

区分	課程
----	----

(論文 様式)

アスリートの急速減量時の エネルギー負債量

スポーツ科学研究科

スポーツ栄養学専修

学 籍 番 号

215D02 近藤 衣美

研 究 指 導

岡村 浩嗣 教授

関連論文.....	1
略 語.....	2
第 1 章 序論.....	4
1-1 研究の背景.....	4
1-2 研究の目的.....	6
1-3 文献研究.....	7
1-3-1 エネルギーバランスの測定方法.....	7
1-3-2 エネルギー摂取量の測定方法.....	10
1-3-3 エネルギー消費量の測定の方法.....	12
1-3-4 身体組成の測定方法.....	16
1-3-5 急速減量が身体組成に及ぼす影響.....	25
第 2 章 空気置換法による身体組成評価の妥当性の検討（研究課題 1）.....	27
2-1 緒言.....	27
2-2 方法.....	27
1) 対象者及び研究参加の同意の取得方法.....	27
2) 実験プロトコル.....	28
3) 形態計測及び空気置換法.....	29
4) 体水分量測定.....	31
5) 二重エネルギー X 線吸収法.....	31
6) 身体組成の 4 成分（4C）モデル.....	31
7) エネルギー及び栄養素摂取量.....	32
8) 統計解析.....	32
2-3 結果.....	33
1) 栄養素摂取量及び身体組成の各指標の変化.....	33
2) 実測 V_{TG} と推定 V_{TG} による身体組成評価.....	34
2-4 考察.....	40
2-5 結論.....	42

第3章 急速減量時の身体組成変化とエネルギーバランス (研究課題2)	43
3-1 緒言	43
3-2 方法	44
1) 対象者及び研究参加の同意の取得方法	44
2) 実験プロトコル	45
3) 形態計測、身体組成測定	45
4) 空気置換法	46
5) 二重エネルギーX線吸収法	46
6) 安定同位体希釈法	46
7) 生体電気インピーダンス法	47
8) 身体組成の3成分モデル及び4成分モデル	47
9) 総エネルギー消費量	48
10) 安静時エネルギー代謝量及びトレーニングによるエネルギー消費量	48
11) エネルギー及びエネルギー産生栄養素摂取量	49
12) 急速減量時の身体エネルギー密度	49
13) 統計解析	49
3-3 結果	50
1) 体重及び身体組成	50
2) 減量期間中のエネルギーバランス	51
3-4 考察	56
3-5 結論	58
第4章 総合考察	59
第5章 結論	62
謝辞	63
参考文献	64

関連論文

本論文は、以下に示した論文に基づき作成されたものである。

1. **Kondo E, Sagayama H, Yamada Y, Shiose K, Osawa T, Motonaga K, Ouchi S, Kamei A, Nakajima K, Higaki Y, Tanaka H, Takahashi H, Okamura K.** Energy Deficit Required for Rapid Weight Loss in Elite Collegiate Wrestlers. *Nutrients*, 10; E536, 2018
2. **Kondo E, Shiose K, Yamada Y, Osawa T, Sagayama H, Motonaga K, Ouchi S, Kamei A, Nakajima K, Takahashi H, Okamura K.** Effect of Thoracic Gas Volume Changes on Body Composition Assessed by Air Displacement Plethysmography after Rapid Weight Loss and Regain in Elite Collegiate Wrestlers. *Sports*, 7; E48, 2019

略 語

ACSM: アメリカスポーツ医学会

BIA: Bioelectrical impedance analysis、生体電気インピーダンス法

BM: Body mass、体重

BV: Body volume、身体体積

Db: Body density、身体密度

DXA: Dual energy X-ray absorptiometry、二重エネルギーX線吸収法

EI: Energy intake、エネルギー摂取量

FM: Fat mass、体脂肪量

FFDS: Fat free dry solid、除脂肪固形成分

FFM: Fat free mass、除脂肪量

FQ: Food quotient、食物商

IOC: International Olympic Committee、国際オリンピック委員会

METs: Metabolic equivalents、代謝当量

REE: Resting energy expenditure、安静時代謝量

RER: Respiratory exchange ratio、呼吸交換比

RV: Residual volume、機能的残気量

SAA: Surface area artifact、体表面アーチファクト

SID: Stable isotope dilution、安定同位体希釈法

TBW: Total body water、体水分量

TEE: Total energy expenditure、総エネルギー消費量

V_{TC}: Thoracic gas volume、肺容量

4C: 4-compartment、4 成分

3C: 3-compartment、3 成分

2C: 2-compartmento、2 成分

第1章 序論

1-1 研究の背景

ヒトは生きていくために食物からエネルギーを摂取する。エネルギー摂取量 (EI) が総エネルギー消費量 (TEE) よりも過剰な場合には身体にエネルギーが蓄積し、反対に EI が TEE よりも不足する場合には身体の構成成分 (グリコーゲン、体脂肪、体たんぱく質等) からエネルギーを合成して生命を維持している。減量のための栄養指導や運動指導では、TEE と EI のバランス、すなわちエネルギーバランスを負の状態にすることが基本である。一般的には減量時には体重 (BM) 1kg あたり 7,700 kcal の負のエネルギーバランスが必要になると考えられている。これは、ヒトの脂肪組織には 87 % の脂質が含まれており、動物の脂質は 1 g あたり 9.5 kcal のエネルギーがあることに起因し、体重減少量の全てを脂肪組織で減少させた場合の数値である(1)。この他に、ヒトが減量する際には脂肪成分が 75 %、除脂肪成分が 25%減少するため、1kg の体重減少には 7,400 kcal を身体から喪失させなければならないとの説もある(2)。これらの先行研究に基づき、1kg の減量のためのエネルギー負債量はおよそこの範囲であると考えられている。しかし、Forbes は減量前の体脂肪量 (FM) が少ない者では体重減少量に占める除脂肪量 (FFM) の割合が高まり、さらに減量時のエネルギー制限が大きいほど体重減少に占める FFM の割合が大きい可能性を指摘した(3)。この Forbes の指摘について、近年複数の観察研究において支持する結果が得られている(4-6)。また、Dulloo & Jacquet (7)は、体脂肪率が 6~25 % と比較的低い健康なヒトであ

っても、半飢餓時の初期 FM は動員される体たんぱく質と脂質の割合との間に強い相関関係があり、初期 FM の寄与率は 70%であったことを報告している。さらに、飢餓時や半飢餓時に動員される体たんぱく質と脂質の割合は、性別、年齢、人種、食事制限の度合いや制限食の組成、肥満度、身体活動レベル、高強度トレーニングだけでなく、体脂肪率の測定による大きな誤差も影響していると述べている。ヒトの脂肪成分は 1 kg あたり 9,500 kcal、除脂肪成分は 1 kg あたり 1,020 kcal あると考えられている(8)。したがって、減量前の FM や体脂肪率によって減量時に減少する成分が異なると、1 kg の体重減少のためのエネルギー負荷量は従来用いられてきた 7,400~7,700 kcal とは異なる可能性がある。

アスリートは、競技力を向上させるために減量や増量などのウエイトコントロールや身体組成の改善を行う。減量を必要とすることの多い競技には、レスリングや柔道、ボクシングなどの体重階級制競技、陸上競技の長距離種目などの荷重が競技成績に影響する競技、体操や新体操などの審美系競技などがある。減量を必要とすることの多い競技のアスリートの体脂肪率は、男性で 10%前後、女性で 15%前後(9)であり、減量前から体脂肪率が少ない。このような減量前の FM が少ないアスリートが減量をするときには、体重減少量に占める FFM の割合が高くなる可能性がある。

体重階級制競技では、試合の 1~2 週間前から急激に BM を減少させる急速減量を行い、計量後から試合までに急速に増量をする「making weight」を行うことで、対戦相手よりも体格的、体力的なアドバンテージを得ようとする選手が少なくない(10-12)。その減量方法

は肥満治療や健康増進を目的として行う減量とは異なり、脱水や食事制限などにより急速に BM を減少させる方法が多く用いられている (13)。試合前に減量を実施するアスリートは軽量級、中量級に多い(14)が、これらの多くのアスリートが減量前の時点で FM が少ないため、肥満者や過体重者のように体脂肪のみを減少させることは困難である。Sagayama *et al.*(15)は、1 週間に 4.4 kg の減量をする、体重減少量に占める FFM の割合が 66 %を占めていたことを報告している。したがって、減量前に FM の少ないアスリートが急速減量をする際は、7,400~7,700 kcal よりも少ないエネルギー負債量で減量をしている可能性が考えられた。急速減量はアスリートの生理機能(16-19)、心理面(20)、及び運動パフォーマンス(21, 22)に悪影響を及ぼすことが多くの研究によって明らかにされているが、急速減量時のエネルギー負債量については明らかにされていない。そのため、体重階級制競技選手の体重調整の食事指導においても一般的なエネルギー密度を使用して減量指導が行われている。急速減量時のエネルギーバランスが明らかになれば、適切な EI の計画を立てることができ、無謀で危険な急速減量を抑制することができるようになることが予測される。

1-2 研究の目的

本研究では、急速減量時のエネルギーバランスを明らかにすることを目的に実験を実施した。本研究の仮説は、減量前体脂肪量の少ない体重階級制アスリートの急速減量時は、体脂肪減少量は限りなく少なく、体重 1 kg を減少させるためのエネルギー負債量はこれまで

栄養指導で用いられてきた 7,400~7,700 kcal よりも少ないことである。

1-3 文献研究

1-3-1 エネルギーバランスの測定方法

体重減少 1 kg あたりのエネルギー密度は、エネルギー負債量を体重減少量で除することで算出される。エネルギー負債量の算出方法は二つ考えられる。一つは EI と TEE から算出する方法である。ヒトのエネルギーバランスを食物や飲料から摂取した EI と、基礎代謝や身体活動、食後の消化吸収に要するエネルギー（食事誘発性熱産生; dietary induced thermogenesis (DIT))などを加算した TEE の差を求めることで得られる。しかし、EI も TEE も実測することは容易ではない(23)。この方法は、実際の EI と TEE の差を算出するので、一見わかりやすいがそれぞれの測定方法のばらつきをよく検討したうえで使用しなければ、真のエネルギーバランスは明らかにできない。EI、TEE の測定には様々な方法があり、その妥当性が多くの研究者によって検討されている（1-3-2、1-3-3 に記載）。

近年、エネルギーバランスの新たな測定方法として、身体組成の変化を測定し、変化した身体成分からヒトのエネルギーバランスを推定する方法が考案されている。これは、エネルギーは生成も破壊もできないため、EI は TEE と身体エネルギー貯蔵量の合計と等しいという、エネルギー保存の法則に基づいている。ヒトの身体組成を分子レベルで分析すると、水、たんぱく質、グリコーゲン、脂質、ミネラル等に分けられるが、成分によって物理的エ

エネルギー量(24)と密度(25)が異なっている(表1)。現在、多くの身体組成測定法で用いられている2成分(2C)モデルは、人体を脂肪成分と除脂肪成分の二つに分け、体重の増減に占める脂肪成分と除脂肪成分の占める割合からエネルギーバランスを算出する。減量時のエネルギー負債量は、脂肪1kgが燃焼されるときに物理的エネルギーを9,500 kcal、除脂肪1kgが燃焼されるときにエネルギーを1,020 kcalとして推定される(5, 6, 26)。一方、身体に脂肪1kgが蓄積する際には、脂肪合成のためのエネルギーも必要となるため、脂肪1kgの蓄積に13,200 kcal、除脂肪1kgの蓄積に2,200 kcal必要だと考えられている(27)。

しかし、身体組成測定法には様々な種類があり、用いる方法によって得られる値が異なることが報告されている(28, 29)。1-3-4に身体組成測定法の原理と特徴について記述する。

表 1. 分子レベルの身体組成の参照値（男性）

分子レベルの成分	物理的エネルギー量 (kcal/g)	密度 (g/cm ³)	温度 (°C)	質量 (kg)	体重に占める割合 (%)	備考
脂質	9.448 – 9.539	0.9007	36	13.3	19.0	皮下及び腹腔内からエーテルで抽出された脂肪の密度。1.2kg の必須脂肪酸を含んでいる。
除脂肪	1.100 – 1.020	1.100	—	56.7	81.0	FFM の密度は水、たんぱく質、ミネラル、その他の成分が一定の割合と仮定している。
グリコーゲン	4.187	1.52	37	0.47	0.7	グリコーゲン重量は、通常モデルでは考慮されていないが、たんぱく質とともにその他の成分として計算されている。推定値は Wang et al. のモデルに基づいている。参照値の体重や密度の計算には含まれていない。
水	0	0.99371	36	42	60.00	水重量は、同位体希釈体積、調整係数（通常 O ¹⁸ の場合は 0.99、 ² H ₂ O の場合は 0.96）、及び水の密度の積により計算される。
たんぱく質	4.166 – 5.055	1.34	36-37	10.6	15.1	たんぱく質重量は、in vitro の水とたんぱく質の重量として表している。個々のたんぱく質及びたんぱく質族の密度は 1.34g/cm ³ の世界的な推奨値と異なる場合がある。
ミネラル						
総ミネラル		3.042		3.7	5.3	軟組織ミネラル重量/総骨灰分量を 0.235 と仮定している。
軟組織		3.317	40	1.0	1.4	各組織のミネラル重量と非骨性の体液中のミネラルの総重量から推定した。40°Cの密度を用いて計算した。
骨		2.982	36-36.7	2.7	3.9	動物の長骨から得られた値に基づいている。
その他						
Siri		1.565				総骨ミネラル/たんぱく質を 0.35 と仮定している。
Allen		1.399	37			たんぱく質、非骨性ミネラル、グリコーゲンを含んでいる。
全体		1.058	36	70	100	脂質、水、たんぱく質、骨ミネラル及び軟組織ミネラル量の複合体。

1-3-2 エネルギー摂取量の測定方法

EI は、食事調査により摂取した飲食物に含まれるエネルギー量を加算して算出する。しかし、各調査方法には特徴があり、調査の目的や調査期間によって適切な調査方法を選択する必要がある。そこで、食事調査の方法と特徴について以下に記述する。

1) 食事記録法

食事記録法とは、対象者が一定期間内に摂取した食品名（材料名）、摂取量、料理名などを、原則としてリアルタイムで記録する方法である。調査者が対象者の食事を記録する直接法と、対象者が自らの食事を記録する間接法（自記式）がある。また、食事記録法には、重量を測定する秤量記録法と、摂取量を目安で推定する目安量記録法がある。食事写真を撮影し、画像から摂取量を推定する写真記録法もある。

1日あるいは短期間の記録法は集団の平均値の推定に用いられる。調査期間中にリアルタイムで食品と重量を記録するので記入漏れが少なく、正確な情報が得られやすい。しかし、間接法では対象者の食知識（食品名や調理方法など）によって誤差が起きやすく、対象者の負担も大きいモチベーションの高い対象者でないと実施できない場合がある。また、食事を記録して他人に報告するという非日常的な活動によって、食べる量が普段よりも増減したり、いつもより質のよい食品選択をしたりすることが観察されている。対象者の平均 EI が「真の平均値」の 20% の誤差範囲内に入るために必要な調査日数は 3 日間であることが報告されている (30, 31)。

2) 24 時間思い出し法

対象者の調査日前日（24 時間以内）の食事内容（摂取食品名と摂取量）を面接者が聞き取る方法である。対象者は思い出し期間が前日 1 日だけなので、比較的思い出しやすい。24 時間思い出し法の妥当性、信頼性を高めるためには、詳細な面接手順、面接者の訓練及び再

訓練期間の設定、調査期間中に頻回に出現する食品や料理を集めてコード付けするなどの、面接の標準化は重要である。標準化・システム化された 24 時間思い出し法は、米国の国民健康・栄養調査にあたる National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) で用いられている。近年ではオンラインで行える調査ツールも開発されている(32)。

24 時間思い出し法は、一般的には集団の栄養状態の判定に用いられている。調査時間は一人当たり 20~40 分であり、対象者の負担が比較的小さいため、食事記録法よりも協力が得られやすく、広い範囲の集団に適用できる。調査員が面接を行い、回答を記録するので、対象者が読み書きできなくても調査が可能である。また、調査が摂取後に行われるため、調査による食習慣への干渉が少ない。しかし、対象者の記憶に依存する点ため、二重標識水 (doubly labeled water; DLW) 法で測定する TEE よりも過少申告する傾向が観察されている (33, 34)。

3) 食物摂取頻度調査法 (food frequency questionnaire; FFQ)

過去の食物や栄養素等の習慣的な摂取量を把握するために開発された方法である。この調査票は、①どのような食物を食べたかを問う食品リスト、②ある一定期間内の摂取頻度、③1 回あたりの平均的な摂取量 (目安量) の要素からなる。対象者は、一定期間内に摂取した食品の摂取頻度を、調査用紙に従って回答する。

この方法は、ハーバード大学の Willett *et al.* (35) が妥当性の高い調査票を用いた疫学調査結果を報告したことで、栄養疫学の調査法として世界的に広がった。FFQ には、食品の摂取頻度のみ質問する定性的 FFQ と、食物の摂取頻度と摂取量について質問する半定量 FFQ がある。後者はエネルギー、栄養素あるいは食品成分の各個人における習慣的な摂取量を推定するために行われる。しかし、推定された栄養素などの摂取量は個人の絶対量というよりは、疾患との関連を検討するため、集団におけるランク付けに用いられる相対値と考えるのが良い。栄養教育の場では、食生活に問題のある者のスクリーニングに利用される場

合もある。

対象者及び調査者の負担、データ収集と処理の時間、人手、費用が食事記録法や 24 時間思い出し法よりもはるかに小さい。しかし、過去の食物摂取に関する対象者の記憶に依存する点や、食事摂取に関する詳細な情報が得られないので、正確度は劣る(34)。FFQ の調査票は様々な種類が開発されており、目的に応じて選択するのが望ましいが、調査票の食品リストが多くなればなるほど、エネルギー及び栄養素摂取量が過大評価される傾向にある。食品・栄養素摂取量は、複数日の食事記録法と FFQ の相関係数は 0.4~0.7 の範囲にあることが報告されている(36)。

4) 食事歴法

食事歴法は、対象者が通常摂取している食品の目安量や頻度ばかりではなく、食事様式の情報も得るものである。具体的には、熟練した管理栄養士等が対象者と面接し、朝食、昼食、夕食、夜食、間食、晩酌の摂取の有無、摂取時間、平日・休日の摂取パターンなどを聞き取る。さらに、日常的に各食事において、主として何をどのくらい食べているかを聞き出す。調理法についても聞き取り、調理損失などを考慮することで、より正確な栄養素摂取量を推定できる。

