— 原 著 —

成長期, 成熟期の自発走運動が正常食, 鉄欠乏食 ラットの鉄代謝および体組成に及ぼす影響*

高松 薫

日本医科大学第2生化学教室 (主任: 吉野芳夫教授)

Effects of voluntary running exercise during growing and post-growing
periods on iron metabolism and body composition of the rats fed
on normal and iron deficient diets

Kaoru Takamatsu

The Second Department of Biochemistry (Chief: Prof. Yoshio Yoshino), Nippon Medical School

The purpose of this study was to investigate the effects of voluntary running exercise on iron metabolism and body composition of rats through two batches of experiments. In experiment 1, 92 male and female wistar rats after weanling were fed on normal diet for 10 weeks or 20 weeks. Ten-week rats were divided into two groups and 20-week rats were into four groups depending on the exercise condition, i.e. non-exercise or exercise. In experiment 2, 37 male wistar rats after weanling were fed on three kinds of diets containing different iron levels for 10 weeks. And the rats of each dietary group were further divided into two groups depending on the exercise condition. Voluntary running exercise was performed by rotating wheel.

The results were summarized as follows:

1) In the rats maintained on normal diet, hemoglobin concentration (Hb), hematocrit value (Ht), red blood cell counts (RBC), serum iron concentration (SI), transferrin saturation, free erythrocyte porphyrin concentration (FEP) and liver ferritin content were not affected by the exercises during growing period and/or post-growing period (Experiment 1).

2) In the rats maintained on iron deficient diet, Hb, Ht, RBC, SI, transferrin saturation and liver ferritin content were affected by the dietary iron levels. But they were not affected by the exercise during growing period (Experiment 2).

3) The exercises decreased the rate of body weight gain and increased the weights per body weight of heart and m. soleus whether the rats were maintained on normal or iron deficient diet. This was caused by the decrease of the rate of adipose tissue weight gain (Experiment 1 and 2).

These results suggest that voluntary running exercise may not be a direct factor on the cause of iron deficiency anemia or latent iron deficiency, and that it may be an effective workout to prevent from obesity.

Key words: rat, iron metabolism, voluntary running exercise, normal diet, iron deficient diet

緒 言

生体内における鉄の主な機能は酸素の輸送、利用にある。このために、体内鉄は種々の運動のなかでも、特に有気的運動と密接な関係がある。体内鉄と運動に関するこれまでの研究は、体内鉄が有気的作業能力に及ぼす影響に関するものと、各種の運動が鉄代謝に及ぼす影響に関するものとに大別できる。

前者は、ヒトまたは動物の体内鉄の水準と有気的作業能力との関係¹⁻⁶⁾、および鉄剤投与⁷⁾、輸血⁸⁾、血液ドーピング⁹⁾、低酸素暴露¹⁰⁾、瀉血¹¹⁾、溶血剤投与¹²⁾、鉄欠乏食投与¹³⁾などによる、ヒトまたは動物の体内鉄の動態と有気的作業能力との関係などによって研究が行われている。しかし、体内鉄が有気的作業能力とこれを限定する諸要因に及ぼす影響について、一致した結論は得られていない。

一方、後者、すなわち運動が鉄代謝に及ぼす影響は、一過性の運動と数日から数年間にわたる継続的な運動によって研究が行われている。行軍性(運動性)血色素尿症¹⁴⁻¹⁷⁾、運動性ミオグロビン尿症¹⁸⁾などに関する研究は、一過性の運動の影響を見たものである。これに対して、スポーツ選手の体内鉄の実態¹⁹⁻²⁰⁾、およびヒトまたは動物に数日から数ヵ月間にわたって運動を課した場合の体内鉄の動態²¹⁻²³⁾などを解明しようとした研究は、継続的な運動の影響を見たものといえる。吉村ら^{21, 22)}の運動性貧血に関する研究は、継続的な運動による体内鉄の動態を検討した代表的なものである。しかし、運動が鉄代謝に及ぼす影響は、スポーツ選手で観察されている低ヘモグロビン濃度が、運動による合目的な適応現象であるという説²²⁾も含めて、一致した結論は得られていない。したがって、体内鉄と運動の相互作用は十分に解明されていない状況にある。この原因には年齢(週齢)、性、運動様式、運動の強度・量・頻度・実施期間および栄養状態などの条件が、研究者間で様でないことが考えられる。

本研究では、運動が鉄代謝に及ぼす影響を解明する一助を得ることを主な目的として、ラットの飼育実験を試みた。運動には自発走運動を用いた。ラットを対象にしたこれまでの研究では、自発走運動の実施週齢と期間を変えて、運動の影響を見たものはない。また、自発走運動と食餌鉄水準の両者の影響を見たものは少ない²⁴⁾。そこで本研究では、以下の課題について検討した。

(i) 成長期の自発走運動、成長期から成熟期にわ

たる自発走運動、および成長終了時期に開始または中止した自発走運動が、正常食雌雄ラットのヘム系および非ヘム系鉄代謝に及ぼす影響(実験 1)。

(ii) 成長期の自発走運動が鉄欠乏食雄ラットの各鉄代謝に及ぼす影響(実験 2)。

ヘム系鉄代謝の指標には、ヘモグロビン濃度(Hb)、ヘマトクリット値(Ht)、赤血球数(RBC)を用いた。非ヘム系鉄代謝の指標には、運搬途上鉄として血清鉄濃度(SI)を、貯蔵鉄としてトランスフェリン飽和率、赤血球遊離ポルフィリン濃度(FEP)、肝臓フェリチン量を用いた。

