A Characterization of Weight Growth in
Savannah Baboon

Hiroshi Sasaki and Takao Shohoji

Hiroshima University
Faculty of Integrated Arts and Sciences
1-1-89, Higashisenda-machi, Hiroshima 730 Japan

Summary

Generalized logistic type and Gompertz type growth models were used for the average body weights of savannah baboon. The average weights of the males were longitudinally compared with the females by adjusting the age axis. (e. g., the statistical onsets of adolescence of males and females were adjusted.) Also, growth curve was linearized for comparison. The growth patterns were similar until about 190 weeks old for the males. However, the growth patterns of average weights during adolescent growth cycle were different. Relative amounts of information per observation were obtained for a generalized logistic growth curve which might be useful for designs of experiments on nonlinear models.

1. はじめに

生物体の成長・発育は遺伝並びに環境などの因子から強い影響を受けて変遷ししかも安定している。これら成長発育過程は基本的で最も安定している生命現象の1つである。実際にこれらの成長・発育の解析に当たっては (1) 各個体の縦断的資料が利用できる場合と (2) 集団に対する横断的な統計量のみが利用できる場合と (3) これら2つの場合が混在する場合とがある。成長を特徴づけるに当たっては成長曲線のみならず成長速度曲線並びに成長加速度曲線をも十分に考慮する必要がある。各個体の縦断的資料が活用できる場合には、それら各個体の成長を成長模型とその成長に関わる母数によって統計的に特徴づけることが出来る。各個体の測定時年齢や特定の現象の発現時年齢は個体毎に異なっている場合が多い。集団の平均的な成長は単なる集団の測定値の平均値を取るよりも、個体ごとの成長過程の特徴づけを行って後に集団の平均的な成長として平均母数成長曲線などを考えると都合の良い場合が多い。しかし、成長の特性点などの特徴づけに当たっては模型の特性に関して注意を十分に払う必要がある。

Glassman et. al.(1984) は黄色ヒヒ *Papio Cynocephalus* に対する体重の縦断的な平均値などを報告するとともにそれに対する成長曲線や成長速度曲線に当たるものを報告している。これらの資料に対して一般化ロジスティック型成長曲線等を当てはめ体重の平均値成長曲線の特徴づけが行われている(Shohoji and Sasaki, 1985)。これまでにヒトの成長記録を基にして、ヒトの出生から成人までの成長過

Key words: generalized logistic growth model, Gompertz type growth model, growth curve, growth velocity curve, linearization, relative measure of maturity, savannah baboon, weight

程の一部分または全部の区間に対し数多くの成長模型が提案されている(Bock et. al., 1973; Preece and Baine, 1978; Shohoji and Sasaki, 1983)。しかし、これまでのところヒトの成長に対し満足した成長模型は得られていない。

2. 資料と成長模型

Glassman et. al. (1984)の表1にある縦断的な資料には87頭の黄色ヒヒの体重の平均、標準偏差及びその標本の大きさが記載されている。なお、45頭は雄であり42頭は雌である。表1には出生時、生後12週および28週以後は12週毎の体重の値が記載されている。全ての標本は7年間追跡調査されたものであり、しかも測定値は測定予定日の前後10日間以内に得られている。

成長を特徴づけるために生物学的に説明し得る数学的成長模型を導入することがある。しかし、適当な成長模型では成長に関する生物学的な説明は十分には行えないのみならず、間違った結果さえも導かれる事がある。各個体の体重の成長を特徴づけるに当たっては成長は各種の遺伝的因子や成長環境因子等に大きく関連していることを考慮すべきである。生物学的な観点からは個体単位での成長は集団の平均値の成長とは異なっているから、これら2つの成長模型は必ずしも同じ型である必要はない。しかし成長予測を行う場合には同一型の模型である方が取扱い易い。各個体の成長記録が利用できる場合には、その集団の平均的な成長を特徴付けて後に適当な条件のもとで成長の予測並びに比較を行うことも可能である。特に、比較等に当たっては多変量解析の手法などを利用すると有効である。ここで取り扱う資料は平均体重であるから、黄色ヒヒの平均体重の増加過程を対象にし、各個体の成長に対する議論は行わない。

