

〔総 説〕

発育発達と Scammon の発育曲線

藤井 勝紀

(愛知工業大学大学院経営情報科学研究科)

Scammon's Growth Curve & Growth and Development

Katsunori FUJII

【Abstract】

Eighty years have passed since Scammon proposed the growth curve and even today it continues to be used in various fields. That is because it is an advantageous theory for explaining growth phenomena. However, there has been little verification of Scammon's growth curve over these 80 years. It is also true, of course, that no methodology for verification of this theory has been established. The reason is thought to be that best methods for describing the growth curves of various physical attributes and deriving velocity curves have not been established. This study attempted to verify Scammon's growth curve using the wavelet interpolation model proposed by Fujii. First, the four growth curve patterns from Scammon's original paper were confirmed. An examination was then made of how the four growth patterns are related to growth phenomena. At the same time the wavelet interpolation model was applied to investigate the reliability of these growth curves. The use of a cross-correlation function was also proposed to verify the similarities and differences in growth curves, and the similarities and differences of Scammon's four growth curve patterns were investigated. Differences were seen in neural, lymphoid, and genital (general) types, but conversely a very close similarity existed between the genital and general types. Based on these findings a new growth model is proposed, divided into three types: neural type, lymphoid type, and general type, with the general type consisting of a genital type, visceral type, and morphological type.

Key words : Body composition, Motor fitness development, Age at MPV, Change with age, Wavelet Interpolation Method

キーワード 発育発達, MPV 年齢, ウェーブレット補間モデル, 相互相関関数

I. 緒言

成長を学問的意味として捉えれば、個体が時を経るごとにその変化を示す現象であり、その学問としての起源は発生学にその端を求めることができる。近年における成長学 (Auxology) の意義は、『生体が生まれてから成人を経て死に至るまでの質的、量的時間的変異を一連の現象として捉え、その現象を把握、解明し、そこから普遍的法則性を究明しようとする学問大系である』と考えられる。ちなみに、出生から成人に達するまでの時間的変異を扱った学問領域は狭義の意味での『成長学』と理解されているが、研究分野によっては『発育学』、『発育・発達学』とも理解されている。松浦³⁵⁾によれば、出生から成人までの量的変異について『発育』を用い、質的変異については『発達』を用い、特に体育・スポーツ科学分野では『発育』『発達』を並記して用いることを説明した。そして、この分野における学問体系として発育・発達学を提唱した。また成人を経て、死に至るまでの時間的変異を扱った学問領域として、最近、注目されてきたのが老化学といえよう。

そこで、体育学・スポーツ科学の分野として発育・発達学へのアプローチを考えれば、必然的に自然科学系の立場を取ることになり、次の2つの方法が考えられる。その1つは発育・発達現象の実態を明確にすることであり、もう1つは明確化された実態から一般的な法則性を究明しようとするものである。もともと、成長学としては医学者の Tanner⁴²⁾が『Auxology』として提唱した学問大系であり、生物学、医学から派生した学問分野であることは周知のことである。したがって、研究の手法大系は生物学、医学における手法理論を適用してきた経緯がある。しかし、発育・発達学を含めた成長学の大きな特徴は人の時間的変異を扱うことであり、よって時間の変化の扱い方が研究の手法理論に繁栄されることになる。古典的な成長研究で有名な Scammon³⁹⁾は成長現象の実態解明の手法として、多くの横断的集団データを扱う方法と個々による追跡、継続する方法があると述べている。Tanner⁴³⁾⁴⁵⁾、Tanner et al⁴⁴⁾は自ら縦断的資料に対して graphic method を提唱した。しか

しながら、発育・発達学の科学的的手法理論は未だに確立されているとはいえない。今日、発育・発達学の普遍的法則性へのアプローチを探る鍵として数学関数の当てはめの議論はコンピューター社会において重要な意味を持つものと考えられる。

そこで、藤井¹⁷⁾は発育曲線を科学的に解析する手法としてウェーブレット補間法 (WIM) を提唱した。この手法の提唱によって青年期における身体的発育パターンの解析、女子スポーツ選手の初経遅延の検証、幼児期の身体的発育発達の検討等多くの知見¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²²⁾²³⁾²⁵⁾を導いてきた。もちろん、形態的要素の発育だけでなく、近年では身体組成や骨密度などの測定法も確立され、簡便な BIA (Bioelectrical Impedance Analysis) 法や OSI (Osteo Sono-Assessment Index) や Stiffness 値等の骨評価値で示される骨密度測定法も開発され、それらの加齢変化が検討されている。しかしながら、このように解析手法の科学性が確立されてきたにも拘わらず、依然として Scammon の発育曲線が活用されている。

Scammon の発育曲線は、彼が 1930 年に “The measurement of Man” で人の身体諸属性は大きく 4 つのパターンに分類されることを提唱した。その後、約 80 年が経過した今日においても Scammon の発育曲線として広く様々な分野で活用されている。神経型、リンパ型、生殖型、そしてそれら 3 つのパターンに属さない諸属性のパターンを一般型として類別した。視覚に訴える限り、非常に明瞭に判別できる。しかしながら、4 つのパターンの発育曲線に人の諸属性のすべてが分類されるのであろうか。実は、現在まで Scammon の発育曲線は科学的な検証はなされていないのである。仮に、身体諸属性である各臓器の加齢変化現量値をプロットしてグラフ化しても、描かれた曲線を客観的に区別できる手法がない。つまり、発育曲線の類似性や相違性を客観的に評価する手法が確立されていないのである。

II. Scammon の発育曲線とは

スキヤモン (Scammon, R E³⁹⁾) は、「成長と分化」をテーマに、ヒトの身体諸属性の発育につ

いて検討を試みた。Scammon は先ず身体の全体的な発育について、身長、体表面積、体重、座高等の横断的データを基にグラフ化した。図1は Guttman²⁶⁾ が観察した生のデータを基に、出生から成人までの体重の成熟別に分けた4タイプの個々の発育をグラフ化したものであり、図2は Emerson and Manny³⁾ によって与えられた体重の出生から18歳までの横断的発育をグラフにしたものであるが、これらグラフはS字状カーブ、すなわちシグモイド曲線を示すことを導いた。したがって、身体全体の発育はすべて同じ発育パターンを示し、さらに内臓の発育も体重に含まれるので、肝臓等の発育パターンを検討して、身体全体の発育と同じようにシグモイド曲線を示すことを提案し、そのような諸属性の発育パターンを

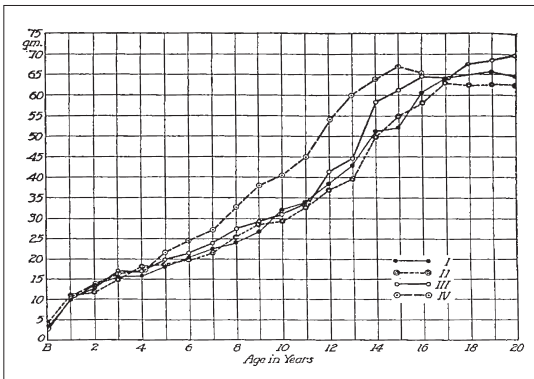


図1 Guttman (1915) による体重の出生から成人までの成熟別に分けた個々の発育曲線

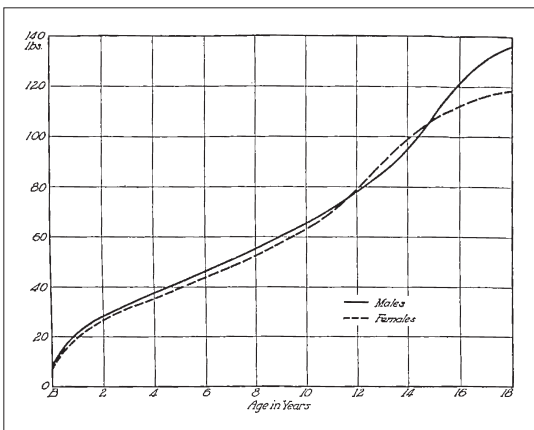


図2 Emerson and Manny (1920) による体重の出生から18歳までの横断的発育曲線

一般型と名称化した。

Scammon は同様の方法で、脳重量（脳全体の重さ）を基本に、小脳、眼球等の発育をグラフにして、出生後急激に発育し、10歳頃にはほぼ停滞を示す発育パターンを提案し、神経型と名付けた。次に、リンパ様組織の発育について検討し、特に胸腺重量の発育をグラフ化して検討し、出生後急激に増大し、思春期にピークを示し、成人になると減少するが、成人値を100%とすれば、思春期ではほぼ200%近くなる発育パターンを示すことを提案し、リンパ型と名付けた。そして、最後に生殖組織に関する内臓の発育について、睾丸、卵巣、前立腺等の発育をグラフ化して検討し、幼少期には僅かな増大であるが、思春期になると急激な増大を示すパターンを提案し、生殖型と名付けた。

