 原 著

豚の系統造成における希望改良量を達成するための 選抜手法の比較

家入誠二・野村哲郎*・広岡博之**

熊本県農業研究センター畜産研究所, 熊本県合志市, 861-1113

* 京都産業大学工学部, 京都市, 603-8555

** 京都大学農学部, 京都市, 606-8577

(2008 年 6 月 25 日受付, 2008 年 8 月 29 日受理)

要 約 豚の閉鎖育種集団を想定したモンテカルロシミュレーションを用い, 通常の BLUP 法から得られる推定育種価に線形計画を適用した選抜法 (BLUP+LP 法) と制限付き BLUP 法による選抜法 (RBLUP 法) を比較した。選抜形質は背脂肪厚 (BF) および 1 日平均増体重 (DG) とし, 両形質を予め設定した方向に改良するものとした。遺伝的パラメーターは, 熊本県で実際に造成された系統豚「ヒゴサカエ 302」のデータからの推定値を用い, 選抜は 7 世代まで行った。500 回の反復の平均値で見ると, 両選抜法とも全世代を通じて育種価の集団平均を意図した方向に導いた。しかし, RBLUP 法の下では, 育種価の集団平均の反復間での分散が BLUP+LP 法の下でのそれより大きく, その差は世代とともに増加した。遺伝相関に推定誤差がある場合, 両選抜法の下での育種価の集団平均は意図した改良方向からずれを生じたが, RBLUP 法におけるずれは BLUP+LP 法におけるずれよりも著しく大きかった。近交係数については, 両選抜法の間で全世代を通じて大差はなかった。以上の結果から, BLUP+LP 法は RBLUP 法に比較して信頼性に優れ, 豚の系統造成における選抜法として有効であると考えられた。

緒 言

わが国の豚の系統造成では, 予め設定された希望改良量を達成するための選抜が実施されている場合が多い。希望改良量を達成するための手法として, 従来から, 制限付き選抜指数法¹⁾や制限付

き BLUP 法²⁾が用いられてきたが, FAMULA³⁾は推定育種価 (EBV) に対して線形計画法 (LP 法) を適用して遺伝的改良量に制限を付加する選抜手法を提唱し, 広岡ら⁴⁾はそれを希望改良量への選抜に拡張した。LP 法を用いた選抜の効率については, NOMURA ら⁵⁾, DIAZ ら⁶⁾ および IEIRI ら⁷⁾に

A Comparison of Restricted Selection Procedures to Control Genetic Gains in Closed Herds of Swine

S. IEIRI, T. NOMURA* and H. HIROOKA**

Department of Animal Husbandry, Kumamoto Agricultural Research Center, Koushi-shi, Kumamoto-ken, 861-1113, Japan

* Faculty of Engineering, Kyoto Sangyo University, Kyoto-shi, 603-8555, Japan

** Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-8577, Japan

連絡者: 家入誠二 (E-mail: ieiri-s-dz@pref.kumamoto.lg.jp Tel: 096-248-6433)

よってシミュレーションによる検討がなされてきた。その結果, LP 法を用いた選抜は, 制限付き BLUP 法などの従来の選抜手法に比べて, 遺伝的改良量はやや小さいが, 反復間でのばらつきが小さく, より高い信頼性を持つことが示された。

豚の系統造成を想定した LP 法による選抜について, 家入ら⁸⁾は熊本県で実際に造成された豚の系統造成のデータに基づいて, 雄豚における選抜を通常の BLUP 法から得られた EBV に LP 法を適用した選抜 (BLUP+LP 法) と制限付き BLUP 法による選抜 (RBLUP 法) で比較し, 両選抜法の下で選抜される個体群に大差がないことを示した。また, 従来の LP 法を用いた選抜では各性内での選抜に LP が適用されてきたが, 最近, 佐藤⁹⁾は LP 法により雌雄同時に選抜を行う方法を提案し, シミュレーションによる 1 世代の選抜結果に基づいて, 新たに提案した選抜手法のほうが豚の閉鎖群育種においてはより正確に意図した制限を達成することを示した。しかし, 多世代にわたる系統造成における LP 法による選抜の効率について検討された報告はない。

そこで本研究では, 実際に造成された豚の閉鎖系統の情報に基づいた多世代にわたるシミュレーションによって, BLUP+LP 法と RBLUP 法の比較を行ない, 豚の系統造成における選抜方法について議論した。