年齢 t での体重を $W(t)$ とし成熟時の体重を U とする。体重の増加は成長の各時期でそれぞれ固有な特徴がある。ここでは、成長を乳幼児期の成長 $g(t)$ と思春期の成長とに分けて考える。成長期の各年齢での成長に関する横断的な資料はこれら2つの成長成分が適当に混じり合っているものとも考えられる。この度は、乳幼児期の成長としては便宜上 Count (1943)の模型

$$g(t) = C + Dt + E \log t$$

を用いる。ここで、 C 、 D および E は共に未知母数である。体重の観点から成長に関する相対成熟度

$$J(t) = \frac{W(t) - g(t)}{U - g(t)}$$

の導入を行い、出生から成熟時までの体重に関する一般的な成長模型

$$W(t) = g(t) + J(t) [U - g(t)]$$

を提案した。この成長模型に対し生物学的説明を与えることが出来る。特に、相対成熟度 $J(t)$ として

$$J_1(t) = e^{-e^{A-Bt}}$$

および

$$J_2(t) = (1 + F e^{A-Bt})^{-\frac{1}{F}}$$

の場合を取り扱う。なお、 A 、 B および F は成長を特徴づける正の母数である。また、 F の値を0に近づけると $J_2(t)$ は $J_1(t)$ に収束する。

Figure 1: Average growth and growth velocity curves of savannah baboon

図1の黄色ヒヒの雄の体重に対する相対成熟度として一般化されたロジスティック型関数 $J_2(t)$ を用い当てはめた結果は実線であらわし、雌の相対成熟度としてゴンパーツ型関数 $J_1(t)$ を用いた結果は鎖線で表した。なお、図1で実際の雄の体重の平均値は×印で表され、引き続く2個の測定時点間の平均体重の平均増加量は下側の階段関数で表されている。また、雌に対するデータは記入されていないが雌の推定された成長曲線などは鎖線で表されている。ある種の条件のもとで未知母数の推定量は漸近的に正規分布しており、また、推定値の偏りも必要に応じて計算

できる。これらの成長模型に対する乳幼児期の成長成分と思春期の成長成分に対する詳細な説明並びに成長曲線の各特性に関しては正法地及び佐々木（1986）の報告がある。図1の上側に記入されている軸上の文字は成長に対する特性点を与える年齢を表している。即ち、ON は平均体重から見た思春期の（統計学的）発現時年齢を、 I_1 及び I_2 は成長速度曲線の変曲点を与える年齢を、PK は最大の伸び量を与える年齢をそして CP は思春期の（統計学的）完了時の年齢を表している。また、平均初潮年齢はMで表されている。なお、雄は普通の活字で表し、雌はイタリック体の活字で表している。

Figure 2: Relative amounts of information on unknown parameters (males, savannah baboon)

スコアリング法を用いて未知母数を推定し曲線のあてはめを行った結果の一部分は図1の通りである。あてはまり具合の評価に当たっては残差平方和やAICやジャックナイフ的手法などを用いた。未知母数に対する単位観測値あたりの月当りの平均情報量を求め、各母数に対する最大情報量に対する相対量を百分率で図示すると図2となる。雄の成長模型に対してジャックナイフ的な手法を用いると図2の単位観測値あたりの未知母数の平均情報量の相対量はジャックナイフ的に推定した未知母数の推定値の変動量に良く対応していた。図2では、Uの推定には思春期の完了時頃の体重が最も有効であり、AおよびBを推定するには成長速度曲線が極大になる前後の体重が最も有効であることなどを示している。すなわち、Fisherの

情報量をある意味で一般化した平均情報量の相対量を有効に用いて非線型回帰に対する測定計画を立て有効な資料を収集する必要があると思われる。ここで用いた成長模型には5個または6個の未知母数が含まれている。各個体にこの成長模型を当てはめるとAとBとの間およびC、DおよびEの間に非常に高い相関関係があることが認められたので必要に応じて未知母数の個数を減少させることも出来る。

Figure 3: Estimated distance curves for average weight in males and females after adjusting the age axis.