Scammon は以上のような論述からヒトの身体諸属性を大きく4つのパターンに分類することを提唱した。図3は Scammon が提唱した4つの発育パターンを一種のモデルパターンと考え、創作によったアイデアをフリーハンドによってグラフ化したものである。簡単に説明すると、特徴的な発育パターンを示す神経系型のパターンは、出生直後から急激に発育し、4、5歳までには成人の80%程度（6歳で90%）にも達する。生殖器系型は、男児の陰茎、睾丸、女児の卵巣、乳房、子宮などの発育を示す。男女で異なるが、男子の場合、10～12歳頃まではわずかに成長するだけだが、14歳あたりから急激に発育する。女子の場合は男子

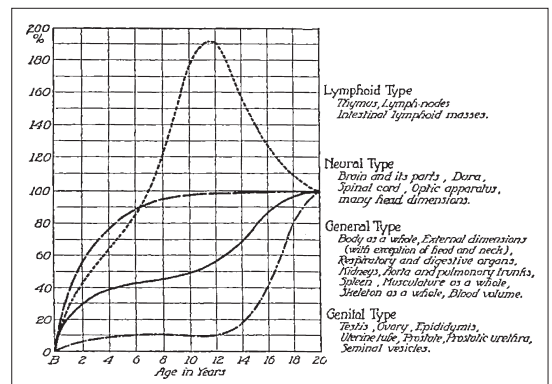


図3 Scammon (1930) のアイデアで作図した身体の4つの発育曲線パターン

より2年程度早くなる。特に、中学、高校に入るとより鮮明に現れる。リンパ系型は、免疫力を向上させる胸腺、扁桃、リンパ節などのリンパ様組織の発育で、生後から12・3才までにかけて急激に発育し、成人のレベルを超えるが、思春期を過ぎてから成人値に戻る。最後に一般型であるが、研究者の判断としては、以上述べた3パターンに分類されない形質を総合して一般型にしたと理解したのである。一般型の特徴は、乳幼児期までは神経系型と同じように急激に発育し、その後定常状態になり、再び思春期といわれる12、13歳頃から急増するS字状のシグモイド曲線を示す。つまり、身長、体重等の身体全体の発育パターンと心臓、肝臓、肺、腎臓等の胸腹部臓器の発育パターンを大雑把に判断すれば、シグモイドカーブを描く曲線となる。しかし、シグモイド状にもいろいろあり、思春期最大発育を示す時期は大きく異なるわけで、Scammonはそのような点は検討していないので、神経型、リンパ型、生殖型以外をすべて一般型に類別したような印象がある。

しかしながら、Scammon³⁸⁾はすでに自身の本の中で、リンパ型に属する甲状腺、下垂体、胸腺の発育パターンが少し異なることを示している。図4はScammonの“The measurement of Man”に描かれている胸腺、甲状腺、脳下垂体、副腎重量の発育曲線であるが、胸腺に関してはScammon

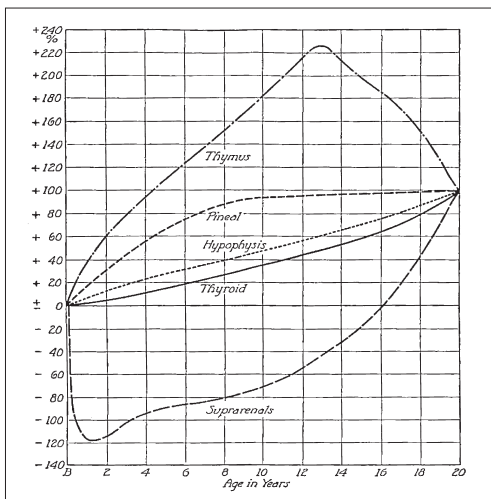


図4 Scammon (1930) による胸腺、甲状腺、脳下垂体、副腎重量の発育

が描いたリンパ型のモデル曲線と似ているようであるが、他の甲状腺、下垂体重量の発育は全く異なった曲線を示している。このように Scammon はすでにリンパ型の発育パターンがすべてのリンパ様組織に当てはまらないことを示しており、彼が提唱した発育曲線はあくまでもある一定の事実による推定から導かれた仮説のモデル曲線であり、科学的な検証は成されていないといえよう。

Ⅲ. 発育発達と Scammon の発育曲線の接点

Scammon の発育曲線が現代まで幅広く活用されてきた背景には、現実の発育現象と照らし合わせた場合に非常に上手く説明できた点にある。例えば、日本人成人の場合7頭身が多いが、出生直後は4頭身程度であり、胎児では3頭身の時期もある。このような発育に伴う頭身の変化を説明するときによく用いられてきた。つまり、高石⁴¹⁾は身長、体重などの一般型発育パターンと頭部の発育を示す神経型発育パターンの相対的な発育として説明しやすいと述べている。そして、高石⁴¹⁾が強調していることは、「成熟までの増加量を100とした生後の増加量の大きさ」としていることで、4つの諸属性のすべての曲線が出生時を0として出発し、20歳時で100に到達している点が重要なのである。但し、頭身の加齢変化において下顎の発育は一般型の発育パターンを示すことを留意されたい。

また、神経型の発育パターンを引用して、神経系の急激な発育を示す乳幼児期では言語や寝等の人としての基礎的な知的能力をしっかりと身につけることが重要であることを説明できる点もある。思春期にニキビができるメカニズムについてもリンパ型の発育パターンで説明がつく。八木⁴⁶⁾はリンパ型の適用事象として胸腺の発育を例にとり、児童期にほぼ免疫機能は成就することから、胸腺の発育は出生時では他の臓器と比べて不釣り合いに大きいが、その後急激に増大し、思春期以後はその任を終え、減少局面に入ると説明している。つまり、このような機能は胎内環境から出て直ちに外界の細菌や異物に対して反応しなければならず、このような免疫の役割に対応した人

の進化システムと考えられる。この事実もまた Scammon のリンパ型発育曲線で説明できる。陰莖や乳房が思春期で急に大きくなることは生殖器型の発育パターンから説明される。このように人の出生後の発育を論じる場合、個々の諸属性の発育を理解する前に Scammon の発育曲線を参考にする事で大凡の発育の概観が把握できる便利さがある。

これまで、Tanner⁴³⁾⁴⁵⁾をはじめとして、日本における発育学の先駆者として権威ある木村³¹⁾、高石ら⁴⁰⁾の著書にも Scammon の発育曲線が活用されている。近年では Malina and Bouchard³³⁾、松尾³⁶⁾、浅井¹⁾、彼末と能勢²⁸⁾、松浦³⁵⁾の著書の中にも引用され、活用されてきた経緯がある。筆者が関係した著書¹⁷⁾²¹⁾²⁹⁾³⁰⁾にも必ず Scammon の発育曲線を引用した。もちろん、さらに列挙すれば高校の保健体育の教科書まで Scammon の発育曲線が取り上げられてきた。結局、80年以上経った現在でも Scammon の発育曲線が活用されている背景には、発育現象を説明するうえで都合の良い便利さが、Scammon という医学、人類学の研究者というステータスと共存することによって保証されたのであろう。彼が提唱した身体諸属性を4つの発育パターンに分類した手法を科学的に検証したとは考えにくい。1930年代の科学では無理もないから、多くの身体諸属性の発育データから発育現量値のグラフを描き、視覚による判断から4つのパターンを検討したのであろう。

