

厚生労働科学研究費補助金（循環器疾患・糖尿病等生活習慣病対策総合研究事業）  
分担研究報告書

学校保健統計調査のデータ解析

～身長に左右されない身長調整体格指標に求められる数学的必要条件～

研究分担者：清野 健 大阪大学大学院基礎工学研究科・教授  
研究代表者：緒形 ひとみ 広島大学大学院人間社会科学研究科・准教授  
研究分担者：永井 成美 兵庫県立大学環境人間学部・教授  
能瀬 さやか ハイパフォーマンススポーツセンター・国立スポーツ  
科学センター・スポーツ医学研究部門・産婦人科医  
木村（萱場） 桃子 筑波大学医学医療系・日本学術振興会特別研究員  
(RPD)

研究要旨

体重 (kg) を身長 (m) の2乗で割った体格指数 (BMI) は、成人だけでなく、小児や青少年を含む幅広い年齢層のやせや肥満の評価に用いられてきた。しかし、やせや肥満といった体格評価の指標としての BMI の妥当性や有用性については問題点が指摘されるようになっている。本研究では、BMI の妥当性の根拠となる数学的条件を議論し、子どもの体格評価における BMI の欠点を明らかにする。我々は、客観的な身長調整体格指標が満たすべき数学的必要条件として、アロメトリック単一スケール性を導入する。アロメトリック単一スケール性とは、身長に対する体重分布における任意の体重センチル（パーセンチル）曲線が、同じスケール指数を持つべき乗関数を用いて近似できることを意味する。これに対し、体重センチル曲線の位置によってスケール指数が変化する場合は、アロメトリック多重スケール性と呼ぶ。本研究では、このようなスケール特性を、分位点回帰 (quantile regression) を用いて評価する方法を開発し、この方法を、我が国の学校保健統計調査により収集された5～17歳の子ども7,863,520人を含む大規模データベースに適用した。分析の結果、男性では5～13歳、女性では5～11歳において顕著な多重スケール性が見られ、男女ともに17歳に近づくにつれてスケール指数が2に近い単一スケール性に漸近することを見いだした。このことは、男女とも成人に近い17歳において、従来のBMIが客観的な身長調整体格指標として妥当であることを裏付けている。しかし、それ以下の年齢層の子どもではBMIの妥当性は確認できなかった。我々の知見は、子どもの体重と身長の関係の成長は、これまで想定されていたよりもはるかに複雑であることを示している。したがって、単一のBMI型の指標では、子どもや青年のやせや肥満を適切に評価することはできない。ここでは、子どもの適切な瘦身評価のために、従来のBMIとは異なる、拡張BMIを新たに提案する。

## A. 研究目的

本研究の目的は、子どもの年齢に依存した身長に対する体重分布の特徴を明らかにし、一般人口において成り立つ統計的根拠（統計法則）に基づいた子どもの体格評価（やせ・肥満評価）を実現することである。これまで、世界保健機関（World Health Organization: WHO）や国際肥満タスクフォース（International Obesity Task Force: IOTF）などでは、子どもの体格評価において、体重（kg）を身長（m）の2乗で割った成人と同様の体格指数（Body Mass Index: BMI）

を用い、成人とは異なる子ども用の評価基準値を設定することで、子どものやせ・肥満を判定する枠組みを確立してきた<sup>1, 2)</sup>。そのため、BMI は子どもを対象とした疫学研究において広く活用されてきた<sup>2)</sup>。しかし、BMI を子どもに適用することの問題点や限界については、ほとんど検討されてこなかった。本研究では、BMI を子どもに適用することの深刻な欠点を明らかにし、子どもの体格を適切に評価するための方法について議論する。