方 法

1. 計画の基本設計と選抜方法

選抜計画は, 熊本県で造成された豚の閉鎖系統「ヒゴサカエ 302」の基本設計に準じ, 毎世代, 雄 10 頭と雌 50 頭の間で交配を行い, 次世代の選抜候補個体として 1 腹あたり雌雄各 2 頭の育成豚を生産するものとした。得られた雌雄各 100 頭の育成豚から雄 10 頭および雌 50 頭を次世代の親として選抜した。選抜と交配は, 「ヒゴサカエ 302」の造成にしたがい 7 世代にわたり実施した。なお, 実際の系統造成では交配に際して半きょうだい以上の血縁個体間の交配は回避されたが, 本研究では交配はランダムに行うものとした。

選抜形質は背脂肪厚 (cm) と 1 日平均増体重 (g) の 2 形質とし, 希望改良量は表型標準偏差

(S.D.) 単位で設定し, それぞれ 0.0 cm と 130 g (0 : 1 S.D. 単位), -0.3 cm と 130 g (-1 : 1 S.D. 単位) および -0.6 cm と 130 g (-2 : 1 S.D. 単位) の 3 通りを設定した。なお, 7 世代以内に集団が上記のレベルに達した場合でも, 選抜は 7 世代まで継続した。比較した選抜方法は, 以下の 2 つのものである。

1) BLUP 法と LP 法を組み合わせた選抜 (BLUP+LP 法)

まず, 通常の多形質 BLUP 法により選抜形質の EBV を得た。つぎに, LP 法によって, 希望改良量を達成できるように選抜個体群の EBV の平均値を制御する選抜を行った。選抜方法の詳細は以下のとおりである。いま, T 頭の育成豚から N 頭の候補豚を選抜するものとする。また, 背脂肪厚 (BF) を 1 番目, 1 日平均増体重 (DG) を 2 番目の形質とする。 i 番目の育成豚の次世代への寄与率を f_i とし, その j ($=1$ or 2) 番目の形質の EBV を $\hat{A}_{i,j}$ とする。2 つの形質の選抜個体群における EBV の平均値に対して所与の比例制限を満たすような f_i を得るための LP 問題は,

$$\sum_{i=1}^T f_i \hat{A}_{i,2} \rightarrow \text{maximize}$$

を, つぎの制限のもとで解くことである。

$$\Delta g_1 \sum_{i=1}^T f_i \hat{A}_{i,2} = \Delta g_2 \sum_{i=1}^T f_i \hat{A}_{i,1} \quad (1)$$

$$f_i \geq 0 \quad (\text{全ての } i \text{ について})$$

$$f_i \leq 1/N \quad (\text{全ての } i \text{ について})$$

$$\sum_{i=1}^T f_i = 1. \quad (2)$$

制限式 (1) によって, 両形質の EBV の選抜個体群における平均値は事前に定義した比 $\Delta g_1 : \Delta g_2$ にコントロールされる (本研究においては, 前述した 0 : 1, -1 : 1 および -2 : 1 S.D. 単位)。制限式 (2) は線形計画において N 頭の親が選ばれるように付加されている。この制限が付加されない場合, LP は, 選択された個体の EBV の平均を最大にするために, わずか 1, 2 頭を選択することになる^{2,3)}。実際の LP 計算においては, $N-1$ 頭の個体の寄与率は $f_i = 1/N$ となり, 第 N 番目と $N+1$ 番目の個体の寄与率は $0 < f_i < 1/N$ となる場合が多かった。これは, 制限式 (1) と (2) を厳密に満足さ

せるために、 $N+1$ 頭の個体を選抜していることを示している。しかし、本研究では選抜率を N/T に保つため、 f_i について上位 N 個体を選抜した。このような措置により、選抜個体群の育種価の平均値は意図した方向からずれることになるが、その誤差は無視できるものとした。選抜は雌雄それぞれにおいて実施した。LP 計算には、PRESS ら¹⁰⁾ の FORTRAN サブルーチンを用いた。

2) 制限付き BLUP 法による選抜 (RBLUP)