IV. Scammon の発育曲線の信憑性

Scammon の発育曲線における4分類された諸属性の発育パターンについては、高石ら⁴⁰⁾がそれぞれの諸属性のデータから出生後の発育をグラフにしている。神経型であれば脳重量の発育を示し、リンパ型では胸腺の発育を、生殖器型では睾丸重量の発育を、そして、一般型では身長、体重はもとより、内臓の臓器として心臓や肝臓の発育を示している。確かにこれら諸属性の発育現量値曲線を視覚に訴える限り類似性を示しているといえよう。また、特に一般型では、作図法による年間発育量から描かれた速度曲線から判断してもその類似性は思春期ピークが存在から確認できる。しかし、そのことが Scammon の発育曲線を正当化しているとはいえない。小林³²⁾は子どもの臓器の発育を議論する中で、臓器の発育を扱った研究が如何に少ないかを述べている。それは、1967年に出版された「成長の形態学」の中で、満川らが報告した臓器重量発育値が貴重な資料となっているが、それ以後、本来の目的以外の遺体解剖が禁止されたことにより臓器別の発育を研究することがなくなったことに起因している。このような背景によって Scammon の発育曲線を検証することが困難になったこともある。そこで、小林³²⁾は満川と吉村が東京都監察医務院において解剖した検体868例を用いて報告された月齢別、年齢別の各臓器重量の平均値に基づいてグラフ化した。図5～8は神経型の脳重量、一般型の肝臓、リンパ型の胸腺、生殖器型の睾丸の発育を示したもので

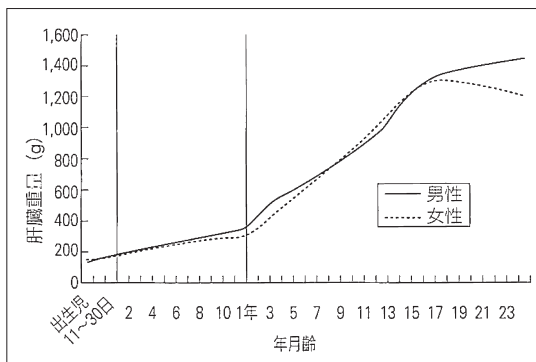


図5 小林(2003)による肝臓重量の発育現量値曲線

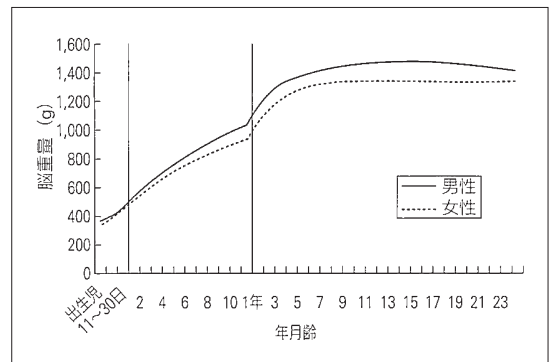


図6 小林(2003)による脳重量の発育現量値曲線

ある。確かにこれら臓器の発育現量値曲線から判断すると、それぞれ4つの発育パターンに類似しているようであるが、結局は視覚的な判断に依存しており、客観的な判断を示す方法がないのである。保志²⁷⁾は Scammon の発育曲線を実際の暦年齢軸に対する数値を適用することで改訂版を作成した(図9)。リンパ型は省略されているようであるが、発育現量値曲線を問題にする限り、出生時を0にしてもしなくとも発育パターン自体が大きく変わることはない。むしろ分類された発育パターンが分かりにくい欠点がある。

そこで、藤井ら²¹⁾は、Scammon の発育曲線によって分類された4つのパターンに属する各臓器の加齢変化現量値に対してウェーブレット補間法を適用し、各臓器の発育速度曲線を導くことによって4つの発育パターンを客観的に検証した。現量値曲線からの判断だけでは視覚的に頼る方法しかなく客観的な評価は難しいが、速度曲線の挙

動を判断し、特に、一般型の発育パターンについては思春期ピークを把握することにより、現量値曲線がシグモイド状曲線を示していることを確認することができた。図10は高石ら⁴⁰⁾のデータを利用して肝臓の発育現量値に対してウェーブレット補間法を適用したグラフである。現量値曲線は視覚的にはシグモイド状を示しているようであるが、あくまでも視覚的な判断である。しかし、速度曲線の挙動から思春期最大発育速度(MPV: Maximum Peak Velocity)を検出したことによって、現量値曲線がシグモイド状を示すことを明確

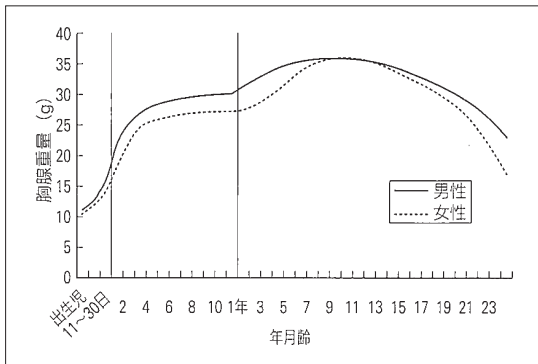


図7 小林(2003)による胸腺重量の発育現量値曲線

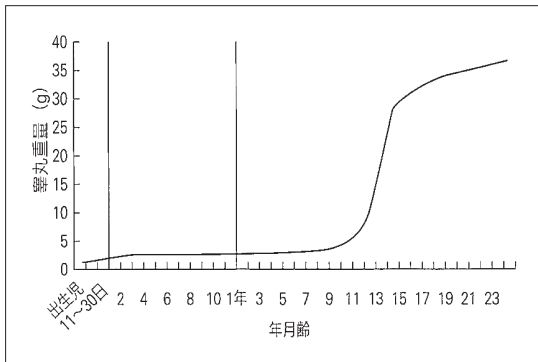


図8 小林(2003)による睾丸重量の発育現量値曲線

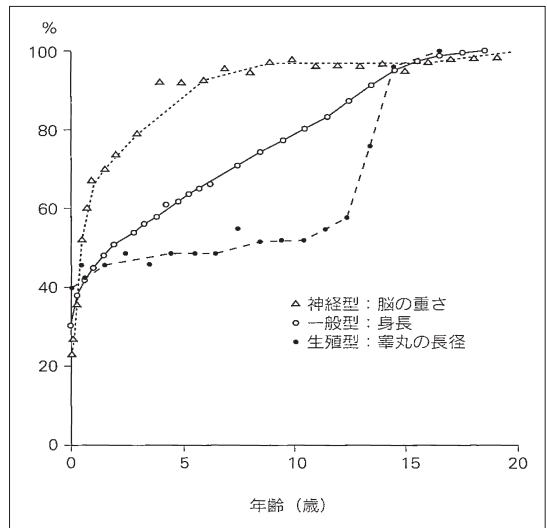


図9 保志(1988)による Scammon の発育曲線の改訂版

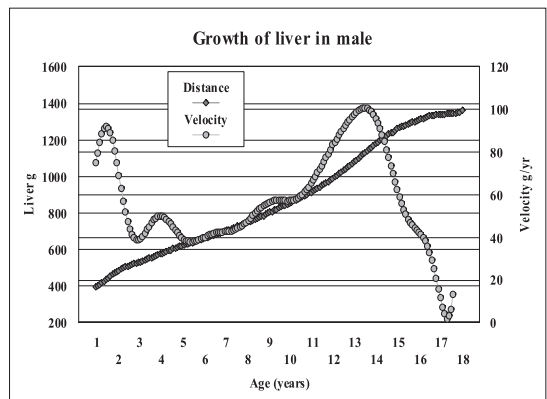


図10 藤井(2008)によるウェーブレット補間モデルで描かれた肝臓重量の発育現量値および速度曲線

にしている。さらに、図 11 の脳重量の発育についても、速度曲線の挙動から判断すれば、現量値曲線が乳幼児期に急増している様子が視覚的に見られるが、正に速度曲線は急激に減少し、以後一定となっていることから現量値曲線の挙動を神経型と見なすことができよう。図 12、13 のリンパ型の胸腺発育、生殖型の睾丸の発育についても、速度曲線の挙動からそれぞれの発育パターンを明確にしている。

