家畜育種における分析と総合

西田 朗

東北大学大学院農学研究科・農学部 動物遺伝育種学分野

Analysis and synthesis in animal breeding and genetics

Akira NISHIDA

Graduate school of Agricultural Science, Faculty of Agriculture, Tohoku University

1. はじめに

家畜育種における分析と総合と題して、以下に意見を述べる。はじめに、本論の内容の概略を示す。

2. 本論の題にある「家畜育種」とは何か？ 一般に「分析と総合」とは何か？ について触れる。
3. 家畜育種には「総合が不可欠である」ことについて、いくつかの局面から述べる。
4. 家畜育種における総合的な概念の活用について、“育種価”を例として示す。
5. 総合に必要な、要素間の交互作用について述べる。
6. 総合的な観点が不可欠な“複雑系”の科学について述べる。
7. 総合的な側面を持つ、家畜育種に関する研究を二つ紹介する。
8. エネルギーの利用効率を例として、動物の総合的な進化について述べる。
9. 今後、重要になると考えられる概念について提案する。
10. 家畜育種における分析と総合についてまとめる。

2. 「家畜育種」とは何か？ 一般に「分析と総合」とは何か？

(1) 「家畜育種とは何か？」

家畜育種とは「家畜や家禽の群の遺伝的な能力を、人々の望む方向へ変化させるための努力」であるといえる。家畜育種では、改良の対象となる家畜の能力の測定値 (Phenotypic value; P) は、遺伝的な能力 (Genotypic value; G) と環境の効果 (Environmental effect; E) から成り立っていると考える。 P を高めるには G と E をともに高める必要があるが、家畜育種の直接の目的は G を高めることである。

(2) 一般的に、「分析と総合」とは何か？

分析とは「ある物事を分解して、それを成立させている成分、要素を明らかにすること」とされており、総合とは「個々別々の物を一つに合わせてまとめること」とされている。しかし、家畜育種における分析と総合には、もう一つ重要な概念が必要であるということを本論で述べる。

3. 家畜育種には「総合」が不可欠である

まず家畜育種の実践にあたっては、分析とともに総合が不可欠であることについて、3つの例を挙げて述べる。

(1) 一つ目の例として遺伝的改良と近交退化の総合について、図1を用いて説明する。図1は縦軸に集団

図1. 遺伝的改良と近交退化との総合

連絡先: 西田 朗 〒020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字後
496-18 (e-mail: Akira.Nishida@mc2.seikyoku.ne.jp)

図2. 系統内の斉一性の確保と品種内の変異の保存との総合

の遺伝的な能力の平均値を、横軸に改良の世代数をとったグラフである。遺伝的改良を図1に示した速度で進めたとすると、それにともなつて、近親交配による能力の低下すなわち近交退化が起きる。遺伝的改良の速度が近交退化の速度を上回れば、総合的に選抜反応が見られることになる。つまり、遺伝的改良と近交退化の相反する要素を適度な均衡を保って総合することにより、改良という成果が得られるのである。

(2) 二つ目の例は、系統内の能力の斉一化と、品種内の変異の保存との総合である。系統とは品種の中で特徴を持った斉一な集団のことである。系統内の個体の能力はできる限り斉一であることが望ましく、逆に品種内の変異は将来の改良にとって欠くことのできない土台となる。この矛盾する二つの要因を総合して両立させるには、図2に示したように系統内のばらつきを小さくすると同時に、系統間の変異を維持することが有効である。つまり、ある階層での矛盾は、より高い階層の水準から見て総合し、統一することができるのである。

(3) 三つ目の例は、同時に改良するのには都合の悪い遺伝的な相関関係を持つ二つの形質の総合的な同時改良である。たとえば、図3に示したように縦軸に成長速度の遺伝的能力、横軸に免疫能の遺伝的能力をとり、各個体の能力をプロットすると、図中の楕円の中にデータが分布していて、両形質を同時に改良するには都合の悪い相関があったとする。しかし、いつでも

図3. 同時改良に都合の悪い遺伝相関を持つ2形質の総合的な改良
(図中の斜線の右上の部分を選抜する)

多くの個体の中には、図3の斜線の右上のように両形質とも群平均値よりも高いものがあり、それらを親として選抜することにより、ゆっくりとではあるが、両形質を総合的に同時に高めることが可能である。このような改良の実績は、これまでに数え切れないほどある。

