

早稲田大学審査学位論文
博士（スポーツ科学）

DXA 法を用いた日本人健康小児の運動器の発育様式

Growth pattern of musculoskeletal system in healthy
Japanese children using DXA

2018年1月

早稲田大学大学院スポーツ科学研究科

鳥居 俊
TORII, Suguru

目次

1. 緒言	1
2. 現代の日本人の発育様式に関する研究が必要な理由	5
3. DXA法の測定メカニズム	9
4. 日本人健康小児の身体発育様式—骨量、骨密度、除脂肪量、体脂肪率などの標準値の作成	13
5. 日本人男児の上肢発育様式の検討	21
6. 日本人男児の下肢発育様式の検討	28
7. 日本人女児の四肢発育様式の検討	33
8. PHV年齢に基づく発育様式	37
9. 総合考察	41
謝辞	48

1. 緒言

現在、日本は超高齢社会と呼ばれるように、平均寿命の延伸により 90 歳、100 歳まで健康を維持する必要性に迫られている。これまで注目されていた動脈硬化性疾患や悪性腫瘍に対して、変形性関節症や骨粗鬆症のような運動器疾患が健康寿命を制約し、要支援・要介護の原因疾患として多くを占めることが明らかになった（表 1）¹⁾。その結果、運動器の健康を維持するための方策が求められるようになった。日本整形外科学会は 2007 年に、運動器への関心を高め運動器疾患の進行予防を図るために、運動器の障害により移動機能の低下した状態を「ロコモティブシンドローム」という名称で包括した²⁾。

（単位：%）

平成28年

要介護度	第 1 位		第 2 位		第 3 位	
総 数	認知症	18.0	脳血管疾患（脳卒中）	16.6	高齢による衰弱	13.3
要支援者	関節疾患	17.2	高齢による衰弱	16.2	骨折・転倒	15.2
要支援 1	関節疾患	20.0	高齢による衰弱	18.4	脳血管疾患（脳卒中）	11.5
要支援 2	骨折・転倒	18.4	関節疾患	14.7	脳血管疾患（脳卒中）	14.6
要介護者	認知症	24.8	脳血管疾患（脳卒中）	18.4	高齢による衰弱	12.1
要介護 1	認知症	24.8	高齢による衰弱	13.6	脳血管疾患（脳卒中）	11.9
要介護 2	認知症	22.8	脳血管疾患（脳卒中）	17.9	高齢による衰弱	13.3
要介護 3	認知症	30.3	脳血管疾患（脳卒中）	19.8	高齢による衰弱	12.8
要介護 4	認知症	25.4	脳血管疾患（脳卒中）	23.1	骨折・転倒	12.0
要介護 5	脳血管疾患（脳卒中）	30.8	認知症	20.4	骨折・転倒	10.2

注：熊本県を除いたものである。

表 1 要支援・要介護の原因疾患（平成 28 年度国民生活基礎調査；厚生労働省）

運動器には骨、筋・腱、軟骨、神経など多様な組織から構成される器官が含まれ、その発育様式や加齢変化も個々で異なっている。多くの運動器は発育期に量的に増加し、身体発育完了後には到達した最大量を維持し、やがて減少していくことも示されている。特に骨については、骨粗鬆症の予防のために発育完了時までに蓄積される骨の量（最大到達骨量；peak bone mass）を高めることが提案されている。身体活動やスポーツへの参加は発育期に骨量を増加させる手段として認知されており、海外では発育期の小児を対象とした介入研究も行われている^{3,4,5)}。筋は発育完了後も、さらには高齢期になってもトレーニングによって増加させることが可能であることが知られている^{6,7,8)}が、加齢によって徐々に

量的な減少が生じることも明らかである⁹⁾。全身的に筋量が減少し日常生活動作に支障が生じるサルコペニアという状態もロコモティブシンドロームの1つの要素とされ²⁾、その評価方法も検討されている^{10,11)}。このようにある程度の知見が蓄積されてきた骨、筋に対して、腱や軟骨に関する発育様式や加齢変化の研究は少なく¹²⁾、加齢変化を抑制したり予防したりする方法については未知に近いのが現状である。

運動器の量の計測方法にはCT、MRIという断層画像に基づく方法、X線吸収率から組織重量を算出するDXA法、電気抵抗値から組織重量を算出するインピーダンス法がある。それぞれに長所・短所、限界があるが¹³⁾、少なくとも発育途上の対象を計測する学校現場で使用可能なのは、搬送可能性、測定時間の点からはインピーダンス法装置に限られてしまう。

学校での身体計測によって計測されている身長、体重は時間を要さず簡便に計測可能な発育の指標として近年は発展途上国においても日本人研究者が計測を行い、分析して助言を行っている^{14,15)}。身長は身体各部の骨の長さの合計値（下肢+骨盤+脊椎+頭蓋）と考えることができ、体重は骨、筋・腱、脂肪、神経（脳、脊髄）、その他の内臓の合計値と考えることができる。

一方、体重に占めるさまざまな身体成分の割合、特に体脂肪率を知ることは健康評価の上で重要であり、正確に計測された体脂肪率値をもとに肥満ややせの評価をする必要がある。しかし、児童・生徒の世代の小児で短時間に簡便に体脂肪率を計測できる装置は少なく、最近家庭用も含めて幅広く普及しているインピーダンス法装置も種類の多さ、正確性などの問題で全国一律の計測項目とするには難しい。そのため、性別年齢別身長別の標準体重をもとに肥満、やせの評価が行われているが、小中学生であっても特定のスポーツ競技に専門的に参加している対象では正しい評価ができない危険性がある。

このような背景より、運動器の発育変化を、運動器ごとに正確に数値化することは重要であるが、その実現は容易ではない。DXA装置は運動器のうちで、骨、筋（四肢除脂肪量）や、脂肪量について正確な情報をもたらすことができ、発育状態をより詳細に評価するこ

とが可能となる。

本研究は、DXA 法装置を用いて、健康日本人小児の発育様式を明らかにすることを目的に行なった。小目的として、全般的な発育と骨量・骨密度、脂肪量の発育様式を明らかにすること、部位ごとの割合やプロポーションについての発育の相違を明らかにすること、を設定した。前者は健康日本人小児の標準値を得るための基礎データの作成が最終目的となる。後者は成人と異なる発育途上の身体の特徴がスポーツ動作において生じさせる問題を明らかにし、発育期スポーツ障害の予防に資することが最終目的となる。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 28 年国民生活基礎調査の概況 介護の状況、
(<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa16/index.html>, 2017 年 10 月 9 日参照)
- 2) 日本整形外科学会：新概念「ロコモティブシンドローム（運動器症候群）」。
(<https://www.joa.or.jp/public/locomo/>, 2017 年 10 月 13 日参照.)
- 3) Fritz J, Rosengren BE, Dencker M, et al.: A seven-year physical activity intervention for children increased gains in bone mass and muscle strength. *Acta Paediatr* 105:1216-1224, 2016.
- 4) Coster ME, Rosengren BE, Karisson C, et al.: Effects of an 8-year childhood physical activity intervention on musculoskeletal gains and fracture risk. *Bone* 93:139-145, 2016.
- 5) Specker B, Thiex NW, Sudhagani RG: Does exercise influence pediatric bone? A systematic review. *Clin Orthop Relat Res* 473:3657-3672, 2015.
- 6) Psatha M, Wu Z, Gammie F, et al.: Age-related changes in the effects of strength training on lower leg muscles in healthy individuals measured using MRI. *BMJ Open*

Sport Exerc Med 20:e000249, 2017.

7) Watanabe Y, Madarame H, Ogasawara R, et al.: Effect of very low-intensity resistance training with slow movement on muscle size and strength in healthy older adults. Clin Physiol Funct Imaging 4:463-470, 2014.

8) Stewart VH, Saunders DH, Greig CA: Responsiveness of muscle size and strength to physical training in very elderly people: a systematic review. Scand J Med Sci Sports 24:e1-10, 2014.

9) Makizako H, Shimada H, Doi T, et al.: Age-dependent changes in physical performance and body composition in community-dwelling Japanese older adults. J Cachexia Sarcopenia Muscle 8:607-614, 2017.

10) Furushima T, Miyachi M, Iemitsu M, et al.: Development of prediction equations for estimating appendicular skeletal muscle mass in Japanese men and women. J Physiol Anthropol 36:34, 2017.

11) 真田樹義、宮地元彦、山元健太ほか：日本人成人男女を対象としたサルコペニア簡易評価法の開発. 体力科学 59:291-302, 2010.

12) 鳥居 俊：日本人健康男児の膝関節軟骨厚の発育変化に関する横断的検討. 日小整会誌 22:513-516, 2013.

13) 鳥居 俊：子どもにおける身体組成の評価法と加齢変化. 子どもと発育発達 14(3):226-229, 2016.

14) アチャヤ・ウシャ、大澤清二、下田敦子ほか：ネパールにおける幼児の発育標準値の作成（試案）と提案. 発育発達研究 62:56-65, 2014.

15) Ohsawa S, Shimoda A, Sagawa T, et al.: Growth standards for children's weight of 12 ethnic groups in Myanmar and Thailand. Jpn J Hum Growth Dev Res 51:46-56, 2011.

2. 現代の日本人小児の発育様式に関する研究が必要な理由

わが国では学校で行われた身体計測の結果が明治 33 年度より蓄積されている¹⁾。第二次世界大戦の時期にあたる昭和 15 年から 22 年（1940 年から 1947 年）の計測値は欠損しているが、この時期を除けば 100 年を超える期間の計測値が記録されている。これらは文部科学省のホームページより誰でも参照することが可能になっている。

日本人の体格は第二次世界大戦後の復興と共に著しい向上を遂げたとされている。文部科学省の学校保健統計における 12 歳と 17 歳の身長を 1900 年から 2015 年までプロットすると、図 1 のように 1940 年頃までの増加が途切れ、戦後低い数値から再び増加していくことが示される。その変化は 12 歳でより顕著であり、1940 年以前に減少傾向が見られる。同様に体重の全国平均値をプロットすると、図 2 のように第二次大戦時の減少は 12 歳だけでなく、17 歳男子でも明確に見られた。一方、2000 年以降は身長、体重とも増加が停止し、体重は減少傾向にあるように見える。

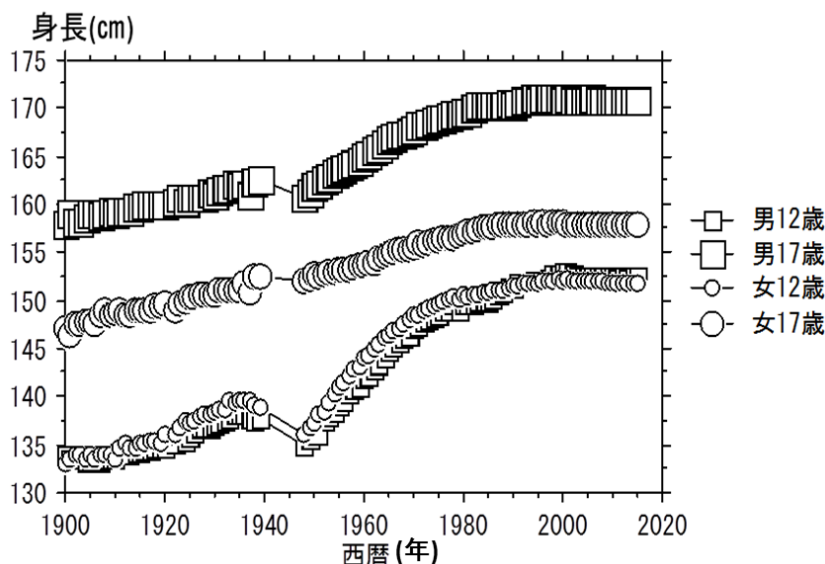


図 1 12 歳、17 歳時の身長の時代変化

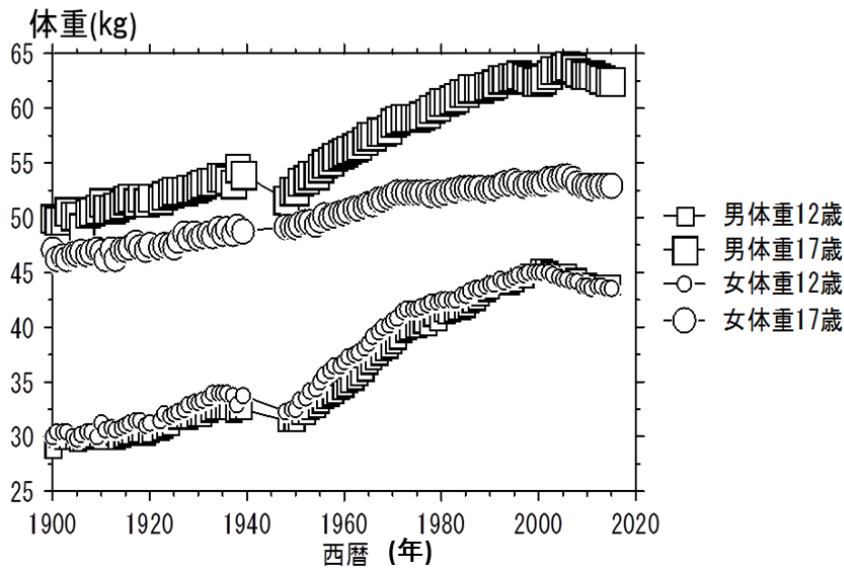


図2 12歳、17歳時の体重の時代変化

身長、体重の全国平均値からBMIを求め同様にプロットすると、図3のように17歳女子では第二次大戦の少し前から低下するが、12歳女子や男子では第二次大戦前の低下が顕著でない。このように、身長や体重、およびこれらから算出されるBMIの時代変化は性別、年齢により異なっている。また、2000年以降12歳のBMIは減少しており、17歳も少し遅れて減少傾向にある。