しかしながら、速度曲線の挙動から判断したとしても、今までの Scammon の発育曲線の 4 つのパターンを確認したにすぎない。つまり、Scammon³⁸⁾ が身体 の発育パターンを大きく 4 つに分類したことに大きな間違いはないということ

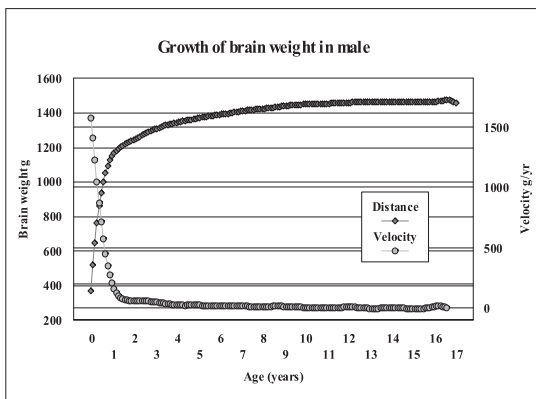


図 11 藤井 (2008) によるウェーブレット補間モデルで描かれた脳重量の発育現量値および速度曲線

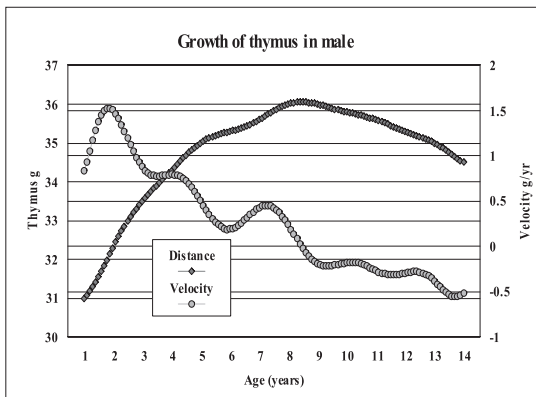


図 12 藤井 (2008) によるウェーブレット補間モデルで描かれた胸腺重量の発育現量値および速度曲線

である。そのことが Scammon の発育曲線を本質的に検証していることにはならない。それは 4 つの発育曲線が独立しているか、場合によっては曲線同士の類似性があるのかその点は全く分からないのである。つまり、現量値および速度曲線の相違性或類似性は思春期ピークの存在の有無だけから判断できるわけではないので、曲線の相違性或類似性を計量的に判断できなければ科学的には検証が不可能であろう。

V. Scammon の発育曲線を再検証する

ここまで Scammon の発育曲線の信憑性について議論してきたが、人の身体諸属性を大きく 4 つのパターンに分類したことは本質的に間違っていないであろう。しかし、間違っていないが、4 つの発育パターンが本当に独立しているのか、その点は改めて検証することが必要である。問題はそれぞれ 4 つの発育曲線のパターンが相違性を示すのか、類似性を示すのかその点を検証する方法が確立されていないのである。そこで、Fujii and Mishima²⁴⁾ は曲線の類似性を検証する手法として、双生児における 1 卵生と 2 卵生の体格発育について、どちらの類似性が高いのか検証した。この検証方法について、曲線の類似度を調べるために 2 つの曲線間における片方の曲線を折りたたむことによりその変化を解析する Cross correlation function (相互相関関数) を適用するこ

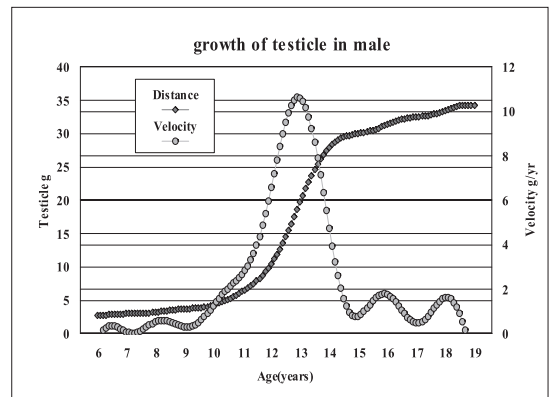


図 13 藤井 (2008) によるウェーブレット補間モデルで描かれた睾丸重量の発育現量値および速度曲線

とを提唱した。ここで類似性が検証できれば相違性も同時に検証することが可能となる。ところが、相互相関関数を適用するためには、最低限発育曲線が関数化できなければならない。そのためには藤井⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹²⁾¹⁷⁾が提唱したウェーブレット補間法によって発育曲線を近似することが必須条件となる。このような条件が整ったことにより Scammon の発育曲線の再検証を試みる。

1. 再検証の方法論

1) データの構成

一卵性双生児一対、二卵性双生児一対における身長、体重、座高、下肢長の6歳(小学1年)から17歳(高校3年)までの縦断的発育データを得た。また、Scammon の発育曲線から分類される4つの諸属性として、高石ら⁴⁰⁾が示している脳重量(神経型として)、胸腺、扁桃腺(リンパ型として)、睾丸(生殖型として)、肝臓、心臓(一般型として)の1歳から20歳までの横断的発育データを使用した。さらに、2005年度、文部科学省から公表されている体力・運動能力調査記録より握力、立ち幅跳び、50m走、走り幅跳びの6歳から17歳までの横断的発達データを得た。

2) 解析手法

① Wavelet Interpolation Method

ウェーブレット補間(Wavelet Interpolation Method: WIM)は、与えられた発育データから真の発育曲線を近似的に記述するために、データとデータをウェーブレット関数によって補間し、発育現量値曲線を描き、その描かれた現量値曲線を微分して得られた発育速度曲線を導き、思春期ピークや初経年齢時の発育現量値を調べる方法である。ウェーブレット補間法の有効性については、局所的現象を敏感に読み取り、近似の精度が極めて高いことである。その理論的背景の詳細や有効性の根拠については、藤井による先行研究⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹²⁾¹⁷⁾ですすでに述べてあるので省略する。

② Cross correlation function

相互相関関数とは、2つの波形の類似性を表すために用いられる関数で、以下に示した関数の片方を畳み込むことによって相互相関関数を求める

ことができる。さらに、類似している部分があれば、どの程度の時間差があるのかを調べることもできる(松浦ら³⁴⁾、山田ら⁴⁷⁾)。そこで本研究では、双生児の体格、Scammon の発育曲線として分類される各種臓器および運動能力の発育発達現量値に対してウェーブレット補間法を適用し、微分して導かれた速度曲線の数値に対して相互相関関数を想定することになる。算出された2つの速度曲線の数値をそれぞれ $x'(t)$ 、 $y'(t)$ とすると、平均値を差し引いた変動 $x(t)$ 、 $y(t)$ は、 $x(t) = x'(t) - \mu$ 、 $y(t) = y'(t) - \mu$ となる。この変動 $x(t)$ 、 $y(t)$ を用い、 τ を一方のデータに与える時間のラグ、 n をデータ数とすると、相互共分散は次のように定義される。

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t+\tau) dt$$

この相互共分散 $C_{xy}(\tau)$ を2つの速度曲線の数値 $x'(t)$ 、 $y'(t)$ の標準偏差で正規化したものが相互相関であり、次のように与えられる。

$$R_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{C_x(0)C_y(0)N-j} = \frac{\overline{x(t)y(t+\tau)}}{\sqrt{x^2} \sqrt{y^2}}$$

このようにして算出する相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ を用いて解析を行った。

2. 再検証における論議

1) 双生児の類似性に関する科学的検証

図14は一卵性双生児一対の身長発育に対して、図15は二卵性双生児の身長に対してウェーブレット補間法を適用したものである。両グラフにおいて身長発育の速度曲線を視覚的に概観すれば、一卵性双生児の類似度が視覚的には高いことが伺われる。そこで、ウェーブレット補間法によって記述された一卵性、二卵性双生児の身長発育に対して相互相関関数を適用し、片方の発育現量値および速度値を折りたたみによって導かれた相互相関係数の変化が図16、17に示された。両グラフに示された相関係数の変化を検討すると、一卵性双生児の方が $r=0.9$ 、二卵性双生児が $r=$