なお実験 1, 2 ともに、体重、脂肪組織重量、および体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量などの成績をもとにして、自発走運動が体組成に及ぼす影響についても検討した。

研究材料および方法

(1) 被検動物および飼育条件

1) 正常食による場合(実験 1)

被検動物には、生後 3 週齢のウィスター系雌雄ラット 92 匹を用いた。10 日間予備飼育した後に、雌雄ともに飼育期間の相違によって 10 週間飼育群と 20 週間飼育群に分けた。また、運動条件の相違によって、前者は非運動群(N)と運動群(E)の 2 群に、後者は 20 週間非運動群(NN)、20 週間運動群(EE)、後半 10 週間運動群(NE)、前半 10 週間運動群(EN)の 4 群に分けた。すべての群に予備飼育、実験飼育期間中を通して、カゼイン 24%, 鉄 180 ppm を含む実験動物用標準飼料(オリエンタル酵母工業社製, MF)を自由に摂取させた(Fig. 1, 2)。

2) 鉄欠乏食による場合(実験 2)

被検動物には、生後 3 週齢のウィスター系雄ラット 37 匹を用いた。実験動物用標準飼料で 2 週間予備飼育した後に、食餌鉄水準の相違によって、鉄を十分量添加した食餌群(S)、中等量添加した食餌群(M)、除鉄した食餌群(D)の 3 群に分け、さらに運動条件の相違によって、各群を非運動群(N)と運動群(E)の 2 群に分けた。いずれの群も 10 週間飼育した。D 群には、カゼイン 22% を含む除鉄飼料²⁵⁾(オリエンタル酵母工業社製)を、S 群と M 群には除鉄飼料にクエン酸鉄を各々 200, 75 ppm 添加した飼料を、いずれも自由に摂取させた(Fig. 3)。また、すべての群に脱イオン水を自由に摂取させた。

実験 1, 2 ともに、非運動群は狭小なケージで、ま

た運動群は円周 1 m の回転式運動装置を併設したケージで 1 匹ずつ飼育した。運動群には、上述のケージ内で自由に運動を行わせた。実験 1 では 1 週間に 1 日、実験 2 では 2 週間に 1 日、定期的に休息日を与えた。実験室の環境条件は、温度 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ であった。明暗は 12 時間ごと（明 8～20 時、暗 20～8 時）に切り替えた。

なお、本研究では生後 4～5 週齢から最長 20 週間飼育したので、その前半を成長期、後半を成熟期とみなした。

(2) 測定項目および測定法

飼育期間中、自発走運動量を毎日測定し、体重と Hb を 1～3 週間ごとに測定した。また、飼育終了時に Hb, Ht, RBC, SI, トランスフェリン飽和率, FEP などの血液成分値、および肝臓フェリチン量を測定した。

自発走運動量は、回転式自由運動装置の回転軸に取り付けたカウンターで測定した。飼育期間中の Hb の測定には、尾静脈より得た血液を用いた。また、飼育終了時の各血液成分値の測定には、エーテル麻酔下で腹部大動脈より得た血液を用いた。Hb はシアナメトヘモグロビン法、Ht は毛細管遠沈法、SI は国際血液学会推奨法⁴³⁾、総鉄結合能は中根らの方法⁴⁴⁾、FEP は Piomelli の方法⁴⁵⁾で、また RBC はコールターカウンターでそれぞれ測定した。肝臓フェリチン量は、抗ラット肝臓フェリチンウサギ抗血清を用いるロケット免

疫電気泳動法⁴⁷⁾で測定した。

なお、飼育終了時に腎臓周囲と副睾丸周囲の脂肪組織、心臓、ヒラメ筋を凍血致死後に摘出し、各々の湿重量を測定した。

(3) 統計処理

飼育終了時の各成績について、実験 1 では 2 元配置 [飼育期間 (10, 20 週間) × 運動条件 (非運動, 運動)], および 1 元配置 [運動条件 (20 週間非運動, 20 週間運動, 後半 10 週間運動, 前半 10 週間運動)] の各分散分析を雌雄別に行った。実験 2 では 2 元配置 [食餌鉄水準 (200, 75, 0 ppm) × 運動条件 (非運動, 運動)] の分散分析を行った。統計処理の有意性は危険率 5% 水準で判定した。

結 果

1. 成長期、成熟期の自発走運動が正常食雌雄ラットの鉄代謝および体組成に及ぼす影響(実験 1)

Table 1 に飼育期間中の総運動量を示した。また、Table 2, 3 に飼育終了時の各成績を示した。

(1) 成長期の自発走運動および成長期から成熟期にわたる自発走運動の影響

この項では、10 週間飼育群の 2 群 (N, E) と 20 週間飼育群の 2 群 (NN, EE) を対象にした。

Fig. 1 に走行距離、体重、Hb の経期的変化を示した。

Table 1 Voluntary running activity in each group fed on normal diet, Experiment 1