つぎに家畜育種学の成り立ちにおいても総合が不可欠であることについて述べる。

(4) 図4に示したように家畜育種学の体系には多くの関連する学問の成果が総合されている。動物を健康に飼育し、正しく繁殖させてはじめて選抜による改良が可能になるからである。他の学問でも同じことがいえるであろうが、家畜育種学では特にその性格が強いと考えられる。この図の遺伝学と育種学との関係を詳しく見たのが次の図5である。分子遺伝学、遺伝学、集団遺伝学、統計遺伝学と家畜育種学は、互いに分析と総合の関係でつながり合っているといえる。ただし、ここでいう分析と総合は、単なる要素への分解とその寄せ集めではないことについては、これから述べることにする。

(5) 図6は異なる学問領域の力の総合について示している。異なる学問領域に立脚して新しい学問領域に研究の対象を広げた研究者同士がお互いを深く理解し合い協力し合うことができたときに、はじめて新しい学

図4. 育種学の成立には他の多くの学問の成果の総合が必要である

問の領域が生まれると考えられる。家畜育種学もこのようにして生まれたと考えられる。

(6) 図7のように、動物の群が持つ素粒子から品種に至る階層をカバーするためにも、家畜育種学が総合的でなければならないと思われる。これまでの遺伝学では、タンパク質をコードするDNAの領域以外はその働きがわからないことを理由にジャンクと呼ばれていた。しかし、最近、例えばマウスではDNAの98%をしめるこの領域に、遺伝子の発現を調節するという重要な働き、すなわちエピジェネティックな作用(佐々木裕之 2005)のあることが分かってきた。動物の環境への適応も、環境を検知したエピジェネティックな作用による遺伝子発現の調節により起きている可能性がある。今後、遺伝学ではこの領域の研究が重要になるとおもわれ、この分野の研究は家畜育種にとってもきわめて重要な情報をもたらすことになる予測される。

(7) つぎに、家畜育種学の理論を支える統計遺伝学は、分析的であると同時に総合的であるということについて述べる。統計遺伝学は、統計学と遺伝学の融合

図5. 遺伝学と育種学の関係
⇒: 総合、⇐: 分析

図6. 異なる学問領域の力の総合
A,B: 既存の学問、C: 新しい学問

図7. 育種学は生物の持つ階層性をカバーする

によって生まれた学問である。家畜育種学の総合的な性質の反映として、その理論体系を支えている統計的なデータの処理法は、分析的であると同時に総合的であるという興味深い性質を持っている。たとえば分散分析法は、データが持つばらつきを、その原因別に分析すると同時に、データが持つ重要なばらつきの原因を総合的に網羅した数学モデルによりデータが成り立っていることを明らかにできる点で、総合的でもある。重回帰法もまた、分析的であると同時に総合的であることを図8で示す。いま、酪農家では雌牛の泌乳量と体重などのデータをもとに、飼養標準に従って飼料の給与量を決め、牛の健康を守っているとする。しかし牛の体重計は大きく高価で酪農家ごとに備えることができない。そこで、もし、牛の胸囲と体長からその体重を正確に推定できれば、巻き尺が一本あればよいことになる。ある乳牛群について体重 y と胸囲 x_1 、体長

図8. 重回帰法は分析であり、同時に総合である

x_2 のデータがあれば、最小二乗法により胸囲と体長から体重を推定する推定式 $\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$ を作ることができる。式ができれば、体重推定の正確度 $r_{y\hat{y}}$ を計算でき、胸囲と体長が体重の推定にそれぞれどれだけの寄与をするかを量的に把握できる。つまり、重回帰法は体重を左右する原因を総合した推定式を与える点で総合的であり、同時に体重のばらつきを説明する原因別にその寄与率を計算できる点で分析的でもある。ここでは重回帰法の総合的な意義が重要である。この重回帰法の考え方は、家畜の複数の形質を同時に改良したいときに選抜の指標とする総合得点の一種、選抜指数にも活用されている。

4. 家畜育種における総合的な概念を活用した改良の実績について

(育種価を例として)

これまでに、ほぼすべての家畜や家禽で育種価を用いた改良が成功している。図9は日本の乳牛1頭、1年あたりの乳量の、1950年から2003年までの54年間の変化を示している。生産現場での乳量の測定値を用いて推定した育種価を指標とする改良が始まってからの28年間に乳量は、4,500キログラムから7,600キログラムに増えた。この乳量の増加には、もちろん飼養管理法の改善の効果も含まれているが、その重要な部分を遺伝的な能力の改良が占めていることが明らかにされている。