0.7で明らかに一卵性双生児の類似度が高いことが認められた。同様に、体重、座高、下肢長についても解析しており、ここには示してはいるが、体重も一卵性の相関係数が高く、さらに座高、下肢長についても一卵性双生児の相関係数が高く、一卵性の類似度が高いことが示された。やはり、遺伝性の高い長育については当然のごとく一卵性の類似度が高いことが客観的に証明された。このような解析結果から、相互相関関数は2つの時系列波形がどの程度相互依存しているか、もしくは類似しているかを示すもので、2つの波形の位相ずれ時間、 Δt の関数として表される。相互相関関数は時系列波形 $x(t)$ と $y(t+\Delta t)$ があるとき、両者間の相関係数を Δt を増加させながら計算することにより求めることができる。したがって、相関係数と同様に $+1 \geq r \geq -1$ の範

囲にあり、0である場合は $x(t)$ と $y(t)$ の間に相互依存あるいは類似性が認められないことを意味する。特に、本項では $x(t)$ として各身体諸属性の発育現量値に対してウェーブレット補間を適用し、その一次導関数を当てていることに留意してほしい。

本項では相互相関関数の性質を利用して、まず、双生児の一卵性と二卵性の類似度を検証した。もちろん、双生児において一卵性の類似度が当然高いと考えられているが³³⁾³⁵⁾⁴⁰⁾、人は個体差が大きいので二卵性の類似度が高い可能性もある。したがって、本項では体格発育について一卵性、二卵性における類似度を比較検証し、体格属性によって類似度がどの程度異なるのか科学的に解析したわけである。まず、身長発育についてみると、明らかに相互相関係数は一卵性が高い。し

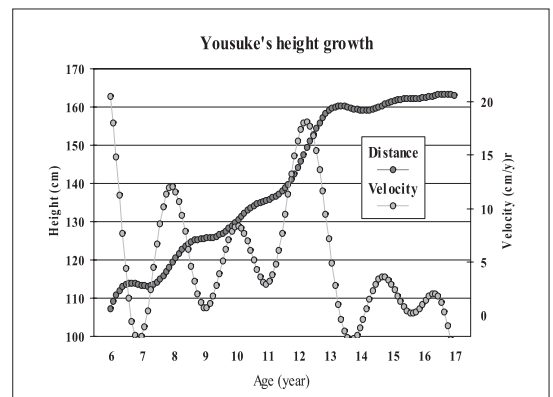
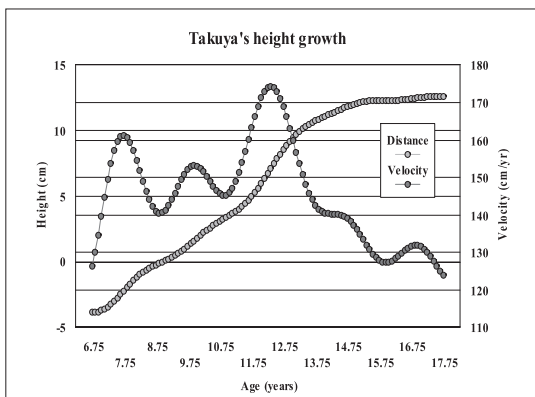
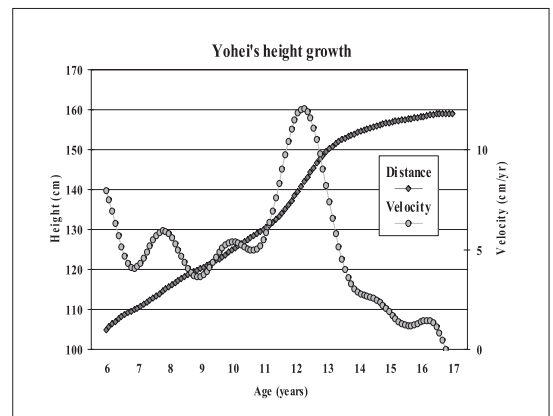
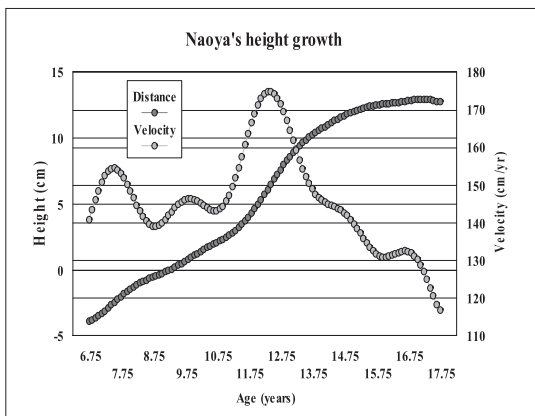


図14 ウェーブレット補間モデルによる一卵性双生児一対の身長発育現量値および速度曲線 (名前は架空の名前である)

図15 ウェーブレット補間モデルによる二卵性双生児一対の身長発育現量値および速度曲線 (名前は架空の名前である)

しかし、相関係数としては0.2程度の差であるが、係数から客観的に判断された意義が大きいと考える。他の体格諸属性である、体重、座高、下肢長についても身長と同様に一卵性の類似度が高いことが示された²⁴⁾。このように相互相関関数によって客観的に類似性が判断されたことは、今後の身体発育パターン解析に重要な提示となろう。

2) Scammon の発育曲線の類似性と相違性の検証

前項ですでに示した図10~13は Scammon の発育曲線の4つのパターンに分類される身体諸属性 {肝臓 (一般型)、脳重量 (神経型)、胸腺 (リンパ型)、睾丸 (生殖型)} の発育現量値に対してウェーブレット補間法を適用し、現量値と速度曲線が描かれたものである。視覚的には速度曲線の

挙動から判断して、Scammon が提唱した4つのパターンに類似していることが伺われる。そこで、先ず、これらの発育曲線の相違度について相互相関関数を適用して検討した。各パターン間の相違度は異なると考えられるので、4つの身体諸属性間においてそれぞれの相違度を相互相関関数から導いた。その結果、脳重量 (神経型) と胸腺 (リンパ型) では $r=0.75$ 程度あり、脳重量と睾丸 (生殖型) では $r=-0.45$ と逆相関が示された。脳重量と肝臓 (一般型) においても $r=-0.63$ と逆相関が示された。次に、胸腺と睾丸では $r=-0.7$ 、胸腺と肝臓では $r=-0.8$ 、さらに睾丸と肝臓では $r=0.9$ とかなり高い相関を示した。このように、明らかに4つのパターン間における相互相関係数は異なり、パターン判別が可能であることが示された (図18~20)。一方で、意