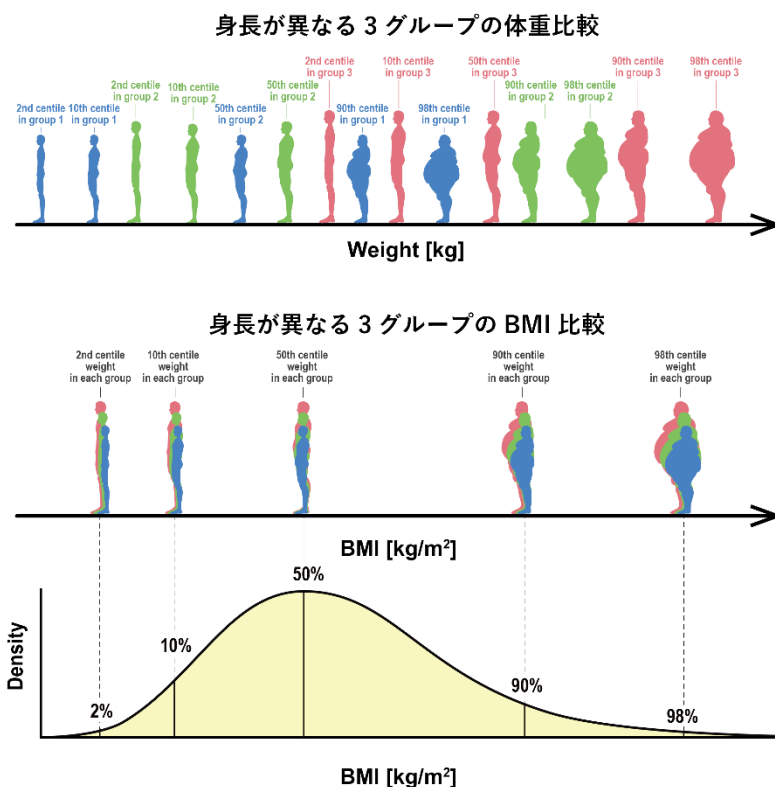


図 1：身長調整体格指標として BMI が妥当である条件の説明（模式図を使った説明）。ここでは、身長が異なる 3 グループを仮定（各グループ内では身長は同じとする）。（上段）各グループの 2%、10%、50%、90%、98%点体重の比較（体重は身長に依存するため、体重のみを用いてやせ・肥満を比較することはできない）。（中段）各グループの 2%、10%、50%、90%、98%点 BMI の比較（BMI には身長依存性がないため、やせ・肥満の程度を比較できる）。（下段）身長が異なっても BMI 分布が同じであれば、BMI を用いて、異なる身長グループ間での BMI パーセンタイル位置が比較できる。以上は、BMI が理想的な身長調整体格指標であると仮定した場合の説明。

## B. 研究方法

本研究の方法と内容の理解のためには、「身長調整体格指標の妥当性」、「アロメトリック単一スケール性」、および、「ア

ロメトリック多重スケール性」の意味を明確にする必要がある<sup>3)</sup>。そこでまず、これらの概念について説明し、その後、具体的な研究方法を述べる。

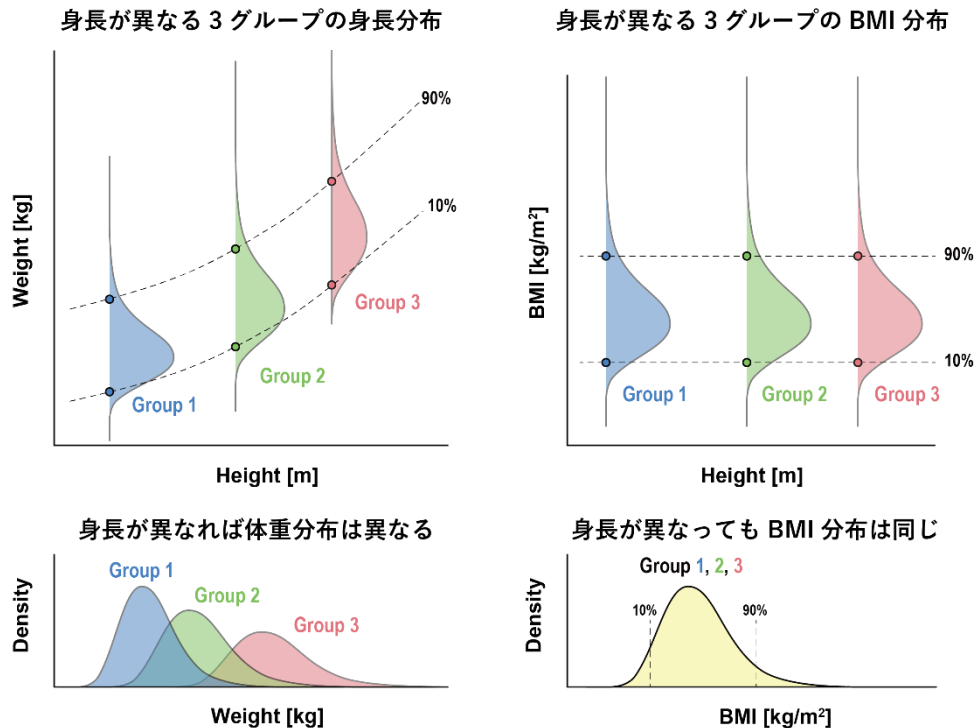


図2：BMIが理想的な身長調整体格指標である場合の、身長に対する体重分布とBMI分布の特徴（模式図を使った説明）。ここでは、身長が異なる3グループを仮定（各グループ内では身長は同じとする）。（左上）身長に対する体重の分布。（左下）3グループの体重分布。破線は、10%、および、90%のセンタイル（パーセンタイル）曲線。（右上）身長に対するBMIの分布。破線は、10%、および、90%のセンタイル曲線。（右下）3グループのBMI分布。一般人口において、身長に依存しないBMI分布が存在することが、BMIの妥当性の根拠（最も理想的な条件）。図1、図2に示した理想的な身長調整体格指標が存在するための必要条件が、アロメトリック単一スケール性であり、多重スケール性が見られる場合、従来のBMIは身長調整体格指標ではない。