次に、年間身長増加量の目安として、各年齢の身長の全国平均値を1歳上の全国平均値から引き算することで身長差を算出し、その時代変化を観察する。図4に男子の数値を示すが、全ての年度に対してプロットすると重なりによって変化がわかりにくくなるため、11年ごとの値をプロットした。1972年以降は最も身長差の大きい年代が12-13歳か11-12歳であるのに対して、1950年以前は13-14歳以降になっている。最も身長差が大きい年代が1950年以前より低い年齢になっており、発育のピークが若年齢化していることになる。

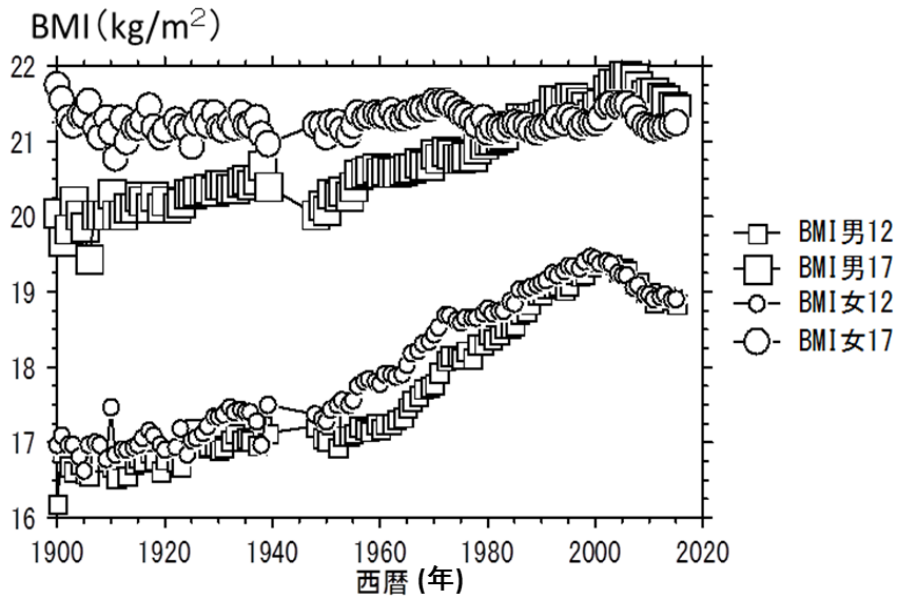


図3 12歳、17歳時のBMIの時代変化

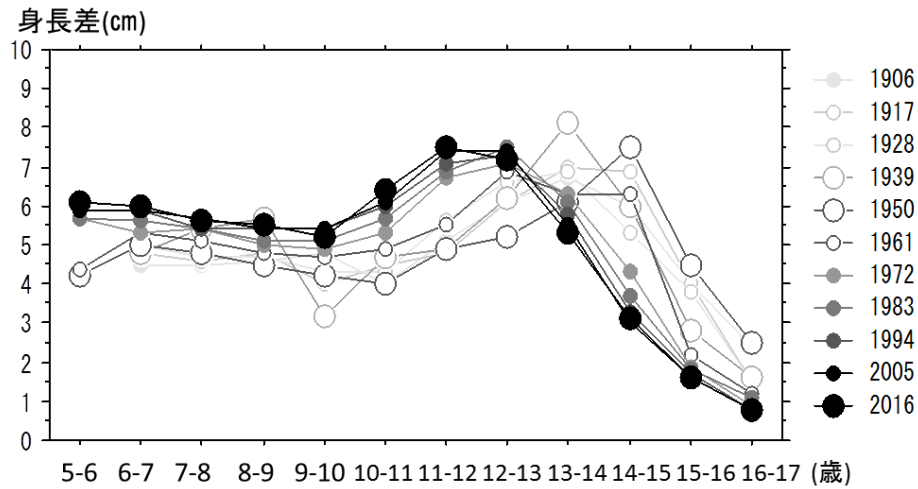


図4 男子の各年齢での身長差の時代変化 (11年毎)

一方、日本人の体型（プロポーション）も変化してきたと考えられている。平成25年まで身体計測において坐高の測定が行われていたため、身長に占める脚長（身長－坐高）の割合を算出することができる。第二次大戦後の1950年から最近までの男子の脚長の割合を図5に示す。6歳児では増加が続いており、12歳児でも増加しその後一定値を維持しているが、15歳、17歳児では1990年頃から減少傾向である。

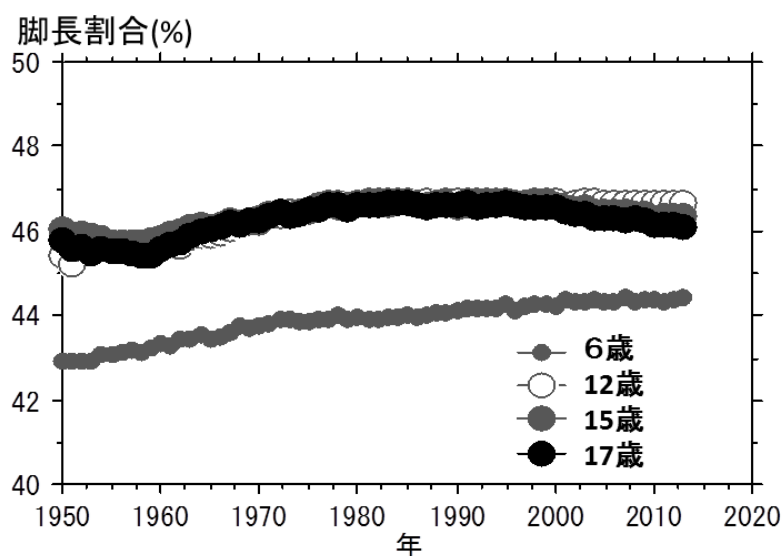


図5 男子の身長に対する脚長の割合の時代変化（6、12、15、17歳）

以上、発育途上の日本人小児の身体は、身長、体重という合計値、これらから算出されるBMI、身長や体重の増加時期、坐高や脚長の割合などに時代変化があり、発育変化の様式にも時代変化があると考えられる。さらに、身体各部の発育は同時並行的に進んでいるわけではなく、骨、筋など運動器ごとに発育様式に違いがあることも知られている。

従って、発育期の身体活動やスポーツの最適時期を決めたり、発育期特有のスポーツ外傷・障害の発生要因を考えたりするためには、現代の日本人小児の発育様式をより詳細に明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 文部科学省：学校保健統計調査．年次統計，
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001014499&cycocode=0>，2017年9月14日参照.

3. DXA 法の計測メカニズムとその活用

DXA (Dual X-ray Absorptiometry) 法は、2 種類の (dual) 波長の異なる X 線 (X-ray) を身体に照射した際に、身体組織に吸収される X 線のエネルギー量の違いから身体組織の成分の量を計算する (absorptiometry) 身体組成測定法である。この方法で算出される身体組織の成分は、骨組織、脂肪組織、除脂肪・除骨組織の 3 種類であり、3 コンパートメントモデルと呼ばれる。従って、身体組織重量 (= 体重) を骨重量、脂肪重量とそれら以外の重量に分けて算出することになる。現状では身体組成測定法として最も精度が高く、golden standard と考えられている。

最近の DXA 装置では、全身スキャンが 3~4 分で行われ、その際の被曝量はわずかであり、胸部 X 線撮影よりもはるかに少量とされている。実際、小児で本研究と同様の全身スキャンを行った際の有効線量は 5 歳児、10 歳児で $0.19\mu\text{Sv}$ 、 $0.15\mu\text{Sv}$ と報告されており、発癌リスクは無視できるものとしている¹⁾。

日本国内では Hologic 社の QDR シリーズと GE 社の Lunar シリーズが稼働している。解析の方法などに多少の違いはあるものの、測定メカニズムは同じである。両者の機器の精度の時間変化を検討した 2007 年の報告では QDR シリーズは 4 年間に変化はなく、一方 Lunar シリーズでは骨密度値が有意に変化したとしている²⁾。従って、この時点では QDR シリーズがより安定した精度で測定できると言える。

運動器の組織のうちで、骨量や骨密度について DXA 法では正確に算出することができ、また体脂肪率に関しても正確な評価が可能である。筋・腱組織は three compartment model では除脂肪・除骨組織(以下、除脂肪組織)に含まれ、体幹では胸部や腹部内臓もその中に含まれることになる。そのため、体幹の筋・腱組織の重量を算出することは不可能である。一方、四肢では筋・腱以外の除脂肪組織が少ない(皮膚、血管、神経など)ため、除脂肪組織重量が筋・腱重量に近接した数値となる。これを利用して、サルコペニアの評価基準に DXA 法測定による四肢除脂肪量値が用いられている³⁾。

なお、頭部、上肢、体幹、下肢の分割は現在の多くの機種で自動的に行われるが、測定時の姿勢・肢位による再現性を考慮して、骨格指標をもとに手動で分割することもできる。

著者らは身体全体を頭頸部、上肢、体幹、下肢の4部位に分割して、部位ごとの発育を検討してきた⁴⁾。頭頸部は両肩峰と第1肋骨を結ぶ線より頭側と、上肢は腋窩と肩関節裂隙を結ぶ線より外方と、下肢は坐骨と大転子を結ぶ接線より遠位部と定義した(図 3.1, 3.2)。さらに、subresion機能を用いて、任意の関心領域(例えば上肢のうちで上腕、前腕など)を設定することも可能であり、関心領域設定の再現性は妥当であると報告されている⁵⁾。

DXA法による測定で得られた画像上で骨長や骨幅、あるいは骨盤形態や肩幅のような長さや幅育の数値化も可能である。長さを検討する手法は1990年頃より大腿骨頸部の力学的指標の算出のため行われ始めた。他の骨に関してはSievanenらが1994年に上腕骨や大腿骨の長さや幅について報告したのが最初である。また、ChinappenらはDXA像からの骨長測定の方法について、ピクセル数から算出する方法とメジャーを当てて縮尺から算出する方法を比較検討し、いずれも相関が高く再現性良好と報告した。

Abrahamyan DOらはDXA画像から身長や四肢分節長を算出する精度について検討し、精度も再現性も良好であることを報告している⁶⁾。また、Volgyi Eらは四肢の主要な骨の長さや肩幅、骨盤幅をDXA上で数値化し、思春期女兒の7年間にわたる縦断変化を報告している⁷⁾。

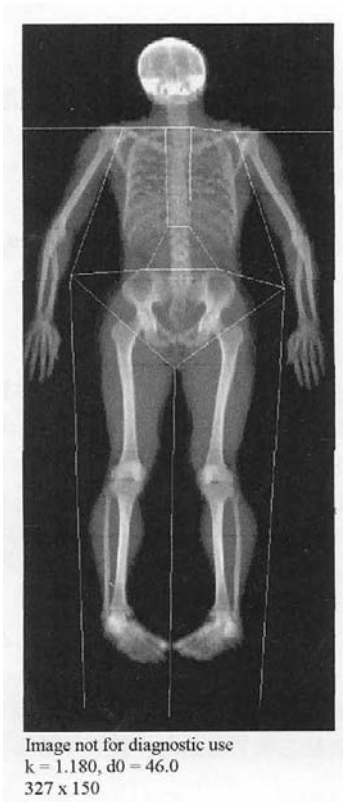


図 3.1 DXA 装置による全身モードでの測定画像と身体部位分割

DXA 測定結果:

領域.....	骨塩量 (g)	脂肪量 (g)	除脂肪量 (g)	除脂肪量+ 骨塩量(g)	トータル (g)	脂肪率
左腕	175.81	1113.3	2678.7	2854.5	3967.7	28.1
右腕	171.85	1128.0	2867.5	3039.3	4167.3	27.1
トランク	577.68	9406.0	26239.3	26817.0	36223.0	26.0
左脚	458.28	2836.9	8900.3	9358.6	12195.5	23.3
右脚	457.77	2990.3	8852.8	9310.6	12300.9	24.3
小計	1841.39	17474.5	49538.6	51379.9	68854.5	25.4
頭部	521.84	1102.5	3773.8	4295.6	5398.2	20.4
トータル	2363.23	18577.1	53312.3	55675.6	74252.6	25.0

TBAR1904

図 3.2 全身モードでの測定結果

参考文献

- 1) Damilakis J, Solomou G, Manios GE, Karatanas A: Pediatric radiation dose and risk from bone density measurements using a GE Lunar Prodigy scanner. Osteoporos Int 24:2025-2031, 2013.
- 2) Hangartner TN: A study of the long-term precision of dual-energy X-ray

absorptiometry bone densitometers and implications for the validity of the least-significant change calculation. *Osteoporosis Int* 18:513-523, 2007.

3) 真田樹義、宮地元彦、山元健太ほか：日本人成人男女を対象としたサルコペニア簡易評価法の開発. *体力科学* 59:291-302, 2010.

4) 鳥居 俊、江川陽介、山本紘平、高橋直美、佐藤亨至：成長期の中学生男子サッカー選手における手部骨年齢と全身および各部位の骨密度との関連性. *日本成長学会雑誌* 12:75-79, 2006.

5) Burkhart TA, Arthurs KL, Andrews DM: Manual segmentation of DXA scan images results in reliable upper and lower extremity soft and rigid tissue mass estimates. *J Biomech* 42:1138-1142, 2009.

6) Abrahamyan DO, Gazarian A, Brailion PM: Estimation of stature and length of limb segments in children and adolescents from whole-body dual-energy X-ray absorptiometry scans. *Pediatr Radiol* 38:311-315, 2008.

7) Volgyi E, Tyllavsky FA, Xu L, Lu J, Wang Q, Alen M, ChengS,: Bone and body segment lengthening and widening: A 7-year follow-up study in pubertal girls. *Bone* 47:773-782, 2010.