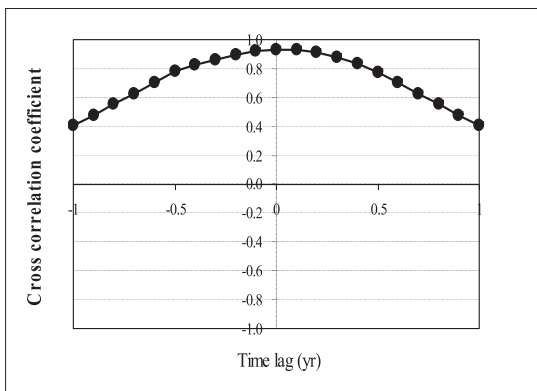


図16 一卵性双生児の身長発育における相互相関係数の変化

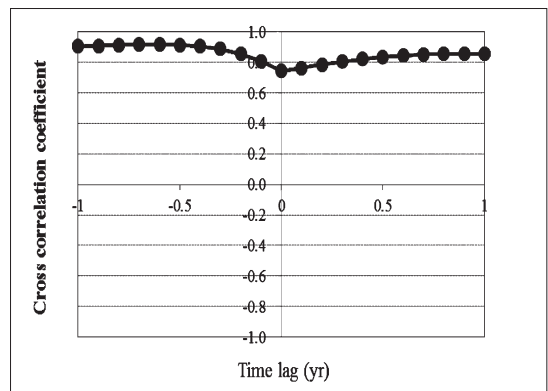


図18 脳重量と胸腺重量との間における相互相関係数の変化

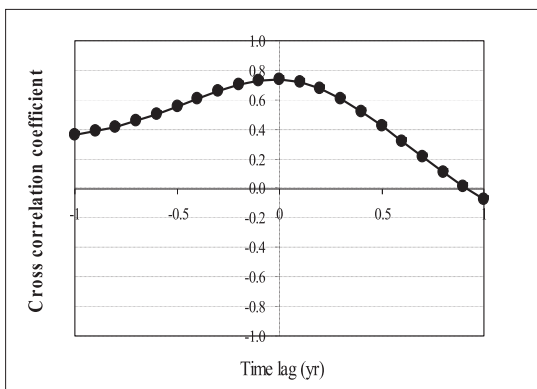


図17 二卵性双生児の身長発育における相互相関係数の変化

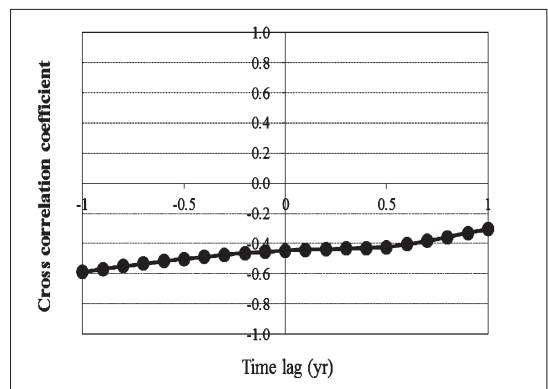


図19 脳重量と睾丸重量との間における相互相関係数の変化

外にも脳重量と胸腺の類似の可能性や、睾丸と肝臓の類似の可能性も指摘された。

Scammon の発育曲線について、本来は4つのパターンに分類される諸属性を多く使用して、解析することが必要であろうが、ここではその客観的な手法によって区別が可能である提示までにしておく。本項では脳重量（神経型）と胸腺（リンパ型）の類似の可能性、睾丸（生殖型）と肝臓（一般型）の類似の可能性が指摘されたわけであるが、双生児の類似性でも示したように、同じパターン間では相互相関係数が高い中で係数の違いが判断される。しかし、パターンが異なる関係では類似性の可能性といっても係数の違いは大きいと考える。したがって、Scammon の発育曲線のパターンの違いを相互相関関数で判断する係数の基準は、 $r=0.3\sim 0.4$ 程度でパターンの相違性が示され、 $r=0.1$ 程度の違いは同じパターンと考えられる。そのように考えると、脳重量に対して、胸腺、睾丸、肝臓の発育パターンは明らかに異なると考えられる。胸腺に対しては、睾丸、肝臓の発育パターンも異なると考えられるが、しかし、睾丸と肝臓の発育パターンは非常に類似性が高いと考えられる。つまり、神経型、リンパ型、生殖型（一般型）との間では明らかに発育パターンの相違性が認められたことになるが、逆に、生殖型と一般型は非常に高い類似性が認められたことになる。Scammon³⁸⁾ は神経型、リンパ型、生殖型に属さないパターンを一般型に分類した経緯を考えると、本項における再検証によって新たに生殖

型と一般型はかなり類似性が高いことを客観的に検証したといえる。

3) 運動能力発達のパターン類別の検証

木村³¹⁾によれば、運動能力発達のパターンは神経型と一般型の間タイプであることを提示した。もちろん検証されているわけではない。そこで、運動能力種目として、サイドステップ、立ち幅跳び、50m 走について、これら種目と神経型の典型である脳重量、一般型の典型である身長に対して先ずウェーブレット補間法を適用した。そして、導かれたそれぞれの種目の発育発達速度曲線に対して相互相関関数を適用した。先ず、図 21、22 は脳重量と立ち幅跳び、および脳重量とサイドステップおける相互相関関数を示したものである。係数を見ると脳重量とサイドステップとの相

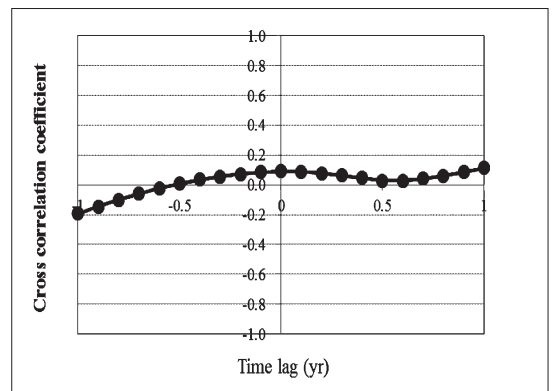


図21 脳重量と立ち幅跳びとの間における相互相関係数の変化

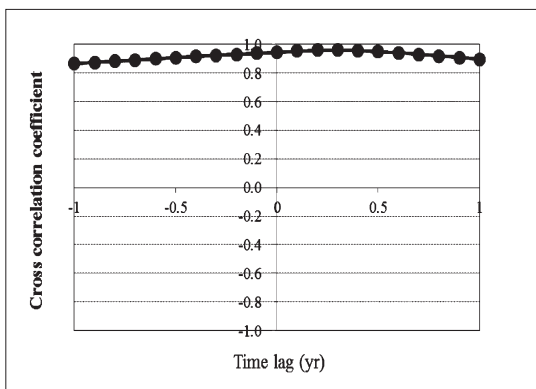


図20 肝臓重量と睾丸重量との間における相互相関係数の変化

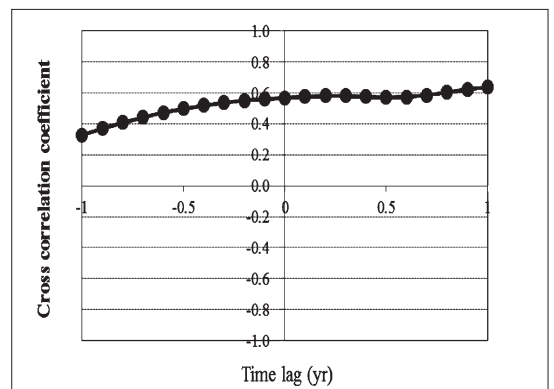


図22 脳重量とサイドステップとの間における相互相関係数の変化

互相関係数が大きいことが分かる。次に、図 23、24 は身長と立ち幅跳び、および身長とサイドステップにおける相互相関関数を示したものであるが、脳重量の場合とは逆に立ち幅跳びとの相互相関関係数が大きいことが示された。さらに、脳重量および身長と 50m 走における相互相関関数を求めると、脳重量と 50m 走では $r = -0.5$ 、身長と 50m 走では $r = -0.6$ 程度となり、50m 走は脳重量と身長発育と同じ程度の類似性が認められた。したがって、立ち幅跳びのような発達は一般型に近く、サイドステップのような発達は神経型に少し近いことが示された。そして、50m 走の発達は正に神経型、一般型の中間として位置づけられることが推察された。

木村³¹⁾が模索した、運動能力は神経型と一般型の中間型の発達パターンを示すと提示したが、相互相関関数を適用した結果、確かにサイドステップは神経型との相互相関係数が高く、一般型とは低い。また、立ち幅跳びは逆に神経型とは相互相関係数が低く、一般型との間では高いことが明確であった。しかし、50m 走では神経型と一般型において同程度の相互相関係数であった。したがって、本項では運動種目の適用が少なかったが、さらに多くの運動種目に相互相関関数を適用することによって発達パターンの類似性と相違性が検証できる方向性が確立できたといえよう。そして、Scammon の発育曲線を新たに意味づけしようとするれば、生殖型を無理に一般型と区別しなくとも同じ発育パターンとして分類し、神経型、