3. 雌雄の成長の比較

Glassman et. al. および図1を見ても雌雄の平均体重の成長には明確な類似点は簡単には見あたらなかった。しかしながら、思春期の統計学的発現時年齢が同じになるように調整し雌の年齢軸に変換を施した雌雄の成長曲線は図3となる。なお、図3-図5の内の口印は雌雄とも思春期の統計的発現時点を表している。このことから雌雄の成長曲線は思春期の前半頃まではある意味で非常に類似している。雌雄の比較が簡単に行えるように図3の雄の成長曲線を直線化すると図4となる。これら図3と図4とから黄色ヒヒの平均体重の成長は雌雄の成長分岐年齢（雄では約190週、雌では約230週）までは、年齢軸を調整すと雌雄とも殆ど同じ成長パターンに従っていると言える。すなわち、この成長分岐年齢までは年齢という観点から見ると雌の平均体重の成長は年齢的には約2割遅れながら雄の平均体重の成長過

Figure 4: Age adjusted linearization

Figure 5: Estimated growth velocity curves for average weights in males and females after adjusting the age axis.

程を追いかけている。しかし分岐点を越えると雌雄の成長の特徴が明確に出てくる。更に、平均成長速度曲線を対象にして雌雄の思春期の発現時年齢を調整すると図5となる。この図より成長速度曲線の型は雌雄とも良く似ているが雄の週当りの体重の伸び量が概ね雌のそれより一定量だけ多い。しかし、思春期の特徴的な成長パターンは雌雄で全く異なり雄では一般化ロジスティック型成長曲線が適しており、雌ではゴンパーツ型成長曲線が適しているように思える。ここでは平均体重を取り扱ったため各個体の成長の特徴が平均化されている。黄色ヒヒの各個体の体重の成長の特徴づけを行うともう少し成長の特徴が明確になるであろう。雌の平均初潮年齢（189.8 週）は雌の平均成長の加速度が零に近くなる年齢である。

4. おわりに

各個体の計測値がある場合、成長曲線などの比較に当たっては平均値成長曲線や中央値成長曲線による直接的な比較よりもむしろ、まず、各個体の成長曲線を制御する成長母数の推定を行い、平均成長曲線を求めて成長の特性の比較などを行った方が適切である場合が多い。しかしながら、成長の特性などについての推測を行うに当たっては、無条件に推測値等を利用するのではなく、推測値は適用されたモデルに強く関連していることを十分に考慮する必要がある。成長を単に比較するだけならば年齢軸に適当な変換を施して平均成長曲線を線型化して比較することもできる。また、モデルが非線型の場合には、最適な資料の収集方法に対する理論がまだ確立されていない。各個体の計測値を有効に集めるに当たっては母数に対する観測値当りの平均情報量を活用することも可能である。

謝辞 本報告は文部省科学研究補助金一般研究（C）および統計数理研究所の共同プログラム 61-共研-49 の協力によって作成された。

参考文献

- Bock, R. D., Wainer, H., Peterson, A., Thissen, D., Murray, J. and Roche A. (1973) A parameterization for individual human growth curve. *Human Biology*, 45, 63-80.
- Count, E. W. (1943) Growth patterns of human physique: an approach to kinetic anthropometry. *Human Biology*, 15, 1-32.

- Glassman, D. M., Coelho, A. M, Jr., Carey, K. D. and Bramblett, C. A.
(1984) Weight growth in savannah baboons: a longitudinal study from birth to adulthood. *Growth*, 48, 425-433.
- Preece, M. A. and Baines, M. J. (1978) A new family of mathematical models describing the human growth curve. *Annals Human Biology*, 5, 1-24.
- Sasaki, H. and Shohoji, T. (1986) A characterization of weight growth in savannah baboon. Preprint of the 13th International Biometric Conference, Seattle.
- Shohoji, T. and Sasaki, H. (1983) Physical growth models of Japanese. The 44th Session of International Statistical Institute, Madrid, Spain, 12-22 September 1983, Vol. 2, 781-785.
- Shohoji, T. and Sasaki, H. (1985) An aspect of growth analysis of weight in savannah baboon. *Growth*, 49, 500-509.
- 正法地孝雄、佐々木紘 (1986) 日本人の身長の成長についてのある見方。応用統計学会誌 (印刷中)。
[Received December, 1986]