### 【基本事項の説明】身長調整体格指標の妥当性

BMIの妥当性について考察する場合、その計算式の根拠と、判定に用いる閾値の根拠を、分けて考える必要がある。BMIの計算

式については、身長に依存することなくやせ・肥満を定量化する身長調整体格指標であることが、その妥当性の根拠となる（図1、2参照）。一方、BMIの閾値の妥当性は、それが、臨床判断値として疫学的根拠に基

づいて定められたものか、あるいは、健常人（もしくは、一般人口）を対象とした出現確率に基づき定められたものかで、閾値の設定法とその意味が異なる。現在広く用いられているBMIの閾値は、後者の立場で定められている。すなわち、一般人口において、ある程度出現確率が少ないと考えられるBMIのパーセント点（センタイル点）の値がBMIの閾値として採用されている。具体的には、やせ評価は、10%点、3%点、2%点など、肥満評価は90%点、97%点、98%点などが用いられてきた（ $z$  スコアを用いる場合もある）<sup>1)</sup>。この立場では、やせと判定する閾値以下のBMIを計測した場合、「出現確率が低い瘦身体型である」と解釈できる。とはいえ、出現確率が低い体型であっても、一般人口において一定の確率で自然に出現するため、健康や栄養などの問題があるかどうかを判断するには、BMIの情報だけでは不十分である。

BMIの計算式を裏付ける古典的根拠として、BMIと身長との無相関性と、身長と体重のアロメトリックスケール性の2つがある。1970年代以前は、BMIの他に、body build指数（体重÷身長）やRohrer指数（体重÷(身長の3乗)）なども身長調整体格指標として用いられてきた<sup>4)</sup>。これらの身長調整体格指標の妥当性は、Keysら（1972）によって検証され、身長との相関が最も弱い指数として、BMIの計算式の妥当性が示された<sup>5)</sup>。1993年、WHOはBMIのカットオフ値を示し、それが今日も広く利用されている<sup>6)</sup>。

数理生物・生理学の視点では、身長体重分布におけるアロメトリックスケール性がBMI型の式  $w/h^\alpha$  の根拠と考えられる。

アロメトリー（allometry）とは、生物の体の大きさと生理学的、形態学的、あるいは、進化的特性との関係を研究する学問である<sup>7)</sup>。BMIの定義式は、身長  $h$  に対する典型的な体重  $w$  が、スケールリング則  $w = Ch^\alpha$  により与えられ、 $\alpha = 2$  であることを根拠としている。ここで、 $\alpha$  と  $C$  はそれぞれ統計的に推定されたスケールリング指数と比例係数である。単細胞生物、多細胞生物、恒温動物など広範な動物において、安静時エネルギー消費量は  $w^{3/4}$  に比例することが経験的に知られている（クライバーの法則または  $3/4$  べき乗則のスケールリングとして知られている）。この事実と、体温を一定に保つためのエネルギー消費量は体表面積に比例するという仮定に基づけば、ヒトの体重は  $h^2$  に比例することが数理的に導出できる<sup>8)</sup>。また、実際に成人の体重・身長関係の回帰式を推定した先行研究によりスケールリング指数  $\alpha$  が 2 に近いことが示されている。しかし、18歳未満では、スケールリング指数  $\alpha$  が年齢とともに変化することが示されている。幼児期には  $\alpha = 2$  であり、青年期には 3 まで上昇し、成人期には 2 に戻る。そのため、成人と同じBMI型の計算式では、子どものやせ・肥満は、適切に評価できない可能性がある。

#### 【基本事項の説明】アロメトリック単一スケールリング性と多重スケールリング性

従来のアロメトリックスケールリング解析の枠組みにおいて、身長に対する体重分布の構造を特徴づける場合、体重  $w$  と身長  $h$  の関係は、1つのスケールリング指数  $\alpha$  で完全に特徴づけられると仮定されてきた。この場合、身長に対する体重の任意のセンタ

イル曲線は、同じスケーリング指数  $\alpha$  を持つべき乗関数  $w = C h^\alpha$  で近似できることを意味する。そのように、身長に対する体重の任意のセンチイル曲線が、単一のスケーリング指数  $\alpha$  で特徴付けられる場合を、ここでは「アロメトリック単一スケーリング」と呼ぶ、それに対し、 $q\%$  のセンチイル曲線が、 $q$  に依存したスケーリング指数  $\alpha_q$  により特徴付けられる場合を「アロメトリック多重スケーリング」と呼ぶ。アロメトリック多重スケーリング性は、本研究で新たに導入した概念である<sup>3)</sup>。

## データと方法

本研究では、2008 年から 2019 年の間に計測された、5 歳から 17 歳の子ども 7,863,520 人の年齢、性別、身長、体重を含む大規模データを分析した。このデータは、学校における子どもの身体発育を明らかにするために、文部科学省が実施した学校保健統計調査により収集されたものである。データとして記録されている身長と体重は、それぞれ、センチメートル (cm) とキログラム (kg) の整数値として記録されている。本研究では、これらのデータを平滑化 (実数化) し、統計的信頼度を向上させるために、平滑化ブートストラップ法を適用した<sup>9)</sup>。この平滑化ブートストラップ法では、サイズ  $N$  の初期データセットからサイズ  $N$  の再サンプルデータを得るために、データセット中の行をランダムに抽出する。その後、抽出された行の身長と体重のペアに、身長・体重関係の相関を考慮した 2 変量ガウス分布に従うランダムノイズを加える。この手続きを 200 回繰り返し、各平滑化ブートストラップ複製に対して統計値を計算

