

## 選択交配法による筋線維組成・筋酵素活性の遺伝学的検討

— 第7世代までの結果より —

勝田 茂・増井 都乃\*・中村 友浩\*\*

### Heredity of muscle fiber composition and muscle enzyme activities obtained from a selection experiment in rats

Shigeru KATSUTA, Satono MASUI\* and Tomohiro NAKAMURA \*\*

The purpose of this study is to investigate the extent to which muscle fiber composition is determined by the genes transmitted from parents to the offspring and the extent to which the change of muscle fiber composition influenced on the muscle enzyme activities. The realized heritability of muscle fiber composition was estimated by using successive selection for a high percent of %Type I fibers.

In this experiment, we used the foundation population ( $G_0$ ), which is hybrid rats obtained from random mating of three different strains, and mated them by successive selection. The results of the foundation population ( $G_0$ ) and the first seven generations of selection ( $G_1 \sim G_7$ ) will be reported here.

The results were summarized as follows ;

1. Litter size, proportion of females mated giving birth and time from mating to birth are called biological fitness. Litter size and proportion of females mated giving birth tend to decrease, and time from mating to birth tend to increase. It was suggested that the genetically degree of inbreeding was increased.
2. It is observed that the mean value of %Type I fibers changed to high direction by successive selections. The individuals which have low %Type I fibers decreased, and contrariwise the individuals which have high %Type I fibers increased.
3. The realized heritability of %Type I fibers was 0.20.
4. There was no significant difference between the mean value of %Type I fibers and muscle enzyme activities.

Thus, as a result of the selections, muscle fiber composition changed, and the realized heritability was 0.20. It means that about 20% of the variation of muscle fiber composition is influenced by the parents. Moreover, even though the mean value of %Type I fibers changed to high, SDH activities didn't increase. It means that the muscle enzyme activities is much influenced by the environmental factors.

Key words : Muscle fiber composition, Realized heritability, Successive selection, Genetical analysis, Rat

\*筑波大学大学院体育研究科

\*\*大阪工業大学

## I. 緒 言

競技スポーツでよい成績を修めるためには、技術・体力の様々な面にわたって適性を有していることが不可欠であるため、いかにしてそれぞれの種目に適した者を見つけ、そして育てていくかが、スポーツタレント発掘の観点から重要な問題である。

運動能力に及ぼす遺伝的影響を検討したものに、双生児及び兄弟姉妹を用いた横断的研究<sup>(4,6,8,12,16)</sup>や、親子を用いた縦断的研究<sup>(21)</sup>が報告されている。これまでは主に横断的研究が行われてきたが、性・年齢などの影響を考慮する必要もあり<sup>(3,6)</sup>、また遺伝的要因以外の環境的要因を統一することも困難である。遺伝とは、本来親から子へある形質が受け継がれていく現象を示していることから、縦断的研究が必要であると思われる。

体育の分野で報告されている研究は、有氣的・無氣的能力などを扱うマクロ的な視点からの検討<sup>(8,9,12,13,14,16,17)</sup>が大部分を占め、細胞レベルでのミクロ的な視点、たとえば筋線維組成についての研究<sup>(26)</sup>は少ない。また、筋線維組成はスポーツパフォーマンスを規定する一つの因子であるが、トレーニングによる変化は起こりにくいとされている<sup>(6)</sup>ことから、スポーツ適性の観点の一つとして重要なパラメーターであると考えられている。

そこで本研究では、筋線維組成をスポーツ適性を発見するための重要な手がかりの一つと考え、ライフスパンの短い実験動物を用いて遺伝の面から検討を試みることにした。すなわち、ラットを用いて選択交配法を適用し、筋線維組成がどのくらい親から子へ受け継がれているのか、縦断的に検討することを目的とした。また、筋線維組成の変化が筋の酵素活性にどのような影響を及ぼすのかについても検討を行った。

## II. 実験方法

### 1. 実験用動物

本研究では、祖父母世代として異なる3系統(Wistar-Imamichi, Donryu, Fischer 344)のラットをランダム交配して作成した基礎集団(雄48匹, 雌46匹, 計94匹)、およびその基礎集団からType I線維の占める割合の高いものを交配し、世代を重ねた結果得られた第1世代～第7世代(雄285

匹, 雌269匹, 計554匹)のラットを用いた(以下第n世代をG<sub>n</sub>とする)\*<sup>1)</sup>。また、G<sub>7</sub>に対するコントロール群(以下CON群)として3系統(Wistar-Imamichi雄雌8匹ずつ計16匹, Donryu雄雌7匹ずつ計14匹, Fischer 344, 雄雌7匹ずつ計14匹)のラット計44匹を購入し、実験に用いた\*<sup>2)</sup>。

### 2. 飼育方法

飼育は12時間の明暗サイクルの照明下、温度22±2℃、湿度60±5%に常時維持された飼育室において、オガクズを敷いたプラスチックのケージ(夏目製作所製、ポリカーボネイトラットケージKN-602, 38cm×32cm×18cm)で行った。水と飼料(オリエンタル酵母工業製、実験用動物標準固形飼料MF)を与え、自由摂取とした。また、発育状態を知る上で毎週一定曜日の一定時間に体重を測定した。

### 3. 選択交配

G<sub>n</sub>の実験プロトコルをFig. 1に示した。G<sub>n</sub>のラットは誕生後、授乳期間として3週間母親ラットと同一ケージで飼われた。3週齢時に母親ラットから分離し、同時に雌雄別にした。9週齢時に筋を摘出し、組織化学的染色を施し、筋線維組成を算出した。得られた結果から、10週齢時にType I線維の割合(Percent of type I fibers: 以下%Type I線維)の高い順にG<sub>5</sub>までは雄5匹, 雌10匹, G<sub>6</sub>以降は雄6匹, 雌12匹を選択した。これらを雄ラット1匹に対し、雌ラットを2匹ずつ、すなわち1対2に兄妹交配を避けて組合せ、11週齢時に交配させた。ラットの妊娠期間は約3週間であるので、3週間に達する2～3日前に雌雄別のケージに分離した。以上のように、各世代において組織化学的分析によって得られた%Type I線維の高いものを順次、次世代の親となる個体として選択した。また、基本的に一世代の個体数を雄50匹, 雌50匹, 計100匹とするが、出産率、産仔数の減少により、生まれてきた仔ラットの数とその世代で計100匹に満たない場合、すべてのラットをその世代の集団とした。

### 4. 分析方法

ラットが9週齢時に達した後、ネンプタール麻酔下にて、下腿背部をメスで切開し、腓腹筋(M.