図9. 日本における経産牛1頭1年あたりの乳量の推移

では、このように改良を促進した育種価とはどのような概念であろうか。それを説明するために、まず、遺伝子の効果のあり方について考え、それをふまえて遺伝子の平均効果の考え方を導入し、さらに、遺伝子の平均効果を用いて育種価を定義しよう。

(1) 遺伝子の効果について

まず、遺伝子の効果について図 10 で説明する。いまある材料から一定の産物を作る生化学反応があるとします。例えば、アンモニウムイオンと炭酸ガスから尿素を作る尿素サイクルを考える。この反応を進めるのに必要な 5 つの酵素が知られている (ハーパー 1990)。厳密には一遺伝子に対応するのは一ポリペプチドであるが、いま説明を単純にするために各酵素がそれぞれ一つの遺伝子で作られていると考える。もしすべての遺伝子が正常で、酵素に異常がなければ尿素が作られる。しかし、もし、二番目の酵素をコードする遺伝子に異常が起きて、酵素ができなければ、尿素は作れず、中間代謝産物の蓄積で遺伝的な疾患が起きる。もし、二番目の酵素を作る正常な遺伝子を補うことができるとすれば、この個体は正常に戻る。つぎに、もし 5 番目の酵素を作る遺伝子が異常であっても、やはり、尿素は作れず、前とは異なる中間代謝産物の蓄積で遺伝的な疾患が起こる。ここでも、もし、5 番目の酵素を作る正常な遺伝子を補うことができるとすれば、この個体は正常に戻る。しかし、この個体に二番目の酵素を

作る正常な遺伝子を補っても変化は起きない。さらに、2 番目と 5 番目の酵素を作る遺伝子に異常があれば、2 番と 5 番の遺伝子を単独で補っても変化は起きず、2 番と 5 番をともに補って初めて、正常に戻ることができる。つまり、複数の遺伝子の影響で決まる形質に対する個々の遺伝子の効果は、それを受け入れる側の遺伝状況により変化するのである。

さらに、遺伝子のエピソード的な機能を考えれば、ある個体がある遺伝子をもっており、その遺伝子の機能が発揮されてはじめて形質の発現につながるものであるから、ある遺伝子を持っているということは、その形質発現のための必要条件ではあるが、必ずしも十分条件ではない。また、完全に正常な状態を維持するための遺伝子群のあり方には限りがあるが、異常の起こり方は極めて多様であることにも注意しなければならない。

(2) 遺伝子の平均効果について

上に述べた事実をみたうえて、例えば A_1 遺伝子の成長速度に関する平均効果について図 11 により説明する。まず、ある繁殖集団に属する個体群の中で、少なくとも 1 個の A_1 遺伝子を持つすべての個体を選び、その成長速度の平均を求める。この集団での成長速度に関する A_1 遺伝子の平均効果とは、この平均値の全集団平均値からの偏差である。したがって、これは A_1 遺伝子が乗っている遺伝子座のアリルの種類やそ

図 10. 遺伝子の効果
左端の①から⑤：材料から産物を作るのに必要な 5 種類の酵素を表す、○：正常な酵素の存在を示す、下の②、⑤：2 番目と 5 番目の酵素を作る正常な遺伝子を補うことを示す。

遺伝子型	表型値
$A_1 \bigcirc$	$\square\square\square\square$
$A_1 \bigcirc$	$\square\square\square\square$
$A_1 \bigcirc$	$\square\square\square\square$
.	.
.	.
.	.
$A_1 \bigcirc$	$\square\square\square\square$
平均値 (A_1)	$\square\square\square\square$

1. ○はこの集団が造る全配偶子から無作為にとった配偶子が持つ遺伝子

2. 遺伝子型の構成はアリルの種類とその頻度で変わる

3. 表型値は遺伝子型値で変わる

4. 平均効果はアリルの種類、頻度と遺伝子型値で変わる

$$A_1 \text{ 遺伝子の平均効果} = \text{平均値} (A_1) - \text{全集団平均}$$
$$= f(\text{アリルの種類；頻度；遺伝子型値})$$

図 11. 遺伝子の平均効果とは

の頻度、遺伝子型値により変動する。つまり、この集団で作られた A_1 遺伝子を持つ配偶子を、他の配偶子と無作為に組み合わせたときに、その遺伝子型が持つ効果はまちまちであるが、それらの平均値がすべての遺伝子型の平均値と比べてどれほど高いか、低いかにより A_1 遺伝子はその集団で平均的に発揮できる効果を評価していることになる。

