

## 体力テストを用いた体脂肪率の推定: I. 理論と方法

Prediction of relative fat with physical fitness test: I. Theory and method

稲垣 敦 Atsushi Inagaki, PhD

大分県立看護科学大学 人間科学講座 健康運動学 Oita University of Nursing and Health Sciences

2006年12月21日投稿, 2007年4月5日受理

### 要旨

体力テストを用いて除脂肪体重 (FFW) を推定する簡便な方法を提案した。体脂肪量、体脂肪率はFFWから簡単に算出できる。推定式は、各テストにおける動作の生力学的モデルに基づいている。予測変量は、身長、体重と3つの体力テスト、すなわち、握力、背筋力、垂直跳びのうちの一つである。式を整理するとFFWと予測変量の項は線形関係になるので、推定式中のパラメータは通常の重回帰分析で求めることができる。この理論における前提や単純化、他の可能性について実用性を考慮して議論した。

### Abstract

A simple method for predicting fat-free weight (FFW) with a physical fitness test has been proposed. Fat weight and relative fat could be easily calculated with FFW. The prediction equations are based on a biomechanical model of the motion of the physical fitness test. The predictive variables are height, weight, and one of the three physical fitness tests: grip strength, back strength, and vertical jump. The parameters in the equations could be estimated using ordinary multiple regression analysis because FFW and the terms of predictive variables proved to be linear after arrangement. The assumptions, the simplifications in this theory, and other possibilities were discussed taking practicability into consideration.

### キーワード

身体組成、体脂肪率、除脂肪体重、体脂肪量、体力テスト

### Key words

body composition, relative fat, fat-free weight, fat weight, physical fitness test

## 1. 序論

肥満は生活習慣病のリスクファクターであり、このため体脂肪率は重要な健康指標である。体脂肪率測定のスタンドアードは水中体重秤量法 (underwater weighing) であるが、学校や地域での健康診査などにはむかないため、便宜的にBMI等で肥満度を評価してきた。最近では成人だけではなく、小児・児童の肥満も問題になっているが、BI法 (Bioelectrical Impedance Analysis) による体脂肪率の測定機器が安価になったにもかかわらず、未だ健康診査の項目には含まれていない。

一方、体力と健康の関連性が多数報告され、健康関連体力 (health-related physical fitness) という概念が確立し、身体組成は体力の構成要素の一つとしても位置づけられるようになった。このため、体脂肪率と体力を同時に測定する機会が増えている。

運動という点からみれば、体脂肪はエネルギー

の備蓄であり、緩衝材であり、断熱・保温材であるが、同時にその重量は負荷にもなる。また、体重が同じで体脂肪が多いということは筋量が少ないことにつながる。したがって、体力テストの測定値には、身体組成の情報が含まれているはずであり、実際、体力テストと体脂肪率の相関関係が報告されている (金 他 1992, 1993a, 1993b, 1993c)。これらの点から、体力テストの測定値を用いて身体組成を推定することが可能と考えられ、これは一種の逆問題 (inverse problem) といえる。

以上のような点から、稲垣ら (1993, 1994) は体力テストの測定値を利用した体脂肪率の推定式を提案したが、簡便性を重視したため、推定式は形態と体力テストの測定値の1次関数であった。そこで、本研究では、体力テストの情報をより有効利用するため、身体組成を考慮して体力テスト時の運動を力学的視点からモデル化し、実用的な体脂肪率の推定式を導出することを目的とした。

## 2. 理論と方法

### 2.1 体力テスト項目の選択

体脂肪率の推定に用いる体力テストは、以下の条件を満たすことが望ましい。

- (1) 身体組成の指標と体力テストの測定値が力学的あるいは生理学的に関連があり、それを関数で表すことができる。
- (2) 測定精度（妥当性、信頼性、客観性）や実用性が高い。
- (3) 体力テストの動作の個人差が小さい。

(1)の点は、理論的妥当性（theoretical validity）のために最重要である。この点では、敏捷性、柔軟性、平衡性、全身持久力などよりも、筋力や瞬発力のテスト項目が適当と考えられる。

