子馬（サラブレッド種）の体重に基づく成長パターンの3点法を用いた Richards Growth Model による推定

秋元博一*

Estimation of Growth Pattern of Body Weight in Foal, *Thoroughbred* Using of Richards Growth Model with Three Point Method

Hakuichi AKIMOTO

Former Osaka Agricultural Research Center,
Habikino 583, Japan

Summary

The growth pattern of body weight in foal, *Thoroughbred* from 30 to 50 days olds was estimated by the data classified with sexes and parities using of the Richards growth model, the three point method was also applied to the estimation of growth pattern of foal. Each data was extracted independently from each three developmental stage, such as initial, middle and final one, respectively. These three point of data was compared between each age of six groups. Shape parameter “m” in the Richards growth model was applied from 0.0 to 2.0 in scale of 0.1.

1) The growth pattern of foal, *thoroughbred* may be estimated with 98% / or greater of coefficient of determination R^2 by the body weight data in both of sexes and parities.

2) The shape parameter “m” at the highest R^2 point was presented at 0.0 and growth curve has no inflectional point in the present analysis.

3) The body weight at 5-6 parities were the largest in all ages. The parity may be in reverse ratio to the average of body weight.

一般に動物の体重に基づく成長は、遺伝、栄養、管理などの要因の影響を複雑に受けている。したがって、出生時から成熟時にいたる経済的変化を正確に把握することは、これら要因が動物の成長に及ぼす影響を解析するために極めて重要である。

しかし、ウマの成長解析についての報告はきわめて少なく、古くは幼駒の発育成長についての岡部(1954)^{15,16)}、中型農場の発育についての林田、山内

(1960)^{11,12)}の報告、最近ではサラブレッド種子馬の成長要因の解析に関する山本、朝井、楠瀬(1993)¹⁹⁾の報告があるのみと思われる。

動物の成長現象を時間の関数として理論的に導出したものは、Brody, Logistic, Gompertz, Bertalanffy, Richards などの曲線モデルがある⁸⁾。その中でも Richards の曲線モデルの最大の特徴は、shape parameter “m” を想定したことである。すなわち、 $m=2$ のときは Logistic, $m=1$ のときは Gompertz, $2/3$ のときは Bertalanffy, 0 のときは Monomolecular, $m>2.0$ 以上のときは他の S 字状

*元・大阪府農林技術センター
〒520-32 滋賀県甲賀郡甲西町北山台1-18-9
Tel 0748-74-2468

曲線に近似するとしている(Richards 1959)¹⁷⁾。したがって、本曲線モデルは上記の各曲線を、一括包含して論ずることができるという利点がある。

一方、これまでの研究は動物の種、あるいは品種固有の成長型を明らかにする目的として、3点法による Richards growth model の適用と、この model による成長解析をネコ¹⁾、ニワトリ²⁻⁵⁾、アヒル⁶⁾を対象に試みてきた。しかし、他の多くの哺乳類についても、検討する必要があると考えられる。そこで、本研究では Richards growth model を用いた子ウマ(サラブレッド種)の成長解析と、3点法の実用性の検討を併せて行ったので報告する。

1. 材料および方法

(1) 材料

供試馬は、北海道日高地区の24生産牧場において、1990年に生れたサラブレッド種子馬261頭で、日本中央競馬会総合研究所の山本、朝井、楠瀬が調査し、そのデータより求めた最小自乗平均値¹⁹⁾を用いた。

(2) 供試体重の日令

30日、90日、150日、210日、270日、330日、390日、450日令である。

(3) 計算方法

計算機は、Casio 電卓 FX602P を用いて計算用プログラムを入力した。成長曲線モデル式は、Richards の成長曲線モデルであり、Gompertz 曲線への移行を明瞭にした次式を用いた(井上, 1989)¹³⁾。

$$y_m = \left\{ (1 - (-m) \beta e^{-kt}) \right\}^{\frac{1}{1-m}}, (m \neq 1)$$

ただし、 y_m はt時点における体重であり、Aは成熟時の体重であり、 k は定数、 β は積分定数である。

次に3点の測定点の設定にあたり、全測定期間を前期、中期、後期にわけ、それぞれの期間中から1点ずつ計3点の日令を選んだ。今回は次の6種類の組合せを設定した。

- ① 30日令：210日令：390日令
- ② 30日令：210日令：450日令
- ③ 30日令：270日令：450日令
- ④ 90日令：210日令：450日令
- ⑤ 90日令：270日令：450日令
- ⑥ 90日令：330日令：450日令

shape parameter' m'の大きさは、0～2.0までを0.1間隔に設定し A, β , k の推定値を求めて Richards 曲線による理論値を算出した。さらに理論値と最小自乗平均値との適合性は、次式で求められる決定

