



Title	動植物に見られるアロメトリック多重スケーリング性に関する研究
Author(s)	磯山, 陽介
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/98681">https://doi.org/10.18910/98681</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

動植物に見られるアロメトリック  
多重スケーリング性に関する研究

令和6年9月

磯山陽介



動植物に見られるアロメトリック  
多重スケーリング性に関する研究

博士（工学）論文提出先  
大阪大学大学院基礎工学研究科

令和6年9月  
磯山 陽介



# 概要

アロメトリー (allometry) は、生体特性が、その種や種間の大きさを示す値のべき乗に比例する「スケーリング性」と呼ばれる普遍法則の理解を目指す学問である。例えば、生物の体表面積は体重の 3 分の 2 乗、代謝量は体重の 4 分の 3 乗に比例することが知られている。従来のアロメトリーの枠組みでは、生体特性と生物の大きさの関係は、一つのスケーリング指数  $\alpha$  によって特徴づけられることができてはいたが、このことは、生物の大きさが異なる場合も、生体特性のばらつき（分布）が、生物の大きさの  $\alpha$  乗に比例したアフィン変換の下で共通の構造をもつことを意味する。ここでは、そのような特性をアロメトリック単一スケーリング性と呼ぶ。本研究では、そのようなスケーリング特性とは異なる新たな概念として、アロメトリック多重スケーリング性を導入し、実際の動植物の成長過程にそのような特性が見られることを示す。多重スケーリング性が存在する場合、生体特性の分布構造は、生物の大きさに依存して変化する。そして、スケーリング指数は、分布のパーセンタイル点（百分位点）に依存して変化する。

本学位論文は 5 章構成であり、以下に各章の内容を簡単に述べる。第 1 章は緒言である。第 2 章では、アロメトリーについて、その数学的基礎を説明するとともに、単一スケーリング性、および、多重スケーリング性の検証法を導入する。ここで導入する方法は、分位点回帰を応用した手法であり、2 次元分布の各分位点のスケーリング指数を推定することで、スケーリング指数の分位点依存性を評価する。第 3 章では、第 2 章で示す解析方法を、拡張アロメトリックスケーリング解析として新たに導入する。そして、子どもの身長に対する体重分布の多重スケーリング性を示す。これまで、体重を身長の 2 乗で割った体格指数 (BMI) が、すべての年齢において体格評価に用いられてきた。BMI の妥当性の根拠が単一スケーリング性にあることを指摘し、子どもでは、体重・身長関係に顕著な多重スケーリング性が見られることを示す。このことは、子どもの体格評価のための従来基準が妥当でない場合があることを意味する。第 4 章では、哺乳類の体重と脳質量、広範囲な樹木の幹径と高さ、実経営規模で栽培されたトマトの葉重と葉面積の関係性に、多重スケーリング性がみられることが示す。第 5 章は、結言として、多重スケーリング性を理解することの重要性について述べる。

子どもの痩せや肥満は、生涯にわたる健康リスクの上昇と関連する。そのため、子どもの痩せ・肥満を正しく評価することは非常に重要である。本研究の成果は、子どもの痩せ・肥満についての現在の評価法が、誤った判断を与える危険性を示

している。子どもの痩せ・肥満を適切に評価するためには、多重スケーリング性を考慮することが不可欠である。また、植物の成長過程の多重スケーリング性を理解することは、生態におけるバイオマスの推定や農作物の生産性の向上に役立つ可能性がある。

子どもの体格評価方法を検討するなかで創出したアロメトリック多重スケーリング性の概念は、スケーリング指数の根底にある、単一で普遍的な成長モデルというこれまでの概念に疑問を持ち、自然界における生物のダイナミクスを調査する際に、変数の分布を考慮する必要性を強調する。多様な生物学的背景にわたる一様なアロメトリック関係とは対照的に、多重スケーリング性の発見は、パーセンタイル上の異なる点にいる個々の生物は、それぞれ異なる成長過程を採用しての可能性がある。つまり、動植物に見られる成長過程の理解にとって重要な意味を持つ。本学位論文で提案した解析的アプローチは、今後のアロメトリーに関連する評価方法の基礎を提供することが出来る可能性がある。

# ABSTRACT

Allometry is the study of understanding the universal law called "scaling property," in which biological properties are proportional to the power of the organism size. For example, it is known that the body surface area of an organism is proportional to the  $2/3$  power of its body weight, and its metabolic rate is proportional to the  $3/4$  power of its body weight. In the conventional allometric framework, it has been implicitly assumed that the relationship between biological properties and organism size is characterized by a single scaling exponent  $\alpha$ . This implies that the variation (distribution) of biological properties has a common structure under an affine transformation proportional to the  $\alpha$ -power of size, even for different organism sizes. I call such a property allometric uni-scaling. In this thesis, I introduce the allometric multi-scaling property as a new concept different from such scaling property and show that such a property is observed in the actual growth process of plants and animals. In the presence of multi-scaling properties, the distribution structure of biological characteristics changes depending on the organism size, and the scaling index changes depending on the quantile of the distribution.

This thesis demonstrates the importance of objective and accurate assessment of children's body size, as thinness and obesity in children are detrimental to their subsequent growth and health. The thesis also points out the shortcomings of allometry, which is the original concept behind the currently standardized body mass index (BMI). In other words, the validity of BMI, which has been adopted in many situations as the standard for human body size assessment, is questionable. Therefore, the purpose of this thesis is to verify the validity of BMI as a standard for assessing thinness and obesity in children and to present a methodology for this purpose.

To derive the methodology, the mathematical basis of allometry is explained, and methods for verifying uni-scaling and multi-scaling properties are introduced. The technique introduced here is based on quantile regression. It evaluates the quantile dependence of the scaling

index by estimating the scaling index for each quantile of a two-dimensional distribution. This analysis method is newly introduced as an extended allometric scaling analysis. The results showed that children showed multi-scaling of the weight distribution concerning height, although uni-scaling was observed at ages similar to adults. The body mass index (BMI), which is weight divided by height squared, has been used to assess body size at all ages. I point out that the validity of BMI is based on single scaling, indicating that children show significant multiple scaling in weight for height relationship. This means that conventional criteria for assessing body size in children may not be valid.

I applied this method to allometric relationships found in other animals and plants. I show that multi-scaling is present in the relationships between body and brain size in mammals, trunk diameter and height in a wide range of trees, and leaf weight and leaf area in tomatoes grown on a commercial scale. Finally, I discuss the importance of understanding multi-scaling.

The concept of allometric multi-scaling, created in the course of studying methods for assessing children's body size, questions the conventional notion of a single, universal growth model underlying the scaling index and emphasizes the need to consider the distribution of variables when investigating the dynamics of organisms in nature. In contrast to uniform allometric relationships across diverse biological backgrounds, the finding of multi-scaling nature means that individual organisms at different points on the percentiles may adopt different growth processes. This has important implications for our understanding of growth processes in plants and animals. The analytical approach proposed in this thesis may provide the basis for future allometry-related assessment methods.

# 目次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	アロメトリック多重スケーリング性の可能性	7
2. 1	クライバーの法則を用いた BMI の導出	7
2. 2	BMI における身長調整体格指標の妥当性	8
2. 3	アロメトリック単一スケーリング性と多重スケーリング性	11
2. 4	第 2 章のまとめ	12
第 3 章	体格指数（BMI）の検証	17
3. 1	アロメトリック多重スケーリングを用いた子どもの体格評価	17
3. 1. 1	分析に用いたデータセット	17
3. 1. 2	拡張アロメトリックスケーリング解析	20
3. 1. 3	児童と成人にみられるスケーリング特性	20
3. 1. 4	拡張 BMI を用いた痩せと肥満の評価	27
3. 1. 5	児童、青年におけるアロメトリック多重スケーリングが示す意味	34
3. 2	体格評価のための国際基準と国内基準の問題点	37
3. 2. 1	現在用いられている低体重および過体重の評価基準	37
3. 2. 2	パーセンタイル曲線および体重パーセンタイル点の推定	38
3. 2. 3	低体重・過体重評価の身長・年齢依存性	38
3. 3	第 3 章のまとめ	46
第 4 章	動植物へのアロメトリック多重スケーリングの適応	47
4. 1	哺乳類の体重と脳質量	47
4. 1. 1	アロメトリック関係	47
4. 1. 2	分析に用いたデータセット	48

4.1.3 結果と考察	49
4.2 樹木の幹径と高さの関係	51
4.2.1 アロメトリック関係	51
4.2.2 分析に用いたデータセット	51
4.2.3 結果と考察	52
4.3 実経営規模で栽培されたトマトの葉重と葉面積	57
4.3.1 アロメトリック関係	57
4.3.2 分析に用いたデータセット	57
4.3.3 結果と考察	58
4.4 第4章のまとめ	65
第5章 結言	67
謝辞	68
参考文献	69
研究業績リスト	82

# 第1章 緒言

アロメトリーとは、生物の大きさとその生理学、形態学、進化生物学や生活史の側面などとの関係を研究する学問であり、各形質の計測値同士はべき関数関係  $y = Cx^\alpha$  を示す。ここで、比例係数  $C$  と指数  $\alpha$  はともに定数である。生物におけるある一つの形質  $x$  と今一つの形質  $y$  の相対的な大きさの比較を行う方法である。また、生物の大きさの違いに伴う形態や機能の変化をスケーリング(scaling)と呼ぶ[1, 2]。アロメトリーの一般的な用法では、2つの意味がある。1つは、生物の形態に対する大きさの影響に関する研究、もう1つは、生物全体またはその一部の成長に関連した研究を指す[2]。

本学位論文の内容は、前者後者の両方にまたがり、アロメトリー関係の妥当性評価や、より深い洞察を深める方法を提供する。その内容は、これまで2つの形質の分布に対し、主に1つである中央値曲線によって評価が行われてきたが、中央値曲線だけでなく、2つの形質の分布におけるパーセンタイル曲線の全領域にわたり評価する方法を提案するものである。パーセンタイル（百分位数、センタイルともいう。）は小さい数字から大きな数字に並べ変えた計測値のなかで、どこに位置するのかを測定する単位を表す。提案する新しい評価方法は、ヒトの子どもの体格を、どのように評価すれば同じ体格と言えるかを検討するなかで作り上げてきた方法になり、体格評価の重要性から説明する。

まず、本学位論文で示す子どもを表す言葉の定義として、小児は、新生児（出生から生後1カ月まで）、乳児（1か月から1歳まで）、幼児（1歳から4歳まで）、児童（5歳から10歳まで）、青年（11歳から17～19歳まで）の年齢によるグループ全体を含み[3]、11歳から13歳を青年前期、14歳から16歳を青年中期、17歳から19歳を青年後期とする。思春期は、著しい身長の伸びがあり、思春期が始まることで性ホルモンが上昇し、性差が出始める時期を示し、女性は10歳頃、男性は12歳頃から始まり特定の年齢を示さない[4]。また、18歳以上を成人として表し、18歳未満を子どもとして表す。

小児期や思春期の痩せは、発育の不良[5-7]、性的成熟の遅れ[5, 8]、栄養欠乏症[9, 10]、認知能力の低下[11, 12]など、子どもの成長過程のなかでさまざまな不利益な結果と相關している。また、骨粗鬆症[13, 14]、免疫力低下[15, 16]、貧血

[17, 18], 呼吸不全[19, 20], 創合併症[21, 22]の危険性も高まることが報告されている。女性では、不妊症[23, 24], 早産[25-28], 全死亡の危険性上昇[29-31]の原因となる。

一方、肥満は高血圧[32-34], コレステロール値の上昇[35, 36], 2型糖尿病[37-39], 喘息や睡眠時無呼吸症候群などの呼吸器疾患[40-42], 関節疾患の早期発症[43-45]と関連している。

このように、小児期や思春期の痩せや肥満は、その後の人生における様々な疾患の罹患率や死亡率を増大させる。このことから、効果的な予防と体格の管理には、痩せや肥満の状態を正確に評価することが最も重要であり、多くの学校や医療機関において、保健管理の中心となっている。

しかし、これらの機関で頻繁に行われている体格評価は、小児の成長と栄養状態を評価するために、体格指数（Body Mass Index : BMI, 以下 BMI という。）のような伝統的な基準を日常的に適用することである[46-52]。

BMI は、体重 (kg) を身長 (m) の 2 乗で割った値として算出され、小児を含むすべての年齢層にわたって、体の痩せや太りを評価するための指標として広く用いられてきた。BMI は、身長にほとんど依存しない体格評価指標として確立されており [53], 特に成人では、BMI と身長の相関はほとんどゼロであることが確認されている [54]。BMI は、過去 50 年にわたり、世界保健機関（World Health Organization : WHO, 以下 WHO という。）、保険会社、医療機関、栄養士、学校などの団体が、痩せ、低体重、過体重、肥満の状態を評価するための指標として採用してきている[46, 55-58]。

しかし、小児集団に対する BMI の適合性については、以前から異論がある。その異論は、人種や民族間の差異 [59-62], 性別 [61, 63-65], 年齢幅 [61, 66, 67] を考慮できていないことが挙げられる。さらに、BMI は筋肉量、骨密度、全体的な体組成などの要素を考慮していないため、体脂肪量の測定としては不完全であるという批判もある[68-70]。加えて、BMI の上昇と心血管系および死亡率の上昇との直接的な関連性については懷疑的である[71]。体脂肪率の実計測の事例では、低身長な子どもも、過体重に分類されても、肥満ではない場合があることが指摘されている[72]。つまり、子どもの痩せと肥満の評価は、過少や過大評価をしてはならず、正確に評価する必要がある。このように、ヒトの体格評価の指標として多くの場面で採用されている BMI はその妥当性に疑いがある。そこで、本学位論文の目的は、子どもへの痩せ肥満評価基準としての BMI の妥当性を検証することにあり、その方法論を提示することにある。

ここで、BMI の元となる痩せ肥満評価の基礎となる数理的枠組みがアロメトリ

ー(Allometry)である。BMIとアロメトリーの関係性である数理的導出は第2章で述べる。アロメトリーは、その出発点として、あらゆる生物の大きさに関し、幾何学的類似性が得られる点から議論が始まっている。類似性に関する最初の記録上の議論はガリレオである。ガリレオは、体積に対する表面積の比率が寸法に依存して変化することに基づいて、生理学的類似性が必要な場合には常に、大きさの異なる関連生物間で形状が変化するに違いないと主張した[73]。

大きさが異なり、同じ幾何学的形状と有する物体の表面積  $S$  は、体積  $V$  の  $2/3$  乗、つまり  $S \propto V^{2/3}$  となる。 $V$  に関連付けられた生物のプロセスは  $S$  に比例すると想定されているため、プロセスの速度も  $V^{2/3}$  に合わせて形態や機能が変化する必要がある。このことは、代謝率が生物の質量の  $2/3$  乗に比例するという予測につながるが、この仮説は脆弱であり、現実のデータを並べた時に適合する事例は少ない。体積、質量の関係に関するガリレオの仮定は、数学的には正しいが、通常大きさが異なる生物は、同じ形状や幾何学構造に従わないことから、体が成長し発達する生物には当てはまらない[2]。

これまでのように、アロメトリーの分野における基礎代謝率は、動物の表面積と体重に比例すると考えられてきた経緯を踏まえ、Kleiver は体の大きさが異なるネズミからウシまでの様々な動物の種を比較した時に、動物の個体呼吸速度が個体重の  $3/4$  乗に比例するという「クライバーの法則(Kleiver's law):図 1.1」を発見した[74]。

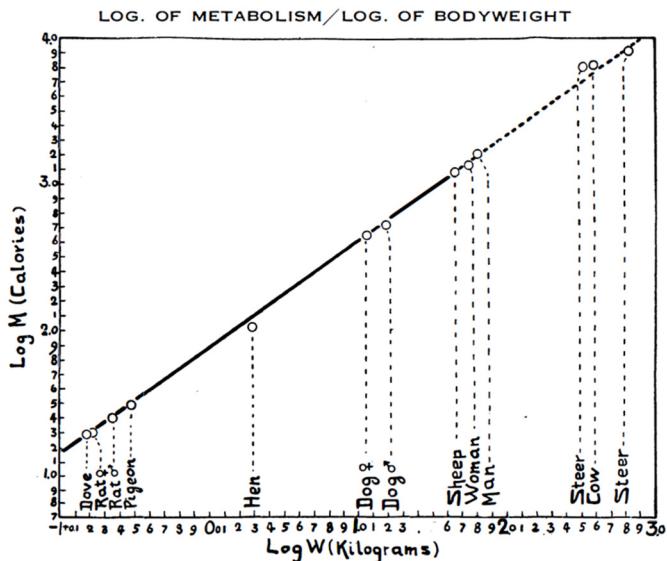


図 1.1 哺乳類における個体重と個体呼吸速度の関係。

対数スケールにおける体重と呼吸速度は一定の比例関係にある。

Kleiver(1932)の論文より引用[74]。

この関係は、単細胞生物から恒温動物までの範囲（10 の 27 乗）まで拡張されている[75]。植物の分野でも、十分に大きな個体では個体呼吸と個体重の  $3/4$  乗の比例関係が成り立つとされ[76-78]、これは有効表面積がフラクタルであり、器官のネットワーク構造が体積充填型であることから、 $A$ （有効表面積） $\propto L^3$ （高さや樹冠） $\propto V^{2/3}$ （体積） $\propto M^{3/4}$ （体重）となるとされている[76, 79]。

アロメトリーの関係は、特定の種や環境に依存しない普遍性がある前提の議論であり、さらに2つの形質間の等尺性関係を適切に表現するのは1つのべき乗則であるという前提である。しかし、この前提から様々な領域で乖離していると報告されるデータも多い。

例えば、単細胞生物、動物、植物の間で代謝率のスケーリング指数にはらつきがあることが報告されている[80, 81]。また、ヒトの臓器は体格に対応してスケーリングの違いを示している[82, 83]。さらに、体格と代謝率の間の等尺的な関係は、外温動物と内温動物の間や、安静時、野外活動時、運動時などの代謝状態の間でも変動が見られる[84]。樹木における樹の直径と樹高の関係も、干ばつによる影響[85]、成長段階[86]の要因に影響されると報告されている。

ここまでをまとめると、スケーリング則の普遍性が示されない例があるという事は、比例関係ある2つの計測値の中で同じべき乗関係が見られない可能性がある。つまり、普遍的なスケーリング則があるのであれば、ある形質をもう一つの形質のべき乗則で割った値（標準化指標）は無相関であるべきである。ただし、この無相関性は、様々な場合が考えられうる。具体的に、図1.2に示すBMIを例にした模式的なデータセットを考えてみる。

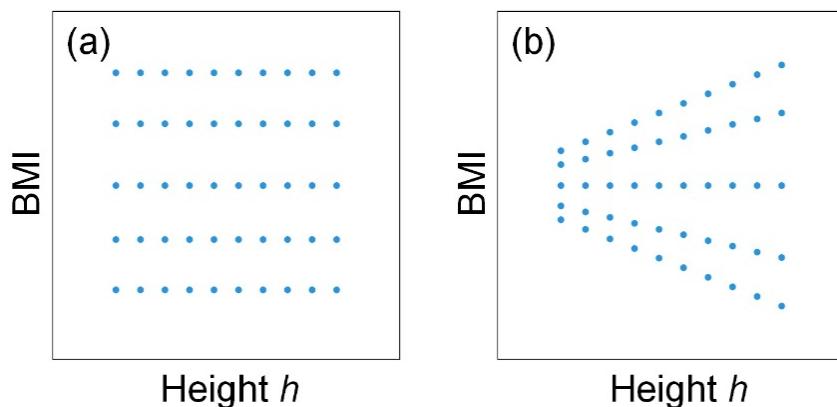


図 1.2 無相関基準の限界。BMI と身長の関係を模式的に示している。

(a) も (b) も BMI と身長の間に相関はないが、(b)の場合、身長が低い場合に、小さい BMI と大きい BMI の値を有する者が存在しない状態になる。

図 1.2(a) と (b) に示す標準化指標である BMI と身長の相関係数を計算すると、両者の相関係数はゼロに等しくなる。しかし、図 1.2(b) の例では、身長が低い場合は、BMI が集約し、小さい BMI と大きい BMI の値を有する者が存在しない状態になる。また、身長が高くなるにつれて BMI は小さい値から大きい値まで分布が拡散している。つまり、BMI の分布が身長に依存している。したがって、同じ無相関でも、身長の高低により、定まったべき指数でない場合が考えられる。このように、図 1.2(a) のどの身長でも同じべき指数が想定されているアロメトリーの関係に疑いを向け、無相関性と想定されるべき乗関係を、丁寧に分析し評価する方法に取り組む必要性がある。

本学位論文では、これまでの 2 つの形質の分布に対し、主に中央値曲線によつて行ってきたアロメトリーの評価から、2 つの形質の分布におけるパーセンタイル曲線の全領域にわたりスケーリング指数を評価することで、例えば、BMI と身長の関係における無相関性を評価する方法を提案するものである。これは、自然界における形態と機能の複雑な相互作用について新たな視点を提供することを意味する。

強調するが、アロメトリーの関係は、これまで暗黙のうちに、2 つの形質の分布は特定のべき指数であることが仮定され、この関係を本学位論文では「単一スケーリング性」と呼ぶ。一方、一様なスケーリング指数である「アロメトリック 単一スケーリング性」から、パーセンタイル曲線でスケーリング指数が変化する場合、「アロメトリック多重スケーリング性」と呼ぶ。この「アロメトリック多重スケーリング性」は、新たに導入する概念である[87]。

本学位論文は、5 章構成であり、第 2 章以降の概要は次のとおりである。第 2 章では、「アロメトリック単一スケーリング性」と「アロメトリック多重スケーリング性」について概説する。第 3 章では、アロメトリー関係の代表例として、子どもにおける BMI の妥当性の検証を、身長依存性の有無に基づいて行うとともに、痩せ・肥満の国際基準・国内基準との比較検証を行う。第 4 章では、導出した概念である「アロメトリック多重スケーリング性」を、様々なデータに適用し、生物の形質間のべき乗則に多重性があることを示す。第 5 章では、全体のまとめを行い、本研究の成果を総括し、今後の展望を示す。



# 第2章 アロメトリック多重スケーリング性の可能性

第2章では、アロメトリーの評価として主に行われてきた、2つの形質の分布に対し、主に中央値曲線によるスケーリング指数の評価を行う「アロメトリック単一スケーリング性」について説明する。そして、新たに提案する2つの形質の分布におけるパーセンタイル曲線の全領域にわたりスケーリング指数を評価し、パーセンタイルによって、スケーリング指数が異なる「アロメトリック多重スケーリング性」を説明する。説明に当たっては、BMIを用いて、体格を適切に評価するための方法について議論する。本研究の方法と内容の理解のためには、「クライバーの法則からBMIの導出」、「BMIにおける身長調整体格指標の妥当性」、「アロメトリック単一スケーリング性」、および、「アロメトリック多重スケーリング性」の意味を明確にする必要がある。そこで、これらの概念について説明し、研究の目的を述べる。

## 2.1 クライバーの法則を用いたBMIの導出

数理生物・生理学の視点で、体重身長分布におけるアロメトリックスケーリング性がBMI型の式  $w/h^\alpha$  となる根拠を示す。BMIの定義式は、身長( $h$ )に対する体重( $w$ )が、アロメトリックスケーリング則  $w = Ch^\alpha$  により与えられ、 $\alpha = 2$ であることを根拠としている。 $\alpha$ と $C$ はそれぞれ統計的に推定されたスケーリング指数と比例係数である。身長に対する体重のスケーリング  $w \propto h^2$  は、安静時エネルギー消費量(代謝率)が体重の3/4乗に比例するというクライバーの法則と関連づけることができる[88]。

クライバーの法則に加え、大きさの異なる種が同じ体温を維持する場合、その熱産生は体重ではなく、表面積に関係するはずだという「体表面積の法則」も知られている[89]。この法則に基づき、ヒトのエネルギー消費は体表面積 $S$ に比例すると仮定すると、クライバーの法則と体表面積の法則の組み合わせは、次のことを意味する。

$$S \propto w^{3/4} \tag{2.1}$$

さらに、人体の形状を円柱状の形で近似すると仮定すると、表面積  $S$  は  $w$  と  $h$  の関数で次のように与えられる[88, 90].

$$S \propto w^{1/2} h^{1/2} \quad (2.2)$$

式(2.1)と式(2.2)を用いると、次のようになる.

$$w^{3/4} \propto w^{1/2} h^{1/2} \quad (2.3)$$

$$w \propto h^2 \quad (2.4)$$

そして、体重を身長の2乗で割った値が BMI となる.

$$BMI = w/h^2 \quad (2.5)$$

このように、クライバーの法則、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、ヒトの体重は身長の2乗に比例することが数理的に導出できる。なお、この導出は、BMI 公式（図 2.1 (a)）の基礎を提供するだけであり、図 2.1 (b) および図 2.1 (c) に示すように、BMI に関する他の問題の根拠を提供する意味は含まれていない。

## 2.2 BMI における身長調整体格指標の妥当性

BMI に関する問題を論じる場合、図 2.1 のように分類することができる。  
(a) BMI 式の根拠、(b) 身長差のある集団における痩せ・太りの客観的尺度としての BMI の妥当性、(c) 栄養状態スクリーニングのための範囲を区切る値となる BMI カットオフ値の妥当性が挙げられる。

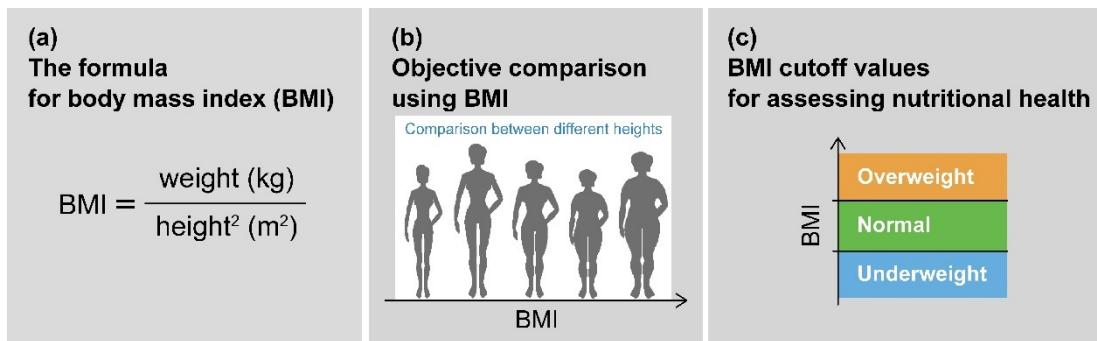


図 2.1 BMI の妥当性に関する問題の分類.

- (a) BMI 計算式の基礎：この式はどのようにして導き出されるのか？
- (b) 身長差がある集団における客観的な身長調整指標としての BMI の妥当性：  
BMI は身長に依存しない指標か？
- (c) BMI カットオフ値の妥当性：痩せ、肥満を区切る値をどのように決めるのか？

BMI の計算式の導出は前節で述べた。BMI の根拠は、身長に依存することなく、痩せと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。

一方、BMI のカットオフ値の妥当性は、体脂肪率などの体組成測定に基づく生理学的根拠によって基づいて定められた値か、疾病の有病率などの臨床判断値として疫学的根拠に基づいて定められた値か、あるいは、健常人（もしくは、一般人口）を対象とした集団統計的根拠による出現確率に基づき定められた値かで、カットオフ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 のカットオフ値は、集団統計的根拠による出現確率により定められている。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 のパーセンタイル点の値が BMI のカットオフ値として採用されている。具体的には、痩せ評価は、10%点、3%点、2%点などであり、肥満評価は 90%点、97%点、98%点などが用いられてきた（正規分布を示す母集団の平均値からのずれを示す値である  $z$  スコアを用いる場合もある。）[46]。つまり、この立場では、痩せと判定する閾値以下の BMI を計測した場合、「出現確率が低い痩身体型である」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。

ここでパーセンタイル点をより詳しく解説すると、観察されたデータを昇順に並べたリストにおけるパーセンテージの位置を表す値のことである。例えば、101人の体重データがあり、体重の軽い者から並べ替えた場合、最小体重は第 0 パーセンタイル点の値で、最大体重は第 100 パーセンタイル点の値である。小さい方から 3 位、11 位、51 位、91 位、99 位の体重は、それぞれ第 2 パーセンタイル点、第 10 パーセンタイル点、第 50 パーセンタイル点、第 90 パーセンタイル点、第 98 パーセンタイル点である。

今まで、集団統計的根拠のアプローチは主に BMI を支持する基盤を提供してきたが、体格を評価するための BMI の妥当性に関し、以下のように多くの疑問が投げかけられている。BMI は、人種・民族、性別、年齢層による違いを考慮していないこと。体脂肪量の不正確な測定値であり、筋肉量、骨密度、全体的な体組成を考慮していないこと。BMI の増加は、必ずしも心血管系の有病率や死亡率の増加と関連していないこと[49, 72]が挙げられている。このような、生理学的、疫学的な視点だけでなく、計算式の根拠に対する批判もある。

ここで、BMI が現在の体格評価の指標に使用されてきた経緯を説明する。BMI の計算式を裏付ける古典的根拠として、BMI と身長の無相関性と、体重と身長のアロメトリックスケーリング性の 2 つがある。1960 年代と 1970 年代には、BMI に

加えて, body build 指数 (体重÷身長 :  $\alpha = 1$ ) やローレル指数またはトリポンデラルマス指数 (体重÷身長の 3 乗 :  $\alpha = 3$ ) のような  $w/h^\alpha$  公式の研究がされてきた[91-95]. 1972 年には, Keys らによってスケーリング指数が再検証され[95], 身長との相関が最も無視できる指標として BMI の重要性が示された. 1993 年に WHO は, 今日広く利用されている BMI カットオフ値と栄養状態分類をまとめ, これは BMI と身長の相関が, 無視できるほど弱いという無相関の基準に基づいて検証してきた[96]. このことを示すように, 比較的大規模な標本 (数千例以上) を含む初期の研究では, いくつかの異なる人種／民族の成人グループにおいてスケーリング指数が 2 に近いことも実証されている[97, 98]. 従来のアロメトリックの枠組みに基づけば,  $w = Ch^\alpha$  が成り立つとき,  $w/h^\alpha$  は身長に対する体重の標準化指標を提供すると仮定できる.