(2)については、体力テストの開発時に考慮されている。体力は構成概念（construct）であり、多くの生理学的機能に支えられており、しかもフィールドテストなので工業計測のような測定精度は期待できない。妥当性係数の上限でもある信頼性係数の推定値については、中学生で、握力、垂直跳び、立位体前屈、50 m走で0.90以上（稲垣，1993）、ソフトボール投げが0.90～0.93、握力が0.91、垂直跳びが0.83～0.98、50ヤード走が0.83～0.94、立ち幅跳びが0.90（Fleishman 1964, Kirkendall et al 1987）などの報告がある。このように、筋力や瞬発力に関するテストの妥当性や信頼性が高いと考えられる。実用性の点では、現時点で普及した項目が望ましいと考えられる。

(3)については、本研究が体力テスト時の筋出力から体脂肪率を推定するので、測定値の個人差に動作の差が反映されないことが望ましいということである。この点、体力テストは技能テストではないため、あらかじめ動作の個人差が生じにくい項目が選ばれている。したがって、握力や背筋力と比較すると、垂直跳びや50 m走の方が全身運動で動作も大きいので、個人差の生じる可能性は相対的に高いと考えられる。

(1)～(3)及び普及度や実用性、安全性を考慮すると、握力、背筋力、垂直跳びなどが体脂肪率の推定に相応しいと考えられる。

### 2.2 握力や背筋力を用いた体脂肪率の推定

体力テスト項目から体組成を推定するために、以下の4つの仮定を導入する。

仮定1: 除脂肪体重から筋量を除いた重量は体重の一次関数で表せる。

仮定2: 当該筋の筋断面積は筋量/身長に比例する。

仮定3: 当該筋が発揮した筋力はその筋断面積に比例する。

仮定4: 測定された力は当該筋が発揮した筋力に比例する。

身長(m)、体重(kg)、体脂肪率(0～1: 無名数)、体脂肪量(kg)、除脂肪体重(kg)をそれぞれ、H、m、RF、FW、FFWと表すと、筋力測定機器に作用した力Fは上記の仮定から、

$$F = \alpha \frac{FFW - (bm + c)}{H} \quad (1)$$

と表せる。但し、 $\alpha$ は全ての比例定数を吸収した係数で、推定すべき未知のパラメタである。除脂肪体重の推定式は(1)をFFWについて解いて、

$$FFW = aF \cdot H + bm + c \quad (2)$$

と得られる。但し、

$$a = \frac{1}{\alpha}$$

である。このように、身長、体重、握力(背筋力)の3つの測定値から除脂肪体重を推定することができる。

(2)式中のa、b、cは重回帰分析を実際の測定データに適用し、偏回帰係数及び定数として求めればよい。また、定義よりFWとRFは

$$FW = m - FFW,$$

$$RF = \frac{FW}{m}$$

と求めればよく、筋量MM(kg)はモデルより、

$$MM = FFW - (bm + c) = aF \cdot H$$

で得られる。

### 2.3 垂直跳びを用いた体脂肪率の推定

垂直跳びを用いて体脂肪率を推定する場合は、仮定1～4に加え、さらに仮定5～7を導入する。

仮定5: 垂直跳びの測定値は踏切動作最終時点から最高時点の重心の変位と等しい。

仮定6: 脚伸展局面の垂直方向の重心移動距離

は身長 $\frac{1}{4}$ である:  $d = \frac{H}{4}$ 。

仮定7: 脚伸展局面では一定した力が上方に発揮される:  $F = \text{constant}$ 。

つまり、離陸まで重心が等加速度で上昇する:  $a = \text{constant}$ 。

跳躍高(m)、重力加速度(=9.81 m/s<sup>2</sup>)、脚伸展中の垂直方向の重心加速度(m/s<sup>2</sup>)、重心の最下点を0とした時の踏切時の時間(脚伸展時間, s)をそれぞれ、 $h$ 、 $g$ 、 $a$ 、 $t$ とすると、重心の運動方程式