食事歴法は、短期間の食物摂取量とその頻度だけではなく、日常の食事様式と詳細な食事摂取状況を把握できる。調理損失や一緒に食べた食品間の相互作用も考慮でき、実際の摂取量に近い結果を出せると考えられている。しかし、思い出しが困難な高齢者、病人、幼児などへの適応は難しい。また、特定の食事様式を持たない対象者には不向きである。この調査を面接で行う場合、熟練した管理栄養士等を必要とする。

1-3-3 エネルギー消費量の測定の方法

1) メタボリックチャンバー法

ホテルのシングルルーム程度の大きさの密閉された施設に滞在し、滞在期間中の酸素 (O_2) 濃度と二酸化炭素 (CO_2) 濃度の変化を測定することでエネルギー消費量を測定する。Atwater と Benedict (37)は Atwater-Rosa-Benedict 型熱量計を開発し、密閉した断熱の部屋にヒトを生活させ、室内を循環する水温の上昇から発生した熱量を、空気の換気量と気流の温度変化から、肺と皮膚を通して体から放出される CO_2 と水の量からエネルギー消費量を測定した。この方法は直接熱量計と呼ばれている。この方法は装置が大掛かりで、活動内容も限定されるため、最近ではほとんど使用されていない (38)。一方、現在使われているメタボリックチャンバーは間接熱量計と呼ばれ、エネルギーを産生する際に消費する O_2 量と CO_2 排出量を測定し、エネルギー消費量を推定する。間接熱量計は直接熱量計と比較して簡便に測定できる上に、直接法による測定値ともよく一致する。さらに、消費したエネルギーの基質も測定できるため、正しく測定することで有用な情報が得られる方法であると考えられている (38)。

2) 二重標識水 (DLW) 法

DLW 法は、日常生活の平均的な TEE を測定するために開発された方法である (39)。重水素 (2H) と重酸素 (^{18}O) で標識された水 (DLW) を摂取し、その 1~2 週間後までの体内濃度の減衰量を調べることで、この期間の二酸化炭素産生量 (rCO_2) を推定する(40)。その基本原理は、水素と酸素の代謝速度の違いを利用している。 2H は尿や汗などの水分 (H_2O) として代謝される一方、 ^{18}O は水分 (H_2O) と呼気 (CO_2) として代謝されるため、 ^{18}O は 2H と比較して代謝速度が速い。このことを利用し、以下の式から rCO_2 が推定される。

$$rH_2O \text{ (kg)} = N_D k_D$$

$$rH_2O \text{ (kg)} + 2rCO_2 \text{ (L)} = N_o k_o$$

$$rCO_2 \text{ (L)} = 1/2 (N_o k_o - N_D k_D)$$

r_{H_2O} : 水分産生量、 N_O : ^{18}O の希釈容積、 k_O : ^{18}O の代謝速度、 N_D : 2H の希釈容積、 k_D : 2H の代謝速度

希釈容積は全身の体水分量 (TBW) と等しいと仮定されているが、 2H の 4.1 % は体タンパク質の合成などに、 ^{18}O の 0.7 % は骨ミネラルの炭酸塩化などに使われるため、これらを TBW から差し引いて推定する必要がある。したがって、 r_{CO_2} は以下の推定式で算出される。

$$r_{CO_2} (L) = (TBW (kg) / 2) \times (1.007k_O - 1.041k_D)$$

しかし、実際には化合物中の同位体の相対濃度は体内水分の存在量と異なっており、体内から発生する水蒸気中の 2H は体水分の 2H の 94.6 % である。 CO_2 中の ^{18}O の場合は、 ^{18}O の存在比が体水分よりもやや高く、1.038 倍となる。これらを推定式に組み込むと次の推定式で表される。

$$r_{CO_2} (L) = 0.455 \times TBW (kg) (1.007k_O - 1.041k_D)$$

この r_{CO_2} と呼吸交換比 (respiratory exchange ratio: RER) または食事商 (food quotient: FQ) から測定期間の平均的な TEE を、Weir の式 (41) を用いて推定する。

$$TEE (kcal/日) = 22.4 \times r_{CO_2} (L) \times (1.10 \times 3.90 / RER \text{ または } FQ)$$

DLW 法は測定機器を携帯する必要がなく、測定期間中の生活に制限がほとんどないため、日常的な TEE を測定するのに有用な方法であると考えられている。しかし、DLW が非常に高価で入手しづらいうえに、いくつかの仮定に基づいて TEE を推定しているため、慎重

に測定しないと分析誤差が大きくなることが指摘されている。エネルギー代謝測定室を基準とした場合、確度及び精度は±5%程度あることが報告されている(38)。

3) 心拍数法

トレッドミルや自転車エルゴメーターを用いた漸増運動負荷試験における心拍数と酸素摂取量の関係式を用いて、運動中や生活活動中の心拍数から TEE を推定する(42)。しかし、安静時から低強度運動の活動では心拍数とエネルギー消費量の相関関係は弱く(42, 43)、DLW 法と比較して TEE を 12.3% 過大に評価することも報告されている(44)。そこで、心拍数から TEE を推定するためにいくつかの方法が考案されている。Spurr et al. (45)は、安静時の最も高い心拍数と運動中の最も低い心拍数の平均値を安静時と高強度運動の心拍数回帰直線の屈曲点とし、屈曲点未満の心拍数では安静時代謝量 (REE) を使い、屈曲点以上では運動時の心拍数と酸素消費量の回帰式からエネルギー消費量を用いて加算する flex heart rate 法を開発した。Flex heart rate 法は、アスリートを対象とした研究に用いられている(46)。さらに測定精度を高めるために、心拍数と加速度組み合わせて用いる方法も考案されている(47-49)。

4) 加速度計法

加速度の大きさや変化の速さが酸素消費量と正の相関があることを利用してエネルギー消費量を推定する方法である。身体の動きを腕、腰などに装着した携帯型の加速度計で記録することで、TEE を正確に推定できる (50, 51)。従来は歩数計や一軸加速度計が用いられていたため、計測軸と異なる加速度を評価できず、歩行以外の生活活動を過小評価する傾向があった。実際に、アスリートを対象とした研究において、ランニング中心のオフシーズンとサイクリングやウエイトトレーニング、インラインスケート、スライドボードエクササイズなどの運動中心のプレシーズンのエネルギー消費量には差がなかったにも関わらず、プ

レシーズンには加速度計のアクティビティカウンターがオフシーズンよりも低値だった、すなわち活動量が過少評価されていたことが報告されている(52)。しかし、近年の加速度計は3軸加速度センサーが搭載され、日常生活活動のエネルギー消費量を精度高く評価できるようになった(53)。

5) 要因加算法

生活活動記録をもとに、身体活動と時間から簡易的に TEE を算出する方法である。各身体活動が安静時の酸素消費量 (3.5 ml/kg 体重/分) またはエネルギー消費量 (1 kcal/kg 体重/時) の何倍であるかを示した代謝当量 (metabolic equivalents; METs) に体重と活動時間を積算し、それらを加算して TEE を求める。

要因加算法は、対象者の記録に依存すること、リスト化された活動以外の METs を求めることができないことなどにより、DLW 法を用いて測定したエネルギー消費量よりも過小評価や過大評価することが報告されている(54-56)。要因加算法は、特に測定機器や分析機器を必要としないため手軽に TEE を評価できるが、対象者の記入漏れや誤申告、解析者による活動のコード選択により誤差が生じることに注意しなければならない。

1-3-4 身体組成の測定方法

身体組成を適切に評価することは、栄養や運動の介入効果を評価するために重要である。身体組成を測定する方法は様々あり、方法によって原理及び特徴が異なる。また、身体組成変化を測定する際には、測定方法の精度が高くなければ真の変化を捉えることはできない。ここでは、各身体組成測定方法の原理及び特徴についてまとめる。

1) 体密度法

体密度法は、身体の体積を測定し、BM と体積 (BV) から身体密度 (Db) を測定する。

そして、Db から FM 及び FFM を、推定式を用いて推定する。体密度法の代表的な推定式は以下の通りである。

$$\text{体脂肪率 (\%)} = (4.95 - 4.50) \times 100 / \text{Db (g / ml)} \quad (57)$$

$$\text{体脂肪率 (\%)} = (4.570 - 4.142) \times 100 / \text{Db (g / ml)} \quad (58)$$

これらの推定式は、死体解剖によって得られた組織の組成（表 1）が一定であることを前提条件としている。

1-1) 水中体重法

水中体重法は、長年の間、身体組成測定ゴールドスタンダード法として用いられてきた。その基本原理は、アルキメデスの原理を応用している。ヒトが水中に入ると浮力が働くが、この浮力は体積によって異なる。したがって、空気中での体重 (Wa) と水中での体重 (Ww) の差と、水の密度から BV を推定し、BM と BV を使って Db を算出する。肺内の空気もまた浮力を生じ水中体重に影響を及ぼすため、最大呼気位で水中体重を測定するが、それでも肺内に空気が残留する。この機能的残気量 (RV) を推定するために、窒素、酸素、ヘリウム のいずれかを使って測定して補正する。さらに、気道などの死腔が約 100mL 存在する。これらを考慮した水中体重法での Db の算出式は、次のように表される。

$$\text{Db (g / ml)} = \text{Wa (kg)} / \{[(\text{Wa (kg)} - \text{Ww (kg)}) / \text{Dw}] - (\text{RV (L)} + 0.100)\}$$

Db, 身体密度; Wa, 地上での体重; Ww, 水中での体重; Dw, 水の比重; RV, 機能的残気量

専用の施設が必要であるため、スポーツ現場で手軽に測定するには不便である。さらに、水中に数秒息を止めて潜る必要があるため、対象者の負担が大きい。また、RV 測定において十分に呼気を排出できない対象者では、Db の誤差が大きくなる。

1-2) 空気置換法

空気置換法 (ADP) は、水中体重法に代わる方法として開発された(59)。専用の装置内に入り、圧力変化と体積変化から BV と Db を測定する方法である。装置はテストチャンバーとリファレンスチャンバー、振動板から成っており、約 40 秒間の呼吸の波から BV を推定する。ADP の機械内部の空気はボイルの法則に基づいて断熱変化をするが、人体表面や胸腔内の空気はポワソンの法則に基づいて等温変化をする(60)。具体的には、人体表面は体表面積に定数をかけて補正され (体表面積アーチファクト; surface area artifact, SAA)、体積の実測値からこの SAA を減じている。また、胸腔内の空気は 40%圧縮しやすいため、圧縮された肺容量 (thoracic gas volume; V_{TG}) の体積は、体積の実測値に加算される。したがって、ADP では測定で用いられる推定体表面積が、測定されるヒトの体表面積に近い状態であること、 V_{TG} の測定が規定通り行われていないと誤差を生じることがある。

$$BV (L) = \text{実測体積 (L)} - SAA (L) + 40 \% V_{TG} (L)$$

水中体重法と比較して対象者の負担が少ないが、専用の機械が必要である点、測定の度に機械のキャリブレーションが必要であるため測定に時間を要する点を考慮すると、競技現場では用いにくい。

2) 安定同位体希釈法

既知の濃度の 2H や ^{18}O を含む水を摂取し、全身の TBW によって希釈された量から TBW を推定する。そして、FFM の約 73%が水分であることから FFM を推定する。体水分は様々な影響を受けるため、その挙動の特徴を把握し、①安定同位体は体水分のみに分布する、②安定同位体は水を含む全ての解剖学的区画に均等に分布する、③安定同位体の平衡状態になる速度は速い、④安定同位体も体水分も安定同位体が平衡状態になるまでの間に代謝さ

れないことが仮定されていることを理解しておかなければならない。ただし、摂取した ^2H の約 4.2 %、 ^{18}O の 0.7 % はたんぱく質や脂肪組織との結合に使用され、体水分とは異なる区画に分配されることが明らかとなっている (61)。安定同位体は静脈投与後 2 時間、皮下注射及び経口摂取後には 3 時間で全身の体水分において平衡状態になる (62)。また、投与後 1~2 時間では呼気中の CO_2 は血漿の ^{18}O 濃度に対して 40 % 過大評価されることや、尿中濃度は血漿濃度よりも低くなることが観察されている (63)。特に尿サンプルを扱う際には、安定同位体投与前の体水分状態を反映した尿が蓄積している可能性があるため、サンプリングまでに排尿し、投与後 3~5 時間でサンプリングすることが勧められている (40)。検体採取まで体水分を平衡状態に保つために、測定が終了するまで原則飲食をしないこと、運動などによる発汗のないよう注意しなければならない。この他に、安定同位体摂取の翌日と、摂取後約 14 日に検体を摂取し、濃度変化の傾きから TBW を推定する方法もある。この場合、安定同位体摂取から検体採取が終了するまで、水分代謝量が毎日ほぼ一定であることが求められる。安定同位体の分析には専用の分析装置が必要となり、結果が得られるまでに数日から数か月かかる。

3) 二重エネルギー X 線吸収法

二重エネルギー X 線吸収法 (dual energy X-ray absorptiometry; DXA) は二種類の X 線を人体に照射し、X 線の減衰量の違いから骨塩量 (Mo)、FM、FFM の量を推定する方法である。DXA で測定される脂肪とは、脂肪組織ではなく脂質そのものを指し、除脂肪軟組織は脂質以外の軟組織を指している。DXA は X 線を照射するリスクについても議論されているが、CT や胸部 X 線レントゲンと比較すると非常に少なく、航空機で日本とアメリカを往復する際の被ばく量よりも少ない (表 2)。DXA は変動係数が約 1 % と高い精度で測定できることから、現在、国際的に臨床現場やスポーツ現場における身体組成測定法の中で最も精度の高い方法と考えられ、アメリカスポーツ医学会 (ACSM) や国際オリンピック委員会

(IOC) からも推奨されている方法である(64, 65)。しかし、被ばく線量や測定精度は測定機器メーカーや機器の構造 (ペンシルビーム、ファンビーム)、測定部位、測定時間などによって異なることに注意が必要である。また、飲食物摂取は身体組成の測定値にわずかな影響を与えるため考慮しなければならない (66)。血液透析のように 1~4 kg の塩を含む液体が除去されると、Mo や FM には影響しなかったが、FFM の推定値が減少したことが報告されている (66)。この他、筋グリコーゲン量の変化が FFM の推定値に影響することも報告されているため(67)、アスリートの身体組成測定の際には測定前の条件に注意が必要である。

表 2. X 線を用いた各種医学検査装置による被ばく量

	等価線量	吸収線量	臨床で用いられる場面
X 線 CT	≥8mSv	≥10mGy	大腸がん、胃がん、脳挫傷、脳内出血、内臓脂肪量検査等
X 線 マンモグラフィー	0.4mSv	3mGy	乳がん
骨折検査単純 X 線 撮影	0.02mSv	0.07～ 5.6mGy	骨折
胸部単純 X 線撮影	0.06mSv	0.01～ 0.07mGy	呼吸系疾患・循環器系疾患
DXA 法	0.01mSv	0.003mGy	全身及び身体各部位の骨密度・骨塩量、骨粗鬆症検査
(参考値)			(備考)
日常生活での 被ばく量	2.4mSv/年 (0.007mSv/日)		宇宙からの放射線など、自然界で日常の生活している場合に受ける値 (世界の平均値) 日本は、2.1mSv/年
航空機旅行	0.11～0.16mSv		東京-ニューヨーク間を 1 往復した場合。高度による宇宙線の増加によっ て被ばく量が増える。

4) 生体電気インピーダンス法

生体電気インピーダンス法 (BIA) は、身体に電極を装着し微弱な交流電流を流し、そのインピーダンス値を測定することで身体の水分量を推定する。最も一般的な方法は、交流電流を流す 2 つの電極と、電流を検出する 2 つの電極を装着する四極法である。交流電流を流した時に体水分が多い場合には抵抗が少なく、骨や脂肪が多い場合には抵抗が高くなる。理論的には電流は体全体に均一に通電するが、人体は均一な導体ではないうえに、一般的には腕や脚に電極を装着するため頭部の組成は反映されない。四肢のレジスタンスは、水分含有量の多い筋組織を反映するが、体幹部は肺、心臓、大動脈、腸管、腹部脂肪など複雑な構造をしており、結果を慎重に解釈する必要がある。開発初期の測定器では、仰臥位にて測定を行っていた。これは、立位での測定は重力によって脚部に体水分を蓄積するためである(68)。しかし、現在は立位で測定する機器が開発されており、より簡便に測定できるようになっている。電極の配置や電流の流し方、インピーダンス値から身体組成へ換算する方法は、開発業者により異なっているため、身体組成をどのように算出しているかは測定機器によって異なる。ただし、TBW の定量化においては正確だということが報告されている(69, 70)。身体組成の推定は、TBW とインピーダンスインデックス (セグメント長の二乗 (S^2)/R) が直線関係にあること(71)、TBW が FFM の 73 %を占めていること(72)に基づき、水中体重法や DXA 法、身体組成の多成分モデルなどを標準法としてインピーダンス値との関係式から算出されていることが推察される。

BIA には、単一周波数 (50 kHz) を用いる方法と多周波の電流 (0~1000 kHz) を用いる方法がある。単一周波数を用いた測定では、TBW は比較的精度高く測定できる。一方、多周波数を用いた測定では、低周波数の電流は細胞内を通電しないため細胞外の水分状態を反映し、高周波数の電流は細胞内にも通電するため細胞内外の水分状態を反映する。これらを組み合わせることで、細胞の水分状態まで把握することができる。

いずれの方法においても、身体組成を推定する推定式に用いたデータベースの人種、性別、

年齢などのプロフィールの違いにより得られる結果が異なることに注意が必要である。さらに、身体組成の変化を推定するには問題がある。レジスタンス (R) の変化は主に FFM や TBW の変化を反映するため、重量の変化が主に脂肪である場合は検出が難しい可能性がある。

5) 皮下脂肪厚

皮下脂肪厚法はその名の通り、皮下脂肪の厚さをキャリパーで挟んで測定する方法である。皮下脂肪厚は FFM との相関は低い ($r = 0.2$ 程度) が、体脂肪率とは高い相関を示す ($r = 0.7 \sim 0.9$) (73, 74)。しかし、皮下脂肪の分布は部位による差だけでなく、性別、年齢、身体活動量によって異なる(75)。また、競技種目による差も大きいことが報告されている(76)。

皮下脂肪厚から全身の FM を推定する際には、数か所の皮下脂肪厚の合計値から Db を推定して体脂肪率を推定する方法と、皮下脂肪厚から直接体脂肪率を推定する方法がある。対象者が日本人の場合によく用いられるのが Nagamine & Suzuki の式(77)によって Db を推定し、体密度法による体脂肪率算出式に代入する方法である。

$$\text{成人男性 : Db (g/ml) = 1.0913 - 0.00116} \times (\text{上腕背部 (mm)} + \text{肩甲骨下部 (mm)})$$

$$\text{成人女性 : Db (g/ml) = 1.0897 - 0.00133} \times (\text{上腕背部 (mm)} + \text{肩甲骨下部 (mm)})$$