しかし, Cole は, スケーリング指数  $\alpha$  が年齢とともに変化し, 幼児期には  $\alpha$  が 2 から青年期には 3 まで上昇し, 成人期には 2 に戻ることを示した[96, 99]. したがって, この知見は, 年齢に依存する  $\alpha$  を用いて BMI 式を修正する方がよいことを示唆しており[100], 成人と同じ BMI 型の計算式では, 子どもの痩せ・肥満は, 適切に評価できない可能性がある. 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. そこで, 第 2 章および第 3 章において, 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述べる. ここまで示すように, BMI は, その適用に限界があり, あらゆる目的に対して万能な指標とは限らないため, その根拠と妥当性を検証する科学的な方法を確立することが極めて重要となる.

そこで, まず, 身長の異なる集団を比較できる客観的な身長調整指標としての BMI の妥当性を検証する. すなわち, 図 2.2 に示されているように, 図 2.2 (a) の A 点と B 点は,  $w = Ch^2$  で記述される回帰曲線上で, 身長と体重の異なる 2 つの異なる個人であるが, 図 2.2 (b) では同じ BMI 値となっている. この場合, 回帰曲線は身長に対する体重の分布における中央値 (第 50 パーセンタイル点) の曲線に相する. BMI を用いた痩せ・肥満評価では, 図 2.2(b) の A 点と B 点と同様に, A' 点と B' 点, A" 点と B" 点は同じような体格であると仮定する. 図 2.2(c) に示すように, A と B, A' と B', A" と B" の各ペアは, 身長に対する体重の分布において, 同じパーセンタイル曲線を通過すると解釈するのが統計学的に正しくなる. つまり, 図 2.2(b) の BMI カットオフ値は, 図 2.2(c) の指定されたパーセンタイル曲線に対応するはずである. つまり, 同じ BMI の人は, それぞれの身長グループにおいて同じパーセンタイルにあるということになる. なお, この仮定が常に成り立つとは限らず, この仮定が満たされなかつた場合, 客観的な身長調整

## 2.3 アロメトリック単一スケーリング性と多重スケーリング性

指標としての BMI の妥当性は否定されることになる。本学位論文の主な目的は、これまで指摘・検討されてこなかったこの問題を研究することである。

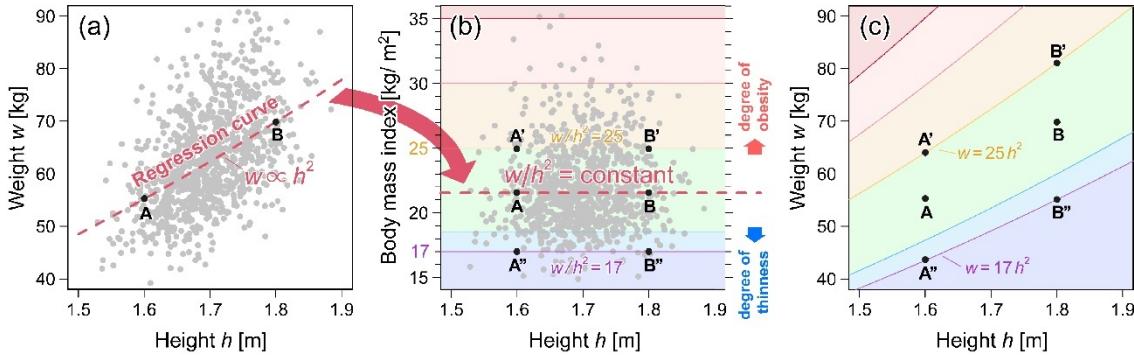


図 2.2 身長別体重分布と身長別 BMI 分布の関係。

- (a) 体重-身長分布の例。体重と身長の関係（体重の中央値曲線）は、経験的に  $w \propto h^2$  のべき乗則で近似できる。
- (b) (a)から変換した BMI 対身長分布。横の実線は、下から順に痩せ、痩せぎみ、過体重、肥満、肥満（1度）のカットオフ値を表している。
- (c) 身長に対する体重のカットオフ曲線は、(b)に示した BMI のカットオフ値に対応している。

## 2.3 アロメトリック単一スケーリング性と多重スケーリング性

本学位論文における集団統計的なアプローチは、体重-身長分布の任意のパーセンタイル曲線が、中央値だけでなく、同じスケーリング指数で等尺性スケーリングを示すかどうかに基づいて BMI の妥当性を検証する。すべてのパーセンタイル曲線が同じスケーリング指数を持つ場合、この種のアロメトリックスケーリングを「アロメトリック単一スケーリング性」と呼び、BMI の妥当性の根拠となる。対照的に、各パーセンタイル曲線が異なる指標でアロメトリックスケーリングを示す場合は、「アロメトリック多重スケーリング性」と呼ぶことにする。従来のアロメトリーでは、「アロメトリック単一スケーリング性」が暗黙の前提となっており、「アロメトリック多重スケーリング性」の存在は仮定されてこなかった。

分析の鍵となる考え方と、「アロメトリック多重スケーリング性」と名前を付けたアロメトリックスケーリングにおける新しい概念をより詳細に説明する。従来のアロメトリック分析は、2つの変数の関係が、单一のスケーリング指標  $\alpha$  によって完全に特徴づけられることを暗黙のうちに仮定している。BMI では、体重-身長分布における体重の任意のパーセンタイル曲線は、同じスケーリング指標  $\alpha$  を

持つべき乗関数,  $w(h) = Ch^\alpha$  で近似することができる。この特性を明示的に検証するために、図 2.3 の実線で示す  $q$  番目のパーセンタイル曲線に、分位点回帰法 (quantile regression) [101] を用いてべき乗関数を当てはめ、中央値曲線から拡張する(式は 3 章で説明する)。この分析では、スケーリング指数  $\alpha(q)$  は  $q$  によって変わるものがある。

図 2.4(a) に示されるように、推定指数  $\alpha(q)$  が  $q$  に依存しない場合、この性質はアロメトリック単一スケーリングとなる。この場合、BMI パーセンタイル曲線は、図 2.4(c) に水平な平行線で示されているように、身長とは無関係に一定となる。

一方、図 2.4 (b) に示すように、推定指数  $\alpha(q)$  が  $q$  に依存する場合はアロメトリック多重スケーリングとなる。この場合、BMI パーセンタイル曲線は図 2.4 (d) に示すように身長に依存する。BMI の身長依存性は、BMI が体の細さと太さの客観的かつ統一的な尺度として不適切であることを示している。図 2.4(c) に示すように、アロメトリック単一スケーリングの場合、同じ BMI を持つ 2 つの点 A と B は同じ 90 パーセンタイル曲線上にあり、BMI の統計的解釈が保証される。

対照的に、アロメトリック多重スケーリングの場合、図 2.4 (d) に示されるように、同じ BMI を持つ 2 つの点 A および B は、異なるパーセンタイル曲線上に位置し、少なくとも統計的に BMI を解釈することが困難であることを意味する。

図 2.5 に示すように、アロメトリック単一スケーリングの条件では、BMI の比較が、身長の異なる集団間の体重のパーセンタイル点の比較に対応するという、BMI の客観的な解釈を提供することができる。一方、アロメトリック多重スケーリングの条件では、 $\alpha(50)$  のスケーリング指数を用いた場合、中央値となる 50 パーセンタイル点では、BMI の客観的な解釈を提供できるが、それ以外のパーセンタイル点では、身長の異なる集団が重ならず、BMI は客観的な解釈を提供できない。

## 2.4 第2章のまとめ

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 (痩せ・肥満評価) を実現することである。現在、標準的に体格指標として使用されている体重 (kg) を身長 (m) の 2 乗で割った BMI は、成人だけでなく、小児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、痩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ことから、BMI の妥当性の根拠となる数学的条件を議論し、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

アロメトリック単一スケーリング性を導入した。アロメトリック単一スケーリング性は、身長に対する体重分布における任意の体重パーセンタイル曲線が、同じスケーリング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、体重パーセンタイル曲線の位置によってスケーリング指数が変化する場合を、アロメトリック多重スケーリング性と呼ぶこととした。本章では、このようなスケーリング特性を、分位点回帰を用いて評価する概念を創出した。

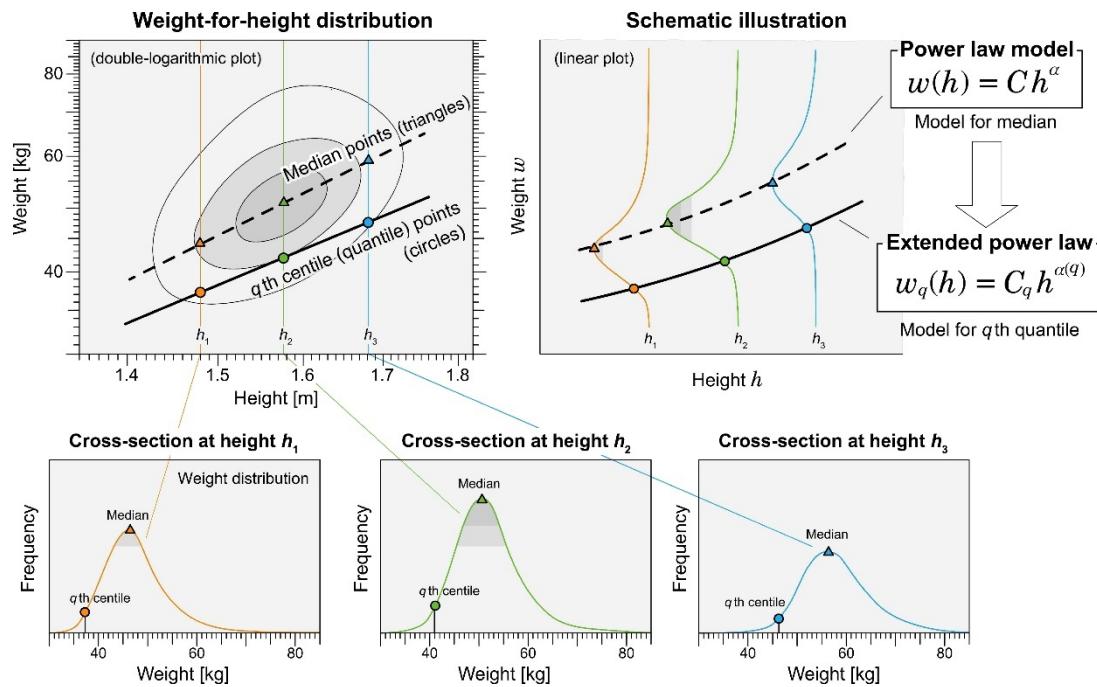


図 2.3  $q$  分位（百分位）回帰の模式図。

拡張アロメトリックスケーリング解析では、体重( $w$ )-身長( $h$ )分布の $q$ 番目のパーセンタイル（百分位）曲線は、べき乗関数  $w_q(h) = C_q = h^{\alpha(q)}$  によって対応する。

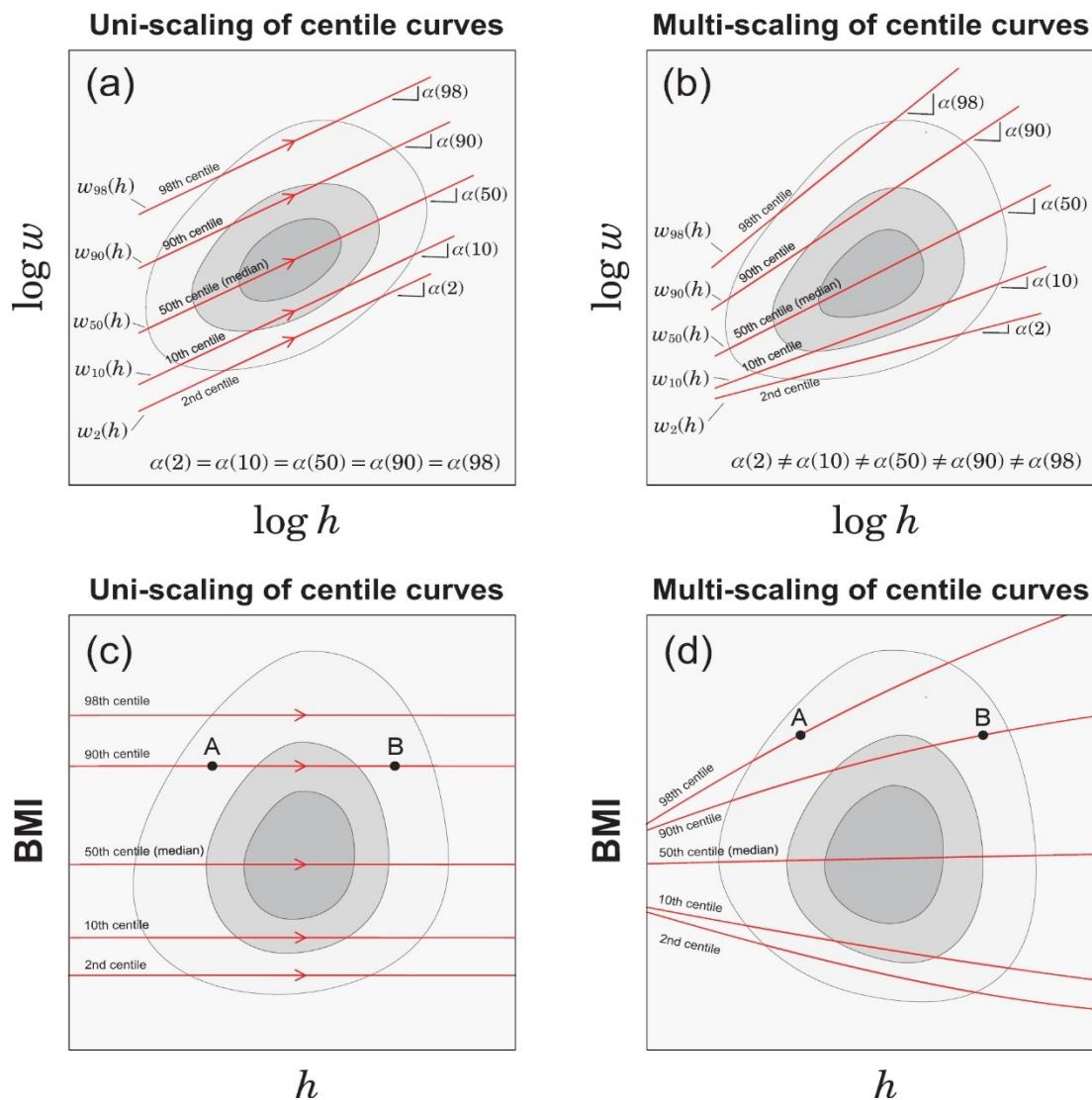


図 2.4 アロメトリック単一スケーリング性とアロメトリック多重スケーリング性の概要図。

- 体重-身長分布におけるアロメトリック単一スケーリング。両対数プロットでは、すべてのパーセンタイル曲線は平行な直線である。
- 体重-身長分布におけるアロメトリック多重スケーリング。両対数プロットでは、パーセンタイル曲線の傾きはパーセンタイル点によって異なる。
- BMI-身長分布における单一スケーリングのパーセンタイル曲線。单一スケーリングの場合、同じ BMI を持つ 2 点 A, B が同じ第 90 パーセンタイル曲線上にある。
- BMI-身長分布における多重スケーリングのパーセンタイル曲線。多重スケーリングの場合、同じ BMI を持つ 2 点 A, B は異なるパーセンタイル曲線上にある。

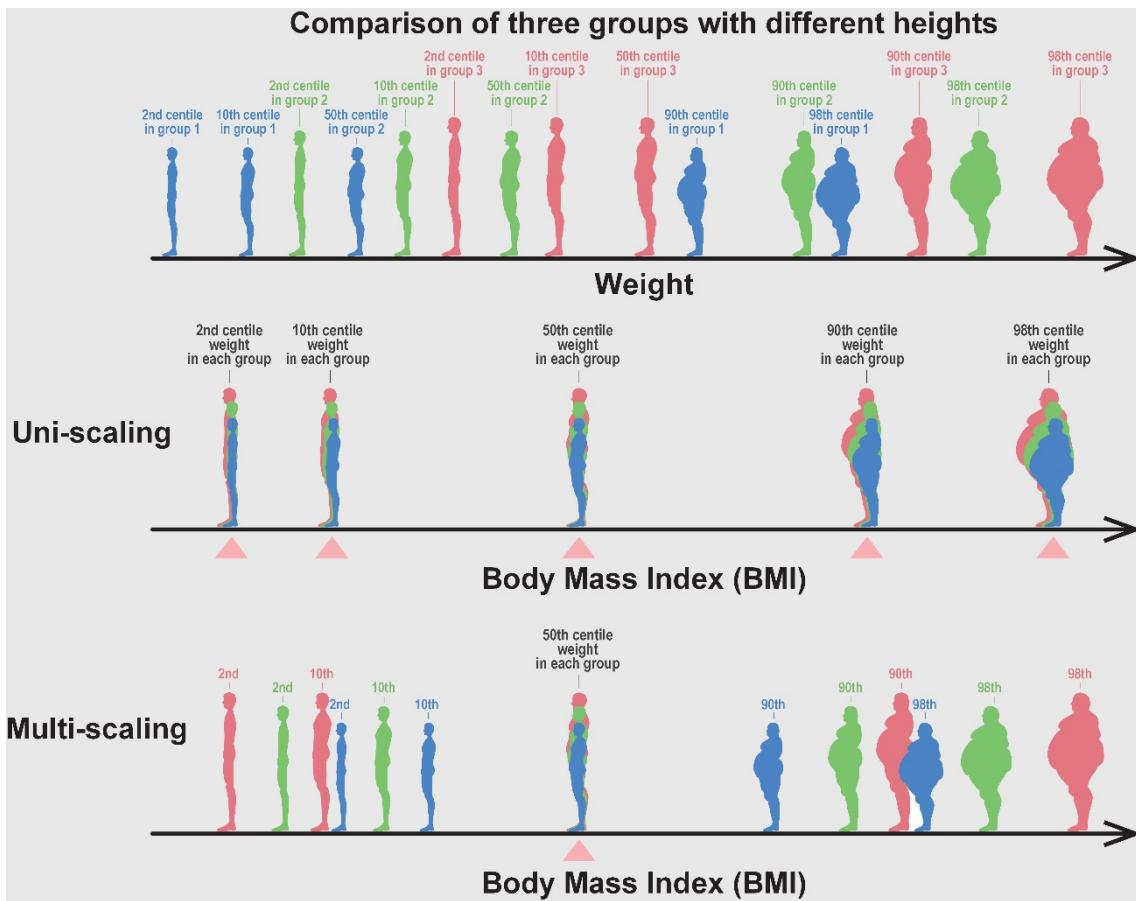


図 2.5 単一スケーリング基準の意味.

上段は、3つの異なる身長グループ（赤が高身長、緑が中身長、青が低身長）の第2, 10, 50, 90, 98パーセンタイル体重の体重分布の模式図。体重-身長分布の单一スケーリング条件が満たされている場合、BMIは、中央の段に描かれているように、各グループの体重パーセンタイル点を同じ位置（赤の三角形で示されている）に配置する。したがって、BMIの比較は、身長で調整された体重パーセンタイル点の比較に相当する。対照的に、多重スケーリング性の場合、BMIは、下段に描かれているように、体重第50パーセンタイル点（中央値）は同じ位置に配置するが、他の下位および上位のパーセンタイル点を比較することはできない。



# 第3章 体格指数（BMI）の検証

ここまで、BMI の根拠と、その元となるアロメトリーの関係、及び、アロメトリーの新たな概念である、アロメトリック多重スケーリング性について述べできた。また、BMI は、WHO や国際肥満タスクフォース（International Obesity Task Force : IOTF、以下 IOTF という。）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 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、子どもの痩せ・肥満を判定する枠組みを確立してきてきている[49, 103]。本研究の目的に立ち戻ると、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（痩せ・肥満評価）を実現することである。

第3章では、5から17歳の子ども 7,863,520 人を含む大規模データベースに対し、アロメトリック多重スケーリングの考え方を用いて分析を行う。そして、第1節では、従来の BMI の代わりに、アロメトリック多重スケーリングを用いた拡張 BMI による児童および青年の体格評価法について述べ、第2節では、体格評価のための国際基準と国内基準の問題点について指摘する。

## 3.1 アロメトリック多重スケーリングを用いた子どもの体格評価

### 3.1.1 分析に用いたデータセット

統計法に基づき文部科学省が実施している、学校における幼児、児童及び生徒の発育及び健康の状態を明らかにすることを目的とした学校保健統計調査データを用いた。このデータは、2008年から2019年の間に5から17歳の子ども 7,863,520 人の年齢、性別、身長、体重を含む大規模な全国データセットを分析対象とし、合計 8,083,466 サンプルから欠損値を含む 2.72% のサンプルを除外した、性・年齢別のサンプル数は表 3.1 にまとめられている。この全国標本調査では、学校における子どもの身体発育を明らかにし、小規模校から大規模校までを確実に含むため（言い換えれば、市町村の人口規模に伴う偏向を減らすため）、各都道府県の学校を在籍生徒数で層別化し、その後、各学校規模層内で調査対象校を無作為に

抽出するという層化無作為抽出法を採用している。調査対象の子どもたちは、年齢と性別による系統的なサンプリング方法で選ばれている。この調査は毎年4月から6月にかけて実施されている。しかし、COVID19が大流行した2020年以降は、調査期間を4月から6月に設定することができなくなり、通年で実施されるようになったため、2020年以降のデータは分析から除外している。厚生労働省の見解によると、本データの利用に倫理的問題は生じない。

表 3.1 欠損値のあるサンプルを除去した後の各年齢・性別のサンプル数。

Age (years)	Number of samples	
	Males	Females
5	358,375	355,134
6	260,536	260,090
7	261,178	260,666
8	261,374	260,903
9	261,852	261,426
10	261,898	261,643
11	262,405	261,994
12	427,950	428,705
13	428,295	429,324
14	429,119	429,896
15	239,003	241,696
16	238,935	241,314
17	238,851	240,958
Subtotal	3,929,771	3,933,749
Total	7,863,520	

データセットでは、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)を単位とする整数として記録されていることから、元のデータの整数値の離散分布を平滑化し、統計的信頼性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[103]。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のサンプルを得るために、データセットの行を置換ありでランダムに抽出する。その後、図3.1に示すように、抽出された行の身長と体重

の各組に、2変量ガウスカーネル密度からのランダムノイズを加える。平滑化の帯域幅は、2変量ガウスカーネルの帯域幅選択則[104]を用いて推定した。今回、このブートストラップ法を200回繰り返し、平滑化されたブートストラップ複製のそれについて統計的推定値を計算した。結果では、推定値として全複製にわたる中央値を示している。

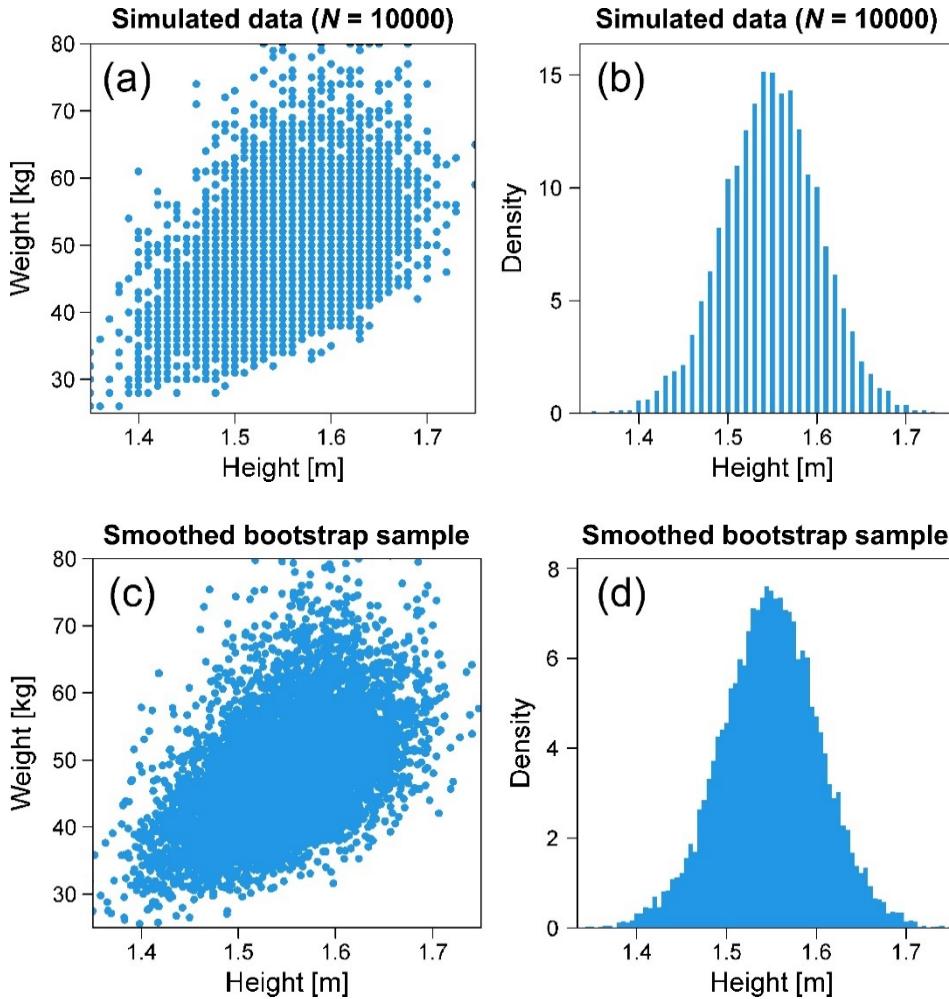


図 3.1 ノイズを加えて平滑化したブートストラップのサンプル図。

- (a) 身長と体重の整数データのサンプル・プロット。
- (b) 整数身長データのヒストグラム。
- (c) ノイズを加えた後の身長と体重のサンプル・プロット。
- (d) ノイズを加えた後の身長データのヒストグラム。

### 3.1.2 拡張アロメトリックスケーリング解析

体重-身長分布において、身長に依存した体重の  $q$  パーセンタイル曲線  $w_q(h)$  にべき関数を当てはめ、拡張アロメトリックスケーリングと定義した。

$$w_q(h) = C_q h^{\alpha(q)} \quad (3.1)$$

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、分位点回帰法を用いた。分位点回帰は、応答変数の条件付きパーセンタイル（百分位数）を推定できる[101]。アロメトリック・モデルを用いた分位点回帰では、重み付き絶対残差の合計を最小化する。

$$\begin{aligned} \Delta = & \sum_{i:w_i \geq f(h_i; \hat{C}, \hat{\alpha})} \tau |w_i - f(h_i; \hat{C}, \hat{\alpha})| \\ & + \sum_{i:w_i \geq f(h_i; \hat{C}, \hat{\alpha})} (1 - \tau) |w_i - f(h_i; \hat{C}, \hat{\alpha})|, \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 $w_i$  は体重、 $i$  は個別の個体、 $f(h_i; \hat{C}, \hat{\alpha}) = Ch^\alpha$  はアロメトリックモデル、 $\hat{C}$  及び  $\hat{\alpha}$  はモデルパラメータの推定値、 $q$  分位回帰が適用される場合、 $\tau$  は  $q/100$  に設定される。モデルパラメータの推定には、最小化問題に対して効果的で、計算量も少ないことが示されている simplex search algorithm [105] を用いた。

### 3.1.3 児童と成人にみられるスケーリング特性

図 3.2 に、17 歳男性 (a) と女性 (b), 8 歳男性 (c) と女性 (d) のアロメトリック解析の結果を示す。成人の体格に近い 17 歳男女の第 2, 10, 50, 90, 98 パーセンタイル点の回帰曲線は、スケーリング指数が 2 に近い 1.8 から 2.1 の範囲に入り、単一スケーリング性を示した(図 3.2 (a), (b))。対照的に、児童期の 8 歳男女の回帰曲線は、スケーリング指数が 2 より大きく、男性の  $\alpha(2)$  が 2.4,  $\alpha(50)$  が 2.7,  $\alpha(98)$  が 4.1、女性の  $\alpha(2)$  が 2.4,  $\alpha(50)$  が 2.7,  $\alpha(98)$  が 3.7 とパーセンタイル点が上昇するにつれて、スケーリング指数も増加し、明確な多重スケーリング性を示した(図 3.2 (c), (d))。

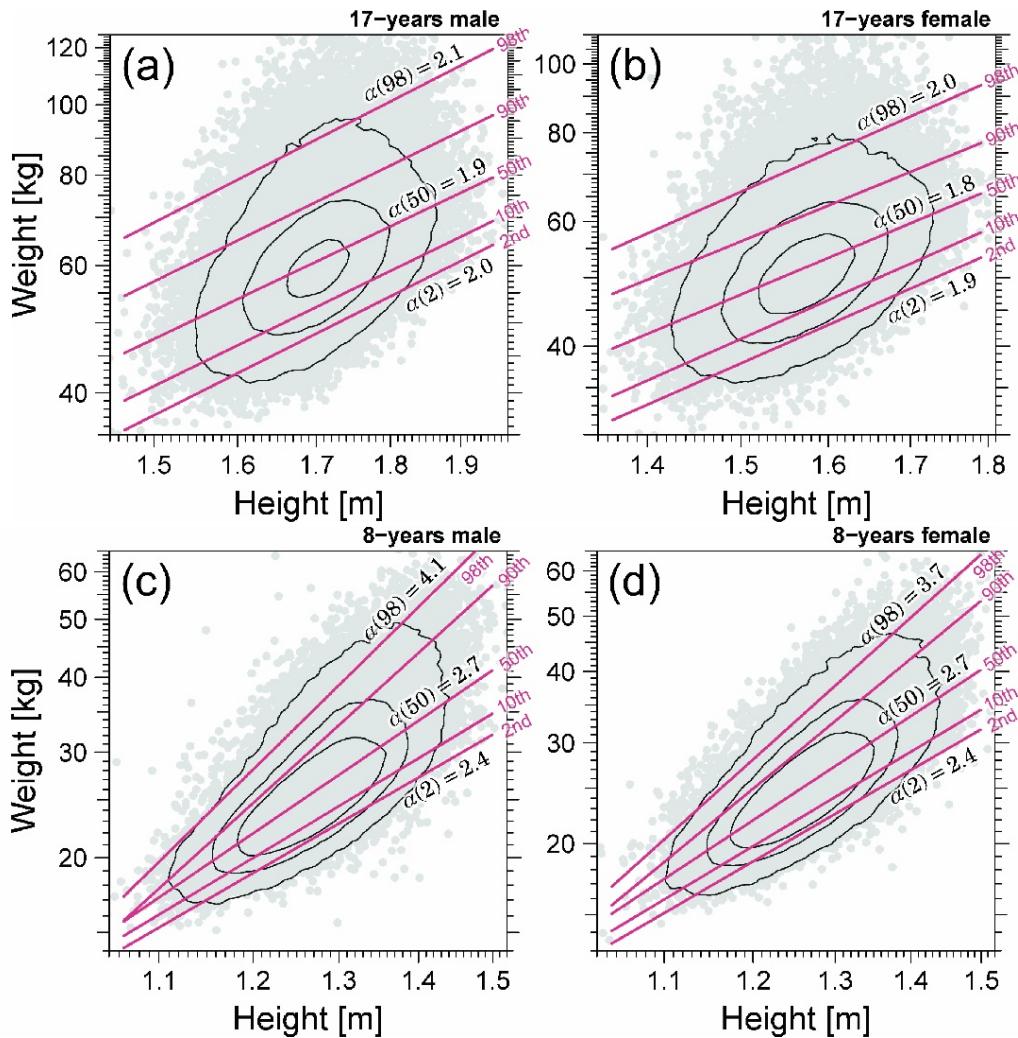


図 3.2 アロメトリック多重スケーリングを用いたスケーリングの拡張結果.