所与の比例制限を付加した RBLUP 法¹¹⁾ により育成豚の育種価を推定し、上位の個体を選抜した。

2. シミュレーション

シミュレーションはモンテカルロ法によって実施した。まず、基礎世代における i 番目の親の第 1 形質 (BF) と第 2 形質 (DG) の育種価 $A_{i,1}$ と $A_{i,2}$ を、つぎのようにして発生させた。

$$\begin{bmatrix} A_{i,1} \\ A_{i,2} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi'_i \end{bmatrix}$$

ここで、 $\mathbf{L}$ は 2 つの形質の遺伝分散共分散行列を Cholesky 分解して得られる下三角行列である。また、 ϕ_i と ϕ'_i は独立な標準正規分布から得られた乱数である。無限遺伝子座モデル¹²⁾ にしたがって、次世代以降の第 i 番目の育成豚の育種価 $A_{i,1}$ および $A_{i,2}$ を次式により得た。

$$\begin{bmatrix} A_{i,1} \\ A_{i,2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{m,1} \\ A_{m,2} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{f,1} \\ A_{f,2} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \sqrt{1-F_m} \mathbf{L} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi'_i \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \sqrt{1-F_f} \mathbf{L} \begin{bmatrix} \phi''_i \\ \phi'''_i \end{bmatrix}$$

ここで、 $A_{s,1}$ および $A_{s,2}$ は、それぞれ父 ($s=m$) あるいは母 ($s=f$) の 1 および 2 番目の形質の育種価であり、 F_m および F_f はそれぞれ父親および母親の近交係数である。また、 ϕ_i 、 ϕ'_i 、 ϕ''_i および ϕ'''_i は独立な標準正規分布から得られた乱数である。両形質の表現型値 $X_{i,1}$ および $X_{i,2}$ は、つぎのように発生させた。

$$\begin{bmatrix} X_{i,1} \\ X_{i,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{i,1} \\ A_{i,2} \end{bmatrix} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \varepsilon_i \\ \varepsilon'_i \end{bmatrix}$$

ここで、 $\mathbf{E}$ は両形質の環境分散共分散行列を Cholesky 分解して得られる下三角行列であり、 ε_i および ε'_i は独立標準正規分布から得られた乱数である。

データの発生および 2 つの選抜方法 (BLUP+LP 法および RBLUP 法) における育種価の推定には、「ヒゴサカエ 302」のデータ¹³⁾ から制限付き最尤法 (REML 法) によって推定した遺伝的パラメーターを用いた (表 1: 基本セット)。さらに、遺伝的パラメーターの推定誤差の影響を評価するため、育種価の推定に用いられる遺伝相関 (r_g) が真値 ($r_g=0.23$) から偏っている場合として、 $r_g=-0.23$ 、 0.46 および 0.92 について検討した (表 1: セット A、B および C)。なお、遺伝率の推定誤差も改良の効率に影響を及ぼすことが考えられるが、今回は遺伝相関の推定誤差の影響について検討するにとどめた。基本セットの Cholesky 分解から計算した $\mathbf{L}$ と $\mathbf{E}$ は、

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0.1821 & 0.0000 \\ 15.4841 & 64.2375 \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0.2363 & 0.0000 \\ 6.1983 & 111.3036 \end{bmatrix}$$

である。

各パラメーターのセットについて、反復回数は 500 回とし、各反復において世代ごとの全育成豚の真の育種価の平均値から遺伝的改良量を評価した。結果は、500 回の反復に関する平均値と標準偏差で表した。また、各世代の近交度の上昇についても調査した。

結果および考察

図 1 に遺伝的パラメーターの基本セットの下で BLUP+LP 法と RBLUP 法による各世代の累積改良量について 500 回の反復の平均値を示した。また図 2 には、累積改良量の 500 回の反復間での標準偏差の推移を示した。図 1 に示したように、いずれの選抜法でも 500 回の反復の平均値で見ると、改良量を意図した方向に制御できた。この結果は、完全には一致しないものの、遺伝的パラメーターが既知の条件下では、両選抜手法とも、比例制限を満足させ遺伝的改良量を最大にする個体を選抜していることを示している。累積改良量の標準偏差については、RBLUP 法では世代と

表 1. シミュレーションで仮定した遺伝的パラメータのセット

Table 1. Set of genetic parameters assumed in simulation

Set	h_{BF}^2	h_{DG}^2	r_p	r_g	$\hat{r}_g$
Basic	0.26	0.37	0.03	0.23	0.23
A	0.26	0.37	0.03	0.23	-0.23
B	0.26	0.37	0.03	0.23	0.46
C	0.26	0.37	0.03	0.23	0.92

h_{BF}^2 , h_{DG}^2 =heritabilities of daily gain and backfat thickness.

r_p =phenotypic correlation.

r_g =genetic correlation.