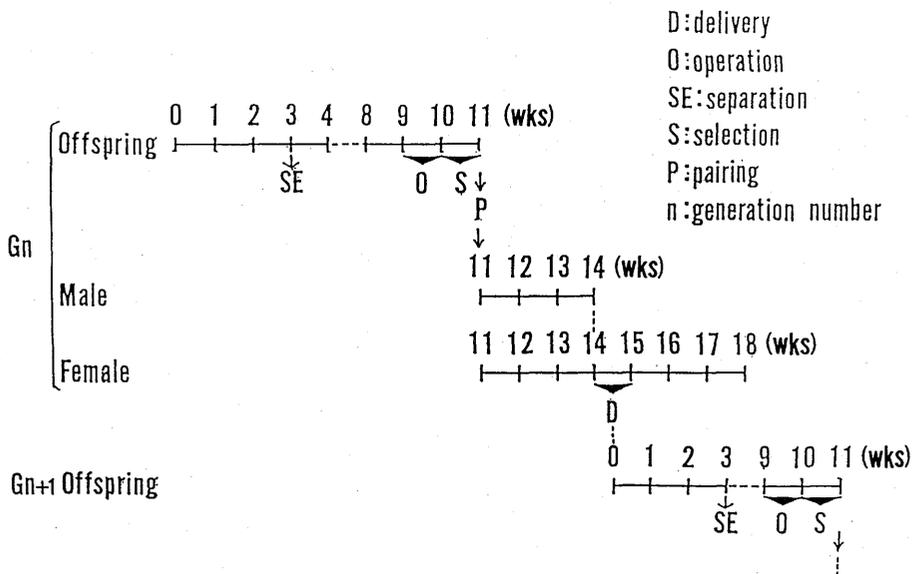


Fig. 1 Experimental protocol

gastrocnemius) (Fig. 2) を摘出した。G<sub>0</sub>～G<sub>6</sub>では右脚で組織化学的分析のみを行い、G<sub>7</sub>及びCON群では両下肢を摘出し、右脚の筋で生化学的分析を、左脚の筋で組織化学的分析を行った。

1) 組織化学的分析方法

摘出した筋の筋腹部付近を数mmの厚さに横断方向に切断し、筋をOCT-compound (Ames社製)で包埋し、液体窒素中で冷やしたイソペンタンによって急速冷凍した。その後クリオスタット (英国ブライト社製: FS-FCS型) を用い、筋腹部を約10μmに横断薄切し、切片を作成した。G<sub>0</sub>～G<sub>6</sub>では、得られた切片にmyosin ATPase 染色 (pH 10.3)<sup>5)</sup>を施し、Type I, II線維に分類し、G<sub>7</sub>, CON群では連続切片を作成し、myosin ATPase 染色 (pH 10.3, 4.6)<sup>5)</sup>を施し、各筋線維をType I, IIa, IIb線維に分類し、筋線維構成比を算出した。

2) 生化学的分析方法

摘出した筋の筋腹付近を横断方向に切断し、赤色部分を数mg摘出し、カプセルに入れ液体窒素中で瞬間冷凍した。コハク酸脱水素酵素活性値 (Succinate dehydrogenase activities: 以下SDH活性)の測定は、Lowry and Passonneau<sup>(20)</sup>によって確立された蛍光法を基礎としたSembrowich et al.<sup>(24)</sup>の方法によって測定した。まず、骨格筋が、1:100になるように0.05%