した。以下では、推定値として全ブートストラップ複製の中央値を示す。

## 拡張アロメトリックスケーリング解析

身長に対する体重分布において、身長に依存した体重の  $q$  センタイル ( $q$  パーセンタイル) 曲線  $w_q(h)$  にべき関数  $w_q(h) = C_q h^{\alpha(q)}$  を当てはめた。ここで、 $\alpha(q)$  と  $C_q$  は、それぞれ、スケーリング指数と比例係数である。パラメタの推定には、分位回帰法を用いた<sup>10)</sup>。モデルパラメタの推定には、シンプレックス探索アルゴリズム (simplex search algorithm) を用いた。

## C. 研究結果

図 3 に拡張アロメトリック解析結果の例を示す。図 7(a)(b)の実線が示すように、17 歳男女の各センチイル曲線のスケーリング指数は 2 に近く、単一スケーリング性を示した。これに対して、図 7(c)(d)中の実線が示すように、8 歳男女のセンチイル曲線は多重スケーリング特性を示した。

図 8 に、女性におけるスケーリング指数  $\alpha(q)$  の年齢依存性を示す。男女とも 17 歳に近づくとつれてスケーリング指数  $\alpha(q)$  は全て 2 付近に漸近し、単一スケーリング性を示すようになるが、より若い年齢ではスケーリング指数  $\alpha(q)$  がセンチイル位置  $q$  に依存する多重スケーリング性が見られた。この結果は、子どもにおける従来の BMI の使用に関して 2 つの問題を提起している。一つは BMI の計算式であり、もう一つは推定されたスケーリング指数  $\alpha(50)$  に基づいて BMI の計算式を修正しても、統一的な身長調整体格指標にならないことである。これらの問題を詳しく論じる前に、BMI がど

のような意味でやせや肥満の評価に適した客観的尺度であるかを説明する。

成人に近い 17 歳女性において BMI の妥当性を確認するために、体重と身長の関係 (図 5(a))、および、BMI と身長の関係 (図 5(b)) を分析した。図 5 では、実際の体重・身長データ (灰色点) に  $w_q(h) = C_q h^\alpha$  を当てはめた結果を実線と破線で示した (これらの図は、模式的に描いた図 2 の具体例である)。また、図 5 (a)には、センチル曲線の推定結果 (回帰曲線) に加えて、身長を部分階級に分け、各階級における体重センチル点をプロットした。身長の部分階級のセンチル位置と回帰曲線の推定結果は良く一致していることから、 $w_q(h) = C_q h^\alpha$  は、身長に対する体重センチル曲線を適切に近似していることが確認できる。図 5(a)に示したように、身長に対する体重分布のすべての回帰直線 (両対数プロットにおける直線) が平行であることから、単一スケールリングであることが確認できる。新たな標準化 BMI として、 $w/h^{\alpha(50)}$  を用い、 $\alpha(50) = 1.85$  を採用すると、身長に対する標準化 BMI 分布のセンチル点の値は一定になり、身長依存性はほぼない。さらに、図 2 に模式的に描いたように、体重分布の身長依存性が、標準化 BMI 分布には見られなくなる。したがって、標準化 BMI は、身

長調整体格指標として妥当と判断できる。

図 4 に示すように、13 歳以下の女性のスケールリング指数は系統的に 2 から乖離し、11 歳以下では明らかな多重スケールリング性を示す。そのため、13 歳以下の女性においては、従来の BMI は適切な身長調整体格指標ではない。図 6 は、図 5 と同じ解析を 8 歳女性のデータに対し行った結果である。図 6(a)に示すように、平行でない回帰直線 (両対数プロットにおける直線) は体重・身長分布の多重スケールリング性を示している。この例では、体重中央値の回帰直線の推定傾きは  $\alpha(50) = 2.73$  であった。したがって、標準化 BMI として  $w/h^{2.73}$  を定義した。図 6(b)に標準化 BMI と身長の関係を示す。図 5(b)と異なり、回帰直線は水平でなくなっており、身長依存性が見られた。また、図 6 (d)に示したように、標準化 BMI の分布は、身長に依存して変化している。したがって、従来の BMI、標準化 BMI とも、それらの基準値を設定しても、身長依存性は排除できない。この結果は、BMI のような  $w/h^\alpha$  型の単一式では、子どものやせと肥満の両方の適切に評価できないことを示している。したがって、やせと肥満の評価には、それぞれ異なる方法を用いる必要がある。