係数 (R_2) の大・小で判定した。

$$R^2 = (S_T - S_e) / S_T \times 100$$

$$S_T = \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2$$

$$S_e = \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2$$

ただし、 y_t はt時点における実測値、 $\hat{y}_t$ はt時点における理論値、 $\bar{y}$ は $\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t$ である。

2. 結 果

(1) 体重の推移

30日令より450日令までの60日間隔のデータを基に、性別について比較すると、各日令ともに差はきわめて小さく、 $P > 0.01$ で有意差が認められているのは210日令、270日令および330日令であった。次いで産次別にみると、すべての測定値に差は認められたが、5～6産次の子馬の体重は、各日令ともに他の産次に比較して大であった。また、90日令時の体重をピークにして、産次を経るごとに平均体重は漸減の傾向がみられた(表1参照)。

次に Richards growth model の適用によって求めた理論値との比較を行うと、性別ならびに産次別においても、測定日令の前期および後期の理論値は、最小自乗平均値よりも大きい傾向がみられた。とくに30日令、および390日令時の比較差は大であった(表1、図1参照)。

(2) 決定係数 (R^2)

1) 性別：6種類の組合せにおいてえられた決定係数は、表2のごとく雄の最低値は96.88～98.10%、最高値は98.66～99.45%であった。また、雌では最低値は93.16～97.90%、最高値は99.12～99.23%であった。最も高い R^2 値をえた日令の組合せは、雄、雌ともに90日令：270日令：450日令の組合せであった。

2) 産次別

上記と同様の6種類の組合せにおいて、パラメーターを推定し、求めた理論値の決定係数を産次別に算出したところ、最低値についても、すべて95%以上の R^2 値であった。

産 次	最低値～最高値
1	96.40～99.35 %
3	97.50～99.68 %
5～6	96.65～99.34 %
7～9	95.71～98.96 %
≥10	96.63～99.28 %

表1 体重の推移の比較（性別・産次別）

項 目		30日令	90日令	150日令	210日令	270日令	330日令	390日令	450日令
性 ♂	* 自乗平均(A)	99.0	168.4	228.2	277.8	312.5	340.5	369.1	411.7
	理 論 値(B)	107.1	168.4	222.5	270.3	312.5	349.8	382.7	411.7
	A — B	−8.1	0	5.7	7.5	0	−9.3	−13.6	0
別 ♀	* 自乗平均(A)	97.9	166.6	225.4	270.2	304.0	333.1	366.5	410.7
	理 論 値(B)	112.5	166.6	216.3	262.0	304.0	342.6	378.1	410.7
	A — B	−14.6	0	9.1	8.2	0	−9.5	−11.6	0
初 産	* 自乗平均(A)	90.5	156.2	213.2	261.1	296.7	326.8	358.7	406.9
	理 論 値(B)	101.3	156.2	206.9	253.6	296.7	336.4	373.1	406.9
	A — B	−10.8	0	6.3	7.5	0	−9.6	−14.4	0
3 産 産	* 自乗平均(A)	99.4	166.6	223.6	271.8	305.6	338.5	367.0	404.2
	理 論 値(B)	108.6	166.6	218.3	264.5	305.6	342.3	375.0	404.2
	A — B	−9.2	0	5.3	7.3	0	−3.8	−8.0	0
5 次 産	* 自乗平均(A)	102.7	172.7	233.9	282.4	316.4	344.7	376.7	420.7
	理 論 値(B)	113.6	172.7	225.8	273.5	316.4	354.9	389.6	420.7
	A — B	−10.9	0	−8.1	−8.9	0	−10.2	−12.9	0
7 別 産	* 自乗平均(A)	101.3	171.1	234.2	279.4	314.3	337.7	370.7	418.9
	理 論 値(B)	112.5	171.1	223.9	271.5	314.3	352.9	387.6	418.9
	A — B	−11.2	0	10.3	7.9	0	−15.2	−16.9	0
≥ 10 産	* 自乗平均(A)	100.3	169.3	225.5	273.4	306.7	334.5	361.7	405.8
	理 論 値(B)	112.6	169.3	220.2	265.8	306.8	343.4	376.3	405.8
	A — B	−12.3	0	5.3	7.6	0	−8.9	14.3	0