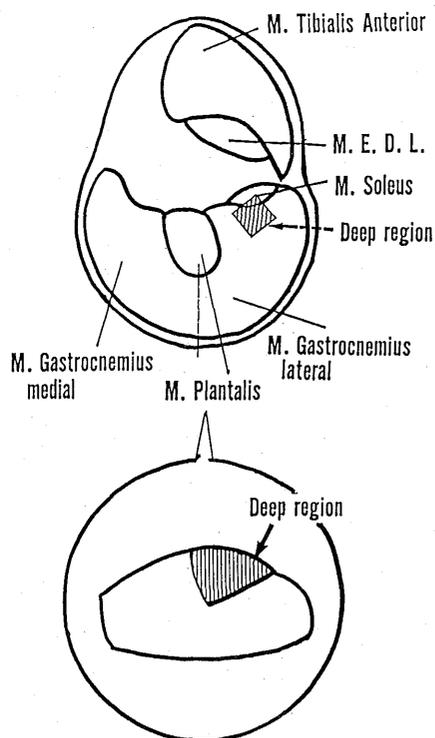


Fig. 2 Inspected parts of the cross section of m. gastrocnemius

Bovine Serum Albumin (BSA) を含む 0.17 M Phosphate Buffer (pH 7.5) を加え、ガラス製の Potter-Elvehjem Homogenizer を使用してホモジナイズした。次に SDH 活性を 2 ステップ反応によって測定した。最初のステップとして、100  $\mu$ l の筋肉 Homogenate を Phosphate-BSA Buffer の中に 600 mM Sodium Succinate と 8 mM の Potassium Ferricyanide を溶かした 100  $\mu$ l の Medium の中で 37°C で 5 分間の Incubation をした。氷で冷やされた 100  $\mu$ l の 3 M Perchloric Acid (PCA) を加えてこの反応を停止し、その後 100  $\mu$ l の 3 M KOH で中和して遠心した。20  $\mu$ l の Perchlorate を含まない上澄液は 0.1 M Hydrazine と 0.36 mM NAD を含む 1.0 ml の反応液 (pH 9.2) の中に加えた。反応開始前の蛍光を測定した後に、5  $\mu$ l/ml Fumarase (SIGMA Chemical Company 製) と 5  $\mu$ l/ml Malate Dehydrogenase (オリエンタル酵母工業製) を含む Enzyme Mixture を加えて反応を開始した。また Tissue Blank も測定し、2 時間後の反応終了時点で再度 NADH の増加によって出来た蛍光を SHIMAZU 蛍光光度計 RF-540 によって Excitation 340 nm / Emission 460 nm の波長で測定した。

### 5. 実現の遺伝率

Fig. 3 に二世代間の実現の遺伝率 ( $h^2$ ) の算出方法を示した。実現の遺伝率は選択交配による世代間の母集団平均値の差 (選択反応: Response to selection: 以下 R) を選択集団とその母集団との平均値の差 (選択差: Selection differential: 以下 S) で除することによって求められる。また、最初の 10 世代くらいの間遺伝率はほぼ一定であり<sup>7)</sup> 遺伝率を定数と見なすことができる。その場合、横軸に累積選択差を、縦軸に問題にしている形質の世代間の母集団平均値の差をとる。実現の遺伝率は、親の表現型のばらつきがどの程度子に伝わるかを示すものである。

### 6. 統計処理

各測定項目において得られた値は平均  $\pm$  標準偏差で示した。ラットの体重、各筋線維については一元配置分散分析を用い各世代の比較を行った。なお有意水準は 5% 及び 1% とした。

## III. 実験結果

### 1. 産仔数及び出産率

G<sub>0</sub> ~ G<sub>6</sub> の産仔数は、雄について 5.9  $\pm$  1.7 匹, 5.0  $\pm$  2.0 匹, 7.1  $\pm$  2.4 匹, 4.6  $\pm$  1.4 匹, 3.1  $\pm$  0.9 匹, 2.4  $\pm$  2.1 匹, 6.0  $\pm$  2.9 匹, 雌について 6.9  $\pm$  2.6 匹, 5.6  $\pm$  1.8 匹, 4.4  $\pm$  2.1 匹, 5.6  $\pm$  2.4 匹, 4.9  $\pm$  2.7 匹, 3.8  $\pm$  2.4 匹, 4.4  $\pm$  1.7 匹であった。出産率は順に、100.0%, 70.0%, 80.0%, 80.0%, 80.0%, 50.0%, 58.3% であった (Table 1)。

### 2. 体重

Fig. 4, 5 にそれぞれ雄, 雌の G<sub>0</sub> から G<sub>7</sub> までの 3, 5, 7, 9 週齢時の体重を示した。

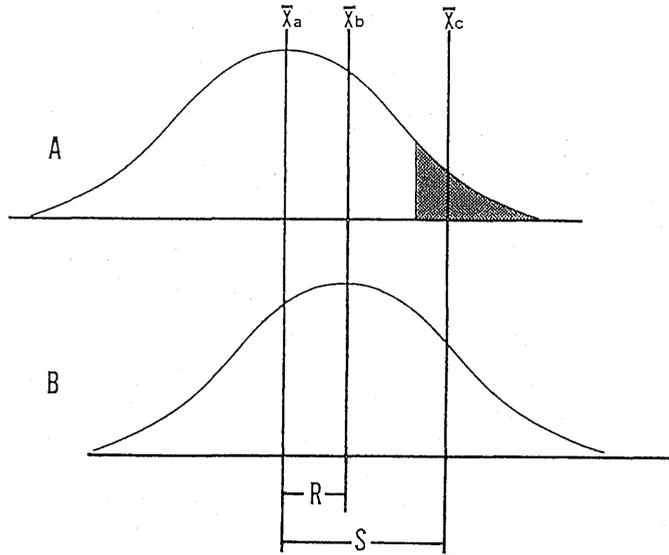
9 週齢時の体重において統計処理を行うと、雄では G<sub>0</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>6</sub>, G<sub>7</sub> に, G<sub>1</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>6</sub>, G<sub>7</sub> に, G<sub>2</sub> と G<sub>7</sub>, G<sub>3</sub> と G<sub>7</sub>, G<sub>4</sub> と G<sub>7</sub>, G<sub>6</sub> と G<sub>7</sub> に ( $p < 0.01$ ), 雌では G<sub>0</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>7</sub> に, G<sub>1</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>7</sub> に, G<sub>2</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>7</sub> に, G<sub>3</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>7</sub> に, G<sub>4</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>7</sub> に, G<sub>6</sub> と G<sub>5</sub>, G<sub>7</sub> に ( $p < 0.05 \sim 0.01$ ), 体重間の有意差が認められ、その他の世代間には有意差は認められなかった。