(3) 育種価とは

遺伝子の平均効果の考え方をを用いて、育種価をつぎのように定義する。「個体のある形質に関する育種価とは、その個体を持つ、その形質に影響を与えるすべての遺伝子の平均効果の和である。」したがって、厳密に言えば育種価は個体とそれが属する集団が決まって初めて決まる概念である。育種価は、親から子に遺伝する能力の平均値であるともいえる。育種価の改良の指標としての価値が高いのは、個体がある集団で持つ遺伝的な効果を総合的に把握した概念であることによる。

5. 動物は交互作用の塊である

例として、品種間交雑種を作りその能力を評価する場合を考える。表1のように母方の品種としてAとB、父方の品種としてCとDがあり、それぞれ純粋種的能力が10、20と30、50であるとする。子供の量的な形質の平均値は、原則的には両親の平均すなわち表中の()内の値となるが、実際には、両親となる系統の遺伝子間の組み合わせに特有な効果により、両親平均を上回ることがよくある。家畜育種では、この両親の組み合わせの効果による両親平均からの正の偏差を雑種強勢と呼ぶ。これは一般的には、両親がもつ遺伝子の組み合わせに特有な交互作用の効果であるといえる。つまり、交互作用があると純粋種的能力が高いも

表1. 動物は交互作用の塊である
：の後ろは純粋種的能力、
数値は交互作用がある場合、()内は両親
平均で交互作用がない場合、

母の品種	父の品種	
	C : 30	D : 50
A : 10	40 (20)	30 (30)
B : 20	25 (25)	35 (35)

のどうしを交配すれば、必ず、最も能力の高い交雑種ができるとは限らないのである。

動物は交互作用の塊であることについて、つぎの3項目を追加しておきたい。一つは、前に触れた素粒子から品種に至る動物群を構成する各階層内と階層間、および各階層と体内外の環境との間に動的で総合的な交互作用のネットワークが存在するということである。二つ目は、交互作用に関する情報は分析の過程で注意しないと失われるおそれがあるということである。例として歯車とゼンマイなどでできた昔の機械的な時計を分解することを考える。分解するときに、各歯車がどの位置にあり、どの歯車とかみ合ってどの方向に回っていたか、それぞれの歯車の歯の数はどうなっていたかといった時計が動いて“時を知らせる機構”を明らかにするためのデータをとりながら分解しないと、ただ単にこのような歯車が何個あったということだけが分かっても、時計の機能がどのようにして生まれるかが分からないという結果になりかねない。三つ目は、統計的方法では、単純なモデルではあるが、交互作用を検出しその大きさの評価と有意性の検定も可能であるということである。

6. 複雑系の科学における研究法

生命、免疫系、神経系、生態系、生物の進化のような複雑系の研究法について述べる。複雑系には、“構成要素だけを見ても系の動向が分からない”、“要素間の交互作用の結果、個々の要素に関する知識だけでは予測できない複雑な様相を示す”という共通の性質がある。従って複雑系の研究には分析法に加えて、交互作用を考慮し、総合を重視した方法が必要になる。

複雑系の研究に力を発揮すると期待される学問として、Norbert Wiener (1948) は、Cybernetics を提唱している。Wiener は、その著書の中で、Cybernetics をつぎのように説明している。「いま、我々が関心を持つ状況に関する二つの変量があるとする。そのうちの一つは、我々には制御できない変量で、もう一つは制御できる変量であるとする。両変量間の関係に関するこれまでのデータを用いて、制御できる変量を適切に調節することにより、従来は制御できなかった変量を望ましい状態に保つための方法を研究する学問がCybernetics である。」そして、Cybernetics で重要な概念としては、閾値、自己組織化、フィードバック、自己増殖、複雑適合系、変量間の曲線関係、時系列データそして要素間の交互作用があげられている。

複雑適合系における自己組織化の概念を単純化して

図 12 に示した。まず小さい円で表した個々の要素がいくつか集まって小さい楕円の階層を作り、その階層がまた集まって大きい楕円の系を構成しているとする。個々の要素間、階層間、系全体のあり方と階層間に交互作用のネットワークがあり、さらに系内外の環境と要素や階層、系間にも交互作用があることにより、この系は系内外の環境要因に巧みに適応した振る舞いを見せることができると考えられる。

これまで動物の集団は典型的な複雑系であるということを強調してきた。しかし、動物生理学者の Knut Schmidt-Nielsen (1973) は、その著書 How animals work のなかで、「生物学的な問題が我々の興味を引いたとき、知識が増すにつれて、問題が多岐に分かれ、複雑になることが多い。総合的な原理が理解できたときに与えられる最大の報酬は、その回答の単純さという点にある。」と述べている。各要素が交互作用を介して密接に関連している場合には、系全体の動きの鍵を握るいくつかの代表的な現象を把握できれば、比較的単純に結果を制御できることもあると私は考えている。

