	10	10	10
	10	10	10
Sprint	40	50	100
Running	10	20	60
Catching	50	10	130
Batting	120	70	170
Weight training	0	70	0
Total	240	240	480

いは、15分毎に記述する方法¹⁶⁾がある。さらに、自由記述やカテゴリー選択などの方法²⁸⁾に分けられる。したがって、AR法の精度は対象者のモチベーションや対応能力に左右される点は否めないことから、対象者の年齢や生活環境を考慮した上で適用すべきかどうかの判断が重要になる^{28,29)}。

2. 加速度計(AC)法

本研究では、先行研究^{9,11,12)}と同様に、DLW法のTEEとAC法のそれとの間に有意な相関関係が認められた(Figure 2)。しかし、DLW法のTEEとの平均値の差において $35.3 \pm 3.6\%$ の過小評価が認められた。この点に関しても、DLW法やヒューマン・カロリーメーター法のTEEに対して加速度計(ライフコーダ)のTEEは過小評価されるというこれまでの報告^{9~12,30)}と一致している。また、本研究はPALが高い者ほど、DLW法との誤差が大きくなる傾向を認めている(Figure 3)。彭ら⁹⁾も、中高年女性を対象に、運動習慣を有する者(PAL: 2.06, 範囲: 1.75~2.32)とそうでない者(PAL: 1.60, 範囲: 1.41~1.75)では、PALの高い集団においてDLW法との平均値の差が大きくなることを報告している。本研究の結果が過小評価される傾向を示した原因として、加速度計の機械的な限界があげられる。つまり、今回用いた加速度計の加速度センサーが感知できる上限はおおよそ10 METs程度の歩・走行運動までと考えられる³¹⁾ため、野球にお

ける盗塁練習などのスプリントトレーニングのような動きを加速度計が感知できなかった可能性があった。さらに、Suzukiら³²⁾は、アスリートを対象として鉛直方向にのみ反応する1次元加速度計が、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。実際に、素振りなどのバッティング練習、守備練習そしてウェイトトレーニングでは鉛直方向の動きを伴わないことが予想される。この様な過小評価させる要因は、身体活動量が多い者ほど強く出現する可能性があったものと推察され、PALの増加に伴い過小評価される割合を増大させたと考えられる。

一方、AC法の信頼限界値は $-2293 \text{ kcal/d} \sim -1192 \text{ kcal/d}$ (精密度: $\pm 5\%$)であり、他の測定法と比較すると小さいこと、また、本研究と同じ加速度計を用いて検討した成人での報告^{9~12)}でも本研究と同程度か、より小さい信頼限界値を示している。信頼限界値に多少のばらつきが生じた理由として、加速度計は物理的な強度としての加速度を感知するものであり、それが個人の生理的強度をどこまで反映するかということが問題である。実際に、樋口ら³¹⁾は加速度計強度と実際の酸素消費量において、個人間にばらつきがあることを報告している。

以上のことから、多様な青少年アスリートを対象にDLW法とAC法のTEEを測定し、そのデータを基に補正式を作成することで、AC法の出力デー

タから TEE を推定できる可能性があると思われる。

なお, 加速度計の取り外し時間は主に着替えや入浴時間であり, 生活時間調査に基づいて補正したエネルギー量は全体の $2.7 \pm 0.9\%$ であったことから, 加速度計の取り外しによる誤差は AC 法の妥当性に大きな影響を与えなかったと考える。

近年では, 青少年や中高年者における 1 日の身体活動の強度および時間などを評価するツールとしての加速度計の応用にも注目が向けられている^{33,34)}。今後, 加速度計は身体活動における質的把握の手段として, 健康, 体力づくりに必要な生活活動内容のあり方を提起する上でも活用できるツールになると思われる。