(a) 17 歳男性. (b) 17 歳女性. (c) 8 歳男性. (d) 8 歳女性.

実線は、第 2, 10, 50, 90, 98 パーセンタイル点に対する分位点回帰の結果を両対数スケールで示している。推定されたスケーリング指数（プロットの傾き）、 $\alpha(2)$ ,  $\alpha(50)$ ,  $\alpha(98)$  が各パネルに示している。

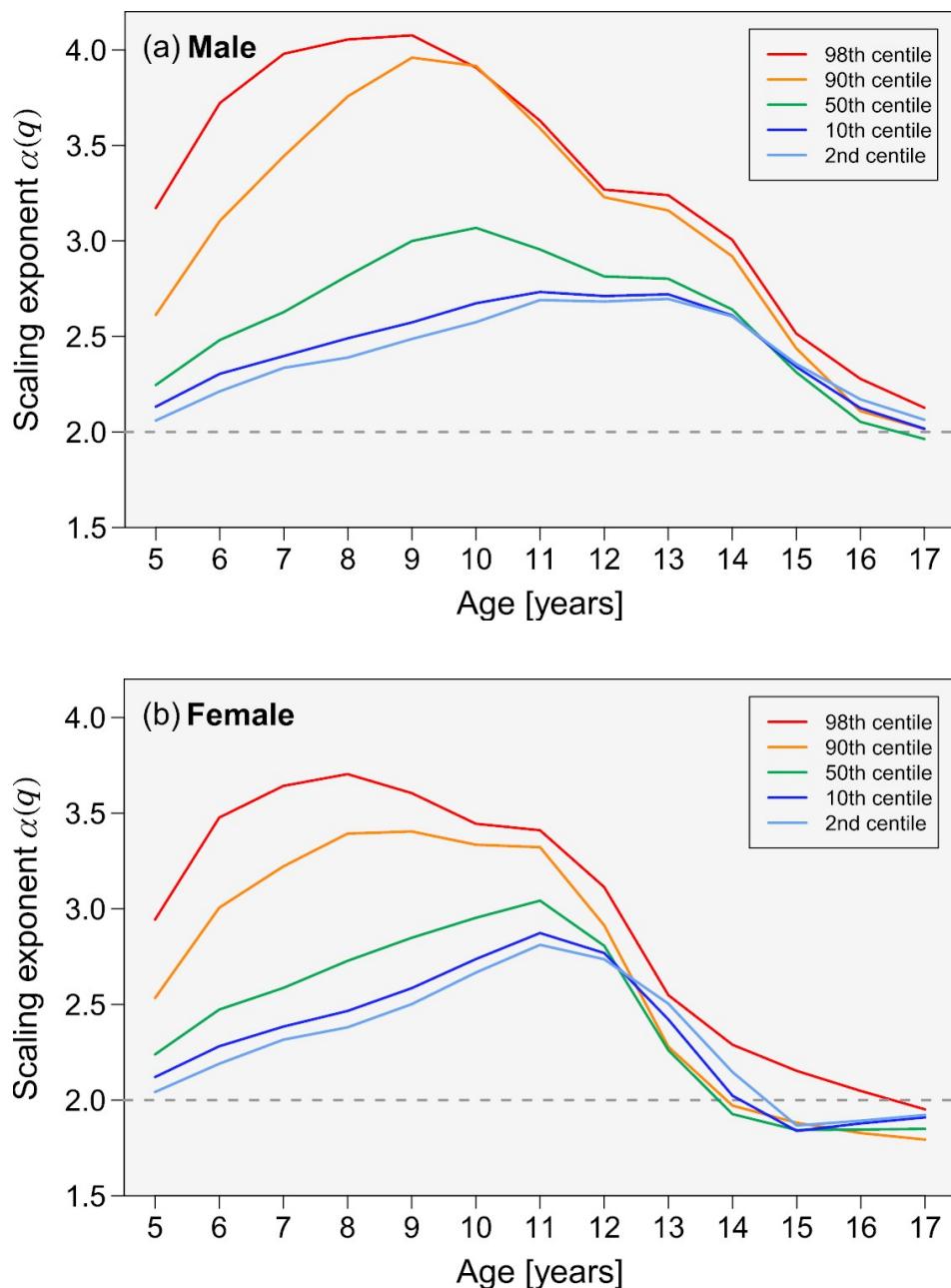


図 3.3. スケーリング指数  $\alpha(q)$  の年齢依存性. 体重-身長分布の第 2, 10, 50, 90, 98 パーセンタイル点の推定スケーリング指数が下から上にプロットされている.

(a) 男性. (b) 女性. 5 本の線が近い位置にあれば、単一スケーリングであることを示し、離れた位置にあれば多重スケーリング性であることが示される.

図 3.3 は、 $q = 2, 10, 50, 90, 98$  の場合のスケーリング指数  $\alpha(q)$  の年齢依存性を示す。図 3.3(a) と (b) に示すように、男女とも年齢が 17 歳に近づくにつれて、すべてのパーセンタイル点におけるスケーリング指数  $\alpha(q)$  は 2 に近い同じ値に収束し、単一スケーリング性を示していく。しかし、より若い年齢では異なるスケーリング指数  $\alpha(q)$  を持つ多重スケーリング性が観察された。図 3.3(a) と (b) の緑線で示しているように、従来のアロメトリックスケーリング指数に相当する  $\alpha(50)$  の年齢依存性は、Cole が報告したように、5 歳前後で  $\alpha(50) = 2$  と変化し、10 歳前後で 3 に上昇し、成人期には 2 に戻る傾向を示した。しかし、 $\alpha(2)$ （水色線）や  $\alpha(98)$ （赤色線）のような上位および下位のパーセンタイル点のスケーリング指数は、男性では 5 歳から 13 歳まで、女性では 5 歳から 11 歳まで、 $\alpha(50)$  の値とは大きく異なる値を示した。

この結果は、従来の BMI を小児に適用することについて、2 つの問題を提起している。1 つは BMI の計算式についてであり、もう 1 つは推定されたスケーリング指数  $\alpha(50)$  に基づいて BMI の計算式を修正した後でも、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痩せや肥満評価の客観的尺度として優れているかを説明し、成人の BMI が母集団統計の意味で有効であることを強調する。

成人に対する BMI の妥当性を説明するために、成人に近い例として 17 歳女性の体重と身長の関係（図 3.4(a)）BMI と身長の関係（図 3.4(b)）の構造を比較する。図 3.4(a) では、式 (3.1) を体重-身長データ（灰色）に仮定した第 2, 第 50, 第 98 パーセンタイルの回帰曲線が実線と破線で記述されている。図 3.4(a) には、分位点回帰曲線に加えて、身長の各層における体重分布の推定第 2, 50, 98 パーセンタイル点をそれぞれ丸、三角、四角でプロットしたが、これらは対応する分位点回帰曲線と大方一致していた。図 3.4(a) に示すように、身長に対する体重分布の第 2, 50, 98 パーセンタイルについては、すべての回帰曲線が平行に見え、これはアロメトリック単一スケーリング性を示している。標準化 BMI を  $\alpha(50)=1.85$  の  $w/h^{\alpha(50)}$  ( $\text{kg}/\text{m}^{\alpha(50)}$ ) と定義すると、身長に対する BMI 分布の第 2, 50, 98 パーセンタイル点は、身長に依存せずに一定になった。したがって、図 2.5（中段）に示すように、単一スケーリング性は、異なる身長間のパーセンタイル点の位置を客観的に比較することが保証される。

図 3.4 (b) では、身長と BMI の線形関係を仮定した分位点回帰線を、身長の各層における BMI 分布の推定パーセンタイル点とともに記述している。傾きがゼロに近い水平回帰直線は、BMI のパーセンタイル点が身長にほとんど依存しないことを示している。今回の例では、アロメトリック単一スケーリングはさらに、身

長に依存しない不変の BMI 分布の存在を意味する。図 3.4 (d) に示すように、異なる身長層における BMI の推定分布はほぼ同じ形状を持つが、図 3.4 (c) に示すように、異なる身長層における体重の推定分布は異なる形状を示す。このことは、任意に選択したパーセンタイルの位置が、身長層に依らず近い値を示していることから、BMI が痩せや肥満の評価のための優れた客観的パラメータであることの利点を明確に示すことになる。体格評価指標を開発するための全体的な目標は、各身長水準において同じ指標分布を持つことであった[106]。この意味で、体重を身長の 2 乗で割る BMI は成人の体格評価指標として十分な根拠があり、有効である。

一般的に、男性は 16~17 歳、女性は 14~15 歳までに成長が止まり、成人身長に達する。したがって、BMI は男性では青年後期、女性では青年中期においても有効であると期待できることから、集団統計学的な意味において、BMI は身長、年齢、性別に依存しない優れた身長調整体重の指標として、男性の青年後期以降、女性の青年中期以降において有効であると期待できる。

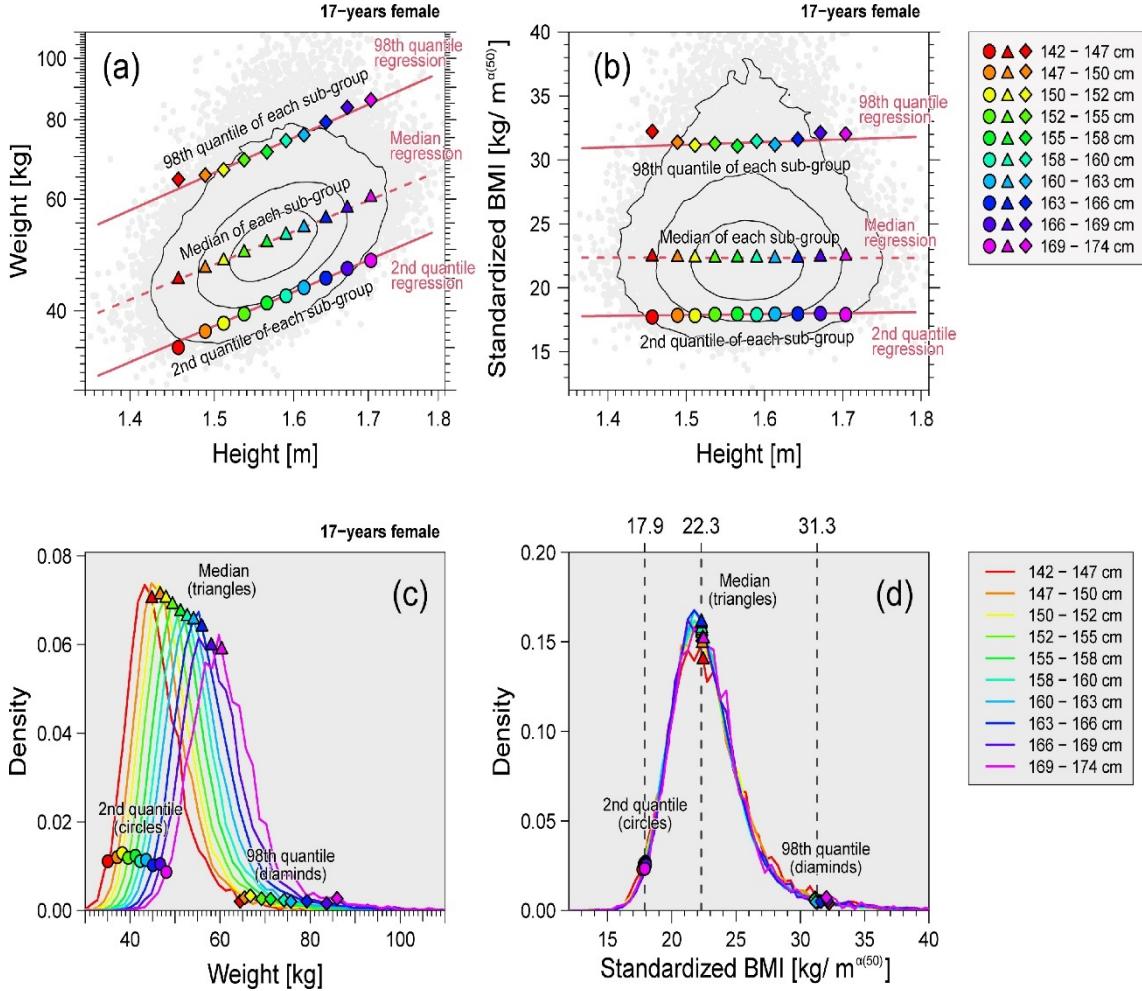


図 3.4 17 歳女性の体重と標準化 BMI. 単一スケーリングの例.

(a) 対数スケールの体重-身長分布 (灰色).

(b) 標準化 BMI ( $\alpha(50) = 1.85$ ) の線形スケール分布 (灰色).

(a) と (b) では、等高線は黒の実線で描かれ、第 2, 第 50, 第 98 パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各身長層における体重分布の第 2, 第 50, 第 98 パーセンタイル点はそれぞれ円、三角、四角でプロットしている。

(c) 各身長層の体重分布.

(d) 各身長層の標準化 BMI  $w/h^{1.85}$  分布.

(c) と (d) では、各身長層における分布の第 2, 50, 98 パーセンタイル点をそれぞれ円、三角、四角でプロットしている。

10 個の身長層は中央値  $\pm 3SD$  の範囲で定義されている。

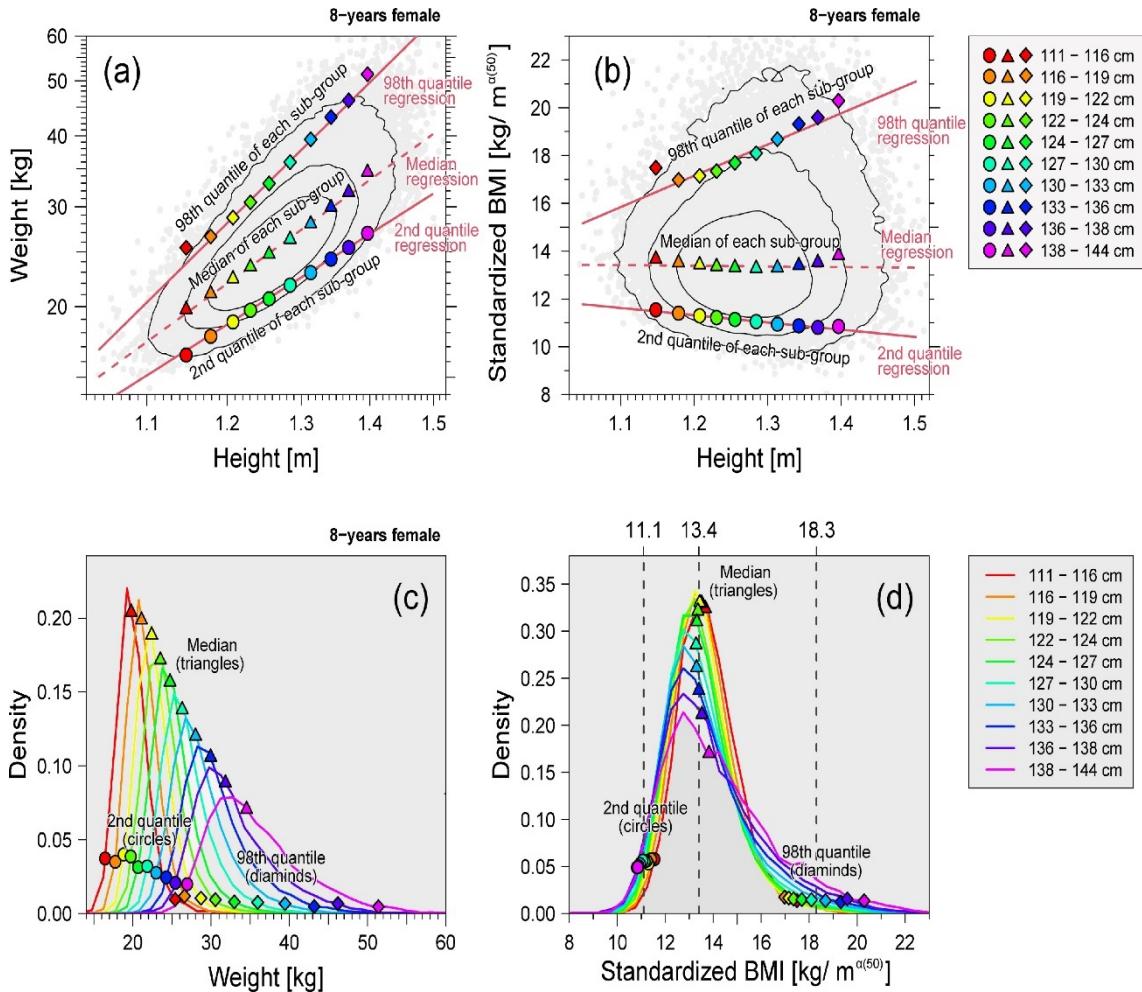


図 3.5 8 歳女性の体重と標準化 BMI. 多重スケーリングの例.

(a) 対数スケールの体重-身長分布 (灰色).

(b) 標準化 BMI ( $\alpha(50) = 2.73$ ) の線形スケール分布 (灰色).

(a) と (b) では、等高線は黒の実線で描かれ、第 2, 第 50, 第 98 パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各身長層における体重分布の第 2, 第 50, 第 98 パーセンタイル点はそれぞれ円、三角、四角でプロットしている。

(c) 各身長層の体重分布.

(d) 各身長層の標準化 BMI  $w/h^{1.85}$  分布.

(c) と (d) では、各身長層における分布の第 2, 50, 98 パーセンタイル点をそれぞれ円、三角、四角でプロットしている。

10 個の身長層は中央値±3SD の範囲で定義されている。

次に、児童にみられた多重スケーリング性について述べる。従来の BMI は、図 3.3 に示すように、17 歳以下の男女のスケーリング指数  $\alpha(q)$  が系統的に 2 から乖離し、さらに多重スケーリング性を示すため、客観的な体格評価指標としては必ずしも適切ではない。ここでは、体重-身長分布に見られる多重スケーリング性が、BMI 型の式を用いた客観的比較にどのように影響するかを述べる。図 3.5 は、8 歳女性のデータを用いて図 3.4 と同様の分析結果を示す。図 3.5(a) に示すように、平行でない回帰曲は、体重-身長分布の多重スケーリング性を示している。この例では、中央回帰直線の推定傾き  $\alpha(50) = 2.73$  であったことから、標準化 BMI として  $w/h^{2.73}$  を使用するように BMI の定義を修正した標準化 BMI-身長分布が、図 3.5(b) である。図 3.4(b) と異なり、第 2 パーセンタイル曲線と第 98 パーセンタイル曲線が水平でなくなっている。実際、図 3.5(d) に示すように、図 3.4(d) と比較すると、第 2 パーセンタイル点と第 98 パーセンタイル点の位置が大きくばらついており、強い身長依存性を示している。この結果は、BMI のような  $w/h^\alpha$  の統一式は、子どもの痩せと肥満の両方の評価に使えないことを示している。つまり、児童における痩せと肥満の評価には、それぞれ異なる手順が必要となることが明らかになった。

### 3.1.4 拡張 BMI を用いた痩せと肥満の評価

前節で明らかになった、従来の BMI アプローチの欠点である多重スケーリング性がみられる体重-身長分布を示した児童と青年前期・中期における痩せと肥満を評価するための方法を検討する。この目的のために、各性および年齢における体重-身長分布の下位および上位パーセンタイルに対する拡張等尺スケーリングに基づく拡張 BMI を提案する。この拡張 BMI は、痩せや肥満の評価において、身長を調整した指標を提供することができる方法となる。

拡張 BMI は以下の式で定義する。

$$\text{BMI}_{\text{ext}}(q) = \frac{w}{h^{\alpha(q)}} \quad (3.3)$$

ここで、 $w$  はキログラム (kg) 単位の体重を表し、 $h$  はメートル (m) 単位の身長を表す。 $\alpha$  はデータセットに対する  $q$  分位回帰によって得られる式 (3.1) のスケーリング指数である。痩せの評価に拡張 BMI を使用する場合、カットオフ値は式 (3.1) のモデルパラメータ  $C_q$  によって提供される。痩せや肥満の評価における指標のカットオフ値を決定することは重要な問題である。集団統計的手法では、カットオフ値は一般集団における体重身長分布のパーセンタイル点に基づいて決

定されてきた。この点を確認するために、今回使用したデータセットにおける BMI のパーセンタイル点を、IOFT によって確立された国際的なカットオフ値と比較する[46, 94]。図 3.6 は、我々のデータから推定された BMI パーセンタイル点（実線）と IOFT のカットオフ値（破線）の年齢依存性を示している。その結果、過体重のカットオフ値は 85 から 90 パーセンタイルに、肥満のカットオフ値は 97 から 98 パーセンタイルに位置していることがわかる。また、痩せ度の評価では、痩せ度 1 のカットオフ値は第 10 パーセンタイル前後、痩せ度 2 のカットオフ値は第 1 から 2 パーセンタイルに位置している。このようなパーセンタイルの位置とカットオフ値の関係や年齢依存性は、本データでも他国とのデータでもほぼ同じであった。この方法は、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ことを示している。

しかし、この方法では、BMI と年齢の関係であり、身長依存性の対応が考慮されておらず、どの年齢でも身長に依存しない体格評価法が必要である。そこで、従来の BMI の代わりに拡張 BMI を用いた痩せ・肥満の評価法を提案する。この方法は、例えば、一般集団の第 2 パーセンタイル点を痩せのカットオフ値と仮定した場合、身長調整指標として拡張 BMI  $BMI_{ext}(2)$  を用いるという手法である。このアプローチは、図 3.7 の中段に描かれているように、異なる身長グループ間で、各体重グループの第 2 パーセンタイル点に位置する体重を拡張 BMI として一致することを意味する。この場合、太っている人の  $BMI_{ext}(2)$  は、身長によって大きくばらつくため、 $BMI_{ext}(2)$  を太りやすさの評価に用いることはできない。一方、図 3.7 の下段に描かれているように、 $BMI_{ext}(98)$  を採用することで、異なる身長グループの中で、各体重グループの第 98 パーセンタイル点に位置する体重を拡張 BMI として一致させることができ、太りやすさの評価が可能になる。

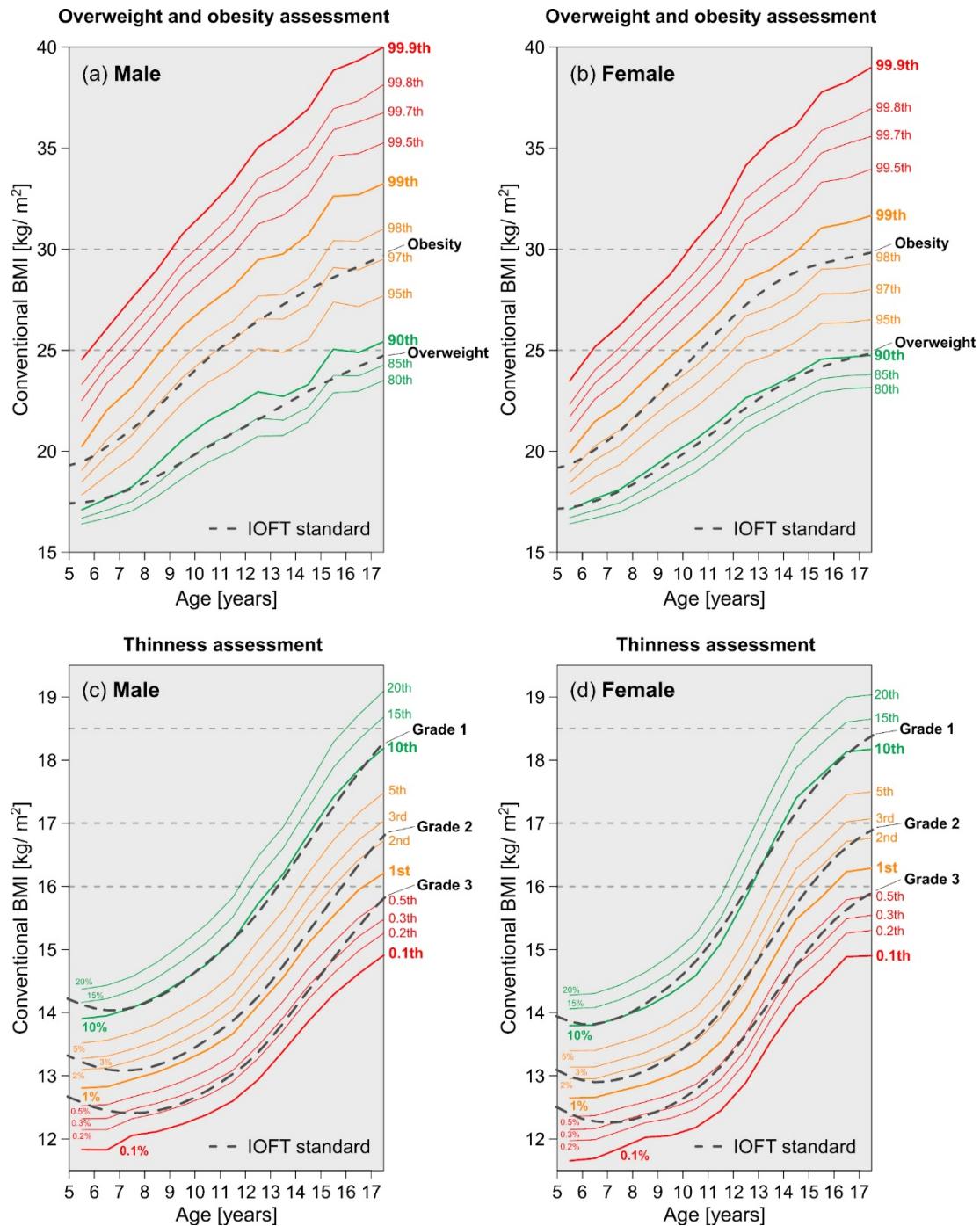


図 3.6 BMI パーセンタイル値と国際的なカットオフ値の比較.