4. 日本人健康小児の身体発育様式—骨量、骨密度、除脂肪量、体脂肪率などの標準値の作成

(1) 身長、体重と骨量、脂肪量、除脂肪・除骨量の発育変化

1) 対象と方法

早稲田大学所沢キャンパス近隣の幼稚園、小・中学校に通う健康な小児を対象とし、測定時に月齢で 180 か月以下であり、身体発育の影響を与えるような傷病の既往なく、スポーツ活動については学校の部活動までの範囲の男女児を分析対象とした。対象人数は男児 512 名、女児 233 名であった。年齢は、男児で 4 歳から 15 歳、女児で 5 歳から 14 歳であった。

発育様式を記述するため、年齢を月齢で表示し、月齢と各測定値との関連を回帰分析により検討した。

2) 体格発育

月齢と身長、体重との関係を図 4.1 に示す。いずれも、12 歳頃までは性差がなく、その後男児が女児より高い値になる。

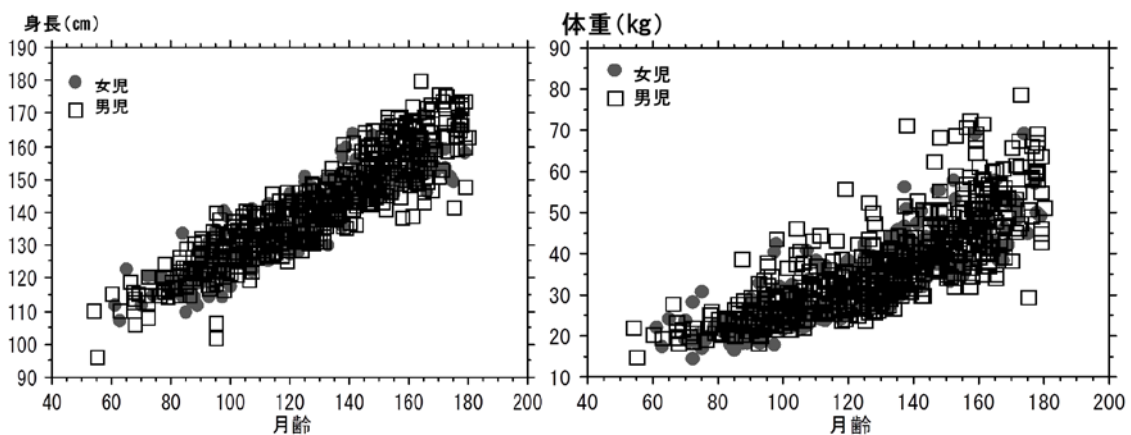


図 4.1 月齢と身長、体重との関係

月齢と除脂肪・除骨量、全身骨量との関係を図 4.2 に示す。どちらも体重と同様に 12

歳頃まで性差がなく、その後男児が高い値となっている。

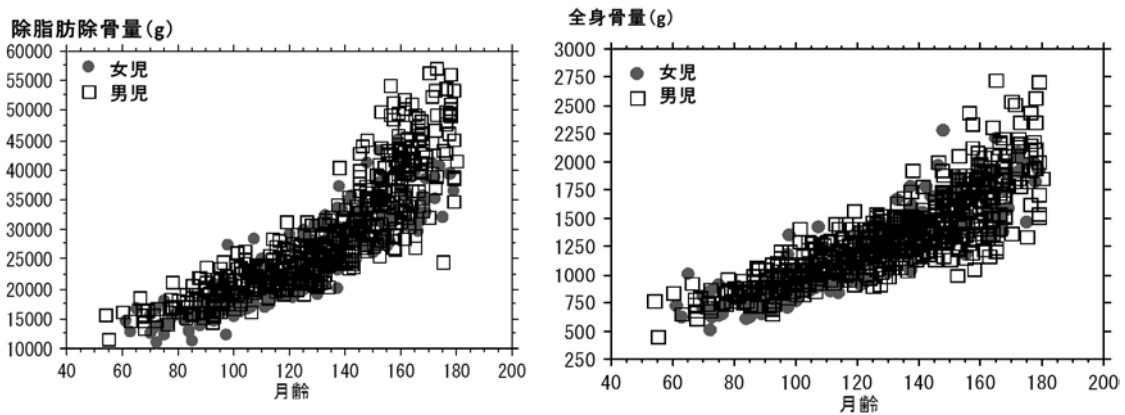


図 4.2 月齢と除脂肪・除骨量、全身骨量との関係

月齢と脂肪量、体重に占める脂肪量の割合である体脂肪率との関係を図 4.3 に示す。他の測定値に比べ、個人差が大きくなっているが、全体として女児が男児より高い値を示す。

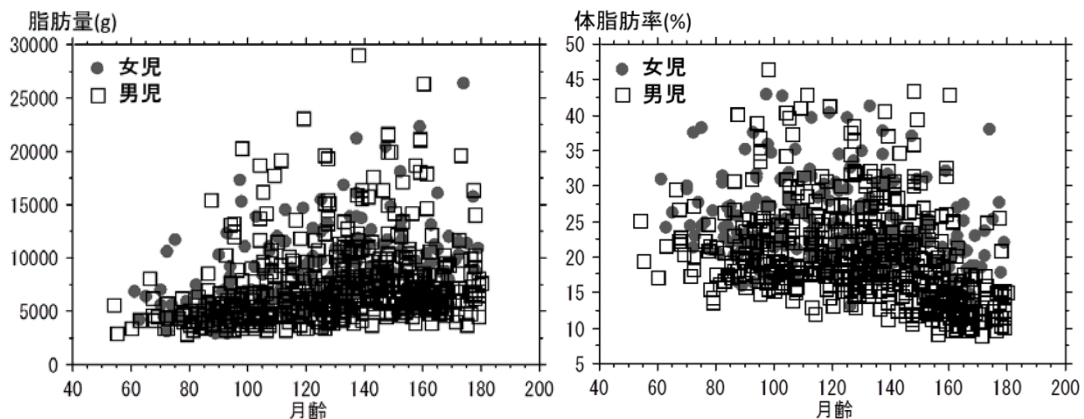


図 4.3 月齢と脂肪量、体脂肪率との関係

3) 骨発育の標準値の作成

全身骨密度の発育様式を明らかにするため、月齢との関係を図示した。図 4.4 のように、年少時はわずかに女児の方が低い値であるが、発育スパートによる立ち上がりが女児では 125 ヶ月頃にあり、その後女児がわずかに高い値となる。男児の立ち上がりは 140 ヶ月頃であり、女児よりも遅れる。男女差については、年齢群別で比較した場合に、6～9 歳群では有意に男児が高く、その後 11 歳群では女児で有意に高い以外は有意差がない(表 4.1)。

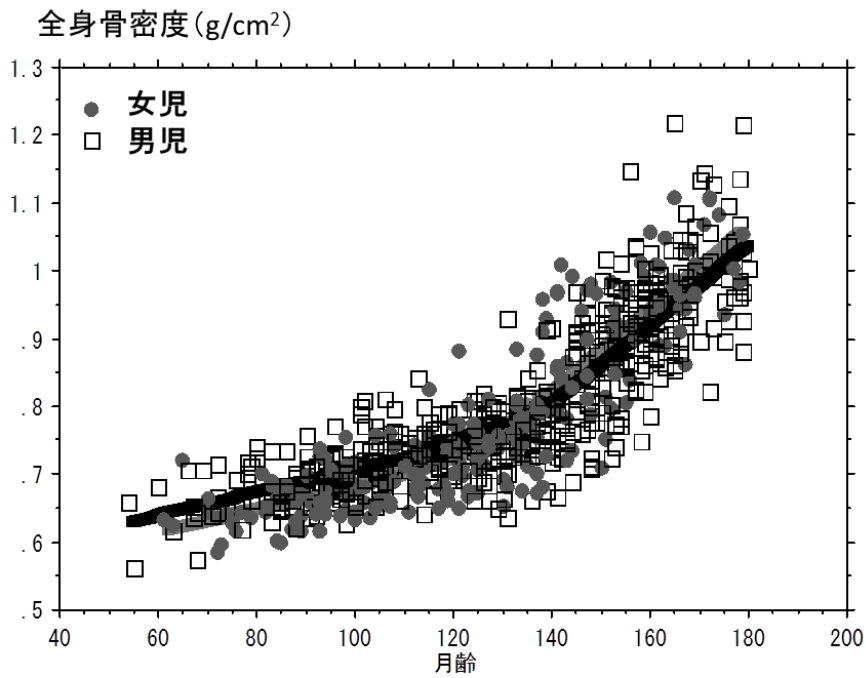


図 4.4 月齢と全身骨密度との関係

表 4.1 年齢群ごとの全身骨密度と性差

	男児 (g/cm ²)	女児 (g/cm ²)	性差
6 歳群	0.672±0.039	0.639±0.034	男児>女児
7 歳群	0.683±0.029	0.665±0.034	男児>女児
8 歳群	0.716±0.041	0.680±0.037	男児>女児
9 歳群	0.734±0.037	0.707±0.038	男児>女児
10 歳群	0.747±0.047	0.733±0.049	差なし
11 歳群	0.768±0.045	0.805±0.085	男児<女児
12 歳群	0.860±0.077	0.875±0.086	差なし
13 歳群	0.936±0.076	0.960±0.066	差なし
14 歳群	1.004±0.083	1.026±0.059	差なし

4) 筋量の発育変化

高齢者ではサルコペニアの指数として、四肢除脂肪量を身長²で除したSkeletal Muscle Index (以下SMI)が用いられている¹⁾。発育途上の小児ではBMIを肥満ややせの指標に用いることが適切でないと考えられているため、SMIを適用することも適切でない可能性が高い。

そこで、本研究の対象において、SMIを算出し、月齢との関連性を検討した。図 4.5 に示すように、男女とも明らかな発育変化を示し、年齢によって標準値やサルコペニアと判定すべきカットオフ値が変化する可能性が示唆された²⁾。

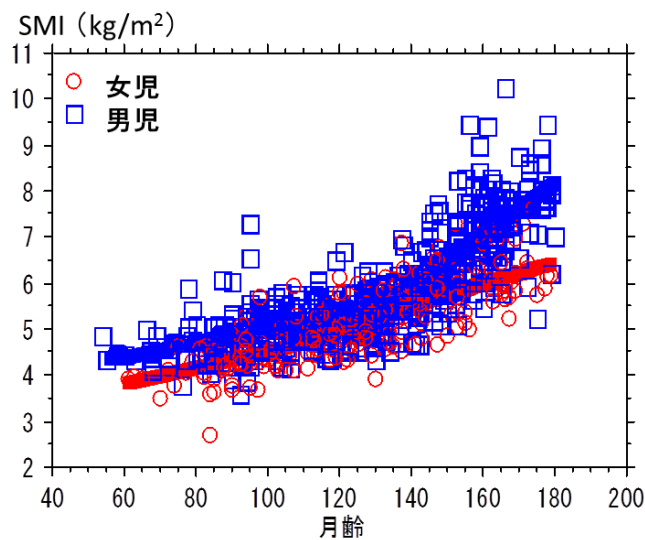


図 4.5 SMI と月齢との関係

(2) 身体各部の発育変化

DXA法では全身スキャンで得られた測定値を、任意の身体部位に分割して部位ごとの重量値を求めることができる。著者らは身体全体を頭頸部、上肢、体幹、下肢の4部位に分割して、部位ごとの発育を検討してきた³⁾。頭頸部は両肩峰と第1肋骨を結ぶ線より頭側と、上肢は腋窩と肩関節裂隙を結ぶ線より外方と、下肢は坐骨と大転子を結ぶ接線より遠位部と定義した(図 4.6)。

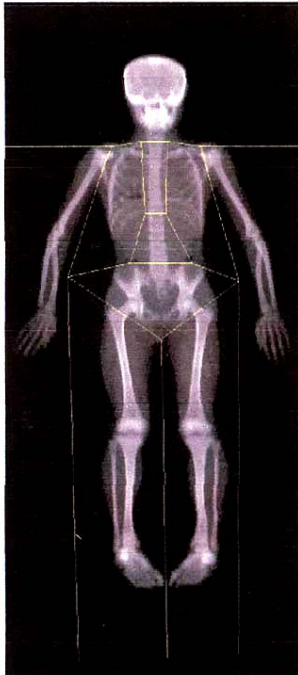


Image not for diagnostic use
k = 1.192, d0 = 49.9
327 x 150

図 4.6 DXA 法による身体部位の分割方法

この分割に基づき、4 部位の重量が体重に占める割合 (%) と月齢との関係を図 4.7 に示した。頭頸部重量割合は月齢と有意な負の相関を示し、年長になるほど減少した。一方、下肢重量割合と体幹重量割合は月齢と有意な正の相関を示し、年長になるほど増大した。上肢重量割合は男児のみ月齢と有意な正の相関を示し、年長になるほど増大したが、変化量は小さかった。

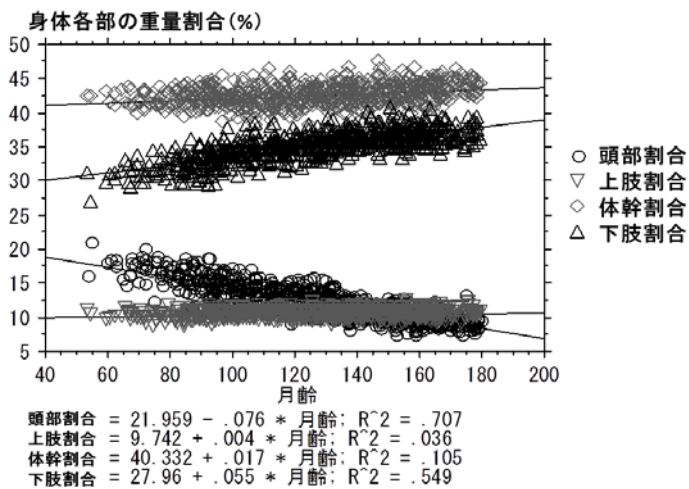


図 4.7 身体各部の重量が体重に占める割合と月齢との関係

同様に、骨量について4部位の骨量が全身骨量に占める割合と月齢との関係を図示した。

図 4.8 のように、頭頸部骨量割合は月齢と有意な負の相関を、他の3部位の骨量割合は月齢と有意な正の相関を示した⁴⁾。

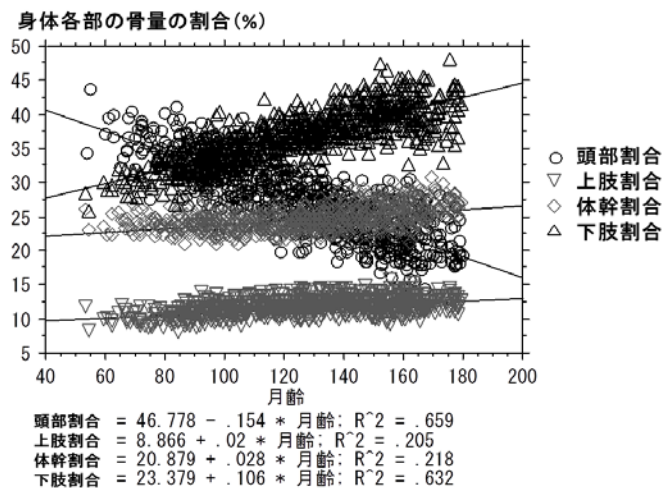


図 4.8 身体各部の骨量が全身骨量に占める割合と月齢との関係

考察

これまで、日本人の健康小児の身体成分量や体脂肪率、および部位ごとの骨量割合に関する標準値は示されていなかった。内分泌疾患やステロイド治療を要する疾患では、本来なら骨量獲得が活発におこる発育期に十分な骨量を形成できない危険性があり、その際に年齢や性別に対する標準値があれば治療の必要性、治療効果の確認が可能となる。