### 3. 筋線維組成

Fig. 6 に G<sub>0</sub> から G<sub>7</sub> の %Type I 線維の分布状態を示した。各世代の分布状態では、G<sub>2</sub> 以後、%Type I 線維の低い個体が減少し、%Type I 線維の高い個体が増加する傾向にあった。特に G<sub>7</sub> では、50% 以下の個体がみられなかった。G<sub>0</sub> ~ G<sub>7</sub> の各世代の %Type I 線維の平均値はそれぞれ 50.4  $\pm$  5.9%, 49.9  $\pm$  6.9%, 51.5  $\pm$  4.7%, 54.0  $\pm$  7.7%, 55.5  $\pm$  6.7%, 54.9  $\pm$  6.7%, 59.8  $\pm$  8.8%, 60.5  $\pm$  5.6% であった。また、G<sub>7</sub> と CON 群の %Type I 線維, IIa 線維, IIb 線維はそれぞれ 60.5  $\pm$  5.6%, 17.2  $\pm$  6.2%, 22.5  $\pm$  6.4%, CON 群で 53.9  $\pm$  5.2%, 20.6  $\pm$  5.3%, 25.0  $\pm$  6.9% であった。

世代間では、G<sub>3</sub> と G<sub>2</sub> に ( $p < 0.05$ ), G<sub>3</sub> と G<sub>0</sub>, G<sub>1</sub> に, G<sub>4</sub> と G<sub>0</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> に, G<sub>5</sub> と G<sub>0</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> に, G<sub>6</sub> と G<sub>0</sub> ~ G<sub>5</sub> に, G<sub>7</sub> と G<sub>0</sub> ~ G<sub>5</sub> および CON 群との間に、有意差が認められた ( $p < 0.01$ ) その他の世代間には有意差は認められなかった。また、G<sub>7</sub> と CON 群との間の %Type IIa 線維, IIb 線維においても有意差は認められなかった。

各世代の %Type I 線維の最大値は、G<sub>0</sub> ~ G<sub>7</sub> でそれぞれ 65.8%, 68.3%, 61.3%, 72.9%, 70.6%, 76.1%, 73.8%, 78.4%, 最小値はそれぞれ 38.4%,



A: population before selection  
 B: population after selection  
 $\bar{x}_a$ : mean value of A  
 $\bar{x}_b$ : mean value of B  
 $\bar{x}_c$ : mean value of selected group  
 R: response to selection  
 S: selection differential  
 $h^2$ : realized heritability

Shaded Area:  
 selected group  

$$h^2 = \frac{R}{S}$$

Fig. 3 Explanation of realized heritability

Table 1 Biological fitness of the foundation population ( $G_0$ ) and the selected generations ( $G_1 \sim G_6$ )

Generation		$G_0$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$G_5$	$G_6$
Mean number of	♂	5.9	5.0	7.1	4.6	3.1	2.4	6.0
Pups per litter	♀	6.9	5.6	4.4	5.6	4.8	3.8	4.4
% Females mated giving birth		100.0	70.0	80.0	80.0	80.0	50.0	58.3

36.6%, 39.2%, 39.6%, 40.6%, 43.6%, 40.9%, 50.0%であった。

#### 4. 筋酵素活性

$G_7$ およびCON群のSDH活性はそれぞれ $6.04 \pm 1.95$ ,  $5.46 \pm 1.70$  ( $\mu\text{moles/g/min}$ )であり、両群の間に有意差はなかった。

#### 5. 筋線維組成と筋酵素活性との関係

Table 2は、SDH活性と%Type I線維、%Type IIa線維、%Type I線維 + %Type IIa線維との間の相関係数を示したものである。いずれにおいても有意な相関は認められなかった。

#### 6. 選択集団

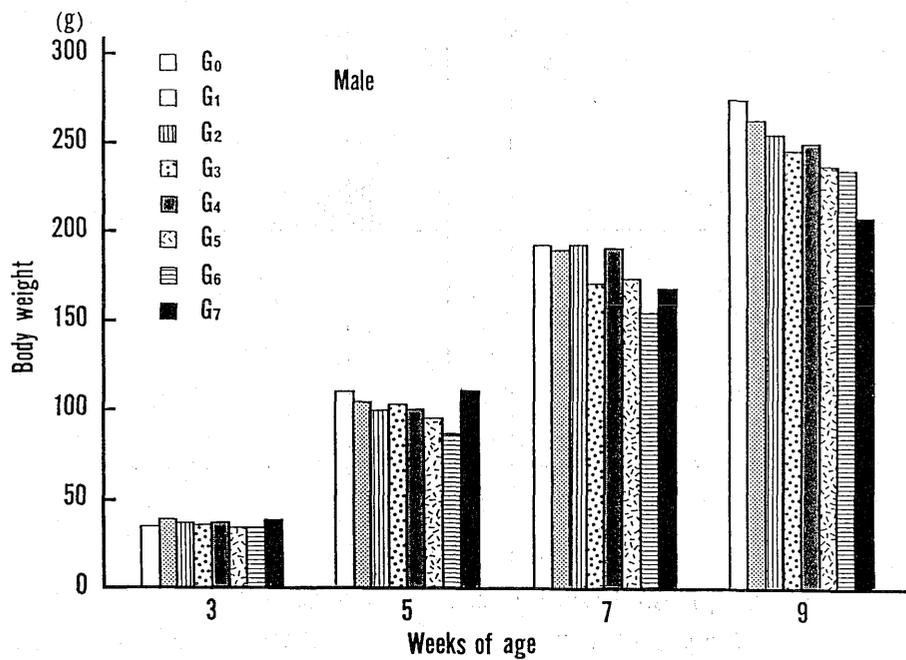


Fig. 4 Body weight increase in developing male rats of the foundation population (G<sub>0</sub>) and the selected generations (G<sub>1</sub>~G<sub>7</sub>)