国際肥満タスクフォース (IOFT) [46, 102]によって設定された国際的なカットオフ値と、使用データセットの上位および下位のパーセンタイル点を示している。肥満評価の男性(a)と女性(b)では 80~99.9 %、痩せ評価の男性(c)と女性(d)では 0.1~20 % の幅で年齢依存性が見られる。

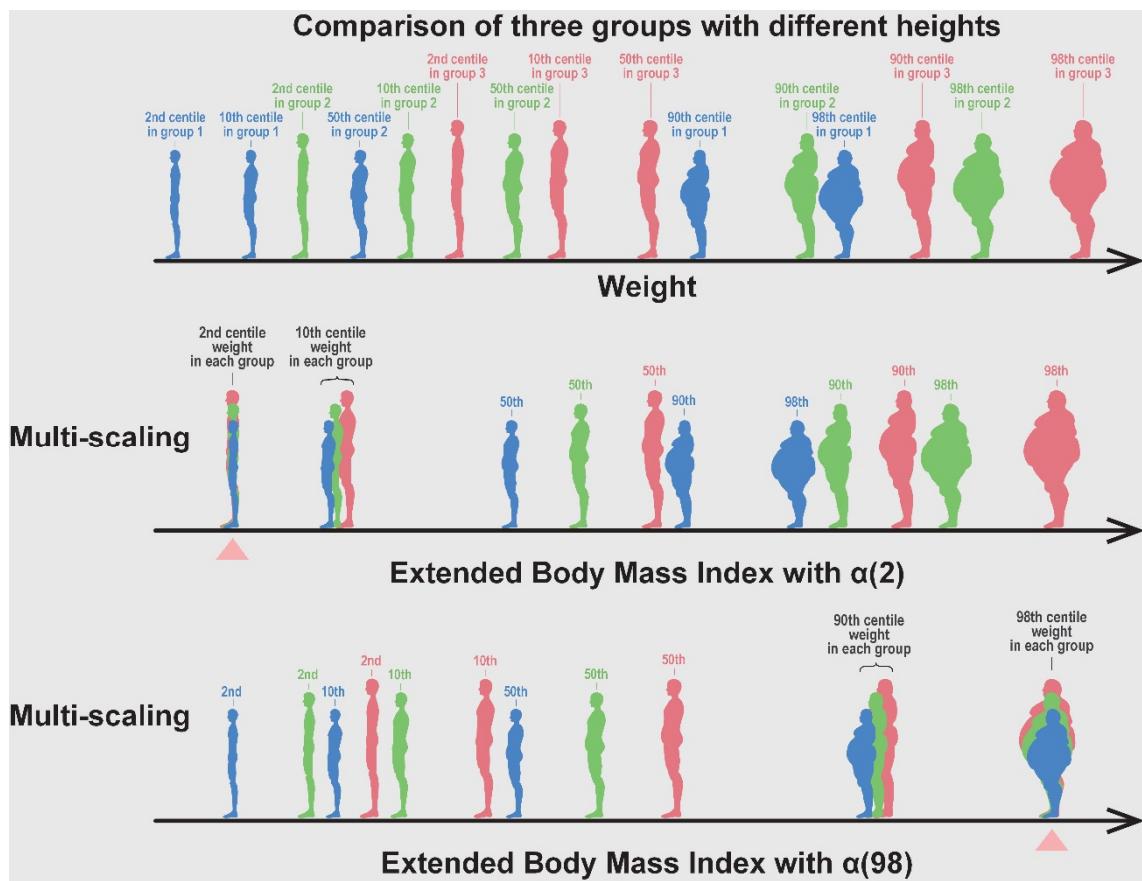


図 3.7 拡張 BMI の意味.

上段は、3つの異なる身長群（赤が高身長、緑が中身長、青が低身長）の第 2, 10, 50, 90, 98 パーセンタイル点の人々の体重分布を模式的に描いている。中段は、上図の人々を拡張 BMI ( $BMI_{ext}(2)$ ) の値で並べ替えた状態であり、各グループの第 2 パーセンタイル点の位置が同じ拡張 BMI で一致している（赤三角）。下段は、上図に示した人々を拡張 BMI ( $BMI_{ext}(98)$ ) の値で並べた状態で、各グループの 98 パーセンタイル点の位置が同じ拡張 BMI で一致している（赤三角）。

拡張 BMI がどのように機能するかを述べる前に、子どもに対する従来の BMI の欠点をより明確に示す。ここでは、体重の第 2 パーセンタイル点を痩せ評価のカットオフ値とする。図 3.8 は 11 歳男性の結果であり、体重-身長分布では、体重の中央値と第 2 パーセンタイル点は式 (3.1) で近似され、スケーリング指数はそれぞれ 2.95 と 2.69 と 2 から乖離している。図 3.8 (b) に示すように、身長に対する指標 2 の BMI 分布では、BMI の中央値と第 2 パーセンタイル点の身長依存性が観察された。このような身長依存性は、図 3.8 (d) に示すように、身長の異なる層における BMI の推定分布が、身長が高くなるにつれて右にシフトし、BMI 分布の中央値（三角）と第 2 パーセンタイル点（丸）も右にシフトする。したがって、BMI の第 2 パーセンタイルの位置は身長に強く依存するため、BMI は痩せ評価のための身長調整指標ではない。そこで、提案する拡張アロメトリックスケーリング解析を用いた拡張 BMI は、従来の BMI のこの欠点を改善することが可能である。

図 3.9 は、図 3.8 と同じデータを用いて、拡張 BMI を  $BMI_{ext}(2) = w/h^{\alpha(2)}$  と定義した場合の結果である。図 3.9 (a) に示すように、 $BMI_{ext}(2)$  の第 2 分位点回帰曲線（実線）は水平であり、身長に依存しないことを示している。また、身長層における  $BMI_{ext}(2)$  分布の第 2 パーセンタイル点（図 3.9(a) の丸印）は水平に並んでいるが、第 50 パーセンタイル点は（図 3.9(a) の三角印）は、やや傾斜している。図 3.9 (b) に示すように、異なる身長層における  $BMI_{ext}(2)$  の推定分布の第 2 パーセンタイル点はほぼ重なっており、 $BMI_{ext}(2)$  が痩せ評価にとって良好な身長調整指標であることを示している。

表 3.2 と表 3.3 は、痩せと肥満の評価におけるスケーリング指標とカットオフ値をまとめている。成人における従来の BMI とは異なり、児童および青年におけるスケーリング指標とカットオフ値には、非常に大きな年齢および性別依存性がみられた。このことから、今後、児童・青年だけでなく小児全体における国際基準の見直しが必要であると考えられる。

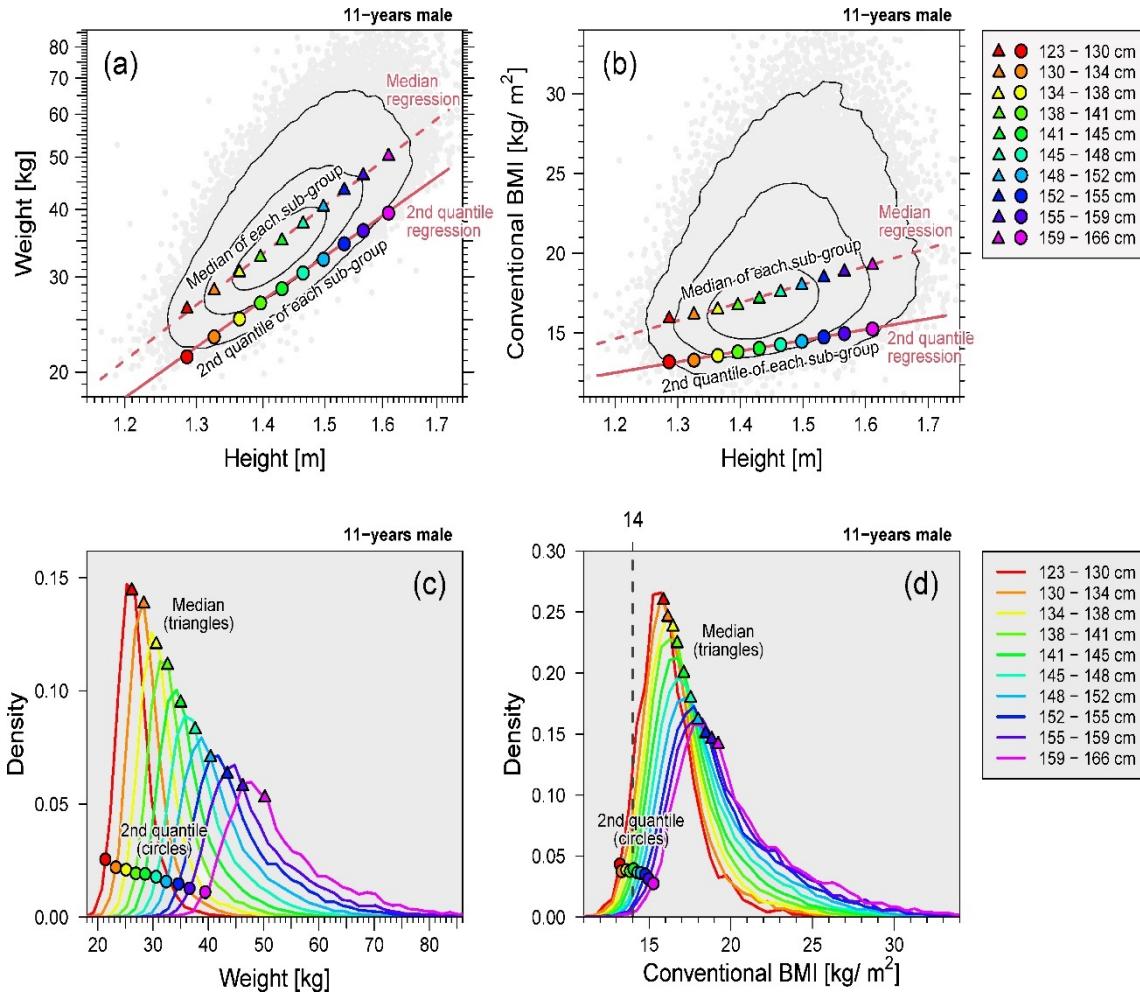


図 3.8 11 歳男性の体重と標準化 BMI. 多重スケーリングの例.

(a) 対数スケールの体重-身長の分布（灰色）.

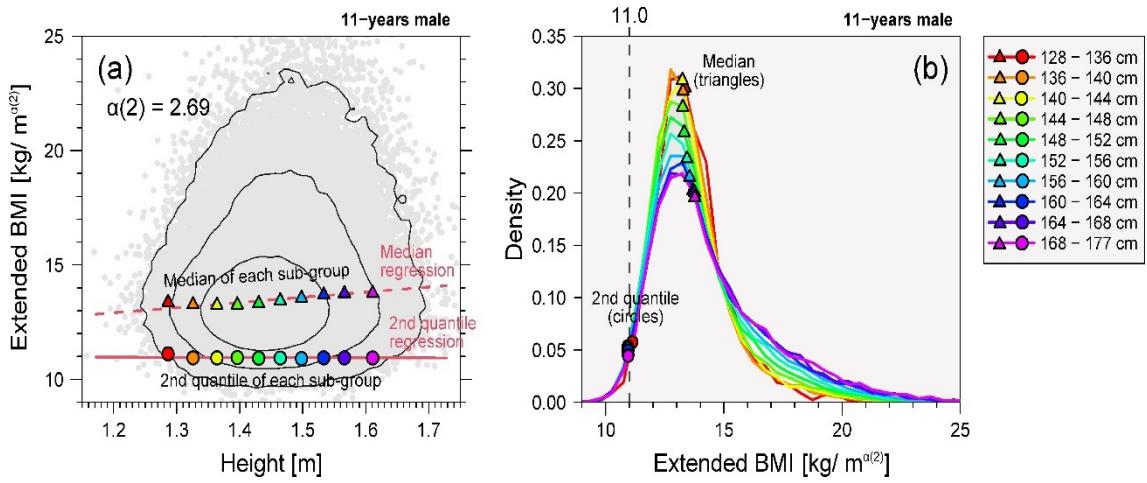
(b) 従来の BMI と身長分布（灰色）を線形スケールで示している.

(a) と (b) では、等高線は黒い実線で描かれ、第 2 パーセンタイルと第 50 パーセンタイル点の回帰曲線は線で描かれ、各身長層における体重分布の第 2, 第 50 パーセンタイル点はそれぞれ丸と三角で示している.

(c) 各身長層の体重分布.

(d) 各身長層の従来の BMI  $w/h^2$  分布.

(c) と (d) では、各身長層における分布の第 2 パーセンタイルと第 50 パーセンタイル点をそれぞれ丸と三角で示している. 10 個の身長層は中央値  $\pm 3SD$  の範囲で定義している.

図 3.9 11 歳男性の拡張 BMI  $\text{BMI}_{\text{ext}}(2)$  分布.(a) 身長に対する  $\text{BMI}_{\text{ext}}(2)$  の線形スケール分布.(b) 各身長層の  $\text{BMI}_{\text{ext}}(2)$  分布. (a) と (b) の図形式は、それぞれ図 3.8 (b) と (d) と同じであるが、従来の BMI の代わりに拡張 BMI を用いている.表 3.2 男性の第 2, 第 10, 第 90, 第 98 パーセンタイル点の推定パラメータ  $\alpha(q)$  と  $C_q$ .

Age [years]	2 <sup>nd</sup> Percentile		10 <sup>th</sup> Percentile		90 <sup>th</sup> Percentile		98 <sup>th</sup> Percentile	
	$\alpha(2)$	$C_2$	$\alpha(10)$	$C_{10}$	$\alpha(90)$	$C_{90}$	$\alpha(98)$	$C_{98}$
5	2.06	13.09	2.13	13.90	2.61	17.10	3.17	19.05
6	2.21	13.13	2.30	13.95	3.10	17.65	3.72	20.60
7	2.34	13.24	2.40	14.07	3.45	18.24	3.98	21.71
8	2.39	13.36	2.49	14.26	3.76	19.36	4.05	23.24
9	2.49	13.55	2.57	14.50	3.95	20.55	4.08	24.61
10	2.57	13.75	2.67	14.78	3.92	21.47	3.91	25.64
11	2.69	14.04	2.73	15.14	3.59	22.14	3.63	26.45
12	2.68	14.52	2.71	15.72	3.23	22.94	3.27	27.68
13	2.70	14.98	2.72	16.20	3.16	22.71	3.24	27.74
14	2.60	15.54	2.61	16.82	2.93	23.30	3.00	28.53
15	2.36	16.01	2.34	17.41	2.43	25.04	2.51	30.44
16	2.17	16.42	2.13	17.85	2.10	24.87	2.26	30.41
17	2.06	16.72	2.02	18.19	2.02	25.42	2.13	31.00

表 3.3 女性の第 2, 第 10, 第 90, 第 98 パーセンタイル点の推定パラメータ  
 $\alpha(q)$  と  $C_q$ .

Age [years]	2 <sup>nd</sup> Percentile		10 <sup>th</sup> Percentile		90 <sup>th</sup> Percentile		98 <sup>th</sup> Percentile	
	$\alpha(2)$	$C_2$	$\alpha(10)$	$C_{10}$	$\alpha(90)$	$C_{90}$	$\alpha(98)$	$C_{98}$
5	2.04	12.95	2.12	13.79	2.54	17.13	2.94	18.95
6	2.19	12.95	2.28	13.81	3.01	17.65	3.47	20.25
7	2.32	13.07	2.38	13.92	3.22	18.12	3.64	21.06
8	2.38	13.17	2.47	14.08	3.39	18.95	3.70	22.23
9	2.50	13.33	2.58	14.30	3.41	19.82	3.60	23.29
10	2.67	13.54	2.74	14.58	3.34	20.59	3.45	24.23
11	2.81	13.92	2.87	15.10	3.33	21.55	3.41	25.34
12	2.74	14.50	2.77	15.83	2.91	22.64	3.12	26.69
13	2.50	15.26	2.42	16.64	2.28	23.17	2.54	27.14
14	2.15	15.97	2.02	17.40	1.97	23.81	2.29	27.84
15	1.87	16.32	1.84	17.77	1.89	24.56	2.14	29.02
16	1.89	16.71	1.88	17.13	1.83	24.65	2.07	29.06
17	1.92	16.77	1.91	17.17	1.79	24.75	1.95	29.31

### 3.1.5 児童、青年におけるアロメトリック多重スケーリングが示す意味

アロメトリック多重スケーリングの解釈について述べる。表 3.2, 表 3.3 に示すように多重スケーリング性が年齢に依存して見られるということは、子どもの成長過程と密接に関連していると考えられる。ここで、スケーリング指数  $\alpha$  は、数学的には、アロメトリックスケーリング関係  $w = Ch^\alpha$  の微分方程式の解として求めることができ、以下の式

$$\alpha = \frac{dw/w}{dh/h} = \frac{\text{体重増加率}}{\text{身長増加率}} \quad (3.4)$$

として記述できる。(3.4)式において、 $dw/w$  は体重増加率を表し、 $dh/h$  は身長増加率を表す。したがって、スケーリング指数は体重増加率と身長増加率の比を定量化する指標と考えられる。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

ス表す指標と解釈できる。

児童および青年における身長に対する体重分布の多重スケーリング性は、身長と体重の成長が、各身長層における体重のパーセンタイルに強く依存することを意味している。このパーセンタイル依存性は、同じ年齢・身長群において、比較的太っている子どもの体重増加率が、平均的な体重の子どものそれよりも著しく大きいことを意味する。

この傾向は、図 3.3 で示すように男性では 15 歳未満、女性では 12 歳未満で顕著であるため、これらの年齢で比較的太っている子どもは、太りすぎ傾向を加速させやすいと考えられる。

逆に、比較的低体重な子どもの体重増加率は、男女とも 12 歳未満では平均体重の子どもより低い。したがって、そのような年齢での体重不足は成長遅延を引き起こす可能性がある。このような痩せ・肥満による成長バランスの差は、成人に近い 17 歳には消失している。

これらの変化の意味は、式(2.1)から式(2.5)により導出した、ヒトを円柱状に見立てた、クライバーの法則と体表面積の法則の関係が子どもには当てはまらないことを意味していると考えられる。このことを示すように子どもの代謝率は、クライバーの法則で予測される値よりも大きいことが知られている[109]。子どもの代謝率が高いのは、安静時代謝率に大きく寄与する内臓の相対的な成長率に関係していることが示唆されている[107]。例えば、5 つの臓器（脳、心臓、腎臓、肝臓、肺）は、体重 10kg の子どもの総体重の 14.6% を占めるが、体重 70kg の成人では、総体重の 6.3% しかない[108]。さらに、脳は体重 10kg の子どもでは総体重の 9.2%，総代謝量の 45% を占めるのに対し、体重 70kg の成人では総体重の 2%，総代謝量の 21% を占める。こうした違いに加え、子どもと大人の体形の違いも、児童、青年の体重-身長分布が多重スケーリングとなる原因と考えられる。新生児や乳児、幼児では、体組成バランスの急激な変化が、多重スケーリングとなる可能性がある。

加えて、多重スケーリング特性の年齢依存性は、成長過程の仕組みと密接に関係していると考えられる。女性を例にスケーリング指数と、主な発達現象が起こる年齢を図 3.10 に示す。異なるスケーリング指数の年齢依存的な特徴的変化は、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 11 歳あたりから、異なる体重のパー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、スケ

リング指数は一定の値に近づき単一スケーリング性に変化し始める。身長の伸びが止まる15歳では、スケーリング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。さらに、第2, 10パーセンタイルを見ると、12歳未満の女性の低体重が、平均的な体重の子どもに比べて成長を遅らせる음을示唆している。特に、第2パーセンタイルの年齢依存性曲線は、第50パーセンタイル（中央値）のそれと比べておよそ1年の遅れを示している。このように、12歳未満の女性の極端な低体重は、深刻な健康問題と関連している可能性がある。さらに、第98パーセンタイルの肥満は、17歳未満で体重増加が加速する傾向が持続することを示唆している。

子どもの栄養状態を適切に管理するためには、痩せと肥満による身長と体重の成長バランスの差の起源を明らかにする必要がある。その起源が遺伝的要因にあるのか、あるいは食生活に関する社会的要因にあるのかを明らかにすることは、子どもに対する効果的な痩せ肥満予防策を見出すことにつながると考えられる。また、今回行ったような、一般人口における存在確率から痩せ肥満を評価する統計学的アプローチだけでなく、生理学的、疫学的アプローチなどを踏まえ小児の各カテゴリーにおける適切な痩せと肥満の評価基準を新たに確立する必要があると考えられる。

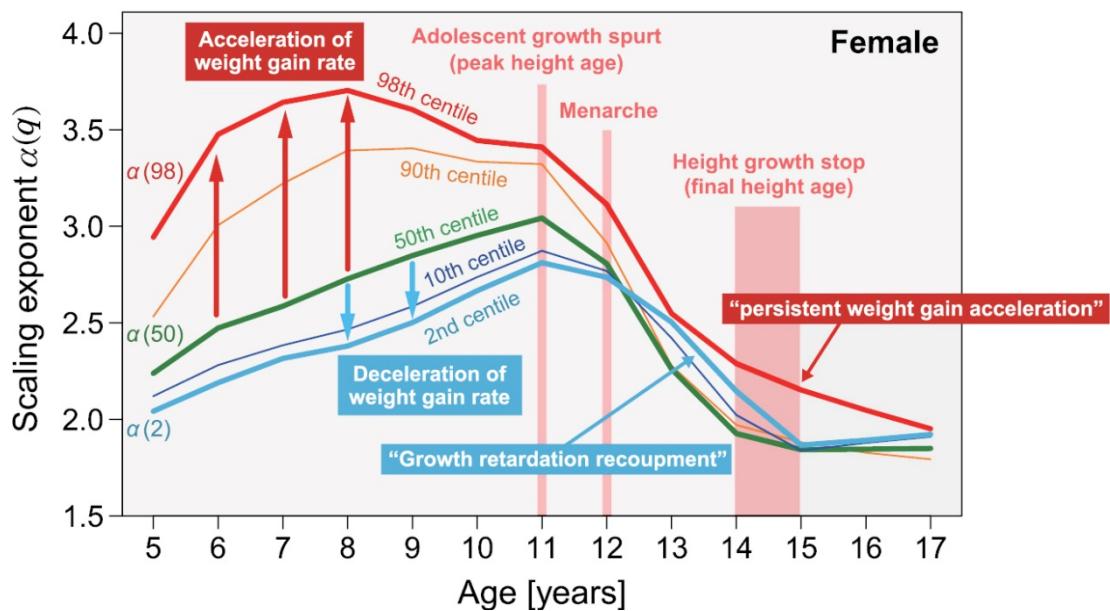


図 3.10 女性におけるスケーリング指数 $\alpha(50)$ の年齢依存性。

主な発達現象が起こる年齢を図 3.3(b)に追記し示している。

### 3.2 体格評価のための国際基準と国内基準の問題点

3.1 節で、子どもの成長過程と密接に関連していると考えられる多重スケーリング性が年齢に依存して見られることを示した。このことは、子どもの体格評価のための既存の基準の妥当性について十分に精査する必要性があると考えられる。また、多重スケーリング性がみられる要因に、強い身長依存性があることが前節により明らかになっている。分析に用いる瘦身評価法の妥当性の根拠が不明のまま、分析結果を示せば、誤った結果を社会に示す危険性がある。そこで、本節では、IOTF が設定した BMI に基づく体格評価基準[46, 94]と、我が国の学校保健統計調査において用いられている体格評価基準[72]について、その評価結果の特徴を調べることが目的となる。

#### 3.2.1 現在用いられている低体重および過体重の評価基準

IOTF が設定した BMI の国際基準と、学校保健統計調査で現在採用されている肥満度（Percentage of Overweight : POW, 以下 POW という。）を用いた国内基準がその主である。IOTF が設定した BMI の基準値は、1963 年から 1993 年の間に収集された 6 カ国（ブラジル、英国、香港、オランダ、シンガポール、米国）のデータ（生後から 25 歳までの男性 97,876 人、女性 94,851 人）の分析に基づき設定された基準である[46, 94]。その基準は、成人の BMI 基準値に対応するパーセンタイル点が維持されるように、低年齢側に拡張された基準であり、性別、年齢別に、BMI の基準値が与えられている。2.2 節で示した議論も踏まえ、出現率の大小が、基準値設定の根拠となっている。この基準は、主に疫学的研究において国際的に広く利用されている[49]。

日本の学校保健統計調査の体格判定基準の設定では、性別、年齢別の身長・体重分布が二変量正規分布で近似できると仮定されている[109]。そして、標準的な体重と身長の関係は、その 95% 確率楕円内のデータに当てはめた回帰直線によってモデル化されている。その線形モデル用いて計算された標準体重と、実際の体重との乖離により、瘦身傾向児と肥満傾向児が判定される。

すなわち、以下で定義される POW

$$POW = \frac{\text{実測体重(kg)} - \text{標準体重(kg)}}{\text{標準体重(kg)}} \times 100 \quad (3.5)$$

が、-20% 以下の子どもは瘦身傾向と判定され、+20% 以上の子どもは肥満傾向と判定される。

### 3.2.2 パーセンタイル曲線および体重パーセンタイル点の推定

分析に用いたデータは、3.1.1と同じ学校保健統計調査データを用いた。ここでは、体重-身長分布の構造を詳細に特徴付けるために、身長に対する体重分布のパーセンタイル曲線を、実際のデータ分布に3次関数を当てはめることで推定した[101]。式(3.6)は、3次関数を利用した分位点回帰の目的は重み付き絶対残差の合計を最小化する。

$$\Delta = \sum_{i:w_i \geq f(h_i; \{\hat{a}\}_{j=0}^3)} \tau |w_i - f(h_i; \hat{C}, \hat{\alpha})| + \sum_{i:w_i < f(h_i; \hat{C}, \hat{\alpha})} (1 - \tau) |w_i - f(h_i; \hat{C}, \{\hat{a}\}_{j=0}^3)|, \quad (3.6)$$

ここで、 $f(h_i; \{a_j\}_{j=0}^3) = a_0 + a_1 h_i + a_2 h_i^2 + a_3 h_i^3$  は3次関数のモデルである。

学校保健統計調査のデータでは、身長がセンチメートル(cm), 体重がキログラム(kg) 単位の整数値で記録されていることから。3.1.1と同様に、元データにランダムデータを加算し、推定結果の平滑化を行った。また、体重パーセンタイル点は、3.1節で行った方法と同様、平滑化ブートストラップ法により複製を200個生成し、それらの中央値として推定した[103]。

### 3.2.3 低体重・過体重評価の身長・年齢依存性

図3.11に、身長の下位2.5~25%, 上位75~97.5%の特定の年齢サブグループについて、男女を問わず低体重と過体重の割合を推定した結果を示している。身長依存性がなければ、図3.11の各パネルの3つの曲線は一致するはずである。この傾向は16歳以上の男性と14歳以上の女性でみられ、BMIが成長後の身長依存性を緩和していることが示唆される。しかし、児童および青年の急速な成長期には、低体重および過体重の評価において身長および年齢依存性が持続している。

具体的には、IOFT基準を用いた低体重評価は、11から13歳男性(図3.11a, b)および9から11歳女性(図3.11g, h)において顕著な身長依存性を示し、身長25パーセンタイル下位の子どもは、上位25パーセンタイルの子どもよりも5倍多く低体重に分類されている。12歳男性(図3.11a)および11歳女性(図3.11h)では、低身長サブグループは高身長サブグループに比べ、グレード2の痩せの割合が8倍であった。

同様に、IOFT基準を用いた過体重評価では、8から11歳の男性(図3.11d, e)および7~10歳の女性(図3.11j, k)において、大きく身長依存性が認められた。身長25パーセンタイル下位の子どもは、上位25パーセンタイルの子どもよりも4, 5倍肥満に評価された。9歳男性(図3.11e)および6歳女性(図3.11k)では、

身長の高いサブグループは低いサブグループに比べて、グレード 2 のやせの割合が 8 倍であった。図 3.11 に示された身長依存性は、2008 年から 2019 年を通じて一貫していた。

POW を用いた国内基準による評価では、身長の違いを区別することなく全データを分析した場合でも、顕著な年齢依存性が見られた。しかし、低体重と肥満の割合の身長サブグループ間のばらつきは 3 倍未満に抑えられていた。POW に基づく評価では、5 歳時点の痩せと肥満の割合が著しく低く（図 3.11 c, f, i, 1），これは IOFT 基準の評価結果と矛盾する。低体重の評価については、11 歳男性の割合は 5 歳男性の 10 倍であり（図 3.11 c），12 歳女性と 5 歳女性との間にも同程度の格差が観察された（図 3.11 i）。

POW を用いた評価も、2008 年から 2019 年の期間を通じて、一貫した年齢依存性が観察された。従って、この年齢に関連した傾向は、低体重者の割合を正確に表しているのではなく、カットオフの位置を示している可能性がある。子どもの痩せと肥満に関する BMI を元にした基準を確立するには、特定の性および年齢コホートにおける BMI の裾確率を考慮する必要がある[46, 102]。これにより、観察確率の低い体重と身長の組み合わせにおける潜在的な異常を同定することができる。この方法を検証するため、図 3.12 に示すように、グレード 1 およびグレード 2 の痩せ、過体重、肥満のカットオフを定義し、性・年齢別の BMI 分布を計算した。また、これらのカットオフに対応する裾確率（パーセンテージ）も求めた。図 3.12 では、肥満の上限確率は男性で 1.5 から 3.5%，女性で 1.4 から 2.2% であり、過体重の上限確率は男性で 7.1 から 15.7%，女性で 9.3 から 12.3% であった。このことから、男女ともに、肥満の上限確率は約 2%，過体重の上限確率は約 10% と一貫していた。また、痩せ判定では、男女ともに、痩せ度グレード 1 では約 10%，痩せ度グレード 2 では約 2% という裾確率を示した。