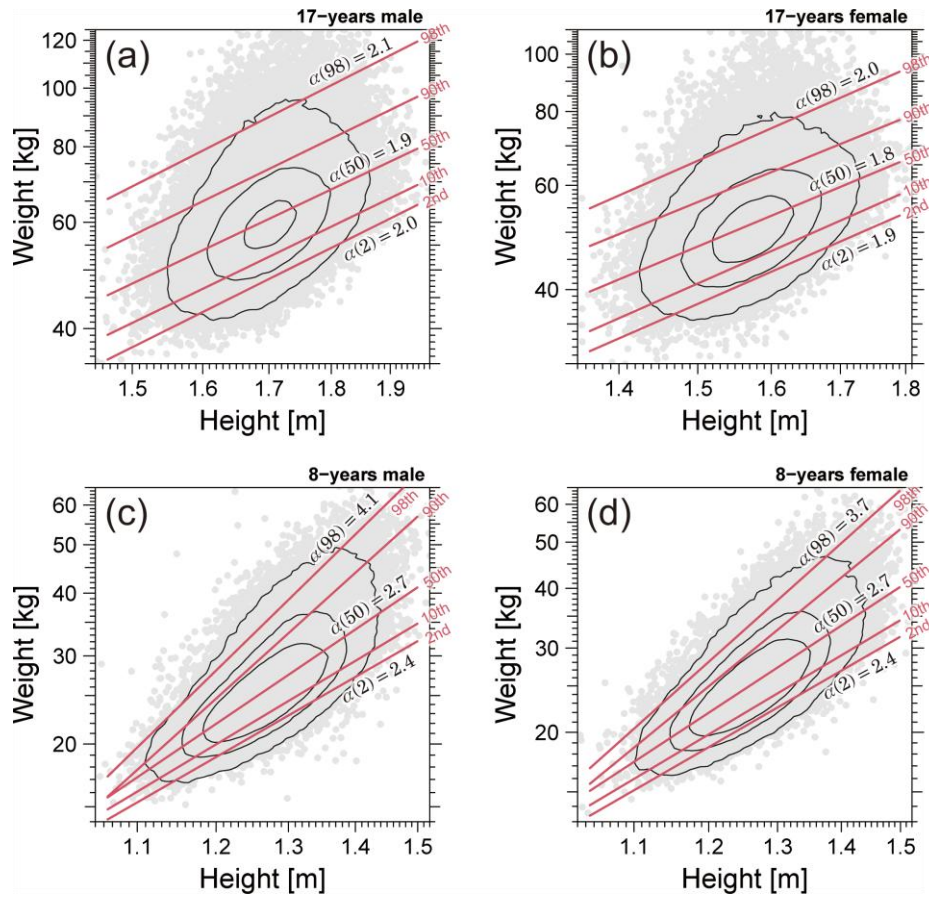


図3：拡張アロメトリック解析の結果。グラフは両対数スケールで描かれており、推定されたセントイル曲線（赤実線）がすべて平行の場合が、アロメトリック単一スケールリングであり、平行でない場合が多重スケールリングとなる。実線は、2%、10%、50%、90%、98%点のセントイル曲線。(a) 17歳男性。(b) 17歳の女性。(c) 8歳男性。(d) 8歳女性。推定されたスケールリング指数（直線の傾き）を各パネル中に示した。

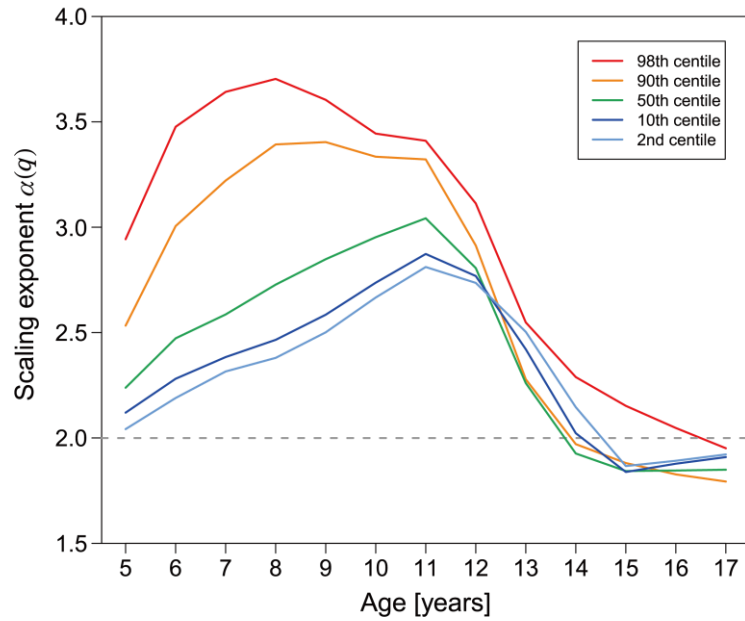


図 4 : 5 歳から 17 歳の女性のスケール指数  $\alpha(q)$  の年齢依存性。身長に対する体重の 2%、10%、50%、90%、98% のセンタイル曲線のスケール指数を示す。5 本の線がほぼ同じ値であれば単一スケール、異なる値であれば多重スケールと解釈できる。