備考 *印は最小自乗平均値（山本，朝井，楠瀬，1993による）

単位：kg

図1 体重の成長曲線（産次別理論値）

表2 各日令の組合せにおける R^2 値と最高時の m 値, パラメーター, 変曲点体重

性	項 目	30：210：390	30：210：450	30：270：450	90：210：450	90：270：450	90：330：450
雄	R ² 最低～最高	97.96～99.22	96.88～99.25	96.95～99.43	97.71～99.24	98.10～99.45	97.02～98.66
	パラメーター 最高時の m 値	0	0	0	0	0	0
	A (kg)	464.4	552.4	609.9	551.0	630.9	946.5
	B	0.88007	0.89233	0.89629	0.89391	0.88353	0.90287
	k	0.03734	0.02786	0.02255	0.02807	0.02074	0.01042
	変曲点時体重 (kg)	—	—	—	—	—	—
雌	R ² 最低～最高	93.16～99.22	96.40～99.12	96.49～99.19	97.51～99.16	97.90～99.23	96.82～98.24
	パラメーター 最高時の m 値	0	0	0	0	0	0
	A (kg)	488.5	594.1	6989	611.9	781.5	2034.9
	B	0.88101	0.89676	0.90627	0.88762	0.89288	0.95083
	k	0.03232	0.02369	0.01750	0.02207	0.01405	0.00379
	変曲点時体重 (kg)	—	—	—	—	—	—
R ²	産 次	3：21：39	3：21：45	3：27：45	9：21：45	9：27：45	9：33：45
最低～最高	1	97.51～99.09	96.40～99.13	96.77～99.31	97.51～99.16	98.07～99.35	97.17～98.58
	3	98.43～99.61	97.65～99.61	97.50～99.66	98.33～99.62	98.49～99.68	97.92～99.40
	5～6	97.82～99.20	96.65～99.13	96.75～99.30	97.57～99.14	98.00～99.34	96.83～98.34
	7～9	97.20～98.79	95.71～98.68	95.99～98.89	96.87～98.71	97.45～98.96	95.78～99.24
	≥10	97.71～99.06	96.63～99.10	96.72～99.27	97.50～99.12	97.91～99.28	96.89～98.44
最高時の m 値	1	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	5～6	0	0	0	0	0	0
	7～9	0	0	0	0	0	0
	≥10	0	0	0	0	0	0

備考 30 : 210 : 390は日令の組合せ

(3) shape parameter “ m ” 値

各組合せにおいて, 最も高い R^2 を得た shape parameter “ m ” 値は雄, 雌別, ならびに産次別においても, すべて0であった (表2 参照)。

(4) パラメーターおよび変曲点

成熟時の重さとされるA値は, 性別に比較すると, どの日令の組合せにおいても雄のA値は雌のA値よりも小さく, 成長速度を示す k 値は, A値とは逆に雄の k 値は雌のそれよりも値は大であった (表2 参照)。

変曲点時体重は性別, 産次別のどちらにおいても認められなかった。

3. 考 察

(1) シグモイド曲線の適用

前述のように, Richards の成長曲線モデルにおいて適用したデータが, shape parameter “ m ” の大きさによって, Logistic 曲線などの, どのシグモイド曲線に最もよく適合するかをみる事ができる。そこで, 著者は, 山本ら (1993)¹⁹⁾ がサラブレッド種子馬 261頭の, 30日令～450日令の体重について求めた最

小自乗平均値を用いて, Richards growth model への適用を3点法によって行ったところ, 性別においても, 産次別においても, すべての組合せにおいて shape parameter “ m ” 値は0であった。したがって, 成長型は Monomolecular と考えられ, しかも, 変曲点のない成長パターンであることを意味していることが明らかになった。変曲点は動物の初期における指數的成長と, 後期の漸近的成長への移行点であって, 曲線の勾配のもっとも大なる時であると同時に, その時期の遅速は個体の性成熟の遅速と関係があることが, すでに知られている (Montriño & Falconer, 1966)¹⁴⁾。ウマでは, およそ15～18ヶ月で性成熟に達するといわれており (渡辺, 1975)¹⁸⁾, 本報告では変曲点が検出されなかった。その理由として, 供試した動物が子馬であって, 450日令時では, まだ馬の成熟体重に達していないことが考えられた。したがって, それ以降のデータを収集して, 渡辺 (1975)¹⁸⁾ の結果と比較検討する必要があると考えられた。