また、図 3.13 に、POW 分布を性・年齢別に分類し、低体重と肥満のカットオフ値を示した。POW 分布の年齢依存性は一目立たないように見えるが、年齢層によって裾確率に大きな違いがあることがわかる。男性の場合、肥満の上限は 2.7 から 11.8% であり、痩せの下限は 0.4 から 3.3% であった。女性では、肥満の上限は 2.7 から 9.2%，痩せは 0.5 から 4.2% であった。注目すべきは、POW の一定のカットオフ値に基づく評価では、裾確率に強い年齢依存性が認められ、低体重と肥満の評価における顕著な非対称性が明らかになった。POW を用いた学校保健統計調査の基準は、POW 分布が年齢に依存せず一致することを前提としていると解釈するのが正しいが、そのような前提は成り立っていないかった。

POW を用いた学校保健統計調査の基準の欠点は、裾確率を調べることなく、基

準値を設定したことにある。このことが、学校保健統計基準を用いた評価結果に、顕著な年齢依存性が見られる原因と考えられる。

IOFT 基準、および、学校保健統計基準に見られる身長依存バイアスの原因を探るために、身長に対する体重分布のパーセンタイル曲線の推定結果を男性は図 3.14、女性は図 3.15 に示す。図 3.14 と図 3.15 中の、IOFT 基準（青破線）、および、学校保健統計基準（緑破線）と、パーセンタイル曲線（赤実線）が平行であれば、BMI や POW 指標値が身長に対して調整されていることを意味する。図 3.14、図 3.15 の右下の 2 つのパネルを見ると、17 歳の男女では、この条件がほぼ成り立つため、評価結果の身長依存性はほとんど確認できない。しかし、それ以外の年齢層では、カットオフ値の身長依存性が顕著になっている。このことから、一般人口における出現確率の大小評価の意味で、妥当な体格評価基準を確立するためには、パーセンタイル曲線の構造を詳しく分析し、それを反映した体格指標を定義する必要があると考えられる。

特に POW を用いた学校保健統計調査の体格評価の問題点は、一般人口における身長に対する体重分布の構造を十分に考慮できていないことがある。図 3.14、図 3.15 に示したパーセンタイル曲線（赤実線）が、すべて直線であることが、体重・身長分布が 2 変量正規分布で近似できることの必要条件である。例えば、17 歳女性では（図 3.15 下段右）、そのような近似がある程度妥当であるが、9 歳女性では（図 3.15 上段右）、身長・体重分布を 2 変量正規分布で近似できない。加えて、体重分布は正規分布に従わぬこと[110]が経験的に知られているため、2 変量正規分布を仮定することは適切でない可能性がある。したがって、POW を定義する前提が崩れていると考えられる。また、先行研究において、POW を用いた評価では、低身長児の肥満度が、過大評価される傾向が報告されている[72]。以上を踏まえれば、POW を用いた体格評価について、その妥当性を早急に再検証する必要があると考えられる。

### 3.2 体格評価のための国際基準と国内基準の問題点

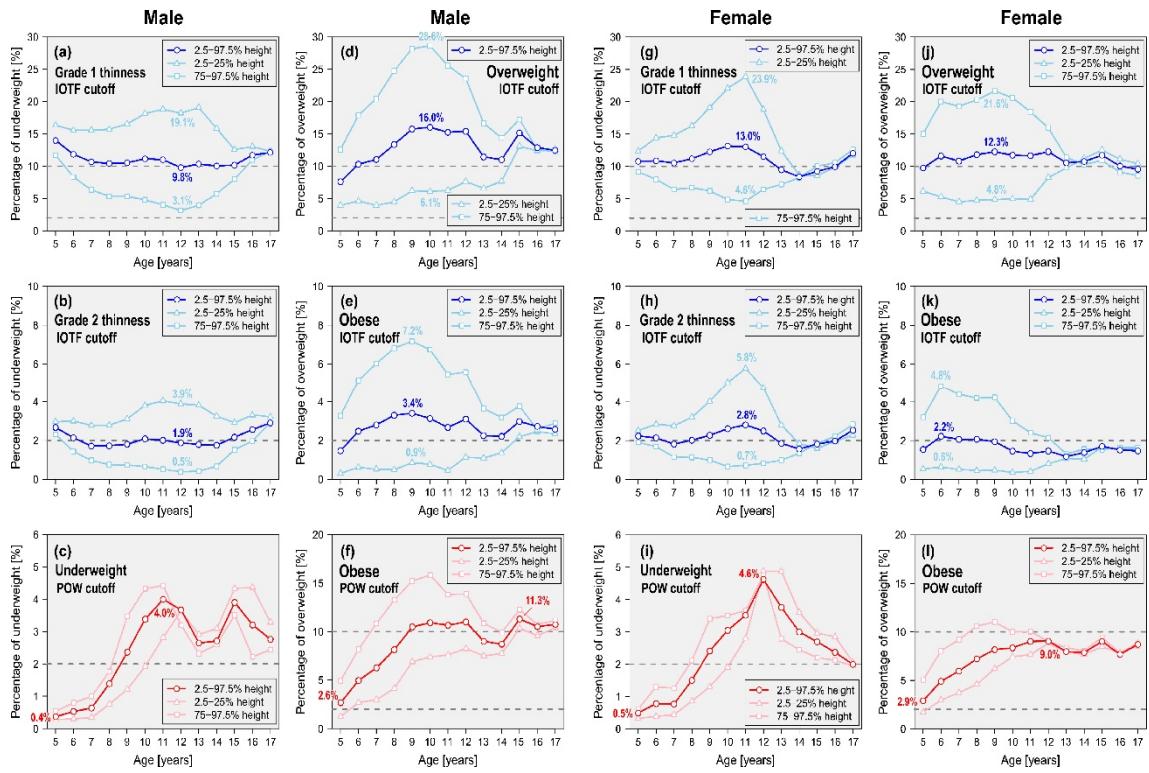


図 3.11 低体重および過体重の児童と青年の割合の年齢依存性

(各パネルの横軸) および身長依存性 (各パネル中の 3 実線).

(a) 男性における痩せグレード 1 の IOTF カットオフ値.

(b) 男性における痩せグレード 2 の IOTF カットオフ値.

(c) 男性における低体重の POW カットオフ値.

(d) 男性における過体重の IOTF カットオフ値.

(e) 男性における肥満の IOTF カットオフ値.

(f) 男性における肥満の POW カットオフ値.

(g) 女性における痩せグレード 1 の IOTF カットオフ値.

(h) 女性における痩せグレード 2 の IOTF カットオフ値.

(i) 女性における低体重の POW カットオフ値.

(j) 女性における過体重の IOTF カットオフ値.

(k) 女性における肥満の IOTF カットオフ値.

(l) 女性における肥満の POW カットオフ値.

身長を 2.5 から 97.5% (全体), 2.5 から 25% (低身長サブグループ), 75 から 97.5% (高身長サブグループ) に分けて、それぞれの年齢依存性を示している

(上 2 段) IOTF 基準を用いた場合. (下段) 学校保健統計基準を用いた場合.

年齢依存性がない場合、各線が水平になり、身長依存性がない場合は、3 本の実線が重なる.

### 第3章 体格指数（BMI）の検証

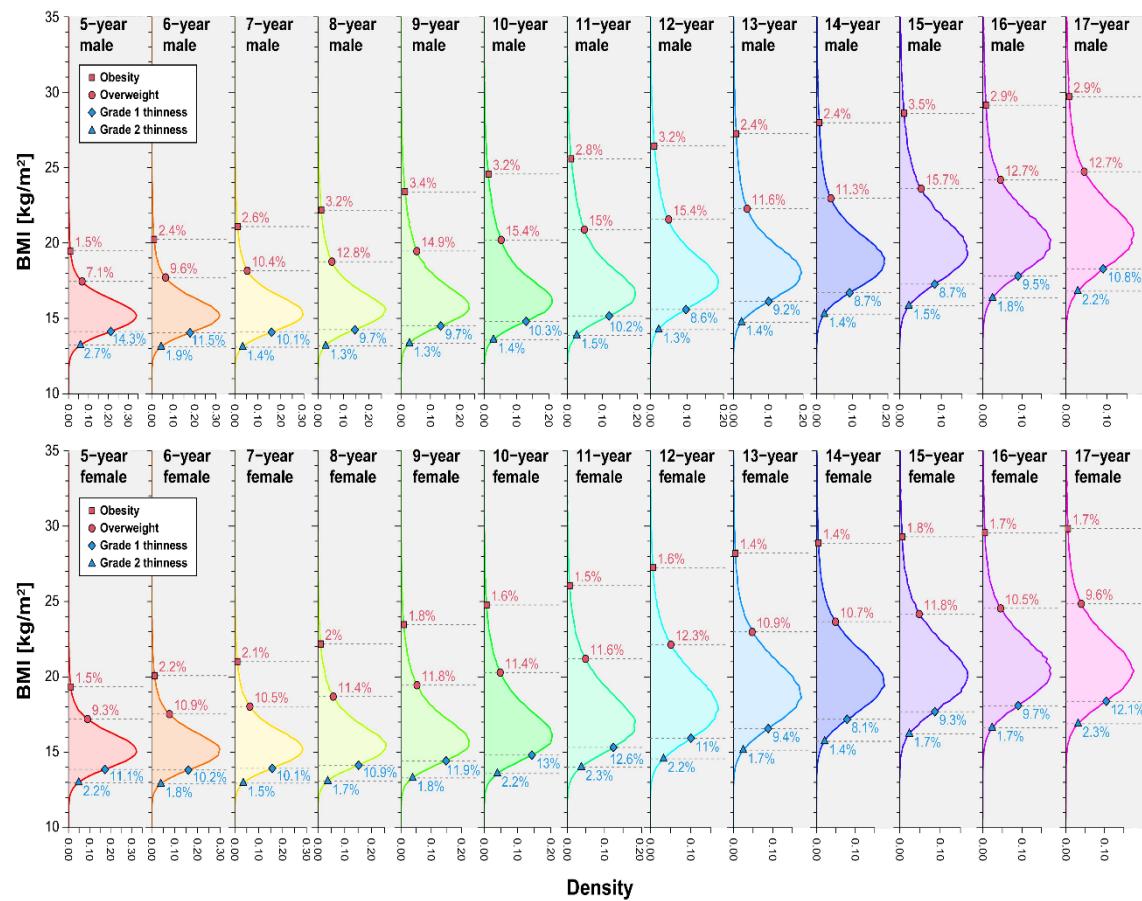


図 3.12 性・年齢別の IOTF カットオフに対応する上下裾確率 (%)

上段 男性, 下段 女性.

各パネルの値 (%) は、上から肥満、過体重、痩せグレード1、痩せグレード2のカットオフ値に対応する各 BMI 分布のパーセンタイル点を示す.

### 3.2 体格評価のための国際基準と国内基準の問題点

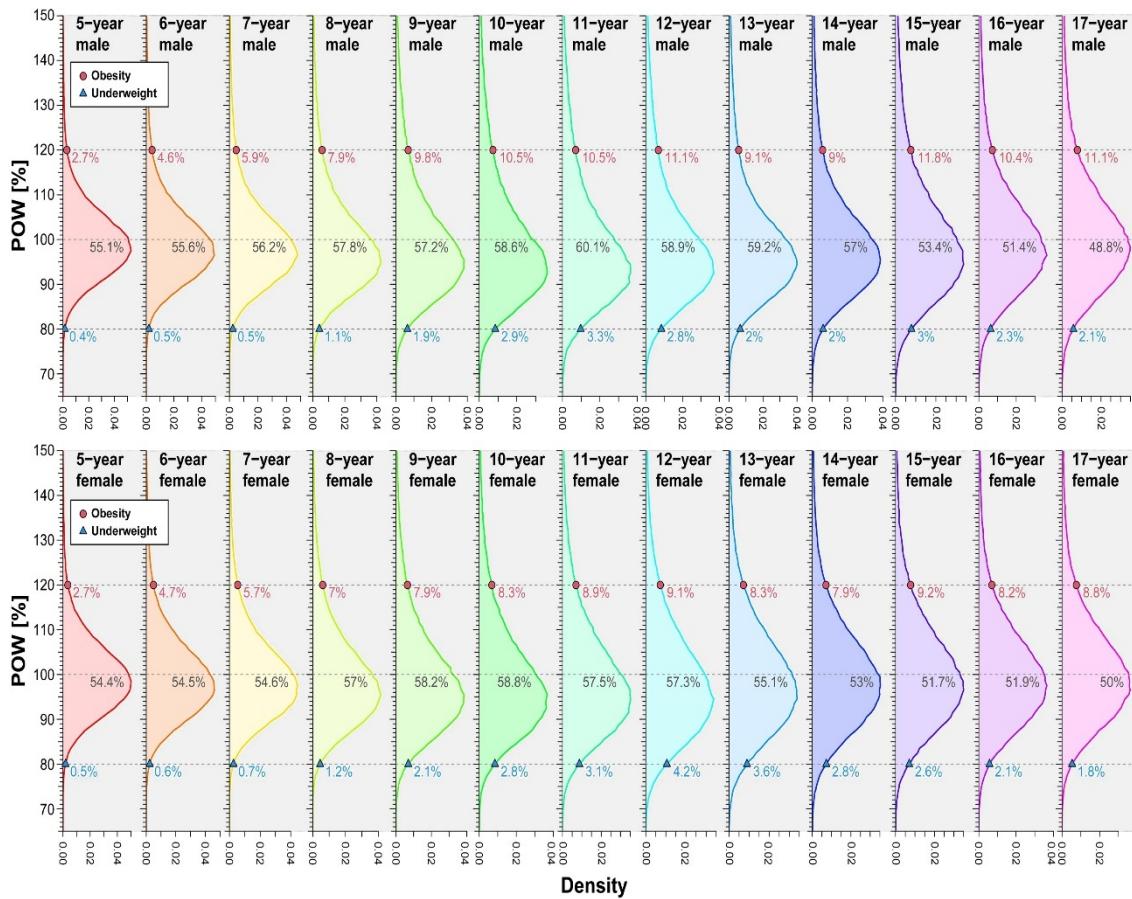


図 3.13 性・年齢別の POW カットオフに対応する上下裾確率 (%).

上段男性、下段女性。

各パネルの値(%)は、上から、肥満傾向、標準体重、痩身傾向のカットオフに対応する各 POW 分布のパーセンタイル点を示す。

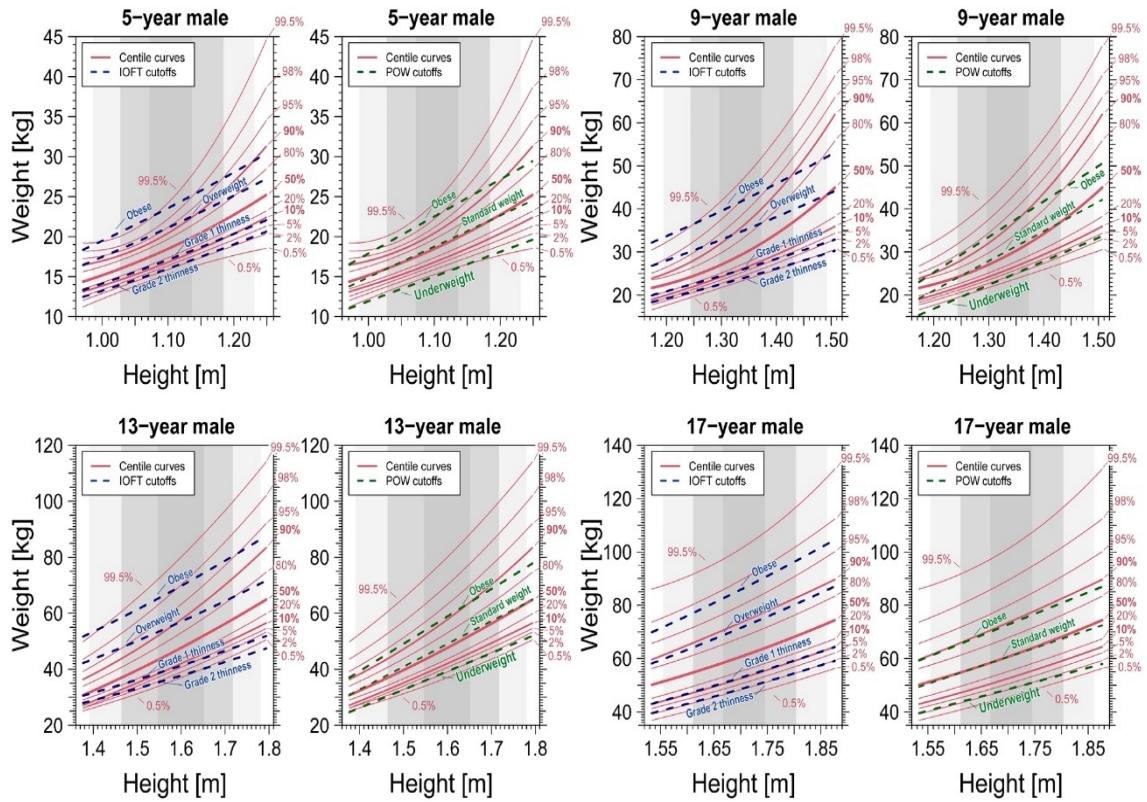


図 3.14 男性の BMI に基づく IOFT 基準（青破線）および POW 基準（緑破線）に基づく体重-身長分布（赤実線）のパーセンタイル曲線とカットオフ曲線の比較。

上段左 5 歳、上段右 9 歳、下段左 13 歳、下段右 17 歳。

破線と実践が平行であれば、指標値が身長に対して調整されていることを意味する。

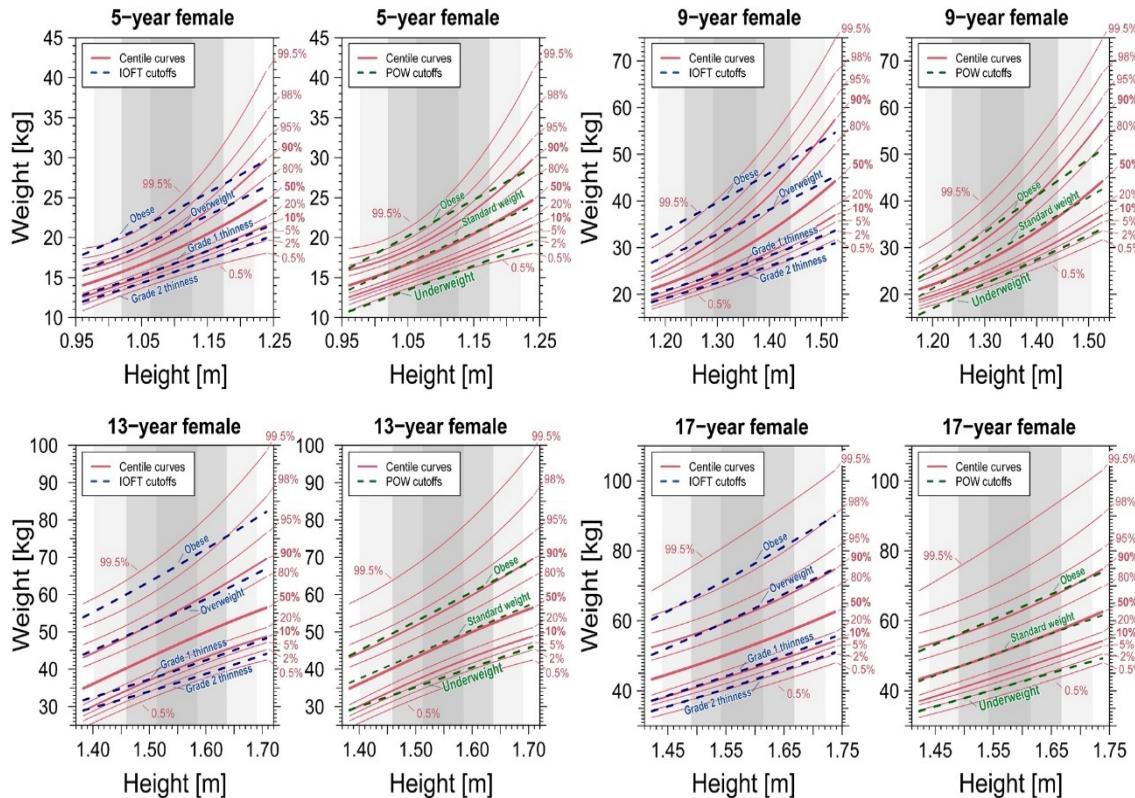


図 3.15 女性の BMI に基づく IOFT 基準（青破線）および POW 基準（緑破線）に基づく体重-身長分布（赤実線）のパーセンタイル曲線とカットオフ曲線の比較。

上段左 5 歳、上段右 9 歳、下段左 13 歳、下段右 17 歳。

破線と実践が平行であれば、指標値が身長に対して調整されていることを意味する。

### 3.3 第3章のまとめ

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（痩せ・肥満評価）を実現することを目標に、痩せ・肥満評価のための客観的な身長調整指標を示した。身長調整体格指標の妥当性は、身長の異なる人々の体格を同一身長群内のパーセンタイル点で比較できることを意味する。

本章では、児童、青年にあたる5～17歳の学校保健統計調査データを用い、体重-身長分布における任意の体重パー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スケーリング解析を導入し、成人に近い17歳に見られる単一スケーリング基準の重要性と、児童、青年における多重スケーリング性の存在を示した。また、多重スケーリング性を示す場合、任意のパーセンタイル曲線のスケーリング指数を用いた拡張BMIを導入することで、身長の異なる人々の体格を同一身長群内のパーセンタイル点で比較できることを示した。このことは、一般人口における存在確率を一致させ、痩せ、肥満評価のための客観的な身長調整指標となることを示した。

さらに、アロメトリー関係に多重スケーリング性が見られるということは、既存の体格評価基準の妥当性を検証する必要があり、BMIを用いたIOFT基準、POWを用いた学校保健統計調査基準を用いた体格評価結果には、身長、あるいは、年齢に依存した無視できない判定バイアスがみられた。これらの結果は、従来基準の有用性を完全に否定する訳ではなく、現時点では、子どもの低体重と過体重を評価するための評価基準が存在しないことについて注意を促すものである。子どもにおいては、相対的に低身長や高身長の場合は、従来基準を用いた判定結果のみに頼るのではなく、生理学的や疫学的など他の検査結果を踏まえた慎重な判断が必要であると考えられる。

これらのことから、アロメトリック多重スケーリングによる拡張アロメトリックスケーリング解析により、これまでのアロメトリー関係のなかに内包されていた、新たな成長過程の理解や評価基準の構築に貢献できる可能性を示した。

# 第4章 動植物へのアロメトリック多重スケーリングの適応

第2章により定義した、アロメトリック多重スケーリング性の考え方を用いて、第3章で現在使用されているBMIの妥当性の検証を行うなかで、子どもには多重スケーリング性があることが明らかになった。本章では、BMIの議論だけでなく、動植物に見られる様々なアロメトリーの関係について、拡張アロメトリックスケーリング解析の考え方を用いて、多重スケーリング性があるかどうか評価する。このことは、様々な分野におけるアロメトリックスケーリングの議論で、普遍的なスケーリング指数から乖離が見られる事象が報告されるなかで、その複雑さを分析することで、自然界における形態と機能の複雑な相互作用についての理解が深まることが期待される。

## 4.1 哺乳類の体重と脳質量

### 4.1.1 アロメトリック関係

哺乳類における体重と脳質量のアロメトリックスケーリングは、エネルギー代謝や生物進化を制限するメカニズムなど複雑な議論を提供している[111]。体重と脳質量のスケーリング関係は  $\text{脳質量} = C \text{体重}^\alpha$  のべき乗式に従う。ここで、 $C$  と  $\alpha$  は、べき乗式を両対数にした場合、それぞれ切片と傾きを表す定数となる。哺乳類では、現存する 28 の異なる分類目にまたがる 1,552 種という膨大なコホートを網羅した先行研究が、0.75 つまり  $3/4$  乗のスケーリング指数になることが明らかになっている[112]。これは、0.66[113, 114]という指数を提唱した他の先行研究とは異なるが、 $3/4$  乗のスケーリング関係を提唱する他の研究と一致している[115-117]。

体重と脳質量が  $3/4$  乗で関係するというこの等尺性スケーリングは、体重と代謝率関係を支配する生理学の代謝理論の基本的な内容を反映している[111, 118, 119]。しかし、脳質量と代謝率のスケーリングの関係は、依然として謎のままである。一般的には、相対的な脳質量と代謝率の間に正の関係がある[120, 121]。しかし、この相関関係は見分けがつくが、比較的弱い傾向であることが指

摘されている[122]. また, この相関の現れ方は分類学的規模によって異なっている[123].

例えば, 系統学的手法を用いた広範な比較分析では, 分類学上の目における傾きが, 様々な目を包含する中央値よりも緩やかな傾向を示すのが一般的であるという考えに基づき[78], 0.5 というスケーリング指数が報告されている[124].

しかし, この一般的な傾向には例外があり, コウモリや靈長類はより急なスケーリングの傾きを示すが, ウサギ目やトカゲ目は, 哺乳類で観察される幾何学的成长を下回る 3/4 のスケーリング指数を示す.

先行研究は, 体重と脳質量を同時に形成する多様な選択圧に関して幅広い議論が行われており, 相関する形質の進化について多くの考察が示されている[124-127]. しかし, これらすべての研究で繰り返されているテーマは, 脳質量と体重の関係が一様である, つまり単一スケーリング性であるということである.

ここでは, 現存する 28 の異なる分類目にまたがる 1,552 種を含む、科学文献の広範なレビューから得られた脳と体の質量を含むデータセットを用い, アロメトリック多重スケーリングを用いた拡張アロメトリックスケーリング解析を実施する.

### 4.1.2 分析に用いたデータセット

Google Scholar と datadryad.orgにおいて、「mammal brain size」のキーワードで検索した脳質量に関する公開データセットや脳質量の測定結果を報告している出版物の結果をまとめた報告の公開データセットを使用した[112]. このデータセットは幅広い出版物から得られた脳と体の質量で構成し, 現存する 28 の異なる分類学上の目にまたがる合計 1,552 種が網羅されている. データは哺乳類の動物の性別とサンプル数, またはサンプル数の範囲 (例 :  $1 < n < 10$ ), 平均脳質量 (g), 平均体重(g)が記載されている. 性差による大きさの二形性を示すことが知られている系統については, 確立された方法論に従って, 両性の成体の平均と, 成体雌の脳質量と体重の平均値が使用されている[116, 128]. 編集されたデータは, 分類学的な標準化過程を経て, 分類体系に沿った内容となっている[129]. この標準化は, 哺乳類の生活史や生態学的パラメータを扱う確立された比較データベース[130, 131]との互換性を促進するために不可欠である. 亜種情報が報告された場合, 標本数を考慮して種別の加重平均値を使用した. 多様な測定単位が存在する場合は, 慣例に従った先行研究[116]と同様に, 1 立方センチメートル ( $1\text{cm}^3$ ) を 1 グラム (1g) に変換した値を使用した.