皮下脂肪厚法の最も大きな誤差の要因は、測定者の経験や技術によるものである(78)。したがって、測定者は十分に測定方法を熟知し、訓練を行い、同一測定者が反復測定したときの測定誤差と、測定者間の誤差などを事前に確認した上で測定し、データを解釈することが望ましい。もう一つの誤差の要因として、測定機器の問題がある。キャリパーは、機器によって測定時にかかる圧力、測定範囲、最小目盛りが異なる。また、使用していくにしたがっ

て測定時の圧力も変わってくるため、定期的にキャリブレーションする必要がある。

皮下脂肪厚も Db を推定する方法であるため、細胞内の分子比率が変わるような状況では誤差を生じる。アスリートの測定では、運動直後や暑熱環境下などによる脱水状況や、怪我や病気による浮腫がある場合には誤差となる可能性がある。

6) 身体組成の多成分モデル

身体組成の多成分モデルは、身体組成を 3 成分以上に分けて分析する方法である。3 成分 (3C) モデル、4 成分 (4C) モデル、6 成分 (6C) モデルなどのモデルが開発されている。これらの多成分モデルは、複数の成分に分けて測定することで 2C モデル (FM、FFM) の「FFM の水、タンパク質、ミネラルの割合は一定である」という仮定による誤差を少なくする狙いがある。TBW の測定値を 2C に追加して 3C に分けて分析すると、TBW の個人差による FM 及び FFM の推定値の誤差を軽減できる(72)。さらに、Mo を加えた 4C モデルでは、Mo の個人差による身体組成推定値の誤差を軽減できる(79-82)。

多成分モデルは、脂肪、水、骨塩の密度を一定と仮定し、体重からこれらを差し引いた重量は既知の密度のタンパク質及び軟部組織のミネラルであると想定される。また、別の考え方として、タンパク質、軟部組織ミネラル及びその他の成分を結合された残留成分として、既知の密度で計算する方法がある。このときの各成分の密度は、体脂肪 0.9007 g/cm³、水 0.99371 g/cm³ (36°C)、骨ミネラル 2.982 g/cm³、残留成分 1.404 g/cm³ (37°C)、タンパク質 1.34 g/cm³、グリコーゲン 1.52 g/cm³、軟組織ミネラル 3.317 g/cm³ と仮定されている(83)。

多成分モデルにおける誤差は、大きく分けて 2 種類ある。まず 1 つ目は、FM を推定するために様々な方法を用いて複雑なモデルを使用するため、測定者、測定機器、研究所ごとに測定誤差が発生する。2 つ目は、数学関数的な誤差である。すなわち、実験によって得られた予測式による誤差である。未知の成分を評価するため、用いる密度の参照値による誤差も

含まれる。そのため、多成分モデルの誤差の計算は複雑であり、仮定誤差と測定誤差の両者の誤差の要因を含んでいる。

7) ホールボディ・カウント法

1950年代から開発された身体組成測定の方法である(84)。自然界に存在するカリウムの三種の同位体 (^{39}K : 93.1%、 ^{41}K : 6.9%、 ^{40}K : 0.0118%) のうち ^{40}K は放射性があり、自然崩壊によって高エネルギーの γ 線を産生する。 ^{40}K による 1.46MeV の γ 線を同定することにより全身のカリウム量 (TBK) を推定することができる。カリウムは人体の細胞内液に存在しているため、TBK は細胞内液量及び細胞量を反映していると考えられる。多くの研究によって FFM の TBK 濃度が調査され、FFM を算出するための TBK/FFM の変換係数がレビューされている (85)。そのため、人体に存在する ^{40}K カウントから人体の TBK を推定し、TBK から FFM を推定することができる。しかし、高価な専用装置が必要となるため、特定の研究所でのみ測定が可能であり、利便性は低い。

1-3-5 急速減量が身体組成に及ぼす影響

食事制限や飲水制限、発汗を伴う急速減量は、身体組成を急激に変化させる。これまでに急速減量が身体組成に及ぼす影響を調べた研究はいくつかある (15, 86-88)。最も大きな変化を示すのは TBW である(15)。ここで問題となるのは、多くの身体組成測定法的前提条件に FFM の水分割合が 73% であることが仮定されている点である。急速減量時は脱水を伴うため、この仮定が成り立たない可能性がある。先行研究の急速減量時の身体組成変化の測定方法は一定ではなく、皮下脂肪厚 (20, 89) や BIA 法 (88, 90) が主流であった (表 3)。これらの研究では、1週間以内で 2.9~5.2 kg の減量で FM は 1.0~1.5 kg (体重減少量の 27~41%)、FFM は 1.7~3.8 kg (59~73%) 減少していた(15, 20, 88-90)。また、レスリングのシーズン前後で身体組成及び形態計測による上肢と下肢の周囲径と皮下脂肪厚の測定

により、FFM や下肢の横断面積が減少すること(91) や、核磁気共鳴画像法 (MRI) による測定で実際の試合に向けた急速減量により体幹部と大腿部の筋横断面積が減少することが報告されている(88)。さらに、急速減量は筋グリコーゲン量を減少させることが動物 (92)やヒト (16, 17)の実験で認められている。グリコーゲン貯蔵量は、全身で見ると体重のわずか0.7%であるが、グリコーゲンが肝臓や筋内に1g貯蔵される際に2.7~4gの水を合成するため(93)、グリコーゲン量の変動はTBWや身体組成の推定に影響している可能性がある。したがって、急速減量時にはTBWの変化を考慮した身体組成の多成分モデルで評価する必要があると考えられる。しかし、これまでに急速減量時の身体組成変化を、身体組成の多成分モデルで評価した研究はほとんどみられない。

表 3. 体重階級制競技選手の急速減量による身体組成変化を示した研究

著者	年	対象選手	減量 日数	身体組成 測定法	体重 減少量	体脂肪 減少量	除脂肪 減少量
Sagayama <i>et al.</i>	2014	柔道、 ボクシング	7日	3Cモデル (DLW、 UWW)	4.4 kg	1.5 kg (34%)	2.9 kg (66%)
Lopes-Silva <i>et al.</i>	2014	柔道	5日	皮脂厚	2.9 kg	1.2 kg (41%)	1.7 kg (59%)
Durguerian <i>et al.</i>	2016	ウエイト リフティング	5-7日	皮脂厚	4.3 kg	1.3 kg (30%)	3.0 kg (70%)
Kukidome <i>et al.</i>	2008	レスリング	1週間	BIA	5.2 kg	1.4 kg (27%)	3.8 kg (73%)
Yang <i>et al.</i>	2015	テコンドー	4日	BIA	3.7 kg	1.0 kg (27%)	2.7 kg (73%)
			4週間	BIA	3.4 kg	2.5 kg (74%)	0.9 kg (26%)

3C: 3成分、DLW: 二重標識水法、UWW: 水中体重法、皮脂厚: 皮下脂肪厚法、
BIA: 生体電気インピーダンス法

第2章 空気置換法による身体組成評価の妥当性の検討（研究課題1）

2-1 緒言

ADP は身体組成測定法の中で古くから用いられてきた水中体重法に代わり、対象者に負担が少なく水中体重法と同等の精度で測定できるとされ、近年スポーツ科学分野でよく用いられている(26, 65)。ADP は Db から身体組成を FM と FFM の 2C に分けて表す方法である。近年では体組成を 2C に分けて推定するだけでなく、さらに詳細な分子レベルに分ける 3C モデルや 4C モデルなどの多成分モデルが考案されている。Db はこれらの多成分モデルの算出式にも用いられており、Db を正しく評価することは身体組成を推定する上で欠かせない。ADP はボイルの法則に基づいて体積を測定する方法である(59, 60)。このときに胸腔内の空気は等温変化をするため、チャンバー内の空気のような断熱変化をする空気よりも 40% 圧縮される（ボワソンの法則）。そのため、胸腔内の体積はこれを考慮して補正する。

先行研究において、肥満女性が 16 か月間の減量プログラムを行った後、 V_{TG} が増加したことが報告されている(94)。この研究では、実測した V_{TG} （実測 V_{TG} ）と推定式より求めた V_{TG} （推定 V_{TG} ）を用いた FM の減少量を比較すると、推定 V_{TG} を用いたときには実測 V_{TG} を用いたときよりも FM の減少が 400 g（減量前体脂肪量の 1%、体重減少量の 11%）多くなることが認められた。そのため、アスリートの急速減量時においても V_{TG} が増加し、その結果が身体組成の結果に影響する可能性が考えられた。

そこで、本研究は急速減量及び急速減量後の回復が身体組成推定値に及ぼす影響を男性レスリング選手で検討した。

2-2 方法

1) 対象者及び研究参加の同意の取得方法

本研究はレスリングのオフシーズンである 1 月から 3 月の冬季に実施した。対象者は所

属チームの指導者を通じて募集した。対象者の条件は 18 歳以上で、過去に大会に向けて 1 週間に 6 %以上の急速減量をした経験があり、事前のメディカルチェックにて代謝性疾患、甲状腺疾患、心疾患のなかった者とした。この条件に適合した関東地区の大学のレスリング部に所属している男子レスリング選手 10 名（平均値 ± 標準偏差; 年齢: 20.4 ± 0.5 歳; 身長: 168.4 ± 4.2 cm; BM 73.0 ± 7.9 kg）を対象者とした。競技レベルは国際大会出場及び全国大会出場の選手であった。

本研究は全ての対象者に書面と口頭にて研究の概要、測定項目、起こりうる危険性とそれに対する配慮、プライバシーへの配慮、データの所有権とデータの管理方法、研究参加を取りやめる権利について説明し、同意書への署名を得て実施された。本研究は、国立スポーツ科学センター倫理審査委員会の承認を得て実施された（通知番号 036（2014 年度））。10 名の対象者のうち、空気置換法における V_{TG} の測定基準（ $\text{merit} \leq 0.50$ Hz, $\text{airway} < 35.0$ cm H_2O ）を 3 回の測定（急速減量前; T1、急速減量後; T2、回復後; T3）のうち 1 回でも満たすことができなかった 2 名のデータは、解析から除外した。

2) 実験プロトコル

体重及び身体組成の測定を 3 回（T1、T2、T3）実施した。1 回の測定には約 6 時間要した。対象者には測定前日からアルコールや刺激物（カフェインなど）を含む飲料の摂取を控え、普段通りの食事をするように指示した。対象者は急速減量前の測定前日に研究所に来所し、自由に夕食を摂取した後、宿泊をした。測定前日の食事は午後 11:00 までに摂取するよう指示し、それ以降の飲食は水のみとした。

測定は午前 6:30 より実施した（T1）。身長、BM、身体組成を測定し、測定終了直後から 53 時間で BM の 6%を減少させた。減量方法は対象者の自由選択とし、自宅や所属大学にて指導者の安全管理のもと実施させた。対象者は 53 時間後の午前 11:30 に再び研究所に来所し、減量前と同様の測定（T2）を行った後、各対象者の BM に応じた栄養素摂取量に調

整した規定食を摂取した（表 4、回復期）。食事は睡眠時間を考慮して午後 11:00 までの約 5 時間とし、翌朝 6:30 より回復後の測定を行った（T3）。

3) 形態計測及び空気置換法

身長は、0.1 cm 単位のデジタル身長体重計を用い（エー・アンド・デイ（株）、東京、日本）、裸足で測定した。BM 及び身体組成は空気置換法（BODPOD Body Composition system ver. 4.24、COSMED、Roma、Italy）を用いて、23°C に保たれた室内で水着とスイミングキャップを着用し、裸足で測定した。測定手技は BODPOD のソフトウェア（version 4.24, COSMED、Rome）、及び先行研究（59）に従って行った。初めに BM を測定し、BV を 2～3 回測定し、V_{TG} を測定した。V_{TG} 測定は、merit（≤0.50 Hz）と airway（<35.0 cm H₂O）の基準を満たすまで実施した。merit（T1: 0.04 ± 0.06 Hz; T2: 0.03 ± 0.05 Hz; T3: 0.07 ± 0.07 Hz）及び airway（T1: 17.6 ± 6.9 cmH₂O; T2: 19.2 ± 7.2 cmH₂O; T3: 17.5 ± 8.5 cmH₂O）は 3 回の測定で差はみられなかった。T1 測定時に本研究の被験者の 5 回の測定値から求めた V_{TG} の被験者間 SD は 0.71 L、被験者内 SD は 0.16 L だった。

被験者の Db、BV、V_{TG} は、先行研究（59）の推定式を用いて算出した。

$$Db \text{ (kg/L)} = BM \text{ (kg)} / BV \text{ (L)} \dots \dots \dots (1)$$

$$BV \text{ (L)} = BV_{\text{raw}} + 0.40 \times V_{\text{TG}} \text{ (L)} - SAA \text{ (L)} \dots \dots \dots (2)$$

$$SAA \text{ (L)} = k \times \text{体表面積 (cm}^2\text{)} \dots \dots \dots (3)$$

SAA は体表面積（95）と定数 k（ $-4.671 \times 10^{-5} \text{ L/cm}^2$ ）から算出される。

$$\text{体表面積 (cm}^2\text{)} = 71.84 \times BM \text{ (kg)}^{0.425} \times \text{身長 (cm)}^{0.725} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{実測 } V_{\text{TG}} \text{ (L)} = (m/1.4) - \text{胸腔内死腔} \dots \dots \dots (5)$$

m は体積測定時の 3 秒間に起こる呼吸の波と主室内空気圧と主室内体積の変化 $[Y_i - (mX_i + b)]$ の最小二乗法から算出された。

推定 V_{TG} は、下記の推定式 6 を用いて算出した。

$$\text{推定 } V_{TG} \text{ (L)} = \text{FRC (L)} + 0.5 \times \text{一回換気量 (L)} \dots \dots \dots (6)$$

一回換気量は測定時にコンピュータによって求められる。推定 FRC は下記の推定式 7 を用いて算出した (96)。

$$\text{FRC}_{\text{pred}} \text{ (L)} = 0.0472 \times \text{身長 (cm)} + 0.0090 \times \text{年齢 (歳)} - 5.290 \dots \dots \dots (7)$$

体脂肪率 (%FM) は下記の推定式 8 (57) を用いて算出した。

$$\%FM = (4.95 / D_b \text{ (kg/L)} - 4.50) \times 100 \dots \dots \dots (8)$$

FM 及び FFM は式 9 及び式 10 を用いて算出した。

$$\text{FM (kg)} = \text{BM (kg)} \times \%FM / 100 \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{FFM (kg)} = \text{BM (kg)} - \text{FM (kg)} \dots \dots \dots (10)$$

当研究所において実施した 22 名の測定値から求めた変動係数は、BV で 0.1%、%BF で 4% だった (28)。また、アスリートのサブグループ (n=13、年齢 21 ± 3 歳； 身長 170.0 ± 5.7 cm) の 2 日間連続測定した際の対象者内 SD は、 V_{TG} で 0.16 L、FM で 0.43 kg だった (未発表データ)。

4) 体水分量測定

各対象者は、T1 の 1 週間前に $^2\text{H}_2\text{O}$ ($^2\text{H}_2\text{O}$ 99.9 atom %; 大陽日酸 (株)、東京、日本) を TBW あたり ~ 0.12 g と H_2^{18}O (20.0 atom %; 大陽日酸 (株)、東京、日本) を TBW あたり ~ 1.5 g 摂取した。次に、T1、T2、T3 において $^2\text{H}_2\text{O}$ を TBW あたり ~ 0.06 g と H_2^{18}O を ~ 0.75 g 摂取した。TBW は、メディカルチェック時の BM の 60 % と推定した。飲用時は 30 mL の水で飲水ボトルと口腔を 2 回リンスして完全に飲用させた。対象者は飲用 2 時間後に排尿して膀胱を空にし、飲用 3 時間後までに 220 mL の水を摂取した。飲用 3 時間後と 4 時間後に採血を実施した。血液は Na_2EDTA 管に採取し、 4°C 、3000 回転で 10 分間遠心分離をし (ユニバーサル冷却遠心機 5920、KUBOTA、東京、日本)、血漿をクライオチューブに分注後、分析まで -30°C にて凍結保存した。

^2H と ^{18}O の分析は、安定同位体質量分析計 (IRMS; Hydra 20-20 Stable Isotope Mass Spectrometers; Sercon Ltd, Crewe, UK) を用いて行った。体水分量はプラトー法(97)を用い、血漿中の ^2H 及び ^{18}O から体タンパク質や体脂肪の合成に使用される体水分 (^2H 4.1 %、 ^{18}O 0.7 %) で補正して算出した (61, 98)。

5) 二重エネルギーX線吸収法

Mo 及び身体組成を二重エネルギーX線吸収法 (DXA) (QDR 4500、Discovery A [S/N 84498]、fan-beam scanner、Software version 12.7.3.2、Hologic, Waltham, MA, USA) を用いて測定した。対象者は水着を着用し、金属やプラスチックの装飾品は外し、仰臥位にて測定した。測定に要した時間は 5~10 分であった。測定と解析は 1 名の放射線技師が測定装置の標準 DXA プロトコルに従って行った。

6) 身体組成の 4 成分 (4C) モデル

BM、BV、TBW、Mo を Heymsfield の式 (99) に代入し、FM を算出した。

$$FM = (2.513 \times BV (L)) - (0.739 \times TBW (kg)) + (0.947 \times Mo (kg)) - (1.79 \times BM (kg)) \dots \dots (11)$$

7) エネルギー及び栄養素摂取量

対象者は T1 の前の 3 日間（練習日 2 日、オフ日 1 日； 減量前）と 53 時間の減量期間中（急速減量期）に食事記録を行った。各対象者にキッチンスケールを配布し、飲食した食品、サプリメントや薬、飲料をできる限り全て計量し、記録用紙に記録させた。計量できなかった場合には、目安量を記入させた。また、摂取した食品、サプリメント、薬、飲料の写真をスマートフォンで撮影させた。管理栄養士が栄養計算ソフト（エクセル栄養君バージョン 6.0、日本食品標準成分表 2015 年版準拠、建帛社、東京、日本）を用いて、食事記録と写真からエネルギー及び栄養素摂取量を算出した。減量前の 1 日当たりのエネルギー及び栄養素摂取量は、1 週間に練習日が 6 日間、オフ日が 1 日として重みづけして算出した。