Group	n	Period of experiment days	Voluntary running activity		
			1st~10th wks km	11th~20th wks km	Total km
Male	N	8	71.6 (1.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	E	8	71.8 (1.5)	246.7 (145.9) a	246.7 (145.9) d
	NN	8	141.0 (2.7)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	EE	7	140.7 (2.8)	169.0 (91.8) ab	276.0 (178.8) d]
	NE	7	143.1 (1.7)	0.0 (0.0)	44.2 (54.9) e]
	EN	7	143.9 (1.7)	166.5 (178.4) a	0.0 (0.0)
Female	N	8	71.9 (1.5)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	E	8	72.0 (1.3)	601.4 (146.9) f	601.4 (146.9) i
	NN	8	141.0 (2.7)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	EE	8	141.0 (2.7)	459.3 (97.4) g	322.9 (76.3) h
	NE	8	143.8 (2.0)	0.0 (0.0)	264.0 (134.3) h
	EN	7	144.1 (1.8)	500.8 (119.9) fg	0.0 (0.0)

1. Exercise and dietary conditions of each group were shown in Figure 1 and 2.

2. Values were shown in mean (SD).

3. Student's t-test was performed to assess the significance of the differences between the means (*: $p < 0.05$). The values indicated by the same alphabetic notations (a: a~i: i) showed no significant difference.

Table 2 Body weight, and the weights of adipose tissue, heart and m. soleus on the sacrificed day of each group in Experiment 1

Group		Body weight g	Adipose tissue weight g	Heart weight mg/100 gBW	M. soleus weight mg/100 gBW
Male	N	495 (38)	26.3 (3.8)	262 (9)	29.8 (2.1)
	E	403 (25)	9.1 (2.3)	303 (26)	37.1 (3.0)
	NN	597 (22)	33.2 (5.5)	241 (15)	30.1 (2.9)
	EE	458 (37)	11.7 (3.3)	284 (26)	37.4 (6.1)
	NE	506 (29)	19.7 (4.6)	272 (13)	36.3 (3.8)
	EN	571 (53)	25.5 (5.5)	251 (4)	31.0 (1.5)
Female	N	308 (30)	21.0 (4.2)	301 (29)	37.4 (2.3)
	E	279 (17)	10.7 (1.7)	350 (20)	41.8 (1.9)
	NN	354 (29)	26.2 (6.5)	271 (20)	35.6 (4.7)
	EE	315 (19)	15.9 (3.8)	328 (24)	41.1 (4.1)
	NE	316 (17)	11.8 (2.4)	316 (9)	46.0 (5.1)
	EN	345 (16)	19.7 (3.2)	282 (14)	40.3 (5.1)

1. Exercise and dietary conditions of each group were shown in Figure 1 and 2.
2. The weights of adipose tissue, heart and m. soleus were listed in wet weight.
Adipose tissue weight was the total of perirenal and epididymal fat pads.
3. Values were shown in mean (SD).

走行距離は雌が雄よりも高値を示し、体重と Hb は雄が雌よりも高値を示した。しかし、飼育期間中におけるこれらの変化の過程には、顕著な性差は認められなかった。

20 週間運動群 (EE) の走行距離は、運動開始から

4~8 週目まで増加し、その後徐々に減少した。したがって、成長期の総運動量は成熟期よりも高値を示した。10 週間運動群 (E) の走行距離は、EE 群の 10 週目までの走行距離とほぼ同様に变化した。

20 週間非運動群 (NN) と EE 群の体重は、いずれも成長期には著しく増加し、成熟期には緩やかに増加した。しかし、EE 群の体重増加は NN 群よりも著しく抑制された。特に、運動量の多い成長期には著しく抑制された。10 週間非運動群 (N) と NN 群の体重曲線、および E 群と EE 群の体重曲線はいずれも 10 週目までは同様の傾向であった。

Hb は、非運動群 (N, NN) と運動群 (E, EE) との間に顕著な差は認められなかった。いずれの群も運動開始から 5~8 週目まで増加し、その後同一水準を保つか、若干低下した。飼育終了時の Hb は 14~16 g/dl の範囲内にあった。

Table 4 に飼育終了時の各成績について行った 2 元配置の分散分析の結果を示した。

体重、脂肪組織重量、および体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量には、雌雄ともに自発走運動の有意な主効果が認められた。体重と脂肪組織重量は N 群が E 群よりも、また NN 群が EE 群よりも有意に高値を示した。これに対して、体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量は E 群が N 群よりも、また EE 群が NN 群よりも有意に高値を示した。なお、心臓とヒラメ筋の絶対重量には自発走運動の有意な主効果は認

Table 3 Blood compositions and liver ferritin on the sacrificed day of each group in Experiment 1