### 4.1.3 結果と考察

図 4.1 に、哺乳類の体重と脳質量の関係を示す。図 4.1 (a) が示すように、第 10, 50, 90 パーセンタイルの回帰曲線は、平行に推移せず、体重が重くなるにつれて、脳質量の分布は広がっていた。すなわち、哺乳類の種間の体重-脳質量分布では、多重スケーリング性を示している。中央値の推定指数  $\alpha(50)$  は 0.76 であったため、標準化指標を、 $\text{脳質量}/10^{-1.28+0.76\log\text{体重}}$  と定義した。 $\alpha(50)$  が 0.76 であったことから、中央値は先行研究[64]と一致している。しかし、図 4.1(b) に示すように、体重と標準化指標分布における、第 10, 90 パーセンタイルの回帰曲線は水平ではなかった。したがって、対数空間における脳質量  $\propto \text{体重}^{0.75}$  のような単一スケーリングの関係は、哺乳類の種間のエネルギー代謝や生物進化のダイナミクスを特徴付けることはできないと考えられる。この確認された多重スケーリング性は、体重と脳質量のスケーリング関係の複雑な相互作用を再評価し、この基本的なアロメトリー関係を詳細に分析する必要性があることを示したものである。特に、スケーリング指数が第 10 パーセンタイルの 0.71 から第 90 パーセンタイルの 0.85 へ増加していることは興味深い点である。この多重スケーリングは、パーセンタイルが上位になるにつれて、体重に比べて脳質量がより大きくなる状態を示唆している。つまり、体重が変化することなく脳質量が大きくなっている。この現象は、先行研究[63, 70, 71]で想定されているような、体重と代謝率の単一スケーリングを前提とした安易な説明を覆す結果である。

体重と脳質量の大きさの多重スケーリング性は、基礎代謝率を維持する体の能力に照らして、脳の成長にさらなる制約があることを示している。あるいは、体が大きければ、小さい体よりも柔軟な摂食戦略や熱量獲得が可能になり、脳の進化に柔軟性が生まれるのかもしれない[121, 132, 133]。

このように、アロメトリック多重スケーリングによる拡張アロメトリックスケーリング解析により、新たな視点が提供され、今後さらなる研究により、複雑なスケーリングパターンを生み出す根本的な生理機構の解明に繋がる可能性が期待される。

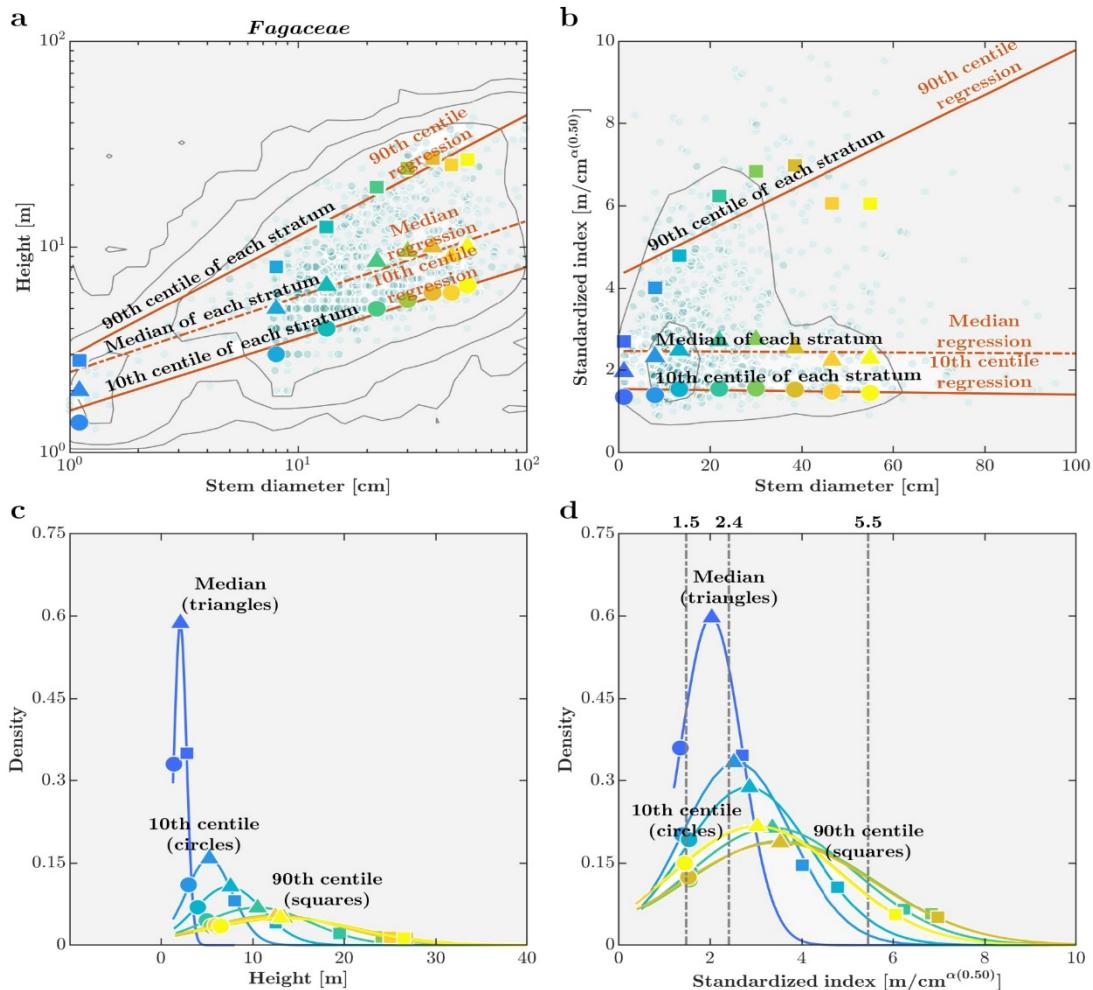


図 4.1 哺乳類と体重と脳質量の関係. 多重スケーリングの例.

(a) 対数スケールの体重-脳質量の分布（薄緑）.  
 (b) 体重-標準化指標：脳質量/ $10^{-1.28+0.76\log}$ 体重 分布（薄緑）を線形スケールで示している。

(a) と (b) では、第 2, 第 50, 第 90 パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各体重層における脳質量分布の第 2, 第 50, 第 90 パーセンタイル点はそれぞれ丸と三角と四角で示している。

(c) 各体重層の脳質量分布。

(d) 各体重層の標準化指標：脳質量/ $10^{-1.28+0.76\log}$ 体重 分布。

(c) と (d) では、各体重層における分布の第 2, 第 50, 第 90 パーセンタイルをそれぞれ丸と三角と四角で示している。9 個の体重層は中央値±2.5SD の範囲で定義している。

## 4.2 樹木の幹径と高さの関係

### 4.2.1 アロメトリック関係

樹木の幹と枝や葉の関係は、フラクタル構造を示し、生物学や生態学など様々な分野において、個体呼吸や光合成などのエネルギー代謝や成長過程など複雑な議論を提供している。

樹木における幹の直径( $d$ )と樹高( $h$ )の関係は、植物種内および植物種間で、 $樹高 = C \cdot 幹の直径^{\alpha}$  のべき乗式に従う。ここで、 $C$  と  $\alpha$  はべき乗式を両対数にした場合、それぞれ切片と傾きを表す定数となる。この関係は一般的に、対数変換された直径と高さが線形相互依存性を示し、様々な環境下にわたって一貫した傾きが維持されるという基礎的な仮定に基づいている[134, 135, 136]。さらに、樹木の自重から生じる重力に対する力学的安定性により、 $2/3$ 乗のスケーリング指数、つまり  $h \propto d^{2/3}$  という式がすべての樹種に普遍的に適用されるという考え方方が一般的である[137-139]。しかし、小型および中型サイズの植物では  $2/3$  乗が満たされないことも知られている[140]。

このような背景のもと、幹の直径と樹高を従来から結びつけてきた、アロメトリック単一スケーリングの関係について、その妥当性の評価と多重スケーリング性の有無について確認した。これは、特に背の低い樹木と高い樹木を比較した場合に、幹の直径と樹高の関係を支える幾何学的・力学的制約関係に、より光を当てることを目的としている。

### 4.2.2 分析に用いたデータセット

生物多様性と生態系研究のための地理参照付き樹木記録のリポジトリである“Tallo database”を用いた[141]。このデータセットは 498,838 件の地理参照記録から構成されており、特に個々の樹木に焦点を当て、分類学的に標準化されている。幹の直径(cm)、高さ(m)、樹冠半径(m)などのパラメータが記録されている。また、地理的に多様な 61,856 地点の膨大な配列から作成され、森林および非森林の様々な生態系情報を幅広く網羅している、そして、1,453 属、187 科からなる分類学的階層に分布する 5,163 種の情報が集約されている。ここでは、カバノキ科(Betulaceae)、ヒノキ科(Cupressaceae)、マメ科(Fabaceae)、ブナ科(Fagaceae)、クスノキ科(Lauraceae)、フトモモ科(Myrtaceae)、マツ科(Pinaceae)の 7 つの科を検討した。

#### 4.2.3 結果と考察

図 4.2 に 7 つの科における各パーセンタイルのスケーリング指數  $\alpha(q)$  の結果を示す。カバノキ科（青線）、マメ科（黄線）、クスノキ科（緑線）、フトモモ科（水色線）、マツ科（茶線）の 5 科は、 $\alpha(q)$  が変化してもスケーリング指數の変動が小さく、単一スケーリング性を示し、スケーリング指數は 0.5 から 0.75 の範囲のなかで、それぞれの科は均一に推移した。対照的に、ヒノキ科（赤線）、ブナ科（紫線）は多重スケーリング性を示し、特にブナ科は顕著な多重スケーリング性の特徴を示した。

図 4.3 に、単一スケーリング性を示したマツ科のアロメトリック関係を示す。図 4.3(a) で示すように、対数領域における幹の直径に対する樹高分布の第 10, 50, 90 パーセンタイル点のすべての回帰直線が平行となった。ここで、標準化指標を樹高/幹の直径  $\alpha^{(50)}$  と定義した。 $\alpha(q)=0.73$  の形で標準化された幹の直径と樹高の関係は、図 4.3(b) に描かれているように、幹の直径の変動に対して、幹の直径と樹高分布の第 10, 50, 90 パーセンタイルの回帰曲線は水平となった。このことは、マツ科における、幹の直径と樹高のアロメトリー関係において、幹の直径依存性が無いことを示している。さらに、さまざまな幹の直径層にわたる標準化指標分布を見ると、図 4.3(c) の分散の大きいパーセンタイル点とは対照的に、図 4.3(d) ではパーセンタイル点は密集しており、単一スケーリング性となっている。これらの結果は、マツ科の樹木の成長を評価するための頑健な指標として、幹の直径に依存せず、伝統的な幹の直径と樹高のアロメトリー関係が有効であることを示している。

次に、図 4.4 に多重スケーリング性を示したブナ科のアロメトリック関係を示す。図 4.2 を見ると、スケーリング指數  $\alpha(q)$  は期待値 0.66 から大幅に下回っており、 $q$  により変動している。すなわち、従来の幹の直径-樹高のアロメトリック関係は、ブナ科では、樹木の成長を評価する客観的な尺度としては機能しない。図 4.4(a) で示すように、両対数領域における幹の直径に対する樹高分布の第 10, 50 パーセンタイルの回帰直線は平行を示すが、第 90 パーセンタイルの回帰曲線の傾きは増加し、第 10, 第 50 パーセンタイルの回帰曲線とは平行にならなかった。 $\alpha(50)=0.37$  の形で標準化された幹の直径と樹高の関係は、図 4.4(b) に描かれているように、幹の直径の変動に対して、幹の直径-樹高分布の第 10, 50 パーセンタイルの回帰曲線は、水平に近い傾きを示す一方、第 90 パーセンタイルの回帰曲線は正の傾きを示した。図 4.4(c)(d) にみられるように、分散の大きいパーセンタイル点は、樹高と幹の直径分布が幹の直径によって異なることを示唆している。これらのことから、ブナ科の幹の直径に対する樹高の分布は、多重スケー

リング性を示し、ブナ科内の樹木の成長は、 $h/d^\alpha$  のような単一なアロメトリー関係が存在しないことを示している。

これらの結果から、生態学など学術分野だけでなく、林業などの実社会でしばしば基本的な指標とされる樹木の幹の直径と樹高の等尺関係[134, 135, 136]は、このような異なる成長戦略を持つ科に普遍的に適用できる評価方法ではない可能性がある。その適否は、樹木の成長タイプを含む多くの要因に左右される。様々な樹種は、寿命などの要因に影響され異なる成長戦略を示す。寿命が短く成長の速い樹木は、寿命が長く成長の遅い樹木と比較して、異なるアロメトリックスケーリングに従うことがある。例えば、ブナ科に含まれるオークは比較的成長が遅く、寿命が長いことで有名である。緻密で頑丈な木材と深い根系を発達させることにエネルギーが投入されている。この戦略によって、オークは何世紀にもわたって自然環境の中を耐えることができ、しばしば成熟した森林の象徴となる。一方、松は、より急速な成長戦略を採用し、樹高と樹冠の早期発達を優先させ、近隣の植生と日照を奪い合う。針葉と効率的な水利用メカニズムは、様々な環境条件下で生育するのに適している。マツに典型的な水利用の上昇軌道は、開けた場所や攪乱の後に優位性を確立することを可能にする。オークとマツの対照的な成長戦略は、自然適応性の証であり、それぞれの種が特定の環境のなかで占有できることのできる範囲である生態学的ニッチと、長期的生存目標に基づき、その成長を最適化している[142, 143]。このような複雑性から、森林生態系を理解し管理する上で、アロメトリー関係の適用性を評価する際には、特定の樹木の生物学的・生態学的背景を考慮する必要があると考えられる。

今回、マツ科とブナ科により焦点を当て、アロメトリック多重スケーリングの考え方に基づいた拡張アロメトリックスケーリング解析によって、伝統的なアロメトリー関係に対し、異なる植物科の間で一貫して成立しないことが示された。この知見は、生態学的背景と樹木の種類に特有の成長戦略を考慮することの重要性を指摘している。また、樹木の成長における普遍的なアロメトリー関係に疑問を投げかけ、様々な研究分野において樹種に特化したアプローチを採用することの必要性があると考えられる。さらに、樹木の成長におけるアロメトリック関係を理解する上で、生態学的背景と成長戦略が極めて重要な要素であることが示唆された。今後、例えば、世界的なバイオマス推定値[144]の再評価に繋がることが期待される。

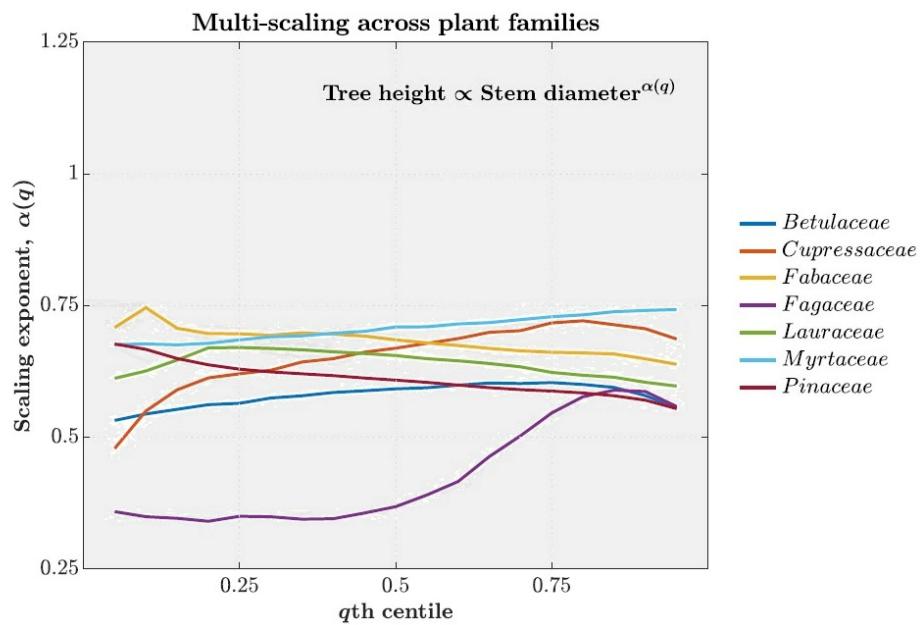


図 4.2 7 つの科の幹の直径と樹高に対する各パーセンタイルにおけるスケーリング指数.

カバノキ科 (*Betulaceae* : 青線), マメ科 (*Fabaceae* : 黄線), クスノキ科 (*Lauraceae* : 緑線), フトモモ科 (*Myrtaceae* : 水色線), マツ科 (*Pinaceae* : 茶線) の 5 科は、スケーリング指数の変動が小さく、単一スケーリング性を示している。ヒノキ科 (*Cupressaceae* : 赤線), ブナ科 (*Fagaceae* : 紫線) のスケーリング指数は変動し多重スケーリング性を示している。スケーリング指数がほぼ値であれば、単一スケーリングであることを示し、異なれば多重スケーリング性であることが示される。

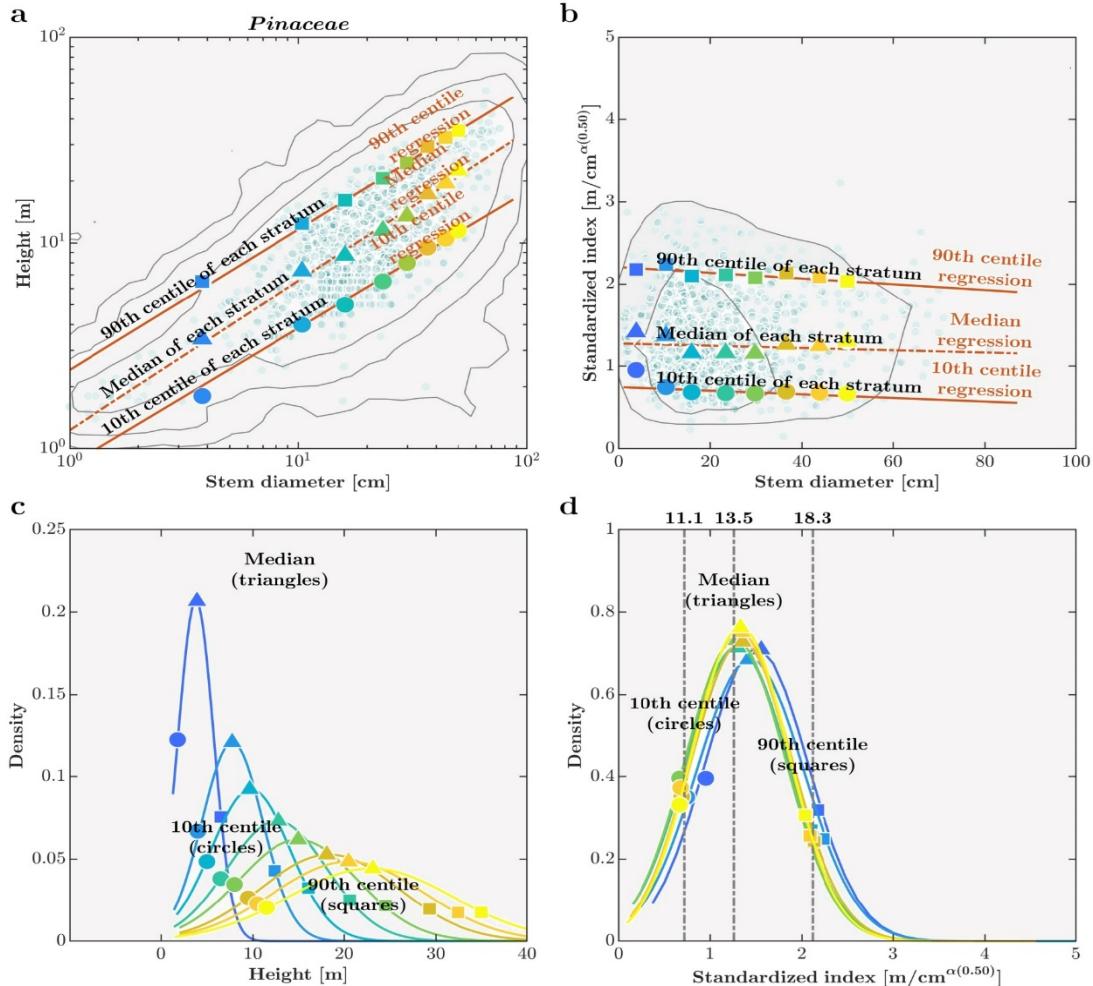


図 4.3 マツ科（スギ, モミ, マツ, トウヒを含む）における幹の直径と樹高の関係. 単一スケーリングの例.

- (a) 対数スケールの幹の直径-樹高分布（緑点）.
- (b) 標準化指標：樹高/幹の直径<sup>0.73</sup>と幹の直径分布（薄緑点）を線形スケールで示している。
- (a) と (b) では、等高線は黒い実線で描かれ、第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各幹の直径層における樹高分布の第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイル点はそれぞれ丸と三角と四角で示している。
- (c) 各幹の直径層の樹高分布.
- (d) 各幹の直径層の標準化指標：樹高/幹の直径<sup>0.73</sup>分布。
- (c) と (d) では、各幹の直径層における分布の第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイル点をそれぞれ丸と三角と四角で示している。
- 8 個の幹の直径層は中央値±2.5SD の範囲で定義している。

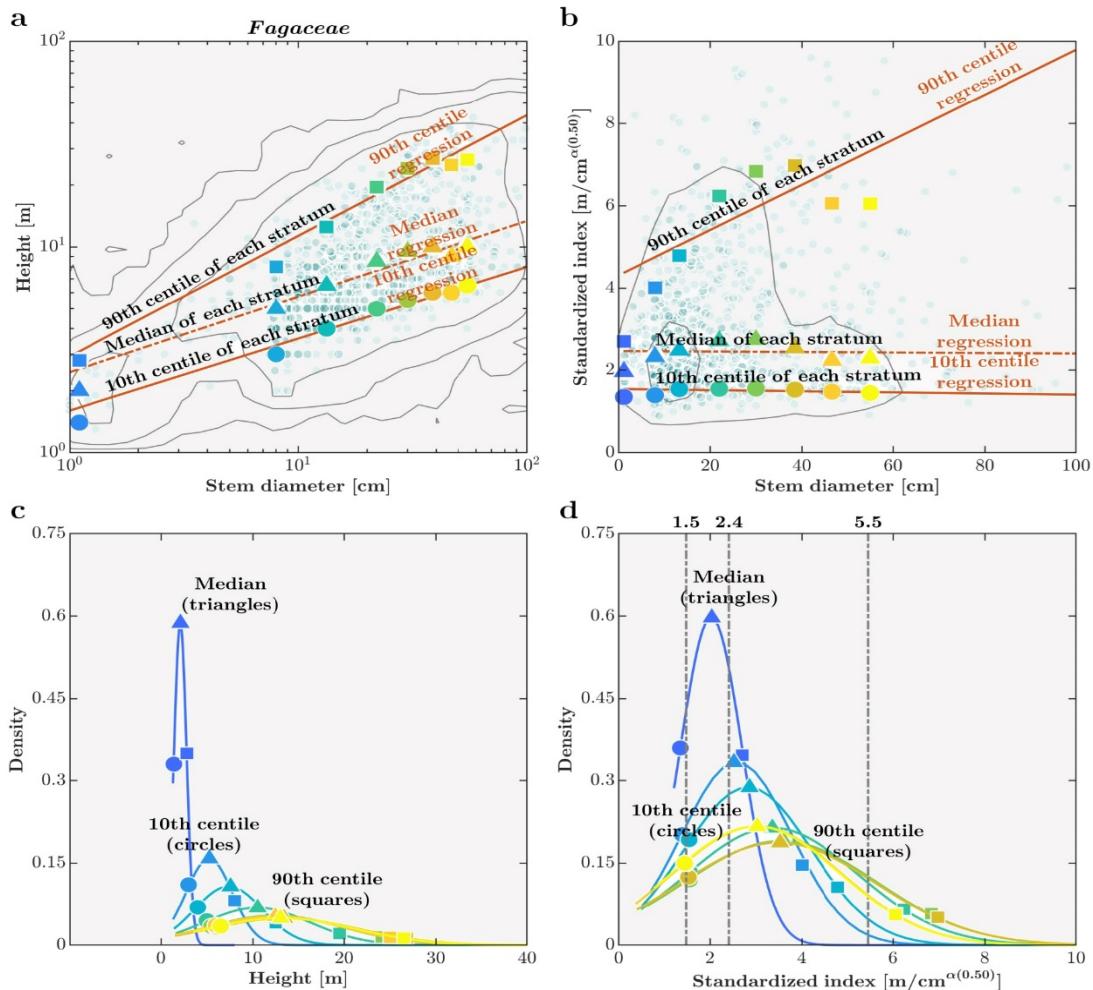


図 4.4 ブナ科（ブナ, クリ, カシを含む）における幹の直径と樹高の関係.

多重スケーリングの例.

(a) 対数スケールの幹の直径-樹高分布（緑点）.

(b) 標準化指標：樹高/幹の直径<sup>0.37</sup>と幹の直径分布（薄緑点）を線形スケールで示したもの.

(a) と (b) では、等高線は黒い実線で描かれ、第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各幹の直径層における樹高分布の第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイル点はそれぞれ丸と三角と四角で示している.

(c) 各幹の直径層の樹高分布.

(d) 各幹の直径層の標準化指標：樹高/幹の直径<sup>0.37</sup>分布.

(c) と (d) では、各幹の直径層における分布の第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイル点をそれぞれ丸と三角と四角で示している.

8 個の幹の直径層は中央値±2.5SD の範囲で定義している.

### 4.3 実経営規模で栽培されたトマトの葉重と葉面積

#### 4.3.1 アロメトリック関係

植物の個体重と葉面積の関係は、近似的にフラクタル成長とみなすことで、スケーリング指数が  $2/3 < \alpha < 1$  となることが報告されている[145]。また、大きな個体間では個体葉面積[145]、個体呼吸速度[76]の両方が、スケーリング指数  $3/4$  乗のべき乗式で近似できると報告されている。さらに光合成は、光や炭酸ガスなど光合成に必要な資源が全て不足しない場合に個体葉面積に比例すると仮定し、個体重の  $3/4$  乗に比例すると予測されている[76, 79]。すなわち、 $A(\text{葉面積}) \propto M(\text{個体重})^{3/4}$ ,  $R(\text{個体呼吸}) \propto M^{3/4}$ ,  $P(\text{個体光合成}) \propto M^{3/4}$  と表される。この関係性は植物個体全体のデータであるが、栽培途中にある植物体を評価すると植物体を枯死させてしまう。このことから、トマト(*Solanum lycopersicum L.*)栽培の過程で行う、摘葉作業によって除去された葉を用い、群落の下層葉の状態の評価に取り組んだ。

これまで、動植物全体のデータを用いたアロメトリー関係に対する多重スケーリング性の評価であったが、ここでは、植物の一部分を切り取ったデータの中に、多重スケーリング性が見られるか確認する。これまでの結果を元に、栽培環境下のトマトにおいても、マルチスケーリング性があることが想定されるが、調査された報告はない。このアプローチは、生育期間中の摘葉した葉のスケーリング指数を見ることで、葉面積と代謝率(個体呼吸)による葉の状態評価を行い、植物の成長過程や収穫を推測する上に有益な情報となる可能性が得られるかどうかを確認することが目的となる。

#### 4.3.2 分析に用いたデータセット

使用する植物の葉は、松阪市（北緯 34 度 37 分 51 秒、東經 136 度 29 分 39 秒）にある三重県農業研究所の温室（栽培面積：500 m<sup>2</sup>、軒高：3.7m）で栽培したトマトを用いた（図 4.5）[146]。3 つのトマト品種、マナグア(Rijk Zwaan Zaadteelt en Zaadhandel B.V.)、鈴玉（国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構）、CF 桃太郎ヨーク（タキイ種苗株式会社）を用いた。この 3 品種は、それぞれオランダ品種、オランダ品種と日本品種の交雑後代品種、日本品種であり、その特性の違いを評価するために選別した。栽培期間が 2015 年から 2018 年にかけて、3 つの栽培期間；2015 年 9 月 18 日(定植)から 2016 年 7 月 12 日、2016 年 9 月 1 日(定植)から 2017 年 6 月 6 日、2017 年 8 月 9 日(定植)から 2018 年 7 月 18 日)の期間の植物体を用いた。いずれの品種もマキシフォート台木(De Ruiter/Monsanto)に接ぎ木した苗を使用した。温室内では、点滴灌漑によるロックウール培養システム

ムを使用した[147]。栽植密度は、2.4株/m<sup>2</sup>とし、いずれの作型も1月下旬に3.6株/m<sup>2</sup>となるように増枝し、着生葉数は10から13葉で管理した。園試処方に準じた培養液（N：16me/L, P：4me/L, K：8.0me/L, Ca：8me/L, Mg：4me/L）をEC 1.0～3.0mS/cmの間の濃度で与えた。温室内の環境制御は、Maximiser（Priva BV）を用い、室内の気温は13から27°Cの範囲に制御した。目標湿度は80%とした。CO<sub>2</sub>濃度は温室の換気時に400ppm、閉鎖時に800ppmを目標とし、燃焼式CO<sub>2</sub>発生機を用いて与えられた。

これらの栽培条件において、3つの栽培期間中に行われた下葉の除去作業、すなわち摘葉処理で行われた、マナグア（574サンプル）、鈴玉（583サンプル）、CF桃太郎ヨーク（415サンプル）を使用した。摘葉処理は1週間に1回を行い、1～3葉が除去された（図4.6）。除去した葉の生葉重（g）、及び乾燥重（g）を電子天秤（株式会社島津製作所、ED2000）で計測し、葉面積（cm<sup>2</sup>）は、葉面積計（LI-COR, LI-3100）で計測した。1葉あたりの乾燥重と葉面積の関係に対し、多重スケーリング性が見られるか確認した。

#### 4.3.3 結果と考察

図4.7は、マナグア、鈴玉、CF桃太郎ヨーク3品種における個葉葉面積と個葉乾物重のアロメトリック関数  $A(\text{個葉葉面積}) \propto M(\text{個葉乾物重})^{\alpha(q)}$  のパーセンタイル別のスケーリング指数を示す。マナグアは、パーセンタイルが上位になるほど、スケーリング指数が低下するが、 $q$ が15から90の範囲では、およそ0.6から0.75の範囲のスケーリング指数となった。

鈴玉も同様、パーセンタイルが上位になるほど、スケーリング指数は低下した。CF桃太郎ヨークは $q$ が5から20にかけスケーリング指数が上昇し、以降低下した。 $q$ が5から80の範囲でスケーリング指数はおよそ0.6から0.75の範囲となった。調査に用いた3品種は、パーセンタイルが下位時のスケーリング指数に差が確認された。この結果から、栽培期間中の植物の一部の関係でも、多重スケーリング性が確認され、品種により傾向が異なることが示された。

図4.8は、マナグアにおける個葉乾物重と個葉葉面積の関係を示す。図4.8(a)のように両対数の個葉乾物重に対する個葉葉面積分布の第10, 50, 90パーセンタイルの回帰曲線は、個葉乾物重の増加に伴って収束する傾きを示している。図4.8(b)は標準化指標を個葉葉面積/個葉乾物重 <sup>$\alpha(50)$</sup> と定義された個葉乾物重と標準化指標の分布であり、第50パーセンタイルの回帰曲線は水平を示すが、第10パーセンタイルは正の傾き、第90パーセンタイルは負の傾きを示した。すなわち、平行でない回帰直線はマルチスケーリング性を示している。この結果は、個葉乾

物重の小さい時に個葉葉面積の分散が大きいためである。図 4.8(c) (d)にみられるように、分散の大きいパーセンタイル点は、個葉葉面積と個葉乾物重分布が個葉葉面積によって異なることを示唆している。すなわち、この傾向もマルチスケーリング性を示している。図 4.9 は、鈴玉における個葉乾物重と、個葉葉面積の関係を示し、マナグアの時と同様の分布傾向を示した。鈴玉は  $\alpha(50) = 0.72$  であった。図 4.10 は、CF 桃太郎ヨークにおける個葉葉面積と、個葉乾物重の関係を示す。CF 桃太郎ヨークは  $\alpha(50) = 0.71$  であった。図 4.10(b)にみられる CF 桃太郎ヨークは、マナグアや鈴玉と異なり、第 10 パーセンタイル点の両対数の個葉乾物重に対する個葉葉面積分布の第 10 パーセンタイルの回帰曲線の傾きは第 50 パーセンタイルと平行となった。標準化指標と個葉乾物重の分布も同様、水平を示した。図 4.10(c) (d)にみられるように、分散の大きいパーセンタイル点は、個葉乾物重と個葉葉面積分布が個葉葉面積によって異なることを示唆している。

West, Brown, Enquist は、自然状態で観察される維管束植物のアロメトリックスケーリングの関係を、木部のフラクタル幾何学として提唱し[76]、1枚の葉の代謝は大きさに依存せず、単純にスケーリングされる前提である。West らの理論的構造は多くの研究者が疑問を呈している[148, 149]が、West の予測は、実証的な測定によって検証され支持されている[79, 150]。また、Mori らは、全植物チャンバーを用いた代謝測定により、小型の植物はスケーリング指数が 1 に近く、大型の植物はスケーリング指数が  $3/4$  に収束されることを示している[78]。

ただし、今回行ったトマトの個葉乾物重と個葉葉面積の関係は、これまでのアロメトリー関係で調査されている個体全体の関係と異なる。この場合、仮に密度を一定とすると、体重は体積比例となり、表面積と体重の  $2/3$  乗の幾何学スケールが妥当とも考えられる。これまで、栽培中の植物の評価として、摘葉処理した葉のアロメトリックスケーリング性を評価した例はほとんどなかった。我々の調査では、使用したマナグア、鈴玉、CF 桃太郎ヨークの間の葉面積と乾燥物重のスケーリング指数は中央値で、マナグア 0.66、鈴玉 0.72、CF 桃太郎ヨーク 0.71 であった。また、マナグアと鈴玉はスケーリング指数が  $2/3$  から  $3/4$  の範囲に約半分のパーセンタイル点で入り、CF 桃太郎ヨークでは約 70% が含まれていたことから、栽培植物の除去する葉においても、多くの摘葉した葉は既存のスケーリングモデルで説明できると考えられた。しかし、パーセンタイルの上位や下位では、 $2/3$  から  $3/4$  乗スケールの範囲外であり（図 4.7）。このことは、多重スケーリング性を示している。

この多重スケーリング性は、図 4.8, 4.9, 4.10(a), (b)に表されるように、個葉乾物重が 2g 程度の値が小さい場合の葉面積の分散が大きいためと考えられる。

標準化指標と個葉乾物重の関係においてマナグア, と鈴玉は第 10, 90 パーセンタイル点で回帰式のそれに正負の傾きが確認され, CF 桃太郎ヨークでは第 90 パーセンタイルで回帰曲線に負の傾きが確認された. これらのこととは, 第 10 パーセンタイルの傾きは, 生育期間中に葉が十分に展開しなかった場合が考え. 第 90 パーセンタイルの傾きは, 葉が十分に展開した後に, 光環境が悪い群落内に位置し, 葉の密度が低下したと考えられる.