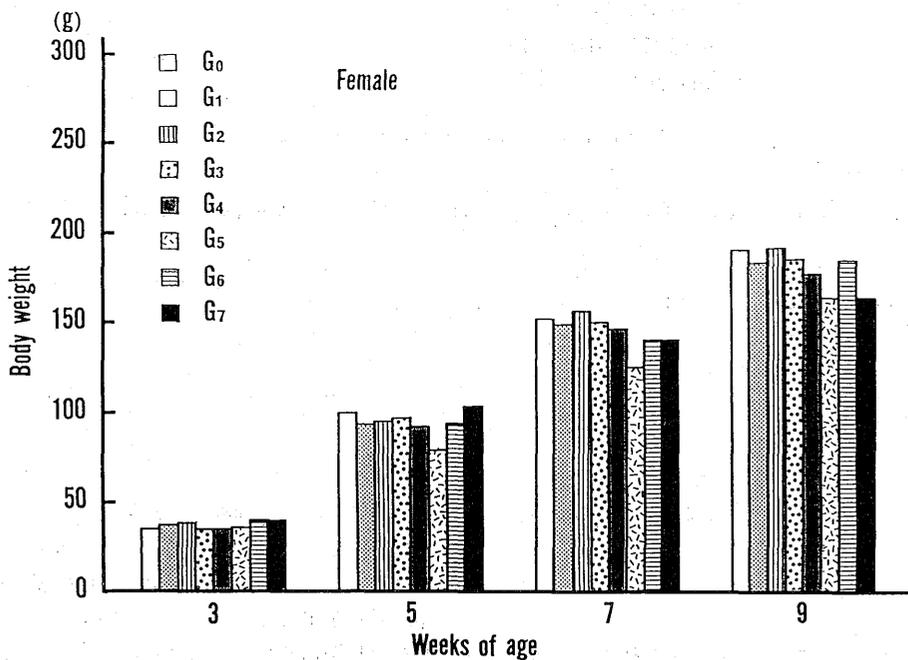


Fig. 5 Body weight increase in developing female rats of the foundation population (G<sub>0</sub>) and the selected generations (G<sub>1</sub>~G<sub>7</sub>)

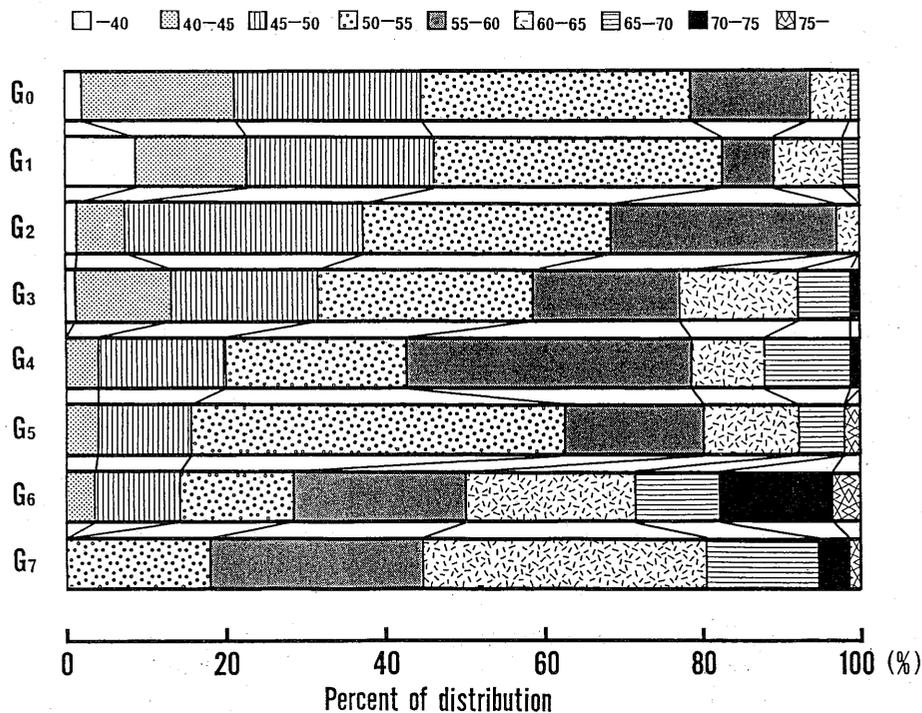


Fig. 6 Changes of distribution of %Type I fibers by successive selection

Table 2 Correlation coefficients between succinate dehydrogenase (SDH) activities and muscle fiber composition

Seventh generation			
	%Type I	%Type II a	%Type I + %Type II a
SDH activities	0.067	0.048	0.081
Control group			
	%Type I	%Type II a	%Type I + %Type II a
SDH activities	0.300	-0.116	0.113

各世代 ( $G_0 \sim G_7$ ) ごとの選択集団の個体数, %Type I 線維の平均値, 選択差, 累積選択差を Table 3 に示した。各世代の選択集団の %Type I 線維の平均値は,  $59.0 \pm 3.3\%$ ,  $60.9 \pm 4.8\%$ ,  $57.3 \pm 2.1\%$ ,  $62.1 \pm 6.0\%$ ,  $65.1 \pm 2.9\%$ ,  $63.0 \pm 7.2\%$ ,  $64.5 \pm 8.0\%$ ,  $62.0 \pm 5.5\%$ であった。

### 7. 実現の遺伝率

Fig. 7 に,  $G_0 \sim G_7$  までの %Type I 線維の実現の遺伝率を示した。 $G_0 \sim G_7$  までの実現の遺伝率は

は 0.20 であった。

### IV. 考 察

本研究の目的は選択交配法により, 集団の %Type I 線維の平均値がどれだけ移行しているか, また, 数世代にわたる選択の結果生じた %Type I 線維の移行がラットの酵素活性に影響を及ぼすかどうか, を検討するものである。

本研究は, 選択交配法を用いて %Type I 線維の移行を観察した。選択交配により世代を重ねて

Table 3 Numbers of rats, mean value of %Type I, selection differential and cumulative selection differential of the foundation population (G<sub>0</sub>) and the selected generations (G<sub>1</sub>~G<sub>7</sub>)