Group		Hb g/dl	Ht %	RBC $\times 10^6/\mu\text{l}$	SI $\mu\text{g/dl}$	Transferrin saturation %	FEP $\mu\text{g/dl RBC}$	Liver ferritin mg/liver
Male	N	16.0 (0.5)	42.7 (1.8)	8.95 (0.25)	259 (30)	36.6 (3.4)	60.0 (7.0)	1.49 (0.24)
	E	16.0 (0.3)	41.6 (1.9)	8.31 (0.52)	313 (101)	41.2 (9.5)	66.6 (11.8)	1.62 (0.40)
	NN	15.8 (0.9)	44.0 (1.8)	9.25 (0.46)	185 (51)	36.3 (10.3)	65.2 (5.5)	2.23 (0.62)
	EE	16.4 (0.6)	44.9 (1.9)	9.26 (0.48)	206 (39)	37.2 (4.1)	50.8 (6.2)	2.21 (0.49)
	NE	15.9 (0.6)	44.9 (0.8)	9.32 (0.34)	218 (30)	32.6 (3.1)	64.3 (9.9)	2.59 (0.38)
	EN	15.2 (0.9)	43.7 (1.4)	9.24 (0.45)	193 (24)	32.5 (1.4)	77.6 (12.9)	2.10 (0.59)
Female	N	15.8 (0.3)	41.0 (1.4)	8.30 (0.28)	335 (54)	43.0 (5.2)	69.1 (7.7)	2.10 (0.67)
	E	15.5 (0.6)	40.3 (2.5)	8.05 (0.41)	339 (66)	42.2 (6.5)	71.7 (8.4)	2.81 (0.61)
	NN	14.8 (0.8)	41.1 (0.9)	8.22 (0.16)	273 (26)	43.8 (4.5)	56.7 (11.5)	3.16 (0.82)
	EE	14.5 (0.4)	40.5 (1.1)	8.06 (0.30)	259 (23)	43.9 (3.6)	51.6 (5.0)	2.99 (0.39)
	NE	14.5 (0.4)	40.7 (1.3)	7.97 (0.32)	306 (47)	42.5 (3.9)	73.0 (11.2)	3.12 (1.19)
	EN	14.4 (0.8)	40.3 (0.5)	8.06 (0.34)	298 (36)	46.2 (3.3)	75.9 (7.3)	3.42 (0.97)

1. Exercise and dietary conditions of each group were shown in Figure 1 and 2.
2. Values were shown in mean (SD).

Fig. 1 Changes in voluntary running activity, body weight and hemoglobin concentration of each group in Experiment 1; In the cases of two 10-week groups (N and E) and two 20-week groups (NN and EE)

1st~10th wks 11th~20th wks
 □ N non-exercise
 ■ E exercise
 ○ NN non-exercise non-exercise
 ● EE exercise exercise
 — casein-24%
 — Fe-180 ppm

められなかった。

鉄代謝に関する項目では、7項目中、雄のRBCのみに自発走運動の有意な主効果が認められた。雄のRBCはN群がE群よりも高値を示したが、NN群とEE群との間に有意差は認められなかった。しかし、4群のRBC ($8.31 \sim 9.26 \times 10^6/\mu\text{l}$) は正常域にあった。したがって、自発走運動は雄のRBCに影響を与えないものと推測された。なお、雄のFEPには飼育期間と自発走運動の有意な交互作用が認められた。こ

の原因の一つとして、N群とE群との間に有意差は認められなかったが、NN群がEE群よりも有意に高値であったことがあげられる。FEPは生体内に鉄が充足している状態では低値を示す。しかし、4群のFEP ($50.8 \sim 66.6 \mu\text{g/dl RBC}$) はいずれも正常域にあった。したがって、自発走運動は雄のFEPにも影響を与えないものと推測された。

飼育期間の有意な主効果は、測定した大部分の項目において認められた。

(2) 成長期から成熟期にわたる自発走運動、および成長終了時期に開始または中止した自発走運動の影響
 この項では、20週間飼育群の4群(NN, EE, NE, EN)を対象にした。

Fig. 2に走行距離、体重、Hbの経週的变化を示した。

Fig. 1と同様に走行距離、体重、Hbには性差が認められた。しかし、飼育期間中におけるこれらの変化の過程には顕著な性差は認められなかった。

20週間運動群(EE)の走行距離の変化の過程は(1)で述べた。前半10週間運動群(EN)の走行距離は、EE群の10週目までの走行距離とほぼ同様に变化した。後半10週間運動群(NE)の走行距離は運動開始から5~6週目まで増加し、その後低下した。しかし、NE群の総運動量はEE群の同時期よりも低値を示した。

20週間非運動群(NN)とEE群の体重曲線の特徴は(1)で述べた。EN群はEE群と同様に、成長期の自発走運動によって体重増加が著しく抑制された。しかし、11週目から自発走運動を中止すると、体重は著しく増加し、次第にNN群の体重に接近した。NE群の体重は、NN群と同様に10週目まで著しく増加した。しかし、11週目から自発走運動を開始すると体重は減少した。この体重の減少は、走行距離が最も多くなった16週目まで続き、その後走行距離の減少に伴い、再び体重は増加した。

NN群とEE群のHbの変化の過程には、(1)で述べたように顕著な差は認められなかった。NE群とEN群のHbも、NN、EE両群のHbとほぼ同様の

Table 4 Statistical data for the results of Experiment 1; In the cases of two 10-week groups (N and E) and two 20-week groups (NN and EE)