リンパ型、一般型の 3 つのタイプに分類し、一般型の中に生殖型タイプ、内蔵型タイプ、形態型タイプを構成してはどうであろうか。

VI. 新たな Scammon の発育曲線の提唱

ここまで述べてきたように、80 年経過した現在でも Scammon の発育曲線として都合よく活用されてきた背景には、ヒトの発育プロセスを説明するためには非常に都合の良い知見なのである。したがって、新たな提唱をしても、その提唱の理論が発育現象を説明するために都合が良ければ改訂版として活用されるであろう。しかし、都合が良くなければ従来の Scammon の発育曲線で十分である。前項でも述べたが、保志²⁷⁾は Scammon の発育曲線を実際の暦年齢軸に対する数値を適用することで改訂版を作成した(図 9)。保志²⁷⁾によれば、Scammon は成人値を 100 としただけでなく、出生時もすべて“0”として作図しているが、実際の諸属性において出生時はゼロではない。このような意味から改訂版を作成したのであり、このことから出生時の脳重量は成人値の 20% 程度なのに対して、精巣の大きさは 40% にも達していることを説明した。しかしながら、Scammon の発育曲線はそれぞれの諸属性のイメージ的な曲線を示しているだけで、出生時がゼロであろうがなかろうが、曲線のイメージには関係がない。さらに言えば、現量値曲線だけを問題にしている限り、発育パターンの類別を誤る危険

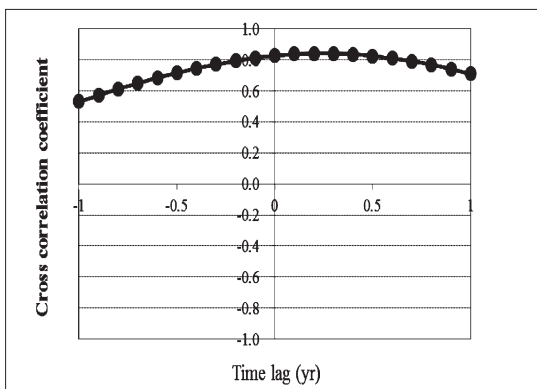


図23 身長と立ち幅跳びとの間における相互相関係数の変化

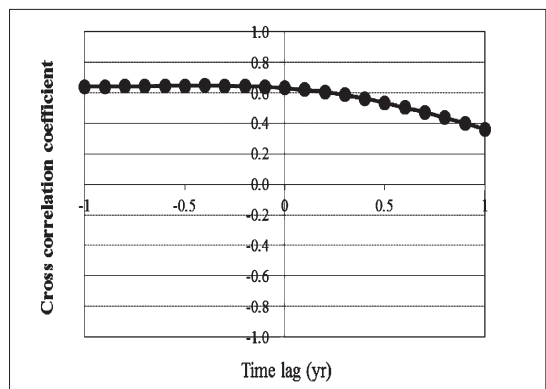


図24 身長とサイドステップとの間における相互相関係数の変化

性がある。例えば、保志²⁷⁾は生殖型の分類に脳下垂体、甲状腺、副腎等の内分泌器官も含めている。しかし、Scammon³⁸⁾はこれら内分泌器官に関しては胸腺と同様にリンパ型として扱ったようであるが、実際のグラフでは下垂体と甲状腺は出生から成人まで直線的な変化を示し、副腎は出生時で一旦減少局面を示してから、思春期で急増するパターンを取っており、生殖型として分類はできないであろう。ただ、保志²⁷⁾は一般型について、何らかの程度のスパートを示す器官はすべて神経型と生殖型の間のどこかに位置することになると述べており、肝臓、腎臓などの内臓の多くは僅かなスパートを示すだけで、神経型に近い一般型であり、男子の筋肉や女子の骨盤発育は顕著なスパートを示し、生殖型に近い一般型であると説明している。このような保志²⁷⁾の解釈は間違っているとは言えないが、この解釈の客観性が問われるのである。つまり、思春期スパート現象の規模をどのように評価するか、その手法が確立されない限り神経型および生殖型に近い一般型という解釈は成立しないであろう。したがって、保志²⁷⁾が提案したScammonの発育曲線の改訂版は、発育現量値曲線を問題にする限り、出生時を0にしても少なくとも発育パターン自体が大きく変わることはない。むしろ分類された発育パターンが分かりにくい欠点があるといえる。

そこで、本総説においてウェーブレット補間モデルと相互相関関数を適用することによって、Scammonの4つの発育曲線の類似性と相違性を検討した結果、リンパ型、生殖型、一般型との間では明らかな相違性を示したが、一般型と生殖型はかなりの類似性を示した。この知見によって新たに提唱できることは、生殖型を一般型に含め、発育曲線タイプとして、神経型、リンパ型、一般型の3つのタイプに分類し、一般型の中に生殖型タイプ、内蔵型タイプ、形態型タイプを含めることにしたらどうであろうか。内臓と形態を分けるのは、身体のサイズと重量の違いであり、つまり、1次元（長さ）、2次元（面積）と3次元（体積、重量）の違いと言うことになろう。Scammon³⁸⁾は最初に一般型として身長横断的データおよび体表面積の横断的データの加齢変化を解析し、シグ

モイド状の加齢変化を示すことで分類した。さらに、体重の横断的データの加齢変化について解析し一般型として分類した。この時に、体重は内臓の総和と考えられるわけで、Scammon³⁸⁾は当然内臓は一般型に分類されなければならないと考えたわけである。しかしその後、保志²⁷⁾が提案しているように、一般型に分類される形質でも、思春期スパート現象の規模によって神経型と生殖型の中間型を指摘するならば、一般型を生殖型パターン、生殖型に比較的類似するタイプとして身体大きさなど形態的属性を示すパターン、そして、生殖型に遠いとされる内蔵型を示すパターンに分類することが提案される。

Fujii and Mishima²⁴⁾によってScammonの発育曲線の再検証をウェーブレット補間モデルと相互相関関数を適用し、一般型と生殖型が非常に類似性を示したことは、同時に保志²⁷⁾が提案した内容を確認したことにもなる。すなわち、思春期スパートの規模はウェーブレット補間モデルより記述された速度曲線から判断できる。それ故にその速度曲線に対して相互相関関数が適用され、曲線間の相関係数から類似性と相違性を判断することができたのである。その結果、本総説で提案した生殖型を一般型に組み込み、その一般型を3つのタイプ、生殖型タイプ、内蔵型タイプ、形態型タイプに分類することを提案するものである。もちろん、今回のデータ以上に多くの神経型、リンパ型、生殖型、一般型に属する発育パターンの相違性と類似性を検証することが必要である。しかし、形態的属性は縦断的データによる加齢変化の解析が可能であるが、身体内部の諸属性においては横断的データ以外では解析が不可能である。このような限界に加えて、近年では小林³²⁾が述べているが、本来の目的以外の遺体解剖が禁止されたために、さらに臓器別の発育に関する情報が得られなくなってしまった。したがって、内臓のような身体諸属性の発育情報には限界があるが、Scammonの発育曲線を客観的手法によって検証を試みたことは非常に意味あることと言えよう。

VII. おわりに

Scammon³⁸⁾ がヒトの発育パターンを4つの曲線に分類して80年余りを経過した今でも、人の発育現象を都合よく説明できる発育曲線グラフとして活用されている。しかし、その現象説明の都合の良さによって4つの諸属性の発育パターンが検証された経緯はない。前項でも述べたように検証する方法論が確立できていなかった点はある。従来まで発育曲線を記述する科学的な手法でさえ確立されていなかったのが現状である。このようなことから、筆者はウェーブレット補間モデルを提唱することによって身体発育曲線の速度曲線を記述し思春期ピークを詳細に検証した。よって、思春期スパートの規模を明確にするとともに、Scammon の発育曲線の4つのパターンが確認できた。さらに、ウェーブレット補間モデルによって速度曲線が描かれることにより、相互相関関数を適用し4つの発育曲線の類似性と相違性を検証することができた。そして、新たな Scammon の発育曲線を提唱してみたが、あまりに強くイメージされた4つの発育曲線を払拭することができるであろうか。いずれにせよ、さらに多くの神経型、リンパ型、生殖型、一般型の発育パターンを示す諸属性間の類似性、相違性について検討する必要がある、本総説で示した結果だけからでは確立した提案とまではいかないであろう。しかし、限られたデータではあるが初めて Scammon の発育曲線を再検証することができた意義は重要といえる。人間生活にとって不可欠なコンピューター時代を迎え、今後、Scammon の発育曲線を基にヒトの発育現象を解明し、新たなヒトの発育モデルを提唱するのも我々研究者の責務ではないだろうか。