一方、スポーツ活動は骨量や筋量を増加させることが期待されるが、実際に標準値と比較することでスポーツ活動の効果を示すことができる。学校での身体計測では身長、体重をもとに肥満ややせの評価が行われるが、活発なスポーツ活動に参加する者では性別・年齢別標準体重による評価が誤った評価となる危険性がある。この点については別の章で述べる。また、スポーツ活動の効果は年齢や発育段階により異なる可能性があり、運動器発育の観点での最適時期を見出すことができるだろう。

これまで、日本人の小児を対象にDXAを用いて骨量や骨密度、身体組成を測定し、発育変化を論じた研究は西山ら(1999)の報告⁵⁾に留まる。この報告では、小学生から高校生ま

での男女 211 名を対象に横断的に発育変化を論じており、部位別の検討も行っているが、対象数が少ない。

本研究では、関東地区に在住する健康小児であるという限界はあるが、特別なスポーツの影響を受けていない小児の身体発育の標準値を示すことができた。この結果によると、12 歳ごろまでは除脂肪量や骨量に性差は見られず、その後男子の増加が活発になる。一方、脂肪量や体脂肪率は幼少期から女子の方が高値を示し、その差や 12 歳以降大きくなる傾向が見られた。全身骨密度は本研究の年代ではほぼ性差がなく、中学生以降の年代で男子が女子を上回るようになることと推測される。

身体各部の重量割合はプロポーションの目安として算出した。著者らは既に頭頸部重量が体重に占める割合が発育と共に有意に減少することを報告⁶⁾し、発育に伴う変化が著明に見られることを示した。Baileyらは身体各部の骨量が全身骨量に占める割合をカナダ人小児で算出しており⁷⁾、本研究で示した結果はカナダ人小児の結果とほぼ同様であった。身長に対する坐高や脚長の割合が発育に伴って変化することも知られているが、本研究ではDXA計測値に基づいた検討として、重量の割合を用いた。なお、著者らは上肢、下肢の筋量の比率が発育に伴って変化することを既に報告している⁸⁾。

DXAを用いることで、身長、骨量、筋量（除脂肪量）の発育時期の順序を明らかにすることができ、著者らは年 2 回の継続的な測定を 3 年間行った中学生男子サッカー選手を対象に検討し、カナダ人でRauchらが報告した結果⁹⁾と同様に、身長、除脂肪量、骨量の順に最大増加時期が訪れることを示している¹⁰⁾。この結果から、日本人でも運動器の発育順序（骨長→筋量→骨量）は保たれているということが確認できた。

参考文献

- 1) 真田樹義、宮地元彦、山元健太ほか：日本人成人男女を対象としたサルコペニア簡易評価法の開発。体力科学 59:291-302, 2010.
- 2) 鳥居 俊、岩沼聡一郎、戸島美智生、飯塚哲司、大伴茉菜：日本人健康小児における四

- 肢除脂肪量比の発育変化. 日本成長学会雑誌 22:39-42, 2016.
- 3) 鳥居 俊、江川陽介、山本紘平、高橋直美、佐藤亨至：成長期の中学生男子サッカー選手における手部骨年齢と全身および各部位の骨密度との関連性. 日本成長学会雑誌 12:75-79, 2006.
- 4) 鳥居 俊：日本人健康男児の骨量分布の発育変化. 日小整会誌 19:85-89, 2010.
- 5) 西山宗六、木脇弘二、井本岳秋、清野佳紀：日本人小児の骨密度と体組成の年齢別推移. 日児誌 103:1131-1138, 1999.
- 6) 鳥居 俊、飯田悠佳子、村田祐樹：頭頸部重量割合の成長変化. 日本成長学会雑誌 17:5-8, 2011.
- 7) Bailey DA, Faulkner RA, McKay HA: Growth, physical activity, and bone mineral acquisition. *Exerc Sports Sci Rev* 24:233-266, 1996.
- 8) 鳥居 俊、岩沼聡一郎、飯塚哲司、村田祐樹：日本人健康男児の除脂肪量の上肢・下肢比率の発育様式に関する横断的検討. 日本成長学会雑誌 19:96-99, 2013.
- 9) Rauch F, Bailey DA, Baxter-Jones A, et al.: The 'muscle-bone unit' during the pubertal growth spurt. *Bone* 34:771-775, 2004.
- 10) 鳥居 俊、岩沼聡一郎、飯塚哲司：日本人健康男子中学生における身長、除脂肪量、骨量の最大増加時期. 発育発達研究 70 : 11-16, 2016.

5. 日本人健康男児の上肢発育様式の検討

緒言：骨長・分節長計測の方法

DXA法装置を用いてwhole body modeで測定を行うと、全身の身体形態に関する情報を得ることができる。このmodeでは縦1.3 cm、横0.204cmの直角形のピクセルごとに、その中に含まれる身体成分量を算出している（図5.1）。ピクセルの4つの頂点を移動させることによって、任意の関心領域に含まれる身体成分量を算出することができる。また、ピクセルの頂点の座標から画面上の2点間の長さを算出できる。例えば、A点の座標 (X_A, Y_A) 、B点の座標 (X_B, Y_B) に対して、線分ABの長さは、 $[1.3 \times (Y_B - Y_A)]^2 + [0.204 \times (X_B - X_A)]^2$ の平方根となる。

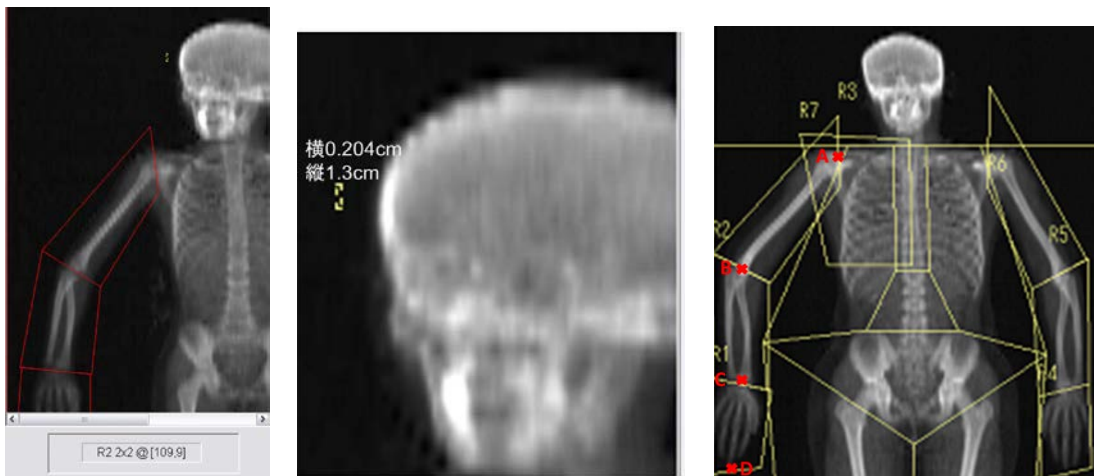


図 5.1 上肢関心領域（上腕、前腕、手）と最小ピクセル

このようにして、上腕長、前腕長、手部長（手関節裂隙中央～中指先端）、大腿長、下腿長を計算することが可能である。ただし、横方向のピクセル幅に対して縦方向のピクセル幅が1.3 cmと大きく、その影響を受けやすいと考えられる。測定台の長軸に平行な分節長では最大1.3 cmの誤差となる。さらに、 $\sqrt{(Y + \Delta Y)^2 + (X + \Delta X)^2} = \sqrt{X^2 + Y^2} + 2(X\Delta X + Y\Delta Y) + (\Delta X^2 + \Delta Y^2)$ となり、最終項は微小値であり、 ΔX は0.204と小さいため $X\Delta X$ も微小値と見なし、 $\sqrt{X^2 + Y^2} + 2Y\Delta Y$ と近似できる。 $\sqrt{A} + \sqrt{B} \geq \sqrt{A+B}$ より、理論上の最大誤差は $\sqrt{2.6Y}$ となる。Yが20 cmの場合、この値は5.1cmとなり、容認できな

い誤差と考える。そのため、本研究では縦方向の座標についてはメジャーを用いて計測することとした (図 5.2)。

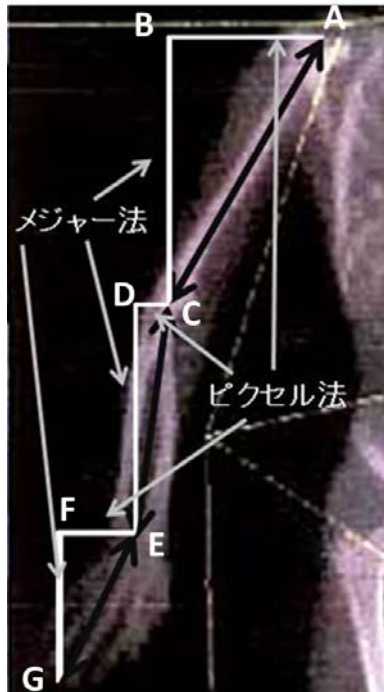


図 5.2 ピクセル法とメジャー法の組み合わせによる長さ計測

実際に、過去 2 年間に 10 回の全身計測を行った成人 1 名の右上腕 (体表面上での長さ 30.0 cm) に対して、上記の方法により測定方法の妥当性を検討した。平均 30.2 ± 0.57 cm、最小値 29.5 cm、最大値 31.0 cm、変動係数 1.9%であった。

対象と方法

4 章で用いた対象のうち、3 回以上の DXA 測定を実施した中学校 3 年生までの男子を対象とした。測定中の体動や肢位不良などを除き、15 名ののべ 74 回の DXA 像を分析対象とした。

各画像上で、上腕長は上腕骨頭近位端から肘関節裂隙まで、前腕長は肘関節裂隙から遠位橈尺関節遠位端まで、手長は遠位橈尺関節遠位端から中指先端までとした。

次に、上肢の 3 つの分節 (上腕、前腕、手部) を関心領域として図 1 のように四角形で囲み、そこに含まれる身体成分量を算出した。

最後に、投球などの肩関節を中心に行うスポーツの動作を想定し、肩関節を回転中心とした慣性値を各分節の中心（上腕ではABの midpoint）の座標と分節重量から概算することを試みた。即ち、回転中心からの距離の二乗とその距離に存在する重量との比の積分値、 $\Sigma(\text{分節中心までの距離})^2 \times \text{分節重量}$ で算出した。

対象の測定時の年齢を月齢として求め、月齢と各測定値との関連性を検討した。さらに増加速度については、引き続き 2 回の測定値の差を 2 回の間隔より年間増加量に換算し、増加速度 (cm/y) とした。

発育様式を記述するために、月齢に対する分節長など測定値との関連を回帰分析により検討した。その際、局所重みづけ回帰平滑法 (Lowess) を用い、極大となる時期を求めた。

結果

各分節長は図 5.3 のようになり、月齢とともに増大するが、手部長は 150 ヶ月頃から、前腕長は 160 ヶ月頃から増加が停止している。

次に、年間増加速度と月齢との関係を検討した。なお、この時の月齢は 2 回の測定時期の中間の月齢とした。上腕では 147 ヶ月、前腕で 143 ヶ月、手部では 134 ヶ月となり、末梢が早い時期となっていた (図 5.4)。