Variable		Analysis of variance						
		Main effects (F ratio)		2 way inter- actions (F ratio)	Difference			
		Period	Exercise		Period		Exercise	
					Non- exercise	Exercise	10w	20w
Male	Body weight (BW)	50.174*	104.716*	4.347*	NN>N	EE>E	N>E	NN>EE
	Adipose tissue weight	11.526*	186.481*	2.376	NN>N		N>E	NN>EE
	Heart weight/BW	8.039*	34.180*	0.026	N>NN		E>N	EE>NN
	M. soleus weight/BW	0.064	29.846*	0.001			E>N	EE>NN
	Hb	0.288	1.988	1.484				
	Ht	11.724*	0.036	2.163		EE>E		
	RBC	15.258*	4.382*	4.134		EE>E	N>E	
	SI	15.719*	2.692	0.531	N>NN	E>EE		
	Transferrin saturation	0.583	0.824	0.417				
	FEP	3.192	1.741	12.479*		E>EE		NN>EE
	Liver ferritin	16.414*	0.113	0.198	NN>N	EE>E		
	BW	22.303*	15.668*	0.308	NN>N	EE>E	N>E	NN>EE
	Adipose tissue weight	11.206*	44.364*	0.000	NN>N	EE>E	N>E	NN>EE
	Heart weight/BW	9.340*	39.755*	0.185	N>NN		E>N	EE>NN
	M. soleus weight/BW	0.942	16.153*	0.229			E>N	EE>NN
Female	Hb	24.470*	2.317	0.036	N>NN	E>EE		
	Ht	0.068	1.097	0.004				
	RBC	0.098	3.711	0.156				
	SI	18.063*	0.067	0.282	N>NN	E>EE		
	Transferrin saturation	0.438	0.040	0.070				
	FEP	29.453*	0.165	1.620	N>NN	E>EE		
	Liver ferritin	7.554*	1.381	3.729	NN>N			

1. Exercise and dietary conditions of N, E, NN and EE were shown in Figure 1.

2. Analysis of variance was performed for two-way classification [period of experiment (10 w, 20 w)×exercise condition (non-exercise, exercise)] (*: $p<0.05$, >: $p<0.05$).

過程をたどって変化した。

Table 5 に飼育終了時の各成績について行った 1 元配置の分散分析の結果を示した。

体重、脂肪組織重量および体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量には、雌雄ともに自発走運動の有意な主効果が認められた。体重と脂肪組織重量は、NN 群と EN 群が EE 群と NE 群よりも有意に高値を示した。これに対して、体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量は、EE 群と NE 群が NN 群と EN 群よりも有意に高値を示した。なお、心臓とヒラメ筋の絶対重量には、自発走運動の有意な主効果は認められなかった。

鉄代謝に関する項目では、7 項目中、雄の Hb と FEP、および雌の FEP のみに自発走運動の有意な主効果が認められた。雄の Hb は EE 群 と EN 群との間に有意差が認められたが、他の群間には有意差

は認められなかった。また、雄の 4 群の Hb (15.2～16.4 g/dl) はいずれも正常域にあった。FEP は雌雄ともに EE 群が最も低値を示した。しかし、雌雄 4 群の FEP (50.8～77.6 $\mu\text{g/dl}$ RBC) はいずれも正常域にあった。したがって、自発走運動は雄の Hb、雌雄の FEP のいずれにも影響を与えないものと推測された。

上述した (1), (2) の結果から、蛋白、鉄栄養ともに正常な条件で飼育した雌雄ラットの体組成は、成長期の自発走運動、成長期から成熟期にわたる自発走運動、および成長終了時期に開始または中止した自発走運動の影響を受けるが、ヘム系および非ヘム系鉄代謝はこれらの自発走運動の影響を受けないことが認められた。

Fig. 2 Changes in voluntary running activity, body weight and hemoglobin concentration of each group in Experiment 1; In the cases of four 20-week groups (NN, EE, NE and EN)

○	NN non-exercise	non-exercise	} casein-24% Fe-180 ppm
●	EE exercise	exercise	
□	NE non-exercise	exercise	
▲	EN exercise	non-exercise	

2. 成長期の自発走運動が鉄欠乏食雄ラットの鉄代謝および体組成に及ぼす影響 (実験 2)

この項では、食餌鉄水準の異なる3種の飼料で10週間飼育した6群(SN, SE, MN, ME, DN, DE)を対象にした。

Table 6 に飼育期間中の総運動量を示した。また、Fig. 3 に走行距離、体重、Hb の経過的变化を示した。

走行距離は、いずれの群も運動開始から3~4週目まで増加し、その後徐々に低下した。しかし、鉄を十

分量添加した食餌群(SE)の総運動量は、鉄を中等量添加した食餌群(ME)と除鉄した食餌群(DE)よりも有意に低値を示した。

体重は、6群ともに飼育終了時まで著しく増加した。しかし、D群(DN, DE)とM群(MN, ME)の体重増加はS群(SN, SE)よりも抑制される傾向にあった。また、3群ともに運動群の体重増加は非運動群よりも抑制される傾向にあった。

S群のHbは、実験開始から4週目まで増加し、その後徐々に低下した。M群のHbは実験開始直後に低下したが、その後増加し、10週目にはS群とほぼ同一水準になった。S群とM群の飼育終了時のHbは約13 g/dlであった。一方、D群のHbは実験開始から低下の一途をたどり、10週目には約10 g/dlまで低下した。しかしS, M, D群ともに、非運動群と運動群のHbの変化の過程には顕著な差は認められなかった。