8) 統計解析

すべてのデータは平均値±標準偏差で示した。BM、摂取重量、エネルギー及びエネルギー一産生栄養素摂取量は一元配置分散分析を用いて、T1、T2 及び T3 の平均値を比較した。一元配置分散分析で有意差が認められた場合は、Bonferroni の多重比較を実施した。V_{TG}、Db、FM 及び FFM の変化（時間）と V_{TG} の測定方法の違い（実測 V_{TG} または推定 V_{TG}）は繰り返しのある分散分析を実施した。有意差が見られた場合は Bonferroni の多重比較を行った。V_{TG}、BV、Db の変化量は、「時間」と「方法」を変数にした繰り返しのある分散分析を実施した。FM と FFM の変化量は繰り返しのある一元配置分散分析を実施し、Bonferroni の多重比較を行った。Bland-Altman プロットを用いて「方法」の違いによる

V_{TG}、FM 及び FFM の系統誤差の有無を算出した(100)。全ての解析は SPSS version 24.0 (IBM、東京、日本) を用いて実施し、統計学的有意水準は 5%とした。

2-3 結果

1) 栄養素摂取量及び身体組成の各指標の変化

実験期間中に摂取した重量とエネルギー量及びエネルギー産生栄養素量を表 4 に示した。被験者の形態及び身体組成を表 5 に示した。BM は、T1 から T2 で 6.4 % ± 0.5 % (p < 0.001) 減少し、T2 から T3 で増加したが、減量前よりも 2.5 ± 0.7 %低値だった (p < 0.001)。TBW は T1 から T2 で有意に減少し (p < 0.001; 95 %CI = -3.981 - -2.719)、T2 から T3 で増加した (p < 0.001; 95 %CI = 2.484 - 3.816)。V_{TG} (p = 0.004)、BV (p = 0.004)、Db (p < 0.001)には、時間と方法に交互作用が認められた (表 5)。T1、T2、T3 の各時点において V_{TG}、BV、Db には群間に差はみられなかった。実測 V_{TG} は、T1 よりも T2 で高値を示し (p = 0.018; 95 % CI[-0.722 - -0.078])、T2 よりも T3 で低値を示した (p = 0.003; 95 %CI = 0.127 - 0.465) が、推定 V_{TG}は急速減量や回復の影響はみられなかった。そのため、実測 V_{TG}の T1 から T2 の変化量 (p = 0.005; 95 %CI = 0.158 - 0.642) 及び T2 から T3 の変化量 (p = 0.001; 95%CI = -0.426 - -0.166) は、推定 V_{TG}よりも有意に高値だった。BV は T1 から T2 で有意に減少し (p < 0.001)、T2 から T3 で増加し (p < 0.001)、この傾向は実測 V_{TG}と推定 V_{TG}で同様だったが、BV の T1 から T2 の変化量 (p = 0.006; 95 %CI = 0.063 - 0.257)、T2 から T3 の変化量 (p = 0.001; 95 %CI = -0.257 - -0.069) は実測 V_{TG}で推定 V_{TG}よりも低値だった。実測 V_{TG}を用いて算出した Db は T1 から T2 で増加し (p = 0.001)、T2 から T3 では変化しなかった。一方、推定 V_{TG}を用いた Db は、T1 から T2 で増加し (p = 0.001)、T2 から T3 で減少した (p = 0.025)。その結果、実測 V_{TG}を用いた Db の変化量は、推定 V_{TG}を用いた Db よりも T1 から T2 (p = 0.007; 95%CI = -0.005 - -0.001)、T2 から T3 (p = 0.002; 95%CI = 0.001 - 0.003) とともにわずかに低値だった。

T1、T2、T3の各時点における V_{TG} のBland–Altman plotを図1に示した。いずれの時点においても、 V_{TG} の平均値と実測 V_{TG} に対する推定 V_{TG} の差との間に有意な相関関係が認められた (T1: $R^2 = 0.83$, $p < 0.01$; T2: $R^2 = 0.81$, $p < 0.01$; T3: $R^2 = 0.80$, $p < 0.01$)。

2) 実測 V_{TG} と推定 V_{TG} による身体組成評価

実測 V_{TG} と推定 V_{TG} を用い、2Cモデル及び4Cモデルを用いて算出したFMとFFMを図2に示した。FM ($p < 0.001$) 及びFFM ($p < 0.01$) には時間と方法の交互作用がみられた。実測 V_{TG} を用いた体積を4Cモデルに代入して算出したFMは、T1とT2では差が見られず、T3においてT1とT2よりも低値を示した ($p < 0.05$)。一方、推定 V_{TG} を用いた体積を4Cモデルに代入して算出したFMは、T2及びT3でT1よりも低値だった ($p < 0.05$) が、T2とT3では差はみられなかった。実測 V_{TG} を用いた体積を2Cモデルに代入して算出したFMはT2及びT3でT1よりも低値を示した ($p < 0.05$) が、T2とT3で差はみられなかった。一方、推定 V_{TG} を用いた体積を代入した2CモデルのFMでは、T2とT3でT1よりも低値を示し ($p < 0.05$)、T3ではT2よりも高値だった ($p < 0.05$)。FMとFFMの変化量を図3に示した。推定 V_{TG} を用いた2CモデルのFM変化量は実測 V_{TG} を用いた4Cモデルよりも有意に高値を示した ($p < 0.05$)。反対に、推定 V_{TG} を用いた2CモデルのFFM変化量は実測 V_{TG} を用いた4Cモデルよりも有意に低値だった。T1、T2、T3の各時点におけるFMのBland–Altman plotを図4に示した。いずれの時点においても、2Cモデル及び4CモデルのFMには有意な系統誤差はみられなかった。

表4 摂取重量、エネルギー及びエネルギー摂取量

	減量前 (1日あたり)	急速減量期 (53時間)	回復期 (13時間)
摂取重量 (g)	3686 ± 1615	3234 ± 1591	4669 ± 1051
エネルギー (MJ)	14.76 ± 3.47	9.90 ± 4.95	12.10 ± 1.23
(kcal)	3528 ± 829	2366 ± 1184	2891 ± 295
たんぱく質 (g)	125 ± 30	85 ± 41	64 ± 8
(g/kg 体重)	1.7 ± 0.4	1.2 ± 0.5	0.9 ± 0.0
(%)	14.2 ± 0.9	14.6 ± 2.8	8.8 ± 0.2
脂質 (g)	110 ± 24	34 ± 20	60 ± 9
(%)	28.9 ± 5.3	28.4 ± 9.3	18.5 ± 1.1
炭水化物 (g)	509 ± 149	340 ± 170	524 ± 45
(g/kg 体重)	6.9 ± 1.9	4.6 ± 2.1	7.1 ± 0.3
(%)	56.9 ± 5.5	57.0 ± 11.4	72.7 ± 1.3

データは平均値 ± 標準偏差で示した (n = 8)。

表 5 被験者特性及び身体組成の変化

		T1	T2	T3	変化量	
					T1-T2	T2-T3
年齢 (歳)		20.4 ± 0.5				
身長 (cm)		169.7 ± 3.5				
体重 (kg)		73.7 ± 8.0	69.0 ± 7.7*	71.8 ± 7.7*#	-4.7 ± 0.5	2.9 ± 0.3
TBW (kg)		46.8 ± 5.6	43.5 ± 5.2*	46.6 ± 5.3*#	-3.4 ± 0.6	3.1 ± 0.6
Mo (kg)		3.2 ± 0.3	3.2 ± 0.3*	3.2 ± 0.3*	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
V _{TG} (L)	実測 V _{TG}	3.56 ± 0.72	3.96 ± 0.70*	3.67 ± 0.69#	0.36 ± 0.31	-0.29 ± 0.15†
	推定 V _{TG}	3.51 ± 0.16	3.51 ± 0.16	3.51 ± 0.17	0.00 ± 0.01 ^a	0.00 ± 0.01 ^a
BV (L)	実測 V _{TG}	68.67 ± 7.53	64.09 ± 7.26*	66.76 ± 7.32*#	-4.58 ± 0.43	2.66 ± 0.36†
	推定 V _{TG}	68.65 ± 7.48	63.91 ± 7.22*	66.69 ± 7.30*#	-4.74 ± 0.46 ^a	2.78 ± 0.35† ^a
Db (g/cm ³)	実測 V _{TG}	1.073 ± 0.006	1.076 ± 0.006*	1.076 ± 0.006*	0.004 ± 0.002	0.000 ± 0.002†
	推定 V _{TG}	1.073 ± 0.005	1.080 ± 0.007*	1.077 ± 0.006*#	0.006 ± 0.003 ^a	-0.002 ± 0.002† ^a

データは平均値± 標準偏差で示した(n = 8)。

V_{TG}, thoracic gas volume; 実測 V_{TG}, measured V_{TG}; 推定 V_{TG}, predicted V_{TG}; TBW, 体水分量; Mo, 骨塩量; BV, 身体体積 Db, 身体密度
V_{TG}、BV 及び Db に交互作用あり (時間 × 方法) , *p < 0.05 vs. T1, #p < 0.05 vs. T2, †p < 0.05 vs. T1-T2, ^ap < 0.05 vs. 実測 V_{TG}

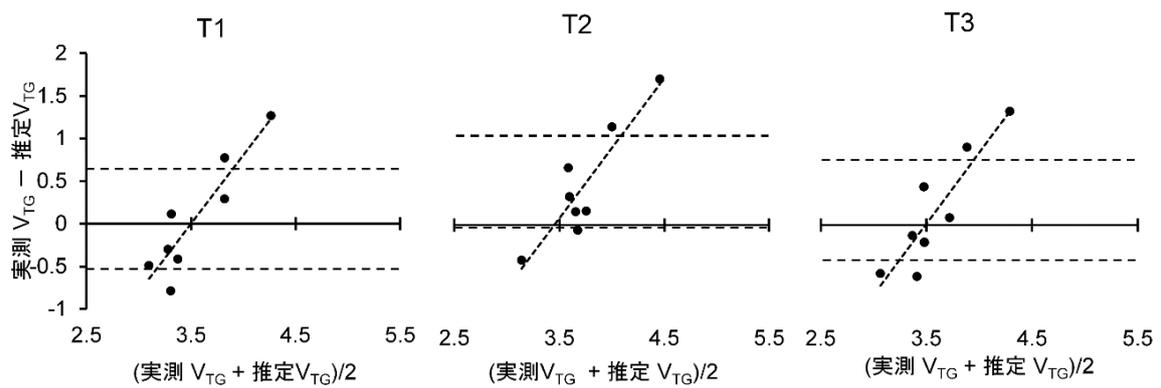


図1 実測 V_{TG} と推定 V_{TG} の Bland-Altman プロット

V_{TG} : thoracic gas volume (肺容量)、実測 V_{TG} と推定 V_{TG} の平均値と実測 V_{TG} と推定 V_{TG} の差に相関関係あり (T1: $R^2 = 0.83$, $p < 0.01$; T2: $R^2 = 0.81$, $p < 0.01$; T3: $R^2 = 0.80$, $p < 0.01$)

図中の点線は 95%信頼区間を示している。

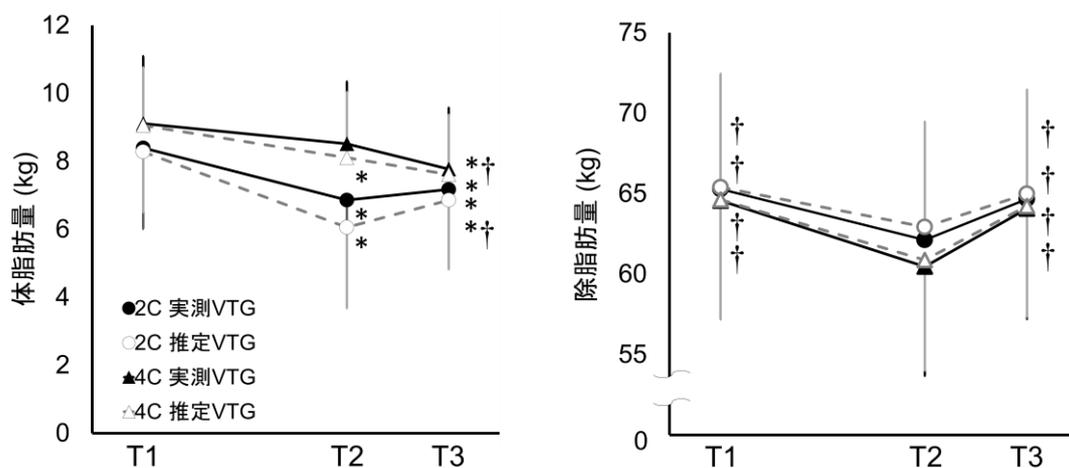


図2 実験期間中の体脂肪量 (左) と除脂肪量 (右) の変化

データは平均値±標準偏差で示した ($n = 8$)。 V_{TG} : thoracic gas volume (肺容量)、繰り返しのある分散分析により体脂肪量の変化と除脂肪量の変化に交互作用あり (時間×方法) * $p < 0.05$ vs. T1, † $p < 0.05$ vs. T2 (Bonferroni post hoc test)

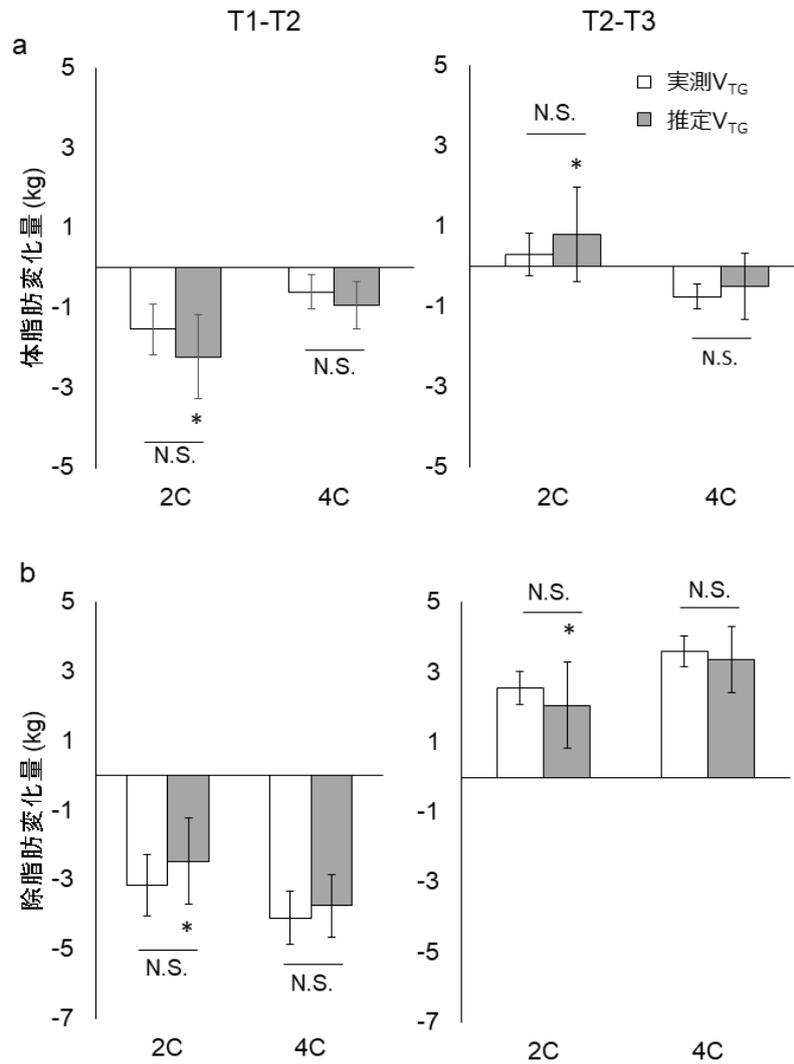


図3 体脂肪変化量 (a) 及び除脂肪変化量 (b)

データは平均値±標準偏差で示した (n = 8)。2C: 2-component model (2成分モデル)、4C: 4-component model (4成分モデル)、実測 V_{TG}: measured thoracic gas volume (実測肺容量)、推定 V_{TG}: predicted thoracic gas volume (推定肺容量)

繰り返しのある分散分析により 2C モデルの体脂肪変化量及び除脂肪変化量、4C モデルの除脂肪変化量に有意な主効果あり (時間)、*p < 0.05 vs. 実測 V_{TG} を用いた 4C モデル

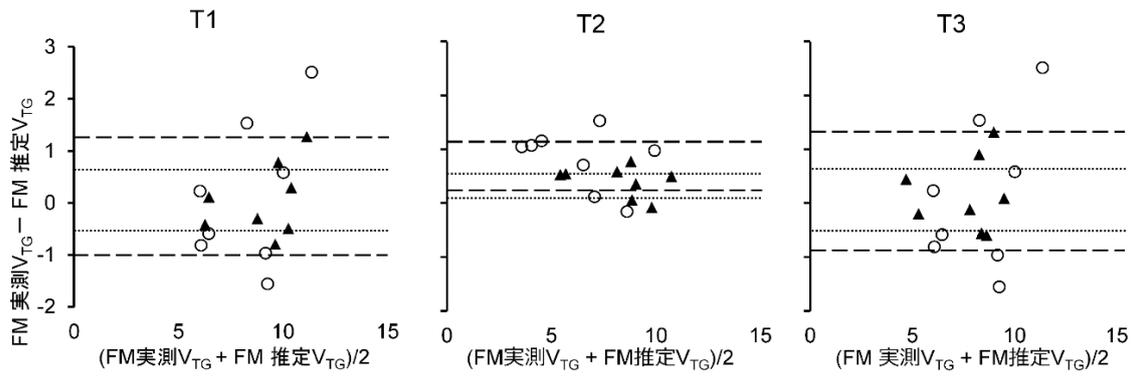


図4 実測 V_{TG} を使って算出した体脂肪量と推定 V_{TG} を使って求めた体脂肪量の Bland-Altman プロット

V_{TG} : thoracic gas volume (肺容量)、FM: 体脂肪量、○は2成分モデル、▲は4成分モデルから算出した値を示している。

破線は2成分モデルの95%信頼区間、点線は4成分モデルの95%信頼区間を表している。

2-4 考察

本研究は、 V_{TG} は急速減量によって増加し、急速増量によって減少することを明らかにした。そのため、実測 V_{TG} を用いた場合と推定 V_{TG} を用いた場合で Db の変化量に差がみられたが、 FM や FFM の変化量には、2C モデルと 4C モデルのいずれを用いてもこの差は影響しなかった。