Generation	G <sub>0</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>	G <sub>5</sub>	G <sub>6</sub>	G <sub>7</sub>
Total Rats								
Numbers	94	92	67	75	75	51	28	72
Mean %Type I (%)	50.4	49.9	51.5	54.0	55.5	54.9	59.8	60.5
Selected Rats (Parent)								
Numbers	15	11	13	13	13	8	11	6
Mean %Type I (%)	59.0	60.9	57.3	62.1	65.1	63.0	64.5	64.4
Selection Differential (%)	8.6	11.0	5.8	9.6	8.1	4.7	3.9	2.3
Cumulative Selection Differential (%)	0.0	8.6	19.6	25.4	35.0	43.1	47.8	51.7

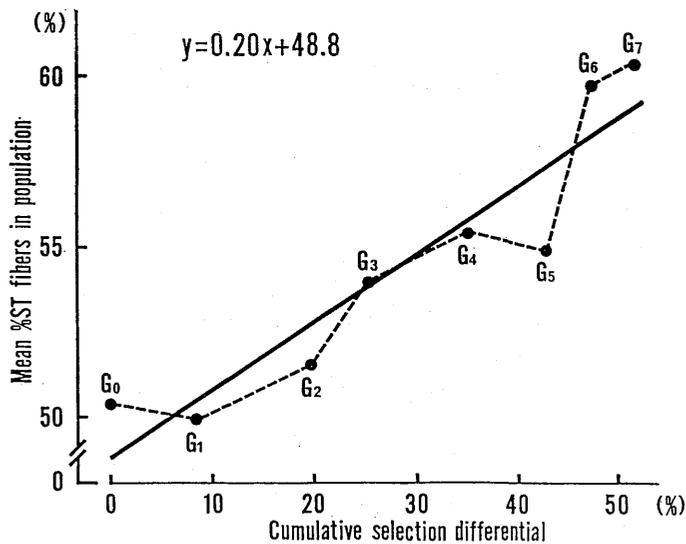


Fig. 7 Realized heritability

いくと、産仔数、出産率の低下がみられるという報告がある<sup>(11)</sup>。選択交配を進めていくと、選択反応がもはや起こらなくなる表現型の限界点、すなわちプラトーに達する。また、世代が重なるにつれ、兄妹交配を避けても遺伝的に近交化が進み、致死遺伝子などの有害遺伝子の累積効果により、必ずしも %Type I 線維の高いラットが選択されているとは限らない場合もある。したがって、今

後、選択交配を進めるにあたり、筋線維組成などの遺伝効果のより明確なデータを得るために生物学的適応を観察していかねばならない。そこで筋線維組成についての考察を行う前に本研究で得られたそれらのデータを検討することにする。

産仔数を見ると、世代間でばらつきがあるものの、本研究の G<sub>4</sub>~G<sub>6</sub> ではほぼ 3~4 匹であり、これは、先行研究<sup>(11)</sup> の 4~7 匹よりやや低い値

であった。ここでの産仔数は離乳時のデータによるものなので、出産直後の母親による仔の食殺や流産などは考慮されず、間接的指標であると考えられる。加藤<sup>(11)</sup>は選択交配により、20世代目で産仔数が3～4匹に減少したと報告しており、これと本研究の結果を照らし合わせると、本研究ではかなり早く近交化が進んでいると思われる。

出産率ではG<sub>4</sub>～G<sub>6</sub>でそれぞれ80.0%、50.0%、58.3%と選択交配の当初G<sub>0</sub>～G<sub>2</sub>(80.0%～100.0%)より、かなり低下し、ラットの繁殖能力の低下傾向が観察された。ここでの出産率も、産仔数同様離乳時のデータによるものなので、出産直後の母親による仔の食殺や流産は考慮されず、断定は出来ないものの、先行研究<sup>(11)</sup>同様、低下傾向にあるといえよう。

このように選択交配を進めてきた結果、兄妹交配を避けているにもかかわらず、全体的傾向として産仔数・出産率が低下した。したがって今後、各世代の総個体数を確保するために、親ラットの増加を図るなどの配慮が必要になると思われる。

筋線維組成は通常のトレーニングによって%Type I—%Type II線維間には移行はなく、%Type I・%Type II線維は遺伝的に固定されているものと考えられている。本研究では、選択交配を行った結果、集団の%Type I線維の平均値に変化が生じた。G<sub>6</sub>、G<sub>7</sub>の%Type I線維の平均値は、それぞれ59.8%、60.5%であり、特にG<sub>6</sub>、G<sub>7</sub>は、G<sub>0</sub>～G<sub>5</sub>に対し有意に高い値であった(p<0.01)。また、G<sub>7</sub>では50%以下のものがなく、さらに78.4%という最高値をも示し、%Type I線維は、低いものが減少し、高いものが増加するといった傾向が明らかに観察された(Fig. 6)。

Kugelbergは姿勢保持など緊張性収縮を課せられるヒラメ筋では、他の筋肉に比べ週齢を追うごとに、%Type I線維が相対的に増加することをラットで報告している<sup>(18)</sup>。本実験の被検筋である腓腹筋深層部もヒラメ筋同様、抗重力の役割を果たしているが、ラットの腓腹筋深層部の線維タイプ移行は生後4週齢で終了するという報告がなされていること<sup>(10)</sup>、また、世代を追うごとに同一週齢時の体重の増加傾向は観察されないことから、選択交配の結果生じた%Type I線維の移行に関して体重の影響は無視できると思われる。さらに、産仔数の少ないケージのラットは他のケージと比較して体重が大きい傾向を示したが、産仔