Table 7, 8 に飼育終了時の各成績を示した。また、Table 9 にその2元配置の分散分析の結果を示した。

食餌鉄水準の有意な主効果は、測定したすべての項目において認められた。非運動群では、体重はS群がM群とD群よりも有意に高値を示し、体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量はM群とD群がS群よりも有意に高値を示した。またHb, Ht, SI, トランスフェリン飽和率、肝臓フェリチン量は、いずれもS群とM群がD群よりも有意に高値を示した。D群のHb, SI, 肝臓フェリチン量は各々S群の74.2, 45.7, 4.9%

であった。運動群の結果は、上述の非運動群の結果とほぼ同様であった。

体重および体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量には、自発走運動の有意な主効果が認められた。体重はS, M, D群ともに非運動群(N)が運動群(E)よりも有意に高値を示した。S群とD群における両群の差は有意であった。これに対して、体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量は、3群ともにE群がN群よりも有意に高値を示した。なお、心臓とヒラメ筋の絶対重量には、自発走運動の有意な主効果は認められなかった。

Table 5 Statistical data for the results of Experiment 1; In the cases of four 20-week groups (NN, EE, NE and EN)

Variable		Analysis of variance	
		Main effect (F ratio)	Difference
Male	Body weight (BW)	21.730*	NN, EN>NE>EE
	Adipose tissue weight	26.159*	NN>EN>NE>EE
	Heart weight/BW	10.889*	EE, NE>EN, NN
	M. soleus weight/BW	6.445*	EE, NE>EN, NN
	Hb	3.176*	EE>EN
	Ht	1.111	
	RBC	0.051	
	SI	1.071	
	Transferrin saturation	1.148	
	FEP	10.080*	EN>NN, NE>EE
	Liver ferritin	1.129	
	BW	6.924*	NN, EN>NE, EE
Female	Adipose tissue weight	16.225*	NN>EN, EE, NE EN>NE
	Heart weight/BW	17.697*	EE, NE>EN, NN
	M. soleus weight/BW	5.980*	NE, EE>NN NE>EN
	Hb	0.714	
	Ht	0.851	
	RBC	1.090	
	SI	2.919	
	Transferrin saturation	1.074	
	FEP	12.860*	EN, NE>NN, EE
	Liver ferritin	0.300	

1. Exercise and dietary conditions of NN, EE, NE and EN were shown in Figure 2.
2. Analysis of variance was performed for one-way classification [exercise condition (20-week non-exercise, 20-week exercise, latter 10-week exercise, former 10-week exercise)] (*: $p < 0.05$, >: $p < 0.05$).

Table 6 Voluntary running activity in each group fed on iron deficient diet, Experiment 2

Group	n	Period of experiment days	Voluntary running activity km
SN	8	71.1 (0.8)	0.0 (0.0)
SE	8	71.0 (0.9)	143.6 (63.6)
MN	5	67.8 (1.3)	0.0 (0.0)
ME	5	72.2 (1.5)	339.4 (76.6) a
DN	5	66.8 (1.1)	0.0 (0.0)
DE	6	72.2 (1.5)	361.8 (182.9) a

1. Exercise and dietary conditions of each group were shown in Figure 3.
2. Values were shown in mean (SD).
3. Student's t-test was performed to assess the significances between the means (*: $p < 0.05$). The values indicated by the same alphabetic notation (a : a) showed no significant difference.

Table 7 Body weight, and the weights of adipose tissue, heart and m. soleus on the sacrificed day of each group in Experiment 2

Group	Body weight g	Adipose tissue weight g	Heart weight mg/100 gBW	M. soleus weight mg/100 gBW
SN	418 (25)	11.9 (2.0)	272 (9)	33.8 (3.7)
SE	383 (24)	7.2 (2.6)	300 (28)	41.6 (5.4)
MN	367 (34)	—	302 (23)	39.8 (1.6)
ME	348 (26)	—	404 (27)	45.6 (5.2)
DN	366 (46)	—	304 (22)	39.8 (5.5)
DE	324 (33)	—	374 (41)	45.5 (4.1)

1. Exercise and dietary conditions of each group were shown in Figure 3.
2. The weights of adipose tissue, heart and m. soleus were listed in wet weight. Adipose tissue weight was perirenal fat pad weight.
3. Values were shown in mean (SD).

Fig. 3 Changes in voluntary running activity, body weight and hemoglobin concentration of each group in Experiment 2

1st~10th wks
 ○ SN non-exercise }-casein-22%, Fe-200 ppm
 ● SE exercise }
 □ MN non-exercise }-casein-22%, Fe-75 ppm
 ■ ME exercise }
 △ DN non-exercise }-casein-22%, Fe-0 ppm
 ▲ DE exercise }

実験2では、S群のみで脂肪組織重量を測定した。S群の脂肪組織重量はSN群がSE群よりも有意に高

値を示した (Table 7)。M群とD群の脂肪組織重量は測定しなかった。しかし、上述の結果および実験1の結果をもとにすると、M、D両群の脂肪組織重量も非運動群が運動群よりも高値を示したと推測された。