サラブレッド種の成長の性差については, Green (1969)⁹⁾ は12ヶ月令までの子馬の外部形態である

図2 m値と決定係数の関係

管囲について認めている。また、山本ら(1993)¹⁹⁾は450日令以降で体重の性差が生じると推察している。産次による成長差は、Gibbsら(1982)⁷⁾や山本ら(1993)¹⁹⁾と同様に、母乳の量、あるいはその質が産次による子馬の初期成長に影響を与えるものと考えられる。

(2) shape parameter “m” 値と決定係数の関係

決定係数 (R^2) を縦軸に、shape parameter “m” 値を横軸にとり、それぞれの値をプロットすると図2にみられるように、両者の関係は雄、雌共に単一の直線で表現され、同一方向に下降している。ネコ¹⁾、ニワトリ²⁻⁵⁾、アヒル⁶⁾では性別によって“m”値と決定係数の関係が、異なるパターンのケースが多い。このように単一の直線、あるいは曲線で表現される両者の関係の生物学的意義は現在不明であり、今後の検討課題と考えられた。

(3) 3点法による成長曲線モデル式の推定

Richards growth model 式の推定に関して、藤原(1975)¹⁰⁾はCaustonの方法を応用している。著者が用いた3点法の根拠は、「天体の運行の場合などには、観測上の誤差さえなければ、すべての観測点が単一の理論曲線上に乗ることが予測される」ことにある(秋元, 1990)¹⁾。3点法では、すでに述べたように3点の日令を選び、それらの日令時の体重を用いて、1989年以来使用している計算プログラムによって、パラメーター A , β , k を推定すると、本報告では、shape parameter “m” 値を0～2.0まで0.1間隔に設定して計算を行った結果は、雄、雌ともに、

表3 R^2 の最高値をえた各日令の組合せにおけるm値と決定係数の関係

m値	性 別		産 次 別				
	雄	雌	初産	3	5～6	7～9	≥10
2.0	98.10	97.90	98.07	98.49	98.00	97.45	97.91
1.9	98.17	97.96	98.13	98.55	98.09	97.53	97.87
1.8	98.23	98.02	98.19	98.60	98.13	97.60	98.03
1.7	98.30	98.08	98.25	98.66	98.19	97.69	98.10
1.6	98.36	98.14	98.31	98.72	98.26	97.75	98.17
1.5	98.43	98.20	98.38	98.78	98.33	97.82	98.23
1.4	98.52	98.27	98.44	98.84	98.39	97.90	98.29
1.3	98.57	98.34	98.50	98.89	98.46	97.97	98.37
1.2	98.66	98.40	98.57	98.96	98.53	98.05	98.43
1.1	98.72	98.46	98.64	98.02	98.60	98.13	98.51
1.0	98.79	98.53	98.71	99.08	98.66	98.21	98.57
0.9	98.86	98.60	98.77	99.27	98.73	98.27	98.64
0.8	98.92	98.68	98.83	99.20	98.80	98.36	98.71
0.7	98.99	98.74	98.90	99.26	98.87	98.43	98.79
0.6	99.07	98.81	98.97	99.33	98.94	98.52	98.86
0.5	99.14	98.88	99.03	99.39	99.01	98.59	98.93
0.4	99.21	98.95	99.10	99.45	99.07	98.66	99.00
0.3	99.27	99.02	99.16	99.51	99.15	98.74	99.07
0.2	99.33	99.09	99.23	99.57	99.21	98.82	99.14
0.1	99.40	99.16	99.29	99.62	99.28	98.89	99.22
0	99.45	99.23	99.35	99.68	99.34	98.96	99.28

また、どの産次別においても、 R^2 の最高値は97%以上であった。

したがって、ネコ(日本種)¹⁾、ニワトリ(ロード・アイランド・レッド種、白色レグホーン種、比内鶏、薩摩鶏)²⁻⁵⁾、アヒル(中国産北京種)⁶⁾に加えて、子馬の体重成長曲線の推定に3点法が有効であり、さらに、推定された曲線モデルによって成長解析も可能であることが明らかになった。さらに、本検索により、今後多くの哺乳動物を対象に成長解析を試み、その実用性を明らかにする必要があることが考えられた。

4. 要 約

本研究では、サラブレッド種における30日令～450日令の子馬の成長パターンを把握するために、Richards growth model 式を性別、ならびに産次別にあてはめ、その適合性とともにより3点法の実用性を検討した。3点法における3点の測定データを選択するに当たっては、測定期間を前期、中期、後期にわけ、