$\hat{r}_g$ =genetic correlation used in estimation of breeding values.

もに大きくなったが、BLUP+LP法では世代の経過に伴う変動が少なく、RBLUP法に比べて常に小さかった(図2)。Ieiri ら⁷⁾は、種々のパラメータおよび制限条件のもとでの1世代の選抜実験において、BLUP+LP法から得られる遺伝的改良量の変動は、RBLUP法のそれより常に小さいことを示している。今回の研究から得られた結果は、そのような変動の大きさの違いが、世代とともに拡大することを示している。NICHOLAS^{14,15)}やNOMURA¹⁶⁾が述べているように、遺伝的改良量の変動は、選抜法の比較において、選抜時のリスクを評価するための重要な基準である。仮に、2つの選抜計画から同程度の遺伝的改良量が得られたとしたら、遺伝的改良量の変動が小さいものを選択すべきである。とくに、反復実験が行われない豚の系統造成においては、遺伝的改良量の変動は選抜手法の重要な選択基準である。

図3には、BLUP+LP法およびRBLUP法における遺伝相関の推定誤差の影響を示した。図に示したように、BLUP+LP法で見られる意図した改良方向からのずれは、RBLUP法よりも常に小さかった。このことは、BLUP+LP法のほうがRBLUP法よりも遺伝相関の推定誤差に対して、より強い頑健性を持つことを示している。一般に、豚の系統造成においては、選抜の初期世代に

図 1. 7世代間の累積遺伝的改良量(500反復の平均値)の推移

Fig. 1. Change of cumulative genetic gains (averaged over 500 replicates) under combined selection of BLUP and linear programming (BLUP+LP: x) and selection with restricted BLUP (RBLUP: triangle) over 7 generations. Arrow "→" indicates the direction of selection determined by the intended ratio (x:y) of genetic gains of BF and DG (in phenotypic S.D. unit).

おいては文献値等の遺伝的パラメータを用い、十分なデータが蓄積された数世代後に、改良しようとする集団から得られたパラメータを推定し、改良方向の見直しを行う。本研究の結果は、このような遺伝的パラメータの再評価と改良方向の見直しの重要性を示すとともに、RBLUP法ではとくに背脂肪厚のように適正水準が存在する形質の遺伝的改良量を、選抜の初期世代から厳密に適正範囲に制限することが困難であることを示唆している。なお、今回の分析では、比例制限の設定によって、両選抜手法間における遺伝相関の推定誤差に対する頑健性が変化したが、この問題については、様々なパラメータ条件の下で詳細に検討する必要がある、今後の課題とする。

両選抜方法の下での平均近交係数は図4に示すように推移し、選抜方法間で実質的な差は認められなかった。

RBLUPにおいては、選抜された個体群の育種価の平均値が改良方向に向かうように、評価される個体全てのBVが制限を付加されている。例え

図 2. 線形計画 (BLUP+LP) と制限付き BLUP (RBLUP) とによる 7 世代にわたる選抜下の累積遺伝的改良量に対する 500 反復での標準偏差の推移

Fig. 2. Change of standard deviation (S.D.) of cumulative genetic gains among 500 replicates under selection with combined selection of BLUP and linear programming (BLUP+LP) and restricted BLUP(RBLUP) over 7 generations $x:y$ =intended ratio of genetic gains of BF and DG (in phenotypic S.D. unit).