3. 心拍数(HR)法

HR 法の特徴として, 中等強度以上の運動時(HR: 110~170拍/分)では, HR と $\dot{V}O_2$ の関係に直線的な相関関係が認められるが, 低強度の活動時や安静時(HR: 110拍/分以下)では, 心理的な影響など, HR の増大が $\dot{V}O_2$ の増加に反映され難く, HR と $\dot{V}O_2$ の関係が明瞭でない³⁵⁾。本研究が用いた FLEX HR 法は, 従来の HR 法の欠点を考慮したもので, ヒューマン・カロリーメーター法との比較でも良好な妥当性が得られている方法である¹⁹⁾。しかし, 本研究において, HR 法により求められた TEE は有意に過大評価し, 信頼限界値も大きなばらつきを示す結果であった。その理由の 1 つに, 本研究の対象者の動作は運動強度の強弱が大きい間欠的な身体活動であり, 運動直後の HR が $\dot{V}O_2$ と比較して安静レベルに戻る時間が遅延^{36,37)}したと考えられる。

これまでに, 高見ら³⁸⁾は HR 法によりスポーツ活動中のエネルギー消費量を評価しており, 実測した酸素消費量より求められたエネルギー消費量との間に有意な差が認められたことを報告している。青木ら³⁹⁾は運動負荷上昇時と下降時における $\dot{V}O_2$ と HR との関係は同一視できないことも認めており, 負荷上昇時と下降時の 2 つの関係式を作成することでより信頼性が高まることを報告している。しかし, 本研究では, 負荷下降時の関係式は作成していないため, このことが HR 法の妥当性にどの程度の影響を与えるのかについては, 今後, さらに検討する余地がある。

なお, 本研究は, 心拍計の記録エラーおよび入浴による取り外し時のエネルギー消費量を生活時間調査により測定した値で補正した。補正したエネルギー量は HR 法の TEE の $3.1 \pm 2.8\%$ あったことから, 心拍計の取り外しやエラーによる誤差は HR 法の妥当性に大きな影響を与えなかったと考える。

C. 高校野球選手に推奨される簡易測定法

本研究では, DLW 法の TEE と各簡易測定法(AR 法, AC 法, HR 法)のそれとの平均値の差(正確度)において有意な差が認められた。高校野球選手のような身体活動強度の高い集団の TEE を把握する場合, 正確度と精密度の両面から評価すると, AR 法はもっとも有用性が高いことが示唆された。一方, 長期間にわたり連続的に身体活動の量と強度を客観的に評価する場合は, 対象者の負担を考慮すると AC 法がもっとも有用であると考えられる。また, AR 法は対象者に行動内容の記述に対する正確性を強く要求するため, 特にスポーツ活動中などは, 「動き」の有無や継続時間を推定するような「動き」に対するセンサーの役割として客観性の高い AC 法を併用することにより, AR 法の有用性がさらに高まるのではないかと考える。

IV. 総 括

本研究では, 身体活動量が多い高校野球選手を対象に, 二重標識水(DLW)法を妥当基準とし, 生活時間調査(AR), 加速度計(AC)法, 心拍数(HR)法の各簡易測定法から求められる総エネルギー消費量(TEE)の妥当性を検討した結果, 以下のことが明らかになった。

- 1) 本研究の対象者の TEE および身体活動レベル(PAL)は 2.66 ± 0.14 を示し, 2005年版食事摂取基準(厚生労働省)に照らし合わせると, III(高い: 1.90~2.20)を上回った。
- 2) 正確度と精密度の両面から総合的に評価した結果, AR 法は高校野球選手のような身体活動レベル(PAL)の高い集団の TEE を把握する方法として有用であることが示唆された。
- 3) AC 法は個人間の身体活動量の大小関係及び活動強度を評価する上で有用であることが示唆された。また, 機器の限界点の修正や DLW 法と AC 法との間における補正式の作成により,

TEE をより正確に推定できる可能性があると考えられる。

- 4) HR 法はこれまで TEE を把握する上で、有用性の高い方法として報告されてきた。しかし、間欠的な動作が多様に含まれ、その上、身体活動量が多い青少年アスリートの TEE を評価する法としては、AR 法や AC 法に劣ることが示唆された。