それぞれ1点計3点を抽出した。また、日令の組合せは6種類とした。

なお、Richardsの成長モデル式中のshape parameter “m” 値は、0から2.0まで0.1間隔に設定した。

1) 3点法による成長モデル式の推定において、最高の決定係数 (R^2) の値は雄、雌ともに、また産次別においても98%以上であって、きわめて高い適合性がみられた。したがって、3点法によるRichards growth model 式による推定が有効であると考えられた。

2) 最も高い R^2 値を得た shape parameter “m” 値は、性別ならびに産次別のすべてにおいて0であり、子馬の体重の成長は変曲点のない成長パターンと考えられた。

3) 産次別の成長については、5～6産次の子馬の体重は各日令において最も大であって、以後産次を経るごとに、平均体重は減少の傾向がみられた。

謝 辞

本解析を試みるにあたり、子馬の成長データを提供いただいた日本中央競馬会日育成牧場の山本修氏、成長解析における数学的助言、ならびに成長曲線モデル式推定のプログラムを作成していただいた京都産業大学理学部物理学教室の井上猛教授、本文の御校閲をいただいた元・神戸大学農学部の後藤信男博士、また、種々助言をいただいた日本獣医畜産大学解剖学教室の尼崎肇博士に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋元博一：ネコにおける体重および内臓諸器官の成長の解析について、成長, 29 (1, 2), 151～158, 1990.
- 2) 秋元博一：ロード・アイランド・レッド鶏の体重の成長解析, 畜産の研究, 45 (9), 949～952, 1991.
- 3) 秋元博一, 飯野雅夫：ニワトリの体重の成長解析におけるRichards growth modelと三点法の機能について, 獣医畜産新報, 44 (12), 37～42, 1991.
- 4) 秋元博一：比内鶏の体重成長と、成長曲線モデル推定における3点法と最小自乗法の比較, 成長, 30 (2), 119～125, 1991.
- 5) 秋元博一：非線形発育モデルあてはめによる薩摩鶏の体重成長の解析, 獣医情報科学誌, 30, 21～30, 1993.
- 6) 秋元博一, 田中実, : 3点法および最小自乗法によるアヒル (中国系ペキン種) の体重の成長解析, 獣医畜産新報, 45 (11), 879～885, 1992.
- 7) Gibbs W. Mc Mollan: Milk production of quarter horse mares during, 150 days of lactation. J. Anim. Sci., 54, 496～499, 1982.
- 8) 後藤信男：成長のとりえ方 (猪貴義ら編, 動物の成長と発育), 34～42, 1987.
- 9) Green D.A.: A study of growth rate in thoroughbred foals. Br. Vet. J., 125, 539～546, 1969.
- 10) 藤原克彦：マウスの成長に関する形態, 形量的研究, II, 体重および全長の成長曲線の推定, 日畜会報, 46別号, 97, 1975.
- 11) 林田重幸, 山内忠平：中型農馬の発育に関する研究, 第1報, 発育曲線について, 鹿児島大学農学部学術報告, 9, 37～60, 1960.
- 12) 林田重平, 山内忠平：中型農馬の発育に関する研究, 第2報, 発育過程の分析, 鹿児島大学農学部学術報告, 9, 61～72, 1960.
- 13) 井上猛：星間物質と成長曲線, 「彗星と星間物質」研究会 (1989) 論文集, 29～37, 1989.
- 14) Monteriro L. S. and D. S. Falconer: Compensatory growth and sexual maturity, Anim. Prod., 8, 179～192, 1966.
- 15) 岡部利雄：幼駒の発育成長に関する研究, 第7報, 初期の成長曲線, 獣医畜産新報, 127, 61～64, 1954.
- 16) 岡部利雄：幼駒の発育成長に関する研究, 第8報, 各部位の相対成長, 獣医畜産新報, 132, 6～8, 1954.
- 17) Richards F. J.: A flexible growth function for empirical use. J. Exp. Bot., 10, 290～300, 1959.
- 18) 渡辺裕：馬・繁殖 (内藤元男監修, 畜産大事典), 1157, 1978.
- 19) 山本修, 朝井洋, 楠瀬良：サラブレッド種子馬の発育に対する性別, 生れ月, 産次, 母馬の体重および牧場の影響, 日畜会報, 64 (5), 491～498, 1993.