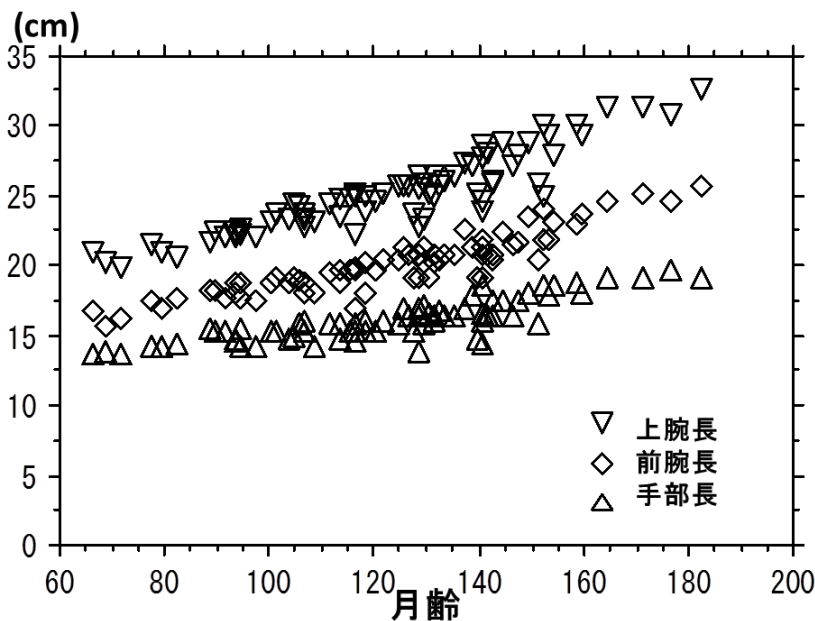


図 5.3 月齢と上肢の分節長との関係

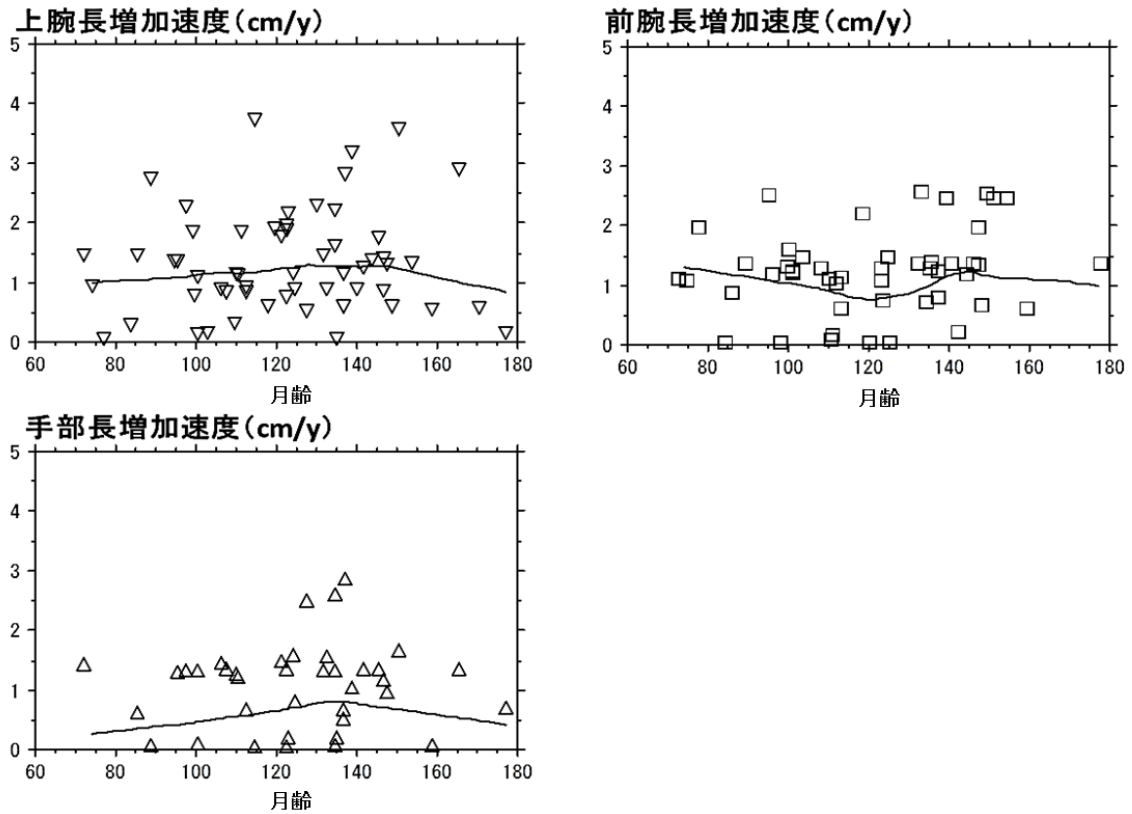


図 5.4 月齢と分節長増加速度との関係

次に、上肢の3つの分節重量の発育変化を検討するため、月齢と分節重量との関係を図

5.5 に示した。分節長の発育変化と同様の変化を示していた。

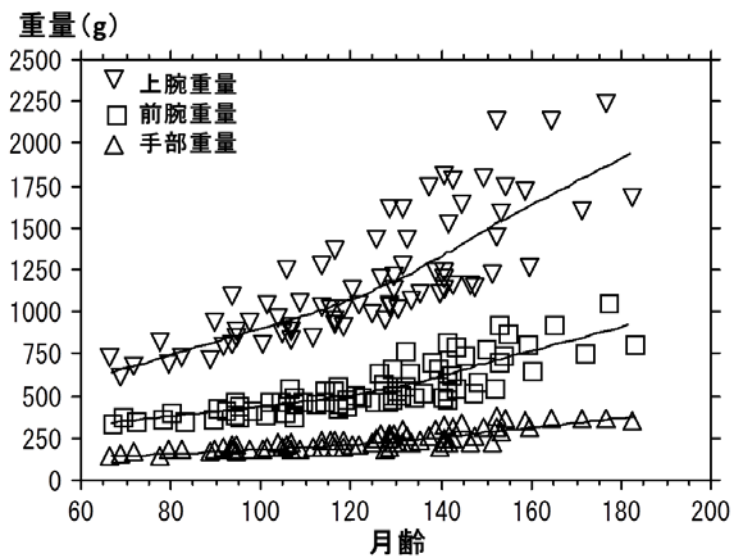


図 5.5 月齢と上肢の分節重量との関係

スポーツにおける上肢の動作を考えると、肩関節を中心に上肢を回転させる際の慣性モーメントは回転中心からの距離の二乗とその距離に存在する重量との比の積分値で求められる。極めて簡略化して、各分節の重量と分節の中心までの距離により上肢の3分節の慣性値を合計すると図 5.6 のようになり、125 ヶ月頃より急速に増大する。前述と同様の方法で月齢と慣性値の増加速度との関係を図 5.7 に示す。増加速度の極大値は 146 ヶ月（12 歳過ぎ）となった。

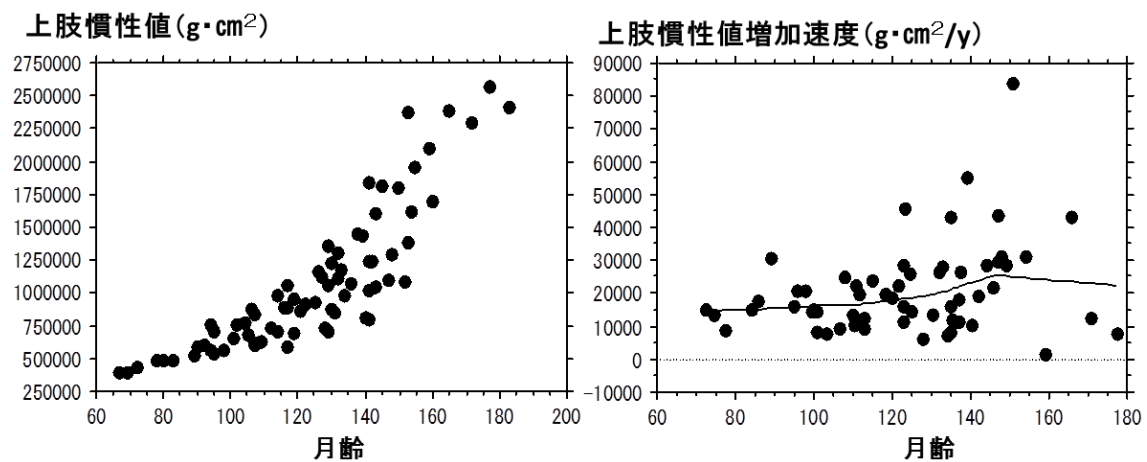


図 5.6 月齢と上肢慣性値との関係

図 5.7 月齢と上肢慣性値増加速度との関係

考察

Cameron ら (1982)は、96 名のイギリス人の発育期（11～18 歳）男女の身体実測値をもとに、坐高、脚長や四肢分節の発育様式を検討し、四肢では最大増加速度を示す時期が末梢で早いことを示した¹⁾。一方、身体プロポーションは人種や居住高度によっても違いが見られることも報告されており、さらに時代変化も見られる。Pomeroyら (2013)はアンデスの高地に居住する民族の 6～14 歳児 165 名を対象に身体計測を行い、末梢分節長に酸素分圧と関連した差があることを報告した²⁾。文部科学省の学校保健統計の身体計測値を観察すると、身長に対する坐高の比率に時代変化が見られ、坐高の計測が行われた最も古い昭和 24 年に比べて徐々に比率は減少し、その後平成年間は漸増している。

このような事実を考慮すると、四肢発育様式はこれまで報告されている欧米人³⁾と日本

人で同様であるという保証はなく、また過去に日本人の四肢発育様式に関する詳細な検討がないことより、欧米人を対象とした先行研究の結果を当てはめるよりも実際に現代の小児で検討すべきと考えた。

本研究は身体にキャリパーやメジャーを当てての実測値ではなく、DXAの全身画像より算出した数値を扱っているが、X線像を用いた骨長発育の研究と同様の考えである。その利点は肩のような周囲を筋で被覆された関節内にある上腕骨の近位端の位置は皮膚上から同定することは困難であるのに対して、骨格映像では近位端の位置が容易に同定できることである。課題として、縦横の測定単位（ピクセル）の違いがあり、また特に縦方向が1.3 cmのため、長さの誤差が大きくなってしまうことである。この点を考慮してDXA像上で長さを実測し、縦横の縮尺を換算することで長さを求める方法はやや誤差を小さくできている可能性がある^{4,5)}。

本研究の結果、現代の日本人男児の手部最大発育速度の時期は134ヶ月（11.2歳）となり、Cameronらの13.49歳より2年以上早期となった。同様に、前腕11.9歳、上腕12.25歳も14.16歳、13.98歳より早期であるが、手部と前腕や上腕との時間差は類似していた。

上肢の各分節の重量と分節中心座標から概算した肩関節を回転中心とする慣性値は125ヶ月頃（10.4歳）より増加が大きくなり、最大増加速度の時期は146ヶ月（12.2歳）となった。現在、野球肘で後遺症を残すリスクの高い外側型の好発年齢は松浦ら⁶⁾によれば11歳頃とされており、本研究の慣性値の増加が大きくなる時期に近い。

また、小学生など若年野球選手の投球動作では肘が下がったり、肘の屈曲が不足したりしていることが指摘されている^{7,8,9)}が、末梢の発育が先行し、より重量が増加している末梢分節を発育が遅れる中枢分節の筋により支持することが難しいのでは、と考えると、発育途上の選手に年長選手の動作を要求することに無理がある可能性がある。また、球技では手で球を保持したり投げたりするため、重い球はより大きな慣性値となって肩や肘に負荷を加える。その点で、発育を考慮して年少者には軽い球で競技を行えるようにすることが望ましい。

参考文献

- 1) Cameron N, Tanner JM, Whitehouse RH: A longitudinal analysis of the growth of limb segments in adolescence. *Ann Hum Biol* 9:211-220, 1982.
- 2) Pomeroy E, Stock JT, Stanojevic S, et al.: Association between arterial oxygen saturation, body size and limb measurements among high-altitude Andean children. *Am J Hum Biol* 25:629-636, 2013.
- 3) Rauch F, Bailey DA, Baxter-Jones A, et al.: The 'muscle-bone unit' during the pubertal growth spurt. *Bone* 34:771-775, 2004.
- 4) 高橋直美: 四肢長管骨の長軸方向の成長と骨量・骨密度変化との関連性. 2007年度早稲田大学スポーツ科学研究科修士学位論文, 2008.
- 5) 野間健佑: 成長期に多発する橈骨遠位部骨折に関連する因子の検討. 2008年度早稲田大学スポーツ科学研究科修士学位論文, 2009.
- 6) 松浦哲也、安井夏生、鈴江直人ほか: 少年野球肘の実態. *日小整会誌* 18:302-305, 2009.
- 7) Fleisig GS, Barrentine SW, Zheng N, et al.: Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *J Biomech* 32:1371-1375, 1999.
- 8) 田中正栄、西野勝敏、飯田晋ほか: 成長期少年野球選手の投球動作解析ー成長に伴う変化についての検討ー. *スポーツ傷害* 11:39-42, 2006.
- 9) Davis JT, Limpisvasti O, Fluhme D, et al.: The effect of pitching biomechanics on the upper extremity in youth and adolescent baseball pitchers. *Am J Sports Med* 37:1484-1491, 2009.