7. 総合的な側面を持つ、家畜育種に関する二つの研究

総合的な考え方をういた私の研究を二つ紹介する。

- (1) 家畜の群に繰り返して選抜を加えたときの改良効果の予測理論の開発に関する研究
- はじめは、家畜の群に繰り返して選抜を加えたとき

の改良効果の予測理論の開発に関する研究である (西田 1990)。従来の予測法では、図 13 に示すように、データの分布は常に正規分布で、変量間の関係は直線的であると仮定しているために、改良の世代に伴う集団の平均値の変化も直線的であると仮定されていた。しかし、実際には、改良が効率的に行われているときは、データの分布は左右非対称な歪んだ分布となり、変量間の関係は曲線を用いなければ表せなくなる。その結果、世代に伴う能力の変化もまたこのような曲線となることが実験により確かめられている。そこで、よりよく実態に即した改良効果の予測法について研究した。

図 14 のように育種価 G を縦軸、環境の効果 E を横軸とする直交座標系で、 G と E の和で決まる能力の測定値 P の軸はどこにあるかを考える。そのためにまず $P = G + E = C$ (constant) のグラフを描く。 $G + E = C$ は $G = -E + C$ と変形できるので、そのグラフは勾配が -1 で、 y 軸切片が C となる。もし、原点を通り $P = C$ のグラフと直交しない直線を引き、その上に $P = C$ 上の各点を投影するとすべて異なる位置にくる。もし、この直線が、 P 軸なら $P = C$ 上のすべての点が一点 C に投影されなければならない。したがって、この直線は P 軸ではないことが分かる。そこで、図 15 に示したように原点を通り $P = C$ と直交する直線を引き、その上に $P = C$ 上の各点を投影すれば、それはすべて一点 C に重なる。したがって、 G と E の軸の中間のこの

図 12. 複雑適合系における自己組織化の概念

図 13. 繰り返して選抜による改良の予測

図 14. G,E 平面で P の軸を探す (1)

図 15. G,E 平面で P の軸を探す (2)

図 16. 表型値に基づく選抜

図 17. 表型値に基づく選抜(連続分布)

直線だけがP軸であることが分かる。

G と E の同時分布が図 16 のようであるとすれば、P による選抜とは、この同時分布の一部を P 軸と直交し GE 平面に垂直な平面で切り取ることである。選抜された部分の G の分布を求めるには、同時分布の確率の水平方向の和をとればよいことになる。例えば G の最頻値に対応する選抜された部分の頻度は、その右の同時分布の灰色の部分 0.04 と 0.08 と 0.16 の $1/2$ を加えた 0.2 となる。すると、たった一度の選抜で、選抜された部分の G の分布は G の周辺分布の中に灰色で書き込んだように、高い方に尾を引く歪んだ分布になる

ことが分かる。

図 16 の棒グラフの棒の巾を小さくしてゆくと、やがて、図 17 に示すようになめらかな曲線となり、同時分布は GE 平面上の等高線で表すことができる。選抜した部分の G の分布を求めるには $G = \text{constant}$ のグラフ上の同時分布の確率を、選抜した部分の E について積分すればよいことになる。

前のスライドでは、三次元空間にある G と E の同時分布のグラフを平面に等高線を使って表したが、今度は G と E の三次元同時分布の例を俯瞰したものを図 18 に示した。

図 18. G と E の同時分布

図 19. P に基づく切断選抜

図 20. 繰り返し選抜による G および G,E 同時分布の変化

図 21. 基礎集団における G,E 同時分布

図 22. 選抜第 10 世代の G,E 同時分布 (1)

図 23. 選抜第 10 世代の G,E 同時分布 (2)
(図 22 を縦軸に関して時計まわりに 90 度回転したものの)

P に基づく選抜を立体的に見ると図 19 のようになる。同時分布の一部を P 軸と直交し、GE 平面に垂直な平面で切り取っている。もう一度、平面と等高線のグラフにもどって世代が進むと同時分布の等高線がどうなるかを見よう (図 20)。育種価の平均が改良の上限に近づくにつれて、育種価のばらつきが小さく、低

い方へ尾を引く歪んだ分布になることが分かる。これを再び、三次元のグラフで見る。図 21 が選抜を始めたときの集団の分布だとすると、繰り返して選抜を加えた後では、同時分布は図 22 のようになり、このグラフを縦軸に関して時計回りに 90 度回転すると、図 23 のようになる。G の低い方に尾を引く歪んだ分布に