数の少ないケージのラットの%Type I線維が特に高いという傾向もみられなかった。

本研究では、G<sub>0</sub>～G<sub>7</sub>の%Type I線維から得られた実現の遺伝率は0.20であった。つまり、親の筋線維組成のばらつきの20%が子の筋線維組成のばらつきに影響を及ぼしていると考えられる。しかしながら、ある形質の遺伝率は特定の範囲の環境における特定の時間での特定の集団のみ当てはまる値<sup>(7)</sup>であるので、遺伝率0.20は本実験において適用されるものであって、環境が変われば同様の値が得られるか疑問であり、この結果は一つの目安として理解すべきであると思われる。

本研究で示された遺伝率0.20に対して、二つの解釈が出来ると思われる。一つは遺伝率0.20はこれまで報告されているKomi et al.<sup>(16)</sup>の0.97よりかなり低いことである。しかしながら、Komi et al.の遺伝率は双生児を用いた横断的研究により得られ、ある形質の遺伝的要因の重要性を示すものであるのに対し、本研究で得られた遺伝率は縦断的研究により、親から子へ伝えられる程度を示すものである。従ってこの2つを比較するには、まず、その概念上の相違に留意することが特に必要であると思われる。二つめは、これまでの選択交配では、遺伝的浮動などにより必ずしも高い%Type I線維を有するもの同士の交配ではなかった可能性がある。また、本来ラットの筋線維組成は、雑種であるヒトの筋線維組成に比べ、ばらつきが小さいため移行が小さく、低い遺伝率を示した可能性もあるということである。

これまでに、狭義の遺伝率に関する報告はあまりなされていないが、親子の間で得られる相関の観察値の2倍が、狭義の遺伝率の目安となることが示唆されている<sup>(7)</sup>。そこで、Montoye and Gayle<sup>(21)</sup>の研究で得られた $\dot{V}O_2\max$ の親子の相関(r=0.37)より、 $\dot{V}O_2\max$ の遺伝率として0.74が推定できる。これと対比しても本研究における遺伝率は比較的低いと考えられる。

近年になり、Komi et al.<sup>(16)</sup>の報告は過大評価であるという意見<sup>(25)</sup>をはじめ、筋線維組成の遺伝的影響はあまりないのではないかという知見<sup>(2)</sup>が支持されるようになってきた。しかしながら本研究では、選択交配によりG<sub>0</sub>からG<sub>7</sub>で50%から60%へ%Type I線維の平均値が移行した。すなわち、筋線維組成には遺伝的影響が関与し、また、表現型に基づいた選択交配が実際、遺伝子型において

も同様の選択を行っていることの証拠となる。

従来、%Type I線維と酸化系酵素のSDH活性は高い相関があると報告されている<sup>(23)</sup>。そこで本研究では、選択交配により、%Type I線維が移行した結果、トレーニング・食事などの影響が強い代謝系酵素にも変化が生じているのではないかという仮定のもとに検討を行った。

しかしながら、統計的には有意差はなく、相関も得られなかった (Table 2)。これは、同様の環境で育てたラットを用いていることより、代謝系酵素は環境による影響が大きいという従来の報告<sup>(2,6,9,15,19)</sup>と同様の結果が得られたと考えられる。

この解釈にはいくつかの留意が必要である。まず、選択交配で確かに%Type I線維は移行しているが、値としては $G_0 \sim G_7$ へ10%の増加、 $G_7$ とCON群では7%の差にとどまっているのに加え、%Type I線維のばらつきが小さかったため、それに伴い酵素活性に差が生じなかった可能性が考えられる。また、腓腹筋深層部のSO・FOG線維<sup>\*3)</sup>の割合が高く、もともと酵素活性値が高いため、ある値以上の活性値が得られず差が生じなかったのかもしれない。ラットの各筋線維タイプの酸化能力はFOG線維が最も高く、それがSDH活性に影響を及ぼしていることも考えられる。

要約として本研究では選択交配法により、縦断的に%Type I線維の移行を観察し遺伝率を算出した。また、%Type I線維の変化に伴う酵素活性を比較検討した。その結果、%Type I線維の遺伝率は0.20であり、遺伝的影響がみられ、酵素活性においては従来の報告同様、環境要因の影響が大きいと思われる。しかしそれらの解釈には十分留意が必要であり、今後さらに研究を進め、より確かな結論を導く必要があると思われる。

## V. 総 括

本研究はラットを用いた選択交配法による縦断的研究により筋線維組成のばらつきがどのくらい親から子へ受け継がれているか、また、その変化が筋線維の酵素活性にどのような影響を及ぼすのかを検討することを目的とした。

本実験は、異種のラットをランダム交配させ得られた基礎集団から%Type I線維の割合(%Type I線維)の高いものを選択交配し世代を重ねた。本研究は第7世代までを検討した。結果は以下の

通りである。

- 1) 生物学的適応の指標である産仔数、出産率に変化がみられ、遺伝的に近交化が進んでいることが示唆された。
- 2) 選択交配により%Type I線維の移行が認められた。また、分布状態として%Type I線維の低いものが減少、高いものが増加していることが観察された。
- 3) %Type I線維の実現の遺伝率として、0.20の値を得た。
- 4) 筋線維組成と筋の酵素活性との間には有意な相関はなかった。

このように、選択交配により%Type I線維には移行が認められ、その結果、遺伝率0.20を得た。これは親の筋線維組成のばらつきの20%が子の筋線維組成に影響を与えることを意味する。また、選択交配により%Type I線維は移行しているが、SDH活性には変化がみられなかった。このような結果は、代謝系酵素活性は環境による影響が大きいことを意味していると思われる。