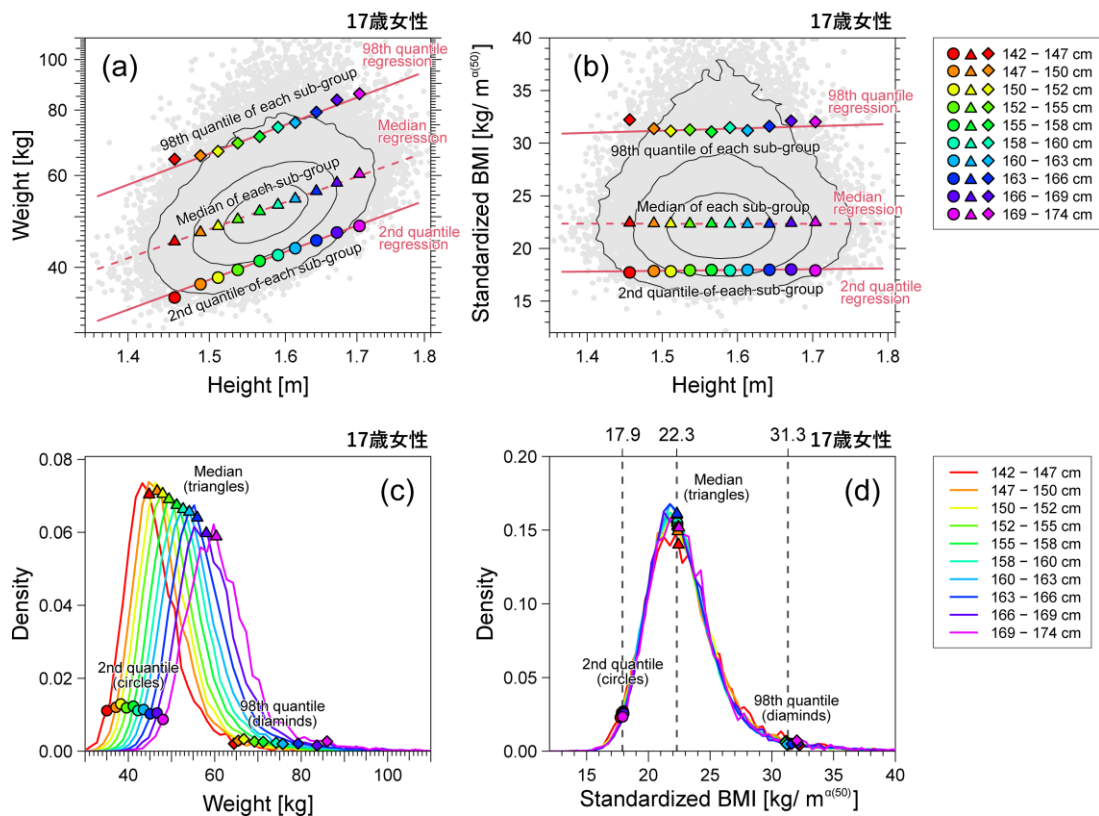


図 5 : 17 歳女性の体重と標準化 BMI の構造。単一スケリングの例。(a) 両対数スケールの身長に対する体重分布。(b) 標準化 BMI  $w/h^{\alpha(50)}$  の身長に対する分布を線形スケールで示したもの。(a)(b)では、2%、50%、98%の回帰曲線を赤線、各身長層における体重分布の 2%、50%、98%点をそれぞれ円、三角形、菱形でプロットした。(c) 各身長階層の体重分布。(d) 各身長階層の標準化 BMI 分布。(c)(d)では、各身長階層における分布の 2%、50%、98%点をそれぞれ円、三角、菱形でプロットした。