なっていることが分かる。この方法を用いて、実験データが示すのと同じ形の図24に示すような曲線的な改良を予測することができる。この方法により各種の改良計画の効率を比較した上で、最も効率の良い計画を採用することにより、育種を促進できるようになる。このような方法を開発できたのも、総合的な家畜の遺伝的能力である育種価の考え方を活用したことによるといえる。

(2) 豚の萎縮性鼻炎 (AR) とマイコプラズマ性肺炎 (MPS) に対する遺伝的抵抗性改良の可能性についての研究

つぎに、豚の萎縮性鼻炎 (AR) とマイコプラズマ性肺炎 (MPS) に対する遺伝的抵抗性改良の可能性についての研究を紹介する (西田ら 2001)。これは、宮城県畜産試験場と東北大学の動物遺伝育種学研究室の共同研究の結果である。まず研究の背景について述べる。いま、世界の養豚産業の現場では、豚の呼吸器、消化

器、生殖器に関する慢性病が蔓延している。それによる繁殖成績や成長速度の低下が、養豚業者に大きな経済的損失を与えている。薬品による予防や治療では、もし薬を乱用すると、その生産物への残留、環境への流出、多剤耐性菌の出現などの問題を引き起こすことが知られている。また、多くの慢性病ではワクチンの効果が不完全である。特定病原体による汚染のない (SPF) 環境での飼育は豚を慢性病から守るのに有効であるが、そのような環境で育種すると、感染性の疾病による自然淘汰の圧力が弱まる結果として、病気が蔓延している環境ではかえって病気の害を受けやすい豚ができる恐れもある。また、SPF な環境を準備し維持するには多くの費用と労力が必要である。このような事態をふまえて、最近では、一般の家畜飼料に抗生物質や抗菌剤を添加することが禁止される方向にある。そこで、免疫能を活性化する飼料添加物の検討や飼養環境の改善に加えて、遺伝的な抗病性の改良が必要になる。

しかし、抗病性を司る免疫系は典型的な複雑系で、免疫能の測定などの経験がまったくなかった私にとっては、困難な課題であった。そこで、マウスを用いた基礎的な選抜実験を行って、各種免疫能の測定技術を磨き、データを蓄積して抗病性改良の可能性を探ることにした。

マウスの三つの近交系間交雑種を基礎集団として、脾臓、肝臓の固定マクロファージの貪食能、遅延型過敏反応の強さ、抗体産生能を同時に改良することにした。各個体の三種の免疫能測定値に適切な重み付け係数を掛けて加えた総合得点である選抜指数を指標として選抜した結果、図25に示したようにそれらの免疫

図24. 新しい理論で推定した繰り返し選抜の効果

図25. マウスにおける免疫能の育種価の選抜による変化

能の育種価が高まった。免疫能を高めた選抜系マウスと選抜を加えていないマウスに、ネズミチフス菌を接種したところ、図 26 に示したように選抜系が無選抜系よりも高い生存率を示した。さらに、選抜系と無選抜系に豚の慢性病のワクチン 3 種類を接種したところ、選抜系が、無選抜系の 2 倍の抗体を産生した(図 27)。系統間差はすべて危険率 5 % で統計的に有意であった。なお、選抜系では、免疫能改良の間接的な影響で、直接改良の対象とはしなかった他の 6 種類の免疫能の改良が認められた。

この結果に励まされ、宮城県畜産試験場の協力を得て、豚での抗病性改良の可能性を探る研究を始めた。用いた豚は、当時、系統造成中であった Duroc 種で、いま、“霜降りレッド”として活躍しているものである。測定した項目は図 28 にある、種豚候補と同じ腹の兄弟 2 頭に関する萎縮性鼻炎とマイコプラズマ性肺炎の病変の程度と、すべての豚の免疫能であった。図 28

図 26. マウスでの *S. typhimurium* 感染実験の結果

図 27. 豚用ワクチンに対するマウスの抗体産生能の比較

に豚の鼻の断面図を示した。真ん中が鼻の穴を左右に分ける壁、鼻中隔で、左右の外側の壁から渦巻き状の襞が張り出している。空気は襞の間の狭い気道を通る。なぜこのような構造になっているのであろうか？一般に鼻から吸込まれた空気の温度は豚の体温より低く、湿度は 100 % より低くなっている。しかし、気道を取り囲む広い面積の粘膜に接することにより気道の奥に進むにつれて短い時間に気温が豚の体温にほぼ等しくなる。また、気道粘膜の表面には粘液が分泌されており、そこから蒸発する水蒸気で吸気の湿度はほぼ 100 % となる。さらに、吸気の中の病原体や塵は、粘液に吸着されて粘膜表皮細胞の繊毛運動で鼻の外へと送り出される。豚の鼻はこのようにして、吸気の気温と湿度を上げ、異物を取り除いて肺に送り込むことにより体を各種の疾病から守っているのである。