ば 2 形質で希望改良量が 1:1 となっていれば、全個体の育種価の RBLUP はこの 1:1 ($y=x$) の直線に投影された点として評価される。したがって、全個体の育種価の RBLUP はいずれも 1:1 となる。本研究の結果は、このような計算過程を経て得られる育種価の RBLUP は遺伝相関の推定誤差に対して感受性が高く、推定誤差の方向と大きさによっては意図した方向とは大きく異なる方向に集団が改良される場合があることを示している。この点に関して SATOH¹⁷⁾ は、豚の系統造成のように過去の世代から蓄積されたデータに対して RBLUP を適用する場合、データに含まれる全個体の育種価に対して制限を加えるのではなく、選抜の対象となる個体群 (当該世代の育成豚) のみに制限を加えるべきであることを指摘し、そのための計算方法を開発している。しかし、開発された方法は本質的には従来の RBLUP と同様の

計算過程を含み、遺伝相関の推定誤差に関する感受性は BLUP+LP 法よりも依然として高いことが予想される。

また、RBLUP においては、YAMADA¹⁾ 型の場合、部分欠測記録をもつ個体を扱うことができず、一腹産子数など雌のみがもつ形質を含む場合には適用できない。さらに、母数効果を推定できない場合もある。このため、最近では、RBLUP の活用は少なくなっており、希望改良量に対応した重み付け値¹⁸⁾ による総合育種価選抜が一般的に用いられるようになってきている。しかし、これは数世代に限定した血縁個体情報に基づく家系選抜指数から得られた簡便法にすぎず、正確性を求めれば、全個体の血縁情報による計算を必要とすることになる。一方、本研究で示した BLUP+LP 法においては、RBLUP に伴う先に述べた問題は発生しない。また、LP は飼料の設計をはじめと

図 3. 線形計画 (BLUP+LP) と制限付き BLUP (RBLUP) とによる 7 世代にわたる選抜下での累積遺伝的改良量 (500 反復の平均値) に及ぼす遺伝相関の推定誤差の影響

Fig. 3. Effect of estimation error in genetic correlation on cumulative genetic gains from combined selection of BLUP and linear programming (BLUP+LP) and restricted BLUP (RBLUP) over 7 generations

Arrow “→” indicates the direction of selection determined by the intended ratio (x : y) of genetic gains of BF and DG (in phenotypic S.D. unit).

▲ : Set A, × : Set B, □ : Set C (See Table 1, for detail of Sets A-C).

して畜産の現場に普及しており、制限のない通常の BLUP 法から得られた EBV を活用して比例制限を課す過程も理解しやすい。IEIRI ら⁷⁾は、選抜

図 4. 線形計画 (BLUP+LP) と制限付き BLUP (RBLUP) とによる 7 世代にわたる選抜下での近交係数 (500 反復の平均値) の推移

Fig. 4. Change of inbreeding coefficients under selection with combined selection of BLUP and linear programming (BLUP+LP), and restricted BLUP (RBLUP) over 7 generations

対象家畜が極端に多く、かつ制限を課す形質が非常に多い場合など、正確な解を算出するのが困難になる可能性を述べているが、佐藤⁹⁾が指摘したように、豚の系統造成で用いられる集団の大きさは各世代数百頭程度で、しかも形質も 3 から 4 形質程度であることから、実際の選抜の場面でこれらのことが問題となることはないと考えられる。また、今回の研究では雄と雌の選抜それぞれに LP を適用したが、佐藤⁹⁾が示すような LP による雌雄同時選抜を行えば、遺伝的改良量の変動をさらに小さくできることが期待できる。

以上の点から、わが国で実施されている豚の系統造成において、希望改良量を実現するための選抜手法としては、通常の BLUP 法により推定された育種価に対して線形計画を適用した BLUP+LP 法による選抜が、現時点では最も信頼性が高く有効な方法であると考えられる。

文 献

- 1) YAMADA, Y., K. YOKOUCHI and A. NISHIDA :