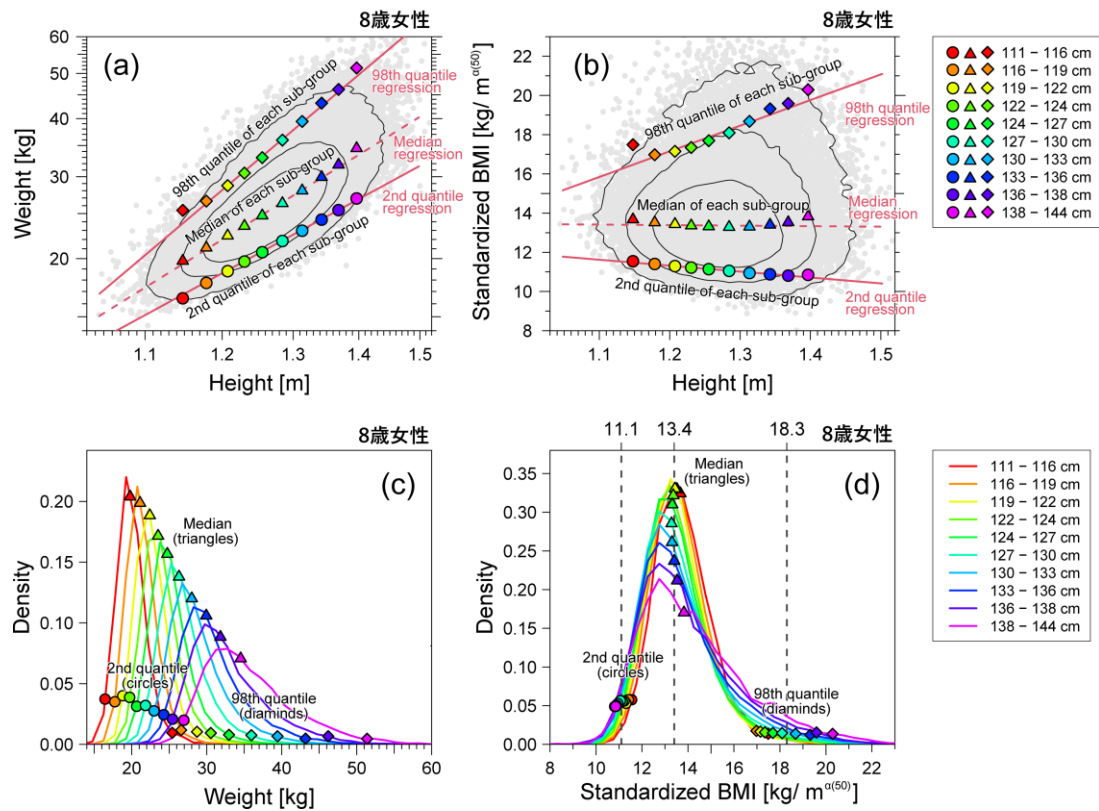


図 6 : 8 歳女性の体重と標準化 BMI の構造。多重スケーリングの例。(a) 両対数スケールの身長に対する体重分布。(b) 標準化 BMI  $w/h^{\alpha(50)}$  の身長に対する分布を線形スケールで示したもの。(a)(b)では、2%、50%、98%の回帰曲線を赤線、各身長層における体重分布の 2%、50%、98%点をそれぞれ円、三角形、菱形でプロットした。(c) 各身長階層の体重分布。(d) 各身長階層の標準化 BMI 分布。(c)(d)では、各身長階層における分布の 2%、50%、98%点をそれぞれ円、三角、菱形でプロットした。

#### D. 考察

子どもの適切なやせ評価の実現のために、新たな方法を検討する。我々の提案法では、性別、年齢別に、次の拡張 BMI を定義する。

$$\text{BMI}_{\text{ext}}(q) = \frac{w}{h^{\alpha(q)}}$$

ここで、 $w$  は体重 (kg)、 $h$  は身長 (m)、 $\alpha(q)$  は体重センタイル ( $q$  パーセンタイル) 曲線のスケーリング指数である。やせの評価に拡張 BMI を用いる場合、 $q$  は、10%点、2%点などを選択肢、その判定閾値はべき関数モデルのパラメタ  $C_q$  で与えられる。実際の拡張 BMI のパラメタおよび閾値は文献<sup>3)</sup>にまとめた。この方法により、一般人口における出現確率の定量評価の意味で、妥当な体格評価が可能になる。

次に、スケーリング指数  $\alpha$  の意味について考察する。多重スケーリング性の年齢依存性は、子どもの成長過程と密接に関連していると考えられる。数学的に、スケーリング指数  $\alpha$  は、

$$\alpha = \frac{dw/w}{dh/h} = \frac{\text{体重増加率}}{\text{身長増加率}}$$

として記述できる。ここで、体重増加率、および、身長増加率は、本来、年齢一定の場合の値であるが、子どもの成長過程では、年齢変化による変化も同様の傾向があるとみなせば、 $\alpha(q)$  は成長過程における体重増加と身長増加のバランスを表す指標と解釈できる。女性の場合、図7に示したように、異なるスケーリング指数の年齢依存的特徴的变化は、思春期の成長スパート (身長のピーク年齢、peak height age)、初潮、身長の成長停止 (最終身長年齢、final

height age) など、女性の成長過程における主要な発達現象と関連している可能性がある。女性の成長過程では、思春期の成長スパートが起こる年齢あたりから、異なる体重センタイル曲線のすべてのスケーリング指数が減少し始め、初経発来の平均年齢

(12歳頃) を過ぎると単一スケーリングに変化し始める。身長の伸びが止まった直後の年齢では、指数は漸近的に単一スケーリングに近づき、スケーリング指数は2となる。

本研究では、日本のデータのみを分析しており、地域、人種、生活習慣などの違いといった影響の評価は不十分である。将来的には、子どもの発達的に影響を与える因子を理解し、子どものやせと肥満の新しい評価基準を確立するために、広範な国際的データベースを分析する必要がある。