6. 日本人男児の下肢発育様式の検討

対象と方法

現代の日本人小児の発育様式を検討することを目的に、前章の上肢の発育様式の検討と同じ男児を用いて、下肢の発育様式の検討を行った。

なお、DXAの全身測定では仰臥位で四肢を伸張した肢位を取らせるが、肘関節や手関節がほぼ伸展した関節角度になるのに対して、下肢では股関節、膝関節は伸展肢位になるものの足関節では最大底屈可動域をとっても不可能である。また、下腿・足関節部のX線撮影時の基本として20度内旋位をとらせるため足部の分節長の算出は不可能と考え、大腿骨頭近位端から大腿骨顆間窩の長さを大腿長、大腿骨顆間窩から距腿関節裂隙中心までを下腿長とした。分節重量の算出における関心領域は、大腿分節についての近位端は既に報告している下肢分節の境界線、遠位端は膝関節裂隙までとし、下腿分節については膝関節裂隙から距腿関節裂隙までを矩形で囲んだものとした。さらに距腿関節裂隙より末梢の部分を足部分節として重量を算出した(図6.1)。

発育様式に関する検討方法は前章と同様であり、月齢と測定値との関係を回帰分析により検討した。下肢のスポーツ動作では股関節を中心とした回転だけでなく、膝を中心とした回転動作(屈曲・伸展)も多用される。発育期のスポーツ障害として頻発するOsgood病は膝を中心とした回転動作が影響している可能性があり、この点に関する検討をするため、膝関節より末梢の重量に対して下腿の midpoint までの長さの二乗を乗じて膝関節に対する慣性値とし、大腿部重量で除した比を観察した。



図 6.1 下肢分節長の計測点、分節重量の関心領域

結果

大腿長、下腿長は図 6.2 のような月齢との関係を示した。同様に、大腿、下腿、足部の 3 つの分節重量は図 6.3 のような月齢との関係を示した。また、大腿長や下腿長の増加量が最大となる時期は図 6.4 のようになり、Lowess の曲線の極大点は大腿で 140 ヶ月、下腿で 113 ヶ月となった。

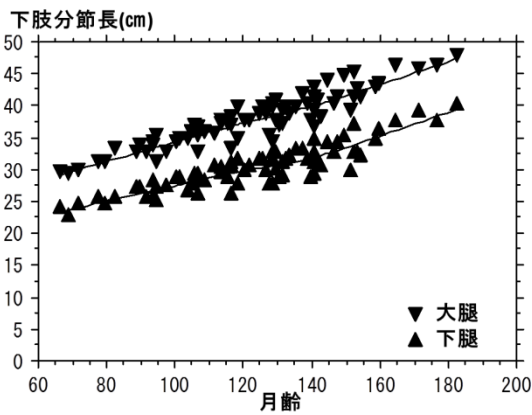


図 6.2 大腿長、下腿長と月齢との関係

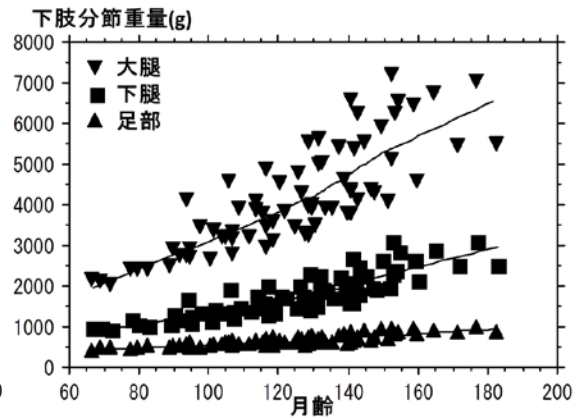


図 6.3 下肢分節重量と月齢との関係

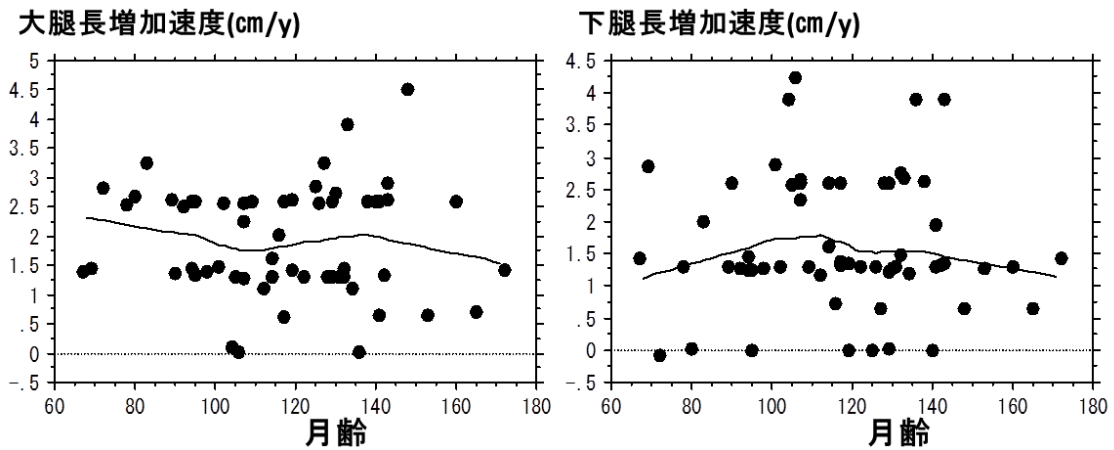


図 6.4 大腿長・下腿長増加速度と月齢との関係

次に、膝関節慣性値を大腿重量で除した比と月齢との関係は図 6.5 に示すように、Lowess による回帰で 140 ヶ月を過ぎて増加が著明になっていた。即ち、12 歳前後より大腿重量の増加を相対的に上回る膝関節慣性値の増加が見られることとなる。

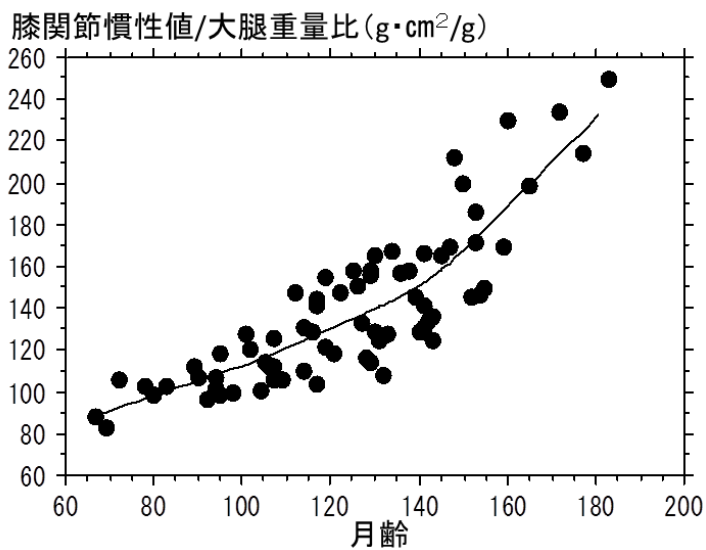


図 6.5 膝関節慣性値と大腿重量との比と月齢との関係

考察

村田らは中学生サッカー選手のDXA測定や膝筋力値を用いて、下肢の分節重量や骨長の発育変化を検討し、膝より末梢の重量発育に対して中枢側の大腿部の筋量や筋力の発育が

遅れることを示し、このような時期のずれがOsgood病のようなスポーツ障害を生む可能性を論じた¹⁾。また戸島らもOsgood病の発症に下肢の骨長増加量が関係することを同様な中学生サッカー選手で示した²⁾。これらの報告は1年に2回の継続的な測定を行っている中学生サッカー選手を対象にして行われたものであり、定期的にサッカーのトレーニングを行っているという集団のため、日本人の小児の標準的な変化を示しているかどうか疑問が残った。本研究の対象は学校での部活動を越えるような競技スポーツの経験のない小・中学生男子に限定している。ほぼ1年間に1回の計測を継続的に3回以上行えた15名を対象としているため検討できた計測値が少ないのが問題点である。

Cameron E et al.は下腿長や足部長の発育変化を身体での直接計測により検討し、最大発育速度の時期は下腿長で14.13歳、足部長で13.81歳と報告している³⁾。しかし、大腿長についての記載はなかった。

本研究における大腿長や下腿長および重量の発育変化は、Cameron E et al.の報告に比べて早期になっていた。継続的に測定が行えた対象のうち、中学生以上の測定値が多くないため、より中枢側の分節の発育を論じるには資料が少なかつた可能性が考えられる。上肢発育と下肢発育のタイミングに関して、Rauch F et al.は骨量、除脂肪量とも上肢が下肢よりも0.2~0.3年遅いことを示している⁴⁾。本研究でも、3に示した上肢の各分節長の最大増加時期（上腕147ヶ月、前腕143ヶ月、手部134ヶ月）に比べて先行していた。

足部の肢位の限界から、足部の分節長や位置を正確に示すことができなかつたため、膝伸展機構への負荷を表現する数値として膝関節より末梢の重量が下腿中点に存在するとみなして慣性値を求め、大腿重量との比がどのような発育変化を示すかを観察した。その結果、140ヶ月付近で増加が著しくなっており、Osgood病が12歳ごろより多発することと矛盾がないと考えられた。なお、大腿四頭筋の筋量と慣性値との比を算出することが膝伸展機構への相対的な負荷を示すことになるが、DXAでは大腿の前面（四頭筋）と後面（ハムストリング）とが重なった状態で平面に投影されるため、両者を分けて重量を算出することができない。そのため大腿重量で除することで代用した。これについても好発年齢以

降の対象が多くないため、今後さらにこの年代の対象数を増やして検討する必要がある。

参考文献

- 1) 村田祐樹、鳥居俊、飯田悠佳子、野間健佑、飯塚哲司：中学生サッカー選手における下肢の発育発達変化－各部位の発育発達変化の違いに着目して．発育発達研究 57:10-19, 2012.
- 2) 戸島美智生、鳥居俊：Osgood-Schlatter 病発症に下肢の骨長増加量が関係する．発育発達研究 50:1-7, 2011.
- 3) Cameron N, Tanner JM, Whitehouse RH: A longitudinal analysis of the growth of limb segments in adolescence. *Ann Hum Biol* 9:211-220, 1982.
- 4) Rauch F, Bailey DA, Baxter-Jones A, Mirwald R, Faulkner R: The 'muscle-bone unit' during the pubertal growth spurt. *Bone* 34:771-775, 2004.

7. 日本人女児の四肢発育様式

男児の発育に比べて、女児の発育は身長・体重とも2年程度早いことが文部科学省の学校保健統計調査の数値から推測できる。四肢の発育についても、女児で早いと推測されるが、分節の順序などについては男児と同様であるか、欧米人と同様であるか、確かめる必要がある。

対象と方法

4章で用いた対象のうち、3回以上反復してDXA測定を行った15名の女児、のべ65回分の測定値を用いて、男児と同様に四肢分節の発育様式の検討を行った。

なお、女児での骨長の測定には既に述べた男児と同様に横軸の長さについてはピクセル法で、縦軸の長さについてはメジャーによる測定より算出した。詳細は男児を検討した6章に記したとおりである。

結果

上肢の分節長と月齢との関係を図7.1に示す。

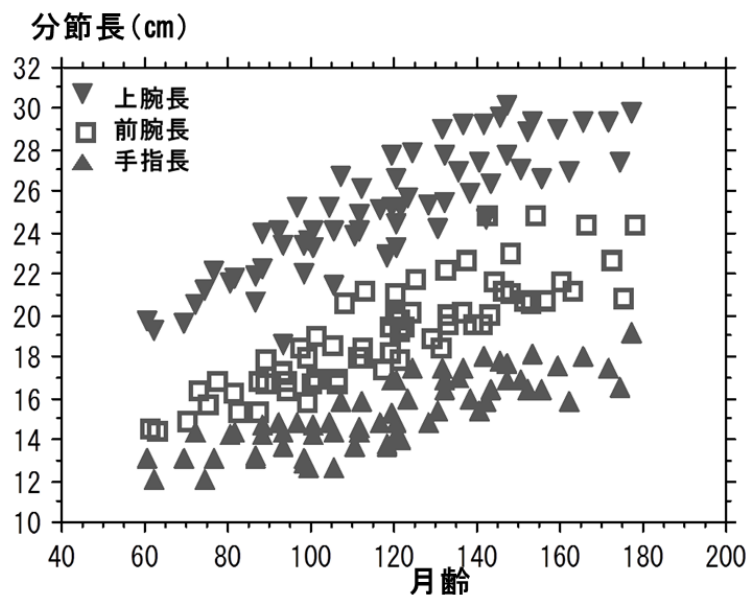


図 7.1 上肢の各分節長と月齢との関係

次に、各対象の引き続く2回の測定での骨長変化量を測定間隔(月)で除し、12を乗ずることで年間増加量に換算、これを増加速度として、月齢との関係を検討した。図7.2のように、各々の骨長の増加速度の回帰直線(LOWESS)は120ヶ月~130か月付近に極大点を持つ曲線で示された。同様に3次式回帰によっても上腕と前腕ではほぼ同様の曲線が得られ、いずれも危険率5%未満の有意な3次曲線回帰となった(図7.3)。しかし、手指については有意な回帰曲線が得られなかった。

同様に、大腿骨長、下腿骨長と月齢との関係を検討し(図7.4)、さらにそれらの増加速度を算出し、3次回帰曲線を作成すると、いずれも有意な曲線回帰となり、大腿骨長のピークが下腿骨長のピークより遅い時期となった(図7.5)。

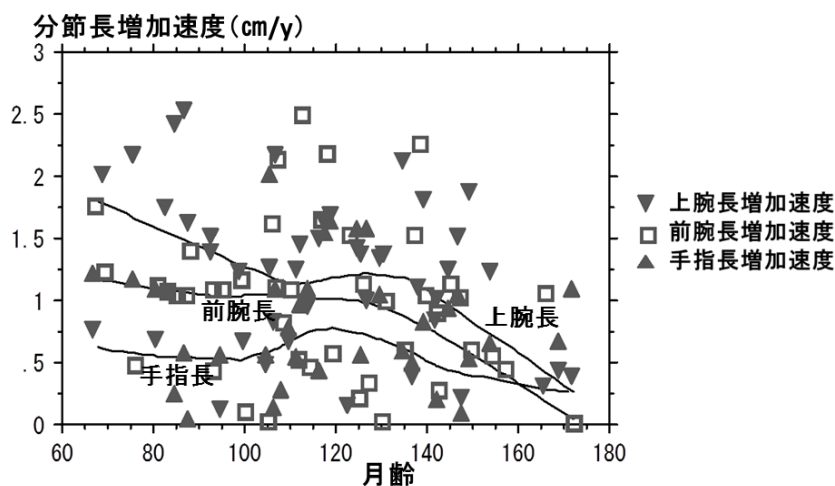


図7.2 上肢の各分節長の増加速度と月齢との関係 (LOWESS)

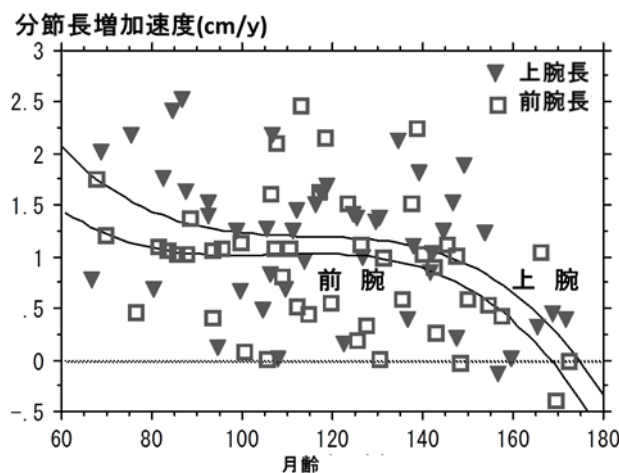


図7.3 上肢の各分節長の増加速度と月齢との関係 (3次曲線回帰)