実測 V_{TG} と推定 V_{TG} の差は FM の推定値に影響を及ぼさなかった。しかし、2C モデルを用いた実測 V_{TG} と推定 V_{TG} の FM 変化量の差は T1 から T2 (急速減量後) で 0.7 ± 1.5 kg、T2 から T3 (急速増量後) で 0.5 ± 1.5 kg みられた。一方、4C モデルを用いた実測 V_{TG} と推定 V_{TG} の FM の差は、T1 から T2 で 0.3 ± 0.8 kg、T2 から T3 で 0.2 ± 0.7 kg だった。したがって、実測 V_{TG} と推定 V_{TG} の違いが FM に及ぼす影響は 2C モデルで 4C モデルよりも大きかった。その結果、推定 V_{TG} を用いた体積を 2C モデルに代入した FM は、実測 V_{TG} を用いた体積を 4C モデルに代入した FM の変化量と比較して有意に高値を示し、反対に FFM の変化量は低値を示した。これは、ADP の問題点であると考えられる。ADP は脂肪成分の密度が 0.9 g/cm³、除脂肪成分の密度が 1.1 g/cm³ であると仮定し、この除脂肪成分の組成は 73% が水であると仮定している (60)。しかし、本研究の対象者は急速減量時に飲水制限やサウナなどの脱水を伴う減量を行っており、 FFM の水分割合が 73% よりもわずかに減少していた (T1: 72.5 ± 0.7 %、T2: 71.9 ± 0.6 %、T3: 72.7 ± 0.7 %)。実験期間を通して 4C モデルよりも 2C モデルでわずかに FM が少なかった要因として、 FFM の水分割合が仮定よりも低値だったことが影響していたと考えられた。したがって、より正確に身体組成変化を測定するためには、体水分量が考慮されているモデルが好ましく、実測 V_{TG} を用いた体積を 4C モデルに代入して測定することが望ましいと考えられた。

これまで、 V_{TG} は短期間に変化することはないと考えられていた。しかし、本研究では 53 時間の急速減量により V_{TG} が増加し、13 時間の急速増量によって減少した。Minderico *et al.* (94) は、過体重や肥満の女性を対象として減量プログラムを実施すると、 3.5 ± 5.5 kg の

減量後に V_{TG} が 0.2 ± 0.36 L 増加したと報告した。本研究の対象者は、Minderico *et al.* (94) よりも多い減量幅であったため、 V_{TG} の増加量がより多かったことは妥当であると考えられた。Minderico *et al.* (94) は、 V_{TG} が増加したメカニズムを腹腔内脂肪の減少や胸腔組織への血流改善によるものと説明した。本研究の対象者は、Minderico らの対象者とは異なり、減量前の時点で FM が少なく健康な若年男性であったため、腹腔内脂肪の減少や胸腔組織への血流改善で V_{TG} が 0.4 L 増加したとは考えにくい。

V_{TG} が増加したその他の要因として、急速減量による内臓組織の減少が考えられた。本研究では、内臓組織の体積を測定していないため定かではないが、肥満者や過体重を伴う II 型糖尿病患者を対象とした長期の減量プログラムで、内臓重量が減少したことが報告されている (101-103)。また、Kukidome *et al.* (88) は、男性レスリング選手が約 1 週間で体重の 7.3 % の減量を行ったときに磁気共鳴画像法 (MRI) によるヤコビー線上の腹部横断面積の内臓領域が 25.8 % 減少していたことを報告している。これらの現象は動物実験でも認められており、ラットの 3 日間の絶食で肝臓や消化管重量が減少した (92, 104)。これらの先行研究の結果から、急速減量時の内臓組織の減少が、胸腔領域を拡張しやすくし、 V_{TG} の増加を引き起こしたと考えられた。一方、急速増量によって V_{TG} は減少した。これは、5 時間の飲食によって肝臓や内臓組織重量、消化管の内容物が増加したことによるものと考えられた。Tai *et al.* は体重の 16 % の急速減量後 16 時間の再給餌によって肝臓重量が増加したことを報告している (105)。ヒトを対象とした研究では、運動後 6.5 時間の回復期のフルクトースとガラクトースの摂取によって肝臓重量が増加したことを報告している (106)。本研究では、対象者は $4,669 \pm 1051$ g、 2891 ± 295 kcal の食事を 5 時間で摂取しており、7.5 時間後に BM 及び身体組成を測定した。したがって、測定時にはまだ消化管内に未消化の食物が残っていた可能性も考えられた。本研究では消化吸收能力や消化吸收速度は測定していないが、急速減量により内臓組織の消化吸收能力が低下していた可能性も考えられた。

急速減量で起こりうるその他の生理学的変化として、脱水による血漿量や血流の低下、運

動中の換気量や換気能力の低下、除脂肪量の減少、筋力及び筋持久力や全身持久力の低下が挙げられる。これらの変化は V_{TG} を増加させるよりも、むしろ減少させる可能性があると考えられる。また、ADP は空気の体積を利用して測定するため、急速減量による脱水に伴う体温上昇が測定結果に影響した可能性も考えられた。本研究では体温測定は実施していなかったが、本研究に先立って行った予備実験では急速減量の有無にかかわらず、夕方（本研究の T2 測定時とほぼ同時刻）の体温は早朝よりも 0.3 ± 0.3 °C 高かった（未発表データ）。しかし、 0.3 °C の体温上昇は V_{TG} の測定結果に影響しないことが報告されている（107）。したがって、体温が V_{TG} 変化に与えた影響は限りなく少ないと考えられた。

2-5 結論

ADP の実測 V_{TG} は、急速減量によって増加し、急速増量によって元に戻った。しかし、2C モデルと 4C モデルのどちらにおいても、実測 V_{TG} と推定 V_{TG} を用いて算出した FM 及び FFM の値に違いはみられなかった。本研究では、TBW が推定式の係数に含まれている 4C モデルを標準法として、2C モデルの FM 及び FFM の結果を比較した結果、急速減量時のような体重が急速に大幅に変化する場合には、4C モデルを使用するほうが望ましいと考えられた。さらに、急速減量や急速増量では V_{TG} が変化するため、 V_{TG} は実測することが望ましく、推定 V_{TG} を使用する場合には体脂肪の変化量を過大評価する点に注意が必要である。

第3章 急速減量時の身体組成変化とエネルギーバランス（研究課題2）

3-1 緒言

減量時のエネルギーバランスを把握することは、適切な減量計画を立てる上で重要である。これまで減量時のエネルギー負債量は体重 1 kg あたり 7,400~7,700 kcal と考えられているが、急速減量期では FM のほかに FFM (15)や血漿量 (108)が減少することが知られている。FFM のエネルギー密度は 1,020 kcal/kg、血漿は 91 %を水分、7 %をたんぱく質、1 %を脂質、0.1 %を糖質、0.9 %を無機物質が占めている(109)ため、約 370 kcal/kg と考えられる。したがって、これらの減少割合の大きい急速減量期はエネルギー負債量が少なくなることが予想される。

体重階級制競技選手がパフォーマンス発揮のために行う急速減量は、健康への悪影響やパフォーマンスの低下が懸念され、決して推奨できるものではない。しかし、健康やパフォーマンスへ影響を及ぼさない範囲での FFM や TBW による体重調整により、選手の精神的な苦痛を軽減でき、競技力へ貢献できる可能性がある。したがって、体重階級制競技の試合に向けた減量では、事前に BM と身体組成、健康状態を評価し、計量と試合のスケジュールやルールに合わせて①体脂肪減少を目的とした緩徐減量期、②計量から 1 週間前までの急速減量期に分けた減量計画を立てることが望ましいと考えられる。

エネルギーバランスは、前述した通り EI と TEE から推定できる。しかし、EI は過少申告や過大申告の可能性が報告されている。一方、TEE は、DLW 法を用いることで自由生活中のエネルギー消費量を高い確度で測定できると考えられているが、測定には高価な安定同位体や分析機器が必要となり、競技現場で使用することは現実的ではない。そのため、身体組成変化量からエネルギーバランスを推定できれば、減量時のエネルギー負債量を明確にでき、アスリートの競技に合わせた減量計画を立てることに貢献できると考えられる。TBW や Mo を考慮した推定式である身体組成の 4C モデルは、身体組成測定法の中でも最も確度の高い方法として考えられている。また、その他にも様々な身体組成測定法が考案さ

れているが、それぞれの方法には科学的な仮定があり、その多くが TBW に依存しているため、急速減量期にこれらの方法が有用であるかを検証する必要がある。

そこで、本研究は①食事記録と DLW 法を用いて急速減量期のエネルギー負債量を明らかにすること、②4C モデルを用いてエネルギーバランスを正確に評価できるかを検証する、③様々な身体組成測定法を用いて急速減量期のエネルギー負債量を推定できるかを検証することの 3 点を目的に実験を実施した。

3-2 方法

1) 対象者及び研究参加の同意の取得方法

本研究は関東地区に在住し、大学のレスリング部に所属している男子レスリング選手 10 名 (平均値 \pm 標準偏差 年齢: 20.4 ± 0.5 歳; 身長: 168.4 ± 4.2 cm; 体重 73.0 ± 7.9 kg) とした。競技レベルは国際国際大会出場及び全国大会出場の選手であった。対象者の条件は 18 歳以上で、過去に大会に向けて 1 週間に 6 %以上の急速減量をした経験があり、研究開始の約 1 週間前に実施したメディカルチェックにて代謝性疾患、甲状腺疾患、心疾患のなかった者とした。

全ての対象者に書面と口頭にて研究の概要、測定項目、起こりうる危険性とそれに対する配慮、プライバシーへの配慮、データの所有権とデータの管理方法、研究参加を取りやめる権利について説明し、同意書への署名を得た。本研究は、国立スポーツ科学センター倫理審査委員会の承認を得て実施された (通知番号 2014-036)。研究課題 1 の結果から、Db の推定には V_{TG} を実測することが望ましいことが明らかとなったため、ADP における肺容量の測定基準 ($merit \leq 0.50$ Hz, $airway < 35.0$ cm H₂O) を 2 回の測定 (急速減量前、急速減量後) のうち 1 回でも満たすことができなかった 2 名のデータは、解析から除外した。

2) 実験プロトコル

実験デザインを図 5 に示す。減量開始前の 7 日間に EI とエネルギー産生栄養素摂取量、TEE を測定した。減量する体重及び減量期間は、多くの体重階級制競技の選手が体重の 6% を 3 日以内に減量することが報告されていた(110)ため、本研究では 53 時間で減量前の体重の 6% を減量することを対象者に指示した。減量方法は選手自身に選択させ、食事制限や飲水制限、サウナを使用する、サウナスーツを着てトレーニングをするなどの方法が用いられた。減量は自宅及び所属機関にて、指導者の安全管理のもと実施した。測定はベースライン、減量前及び減量後に実施した。

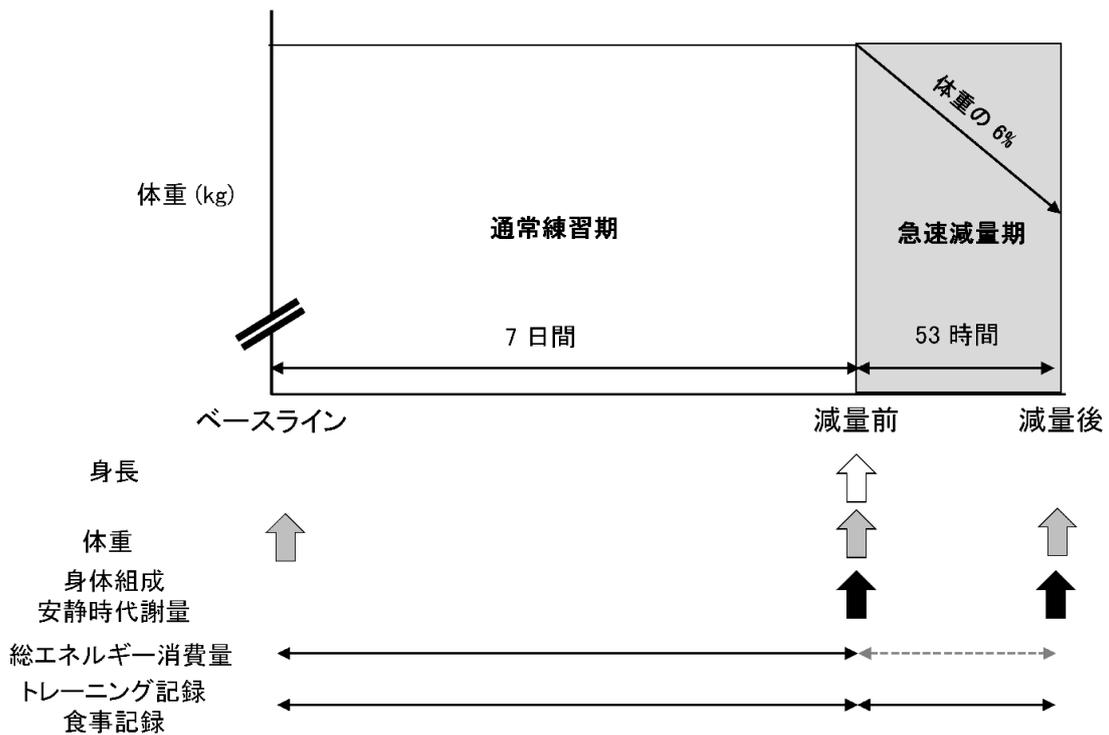


図 5 実験プロトコル

3) 形態計測、身体組成測定

BM はベースライン、減量前、減量後の 3 回測定し、身体組成は減量前、減量後の 2 回測定した。ベースラインの体重測定の前少なくとも 24 時間前からアルコールや刺激物（カフェ

インなど)を含む飲料の摂取を禁止し、水以外の食物や飲料は測定前日の23時以降は摂取しないように指示をした。ベースラインのBMは、起床後排尿後、6時30分を実施した。身長は0.1cm単位のデジタル身長体重計を用い(エー・アンド・デイ(株)、東京)、裸足で測定した。BMは0.01kg単位のADP装置(BODPOD、COSMED、Rome、Italy)に接続された体重計で、水着とスイミングキャップを着用し、裸足で測定した。

4) 空気置換法

ADPによるBV及び V_{TG} の測定はBODPOD(version 4.24、COSMED、Rome、Italy)を用いて実施した。水着とスイミングキャップを着用し、裸足で測定した。機械のプログラムに従って、BVを2~3回測定し、 V_{TG} を測定した。体脂肪率はBrozekの式(58)を用いて算出した。

$$\text{体脂肪率 (\%)} = (4.57 / D_b \text{ (g/ml)} - 4.142) \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

5) 二重エネルギーX線吸収法

Mo及び身体組成をDXA(QDR 4500、Discovery A [S/N 84498]、fan-beam scanner、Software version 12.7.3.2、Hologic、Waltham、MA、USA)を用いて測定した。対象者は水着を着用し、金属やプラスチックの装飾品は外し、仰臥位にて5~10分間で測定した。測定と解析は1名の放射線技師が測定機器の標準DXAプロトコルに従って行った。

6) 安定同位体希釈法

各対象者は、BLの時点で起床時に採尿し、その後 $^2\text{H}_2\text{O}$ ($^2\text{H}_2\text{O}$ 99.9 atom %; 大陽日酸(株)、東京、日本)をTBWあたり~0.12gと H_2^{18}O (20.0 atom %; 大陽日酸(株)、東京、日本)をTBWあたり~1.5g摂取した(DLW)。減量前及び減量後の時点で $^2\text{H}_2\text{O}$ をTBWあたり~0.06gと H_2^{18}O を~0.75g摂取した。TBWは、研究開始の約1週間前のメディカ

ルチェック時の BM の 60%と推定した。飲用時は 30 mL の水で飲水ボトルと口腔を 2 回リンスして完全に飲用させた。対象者は飲用 2 時間後に排尿して膀胱を空にし、飲用 3 時間後までに 220 mL の水を摂取した。飲用 3 時間後と 4 時間後に採血及び採尿を実施した。血液は Na₂EDTA 管に採取し、4°C、3000 回転で 10 分間遠心分離をし（ユニバーサル冷却遠心機 5920、KUBOTA、東京）、血漿をクライオチューブに分注後、分析まで-30°Cにて凍結保存した。尿サンプルは、採尿後クライオチューブに分注し、分析まで-30°Cにて凍結保存した。

²H と ¹⁸O の分析は、安定同位体質量分析計（IRMS; Hydra 20-20 Stable Isotope Mass Spectrometers; Sercon Ltd, Crewe, UK）を用いて行った。体水分量はプラトー法（Cole 1992）を用い、血漿中の ²H 及び ¹⁸O から体タンパク質や体脂肪の合成に使用される体水分（²H 4.1%、¹⁸O 0.7%）で補正して算出した(61, 98)。

7) 生体電気インピーダンス法

BIA による身体組成は業務用マルチ周波数体組成計（MC-980A、株式会社タニタ、東京、日本）を用いて、水着を着用して裸足で実施した。測定にはアスリートモードを使用した。対象者は、手足の表面を電解質ティッシュでよく拭いた後、規定の位置に立ち体重を測定した後、ハンドグリップの指の位置を合わせ、腋下が接触しないように腕を下ろして、測定終了まで姿勢を維持した。

8) 身体組成の 3 成分モデル及び 4 成分モデル

3C モデルでは、BM、BV 及び TBW を Siri (72)の式に代入して算出した。

$$FM (kg) = (2.118 \times BV (L)) - (0.78 \times TBW (kg)) - (1.351 \times BM (kg)) \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

4C モデルでは、BM、BV、TBW、Mo を Hetmsfield (111)の式に代入して算出した。

$$\text{FM (kg)} = (2.513 \times \text{BV (L)}) - (0.739 \times \text{TBW (kg)}) + (0.947 \times \text{Mo (kg)}) - (1.79 \times \text{BM (kg)}) \dots \dots \dots (3)$$

各組織の密度はヒトの体が 37 °Cのときの体脂肪 0.900 g/cm³、体水分 0.994 g/cm³、骨ミネラル 2.982 g/cm³、除脂肪固形成分 (FFDS) 1.34 g/cm³(112)とした。FFM は BM から FM を差し引いて算出した。

9) 総エネルギー消費量

TEE は DLW 法を用いて推定した (40)。BL の DLW 投与 4 日目 (朝) と 7 日目 (朝と夕) に TEE を算出するための採尿を実施したが、分析には 7 日目のサンプルのみ使用した。

BL の起床時、DLW 投与 3 時間後及び 4 時間後、7 日後 (朝、夕) の尿サンプルの ²H 濃度及び ¹⁸O 濃度から、2 ポイント法を用いた推定二酸化炭素排出量と酸素消費量、食物商 (FQ) から Weir の式 (41)を用いて算出した。FQ は通常練習期の 3 日間 (練習日 2 日、オフ日 1 日) の食事記録から算出し、0.89 ± 0.02 だった。

10) 安静時代謝量及びトレーニングによるエネルギー消費量

REE は、10 時間以上の絶食後に温度を一定に保たれた室内 (24~25°C) で仰臥位にて測定した。マスクとダグラスバッグを装着し仰臥位にて 30 分間安静にした後、20 分間 (10 分×2 回) 呼気ガスを収集した(113)。生体ガス分析用質量分析装置 (ARCO-2000 MET and SYSTEM-5L; Arcosystem、千葉、日本) を用いて O₂ 濃度及び CO₂ 濃度、1 分間あたりの換気量を分析した。