鉄代謝に関する項目では、SI、トランスフェリン飽和率、肝臓フェリチン量に自発走運動の有意な主効果が認められた。SIとトランスフェリン飽和率はSN群がSE群よりも、またMN群がME群よりも有意に高値を示した。S、M両群のTIBCには非運動群と運動群との間に差は認められなかった。したがって、トランスフェリン飽和率における非運動群と運動群との差は、両群のSIの差から生じたものである。SIは上述のように、S、M群ともにN群がE群よりも有意に高値を示した。しかし、4群 (SN, SE, MN, ME) ともにSI (100 $\mu\text{g/dl}$ 以上) は正常域にあった。なお、S群のみでFEPを測定したが、SN群とSE群との間に有意差は認められなかった (Table 8)。肝臓フェリチン量は、M群においてのみME群がMN群よりも有意に高値を示した。しかし、除鉄食を与えたD群では、DE群の総運動量が最も多かったにもかかわらず、SI、トランスフェリン飽和率、肝臓フェリチン量ともにDN群とDE群との間に有意差は認められなかった。したがって、食餌鉄水準が異なっても、自発走運動はこれらの3項目に対して影響を与えないものと推測された。

上述の結果から、成長期にある雄ラットの体組成は食餌鉄水準と自発走運動の両者の影響を受けること、ヘム系および非ヘム系鉄代謝は食餌鉄水準の

Table 8 Blood compositions and liver ferritin on the sacrificed day of each group in Experiment 2

Group	Hb g/dl	Ht %	RBC $\times 10^6/\mu\text{l}$	SI $\mu\text{g/dl}$	Transferrin saturation %	FEP $\mu\text{g/dl/RBC}$	Liver ferritin mg/liver
SN	13.2 (0.2)	39.5 (1.4)	8.17 (0.20)	151 (28)	45.0 (7.9)	77.3 (7.0)	5.89 (0.71)
SE	13.5 (0.5)	40.5 (2.1)	8.38 (0.58)	108 (17)	35.2 (5.2)	77.9 (7.5)	5.95 (1.65)
MN	13.1 (0.5)	39.7 (2.0)	7.78 (0.37)	152 (20)	46.9 (2.0)	—	6.33 (1.47)
ME	13.1 (0.7)	39.6 (0.3)	7.88 (0.63)	108 (13)	38.5 (3.3)	—	9.50 (2.44)
DN	9.8 (0.9)	33.7 (4.8)	9.58 (0.76)	69 (12)	27.2 (1.4)	—	0.29 (0.20)
DE	10.6 (1.2)	34.4 (2.6)	8.50 (1.27)	83 (45)	30.7 (14.6)	—	0.46 (0.14)

1. Exercise and dietary conditions of each group were shown in Figure 3.
2. Values were shown in mean (SD).

Table 9 Statistical data for the results of Experiment 2; In the cases of six 10-week groups (SN, SE, MN, ME, DN and DE)

Variable	Analysis of variance							
	Main effects (F ratio)		2 way inter- actions (F ratio)	Difference				
				Diet		Exercise		
	Diet	Exercise		Non-exercise	Exercise	S	M	D
Body weight (BW)	12.034*	10.288*	0.361	S>M, D	S>M, D	N>E		N>E
Heart weight/BW	24.212*	48.796*	6.151*	M, D>S	M, D>S	E>N	E>N	E>N
M. soleus weight/BW	5.558*	20.404*	0.255	M, D>S		E>N	E>N	E>N
Hb	71.833*	1.970	0.822	S, M>D	S, M>D			
Ht	21.228*	0.601	0.166	S, M>D	S, M>D			
RBC	7.553*	0.729	3.104	D>S>M				
SI	15.213*	8.996*	4.778*	S, M>D	S, M>D	N>E	N>E	
Transferrin saturation	7.514*	4.704*	2.364	S, M>D		N>E	N>E	
Liver ferritin	94.279*	4.504*	4.820*	S, M>D	M>S>D		E>N	

1. Exercise and dietary conditions of SN, SE, MN, ME, DN and DE were shown in Figure 3.
2. Analysis of variance was performed for two-way classification [dietary iron level (S: 200 ppm, M: 75 ppm, D: 0 ppm)×exercise condition (non-exercise, exercise)] (*: $p<0.05$, >: $p<0.05$).

影響を受けるが、自発走運動そのものの影響を受けないことなどが認められた。

考 察

運動が鉄代謝に及ぼす影響を明らかにすることを主な目的として、ラットの飼育実験を試みた。実験内容から見た本研究の特徴は、正常食および鉄欠乏食ラットを用いて、比較的長期間の運動の影響を、運動の実施週齢と期間を変えて検討したことにある。

上述の課題を解明するために、本研究ではラットに自発走運動を課した。自発走運動は負荷の強度、量を定量化することができないので、課題を解明する最適な運動様式とはいえない。定量化した運動の影響を見るためには、トレッドミル走がより有効である。しかし、トレッドミル走は電気刺激を用いるので、ラットに大きなストレスを与えるといわれている⁴⁸⁾。一方、運動性貧血の発生原因の一つは、生体に対する過度のストレスであるといわれている^{31, 32)}。これらの理由により、本研究では比較的小ストレスの少ない自発走運動を実験運動として用いた。