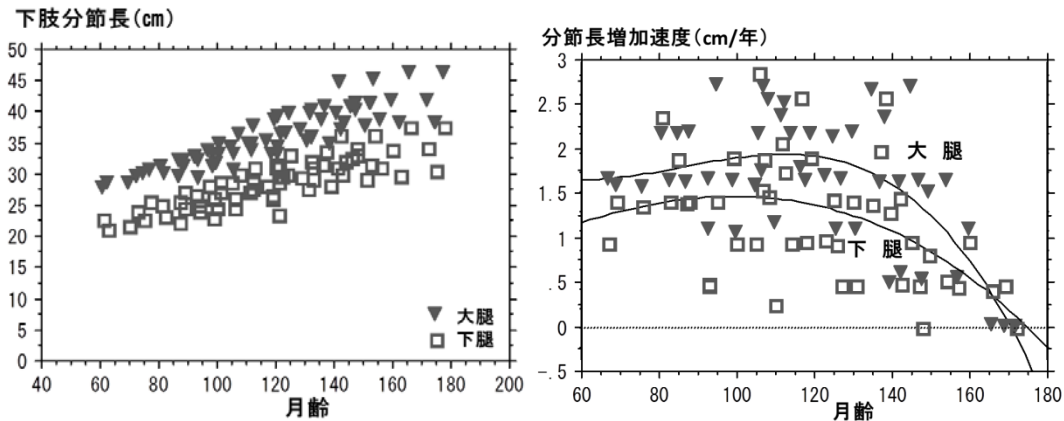


図 7.4 下肢の分節長と月齢との関係 図 7.5 下肢の分節長の増加速度と月齢との関係

考察

男児と同様に女兒を対象に、骨長増加速度を算出してその順序を検討したが、女兒に対してはより精度の高くなるように縦軸をピクセル法でなくメジャーでの測定による数値を用いた。図 7.3, 7.5 に示すように、統計学的に有意な 3 次曲線回帰が得られ、増加速度が最大となる時期は上肢では前腕、上腕の順、下肢では下腿、大腿の順となり、末梢先行であることが確認できた。

Cameron らは直接の計測により男児に比べて女兒の各分節の最大増加時期は 1 年から 1 年半早いことを報告している¹⁾。Smith と Buschang は X 線像より骨長を計測し、縦断的な観察から性差や部位差を観察した。その結果、女兒で発育のピークが早いこと、上肢より下肢の発育のピークが早いことを報告している²⁾。

DXA 法による測定では、肢位をできるかぎり変わらないようにすることで各関節の角度を同様にし、観察できる骨の位置や方向を一定化するようにしている。しかし、小児の場合測定時間が短いとはいえ 3 分間完全に同一肢位を保てない場合があり、特に指先の関節が測定終了までに軽度屈曲位になってしまう例が観察される。そのような場合、手指骨長は短い値になってしまう。今回、手指の回帰が良好でなかった点にはこのような原因が考えられる。

参考文献

- 1) Cameron N, Tanner JM, Whitehouse RH: A longitudinal analysis of the growth of limb segments in adolescence. *Ann Hum Biol* 9:211-220, 1982.
- 2) Smith SL, Buschang PH: Longitudinal models of long bone growth during adolescence. *Am J Hum Biol* 17:71-745, 2005.

8. PHV 年齢に基づく四肢分節の発育様式の検討

前章までの検討では、男児・女児の暦年齢に基づいて四肢の各分節長の発育様式を検討したが、より正確に発育順序を検討するには各児の PHV の時期を算出し、それに基づいて各分節長の発育の時期を位置づけるのが良いと考えられる。

PHVの時期を算出する方法として、各児の身長履歴からウェーブレット補間法により近似曲線を求めて算出する藤井らの方法¹⁾、最終身長解析ソフトを用いて算出する方法²⁾などがある。本研究では、後者のAuxal 3.1を用いて各児のPHVの月齢を求め、各分節の増加量を検討することとした。

対象と方法

5～7章で用いた日本人健康小児の男女のデータを用い、各測定時期の月齢と身長を最終身長解析ソフト Auxal 3.1 (SSI 社) に入力し、PHV の年齢を算出した。これに 12 を乗ずることで月齢にし、各測定時期が各児の PHV の月齢の前後の何ヶ月に当たるかを算出した (PHV 月齢と表示)。

男児では、PHV の月齢が 142～170 ヶ月となり、観察できた分節長増加量の PHV 月齢は-87～+35 ヶ月となった。女児では PHV の月齢が 115～143 ヶ月となり、観察できた分節長増加量の PHV 月齢は-75～+52 ヶ月となった。男児で PHV の月齢以後のデータ数が少ないため、女児のデータを用いて検討を行った。

PHV 月齢と分節長増加量との関係を 2 次あるいは 3 次曲線に回帰させ、より当てはまりのよい回帰を選び、その極大値の時期を比較した。

結果

上肢の分節長増加速度と PHV 月齢との関係を図 8.1 に示す。各回帰式の危険率は上腕で 0.0276、前腕で 0.0110 と有意な回帰であったが、手指では 0.3602 となり、有意な回帰

ではなかった。各曲線に対しての極大値は-24.6ヶ月、-23.3ヶ月、-8.7ヶ月となった。

次に、下肢の分節長増加速度と PHV 月齢との関係を図 8.2 に示す。下肢では 2 次曲線に回帰することで有意な関連性が得られ（大腿： $p<0.0001$ 、下腿： $p=0.0010$ ）、各曲線の極大値は大腿で-25.8ヶ月、下腿で-33.6ヶ月となった。

分節長増加速度 (cm/y)

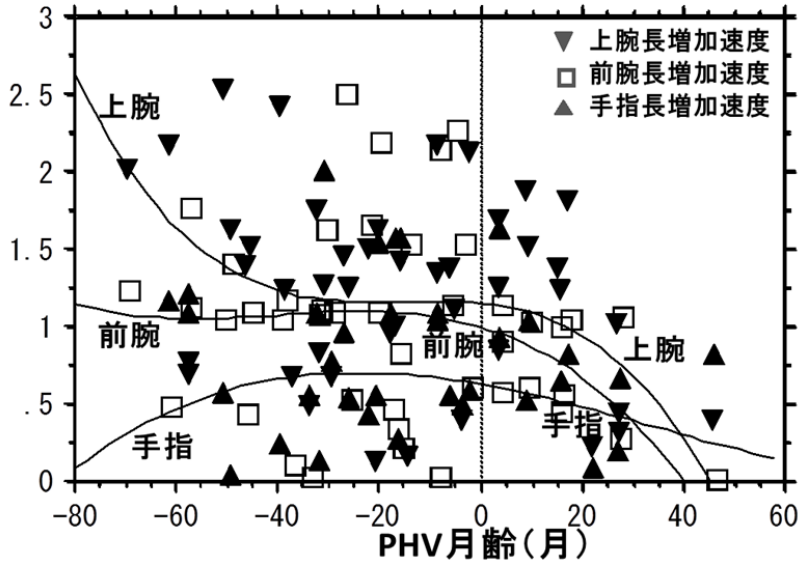


図 8.1 上肢の各分節長の増加速度と PHV 月齢との関係

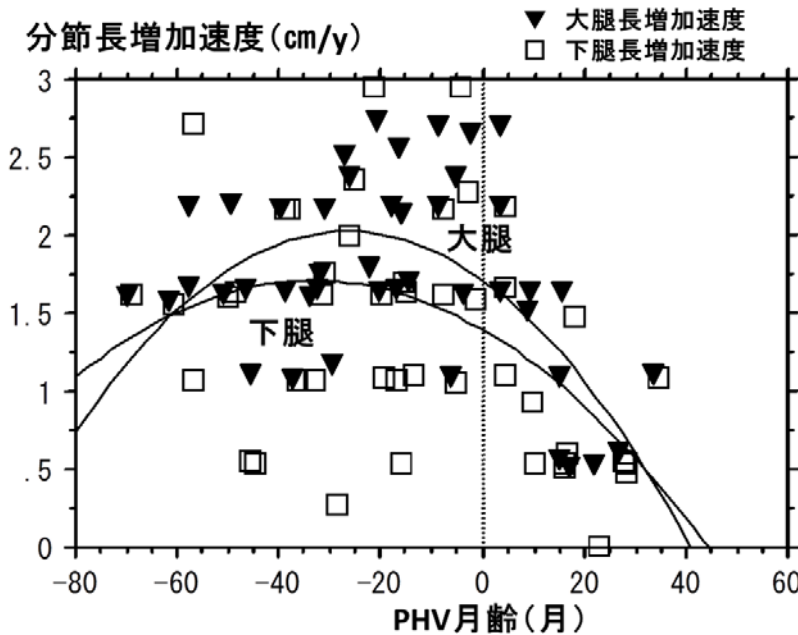


図 8.2 下肢の各分節長の増加速度と PHV 月齢との関係

考察

暦年齢よりも、発育の実態を表す PHV の時期との関係を基に女兒で分節長の発育様式を検討した。手指では有意な回帰曲線を得ることができなかつたため、上肢では上腕と前腕、下肢では大腿と下腿の発育時期の関係を比較したことになった。回帰曲線の極大値より、前腕の発育は上腕に先行し、下腿の発育は大腿に先行していた。また、下肢の発育は上肢に先行していた。極大値を最大増加時期とした場合、下腿長の最大増加時期は最大身長増加の 2 年半ほど前になり、大腿長や前腕長の最大増加時期は約 2 年前、上腕長の最大増加時期は約 9 か月前となる。

分節ごとの最大増加時期と PHV の時期との関係を検討した Cameron らの報告³⁾ では、男子では手指、足、下腿、脚長、身長、上腕、坐高、前腕という順、女子では足、脚長、手指、身長、前腕、下腿、坐高、上腕という順が示されている。Smith と Buschang⁴⁾ は男女とも上腕と前腕の最大増加時期の差は小さく、男児で 0.1 年、女兒で 0.3 年としており、これらは男女とも PHV の時期にほぼ一致すると述べている。一方、下肢について、Smith と Buschang は男児では脛骨で 12.4 歳、大腿骨で 12.7 歳、女兒では脛骨で 10.0 歳、大腿骨で 10.7 歳とし、脛骨、大腿骨の順と記した。

Volgyi E⁵⁾ は発育期の女兒を 7 年間縦断的に観察し、初経発来時期に対して四肢の骨の最大増加時期を算出した。初経時を 0 ヶ月とすると、PHV の時期は -13.5 ヶ月、大腿骨は -20.7 ヶ月、脛骨は -17.5 ヶ月、上腕骨は -18.0 ヶ月、橈骨は -17.4 ヶ月としている。

Cameron らの報告から Volgyi らの報告まで約 30 年が経過しているが、対象は英国とフィンランドといずれもヨーロッパである。一方、Smith と Buschang の対象は 1970 年代の Denver での研究データを解析しており、最も古い。また、測定方法も体表面からの計測から X 線像での計測までと異なっている。時代や人種が異なる報告を通じて、ヒトの発育に普遍的な様式や法則が見出せることを期待したが、本研究も含めて完全に一致することはなかった。不一致の原因が時代差か、人種差か、方法の差かは結論づけることができない。

参考文献

- 1) 藤井勝紀, 川浪憲一, 長谷川泰洋ら : Wavelet 解析による身長発育の時系列分析. 発育発達研究 22:21-28, 1994
- 2) 高井省三, Cuskas A: 成人身長はどのように予測するのか? 東京矯歯誌 11:78-85, 2001.
- 3) Cameron N, Tanner JM, Whitehouse RH: A longitudinal analysis of the growth of limb segments in adolescence. Ann Hum Biol 9:211-220, 1982.
- 4) Smith SL, Buschang PH: Longitudinal models of long bone growth during adolescence. Am J Hum Biol 17:71-745, 2005.
- 5) Volgyi E, Tylavsky FA, Xu L, Lu J, Wang Q, Alen M, ChengS,: Bone and body segment lengthening and widening: A 7-year follow-up study in pubertal girls. Bone 47:773-782, 2010.