謝 辞

実験にご参加頂きました対象者および保護者の皆様に心より感謝に意を表します。なお、本研究は平成14年度科学研究費、基盤A(研究代表者：齊藤慎一、課題番号：14208002)の一部を用いて実施された。

(受理日 平成17年10月4日)

V. 文 献

- 1) J. F. サリス, N. オーウェン(著), 竹中晃二(監訳). 身体活動と行動医学—アクティブ・ライフスタイルをめざして—. 北大路書房, 京都(2000).
- 2) Sugiura, K., Suzuki, I and Kobayashi, K. Nutritional intake of elite Japanese track and field athletes. *Int. J. Sport Nutr.*(1999) **9**, 202-212.
- 3) 田口素子, 餅美和子. 現場に生かすスポーツ栄養学. 第5回スポーツ選手のエネルギーバランス, 体育の科学, (1999), 140-146.
- 4) 高見京太, 北川 薫, 石川利寛. 酸素摂取量の実測によるスポーツ活動中のエネルギー消費量. 体力科学, (1993), **42**, 257-264.
- 5) 北川 薫, 石川 利寛, 山本 高 司, 高見京太. スポーツ活動中のエネルギー消費量. 体育科学, (1992), **20**, 24-28.
- 6) 林 正, 角川彰. 小学生および高校生の生活時間ならびにエネルギー消費熱量について, 体育学研究, (1965), **8**, 55-60.
- 7) 木田和幸, 孫 光, 五十嵐路子, 松浦 修. 中学生の生活活動に関する研究-1-中学1年生のエネルギー消費, 学校保健研究, (1992), **34**, 300-308.
- 8) 木田和幸, 孫 光, 五十嵐路子, 対馬伸晃. 中学生の生活活動に関する研究-2-カロリー測定機法と心拍数法によるエネルギー消費量, 学校保健研究, (1993), **35**, 278-283.
- 9) 彭 雪英, 吉武 裕, 齊藤慎一. 中高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, (2004), **10**(2), 49-58.
- 10) 東野政貴, Rafamantanantos, H. H., 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, (2003), **52**, 265-274.
- 11) Rafamantanantsoa, H. H., Ebine, N., Yoshioka, M., Higuchi, H., Yoshitake Y., Tanaka H., Saitoh S. and Jones P. J. H. Validation of Three Alternative Method to Measure Total Energy Expenditure against the Doubly Labeled Water Methods for Older Japanese Men. *J. Nutr. Sci. Vitaminol*(2002) **48**, 517-523.
- 12) 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. 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, (2002), **51**, 151-164.
- 13) Harrell, J. S., McMurray, R. G., Baggett, C. D., Pennell, M. L., Pearce P. F, Bangdiwala, S. I. Energy costs of physical activities in children and adolescents. *Med. Sci. Sports. Exerc.*(2005) **37**, 329-336.
- 14) Torun, B. Inaccuracy of applying energy expenditure rates of adults to children. *Am. J. Clin.Nutr.*(1983) **38**, 813-815.
- 15) Montoye, H. J. Introduction: evaluation of some measurements of physical activity and energy expenditure. *Med. Sci. Sports. Exerc.*(2000) **32**(9 Suppl), S439-441.
- 16) Bouchard, C., Tremblay, A., Leblanc, C., Lortie, G., Savard, R., Theriault, G. A method to assess energy expenditure in children and adults. *Am. J. Clin. Nutr.*, (1983) **37**, 461-467.
- 17) Ebine, N., Feng, J. Y., Homma, M., Saitoh, S. and Jones P. J. H. Total energy expenditure of elite synchronized swimmers measured by the doubly labeled water method. *Eur. J. Appl. Physiol*(2000) **8**, 31-36.
- 18) Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Whitt, M. C., Irwin, M. L., Swartz, A. M., Strath, S. J., O'Brien, W. L., Bassett, D. R., Jr., Schmitz, K. H., Emplaineourt, P. O., Jacobs, D. R. Jr. and Leon, A. S. Compendium of Physical Activities: an update of activity codes and MET intensities. *Med. Sci. Sports. Exerc.*(2000) **32**, 498-516.
- 19) Ceesay, S. M., Prentice, A. M., Day, K. C., Murgatroyd, P. R., Goldberg, G. R., Scott, W. and Spurr G. B. The use of heart rate monitoring in the estimation of energy expenditure: a validation study using indirect whole-body calorimetry. *Br. J. Nutr.*(1989) **61**, 175-186.
- 20) Weir, J. B. D. V. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. physiol.*(1949) **109**, 1-9.
- 21) 小林修平. 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, (1997), 61-125.
- 22) Bland, J. M and Altman, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*(1986) **1**: 8476, 307-310.
- 23) Ebine, N., Rafamantanantsoa, H. H., Nayuki, Y., Yamanaoka, K., Tashima, K., Ono, T., Saitoh S., Jones P.J. Measurement of total energy expenditure by the doubly labeled water method in professional soccer players. *J Sports Sci.*(2002) **20**, 391-397.