しかし一方では、気道の粘膜上は気温と湿度が高く、粘液に覆われているので、細菌が増殖するのに都合の良い環境であるともいえる。この環境を好んで増殖する菌が知られており、増殖するだけではなく、増殖するときに毒素を産生するので、鼻の粘膜が炎症を起こし、それが慢性化して、この大切な鼻の中の襞である鼻甲介が萎縮し、重傷になると消失してしまう。すると、冷たく乾燥して、病原体を含んだ空気が肺に達し、肺炎などにかかりやすくなる。この研究では、種豚候補の兄弟の病変の程度を正常なものを 0 とし、最も萎

図 28. 萎縮性鼻炎とマイコプラズマ性肺炎による病変の測定

縮のひどいものを4として数量化した(図28)。

健康な肺の組織は肺胞からなるために明るいピンクの比重の軽い組織で水に浮く。しかし、マイコプラズマ性肺炎の病変部は黒ずんだ赤となり、内容が詰まってガス交換の機能を持たない組織に変化しており、水に沈む。この病変の面積を測定した。

この集団では4割以上の豚に鼻炎と肺炎の病変が見られたので、それをまったくみられなくするという目標を立てて、この目標に達するための総合的な能力評価基準である3種類の選抜指数式を作った。その一つは兄弟豚の鼻炎と肺炎の病変の程度に適切な重み付けの係数を掛けて加えることによりを総合得点化した選抜指数である。二つ目は、種豚候補自身の遅延型過敏反応の強さ、羊の赤血球に対する抗体産生能、補体の別経路活性、末梢血中の食細胞の活性からなる選抜指数である。三つ目は種豚候補自身の遅延型過敏反応の強さ、抗体産生能、末梢血中の食細胞の活性とその兄弟豚の鼻炎と肺炎の病変の程度を用いた選抜指数である。それぞれの総合的な評価基準値を用いて上位38%の個体を親として選抜したと仮定すると、病変が全く見られなくなるまでに必要な世代数は、表2に示したようにそれぞれ3世代、5世代、3世代と推定された。豚は1年に1世代進めることができるので、この集団では、3年から5年で、萎縮性鼻炎とマイコプラズマ性肺炎の病変を無くすることができると期待された。

この結果をふまえて、いま、東北大学の動物遺伝育種学研究室と宮城県畜産試験場は協力して、MPSに対する抵抗性の高いランドレース種の豚の系統造成を進めている。

8. 動物の総合的な進化について -- エネルギーの利用効率を例として --

ここで話題を変えて65億頭の巨像に関する話を引用する(安部義孝2005)。話の内容はエネルギーの使

いすぎについてである。先進国の1日1人あたり熱量消費量は200,000kcalであるといわれている。いま一頭の象がいてその体重が7,000kgであり、先進国の成人男性の体重が70kgであったとすると、両者の体重比は、100:1となる。1日あたりの食物から摂る熱量を象では200,000kcal、ヒトでは2,000kcalであるとするれば、両者の比はここでも100:1となる。すなわち、食物以外の供給源からの熱量消費量は象では0であるのに対して、ヒトでは198,000kcalとなっている。地球の人口は2006年2月27日に65億人を越えたと推定されている。65億頭の巨象を地球が養えないことは明らかである。この単純化した例え話は、先進国の人々は、効率の改善などにより熱量の消費を節減しなければならないことを示している。

イルカは恒温の哺乳動物であり、海水温は一般にイルカの体温より低い。イルカの手の先端に向かう動脈の血管は、図29に示すように手の根本の部分で手の先端から心臓へ戻る細い多数の静脈によって取り囲まれているSchmidt-Nielsen(1973)。このような構造がイルカにとって何をもたらすのであろうか? イルカの手は魚の鰭の役割をするために扁平な形となっており、冷たく、流れる海水に曝されているので、そこから体熱を奪われることは避けられないように思われる。しかし、この構造により、海水で冷やされた静脈血は前肢へ向かう動脈血と広い面積で接することにより、動脈血が持つ熱を効率的に受け取って、温度を上昇させた上で、体の深部へ戻ることができる。これとは逆に静脈に熱を渡して冷やされた動脈血は前肢で冷たい海水と接するが、動脈血と海水の温度差が小さいので、