## 注

- \* 1)  $G_0 \sim G_5$ では雄、雌それぞれについて高いものから順に5匹、10匹を、 $G_6 \sim G_7$ では6匹、12匹を選択した。
- \* 2) 選択交配開始当初、選択交配による筋線維組成の変化を検討することのみを目的にしていたので $G_0$ において筋酵素活性の測定は行われなかった。さらに、実験開始当初、スペース上の問題から選択は一方向についてのみ行われ、また、CON群を用意していなかった。従って正確な意味でのCON群ではないが、基礎集団作成時に用いたWistar-Imamichi, Donryu, Fischer 344を比較対照とした。
- \* 3) 齧歯類では収縮特性に代謝特性を加味してSO線維 (Slow-twitch Oxidative fiber), FOG線維 (Fast-twitch Oxidative Glycolytic fiber), FG線維 (Fast-twitch Glycolytic fiber) の3タイプに分類する方法<sup>(22)</sup>が用いられることがある。

## 文 献

- 1) Bouchard C and G Lortie (1984) : Heredity and endurance performance. Sports Med 1 : 38-64.
- 2) Bouchard C and RM Malina (1983) : Genetics of physiological fitness and motor performance. Exercise Sports Sci Rev 11 : 306-339.

- 3) Bouchard C, JA Simoneau, G Lortie, MR Boulay, M Marcotte and MC Thibault (1986) : Genetic effects in human skeletal muscle fiber type distribution and enzyme activities. *Can J Physiol Pharmacol* 64 : 1245-1251.
- 4) Cowart VS (1987) : How does heredity affect athletic performance? *Phys Sportsmed* 15 : 134-140.
- 5) Gollnick PD, D Parsons and CR Oakley (1983) : Differentiation of fiber types in skeletal muscle from the sequential inactivation of myofibrillar actomyosin ATPase during acid preincubation. *Histochemistry* 77 : 543-555.
- 6) Hamel P, J-A Simoneau, G Lortie, MR Boulay and C Bouchard (1986) : Heredity and muscle adaptation to endurance training. *Med Sci Sports Exerc* 18 : 690-696.
- 7) Hartl DL (1987) : 集団遺伝学入門, 向井輝美, 石和貞夫 (共訳), 培風館, 東京, pp. 128-179.
- 8) Holmér I and P-O Åstrand (1972) : Swimming training and maximal oxygen uptake. *J Appl Physiol* 33 : 510-513.
- 9) Howard H (1976) : Ultrastructure and biochemical function of skeletal muscle in twins. *Ann Hum Biol* 3 : 455-462.
- 10) 石原 昭彦, 勝田 茂, 藤田紀盛 (1984) : 発育に伴うラット神経, 筋線維の組織化学的特性の変化について, *体育学研究*, 29 : 125-133.
- 11) 加藤 宏 (1987) : ランウェイテストを指標としたラットの情動反応性の選択反応 : 3. 生物学的適応, *筑波大学心理学研究*, 9 : 57-65.
- 12) Klissouras V (1971) : Heritability of adaptive variation. *J Appl Physiol* 31 : 338-344.
- 13) Klissouras V (1972) : Genetic limit of functional adaptability. *Int Z Angew Physiol* 30 : 85-94.
- 14) Klissouras V, F Pirnay and J-M-Petit (1973) : Adaptation to maximal effort : genetics and age. *J Appl Physiol* 35 : 288-293.
- 15) Komi PV and J Karlsson (1979) : Physical performance, skeletal muscle enzyme activities, and fibre types in monozygous and dizygous twins of both sexes. *Acta Physiol Scand* [Suppl] 462 : 1-28.
- 16) Komi PV, JT Viitasalo, M Havu, A Thorstensson, B Sjodin and J Karlsson (1977) : Skeletal muscle fibres and muscle enzyme activities in monozygous and dizygous twins of both sexes. *Acta Physiol Scand* 100 : 385-392.
- 17) Komi PV, JT Viitasalo, M Havu, A Thorstensson and J Karlsson (1976) : Physiological and structural performance capacity : effect of heredity. *Biomechanics* 2 : 118-123.
- 18) Kugelberg E (1976) : Adaptive transformation of rat soleus motor units during growth. *J Neurol Sci* 27 : 269-289.
- 19) Lortie G, J-A Simoneau, MR Boulay and C Bouchard (1986) : Muscle fiber type composition and enzyme activities in brothers and monozygotic twins. (Eds) Malina RM and C Bouchard (In) *Sport and Human Genetics*. Human Kinetics Pub, Champaign, IL. pp. 147-154.
- 20) Lowry OH and JV Passonneau (1972) : A flexible system of enzymatic analysis. : Academic press, New York. pp. 8-20
- 21) Montoye HJ and R Gayle (1978) : Familial relationships in maximal oxygen uptake. *Human Biology* 50 : 241-249.
- 22) Peter JB, RJ Barnard, VR Edgerton, CA Gillespie and KE Stempel (1972) : Metabolic profiles of three fiber types of skeletal muscle in guinea pigs and rabbits. *Biochemistry* 11 : 2627-2633.
- 23) Saltin B and PD Gollnick (1983) : Skeletal muscle adaptability : significance for metabolism and performance. (Eds) LD Peachy. RH Adian and SR Gieggar. (In) *Handbook of Physiology*. Sect. 10. Skeletal muscle. American Physiology Society, Bethesda, Md, 555-631.
- 24) Sembrowich WL, MB Knudson and PD Gollnick (1977) : Muscle metabolism and cardiac function of the myopathic hamster following training. *J Appl Physiol* 43 : 936-941.
- 25) Simoneau JA, G Lortie, MR Boulay (1985) : Human skeletal muscle fiber type alteration with high-intensity intermittent training. *Eur J Appl Physiol* 54 : 250-253.
- 26) Simoneau JA, G Lortie, MR Boulay, M Marcotte, M-C Thibault and C Bouchard (1986) : Inheritance of human skeletal muscle and anaerobic capacity adaptation to high-intensity intermittent training. *Int J Sports Med* 7 : 167-171.