トレーニングによるエネルギー消費量 (EE_{training}) は、トレーニング内容の詳細、各プログラムの実施時間と自覚的疲労感を自記式のトレーニング記録に記入させ、1 名の調査員によって metabolic equivalent (METs) 値 (114, 115) と実施時間から算出された。

11) エネルギー及びエネルギー産生栄養素摂取量

通常練習期の3日間（練習日2日、オフ日1日）及び急速減量期（53時間）に摂取した飲食物を記録させた。各対象者にキッチンスケールを配布し、飲食した食品、サプリメントや薬、飲料をできる限り全て計量し、記録用紙に記録させた。計量できなかった場合には、目安量を記入させた。また、摂取した食品、サプリメント、薬、飲料の写真をスマートフォンのカメラで撮影させた。管理栄養士が栄養計算ソフト（エクセル栄養君バージョン 6.0、日本食品標準成分表 2015 年版準拠、建帛社、東京、日本）を用いて、食事記録と写真からエネルギー及び栄養素摂取量を算出した。減量前の1日当たりのエネルギー及び栄養素摂取量は、1週間に練習日が6日間、オフ日が1日として重みづけして算出した。

12) 急速減量時の身体エネルギー密度

急速減量時の身体エネルギー密度は、①EI と TEE から算出する方法と②身体組成変化（各種測定方法を使用）から算出した。

①EI と TEE から算出する方法では、EI と TEE 及び BM 変化量（ ΔBM ）から算出した。(116)

$$\text{急速減量時のエネルギー密度 (kcal/kg)} = (EI - TEE) / \Delta BM \dots \dots \dots (4)$$

②身体組成の変化から推定する方法では、各測定方法から得られた FM 及び FFM の変化量（ ΔFM 、 ΔFFM ）から算出した。(6, 117)

$$\text{急速減量時のエネルギー密度 (kcal/kg)} = 1,020 / \Delta FFM + 9,500 / \Delta FM \dots \dots \dots (5)$$

13) 統計解析

統計解析は SPSS バージョン 24.0（IBM、東京、日本）を用いて行った。全てのデータは平均値±標準偏差で示した。BM、4C モデルから算出した身体組成変化、エネルギー及

びエネルギー産生栄養素は、対応のある t 検定を用いた（減量前 vs. 減量後）。身体組成測定法による FM、FFM、体脂肪率の差の検定には、繰り返しのある一元配置分散分析を用い、有意な主効果が認められた場合は、Bonferroni 法を用いて身体組成測定法による差の比較を行った。FM、FFM、体脂肪率の変化量、体重減少量に占める FM と FFM の割合の測定方法間の比較は一元配置分散分析を用い、その後の検定には Bonferroni 法を用いた。急速減量によるエネルギー密度は、一元配置分散分析で測定方法間の比較を行い、その後の検定は DLW による TEE と食事調査による EI から算出した値と各身体組成測定法から算出した値とを Dunnett 法を用いて比較した。

3-3 結果

1) 体重及び身体組成

BM は、ベースライン (73.6 ± 7.7 kg) と減量前 (73.7 ± 8.0 kg) では差はみられなかった。急速減量による体重減少量は 4.7 ± 0.5 kg (6.4 ± 0.5 %, $P < 0.001$) だった (表 6)。TBW ($p < 0.001$)、FFDS ($p < 0.01$) は減量前よりも減量後に有意に低値を示した。しかし、Mo は減量前と減量後で差はみられなかった。その結果、FFM の密度は減量によって有意に増加した ($p < 0.001$)。

体脂肪率、FM、FFM には有意な交互作用 (時間 × 測定方法) が認められた ($p < 0.001$) (表 7)。4C モデル、3C モデル、DXA で算出した体脂肪率は、減量前後で差はみられなかった。しかし、SID は減量前と比較して減量後に高値を示し ($p < 0.05$)、ADP ($p < 0.01$) 及び BIA ($p < 0.001$) では有意に低値を示した。体脂肪率及び FM の減量前後の変化量は、4C モデル、3C モデル、DXA、SID の間に差はみられなかったが、ADP と BIA は他の方法と比較して有意に高値だった。体重減少量に占める FM の割合も ADP と BIA では他の方法と比較して有意に高値だった (図 6)。

2) 減量期間中のエネルギーバランス

通常練習期の TEE は $4,278 \pm 644$ kcal/日だった。REE は、減量前 ($1,696 \pm 242$ kcal/日) と減量後 ($1,619 \pm 164$ kcal/日) で差はみられなかった。EEtraining も、通常練習期 (710 ± 202 kcal/日) と急速減量期 (814 ± 168 kcal/日) で差はみられなかった。

実験期間中のエネルギー及び栄養素摂取量を表 8 に示す。急速減量期の TEE は $9,446 \pm 1422$ kcal、EI は $2,366 \pm 1184$ kcal だった。したがって、53 時間の急速減量期の身体からのエネルギー喪失量は $7,080 \pm 1,525$ kcal だった。体重減少量は 4.7 ± 0.5 kg だった (表 6) ため、体重減少量 1kg あたりのエネルギー密度は $1,507 \pm 279$ kcal/ Δ BM だった (図 7)。さらに、4C モデル、3C モデル、DXA、SID による身体組成変化量から算出した急速減量によるエネルギー密度は、EI-TEE から算出した値と差はみられなかったが、ADP ($p < 0.001$) と BIA ($p < 0.001$) で算出したエネルギー密度は EI-TEE よりも有意に高値だった (図 7)。

表 6 被験者特性及び 4C モデルによる身体組成変化

	減量前	減量後		変化量
年齢 (歳)	20.3 ± 0.5	-		-
身長 (cm)	169.7 ± 3.5	-		-
体重 (kg)	73.7 ± 8.0	69.0 ± 7.7	***	-4.7 ± 0.5
体脂肪率 (%)	12.4 ± 2.5	12.3 ± 2.5		-0.1 ± 0.6
FM (kg)	9.1 ± 1.9	8.5 ± 1.8	**	-0.6 ± 0.4
FFM (kg)	64.6 ± 7.4	60.5 ± 6.8	***	-4.1 ± 0.8
TBW (kg)	46.8 ± 5.6	43.5 ± 5.2	***	-3.4 ± 0.6
TBW (%/kg FFM)	72.5 ± 0.7	71.9 ± 0.6	*	-0.6 ± 0.4
Mo (kg)	3.2 ± 0.3	3.2 ± 0.3	*	0.0 ± 0.0
Mo (%/kg FFM)	5.0 ± 0.3	5.3 ± 0.4	***	0.4 ± 0.0
FFDS (kg)	14.5 ± 1.6	13.8 ± 1.4	**	-0.8 ± 0.4
FFDS (%/kg FFM)	22.5 ± 0.5	22.8 ± 0.3		0.2 ± 0.4
FFM の密度 (g/cm ³)	1.094 ± 0.003	1.098 ± 0.004	***	0.004 ± 0.001

データは平均値±標準偏差で示した (n = 8)

*p < 0.05、**p < 0.01、***p < 0.001 vs. 減量前 (対応のある t 検定)

BM: body mass (体重)、FM: fat mass (体脂肪量)、FFM: fat free mass (除脂肪量)、
TBW: total body water (体水分量)、Mo: bone mineral content (骨塩量)、FFDS:
fat free dry solid (除脂肪固形成分)

表 7 各身体組成測定法による急速減量前後の身体組成変化

指標	方法	減量前	減量後		変化量	
体脂肪率 (%)	4C モデル	12.4 ± 2.5	12.3 ± 2.5		-0.1 ± 0.6	a
	3C モデル	12.8 ± 2.4	12.5 ± 2.2		-0.2 ± 0.5	a
	DXA	11.1 ± 1.8	11.2 ± 2.1		0.1 ± 0.4	a
	SID	13.2 ± 2.7	13.9 ± 2.4	**	0.7 ± 0.6	a
	ADP	11.7 ± 2.4	10.3 ± 2.3	***	-1.4 ± 0.9	b
	BIA	13.3 ± 2.0	10.4 ± 2.5	***	-2.8 ± 0.9	c
FM (kg)	4C モデル	9.1 ± 1.9	8.5 ± 1.8	**	-0.6 ± 0.4	a
	3C モデル	9.4 ± 1.9	8.6 ± 1.8	***	-0.7 ± 0.4	a
	DXA	8.2 ± 1.5	7.7 ± 1.6	**	-0.4 ± 0.3	a
	SID	9.7 ± 1.9	9.6 ± 1.7		-0.1 ± 0.4	a
	ADP	8.7 ± 2.2	7.2 ± 2.1	***	-1.5 ± 0.6	b
	BIA	9.8 ± 2.2	7.2 ± 2.3	***	-2.5 ± 0.6	c
FFM (kg)	4C モデル	64.6 ± 7.4	60.5 ± 6.8	***	-4.1 ± 0.8	ab
	3C モデル	64.3 ± 7.3	60.3 ± 6.7	***	-4.0 ± 0.7	ab
	DXA	65.5 ± 7.2	61.3 ± 7.0	***	-4.3 ± 0.4	ab
	SID	64.0 ± 7.6	59.4 ± 7.1	***	-4.6 ± 0.8	a
	ADP	65.0 ± 7.0	61.8 ± 6.3	***	-3.2 ± 0.8	bc
	BIA	63.5 ± 6.4	61.3 ± 6.2	***	-2.2 ± 0.4	c

データは平均値±標準偏差で示した (n = 8)

繰り返しのある分散分析にて交互作用あり (時間×方法)、

p < 0.01、*p < 0.001 vs. 減量前

変化量の符号が異なる方法との間に有意差あり (Bonferroni post-hoc test, p < 0.05)

表 8 摂取重量、エネルギー及びエネルギー産生栄養素摂取量

		通常練習期	急速減量期	
摂取重量	(g/日)	3,686 ± 1,615	1,464 ± 720	**
エネルギー	(kcal/日)	3,528 ± 829	1,071 ± 536	***
	(kcal/kg 体重/日)	47.9 ± 10.2	14.5 ± 6.8	***
たんぱく質	(g/日)	125 ± 30	38 ± 18	***
	(g/kg 体重/日)	1.7 ± 0.4	0.5 ± 0.2	***
	(%エネルギー)	14.2 ± 0.9	14.6 ± 2.8	
脂質	(g/日)	110 ± 24	34 ± 20	***
	(g/kg 体重/日)	1.5 ± 0.3	0.5 ± 0.3	***
	(%エネルギー)	28.7 ± 5.3	28.4 ± 9.3	
炭水化物	(g/日)	509 ± 149	154 ± 77	***
	(g/kg 体重/日)	6.9 ± 1.9	2.1 ± 1.0	***
	(%エネルギー)	57.1 ± 5.4	57.0 ± 11.4	

データは平均値±標準偏差で示した (n = 8)

p<0.01、*<0.001 vs. 通常練習期 (対応のある t 検定)

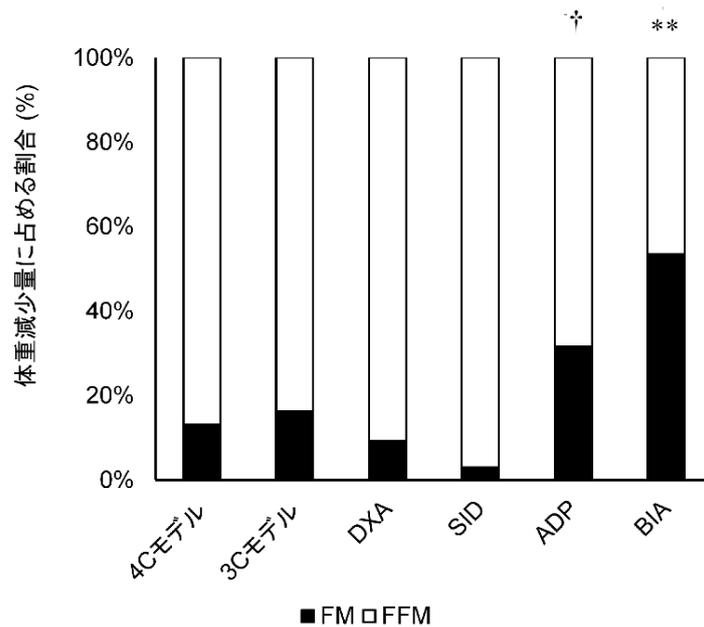


図6 各身体組成測定法から求めた体重減少量に占める体脂肪と除脂肪の割合

データは平均値±標準偏差で示した (n = 8)

**p < 0.01 vs. 4Cモデル、3Cモデル、DXA、SID、ADP (Bonferroni post-hoc test)

† p < 0.05 vs. 4Cモデル、3Cモデル、DXA、SID (Bonferroni post-hoc test)

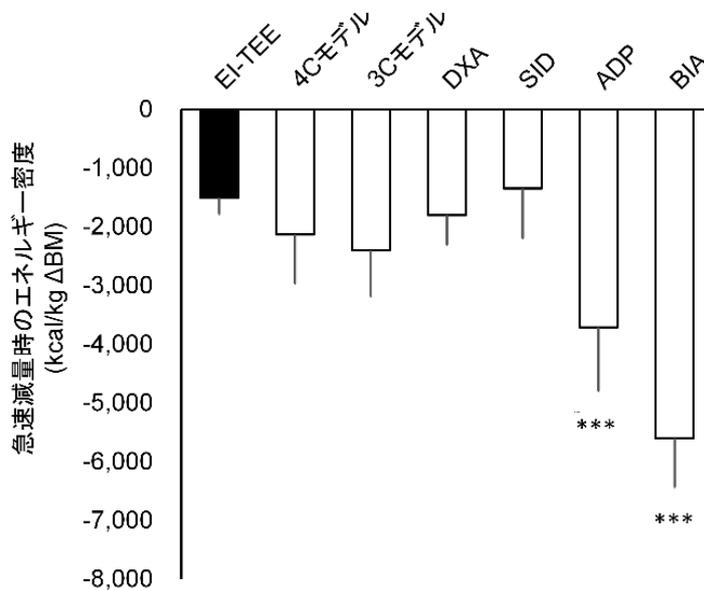


図7 各身体組成測定法による急速減量時のエネルギー密度

データは平均値±標準偏差で示した (n = 8)。***p < 0.001 vs. EI-TEE (Dunnettの post-hoc test)

3-4 考察

本研究では 53 時間の急速減量時のエネルギーバランスを DLW 法による TEE 測定と秤量記録法による EI から算出し、さらに身体組成の 4C モデルによる身体組成変化から身体から喪失したエネルギー量を推定した。急速減量時には体重減少の 71% を TBW が占めていたため、急速減量時のエネルギーバランスは 1,507 kcal/kg Δ BM だった。さらに、FM を 9,500 kcal/kg、FFM を 1,020 kcal/kg としたときのエネルギーバランス推定値は、身体組成の 4C モデル、3C モデル、DXA、SI では TEE と EI から算出された結果と差はみられなかったが、ADP 及び BIA ではエネルギー負債量を過大評価した。

本研究では急速減量時のエネルギーバランスを算出するために、身体組成測定、TEE 測定、EI 測定において正確度が高いと考えられている方法を用いた。近年、同様の方法を用いてアスリートのシーズン中 5~10 週間のエネルギーバランスと身体組成変化を測定した研究が報告されている(8)。この研究では、シーズン中に体重が 1.5%以上減少したアスリートでは、身体組成変化の 15 %は FFM、85 %は FM であり、その結果から推定される減量時のエネルギー負債量は 8,182 kcal/kg Δ BM だったことが報告されている。また、Bhutani et al. (118)は、健康な成人の 2 週間の自由生活下における BM 及び身体組成変化とエネルギーバランスを調査し、1~3 kg の体重変化の平均エネルギー密度は 2,380 kcal/kg Δ BM だったことを報告している。この結果は、我々の研究で得られた結果 (1,507 kcal/kg) と近似した値を示している。したがって、体重減少量に占める FFM と FM の割合やエネルギー密度は減量速度や減量幅が影響している可能性が考えられた。先行研究において、緩徐減量よりも急速減量のほうが体重減少量に占める FFM の割合が大きいことが報告されている (90, 119)。Yang et al. (90)はテコンドー選手を対象に 4 日間と 4 週間のいずれかで体重の 5%を減量したときの身体組成変化を比較した。その結果、4 日間では FM に変化はみられなかったが、4 日間では FM が有意に減少した。4 日間の Δ FFM/ Δ BM は 0.74 だったのに対し、4 週間では 0.27 だった。本研究における Δ FFM/ Δ BM は 0.87 であり、Forbes 式(3)から算出

される値 ($\Delta\text{FFM}/\Delta\text{BM} = 0.53$) よりも高値だった。急速減量では筋グリコーゲン量減少による TBW の減少(16, 17)や除脂肪組織中の水分量の減少が起こる(15, 120)ため、急速減量では緩徐減量時と比較して体重減少量に占める FFM の割合が高くなったと考えられた。

Sagayama et al.(15) は、減量前の体脂肪率が $17.0 \pm 7.4\%$ のアスリートが 1 週間に体重の 5% を減量する急速減量時の $\Delta\text{FFM}/\Delta\text{BM}$ を身体組成の 3C モデルで推定したところ、0.66 だったことを報告している。また、他の先行研究で報告されている身体組成変化から $\Delta\text{FFM}/\Delta\text{BM}$ を算出すると、柔道選手(減量前体脂肪率 13.4%) の 5 日間の減量で 0.52(89)、ウエイトリフティング選手(減量前体脂肪率 22.2%) の 6 日間の減量で 0.42(20)、格闘技選手(減量前体脂肪率 12.5%) の 5~7 日の減量で 0.70(121)だった。これらの先行研究は、皮下脂肪厚法などの様々な身体組成測定方法を用いていたため、値を直接比較することはできないが、本研究の被験者はこれらの先行研究の被験者よりも減量前の体脂肪率 ($12.4 \pm 2.5\%$) が低かった(15, 20, 89, 121)。Forbes 式では、減量前の体脂肪率が低い人は $\Delta\text{FFM}/\Delta\text{BM}$ が高くなることが示されている(3, 4, 116)。しかし、本研究では、Forbes 式(3)から推定される $\Delta\text{FFM}/\Delta\text{BM}$ よりも高値を示した。その要因として、 $\Delta\text{FFM}/\Delta\text{BM}$ には減量前体脂肪率だけでなく減量期間も関連している可能性があり、相互を合わせて検討する必要がある。

本研究の限界は二つある。本研究で用いた DLW 法は 1~2 週間の平均的な TEE を正確に推定できる方法であるが、本研究では 53 時間の TEE は測定できない。そこで、本研究では実験開始前の 7 日間の平均 TEE を 53 時間の減量期間中の TEE に換算した。先行研究において、1 週間以上の減量では REE(120)や睡眠時代謝量(15)が減少することが報告されている。しかし、本研究では REE も EEtraining も減量前と減量期間中及び減量後で差はみられなかった。Müller et al. (120)はエネルギー制限食による代謝適応は 3 日目以降に起こることを報告している。本研究の減量は 53 時間と短期間だったため、エネルギー代謝の適応がほとんど起こらなかったものと考えられた。したがって、53 時間の TEE 推定に 7