- 24) Ekelund, U., Yngve, A., Westerterp, K., Sjostrom, M. Energy expenditure assessed by heart rate and doubly labeled water in young athletes. *Med. Sci. Sports. Exerc.* (2002) **34**, 1360-1366.
- 25) Westerterp, K. R. Alternations in energy balance with exercise. *Am J Clin Nutr.* (1998) **68**, 970S-974S.
- 26) 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* (2002), **60**, 265-276.
- 27) 山岡誠一. 野球試合のエネルギー代謝(スポーツのエネルギー代謝に関する研究第2法). *体力科学*, (1952), **2**, 1-5.
- 28) Montoye, H. J., Kemper, H. C. G., Saris, W. H. M., and Washburn, R. A. *Measuring Physical Activity and Energy Expenditure* (1996), Human Kinetics, Champaign, IL.
- 29) Sirard, J. R., Pate, R. R. Physical activity assessment in children and adolescents. *Sports. Med.*, (2001) **31**, 439-454.
- 30) Kumahara, H., Schutz, Y., Ayabe, M., Yoshioka, M., Yoshitake, Y., Shindo, M., Ishii, K and 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.* (2004) **91**, 235-243.
- 31) 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* (2003), **52**, 111-118.
- 32) Suzuki, I., Kawakami, N. and 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.
- 33) Hoos, M. B, Kuipers, H., Gerver, W. J., Westerterp, K. R. Physical activity pattern of children assessed by triaxial accelerometry. *Eur. J. Clin. Nutr.* (2004) **58**, 1425-1428.
- 34) Montgomery, C., Reilly, J. J., Jackson, D. M., Kelly, L. A., Slater, C., Paton, J. Y., Grant, S. Relation between physical activity and energy expenditure in a representative sample of young children. *Am. J. Clin. Nutr.*, (2004) **80**, 591-596.
- 35) 加賀谷淳子. 心拍数に基づいた消費カロリーの算出法とその問題点, *体育の科学*, (1986), **36**, 858-863.
- 36) 山地啓司. 運動と心拍数, *体力科学* (2001), **50**, 1-6.
- 37) Sady, S. P. : Transient oxygen uptake and heart rate responses at the onset of relative endurance exercise in prepubertal boys and adults men. *Int. J. Sports. Med.* (1981) **2**, 240-244.
- 38) 高見京太. 私の研究 スポーツ活動時のエネルギー消費量の測定. *体育の科学*, 杏林書院, (1998), **48**, 393-399.
- 39) 青木純一郎, 形本静夫. 漸増負荷時と漸減負荷時における心拍応答の差. *体育の科学*, (1977), **27**, 243-247.