$$\frac{W}{g}a = F - W \quad \text{但し、} \quad W = mg$$

及び仮定7より、踏切時( $t$ 秒後)の重心の速度は、

$$v_t = \frac{g(F - W)}{W}t = \left(\frac{F}{W} - 1\right)gt$$

である。したがって、

$$F = \left(\frac{v_t}{gt} + 1\right)W \quad (3)$$

となる。ここで、跳躍高は離陸後の重心速度がゼロになるまでの時間(= $v_t/g$ )に到達する高さゆえ、

$$h = \frac{g}{2}\left(\frac{v_t}{g}\right)^2 = \frac{v_t^2}{2g}$$

である。これより、踏切時の重心速度は、

$$v_t = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

と表すことができる。また、踏切までの重心の変位は、

$$d = \int_0^t v(\tau) d\tau = \int_0^t \left(\frac{F}{W} - 1\right)gt \cdot d\tau = \frac{gt^2}{2}\left(\frac{F}{W} - 1\right) \\ = \frac{v_t t}{2} \text{ であり、仮定6より、}$$

$$\frac{H}{4} = \frac{v_t t}{2}$$

である。これと(4)より、踏切までの時間 $t$ は、

$$t = \frac{H}{2v_t} = \frac{H}{2\sqrt{2gh}} \quad (5)$$

と表すことができる。(3)に(4)及び(5)を代入して整理すると、

$$F = \left(\frac{4h}{H} + 1\right)W = \left(\frac{4h}{H} + 1\right)mg$$

が導かれる。したがって、(1)より、

$$\alpha \frac{FFW - (bm + c)}{H} = \left(\frac{4h}{H} + 1\right)mg$$

となる。除脂肪体重の推定式は、これをFFWについて解いて、

$$FFW = a(4h + H)m + bm + c \quad (6)$$

と得られる。但し、

$$a = \frac{g}{\alpha}$$

である。

この場合も、身長、体重、垂直跳びの3つの測定値で除脂肪体重を推定することができる。パラメタ $a$ 、 $b$ 、 $c$ も重回帰分析で求めればよい。FW、RFも2.2と同様に求めることができ、筋量はモデルより、

$$MM = FFW - (bm + c) = a(4h + H)m$$

で得られる。

### 3. 考察

本研究では、体力テスト動作の力学的モデルに身体組成のパラメタを導入して、握力、背筋力、垂直跳びのそれぞれと身長、体重を用いた体脂肪率の推定式を導いた。簡易化のためのいくつかの仮定を導入して式を展開した結果、極めて簡便な推定式が導かれ、推定式におけるパラメタは実際のデータから重回帰分析で推定できることがわかった。現在、学校や地域の健康診査で肥満度の評価に用いられているBMI等の体格指数と比較すると、直接的に体脂肪率の推定値が得られる点で優れている。元来、この方法は、体脂肪率を推定するために体力テストを実施するというのではなく、既に体力テストのデータがある時に、身長や体重の測定値に体力テストの情報を加えて、BMI等よりも高い精度で体脂肪率を推定することが狙いである。したがって、体育の授業で体力テストを実施することの多い学校では利用できる機会も多いと考えられる。一方、身長、体重、体力テストの測定値の1次関数であった稲垣ら(1993, 1994)の推定式と比較すると、力学的モデルから導いたため理論的妥当性が高く、推定

精度も高いと考えられるが、この点は実際のデータでの検討が必要である。また、推定式が簡単であるという点も特筆すべき点である。さらに、これまで提案されてきた多くの体脂肪率の測定法 (Lukaski 1987) と比較すると、高価な器機や熟練した測定技術が不要であるという点で優れている。

仮定1における除脂肪体重から筋を除いた部分というのは、骨、皮膚、脳、その他の器官である。これらは体重が重い者ほど重いと考えられ、生きてゆく上で必須な部分なので最低限必要な重量がある。したがって、一般に体重の  $n$  次関数で表現できると考えられる。次数を増やして近似を高めることも可能であるが、パラメタ推定に伴う不確かさの増大と実用性の観点から、本研究では1次関数  $Bm + c$  を採用した。