日間の平均 TEE を換算して用いたことによる誤差は非常に少なかったと考えられた。もう一つの限界は、EI の過少評価の可能性である。食事調査では過少申告による誤差が大きいことが報告されている。本研究における食事調査は、対象者に摂取する食品の重量を計量させ、写真撮影と自記式の記録を依頼した。さらに、市販食品を摂取する場合には、その食品ラベルを保管するか栄養表示と原材料表示を写真撮影して記録させた。また、本研究における急速減量期間は、減量のために普段摂取している食品数よりも少なくなるため、対象者にとって容易に記録できる状況であった。したがって、エネルギーバランスを算出するにあたり TEE と EI の測定法の両方に限界はあるものの、比較的正確に推定できたと考えられる。

3-5 結論

本研究で 53 時間の急速減量時のエネルギー負債量は 1,507 kcal/kg Δ BM であることを認めた。従来用いられていた 7,400 kcal/ Δ BM や 7,700 kcal/ Δ BM と大きく異なる値となった原因は、急速減量で失われる成分の多くが TBW だったためである。急速減量は医学的に推奨できるものではないが、体重階級制競技の急速減量時において体重 1 kg の減少を 7,400 kcal や 7,700 kcal として減量計画を立てることは非合理的である。本研究では様々な身体組成測定法を用い、身体組成変化量から減量時のエネルギー負債量を算出した。その結果、身体組成の 4C モデルや 3C モデル、DXA、SID では DLW 法と食事記録から算出した値と近似した値が得られた。したがって、これらの方法は急速減量時の身体組成変化及びエネルギーバランスの評価に用いることが可能である。しかし、ADP や BIA は急速減量時の身体組成変化及びエネルギーバランスを評価するには望ましい方法ではないことが明らかとなった。

第4章 総合考察

本研究は急速減量時のエネルギーバランスを明らかにすることを目的に、急速減量時に ADP を用いて Db を求める際の方法を確立し（研究課題 1）、53 時間の急速減量時の TEE と EI の差を測定した（研究課題 2）。

研究課題 1 では、急速減量時には ADP の FM 推定に用いられている V_{TG} が増大するため、推定 V_{TG} を用いた Db や体脂肪率等の身体組成を測定すると、FM 変化量を過大評価することを明らかにした。これまでヒトの V_{TG} は短期間では変化しないと考えられ、短期間の繰り返し測定では推定値などの固定値が用いられてきた(122)。しかし、 V_{TG} は減量によって増大し(94)、妊娠期（32 週目）には推定 V_{TG} よりも実測 V_{TG} が低値になる(123, 124)ことが報告されている。本研究の急速減量による V_{TG} の増加と一晩の急速増量による V_{TG} の減少は、これらの先行研究の結果と一致していた。このメカニズムは明らかになっていないが、Minderico et al. (94)は V_{TG} の増加がウエスト周囲径と負の相関がみられたことから腹腔内脂肪の減少が関連していると述べている。これらの研究と本研究の共通点は、3.5–9.3kg の大幅な体重の増減があったこと、腹腔内脂肪や腸内容物、胎児などの影響により腹腔内の容積が通常時と変化している可能性があることが考えられた。

本研究では、実測 V_{TG} と推定 V_{TG} を用いた Db を 2C モデルと 4C モデルに代入して FM と FFM の変化量を比較したが、2C モデルと 4C モデルのいずれにおいても使用する V_{TG} 値による差はみられなかった。したがって、急速減量前後の V_{TG} の変化が身体組成の推定値に及ぼす影響はわずかだと考えられた。しかし、実測 V_{TG} を用いた 4C モデルを参照値とした場合、推定 V_{TG} を用いた 2C モデルの FM 変化量は有意に高値を示し ($p < 0.05$)、FFM 変化量は有意に低値を示した ($p < 0.05$)。この要因として、本研究の急速減量で行われた脱水が影響していると考えられた。ADP のような体密度法では、身体組成を推定する際に FFM の 73%が水分であることを仮定した推定式を用いている(57, 58)。本研究では、 V_{TG} の変化の他に TBW の変化が影響し、推定 V_{TG} を使用した 2C モデルでの FM 変化は実測 V_{TG}

を使用した値よりも過大評価されたものと考えられた。以上のことから、減量や増量などの大幅な体重変化のある対象者の身体組成変化を空気置換法によって評価する場合には、 V_{TG} は可能な限り実測することが望ましいことが示唆された。さらに、脱水などの体水分状態が通常時とは異なる場合には、2C モデルでは体脂肪量変化を過大評価するため、4C モデルなどの体水分量も考慮した身体組成推定式を用いることが望ましい。

研究課題 2 では、EI と TEE を測定し、急速減量時のエネルギーバランスを測定した。その結果、これまで栄養指導や運動指導で用いられてきた体重 1 kg の体重減少に $-7,400 \sim 7,700$ kcal よりも少ない $-1,507$ kcal/kg Δ BM だったことを見出した。さらに、研究課題 1 で明らかとなった ADP による身体組成変化測定法の問題点のように、身体組成変化からエネルギーバランスを推定する際に身体組成測定法によっては問題が生じる可能性が考えられた。そこで、エネルギーバランスの実測値と身体組成の 4C モデル、3C モデルによる推定式、DXA、SID 法を用いて急速減量時の身体組成変化を比較し、各方法による FM 及び FFM 変化量から急速減量時のエネルギーバランスを推定した。ADP を用いた Db の推定には、研究課題 1 で推奨法とされた実測 V_{TG} を用いた。その結果、身体組成の 4C モデル、3C モデル、DXA、SID では推定が可能であるが、ADP や BIA 法を用いると FM 変化量を過大評価することを明らかにした。

体重減少量に占める FFM と FM の割合については、Forbes (3) のレビューにより減量前の体脂肪率と体重減少量に占める FFM の割合は負の曲線関係にあることが報告されて以降、多くの研究者が体重減少に占める FFM と FM の割合に影響する要因を調査してきた。Minnesota 実験に参加した男性は初期体脂肪率 6~25 % の健康な男性であったが、このデータに肥満者のデータを加えると、体脂肪率及び体脂肪量の少ない人ほど体重減少に占める FFM の割合が大きいことが示唆された (4-6)。Dolloo & Jacquet (7) は、Minnesota 実験で単純な飢餓によって死亡した人を剖検した結果、脂肪貯蔵量が事実上存在しなかったことから、この現象は生物学的にも説明できると述べている。FFM は生命機能に関わる内

臓や身体活動に必要な筋肉を構成しているため、FM が十分に貯蔵されているときには FM からエネルギーが産生され、FFM は保持される。しかし、FM が少ない人ではエネルギーとして利用できる体脂肪が少ないため、飢餓時にエネルギーとして使用される FM と FFM の比率が変わり、FFM のたんぱく質からもエネルギーを産生しようとする。本研究の対象者の減量前の体脂肪率は 12.4% と比較的低かったため、体重減少量の 87% が FFM で減少したことは妥当であったと考えられた。

本研究の限界として、減量方法を対象者が普段行っている自由な方法で実施させたことが挙げられる。食事内容と練習内容を記録させたが、レスリング選手の減量方法の終盤は脱水によって体重を大幅に減少させる。そのため、体重減少の大部分 (72%) が体水分で占められていた。本研究での体重減少を、脱水による体重減少量を含まずに体重 1 kg あたりのエネルギー喪失量を算出すると、 $-5,446 \text{ kcal/kg } \Delta \text{ BM}$ (53 時間のエネルギーバランス : $-7,080 \text{ kcal}$ 、体重減少量 : 1.3 kg) となり、脱水の影響を除いてもこれまでに使用されてきた $-7,400 \sim 7,700 \text{ kcal} / \Delta \text{ BM}$ とは適合しなかった。したがって、アスリートの急速減量時のエネルギー負債量は、従来用いられてきた値よりも少ないと言えるだろう。

第 5 章 結論

本研究では急速減量時の体重 1 kg の減量に要するエネルギー負債量を明らかにするために、急速減量時に適した身体組成測定プロトコルを検証し、エネルギーバランスの実測値と身体組成変化量からの推定値を用いて測定を行った。その結果、急速減量時のエネルギー負債量は、1,507 kcal/kg Δ BM であり、これまで減量指導に用いられてきた 7,400~7,700 kcal/kg Δ BM よりも低値であることが明らかとなった。

謝辞

本稿を終えるにあたり、指導教員として今日までご指導を賜りました岡村浩嗣先生に感謝の意を表します。前島悦子教授、浜田拓教授には、副査の立場からご指導いただき、心より御礼申し上げます。実験計画並びに実験実施の際にご助言及びご協力頂きました国立スポーツ科学センターの高橋英幸研究員、亀井明子研究員、中嶋耕平先生には深く御礼申し上げます。また、二重標識水法に関するご指導においては福岡大学の故田中宏暁先生、桧垣泰樹先生、データ分析及び解析、論文執筆の際には医薬基盤・国立健康栄養研究所の山田陽介先生、筑波大学の下山寛之先生、レスリングに関する歴史的、技術的な知見について日本レスリング協会強化本部長西口茂樹氏、国士舘大学和田貴弘先生、朝倉利夫先生に多くのご指導及びご助言をいただき心より御礼申し上げます。

研究を進めるにあたり厳しい実験にご参加いただいたレスリング選手の皆様、データ収集にご協力いただいた国立スポーツ科学センターの元永恵子研究員、放射線技師の大西貴弘様、宮崎大学の塩瀬圭佑先生、日本女子体育大学の大澤拓也先生のご協力なくしては本稿を完了することはできませんでした。改めて感謝致します。

参考文献

1. Wishnofsky M. Caloric equivalents of gained or lost weight. *Am J Clin Nutr.* 1958;6:542-6.
2. Webster JD, Hesp R, Garrow JS. The composition of excess weight in obese women estimated by body density, total body water and total body potassium. *Hum Nutr Clin Nutr.* 1984;38:299-306.
3. Forbes GB. Lean body mass-body fat interrelationships in humans. *Nutr Rev.* 1987;45:225-31.
4. Hall KD. What is the required energy deficit per unit weight loss? *Int J Obes (Lond).* 2008;32:573-6.
5. Thomas DM, Schoeller DA, Redman LA, Martin CK, Levine JA, Heymsfield SB. A computational model to determine energy intake during weight loss. *Am J Clin Nutr.* 2010;92:1326-31.
6. Heymsfield SB, Gonzalez MC, Shen W, Redman L, Thomas D. Weight loss composition is one-fourth fat-free mass: a critical review and critique of this widely cited rule. *Obes Rev.* 2014;15:310-21.
7. Dulloo AG, Jacquet J. The control of partitioning between protein and fat during human starvation: its internal determinants and biological significance. *Br J Nutr.* 1999;82:339-56.
8. Silva AM, Matias CN, Santos DA, Rocha PM, Minderico CS, Thomas D, Heymsfield SB, Sardinha LB. Do dynamic fat and fat-free mass changes follow theoretical driven rules in athletes? *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49:2086-92.
9. 独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター. 国立スポーツ科学センター形態・体力測定データ集 2010. 2012.
10. Jones LK, Meyer NL, Gibson JC. Weight management practices of 2012 Olympians in combat sports. *International Journal of Wrestling Science.* 2014;4:56-64.

11. 久木留毅. レスリング・ロンドンオリンピック出場選手における試合に向けた減量の実態と炭酸飲料の嗜好. *臨床スポーツ医学会誌*. 2015;23:111-9.
12. Khodae M, Olewinski L, Shadgan B, Kinningham RR. Rapid weight loss in sports with weight classes. *Curr Sports Med Rep*. 2015;14:435-41.
13. Reale R, Slater G, Burke LM. Individualised dietary strategies for Olympic combat sports: Acute weight loss, recovery and competition nutrition. *Eur J Sport Sci*. 2017;17:727-40.
14. Scott JR, Horswill CA, Dick RW. Acute weight gain in collegiate wrestlers following a tournament weigh-in. *Med Sci Sports Exerc*. 1994;26:1181-5.
15. Sagayama H, Yoshimura E, Yamada Y, Ichikawa M, Ebine N, Higaki Y, Kiyonaga A, Tanaka H. Effects of rapid weight loss and regain on body composition and energy expenditure. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2014;39:21-7.
16. Tarnopolsky MA, Cipriano N, Woodcroft C, Pulkkinen WJ, Robinson DC, Henderson JM, MacDougall JD. Effects of rapid weight loss and wrestling on muscle glycogen concentration. *Clin J Sport Med*. 1996;6:78-84.
17. Houston ME, Marrin DA, Green HJ, Thomson JA. The effect of rapid weight loss on physiological functions in wrestlers. *Phys Sportsmed*. 1981;9:73-8.
18. Shimizu K, Aizawa K, Suzuki N, Masuchi K, Okada H, Akimoto T, Mesaki N, Kono I, Akama T. Influences of weight loss on monocytes and T-cell subpopulations in male judo athletes. *J Strength Cond Res*. 2011;25:1943-50.
19. Choma CW, Sforzo GA, Keller BA. Impact of rapid weight loss on cognitive function in collegiate wrestlers. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30:746-9.
20. Durguerian A, Bougard C, Drogou C, Sauvet F, Chennaoui M, Filaire E. Weight loss, performance and psychological related states in high-level weightlifters. *Int J Sports Med*. 2016;37:230-8.
21. Webster S, Rutt R, Weltman A. Physiological effects of a weight loss regimen

- practiced by college wrestlers. *Med Sci Sports Exerc.* 1990;22:229-34.
22. Ribisl PM, Herbert WG. Effects of rapid weight reduction and subsequent rehydration upon the physical working capacity of wrestlers. *Research Quarterly American Association for Health, Physical Education and Recreation.* 1970;41:536-41.
23. Dhurandhar NV, Schoeller D, Brown AW, Heymsfield SB, Thomas D, Sørensen TIA, Speakman JR, Jeanson M, Allison DB, the Energy Balance Measurement Working G. Energy balance measurement: when something is not better than nothing. *Int J Obes.* 2015;39:1109-13.
24. Livesey G, Elia M. Estimation of energy expenditure, net carbohydrate utilization, and net fat oxidation and synthesis by indirect calorimetry: evaluation of errors with special reference to the detailed composition of fuels. *Am J Clin Nutr.* 1988;47:608-28.
25. Heymsfield SB, Ebbeling CB, Zheng J, Pietrobelli A, Strauss BJ, Silva AM, Ludwig DS. Multi-component molecular-level body composition reference methods: evolving concepts and future directions. *Obes Rev.* 2015;16:282-94.
26. Silva AM, Matias CN, Santos DA, Thomas D, Bosity-Westphal A, Mu LM, Heymsfield SB, Sardinha LB. Compensatory changes in energy balance regulation over one athletic season. *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49:1229-35.
27. Tataranni PA, Harper IT, Snitker S, Parigi AD, Vozarova B, Bunt J, Bogardus C, Ravussin E. Body weight gain in free-living Pima Indians: effect of energy intake vs expenditure. *Int J Obes.* 2003;27:1578-83.
28. 設楽佳世, 袴田智子, 大西貴弘, 池田達昭. 身体組成の評価方法間にみられる身体密度および体脂肪率の差の検討. *体力科学.* 2017;66:369-82.
29. van Marken Lichtenbelt WD, Hartgens F, Vollaard NB, Ebbing S, Kuipers H. Body composition changes in bodybuilders: a method comparison. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36:490-7.
30. Ogawa K, Tsubono Y, Nishino Y, Watanabe Y, Ohkubo T, Watanabe T, Nakatsuka H,

- Takahashi N, Kawamura M, Tsuji I, Hisamichi S. Inter- and Intra-individual variation of food and nutrient consumption in a rural Japanese population. *Eur J Clin Nutr.* 1999;53:781-5.
31. Tokudome Y, Imaeda N, Nagaya T, Ikeda M, Fujiwara N, Sato J, Kuriki K, Kikuchi S, Maki S, Tokudome S. Daily, Weekly, Seasonal, Within- and Between-individual Variation in Nutrient Intake According to Four Season Consecutive 7 Day Weighed Diet Records in Japanese Female Dietitians. *J Epidemiol.* 2002;12:85-92.
32. Wark PA, Hardie LJ, Frost GS, Alwan NA, Carter M, Elliott P, Ford HE, Hancock N, Morris MA, Mulla UZ, Noorwali EA, Petropoulou K, Murphy D, Potter GDM, Riboli E, Greenwood DC, Cade JE. Validity of an online 24-h recall tool (myfood24) for dietary assessment in population studies: comparison with biomarkers and standard interviews. *BMC Med.* 2018;16:136.
33. Schatzkin A, Kipnis V, Carroll RJ, Midthune D, Subar AF, Bingham S, Schoeller DA, Troiano RP, Freedman LS. A comparison of a food frequency questionnaire with a 24-hour recall for use in an epidemiological cohort study: results from the biomarker-based Observing Protein and Energy Nutrition (OPEN) study. *Int J Epidemiol.* 2003;32:1054-62.
34. Trabulsi J, Schoeller DA. Evaluation of dietary assessment instruments against doubly labeled water, a biomarker of habitual energy intake. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2001;281:E891-E9.
35. Willett WC, Reynolds RD, Cottrell-Hoehner S, Sampson L, Browne ML. Validation of a semi-quantitative food frequency questionnaire: comparison with a 1-year diet record. *J Am Diet Assoc.* 1987;87:43-7.
36. 食事調査マニュアル はじめの一步から実践・応用まで. 第2版 ed. 伊達ちぐさ, 徳留裕子, 吉池信男, editors. 東京: 南山堂; 2012.
37. Atwater WO. Experiments on the metabolism of matter and energy in the human