一方, 標本数, 測定誤差, 統計的分析方法によって, アロメトリックスケーリング指数に影響を与えることが示されている[149]. 使用したデータセットでは, サンプルサイズが 400 から 500 のサイズであり, 多くはないことから多重スケーリング性がみられた可能性は除去できないが, アロメトリック多重スケーリングを用いた拡張アロメトリックスケーリング解析により, 葉の状態評価ができる可能性が示唆された. そして, このことは, 日々植物を管理する中で発生する残渣を利用して, 植物の形態と機能の単一的かつ普遍的なモデルに対する証拠が存在しないなかで, 植物の形態的及び機能性を特徴付ける代替手段としてのアロメトリック多重スケーリングを用いた評価ができる可能性を意味する.

本分析の葉面積は葉面積計を使用したが, 葉長と葉幅から, 葉面積を推定する方法がいくつかある[151, 152]. このことから, 作物の成長が均一な温室栽培のために, 温室内的環境条件を適切に管理し続けるだけでなく, 植物の形態的及び機能的な指標に基づき栽培管理できる可能性がある.

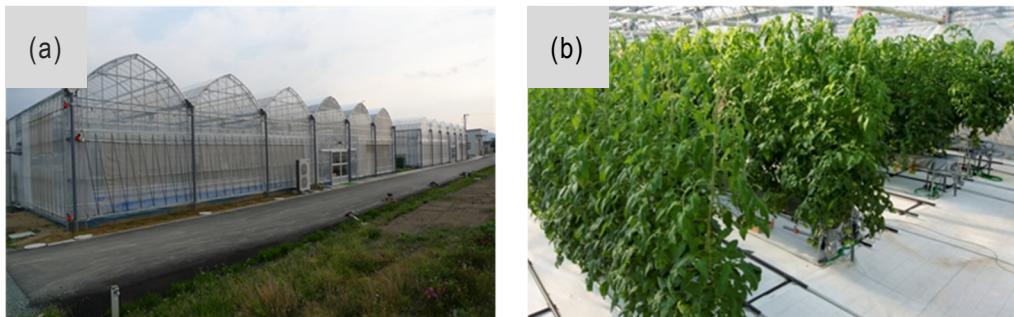


図 4.5 三重県農業研究所温室におけるトマト栽培の様子

(a) 温室の外観 : 軒高 3.7m

(b) トマト栽培の様子 : ハイワイヤー方式により栽培.

#### 4.3 実経営規模で栽培されたトマトの葉重と葉面積

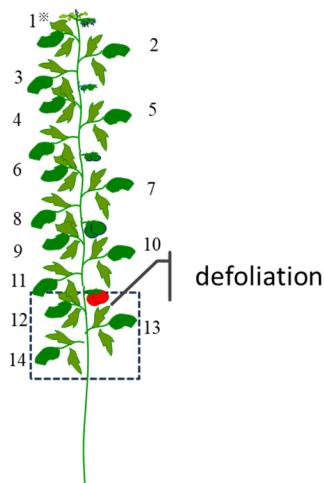


図 4.6 調査に使用したトマト摘葉処理の模式図

※数字は各小葉の番号を示している。

摘葉処理は、この場合第 11 葉を維持するように、第 12, 13, 14 葉を摘葉している。

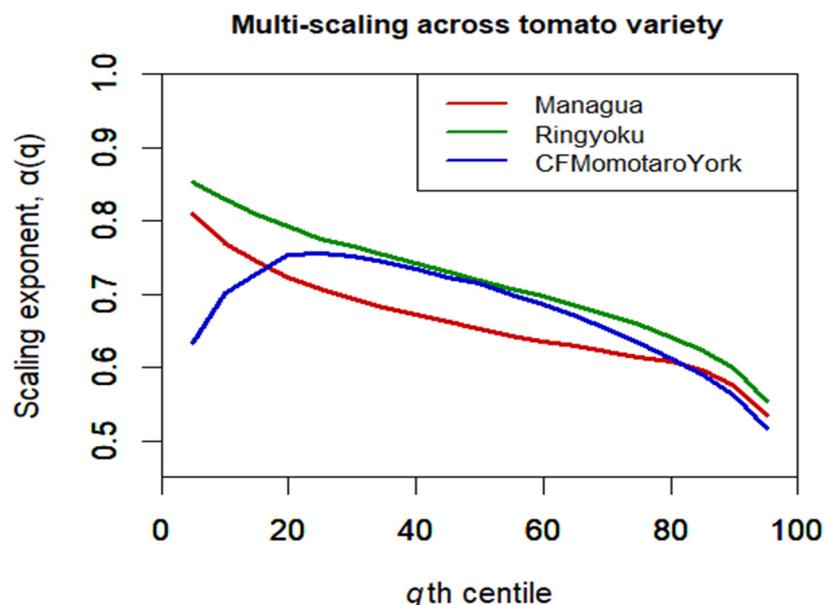


図 4.7 3 つのトマト品種の葉面積と葉乾重に対する各パーセンタイルにおけるスケーリング指数。

マナグア、鈴玉、CF 桃太郎ヨークのいずれの品種もスケーリング指数がパーセンタイルで変化し、多重スケーリング性を示している。スケーリング指数が同じ値であれば、単一スケーリング性であることを示し、異なれば多重スケーリング性であることが示される。

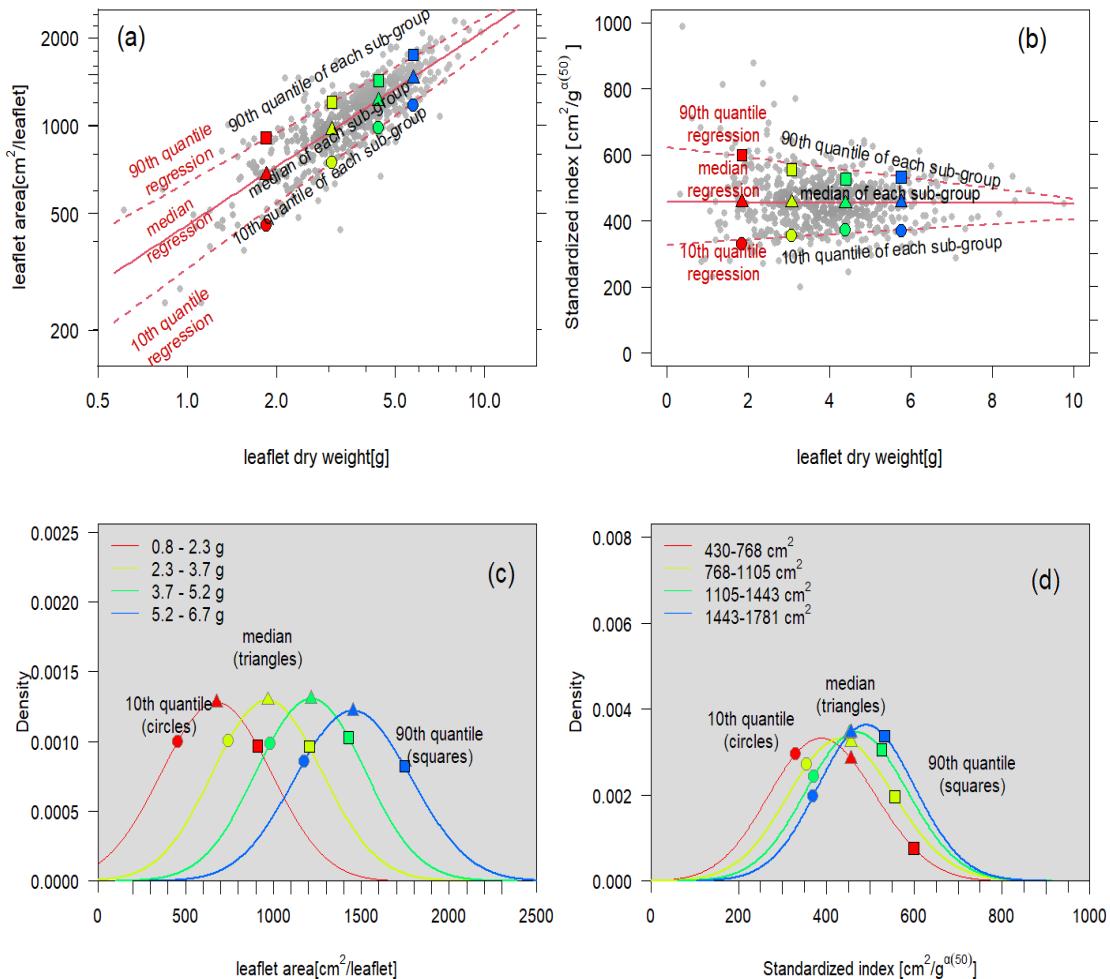


図 4.8 マナグアにおける個葉乾物重と個葉葉面積関係.

多重スケーリングの例.

- (a) 対数スケールの個葉乾物重-個葉葉面積分布（灰色）。
- (b) 標準化指標：個葉葉面積/個葉乾物重 $^{0.66}$ と個葉乾物重分布（灰色）を線形スケールで示している。
- (a) と (b) では、第 10, 50, 90 パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各葉面積層における葉乾重分布の第 10, 50, 90 パーセンタイルの点はそれぞれ丸と三角と四角で示している。
- (c) 各個葉乾物重層別の個葉葉面積分布。
- (d) 各個葉乾物重層の標準化指標：個葉葉面積/個葉乾物重 $^{0.66}$ 分布。
- (c) と (d) では、各個葉葉面積層における分布の第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイル点をそれぞれ丸と三角と四角で示している。
- 4 個の個葉乾燥物重層は中央値±2.0SD の範囲で定義している。

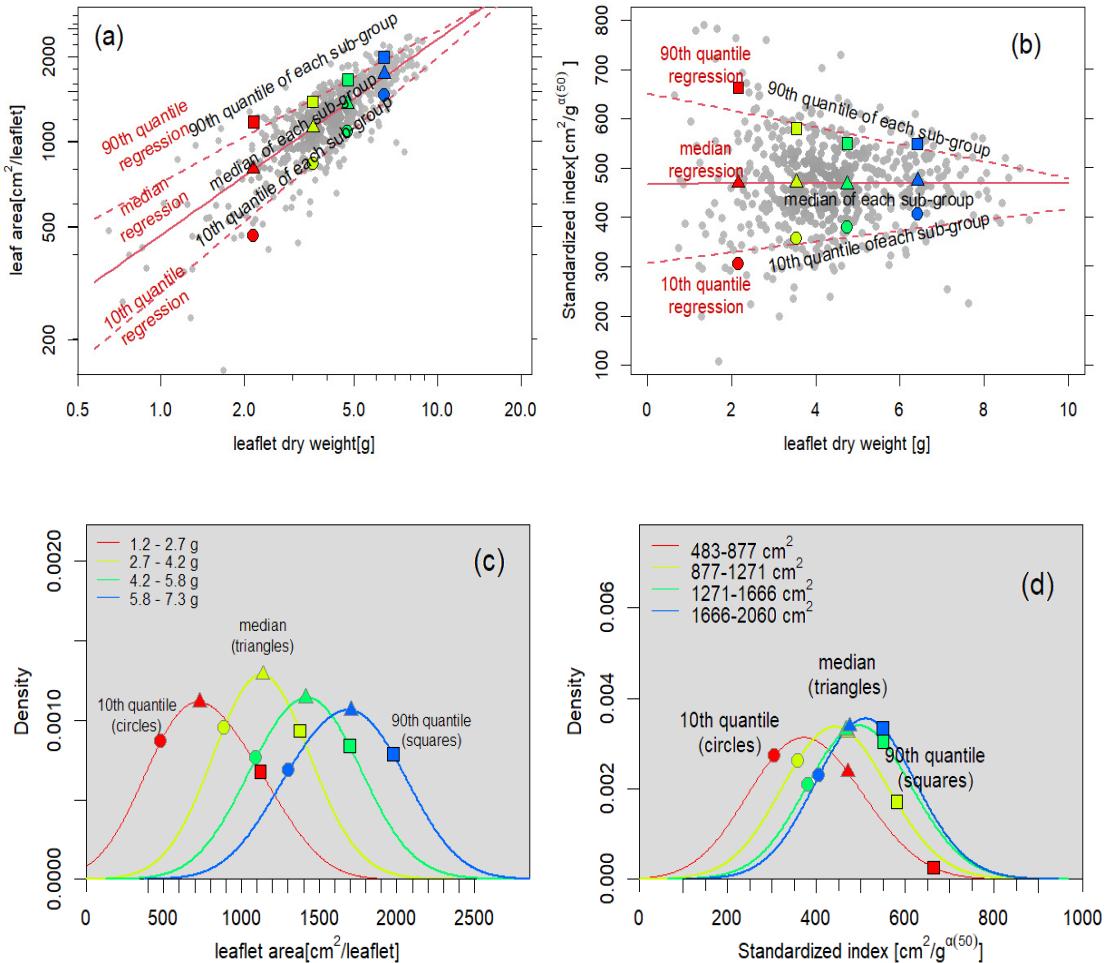


図 4.9 鈴玉における個葉乾物重と個葉葉面積関係.

多重スケーリングの例.

- 対数スケールの個葉乾物重-個葉葉面積分布（灰色）。
  - 標準化指標：個葉葉面積/個葉乾物重 $^{0.72}$ と個葉乾物重分布（灰色）を線形スケールで示したもの。
  - (a)と(b)では、第10, 50, 90パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各葉面積層における葉乾重分布の第10, 50, 90パーセンタイルの点はそれぞれ丸と三角と四角で示している。
  - 各個葉乾物重層別の個葉葉面積分布。
  - 各個葉乾物重層の標準化指標：個葉葉面積/個葉乾物重 $^{0.72}$ 分布。
  - (c)と(d)では、各個葉葉面積層における分布の第10, 第50, 第90パーセンタイル点をそれぞれ丸と三角と四角で示している。
- 4個の個葉乾燥物重層は中央値±2.0SDの範囲で定義している。

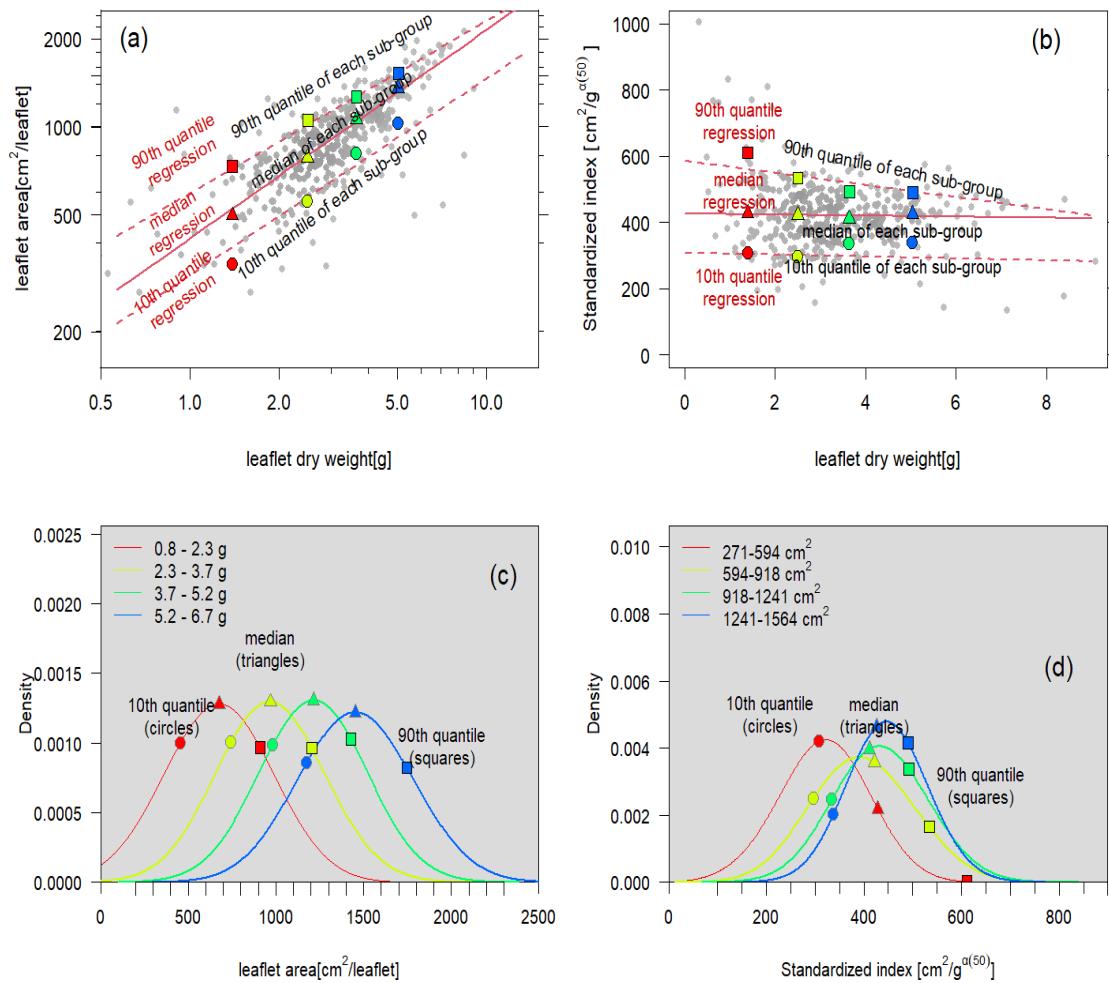


図 4.10 鈴玉における個葉乾物重と個葉葉面積関係.

多重スケーリングの例.

- 対数スケールの個葉乾物重-個葉葉面積分布（灰色）。
- 標準化指標：個葉葉面積/個葉乾物重 $^{0.71}$ と個葉乾物重分布（灰点）を線形スケールで示したもの。
- （a）と（b）では、第 10, 50, 90 パーセンタイルの回帰曲線は赤線で描かれ、各葉面積層における葉乾重分布の第 10, 50, 90 パーセンタイルの点はそれぞれ丸と三角と四角で示している。

（c）各個葉乾物重層別の個葉葉面積分布。

- 各個葉乾物重層の標準化指標：個葉葉面積/個葉乾物重 $^{0.71}$ 分布。
- （c）と（d）では、各個葉葉面積層における分布の第 10, 第 50, 第 90 パーセンタイル点をそれぞれ丸と三角と四角で示している。

4 個の個葉乾燥物重層は中央値±2.0SD の範囲で定義している。

#### 4.4 第4章のまとめ

BMI の妥当性を検証するなかで、新たに創出したアロメトリック多重スケーリングの考え方を用い、様々な動植物のアロメトリック関係を示すデータを分析したところ、アロメトリック関係が一様ではなく、多重スケーリング性を示すことが確認された。分析に用いた手法は、分位点回帰を用いることで、べき乗関係を特徴づけるスケーリング指数が、各形質の分布に位置するパーセンタイルに依存していることが明らかになった。すなわち、新たに導出した拡張アロメトリックスケーリング解析は、様々なアロメトリックな関係において、適応できる可能性が高いと考えられる。



## 第5章 結言

本学位論文は、子どもへの痩せ肥満評価基準としての BMI の妥当性を検証する方法論を提示することを最初の目標にした。従来、BMI 式の根拠となるアロメトリック関係（体重と身長のスケーリング）は単一のべき指数で記述されるべき乗則で表現できると仮定されてきた。ここでは、そのような仮定を「アロメトリック単一スケーリング性」と呼び、分位点回帰を用いた拡張アロメトリックスケーリング解析を導入することで、その妥当性を検証する方法論を提案した。さらに、単一スケーリング性が成り立たない場合を「アロメトリック多重スケーリング性」と呼び、子どもの体重-身長関係には多重スケーリング性が見られることを示した。分析には学校保健統計調査で調査された 5 から 17 歳の 7,863,520 人のデータを用いた。男女とも成人に近い 17 歳において、体重-身長関係に単一スケーリング性が見られることが確認し、従来の BMI が、客観的な身長調整体格指標として適切であることを示した。一方、より若い年齢の児童、青年においては、顕著な多重スケーリング性が見られた。体重-身長関係に多重スケーリング性が見られるることは、従来の BMI が適切な身長調整体格指標ではないことを意味する。そのような BMI の欠点を改善するために、体重のパーセンタイル曲線のべき指数を用いた拡張 BMI を提案した。拡張 BMI を用いることで、身長依存性ない痩せ・肥満評価が可能になる。

本学位論文では、拡張アロメトリックスケーリング解析を、人の体重-身長関係だけでなく、哺乳類の体重と脳質量の関係、樹木の幹の直径と樹高の関係、栽培中のトマトの個葉葉面積と個葉乾物重の関係にも応用し、それらの関係に多重スケーリング性が存在することを示した。多様な生物学的背景にわたる一様なアロメトリック関係とは対照的な、多重スケーリング性の発見は、動植物に見られる成長過程の理解にとって重要な意味を持つ可能性がある。本学位論文で提案したアプローチは、アロメトリーの発展、および、動植物の成長過程の理解に大きく貢献するものである。

## 謝辞

本学位論文をまとめるにあたり、御懇篤な御指導と御助言を頂いた大阪大学大学院基礎工学研究科清野健教授に心から感謝いたします。清野先生には、研究に対する姿勢や論文作成のみならず、調査対象者との関係構築のいろはや、競争的資金申請に至るまで、時間を惜しまず非常に多くのご教示をいただきました。また、本学位論文のとりまとめにあたり、御懇篤な御指導と御助言を頂き、副査をご担当いただきました出口真次教授ならびに大城理教授に深く感謝を申し上げます。

広島大学大学院人間社会科学研究科緒形ひとみ准教授、兵庫県立大学環境人間学部永井成美教授には、直接御指導をいただきました。

清野研究室の皆様には、常にあたたかく接していました。金子美樹助教[現：九州大学システム情報科学研究院准教授]、重松大輝助教[現：山口大学大学院創成科学研究科准教授]には、研究推進にあたり多くのご教示をいただきました。エバンズ直子特別研究員には、多くの激励をいただきました。

本研究の遂行に関し、三重県農業研究所所長岡本明氏、前所長粂谷斎博士には、社会人でありながらこのような機会をくださいました。副所長北村八祥氏には、組織内にこのような機会を推薦くださいり、そして多くの激励を頂きました。また、地域連携研究課主幹飯場聰子博士、兵庫県立大学自然・環境科学研究所山端直人教授、大阪公立大学現代システム科学研究科大山克己教授には、多くの激励や研究活動の発表の場を頂きました。農研機構施設生産システム研究領域磯崎真英博士、三重大学院生物資源学研究科名田和義教授、JA愛知経済連原正之博士には、多くの激励を頂きました。

研究の実施にあたり、三重県農業研究所生産技術研究室室長小西信幸氏、前室長村上高敏氏、元室長中西理氏、野菜園芸研究課課長近藤宏哉氏、主幹中村浩也氏、主査村田憲昭氏、主任杉村安都武氏、主任小林佑理加氏には、所属の業務遂行に対する多くの支援と激励を頂きました。本研究の開始以来、三重県農業研究所の各位に多大なる御協力を頂きました。

ここに、以上の各位に謹んで御礼申し上げます。

# 参考文献

- [1] Schmidt-Nielsen K. Scaling: Why Is Animal Size so Important? Cambridge University Press, New York (1984)
- [2] Niklas. K.J. Plant Allometry: The Scaling of Form and Process. University of Chicago Press, Chicago (1994)
- [3] Evan G. Graber. 成長および発達に関する序論. MSD マニュアルプロフェッショナル版. (2019) 最終アクセス 2024.8.10.  
<https://www.msdmanuals.com/ja-jp/professional/authors/graber-evan>
- [4] 一般社団法人日本小児内分泌学会. 思春期早発症 最終アクセス 2024.8.10.  
<http://jspe.umin.jp/public/sishunnki.html>
- [5] Abubakar A, Holding P, Van de Vijver FJ, Newton C, Van Baar A. Children at risk for developmental delay can be recognised by stunting, being underweight, ill health, little maternal schooling or high gravidity. *J Child Psychol Psychiatr.* (2010) 51:652–659.
- [6] Prentice AM, Ward KA, Goldberg GR, Jarjou LM, Moore SE, Fulford AJ, et al. Critical windows for nutritional interventions against stunting. *Am Clin Nutr.* (2013) 97:911–918.
- [7] Rogol AD, Clark PA, Roemmich JN. Growth and pubertal development in children and adolescents: Effects of diet and physical activity. *Am J Clin Nutr.* (2000) 72:521S–528S.
- [8] Kulin HE, Bwibo N, Mutie D, Santner SJ. The effect of chronic childhood malnutrition on pubertal growth and development. *Am J Clin Nutr.* (1982) 36:527–536.
- [9] Akseer N, Al-Gashm S, Mehta S, Mokdad A, Bhutta ZA. Global and regional trends in the nutritional status of young people: a critical and neglected age group. *Ann N Y Acad Sci.* (2017) 1393:3–20.
- [10] Deka MK, Malhotra AK, Yadav R, Gupta S. Dietary pattern and nutritional deficiencies among urban adolescents. *J Family Med Primary Care.* (2015) 4:364–368.
- [11] Bisset S, Fournier M, Pagani L, Janosz M. Predicting academic and cognitive outcomes from weight status trajectories during childhood. *Int J*

## 参考文献

- Obes. (2013) 37:154–159.
- [12] Gunstad J, Spitznagel MB, Paul RH, Cohen RA, Kohn M, Luyster FS, et al. Body mass index and neuropsychological function in healthy children and adolescents. *Appetite*. (2008) 50:246–251.
- [13] Bialo SR, Gordon CM. Underweight, overweight, and pediatric bone fragility: Impact and management. *Curr Osteoporos Rep.* (2014) 12:319–328.
- [14] Hanafy NM, Elsehaimy LA, Alzokm SM, Abd El-Raheem SI. Bone mineral density and risk factors of osteoporosis in children. *Egyptian Rheumatol.* (2022) 44:257–260.
- [15] Cunningham-Rundles S, McNeeley DF, Moon A. Mechanisms of nutrient modulation of the immune response. *J Aller Clin Immunol.* (2005) 115:1119–1128.
- [16] Dobner J, Kaser S. Body mass index and the risk of infection—from underweight to obesity. *Clin Microbiol Infect.* (2018) 24:24–28.
- [17] Christian P, Smith ER. Adolescent undernutrition: global burden, physiology, and nutritional risks. *Ann Nutr Metabol.* (2018) 72:316–328.
- [18] Mason J, Bailes A, Beda-Andourou M, Copeland N, Curtis T, Deitchler M, et al. Recent trends in malnutrition in developing regions: vitamin A deficiency, anemia, iodine deficiency, and child underweight. *Food Nutr Bull.* (2005) 26:59–108.
- [19] Chen MY, Yang YJ. Being underweight is an independent risk factor for poor outcomes among acutely critically ill children. *Nutr Clin Pract.* (2018) 33:433–438.
- [20] Do JG, Park CH, Lee YT, Yoon KJ. Association between underweight and pulmonary function in 282,135 healthy adults: a cross-sectional study in Korean population. *Sci Rep.* (2019) 9:14308.
- [21] Kao AM, Arnold MR, Prasad T, Schulman AM. The impact of abnormal BMI on surgical complications after pediatric colorectal surgery. *J Pediatr Surg.* (2019) 54:2300–2304.
- [22] O'Byrne ML, Kim S, Hornik CP, Yerokun BA, Matsouaka RA, Jacobs JP, et al. Effect of obesity and underweight status on perioperative outcomes of congenital heart operations in children, adolescents, and young adults: an analysis of data from the society of thoracic surgeons database.