#### E. 結論

本研究では、一般人口統計の観点から、やせ・肥満評価のための客観的な身長調整体格指標が満たす単一スケーリングと呼ばれる数学的条件を提案した。身長調整体格指標の妥当性とは、身長の異なる人々を同一身長群内のセンタイル (パーセンタイル) 位置で比較できることを意味する。ここでは、体重・身長分布における任意の体重センタイル曲線のスケーリング指数を推定する拡張アロメトリック分析を導入し、5~17歳の小児を含む日本の大規模データベースを分析することにより、単一スケーリング基準の重要性と子どもにおける多重スケーリングの存在を示した。

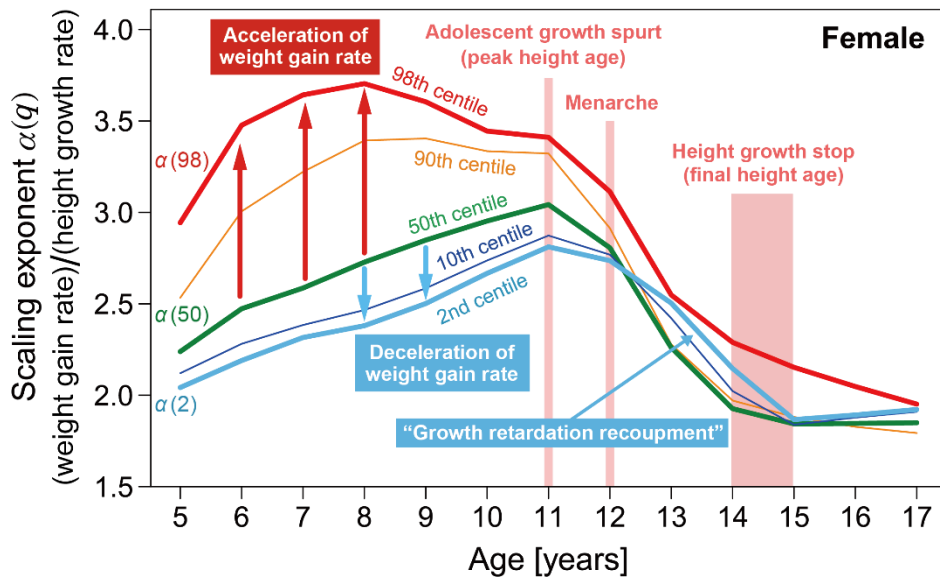


図 6：スケール指数  $\alpha(q)$  の年齢依存性。主な発育現象が起こる平均年齢との対応を描いた。スケール指数  $\alpha(q)$  の値は、体重増加率を身長増加率で調整したものと解釈できる。例えば、11 歳以下の女性では、肥満傾向の女性は、平均的体型の女性に比べて、成長にともなう体重増加が大きく、痩身傾向の女性は、増加が小さいことを、 $\alpha(q)$  は示唆している。

F. 健康危険情報

イックス研究会 (MBE)、(2023).

特記事項なし。

H. 知的財産権の出願・登録状況

G. 研究発表

1. 特許取得

1. 論文発表

特記事項なし。

- Ogata, Hitomi, et al. "Allometric multi-scaling of weight-for-height relation in children and adolescents: Revisiting the theoretical basis of body mass index of thinness and obesity assessment. PLoS One, 19 (7), e0307238, 2024.

2. 実用新案登録

特記事項なし。

3. その他

特記事項なし。

2. 学会発表

- 清野 健、アロメトリック多重スケールリングに基づく小児の体重・身長データ解析～小児における痩身・肥満評価の問題点～、ME とバイオサイバネテ

I. 引用文献

1. Cole, Tim J., et al. "Body mass index cut offs to define thinness in children and adolescents: international survey." Bmj 335.7612 (2007): 194.

2. Lister, Natalie B., et al. "Child and adolescent obesity." *Nature Reviews Disease Primers* 9.1 (2023): 24.
3. Ogata, Hitomi, et al. "Allometric multi-scaling of weight-for-height relation in children and adolescents: Revisiting the theoretical basis of body mass index of thinness and obesity assessment." *bioRxiv* (2024): 2024-03.
4. Nuttall, Frank Q. "Body mass index: obesity, BMI, and health: a critical review." *Nutrition today* 50.3 (2015): 117-128.
5. Keys, Ancel, et al. "Indices of relative weight and obesity." *Journal of chronic diseases* 25.6-7 (1972): 329-343.
6. World Health Organization. *Physical status: The use of and interpretation of anthropometry*, Report of a WHO Expert Committee. World Health Organization, 1995.
7. Schmidt-Nielsen, Knut. *Scaling: why is animal size so important?*. Cambridge university press, 1984.
8. Agrawal, D. C. "Metabolic rate  $M \propto 0.75$  in human beings." *Physics Education* 49.6 (2014): 685.
9. Silverman, B. W., and G. A. Young. "The bootstrap: to smooth or not to smooth?." *Biometrika* 74.3 (1987): 469-479.
10. Koenker, Roger, and Gilbert Bassett Jr. "Regression quantiles." *Econometrica: journal of the Econometric Society* (1978): 33-50.