- Selection index when genetic gains of individual traits are of primary concern, *Jap. J. Genet.*, **50**, 33-41, 1975.
- 2) QUAAS, R.L. and C.R. HENDERSON : Restricted best linear unbiased prediction of breeding values, Mimeo, Cornell University, Ithaca, 1976.
 - 3) FAMULA, T.R. : A comparison of restricted selection index and linear programming in sire selection, *Theor. Appl. Genet.*, **84**, 384-389, 1992.
 - 4) 広岡博之・野村哲郎・松本道夫 : 期待後代差に基づく赤毛和種種雄牛の選抜法に関する検討, *日畜会報*, **66**, 533-539, 1995.
 - 5) NOMURA, T., F. MUKAI and A. YAMAMOTO : Comparison of selection schemes for achieving desired genetic gain in closed broiler lines, *Anim. Sci. J.*, **72**, 386-394, 2001.
 - 6) DIAZ, C., M.A. TORO and R. REKAYA : Comparison of restricted selection strategies : an application to selection of cashmere goats, *Livest. Prod. Sci.*, **60**, 89-99, 1999.
 - 7) IEIRI, S., T. NOMURA, H. HIROOKA and H. SATOH : A comparison of restricted selection procedures to control genetic gains, *J. Anim. Breed. Genet.*, **121**, 90-100, 2004.
 - 8) 家入誠二・佐藤正寛・村上忠勝 : 豚の系統造成における線形計画による選抜と制限付き BLUP 法との比較, *日豚研誌*, **33**, 14-18, 1996.
 - 9) 佐藤正寛 : 豚閉鎖集団において線形計画を用いた制限付き選抜法の比較, *日豚研誌*, **44**, 136-139, 2007.
 - 10) PRESS, W.H., B.P. FANNERY, S.A. YEUKOLSKY and W.T. VETTERLING : Numerical RECEPTION in FORTRAN : the Art of Scientific Computing, pp. 423-436, 2nd edn. Cambridge University Press, New York, 1992.
 - 11) SATOH, M. : A simple method of computing restricted best linear unbiased prediction of breeding value, *Genet. Sel. Evol.*, **30**, 89-101, 1998.
 - 12) BULMER, M.G. : The Mathematical Theory of Quantitative Genetics, pp.144-163, Clarendon Press., Oxford, 1980.
 - 13) 家入誠二・崎村武司 : ヒゴサカエ 302, 動物遺伝資源探査調査報告書, **16**, 25-37, 2006.
 - 14) NICHOLAS, F. : Size of population required for artificial selection, *Genet. Res.*, **35**, 85-105, 1980.
 - 15) NICHOLAS, F. : Incorporation of new reproductive technology in genetic improvement programmes. In : HILL, W.G., MACKAY, T.F.C. (eds), *Evolution and Animal Breeding*, pp. 203-209, CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 1989.
 - 16) NOMURA, T. : A simulation study on variation in response to selection and population size required for selection programs, *J. Anim. Breed. Genet.*, **114**, 13-21, 1997.
 - 17) SATOH, M. : A method of computing restricted best linear unbiased prediction of breeding values for some animals in a population, *J. Anim. Sci.*, **82**, 2253-2258, 2004.
 - 18) GIBSON, J.P. and B.W. KENNEDY : The use of constrained selection indexes in breeding for economic merit, *Theor. Appl. Genet.*, **80**, 801-805, 1990.

A Comparison of Restricted Selection Procedures to Control Genetic Gains in Closed Herds of Swine

Seiji IEIRI, Tetsuro NOMURA* and Hiroyuki HIROOKA**

Department of Animal Husbandry, Kumamoto Agricultural Research Center,
Kumamoto-ken 861-1113, Japan

* Faculty of Engineering, Kyoto Sangyo University, Kyoto-shi 603-8555, Japan

** Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto-shi 606-8577, Japan

Using Monte Carlo simulation, two schemes of restricted selection were compared under the condition of closed swine breeding. The first selection scheme is the combination of ordinary BLUP evaluation and linear programming technique (BLUP+LP), and the second one is based on the restricted BLUP selection (RBLUP). Back-fat thickness (BF) and daily gain (DG) were selected over 7 generations to improve them into the direction determined by the intended ratio of genetic gains of the two traits. The breeding structure and genetic parameters were chosen as to emulate an actual pig line “HIGOSAKA 302” developed in Kumamoto prefecture. The two selection schemes gave a similar cumulative genetic gain averaged over 500 replicates throughout all generations when the parameters are known. In all generations, however, the variance of genetic gains among replicates was much smaller under BLUP+LP selection, and the difference tended to become larger with the advance of generation. When a genetic correlation with estimation error was used in the estimation of breeding values, both selection schemes could not exactly control the direction of genetic gains. However, BLUP+LP selection was robust to the estimation error of genetic correlation. Both selection schemes gave a similar inbreeding coefficient throughout all generations. These results suggest that BLUP+LP selection will be preferable to RBLUP selection in closed herds of swine.

Jpn. J. Swine Science, **45**, 4 : 193-200

Key words : Linear programming technique, Restricted BLUP, closed herd of swine ,
Monte Carlo simulation