仮定2は、筋部を円柱型で近似し、筋量を身長で除すると平均的な筋断面積に相当する値が得られ、それは当該筋の断面積に比例することを示している。たとえば、既存の体格指数、すなわち BMI (Kaup 指数)、Livi (Ponderal) 指数、Rohrer 指数や Quetelet 指数などでも体を立方体あるいは円柱型として単純化している。また、BI法では身体を導体と考えて、身長を長さ、体重を身長で除した値を太さとして電気抵抗値を補正して体密度を求めている (Segal et al 1985, Baumgartner et al 1990, Nakadomo et al 1990)。しかし、電極は手と足に装着されるので、実際に電流が流れる長さは身長と同じではないし、一定の断面積でもなく、電気密度分布も均一とは言い難い。これらの単純化を考慮すると、本研究における筋量を身長で割るという単純化も適当と考えられる。同様に、体の平均的な筋断面積が当該筋断面積と比例するという仮定も簡便法としては必要かつ適切な単純化と考えられる。

仮定3は、筋の単位断面積当りの筋収縮力は性別にかかわらずほぼ一定であるという生理学的知見 (Ikai and Fukunaga 1968, 福永 1978) に基づいている。また、この仮定には、筋組成や筋の動員率は考慮されていないが、この点も実用性の点で適切である。

仮定4は運動効率に関する仮定で、関節におけるてこ比、内部抵抗、運動技術などが関係する。内部抵抗については測定前のウォーミングアップ

やストレッチングが有効と考えられる。また、運動技術については単純な動作の体力テストを採用したことで対処しているが、測定前に被測定者が練習することも重要である。

仮定1-4では、アロメトリー (allometry: Thompson 1917, Huxley 1924, 1932) や次元解析 (dimensional analysis: Asmussen and Christensen 1967) の考え方を応用し、筋量はFFWに比例し、測定された筋力は除脂肪体重の冪関数

$$F = \beta(\text{FFW})^\alpha$$

で表せると仮定することもできる。この場合、筋力は筋の断面積に比例するので、次元数の理論値は2となり、 $\alpha$ の理論値は、

$$\alpha = \frac{2}{3}$$

となる。実際、体重と除脂肪体重という差はあるが、Lietzke (1956) は量挙げの最大挙上重量が体重の0.6748乗 ( $\approx 2/3$ ) に比例すると報告している。しかし、Asmussen and Heeboll-Nielsen (1955) の報告によれば、脚伸展力は2.891、腕屈曲力は3.893、握力は3.274であり、垂直跳びは1.590 (理論値=0) であり、次元数の推定値は理論値と一致しているとは限らない。したがって、 $\alpha$ もパラメタとして推定した方が望ましい。これに従えば、

$$\beta(\text{FFW})^\alpha = F \quad (\text{握力・背筋力の場合})$$

$$\beta(\text{FFW})^\alpha = \left( \frac{4h}{H} + 1 \right) W \quad (\text{垂直跳びの場合})$$

となり、推定式は、

$$\text{FFW} = cF^a \quad (\text{握力・背筋力の場合})$$

$$\text{FFW} = b \left[ \left( \frac{4h}{H} + 1 \right) m \right]^a \quad (\text{垂直跳びの場合})$$

となる。但し、

$$a = \frac{1}{\alpha}, \quad b = \left( \frac{\beta}{g} \right)^\alpha, \quad c = \beta^{-\frac{1}{\alpha}}$$

である。この場合、 $\alpha$ が整数とは限らないため、電卓で除脂肪体重を求めることが困難であるという実用上の問題が残る。しかし、パソコンも現場に普及してきているので、今後、検討の余地があると考えられる。

仮定5については、通常、垂直跳びでは重心の

変位よりも垂直跳びの測定値の方が大きい、体力テストで行われている跳び方では許容できる範囲と考えられている(渋川 1969)。実際、小林(1965)と渋川(1969)は、垂直跳びにおける平均パワーの推定において仮定5と仮定6を用いている。仮定7に関しては、小林(1965)は踏み切り動作中の重心の加速度、すなわち力を時間の一次関数としてとらえているが、渋川(1969)は実際のデータから本研究のようにむしろ単純に一定と仮定することを推奨している。