参考文献

- 1) 浅井利夫 (2001) 子どものスポーツ医学, 新興医学出版社, 東京
- 2) 馬場一雄編 (1967) 成長の形態学, 医学書院, p19-22.
- 3) Emerson, W. R. P and Manny, F. A (1920) Weight and height in relation to malnutrition, Arch. of Pediat, 37, 468-485.
- 4) 藤井勝紀, 川波憲一, 長谷川泰洋, 山本浩 (1994) 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.
- 5) 藤井勝紀, 山本浩 (1995) 身長の成熟別発育速度曲線の解析, 体力科学, 44(3), 431-438.
- 6) 藤井勝紀, 山本浩 (1995) Wavelet Interpolation Method による男子体重発育における PWV の検討, 発育発達研究, 23, 27-34
- 7) 藤井勝紀, 川浪憲一 (1995) Wavelet 補間法による男子胸囲の発育曲線から導き出される速度曲線および P C V 年齢の検討, 学校保健研究, 37, 450-459.
- 8) 藤井勝紀, 松浦義行 (1996) 男子体格の平均発育曲線から導き出される速度曲線の解析, 体育学研究, 41, 247-260.
- 9) 藤井勝紀 (1996) Wavelet Interpolation Method による男子身長の M P V 年齢別平均発育速度曲線の解析, 東海保健体育科学, 18, 31-40.
- 10) 藤井勝紀 (1998) 身体的発育現象における phphase difference effect の検証, 東海保健体育科学, 20, 75-84.
- 11) Fujii, K. and Kawanami, K (1998) An analysis in regard to relationship between age at MPV of height and weight, and its sex difference. *Japanese Journal of School Health*, 40, 317-331
- 12) Fujii, K and Matsuura, Y (1999) Analysis of the growth velocity curve for height by the Wavelet Interpolation Method in children classified by maturity rate. *Am. J. Hum. Biol.*, 11, 13-30
- 13) 藤井勝紀 (2003) 日本女子スポーツ選手における初経遅延の検証－ウェーブレット補間法による解析－, 体育学研究, 48, 523-539.
- 14) Fujii, K. and Demura, S (2003) Relationship between change in BMI with age and delayed menarche in female athletes. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 22, 97-104.
- 15) Fujii K. and Demura S (2005) Confirmation of delayed menarche based on regression evaluation of age at menarche for age at MPV of height in female ball game players, *Environment Health and Preventive*

- Medicine, 10, 48-54.
- 16) Fujii, K., Demura, S. and Matsuzawa, J (2005) Optimum onset period for training based on maximum peak velocity of height by wavelet interpolation method in Japanese high school athletes, *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 24, 15-22.
- 17) 藤井勝紀 (2006) 発育・発達への科学的アプローチ - 発育・発達と健康の身体情報科学 -, 三恵社, 名古屋.
- 18) Fujii K. (2006) Connection between Growth / Development and Mathematical Function, *International Journal of Sport and Health Science*, 4, 216-232.
- 19) 藤井勝紀, 穂丸武臣, 花井忠征, 酒井俊郎 (2006) 幼児の体格・運動能力の発育・発達における年次変化に関する検証 - 身体成熟度からみたアプローチ, *体力科学*, 55, 489-502.
- 20) 藤井勝紀, 春日晃章, 花井忠征 (2007) ウェーブレット補間法による幼児の身体発育の年間時系列解析へのアプローチ, *教育医学*, 53, 194-204
- 21) 藤井勝紀編著, 石垣享, 正美智子, 斎藤由美 (2008) 生涯発達の健康科学 - 生涯にわたる健康への科学的探求 -, 杏林書院, 東京.
- 22) 藤井勝紀, 金俊東, 花井忠征 (2011) 乳幼児身体発育現量値および速度曲線の経年的変化に関する解析, *教育医学*, 56, 292-303.
- 23) 藤井勝紀, 伊藤幹, 斎藤由美 (2012) 青少年における身体発育の年次推移に関する検証, *日本生理人類学会誌*, 17(4), 145-154.
- 24) Fujii K and Mishima T (2012) Re-verification with regard to Scammon's Growth Curve-analysis based on Wavelet Interpolation Model and Cross Correlation Function -, *Journal of Education and Health Science*, 57(3), 243-251.
- 25) Fujii K, Kim J-D and Ishigaki T (2012) Examination of regional differences in physical growth in urban and rural areas. based on longitudinal data from South Korea, *Sport Sciences for Health*, ISSN: 1824-7490.
- 26) Guttman, M (1915) Einige Beispiele individueller körperlicher entwicklung, *Zeitschr. f. Kinderheilk.*, 13, 248-256.
- 27) 保志宏 (1988) ヒトの成長と老化, てらべいあ.
- 28) 彼末一之, 能勢博 (2011) やさしい生理学, 南江堂, 東京
- 29) 川村仁視, 新畑茂充, 太田和義, 藤井勝紀 (1982) 現代人の健康と運動, 杏林書院, 東京.
- 30) 川村仁視, 新畑茂充, 山田岳志, 藤井勝紀 (1990) 新訂 現代人の健康と運動, 杏林書院, 東京.
- 31) 木村邦彦 (1966) ヒトの発育, メジカルフレンド社.
- 32) 小林寛道 (2003) 子どもの臓器の発育, Vol. 1 (2), 85-89.
- 33) Malina, R. M. and Bouchard, C. (1991) Growth, maturation, and physical activity, *Human Kinetics Books*, Illinois
- 34) 松浦康之, 横山清子, 高田宗樹, 岩瀬敏, 嶋田勝彦 (2006) 健康女性を対象とした睡眠時における胃電図の周波数情報解析. *生体医工学*, 44, 560-566
- 35) 松浦義行 (2005) 身体的発育発達論序説, 不味堂書店, 東京.
- 36) 松尾保 (1988) 小児保健医学新版, 日本小児医事出版社, 東京
- 37) 村地俊二 (2005) 障害児の発達とその病像, 子どもと発育発達, Vol. 3(1), 31-35.
- 38) Scammon, R. E. (1930). The measurement of the body in childhood, In Harris, J. A., Jackson., C. M., Paterson, D. G. and Scammon, R. E. (Eds). *The Measurement of Man*, Univ. of Minnesota Press, Minneapolis.
- 39) Scammon, R. E. The first seriatim study of human growth. *American Journal of Physical Anthropology*. Vol. X, No. 3 : 329-336, 1927.
- 40) 高石昌弘, 樋口満, 小島武次 (1981) からだの発達 - 身体発達学へのアプローチ -. 大修館書店, 東京.
- 41) 高石昌弘 (2003) 発育発達と子どものからだ, 子どもと発育発達, Vol. 1(1), 9-12.
- 42) Tanner, J. M. (1947) The morphological level of personality, *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 40, 301-303
- 43) Tanner, J. M. (1962) Growth at Adolescent,

- Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- 44) Tanner, J.M., Whitehouse, R.H. and Takaishi, M. (1966) Standard from birth to maturity for height, weight, height velocity and weight velocity - British children 1965, Arch. Dis. in Child, 41, 454-471.
- 45) Tanner, J. M. (1978) Foetus into man, Open Books, London
- 46) 八木保 (2003) 個体の生い立ち, 子どもと発育発達, Vol. 1(4), 244-247.
- 47) 山田洋, 加藤達郎, 三上恭史, 金子公宏, 塩崎知美, 横井孝志 (2006) 幼児の跳躍動作における運動伝導の評価. 東海大学スポーツ医科学雑誌, 18, 62-68