- Circulation. (2017) 136:704–718.
- [23] Jokela M, Kivimäki M, Elovainio M, Viikari J, Raitakari OT, Keltikangas-Järvinen L. Body mass index in adolescence and number of children in adulthood. *Epidemiology*. (2007) 18:599–606.
- [24] Laru J, Nedelec R, Koivuaho E, Ojaniemi M, Järvelin MR, Tapanainen J, et al. BMI in childhood and adolescence is associated with impaired reproductive function— a population-based cohort study from birth to age 50 years. *Hum Reproduct*. (2021) 36:2948–2961.
- [25] Goldenberg RL, Culhane JF, Iams JD, Romero R. Epidemiology and causes of preterm birth. *Lancet*. (2008) 371:75–84.
- [26] Han Z, Mulla S, Beyene J, Liao G, McDonald SD. Maternal underweight and the risk of preterm birth and low birth weight: a systematic review and meta-analyses. *Int J Epidemiol*. (2011) 40:65–101.
- [27] Han Z, Lutsiv O, Mulla S, McDonald SD, Group KS, et al. Maternal height and the risk of preterm birth and low birth weight: a systematic review and meta-analyses. *J Obstetr Gynaecol Canada*. (2012) 34:721–746.
- [28] Pedersen DC, Bjerregaard LG, Rasmussen KM, Nohr EA, Baker JL. Associations of maternal birth weight, childhood height, BMI, and change in height and BMI from childhood to pregnancy with risks of preterm delivery. *Am J Clin Nutr*. (2022) 115:1217–1226.
- [29] Bjørge T, Engeland A, Tverdal A, Smith GD. Body mass index in adolescence in relation to cause-specific mortality: A follow-up of 230,000 Norwegian adolescents. *Am J Epidemiol*. (2008) 168:30–37.
- [30] Olofin I, McDonald CM, Ezzati M, Flaxman S, Black RE, Fawzi WW, et al. Associations of suboptimal growth with all-cause and cause-specific mortality in children under five years: a pooled analysis of ten prospective studies. *PLoS ONE*. (2013) 8:e64636.
- [31] Strand BH, Kuh D, Shah I, Guralnik J, Hardy R. Childhood, adolescent and early adult body mass index in relation to adult mortality: results from the British 1946 birth cohort. *J Epidemiol Commun Health*. (2010) 66:225–232.
- [32] Falkner B. Children and adolescents with obesity-associated high blood pressure. *J Am Soc Hypertens*. (2008) 2:267–274.
- [33] Paradis G, Lambert M, O'Loughlin J, Lavallée C, Aubin J, Delvin E, et al.

## 参考文献

- Blood pressure and adiposity in children and adolescents. *Circulation.* (2004) 110:1832–1838.
- [34] Ribeiro J, Guerra S, Pinto A, Oliveira J, Duarte J, Mota J. Overweight and obesity in children and adolescents: relationship with blood pressure, and physical activity. *Ann Hum Biol.* (2003) 30:203–213.
- [35] Boyd GS, Koenigsberg J, Falkner B, Gidding S, Hassink S. Effect of obesity and high blood pressure on plasma lipid levels in children and adolescents. *Pediatrics.* (2005) 116:442–446.
- [36] Williams DP, Going SB, Lohman TG, Harsha DW, Srinivasan SR, Webber LS, et al. Body fatness and risk for elevated blood pressure, total cholesterol, and serum lipoprotein ratios in children and adolescents. *Am J Public Health.* (1992) 82:358–363.
- [37] Bjerregaard LG, Jensen BW, Ängquist L, OslerM, Sørensen TI, Baker JL. Change in overweight from childhood to early adulthood and risk of type 2 diabetes. *New Engl J Med.* (2018) 378:1302–1312.
- [38] Hannon TS, Rao G, Arslanian SA. Childhood obesity and type 2 diabetes mellitus. *Pediatrics.* (2005) 116:473–480.
- [39] Goran MI, Ball GD, Cruz ML. Obesity and risk of type 2 diabetes and cardiovascular disease in children and adolescents. *J Clin Endocrinol Metabol.* (2003) 88:1417–1427.
- [40] Narayanan A, Yogesh A, Mitchell RB, Johnson RF. Asthma and obesity as predictors of severe obstructive sleep apnea in an adolescent pediatric population. *Laryngoscope.* (2020) 130:812–817.
- [41] Tauman R, Gozal D. Obesity and obstructive sleep apnea in children. *Paediatr Respir Rev.* (2006) 7:247–259.
- [42] Verhulst SL, Aerts L, Jacobs S, Schrauwen N, Haentjens D, Claes R, et al. Sleepdisordered breathing, obesity, and airway inflammation in children and adolescents. *Chest.* (2008) 134:1169–1175.
- [43] Kessler JI, Jacobs JC, Cannamela PC, Shea KG, Weiss JM. Childhood obesity is associated with osteochondritis dissecans of the knee, ankle, and elbow in children and adolescents. *J Pediatric Orthopaedics.* (2018) 38:e296–299.
- [44] Krul M, van der Wouden JC, Schellevis FG, van Suijlekom-Smit LW, Koes BW. Musculoskeletal problems in overweight and obese children. *Ann*

- Family Med. (2009) 7:352–356.
- [45] Taylor ED, Theim KR, Mirch MC, Ghorbani S, Tanofsky-Kraff M, Adler-Wailes DC, et al. Orthopedic complications of overweight in children and adolescents. *Pediatrics*. (2006) 117:2167–2174.
- [46] Cole TJ, BellizziMC, Flegal KM,DietzWH. Establishing a standard definition for child overweight and obesity worldwide: International survey. *BMJ*. (2000) 320:1240.
- [47] Conde WL, Monteiro CA. Body mass index cutoff points for evaluation of nutritional status in Brazilian children and adolescents. *J Pediatr*. (2006) 82:266–272.
- [48] Li Z, Kim R, Vollmer S, Subramanian S. Factors associated with child stunting, wasting, and underweight in 35 low-and middle-income countries. *JAMA Netw Open*. (2020) 3:e203386.
- [49] Lister NB, Baur LA, Felix JF, Hill AJ, Marcus C, Reinehr T, et al. Child and adolescent obesity. *Nat Rev Dis Prim*. (2023) 9:24.
- [50] Phelps NH, Singleton RK, Zhou B, Heap RA, Mishra A, Bennett JE, et al. Worldwide trends in underweight and obesity from 1990 to 2022: a pooled analysis of 3663 population-representative studies with 222 million children, adolescents, and adults. *Lancet*. (2024) 403:16–22.
- [51] Rachmi CN, Agho KE Li M, Baur LA. Stunting, underweight and overweight in children aged 2. 0-49 years in Indonesia: Prevalence trends and associated risk factors. *PLoS ONE*. (2016) 11:e0154756.
- [52] Wang Y, Lobstein T. Worldwide trends in childhood overweight and obesity. *Int J Pediatr Obes*. (2006) 1:11–25.
- [53] He Q, Karlberg J, BMI. in childhood and its association with height gain, timing of puberty, and final height. *Pediatr Res*. (2001) 49:244–251.
- [54] Han T, Seidell J, Currall J, Morrison C, Deurenberg P, Lean M. The influences of height and age on waist circumference as an index of adiposity in adults. *Int J Obes*. (1997) 21:83–90.
- [55] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). About child & teen BMI. (2022). Available online at: [https://www.cdc.gov/healthyweight/assessing/bmi/childrens\\_bmi/about\\_childrens\\_bmi.html](https://www.cdc.gov/healthyweight/assessing/bmi/childrens_bmi/about_childrens_bmi.html) (accessed February 14, 2024).
- [56] Dietz WH. Health consequences of obesity in youth: childhood predictors

## 参考文献

- of adult disease. *Pediatrics*. (1998) 101:518–525.
- [57] Ogden CL, Flegal KM, Carroll MD, Johnson CL. Prevalence and trends in overweight among US children and adolescents, 1999-2000. *JAMA*. (2002) 288:1728–1732.
- [58] World Health Organization (WHO). Growth reference data for 5-19 years. (2022). Available online at: <https://www.who.int/toolkits/growth-reference-data-for-5to19-years> (accessed February 14, 2024).
- [59] Flegal KM, Ogden CL, Yanovski JA, Freedman DS, Shepherd JA, Graubard BI, et al. High adiposity and high body mass index-for-age in US children and adolescents overall and by race-ethnic group. *Am J Clin Nutr*. (2010) 91:1020–1026.
- [60] Freedman DS, Wang J, Thornton JC, Mei Z, Pierson Jr RN, Dietz WH, et al. Racial/ethnic differences in body fatness among children and adolescents. *Obesity*. (2008) 16:1105–1111.
- [61] Gallagher D, Visser M, Sepulveda D, Pierson RN, Harris T, Heymsfield SB. How useful is body mass index for comparison of body fatness across age, sex, and ethnic groups? *Am J Epidemiol*. (1996) 143:228–239.
- [62] Heymsfield SB, Peterson CM, Thomas DM, Heo M, Schuna Jr J. Why are there race/ethnic differences in adult body mass index-adiposity relationships? A quantitative critical review. *Obes Rev*. (2016) 17:262–275.
- [63] Camhi SM, Bray GA, Bouchard C, Greenway FL, Johnson WD, Newton RL, et al. The relationship of waist circumference and BMI to visceral, subcutaneous, and total body fat: sex and race differences. *Obesity*. (2011) 19:402–408.
- [64] Power ML, Schulkin J. Sex differences in fat storage, fat metabolism, and the health risks from obesity: possible evolutionary origins. *Br J Nutr*. (2008) 99:931–940.
- [65] Staiano A, Katzmarzyk P. Ethnic and sex differences in body fat and visceral and subcutaneous adiposity in children and adolescents. *Int J Obes*. (2012) 36:1261–1269.
- [66] Johnson W, Li L, Kuh D, Hardy R. How has the age-related process of overweight or obesity development changed over time? Co-ordinated analyses of individual participant data from five United Kingdom birth

- cohorts. PLoS Med. (2015) 12:e1001828.
- [67] Silva AM, Shen W, Heo M, Gallagher D, Wang Z, Sardinha LB, et al. Ethnicityrelated skeletal muscle differences across the lifespan. Am J Hum Biol. (2010) 22:76–82.
- [68] Meeuwesen S, Horgan G, EliaM. The relationship between BMI and percent body fat, measured by bioelectrical impedance, in a large adult sample is curvilinear and influenced by age and sex. Clin Nutr. (2010) 29:560–566.
- [69] Müller MJ, Braun W, Enderle J, Bosy-Westphal A. Beyond BMI: conceptual issues related to overweight and obese patients. Obesity Facts. (2016) 9:193–205.
- [70] Rothman KJ. BMI-related errors in the measurement of obesity. Int J Obes. (2008) 32:S56–59.
- [71] Flegal KM, Graubard BI, Williamson DF, Gail MH. Cause-specific excess deaths associated with underweight, overweight, and obesity. JAMA. (2007) 298:2028–2037.
- [72] Matsuda T, Kuroyanagi Y, Okasora K, Takitani K, Takaya R, Ashida A. Percentage of overweight is overestimated in children of short stature. Pediatrics International (2022) 64: e14985.
- [73]. Galileo.G. (1638) Discorsi e dimostrazioni mathematiche, intro a due nuove scienze (Dialogues concerning two new sciences). Trans. H.Crew and A.De Salvio. New York. (1914)
- [74] Kleiber M. Body size and metabolism. Hilgardia, (1932) 6:315-353.
- [75] 小山耕平,八木光晴,福森香代子,森茂太.代謝スケーリング理論：個体生理と生態系をつなぐ統合的アプローチ. 日本生態学会誌 (2013) 63:85-89.
- [76] West GB, Brown JH, Enquist BJ. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. Nature (1999) 400:664-667.
- [77] Enquist BJ, Kerkhoff AJ, Stark SC, Swenson NG, McCarthy MC, Price CA. A general integrative model for scaling plant growth, carbon flux, and functional trait spectra. Nature, (2007) 449:218-222.
- [78] Mori S, Yamaji K, Ishida A, Prokushkin SG, Masyagina OV, Hagihara A, et al. Mixed-power scaling of whole-plant respiration from seedlings to giant trees. Proceedings of the National Academy of Sciences, (2010) 107:1447-1451.
- [79] West GB, Brown JH, Enquist BJ The fourth dimension of life: Fractal

## 参考文献

- geometry and allometric scaling of organisms. *Science*, (1999) 284:1677–1679.
- [80] Glazier DS. Beyond the ‘3/4-power law’: variation in the intra-and interspecific scaling of metabolic rate in animals. *469 Biol. Rev.* (2005) 80:611–662.
- [81] Muir CD and Meret TH. Constraint around quarter-power allometric scaling in wild tomatoes (*Solanum* sect. *Lycopersicon*; Solanaceae). *Am Nat.* (2015) 186(3):421–433.
- [82] Müller M. J. et al. Effect of constitution on mass of individual organs and their association with metabolic rate in humans—A detailed view on allometric scaling. *PloS One* (2011) 6:e22732.
- [83] 八木光晴, 及川信. 生物の体サイズとアロメトリー: エネルギー代謝量と体サイズ. 比較生理生化学 (2008) 25:68–72.
- [84] White CR, Cassey P, Blackburn TM. Allometric exponents do not support a universal metabolic allometry. *Ecology*. (2007) 88:315–323.
- [85] Dai J, H Liu, Y Wang, Q Guo, T Hu, T Quine, S Green, H Hartmann, C Xu, X Liu, Z. Jiang. Drought-modulated allometric patterns of trees in semi-arid forests. *Commun. Biol.* (2020) 3:405.
- [86] Osada N. Height-dependent changes in shoot structure and tree allometry in relation to maximum height in four deciduous tree species. *Funct. Ecol.* (2011) 25:777–786.
- [87] Ogata H, Isoyama Y, Nose-Ogura S, Nagai N, Kayaba M, Joao, 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*. (2024);19(7):e0307238.
- [88] Florey CdV. The use and interpretation of ponderal index and other weight-height ratios in epidemiological studies. *Journal of Chronic Diseases*. (1970) 23(2):93–103.
- [89] Agrawal D. Metabolic rate M 0.75 in human beings. *Physics Education*. (2014) 49(6):685.
- [90] Heymsfield SB, Peterson CM, Thomas DM, Heo M, Schuna Jr JM, Hong S, et al. Scaling of adult body weight to height across sex and race/ethnic groups: relevance to BMI. *The American Journal of Clinical Nutrition*. (2014) 100(6):1455–1461.

- [91] Wiederhold BK. The Weight of It: Tech Tools to Manage Obesity. *Cyberpsychol Behav Soc Netw.* (2023) 26(8):577-578.
- [92] Abramowitz MK, Hall CB, Amodu A, Sharma D, Androga L, Hawkins M. Muscle mass, BMI, and mortality among adults in the United States: A population-based cohort study. *PloS One.* (2018);13(4):e0194697.
- [93] Visaria A, Setoguchi S. Body mass index and all-cause mortality in a 21st century US population: *PloS One.* (2023);18(7):e0287218
- [94] Cole TJ, Lobstein T. Extended international (IOTF) body mass index cut-offs for thinness, overweight and obesity. *Pediatric Obesity.* (2012) 7(4):284–294.
- [95] Keys A, Fidanza F, Karvonen MJ, Kimura N, Taylor HL. Indices of relative weight and obesity. *Journal of Chronic Diseases.* (1972) 25(6-7):329–343.
- [96] World Health Organization. Physical Status: The use and Interpretation of Anthropometry, Report of a WHO Expert Committee (Technical Reports Series No 854). WHO: Geneva. (1995).
- [97] Benn R. Some mathematical properties of weight-for-height indices used as measures of adiposity. *British Journal of Preventive & Social Medicine.*(1971) 25(1):42–50.
- [98] Watson PE, Watson ID, Batt RD. Obesity indices. *The American Journal of Clinical Nutrition.* (1979) 32(4):736–737.
- [99] Cole T. Weight/height<sup>p</sup> compared to weight/height<sup>2</sup> for assessing adiposity in childhood: influence of age and bone age on p during puberty. *Annals of Human Biology.* (1986) 13(5):433–451
- [100] Heymsfield SB, Childers D, Beetsch J, Allison DB, Pietrobelli A. Body size and human energy requirements: reduced mass-specific resting energy expenditure in tall adults. *Journal of Applied Physiology.* (2007) 103(5):1543–1550.
- [101] Koenker R, Bassett Jr G. "Regression quantiles. *Econometrica: journal of the Econometric Society.* (1978) 33-50.
- [102] Cole T, Flegal KM, Nicholls D, Jackson AA. Body mass index cut offs to define thinness in children and adolescents: international survey. *Bmj* 335. (2007):194.
- [103] Silverman B, Young G. The bootstrap: to smooth or not to smooth?

## 参考文献

- Biometrika. (1987) 74(3):469–479.
- [104] Scott DW. Multivariate density estimation: theory, practice, and visualization. John Wiley & Sons. New York. (2015)
- [105] Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. The computer journal. (1965) 7(4):308–313.
- [106] Nuttall FQ. Body mass index: obesity, BMI, and health: a critical review. Nutrition Today. (2015) 50(3):117–128
- [107] Hulbert AJ. A sceptics view: “Kleiber’s Law” or the “3/4 Rule” is neither a law nor a rule but rather an empirical approximation. Systems. (2014) 2(2):186–202.
- [108] Holliday M, Potter D, Jarrah A, Bearg S. The relation of metabolic rate to body weight and organ size. Pediatric research. (1967) 1(3):185–195.
- [109] 生魚(澤村)薰, 橋本令子, 村田光範. "学校保健における新しい体格判定基準の検討." 新基準と旧基準の比較, および新基準による肥満傾向児並びに痩身傾向児の出現頻度にみられる 1980 年度から 2006 年度にかけての年次推移について-小児保健研究 69.1 (2010): 6–13.
- [110] Silverman MP. Exact Statistical Distribution of the Body Mass Index (BMI): Analysis and Experimental Confirmation. Open Journal of Statistics (2022) 12:3.
- [111] Sibly RM, Brown JH, Brown K, A. Metabolic Ecology: A Scaling Approach. John Wiley & Sons, New York. (2012).
- [112] Burger JR, George Jr MA, Leadbetter C, Shaikh F. The allometry of brain size in mammals. J. Mammal. (2019) 100:276–283.
- [113] Jerison, H. Evolution of the Brain and Intelligence. Academic Press, New York. (2012).
- [114] Sol D, Bacher S, Reader SM, Lefebvre L. Brain size predicts the success of mammal species introduced into novel environments. Am. Nat. (2008) 172:63–71.
- [115] Boddy AM, McGowen R, Sherwood CC, Grossman LI, Goodman M, Wildman DE. Comparative analysis of encephalization in mammals reveals relaxed constraints on anthropoid primate and cetacean brain scaling. J. Evol. Biol. (2012) 25:981–994.
- [116] Isler K, van Schaik CP. The expensive brain: A framework for explaining evolutionary changes in brain size. J. Hum. Evol. (2009) 57:392–400.

- [117] Stankowich T, Romero AN. The correlated evolution of antipredator defences and brain size in mammals. *Proc. Royal Soc. B: Biol. Sci.* (2017) 284:20161857.
- [118] Brown JH, Gillooly JF, Allen AP, Savage VM, West GB. Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology* (2004) 85:1771–1789.
- [119] Brown JH, Hall CA, Sibly RM. Equal fitness paradigm explained by a trade-off between generation time and energy production rate. *Nat. Ecol. & Evol.* (2018) 2:262–268.
- [120] Armstrong E. Relative brain size and metabolism in mammals. *Science* (1983) 220:1302–1304.
- [121] Martin RD. Relative brain size and basal metabolic rate in terrestrial vertebrates. *Nature*. (1981) 293:57–60.
- [122] Isler K, Van Schaik CP. Metabolic costs of brain size evolution. *Biol. Lett.* (2006) 2:557–560.
- [123] Sobrero R, May-Collado LJ, Agnarsson I, Hernández CE. Expensive brains: “Brainy” rodents have higher metabolic rate. *Front. Evol. Neurosci.* (2011) 3:2.
- [124] Tsuboi M, Bijl W, Kopperud BT, Erritzøe J, Voje KL, et al. Breakdown of brain–body allometry and the encephalization of birds and mammals. *Nat. Ecol. & Evol.* (2018) 2:1492–1500.
- [125] Pagel MD, Harvey PH. The taxon-level problem in the evolution of mammalian brain size: Facts and artifacts. *Am. Nat.* (1988) 132:344–359.
- [126] Lande R. Quantitative genetic analysis of multivariate evolution, applied to brain: Body size allometry. *Evolution* (1979) 33:402–416.
- [127] Smaers JB, Dechmann DK, Goswami A, Soligo C, Safi K. Comparative analyses of evolutionary rates reveal different pathways to encephalization in bats, carnivorans, and primates. *Proc. Natl. Acad. Sci.* (2012) 109:18006–18011.
- [128] Isler K, van Schaik CP. Allomaternal care, life history and brain size evolution in mammals. *J. Hum. Evol.* (2012) 63.
- [129] Wilson DE, Reeder DM. *Mammal Species of the World: A Taxonomic and Geographic Reference*, vol. 1 Johns Hopkins University Press, Baltimore. MD (2005).
- [130] Jones KE, Bielby J, Cardillo M, Fritz SA, O'Dell J, Orme DL, et al.

## 参考文献

- PanTHERIA: A species-level database of life history, ecology, and geography of extant and recently extinct mammals: Ecological Archives E090–184. *Ecology* (2009) 90:2648–2648.
- [131] Myhrvold NP, Baldridge E, Chan B, Morgan SK, et al. An amniote life-history database to perform comparative analyses with birds, mammals, and reptiles: Ecological Archives E096–269. *Ecology* (2015) 96:3109–3109.
- [132] Fonseca-Azevedo K, Herculano-Houzel S. Metabolic constraint imposes tradeoff between body size and number of brain neurons in human evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci.* (2012) 109:18571–18576.
- [133] Piersma T, Van Gils JA. *The Flexible Phenotype: A Body-centred Integration of Ecology, Physiology, and Behaviour*. Oxford University Press. New York (2011).
- [134] West GB, Brown JH, Enquist BJ. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science* (1997) 276:122–126.
- [135] Feldpausch TR, Banin L, Phillips OL, Baker TR, Lewis SL, et al. Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences* (2011) 8:1081–1106.
- [136] Hulsho CM, Swenson NG, Weiser MD. Tree height–diameter allometry across the United States. *Ecol. Evol.* (2015) 5:1193–1204.
- [137] Bertram JE. Size-dependent differential scaling in branches: The mechanical design of trees revisited. *Trees* (1989) 3:241–253.
- [138] McMahon TA, Kronauer RE. Tree structures: Deducing the principle of mechanical design. *J. Theor. Biol.* (1976) 59:443–466.
- [139] Norberg RA. Theory of growth geometry of plants and self-thinning of plant populations: Geometric similarity, elastic similarity, and different growth modes of plant parts. *Am. Nat.* (1988) 131:220–256.
- [140] Niklas KJ, Spatz HC. Growth and hydraulic (not mechanical) constraints govern the scaling of tree height and mass. *Proc. Natl. Acad. Sci.* (2004) 101:15661–15663.
- [141] Jucker T, Fischer FJ, Chave J, Coomes DA, Caspersen J, et al. Tallo: A global tree allometry and crown architecture database. *Glob. Chang. Biol.* (2022) 28:5254–5268.
- [142] Morán-López T, Poyatos R, Llorens P, Sabaté S. Effects of past growth

- trends and current water use strategies on Scots pine and pubescent oak drought sensitivity. *Eur. J. For. Res.* (2014) 133:369–382.
- [143] Martín-Gómez P, Aguilera M, Pemán J, Gil-Pelegrín E, Ferrio JP. Contrasting ecophysiological strategies related to drought: The case of a mixed stand of scots pine (*Pinus sylvestris*) and a submediterranean oak (*Quercus subpyrenaica*). *Tree Physiol.* (2017) 37:1478–1492.
- [144] Goodman RC, Phillips OL, Baker TR. The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecol. Appl.* (2014) 24:680–698.
- [145] Enquist BJ, Allen AP, Brown JH, Gillooly JF, Kerkhoff AJ, Niklas KJ, Price CA, West GB. Biological scaling: does the exception prove the rule? *Nature.* (2007) 445:9–10
- [146] 増田実, 磯崎真英, 鈴木賢, 小西信幸. 植物工場技術の研究・開発および・実証・展示・教育拠点 (10) 三重実証拠点. *植物環境工学* (2013) 25(2):70–76.
- [147] 磯崎真英, 糸谷齊, 小西信幸, 黒田克利, 佐藤法子, 古田堅持, 鈴木啓史, 田中一久, 富川章. 実規模トマト栽培での排液再利用式ロックウールシステムの有用性の検証(栽培管理・作型) *園芸学研究* (2006) 5(2):135–140.
- [148] Coomes DA, Allen RB. Testing the metabolic scaling theory of tree growth. *Journal of Ecology* (2009) 97:1369–1373.
- [149] Dodds PS, Rothman DH, Weitz JS. Re-examination of the “3/4-law” of metabolism. *Journal of Theoretical Biology.* (2001) 209(1):9–27.
- [150] Anfodillo T, Carraro V, Carrer M, Fior C, Rossi S. Convergent tapering of xylem conduits in different woody species. *New Phytologist.* (2006) 169:279–290.
- [151] 樋江井清隆, 伊藤緑, 番喜宏, 恒川靖弘. 非破壊によりトマトの個葉面積を推定する回帰モデルの構築及び検証. *愛知県農総試研報.* (2018) 50:19–26.
- [152] Koyama K, Smith DD. Scaling the leaf length-times-width equation to predict total leaf area of shoots. *Annals of Botany.* (2022) 13(2):215–230.

## 研究業績リスト

### 学術論文

- 1 . Y. Isoyama, S. Nose-Ogura, M. J. Ijitsu, J. Kruse, N. Nagai, M. Kayaba, H. Ogata, M. Mangalam, K. Kiyono “Age- and height-dependent bias of underweight and overweight assessment standards for children and adolescents”, *Frontiers in public health* 12 (2024)1379897.
- 2 . M. Mangalam, Y. Isoyama, H. Ogata, S. Nose-Ogura, M. Kayaba, N. Nagai, K. Kiyono “Diverse growth strategies: Multi-scale allometry in human development, tree growth, and mammalian morphology”, *Scientific Reports*. (in press)
- 3 . H. Ogata\*, Y. Isoyama\*, S. Nose-Ogura, N. Nagai, M. Kayaba, J. Kruse, I. Seleznov, M. Kaneko, T. Shigematsu, K. Kiyono “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*. (2024) 19(7): e0307238.

\*equal contribution

### 国際学会論文

1. Y. Isoyama, M. Nakashima, M. Kaneko, K. Kiyono “Evaluation of heat stress of workers using wearable biosensors in protected horticulture” AHC2023 The 4th Asian Horticultural Congress 51 (2023)  
(in press)
2. Y. Isoyama, K Kiyono, “Heat Stress Assessment using a Wearable Biosensor Network in Workplace Environments” IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (2022) 421-422.