9. 総合考察

本研究はDXA装置による全身計測値を用いて、日本人健康小児の体格や身体成分（骨、筋、脂肪）、全身のみならず体幹・四肢など部位ごとの標準的な発育様式を明らかにすることを目的とした。これまで、欧米人小児を対象にした発育変化に関する先行研究^{1,2,3,4)}は見られるものの、日本人小児を対象とした報告は少なく、さらに最近の小児を測定した報告はほとんどない。体格や体型は時代変化があり、また地域や環境による違いもあることから、現在の日本人小児を対象に測定する必要がある。標準的な発育様式が明らかになることで、スポーツや身体活動が加わることによる発育への効果をより客観化し数値化することが可能になると期待できる。

3章で記したように、DXA法は比較的短時間に全身の身体情報を得ることが可能な測定法であり、日本では発育研究に用いている研究者が少ないが、欧米では身体成分重量のみならず骨長や骨幅なども含めて非常に多くの研究がすでに行われている⁵⁾。

日本では、学校での身体計測による体格データが1900年より蓄積され⁶⁾、世界大戦の影響、戦後の栄養や衛生の向上など時代変化を見ることができる。しかし、これらの身体計測値で知ることができるのはあくまでも全身の長育や体重であり、身体組成を知ることができない。文部科学省や学校保健会では肥満ややせの指標として、性別・年齢・身長別標準体重を設定し、これより20%以上の過体重の場合に肥満傾向としている。一般の健康小児であれば、この方法で問題はないかもしれないが、トレーニングによって筋量が増加している競技選手では誤った解釈を招くことになる。著者らは中学生で競技スポーツ参加者と非参加者でBMIや性別・年齢・身長別標準体重より算出した肥満度とDXA法による体脂肪率を検討し、競技スポーツ参加者で筋量が多い中学生では肥満に分類される危険性を報告した⁷⁾。近年はbioelectrical impedance (BI) 法による測定が簡便に行えるようになり、年齢や身長を入力すると体重の計測と並行して身体組成を算出できる装置が多い。BI法装置は携帯でき、X線を用いないため使用する場所の制限もないため便利である。この

方法では微弱な電流を通すことにより得られる電気抵抗値から筋量や脂肪量を算出する。また、4電極あるいは8点接触式のように、身体の数多くの箇所間の電気抵抗値から、部位ごとの身体組成を算出することも可能になっている。しかし、骨量や骨密度に関しては計算によって求められた値にすぎず、X線吸収率から直接算出するDXA法とは異なる。

4章では、DXA法によって日本人健康小児のさまざまな身体成分値の横断的な発育変化を示した。比較すべき日本人を対象とした報告がほとんど存在しないため、本研究で得られた値が日本人を代表する標準値となりうるかを論じることができない。日本人以外の人種を対象とした海外の報告^{8,9,10)}との比較では、身体各部の重量や骨量の割合の発育変化、身体成分の発育変化の順序でほぼ同様の結果となっていた。

5～7章では男児、女児で四肢の各分節の発育様式を検討した。その結果、長さ（分節長、骨長）で末梢の発育が先行する様式は海外の報告¹¹⁾と矛盾していなかった。先行研究では四肢分節の長さのみを検討¹¹⁾していたが、衣類や履物などの大きさを決める場合には重量や体積のような指標が必要となる。本研究ではDXAにより算出される重量も検討することで動作に関連する力学的な視点での発育の指標として活用可能と考えられた。動作解析において現在用いられている数式はJensenのモデル^{12,13)}に従っており、日本人では横井らが写真撮影した幼小児の映像より、身体各部の密度が等しいとして各部の比率や重心位置を算出している¹⁴⁾。実際には身体各部の密度には部位差があり、個体差もあるためある程度の誤差が避けられない。そこで、Durkinら¹³⁾、WickeとDumas¹⁶⁾は写真映像に加えてDXAによる測定値（重量値）を用いて慣性値を求め、体幹、四肢で報告している¹⁷⁾。今後、身体各部の分節重量のみならず、分節の重心位置の推定にもDXAを用いることで、より実態に近い値を得ることができると思われる。

次に、身体各部の発育がピークとなる時期の性差を4～7章の結果より検討してみる。対象数が少なく、有意な回帰を示す曲線の形式が男女で異なるが、極大値は上腕で男児147ヶ月、女児で126ヶ月、前腕で各々143ヶ月、122ヶ月、手指で各々134ヶ月、120ヶ月、大腿で各々140ヶ月、118ヶ月、下腿で各々113ヶ月、108ヶ月となった。部位により男

女差に違いがあるが、下腿を除くと 14~21 か月の差があり女兒が早く極大値を迎える、即ち早く発育のピークを迎えているといえることができる。

以上より、身体各部の割合、いわゆるプロポーションや発育の順序、性差などは日本人においても欧米人と大きく異なることはないと考えてよいだろう。ただし、最大増加速度を示す時期は先行研究の検討時期が異なるため、人種差によるものか時代変化によるものか明らかではない。

日本人小児の身長増加が最大となる時期（PHV年齢）は近年早熟化している可能性を 1 章で記した。Ali MA et al.は 1895 年から 1980 年までの出生コホートの身長変化から PHV 年齢の時代変化を検討し、第二次大戦後男女とも早熟化してきたことを示した¹⁸⁾。この報告の最終コホートから既に 20 年以上経過した世代が本研究の対象である。また、文部科学省の学校保健統計調査からすると、2000 年以降の体格変化が殆ど見られていないことから、1990 年出生以後の年代は本研究の対象と変わりがないことが推測される。

日本人の平均寿命の延伸は続き、2017 年 9 月に 100 歳を迎える人口は 67824 人となった。21 世紀生まれの人類では 100 歳以上の長寿を迎える割合が高くなることから、100 年時代の人生設計を考えるべきとの書籍¹⁹⁾があるが、医療・福祉経済的には運動器の健康状態を 100 年間保つことが求められる。要支援の原因疾患を見ると、変形性関節症と骨粗鬆症が最上位を占め、加齢による虚弱にサルコペニアが含まれる²⁰⁾ことを考えると、運動器の健康維持が危急の課題となる。

骨量は発育期に蓄えられるが、最大増加時期は最大身長増加年齢の後である。また、最大増加時期を含む 3 年間に最大到達骨量（peak bone mass）の 3 割近くを獲得する⁹⁾。学校保健統計調査における全国平均値の身長差が最大となるのは男子で 11 歳と 12 歳の間、女子では 9 歳と 10 歳の間である。学年にすると男子は小学校 6 年生と中学校 1 年生の間、女子では小学校 4 年生と 5 年生の間である。そうすると、骨量の最大増加時期は男子で中学校 1 年生頃、女子では小学校 5 年生頃と推測される。この時期に十分な栄養摂取と身体活動による力学的刺激がないと、骨量獲得が抑制される危険性がある。逆に、過度な持久

性のトレーニングは骨量獲得に不利と考えられている。陸上競技の長距離走の女子選手で初経発来以前より長距離走のトレーニングを開始すると腰椎骨密度が低くなるという関連性が示され²¹⁾、長距離走のトレーニングにより女性ホルモンの増加や体重増加が抑制されてしまった結果と推測される。実際、長距離走のエリートジュニア選手では男女とも明らかに低値の選手が見られ、疲労骨折など骨障害の発生が憂慮される。

健全な運動器の発育のために、本研究で得られた標準値に対して低値を示す小児に対しては何らかの働きかけが必要だと考えられる。ただし、本研究では対象の日常の身体活動量や栄養摂取の調査を行っていないため、低値の原因を知ることはできない。また、どの程度の値を低値とすべきかについては一定の見解がない。骨粗鬆症の診断では若年成人平均値の80%未満を骨量減少としている²²⁾ので、標準値の-20%未満を目安とすることが考えられる。実際に男子で全身骨量と月齢との関係を示すグラフで、変曲点を150ヶ月としてその前後の2本の回帰直線に対して80%の値を示す線を引くと、図9.1のようになり、40名(7.7%)が80%未満の値をとった。本研究では発育の早い遅いを考慮せず、暦年齢で検討しているため、発育の遅い小児が低い値をとっている可能性も否定できない。また、活発にスポーツを行っている集団では長距離走競技のように過度なトレーニングが健全な発育を抑制しないように注意が必要である。

発育途上の身体形態は成人の身体を単に縮小した状態ではなく、身体各部の長さや重量の比が異なっていることがDXAによる計測値からも示された。このことは、年長の選手や成人で望ましいと考えられている動作やフォームを年少の子どもが行えない可能性を示唆する。野球の投球動作では、年少の選手では肘が下がったり、肘が伸びたりしていることが指摘される²³⁾。これは相対的に上肢が重い、あるいは前腕や手が重い、ということが原因である可能性がある。発育期のスポーツにおける障害予防を考える場合、単にオーバユースのみならず身体形態に着目した予防策を立案することが必要である。

以上の視点より、DXAを用いて運動器を含めた全身的な発育状態をモニタリングすることは極めて有用であり、特に高い運動負荷が加わるジュニア選手では必須と考えられる。

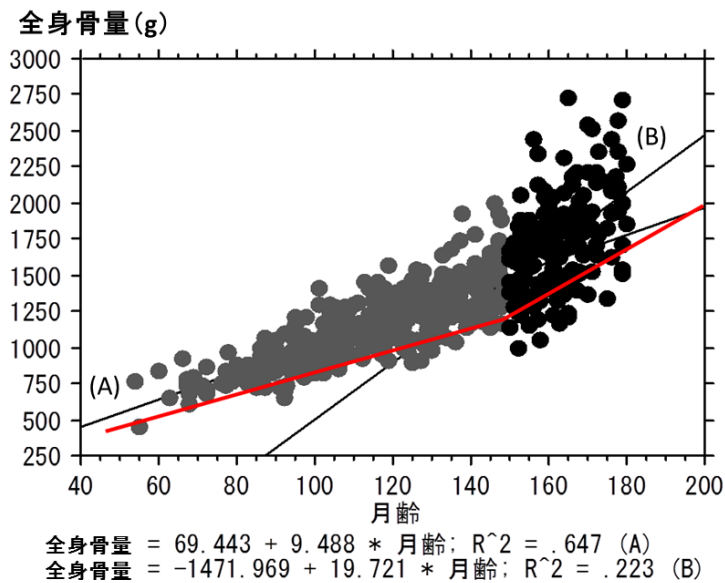


図 9.1 男子の骨量減少(平均値の 80%未満)の目安

参考文献

- 1) Sabatier JP, Guaydier-Souquieres G, Laroche D, et al.: Bone mineral acquisition during adolescence and early adulthood: a study in 574 healthy females 10-24 years of age. *Osteoporosis Int* 6:141-148, 1996.
- 2) Maynard LM, Guo SS, Chumlea WC, et al.: Total-body and regional bone mineral content and areal bone mineral density in children aged 8-18y: the Fels Longitudinal study. *Am J Clin Nutr* 68:1111-1117, 1998.
- 3) Alwis G, Rosengren B, Stenevi-Lundgren S, et al.: Normative dual energy X-ray absorptiometry data in Swedish children and adolescents. *Acta Paediatrica* 99:1091-1099, 2010.
- 4) McCormack SE, Chesni A, Mitchell JA, et al.: Relative skeletal maturation and population ancestry in nonobese children and adolescents. *J Bone Miner Res* 32:115-124, 2017.
- 5) Clark EM, Ness AR, Tobias JH: Gender differences in the ratio between humerus

width and length are established prior to puberty. *Osteoporosis Int* 18:463-470, 2007.

6) 文部科学省：学校保健統計調査．年次統計，
(<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001014499&cycode=0>), 2017年9月
14日参照.

7) 鳥居俊、戸島美智生、大伴茉奈、飯塚哲司、秋和真澄、阿部平、初雁晶子：中学生におけるBMI、肥満度とDXA法による体脂肪率との関連性－競技スポーツ参加の有無での比較－. *日本成長学会雑誌* 23:15-19, 2017.

8) Bailey DA, Faulkner RA, McKay HA: Growth, physical activity, and bone mineral acquisition. *Exerc Sports Sci Rev* 24:233-266, 1996.

9) Rauch F, Bailey DA, Baxter-Jones A, et al.: The 'muscle-bone unit' during the pubertal growth spurt. *Bone* 34:771-775, 2004.

10) Iuliano-Burns S, Mirwald RT, Bailey DA: Timing and magnitude of peak height velocity and peak tissue velocities for early, average, and late maturing boys and girls. *AmJ Hum Biol* 13:1-8, 2001.

11) Cameron N, Tanner JM, Whitehouse RH: A longitudinal analysis of the growth of limb segments in adolescence. *Ann Hum Biol* 9:211-220, 1982.

12) Jensen RK: Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method. *J Biomech* 11:349-358, 1978.

13) Jensen RK: Growth of estimated segment masses between four and sixteen years. *Hum Biol* 59:173-189, 1987.

14) 横井孝志、渋川侃二、阿江通良：日本人幼少年の身体部分係数. *体育学研究* 31:53-66, 1986.

15) Durkin JL, Dowling JJ, Andrews DM: The measurement of body segment inertial parameters using dual energy X-ray absorptiometry. *J Biomech* 35:1575-1580, 2002.

16) Wicke J, Dumas GA, Costigan PA: Trunk density profile estimates from dual X-ray

absorptiometry. J Biomech 41:861-867, 2008.

17) Wicke J, Dumas GA: A new geometric-based model to accurately estimate arm and leg inertial estimates. J Biomech 47:1869-1875, 2014.

18) Ali MDA, Lestrel PE, Ohtsuki F: Secular trends for takeoff and maximum adolescent growth for decades of Japanese cohort data. Am J Hum Biol 12:702-712, 2000.

19) リンダ・グラットン、アンドリュー・スコット：LIFE SHIFT 100年時代の人生戦略. 東洋経済新報社, 2016.

20) 平成28年度国民生活基礎調査の概況 . (<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa16/dl/05.pdf>), 2017年10月13日参照.

21) 鳥居 俊：女子長距離走選手における初経発来前のトレーニング開始は初経発来遅延や骨密度低下と関連する. 発育発達研究 32:1-6, 2006.

22) 日本骨粗鬆症学会、日本骨代謝学会、骨粗鬆症財団：骨粗鬆症診断 予防と治療ガイドライン 2015年版, ライフサイエンス出版, 2015.

23) 田中正栄、西野勝敏、飯田晋ほか：成長期少年野球選手の投球動作解析ー成長に伴う変化についての検討ー. スポーツ傷害 11:39-42, 2006.

謝 辞

本論文は早稲田大学所沢キャンパス近隣から東京都北東部に在住する日本人健康小児およびその保護者の方々の参加に支えられて何とか対象数を重ねることができた結果作成に到ることができた。当初より、日本人小児の運動器の発育に関する標準値を示す研究がなく、その必要性を強く感じて測定を開始した。その間、8年以上にわたり測定に出向いてくださった一家もあり、この方々との共同作業で標準値として提案する結果を得ることができたことに心より感謝している。

本研究の一部は既に国内の学会誌に投稿し掲載されているが、5章以下の上肢・下肢分節の発育様式の検討は2017年夏よりデータ化し始めたものであり、今後発育学関係の学会誌に投稿できるように体裁を整えていく予定である。

結果的には、先行研究に示された欧米人小児の発育様式と日本人小児の発育様式は異なることがなく、末梢先行、下肢先行、女児先行という様式はおそらく人種を越えた人類に共通の発育様式であろう。そのように結論するには全ての人種で計測し、結果を分析する必要があるが、そもそも本研究の開始のきっかけの一つに、著者が欧米人の発育様式と日本人のそれが同じとみなして学会で日本人小児のデータを論じた際に、先達の研究者よりその保証がありますか？、誰が調べたのですか？とお叱りを受けたことがある。

はからずも、このような形で博士学位論文にまとめることになったのは、いつまでたっても学位論文作成をしない著者に業を煮やした主査の坂本先生や教務主任の岡先生、坂本先生の畏友である樋口先生らの説得のおかげであり、副査に加わっていただく金岡先生も含めて、先生がたに深謝します。