表2. 改良目標到達に必要な世代数の予測

選抜指数	形質	改良に必要な世代数
1	AR, MPS	3.2
2	DTH, IgG, IgM, CMP, PA	4.9
3	DTH, IgG, PA, AR, MPS	2.9

図29. イルカの省エネルギー
小さい黒丸: 静脈の断面、大きい黒丸: 動脈の断面

海水に奪われる熱を少なくすることができる。つまり、イルカは、限られた餌の資源を多くの他の動物と分け合いつつ進化することにより、熱を効率的に利用するための対向流式の熱交換機能を持つ構造を発達させて、生き残ってきたと考えることができるのである。なお、イルカの体幹は、厚い皮下脂肪層により断熱されている。いま、ヒトが行っている不十分な断熱しかされていない家屋での冷房や暖房と、熱交換機能のない換気システムを考えれば、ヒトはヒト以外のあらゆる生物と自然から、エネルギーの節約について極めて多くのことを急いで学ばなければならないことがわかる。

農業は本来、現在、地球に注がれている太陽のエネルギーを、一時的に固定して、我々が利用し、再び環境に戻す産業であったはずである。しかし、最近の先進国における農業が、大量の化石エネルギーの消費の上にしか成り立たないことは明らかであり、環境を乱すことの少ない農業への発想の転換が必要である（千秋達道 2001）。家畜育種もこの発想の転換の中で重要な役割を果たさなければならない。

9. 今後、重要になると考えられる概念について

ここで、他の要素の否定は総合を妨げるということについて意見を述べる。家畜育種に限らず、要素間のある程度の矛盾は、より高い階層で総合的に調和させることができる。イルカの例のように生物は進化によりそれを実現してきた。いま、教育や研究の場でも“競争”という言葉が強調されているが、今後、大切になるのは、“共同”、“協力”、“協調”、“共存”、“共栄”、“共生”、“調和”、“連携”、“連帯”などの言葉であると思う。競うならば、いかに良く“共同”したか、“協力”したかを競うべきであると思う。

10. 家畜育種における分析と総合についてのまとめ

終わりに、家畜育種における分析と総合について述べる。分析とは、ある物事を分解して、それを成立させている成分、要素を明らかにすることであるが、そのさい、成分、要素間の交互作用を考慮することが加わらなければならない。総合とは、個々の要素、成分を、それらの間の交互作用を考慮して一つに合わせまとめることであるといえる。

交互作用を考慮した分析と総合は、ある対象を見るとき方向が異なるだけで、互いに一体をなすものであるとも考えられる。

11. 謝辞

長い間、皆様には大変お世話になりました。有り難うございました。何の貢献もできなかった私に講演と、投稿の機会を与えて下さった動物遺伝育種学会と家畜育種研究会の事務局と会員の皆様に御礼申し上げます。

わが国の食料におけるエネルギー自給率はご存じの通り 40%と、極めて低くなっています。十分な量の安全で、栄養豊かで美味しい食料すなわち、私たちのこれからの健康な命を生産する農業が、すべての土台であることは言うまでもありません。この最も大切で誇り高い産業に関する教育と研究に携わる皆様の今後のご発展を心からお祈りしています。

文献

- 安部義孝. 2005. アクアマリン発 --- 小さな水惑星からの発信 ---. 歴史春秋社.
- K. シュミットー ニールセン (柳田為正訳). 1973. 動物の作動と生能. --- その比較生理学 ---. 培風館.
- Nishida A, Ogawa T, Kikuchi Y, Wakoh K, Suzuki K, Shibata T, Kadowaki H, Shinohara H, Ohtomo Y. 2001. A Hopeful Prospect for Genetic Improvement of Chronic Disease Resistance in Swine. Asian-Aust. J. Anim. Sci. 14, Special Issue: 106–110.
- 西田 朗. 1990. 家畜育種における長期的な選抜の効果の予測 (総説). 日本畜産学会報, 61(2): 95–103.
- ハーパー・生化学. 1990. 原書 23 版. 上代淑人監訳. 丸善株式会社.
- 千秋達道. 2001. 環境保全型畜産の意義 ---- 発想転換のすすめ ---- (総説). 東北畜産学会報, 50(3): 53–60.
- 佐々木裕之. 2005. エピジェネティクス入門. 岩波科学ライブラリー: 101.