- body. Washington: Govt. Print. Off.; 1899.
38. 田中茂穂. 間接熱量測定法による 1 日のエネルギー消費量の評価. *体力科学*. 2006;55:527-32.
 39. Lifson N, Gordon GB, et al. The fate of utilized molecular oxygen and the source of the oxygen of respiratory carbon dioxide, studied with the aid of heavy oxygen. *J Biol Chem*. 1949;180:803-11.
 40. International Atomic Energy Agency. Assessment of Body Composition and Total Energy Expenditure in Humans Using Stable Isotope Techniques. Vienna: IAEA; 2009.
 41. Weir JB. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol*. 1949;109:1-9.
 42. Booyens J, Hervey GR. The pulse rate as a means of measuring metabolic rate in man. *Can J Biochem Physiol*. 1960;38:1301-9.
 43. Christensen C, Frey H, Foensteliën E, Aadland E, Refsum H. A critical evaluation of energy expenditure estimates based on individual O₂ consumption/heart rate curves and average daily heart rate. *Am J Clin Nutr*. 1983;37:468-72.
 44. Emons HJG, Groenenboom DC, Westerterp KR, Saris WHM. Comparison of heart rate monitoring combined with indirect calorimetry and the doubly labelled water (²H₂¹⁸O) method for the measurement of energy expenditure in children. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1992;65:99-103.
 45. Spurr GB, Prentice AM, Murgatroyd PR, Goldberg GR, Reina JC, Christman NT. Energy expenditure from minute-by-minute heart-rate recording: comparison with indirect calorimetry. *Am J Clin Nutr*. 1988;48:552-9.
 46. Ekelund U, Yngve A, Westerterp K, Sjöström M. Energy expenditure assessed by heart rate and doubly labeled water in young athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1360-6.
 47. Patrik Johansson H, Rossander-Hulthen L, Slinde F, Ekblom B. Accelerometry

- combined with heart rate telemetry in the assessment of total energy expenditure. *Br J Nutr*. 2006;95:631-9.
48. Löf M, Henriksson H, Forsum E. Evaluations of Actiheart, IDEEA® and RT3 monitors for estimating activity energy expenditure in free-living women. *J Nutr Sci*. 2013;2:e31.
49. Villars C, Bergouignan A, Dugas J, Antoun E, Schoeller DA, Roth H, Maingon AC, Lefai E, Blanc S, Simon C. Validity of combining heart rate and uniaxial acceleration to measure free-living physical activity energy expenditure in young men. *J Appl Physiol*. 2012;113:1763-71.
50. Ohkawara K, Oshima Y, Hikiyama Y, Ishikawa-Takata K, Tabata I, Tanaka S. Real-time estimation of daily physical activity intensity by a triaxial accelerometer and a gravity-removal classification algorithm. *Br J Nutr*. 2011;105:1681-91.
51. Murakami H, Kawakami R, Nakae S, Nakata Y, Ishikawa-Takata K, Tanaka S, Miyachi M. Accuracy of wearable devices for estimating total energy expenditure: comparison with metabolic chamber and doubly labeled water method. *JAMA Internal Medicine*. 2016;176:702-3.
52. Ekelund U, Yngve A, Sjöström M, Westerterp K. Field Evaluation of the Computer Science and Application's Inc. Activity Monitor during Running and Skating Training in Adolescent Athletes. *Int J Sports Med*. 2000;21:586-92.
53. Plasqui G, Bonomi AG, Westerterp KR. Daily physical activity assessment with accelerometers: new insights and validation studies. *Obes Rev*. 2013;14:451-62.
54. 引原有輝, 齊藤慎一, 吉武裕. 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. *体力科学*. 2005;54:363-72.
55. 東野政貴, Hasina RH, 海老根直之, 彭雪英, 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;52:265-74.

56. Conway JM, Seale JL, Jacobs DR, Jr, Irwin ML, Ainsworth BE. Comparison of energy expenditure estimates from doubly labeled water, a physical activity questionnaire, and physical activity records. *Am J Clin Nutr.* 2002;75:519-25.
57. Siri WE. The Gross Composition of the Body. *Adv Biol Med Phys.* 1956;4:239-80.
58. Brozek J, Grande F, Anderson JT, Keys A. Densitometric analysis of body composition: revision of some quantitative assumptions. *Ann NY Acad Sci.* 1963;110:113-40.
59. Dempster P, Aitkens S. A new air displacement method for the determination of human body composition. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27:1692-7.
60. Going SB. Hydrodensitometry and air displacement plethysmography. 2nd ed. Heymsfield SB, Lohman TG, Wang Z, Going SB, editors. USA: Human kinetics; 2005.
61. Racette SB, Schoeller DA, Luke AH, Shay K, Hnilicka J, Kushner RF. Relative dilution spaces of ^2H - and ^{18}O -labeled water in humans. *Am J Physiol.* 1994;267:E585-90.
62. Schloerb PR, Friis-Hansen BJ, Edelman IS, Solomon AK, Moore FD. The measurement of total body water in the human subject by deuterium oxide dilution: with a consideration of the dynamics of deuterium distribution. *J Clin Invest.* 1950;29:1296-310.
63. Wong WW, Cochran WJ, Klish WJ, Smith EO, Lee LS, Klein PD. In vivo isotope-fractionation factors and the measurement of deuterium- and oxygen-18-dilution spaces from plasma, urine, saliva, respiratory water vapor, and carbon dioxide. *Am J Clin Nutr.* 1988;47:1-6.
64. Thomas DT, Erdman KA, Burke LM. American College of Sports Medicine Joint Position Statement. Nutrition and Athletic Performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2016;48:543-68.
65. Meyer NL, Sundgot-Borgen J, Lohman TG, Ackland TR, Stewart AD, Maughan RJ,

- Smith S, Müller W. Body composition for health and performance: a survey of body composition assessment practice carried out by the Ad Hoc Research Working Group on body composition, health and performance under the auspices of the IOC medical commission. *Br J Sports Med.* 2013;47:1044-53.
66. Horber FF, Thomi F, Casez JP, Fontelle J, Jaeger P. Impact of hydration status on body composition as measured by dual energy X-ray absorptiometry in normal volunteers and patients on haemodialysis. *Br J Radiol.* 1992;65:895-900.
67. Bone JL, Ross ML, Tomcik KA, Jeacocke NA, Hopkins WG, Burke LM. Manipulation of Muscle Creatine and Glycogen Changes Dual X-ray Absorptiometry Estimates of Body Composition. *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49:1029-35.
68. Slinde F, Bark A, Jansson J, Rossander-HulthÉN L. Bioelectrical impedance variation in healthy subjects during 12 h in the supine position. *Clin Nutr.* 2003;22:153-7.
69. Kushner RF, Roxel DM. Bipodal bioelectrical impedance analysis reproducibly estimates total body water in hemodialysis patients. *Am J Kidney Dis.* 2002;39:154-8.
70. Sun SS, Chumlea WC, Heymsfield SB, Lukaski HC, Schoeller D, Friedl K, Kuczmarski RJ, Flegal KM, Johnson CL, Hubbard VS. Development of bioelectrical impedance analysis prediction equations for body composition with the use of a multicomponent model for use in epidemiologic surveys. *Am J Clin Nutr.* 2003;77:331-40.
71. Houtkooper LB, Lohman TG, Going SB, Howell WH. Why bioelectrical impedance analysis should be used for estimating adiposity. *Am J Clin Nutr.* 1996;64:436S-48S.
72. Siri W. Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. In: Brozek J, A. H, editors. Techniques for measuring body composition. Washington, DC: National Academy of Sciences, National Research council; 1961. p. 223-44.

73. Lohman TG, Boileau RA, Massey BH. Prediction of lean body mass in young boys from skinfold thickness and body weight. *Hum Biol.* 1975;47:245-62.
74. Frerichs RR, Harsha DW, Berenson GS. Equations for estimating percentage of body fat in children 10-14 years old. *Pediatr Res.* 1979;13:170-1.
75. Kohrt WM, Malley MT, Dalsky GP, Holloszy JO. Body composition of healthy sedentary and trained, young and older men and women. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;24:832-7.
76. Mueller WH, Shoup RF, Malina RM. Fat patterning in athletes in relation to ethnic origin and sport. *Ann Hum Biol.* 1982;9:371-6.
77. Nagamine S, Suzuki S. Anthropometry and body composition of Japanese young men and women. *Hum Biol.* 1964;36:8-15.
78. Wang J, Thornton JC, Kolesnik S, Pierson RNJ. Anthropometry in body composition: an overview. *Ann N Y Acad Sci.* 2000;904:317-26.
79. Baumgartner RN, Heymsfield SB, Lichtman S, Wang J, Pierson RN, Jr. Body composition in elderly people: effect of criterion estimates on predictive equations. *Am J Clin Nutr.* 1991;53:1345-53.
80. Friedl KE, DeLuca JP, Marchitelli LJ, Vogel JA. Reliability of body-fat estimations from a four-compartment model by using density, body water, and bone mineral measurements. *Am J Clin Nutr.* 1992;55:764-70.
81. Fuller NJ, Jebb SA, Laskey MA, Coward WA, Elia M. Four-component model for the assessment of body composition in humans: comparison with alternative methods, and evaluation of the density and hydration of fat-free mass. *Clin Sci (Lond).* 1992;82:687-93.
82. Heymsfield SB, Lichtman S, Baumgartner RN, Wang J, Kamen Y, Aliprantis A, Pierson RN, Jr. Body composition of humans: comparison of two improved four-compartment models that differ in expense, technical complexity, and radiation

- exposure. *Am J Clin Nutr.* 1990;52:52-8.
83. Wang Z, Shen W, Withers RT, Heymsfield SB. Multicomponent molecular-level models of body composition analysis. 2nd ed. Heymsfield SB, Lohman TG, Wang Z, Going SB, editors. USA: Human kinetics; 2005.
84. Murphy CH, Hector AJ, Phillips SM. Considerations for protein intake in managing weight loss in athletes. *Eur J Sport Sci.* 2015;15:21-8.
85. Ellis K. Whole-body counting and neutron activation analysis. In: Roche AF, Heymsfield SB, Lohman TG, editors. *Human Body Composition*. Champaign, IL: Human Kinetics; 1996. p. 45-61.
86. Mendes SH, Tritto AC, Guilherme JP, Solis MY, Vieira DE, Franchini E, Lancha AH, Artioli GG. Effect of rapid weight loss on performance in combat sport male athletes: does adaptation to chronic weight cycling play a role? *Br J Sports Med.* 2013;47:1155-60.
87. Karila TA, Sarkkinen P, Marttinen M, Seppälä T, Mero A, Tallroth K. Rapid weight loss decreases serum testosterone. *Int J Sports Med.* 2008;29:872-7.
88. Kukidome T, Shirai K, Kubo J, Matsushima Y, Yanagisawa O, Homma T, Aizawa K. MRI evaluation of body composition changes in wrestlers undergoing rapid weight loss. *Br J Sports Med.* 2008;42:814-8.
89. Lopes-Silva JP, Felipe LJ, Silva-Cavalcante MD, Bertuzzi R, Lima-Silva AE. Caffeine ingestion after rapid weight loss in judo athletes reduces perceived effort and increases plasma lactate concentration without improving performance. *Nutrients.* 2014;6:2931-45.
90. Yang WH, Heine O, Pauly S, Kim P, Bloch W, Mester J, Grau M. Rapid rather than gradual weight reduction impairs hemorheological parameters of Taekwondo athletes through reduction in RBC-NOS activation. *PLoS One.* 2015;10:e0123767.
91. Roemmich JN, Sinning WE. Weight loss and wrestling training: effects on nutrition,

- growth, maturation, body composition, and strength. *J Appl Physiol* (1985). 1997;82:1751-9.
92. Tai S, Tsurumi Y, Yokota Y, Masuhara M, Okamura K. Effects of rapid or slow body mass reduction on body composition in adult rats. *J Clin Biochem Nutr*. 2009;45:185-92.
93. Olsson KE, Saltin B. Variation in total body water with muscle glycogen changes in man. *Acta Physiol Scand*. 1970;80:11-8.
94. Minderico CS, Silva AM, Fields DA, Branco TL, Martins SS, Teixeira PJ, Sardinha LB. Changes in thoracic gas volume with air-displacement plethysmography after a weight loss program in overweight and obese women. *Eur J Clin Nutr*. 2008;62:444-50.
95. Du Bois D, Du Bois EF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. 1916. *Nutrition*. 1989;5:303-11; discussion 12-3.
96. Crapo RO, Morris AH, Clayton PD, Nixon CR. Lung volumes in healthy nonsmoking adults. *Bull Eur Physiopathol Respir*. 1982;18:419-25.
97. Cole TJ, Coward WA. Precision and accuracy of doubly labeled water energy expenditure by multipoint and two-point methods. *Am J Physiol*. 1992;263:E965-73.
98. Sagayama H, Yamada Y, Racine NM, Shriver TC, Schoeller DA, Group DLWS. Dilution space ratio of ^2H and ^{18}O of doubly labeled water method in humans. *J Appl Physiol*. 2016;120:1349-54.
99. Heymsfield SB, Wang ZM, Withers RT. Multicomponent molecular level model of body composition analysis. Roche AF, Heymsfield SB, Lohman TG, editors. IL, Champaign: Human Kinetics; 1996.
100. Bland J, Altman D. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*. 1986;327:307-10.
101. Bosity-Westphal A, Kossel E, Goele K, Later W, Hitze B, Settler U, Heller M, Gluer

- CC, Heymsfield SB, Muller MJ. Contribution of individual organ mass loss to weight loss-associated decline in resting energy expenditure. *Am J Clin Nutr.* 2009;90:993-1001.
102. Gallagher D, Kelley DE, Thornton J, Boxt L, Pi-Sunyer X, Lipkin E, Nyenwe E, Janumala I, Heshka S, Group MRIASGotLAR. Changes in skeletal muscle and organ size after a weight-loss intervention in overweight and obese type 2 diabetic patients. *Am J Clin Nutr.* 2017;105:78-84.
103. Gils Contreras A, Bonada Sanjaume A, Montero Jaime M, Rabassa Soler A, Sabench Pereferrer F, Molina Lopez A, Becerra Tomas N, Del Castillo Dejardin D, Salas-Salvado J. Effects of two preoperative weight loss diets on hepatic volume, metabolic parameters, and surgical complications in morbid obese bariatric surgery candidates: a randomized clinical trial. *Obes Surg.* 2018;28:3756-68.
104. Hakvoort TB, Moerland PD, Frijters R, Sokolovic A, Labruyere WT, Vermeulen JL, Ver Loren van Themaat E, Breit TM, Wittink FR, van Kampen AH, Verhoeven AJ, Lamers WH, Sokolovic M. Interorgan coordination of the murine adaptive response to fasting. *J Biol Chem.* 2011;286:16332-43.
105. Tai S, Yokota Y, Tsurumi Y, Hasegawa H, Masuhara M, Okamura K. Effects of short-term refeeding after rapid or slow body mass reduction on body composition in adult rats. *Obes Res Clin Pract.* 2010;4:e191-e9.
106. Decombaz J, Jentjens R, Ith M, Scheurer E, Buehler T, Jeukendrup A, Boesch C. Fructose and galactose enhance postexercise human liver glycogen synthesis. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43:1964-71.
107. Fields DA, Higgins PB, Hunter GR. Assessment of body composition by air-displacement plethysmography: influence of body temperature and moisture. *Dyn Med.* 2004;3:3.
108. Valiente JS, Utter AC, Quindry JC, Nieman DC. Effects of commercially formulated

- water on the hydration status of dehydrated collegiate wrestlers. *J Strength Cond Res.* 2009;23:2210-6.
109. 豊田弘子. 体液. In: 菅野 剛, 松田 信, editors. 生理学. 東京: 医学書院; 2001. p. 75-88.
110. Artioli GG, Gualano B, Franchini E, Scagliusi FB, Takesian M, Fuchs M, Lancha AH. Prevalence, magnitude, and methods of rapid weight loss among judo competitors. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42:436-42.
111. Heymsfield SB, Wang Z, Visser M, Gallagher D, Pierson RN, Jr. Techniques used in the measurement of body composition: an overview with emphasis on bioelectrical impedance analysis. *Am J Clin Nutr.* 1996;64:478S-84S.
112. Heymsfield SB, Waki M, Kehayias J, Lichtman S, Dilmanian FA, Kamen Y, Wang J, Pierson RN, Jr. Chemical and elemental analysis of humans in vivo using improved body composition models. *Am J Physiol.* 1991;261:E190-8.
113. Frankenfield D, Roth-Yousey L, Compher C. Comparison of predictive equations for resting metabolic rate in healthy nonobese and obese adults: a systematic review. *J Am Diet Assoc.* 2005;105:775-89.
114. Ainsworth BE, Haskell WL, Whitt MC, Irwin ML, Swartz AM, Strath SJ, O'Brien WL, Bassett DR, Jr., Schmitz KH, Emplaincourt PO, Jacobs DR, Jr., Leon AS. Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:S498-504.
115. Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, Meckes N, Bassett DR, Jr., Tudor-Locke C, Greer JL, Vezina J, Whitt-Glover MC, Leon AS. 2011 Compendium of physical activities: a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43:1575-81.
116. Heymsfield SB, Thomas D, Martin CK, Redman LM, Strauss B, Bosy-Westphal A, Muller MJ, Shen W, Martin Nguyen A. Energy content of weight loss: kinetic features

- during voluntary caloric restriction. *Metabolism*. 2012;61:937-43.
117. Thomas DM, Bouchard C, Church T, Slentz C, Kraus WE, Redman LM, Martin CK, Silva AM, Vossen M, Westerterp K, Heymsfield SB. Why do individuals not lose more weight from an exercise intervention at a defined dose? An energy balance analysis. *Obes Rev*. 2012;13:835-47.
118. Bhutani S, Kahn E, Tasali E, Schoeller DA. Composition of two-week change in body weight under unrestricted free-living conditions. *Physiol Rep*. 2017;5.
119. Garthe I, Raastad T, Refsnes PE, Koivisto A, Sundgot-Borgen J. Effect of two different weight-loss rates on body composition and strength and power-related performance in elite athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2011;21:97-104.
120. Müller MJ, Enderle J, Pourhassan M, Braun W, Eggeling B, Lagerpusch M, Glüer CC, Kehayias JJ, Kiosz D, Bosy-Westphal A. Metabolic adaptation to caloric restriction and subsequent refeeding: the Minnesota Starvation Experiment revisited. *Am J Clin Nutr*. 2015;102:807-19.
121. Reljic D, Feist J, Jost J, Kieser M, Friedmann-Bette B. Rapid body mass loss affects erythropoiesis and hemolysis but does not impair aerobic performance in combat athletes. *Scand J Med Sci Sports*. 2016;26:507-17.
122. Svensson H, Wetterling L, Bosaeus M, Odén B, Odén A, Jennische E, Edén S, Holmäng A, Lönn M. Body fat mass and the proportion of very large adipocytes in pregnant women are associated with gestational insulin resistance. *Int J Obes*. 2016;40:646-53.
123. Henriksson P, Löf M, Forsum E. Assessment and prediction of thoracic gas volume in pregnant women: an evaluation in relation to body composition assessment using air displacement plethysmography. *Br J Nutr*. 2013;109:111-7.
124. Pellonperä O, Koivuniemi E, Vahlberg T, Mokkala K, Tertti K, Rönnemaa T, Laitinen K. Body composition measurement by air displacement plethysmography in

pregnancy: Comparison of predicted versus measured thoracic gas volume. *Nutrition*.
2019;60:227-9.