本研究の場合、体力テストの動作を力学的及び生理学的にモデル化する必要がある。一般に、モデルパラメタの数を増やし、精緻なモデルを構築すれば適合度は高くなる。この意味で、モデルの精緻さというものは合目的である。本研究の目的は、実用的な体脂肪率の推定式の開発であり、また、体力テストの測定精度も工業計測のように高くはないので、精緻なモデルの構築は合理的ではない。一般に、モデルパラメタを減らす方法として、仮定の導入がある。このような意味で、本研究でも上述のような仮定を導入して、モデルを単純化することは適切であると考えられる。しかしながら、本研究で提案した理論と方法を評価するには、実際のデータを当てはめて推定式を導き、その推定式の妥当性を評価しなければならない。これに関しては、近日中に本ジャーナル上で報告する予定である。

#### 引用文献

- Asmussen E and Heeboll-Nielsen K (1955). A dimensional analysis of physical performance and growth in boys. *Journal of Applied Physiology* 7, 593-603.
- Asmussen E and Christensen EH (1967). *Kompendium i Legemsovelsernes Specielle Teori*. Kobenhavns Universitets Fond til Tilvejebringelse af Laremidler, Kovenhavn.
- Baumgartner RN, Chumlea WC and Roche AF (1990). Bioelectric impedance for body composition. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 18, 193-224.
- Fleishman EA (1964). *The structure and measurement of physical fitness*. Prentice-Hall, New Jersey.
- 福永哲夫(1978). 人の絶対筋力: 超音波による体肢組成・筋力の分析. 杏林書院, 東京.
- Huxley JS (1924). Constant differential growth ratios and their significance. *Nature* 114, 895-896.
- Huxley JS (1932). *Problem of relative growth*. Methuen, London.
- Ikai M and Fukunaga T (1968). Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. *International Zeitschrift fur angewandte Physiologie* 26, 26-32.
- 稲垣敦(1993). 体格指数、体力診断・運動能力テストを用いた体脂肪率の推定法の開発: 中学生を対象として. *行動計量学* 20, 81-91.
- 稲垣敦, 金憲経(1994). 形態、体力診断・運動能力テスト項目による体脂肪率の推定法: 中学生を対象として. *教育医学* 39, 331-346.
- 金憲経, 松浦義行, 田中喜代次, 稲垣敦(1992). 肥瘦度が体力・運動能力に及ぼす影響: 12歳から14歳の男子生徒について. *体力科学* 41, 548-558.
- 金憲経, 松浦義行, 田中喜代次, 稲垣敦(1993a). 肥満生徒の体力・運動能力の特徴: 12歳から14歳の男子生徒について. *生理人類学* 12, 17-23.
- 金憲経, 松浦義行, 田中喜代次, 稲垣敦(1993b). 肥満女子中学生の体力・運動能力の特徴. *体力科学* 42, 380-388.
- 金憲経, 田中喜代次, 稲垣敦, 鈴木和弘, 向山貴仁, 中村なおみ, 小磯透, 松浦義行(1993c). 中学生男子の体力・運動能力と関連する諸要因の検討: パス分析を用いて. *体育学研究* 38, 215-227.
- Kirkendall DR, Gruber JJ and Johnson RE (1987). *Measurement and evaluation for physical education*, 2nd Ed., Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois.
- 小林一敏(1965). 身体運動の力学. 宮畑虎彦, 高木公三郎, 小林一敏(編). *スポーツ科学講座8: スポーツ*

ツとキネシオロジー, pp149-150. 大修館書店, 東京.

Lietzke MH (1956). Relation between weight-lifting total and body weight. *Science* 124, 486-487.

Lukaski HC (1987). Methods for the assessment of human body composition: traditional and new. *The American Journal of Clinical Nutrition* 46, 537-556.

Nakadomo F, Tanaka K, Hazama T and Maeda K (1990). Validation of body composition assessed by bioelectrical impedance analysis. *Japanese Journal of Applied Physiology* 20, 321-330.

Segal KR, Gutin B, Presta E, Wang J and Van Itallie TB (1985). Estimation of human body composition by electrical impedance method: a comparative study. *Journal of Applied Physiology* 58, 1565-1571.

渋川侃二 (1969). 運動力学, pp252-258. 大修館書店, 東京.

Thompson DW (1917). *On growth and form*. Cambridge University Press, New York.



#### 著者連絡先

〒870-1201  
大分市大字廻栖野 2944-9  
大分県立看護科学大学 健康運動学研究室  
稲垣 敦  
inagaki@oita-nhs.ac.jp