自発走運動が鉄代謝に及ぼす影響を明らかにする場合には、鉄代謝とは直接関係のない指標を用いて、自発走運動の有効性を確認することが必要である。このために、本研究では自発走運動が体組成に及ぼす影響について検討した。

正常食ラットの自発走運動量は、従来の報告⁴⁹⁾と同

様に雌が雄よりも高値を示した。また、雌雄ともに成長期が成熟期よりも高値を示した。一方、鉄欠乏食雌ラットの成長期の自発走運動量は、食餌鉄水準が低いほど高値を示した。この原因は明確ではないが、一つの原因として食餌組成の不均衡に対する摂食欲求行動の増加が考えられる。

上述のように、自発走運動量は性、週齢、食餌鉄水準などの相違によって異なった。しかし、正常食雌雄ラットでは、成長期、成熟期および成長期から成熟期にわたるいずれの自発走運動によっても、肥満は防止され、運動に直接関与する心臓とヒラメ筋は相対的に肥大した。同様の結果は、食餌鉄水準の異なる3種の飼料で飼育した雄ラットの成長期の自発走運動によっても認められた。これらの結果は、自発走運動が体組成に影響を及ぼすことを示している。徳山⁴⁹⁾は、自発走運動は生体全体での脂肪酸の代謝を亢進させ、体脂肪量の増加を抑制するのに有効であると報告している。本研究の結果によると、自発走運動による脂肪酸の代謝の亢進は、性、週齢、食餌鉄水準などの相違に基づく自発走運動量の差に関係なく生じると考えられる。なお、勝田ら^{50, 51)}は自発走運動によって、本研究で用いた正常食雌雄ラットと鉄欠乏食雄ラットの骨格筋線維はFG (fast-twitch-glycolytic fibers) 型からFOG (fast-twitch-oxidative-glycolytic fibers) 型へ移行し、正常食雌雄ラットの骨格筋のコハク酸脱水素酵素活性とグリコーゲン濃度は増加すると報告してい

る。これらの結果も考慮すると、自発走運動は非定量的な間欠的運動であるが、持久的運動で獲得できる種々の効果を得るのに有効な運動様式であると考えられる。本研究では、このような特性を持つ自発走運動がヘム系および非ヘム系鉄代謝に及ぼす影響について検討した。

正常食雌雄ラットでは、ヘム系および非ヘム系鉄代謝の指標に用いたいくつかのものが週齢によって変動した。しかし、各鉄代謝の指標はいずれも成長期の自発走運動、成長期から成熟期にわたる自発走運動、および成長終了時期に開始または中止した自発走運動の影響を受けなかった。一方、成長期にある雄ラットでは、食餌鉄水準の低下によって、肝臓フェリチン量は最も減少し、次いで SI、Hb の順に減少した。この結果は、従来の報告⁵²⁾と同様に、生命保持に重要な体内鉄ほど減少の度合いが少ないことを示している。しかし、ヘム系および非ヘム系鉄代謝の各指標は、いずれの食餌鉄水準で飼育したラットにおいても、成長期の自発走運動の影響を受けなかった。上述の結果は、性、週齢、食餌内容などが異なっても、ラットの鉄代謝は自発走運動に起因する影響を受けないことを示している。自発走運動がラットの鉄代謝に及ぼす影響に関する研究は、Bowering ら⁸⁹⁾によって行われている。Bowering らは3種の食餌鉄水準(42, 17, 7 ppm)の下で、雌雄ラットに自発走運動を6週間行わせ、いずれのラットにおいても Hb、Ht、肝臓非ヘム鉄量は自発走運動の影響を受けないと報告している。これは本研究の結果とほぼ同じである。したがって、両者の研究結果をもとにすると、どのような条件下で行われた自発走運動でも、自発走運動それ自体が鉄欠乏貧血、潜在性鉄欠乏症を招来する直接の原因にはなり難いと考えられる。これは、自発走運動の特性の一つになると考えられる。

しかし、自発走運動以外の各種の運動がヒトまたは動物の鉄代謝に何らかの影響を及ぼすことは、これまでに多数報告されている。すなわち、一過性の激しい運動では、行軍性(運動性)血色素尿症¹⁴⁻¹⁷⁾や運動性ミオグロビン尿症¹⁹⁾の発症することが報告されている。また、数日から数ヶ月間の激しい運動では、Hb は減少し、運搬途上鉄と貯蔵鉄は増加すること⁸⁶⁻⁸⁸⁾、Hb は減少し、心筋や骨格筋のミオグロビン量は増加すること^{81, 82)}、あるいは Hb は変動しないが、貯蔵鉄は心筋や骨格筋に移行すること^{40, 41)}などが報告されている。またさらに、数年にわたって激しい運動を継続

しているスポーツ選手には、運搬途上鉄と貯蔵鉄の減少している者^{27, 29)}、あるいはそれに加えて Hb も減少している者^{20-23, 25, 26, 28)}などが多いことも報告されている。上述の報告は、各種の激しい運動では鉄欠乏貧血、潜在性鉄欠乏症および体内鉄の再配分などが生ずる可能性のあることを示している。この原因には、機械的作用による筋の崩壊¹⁹⁾、機械的作用または化学的作用による赤血球の破壊^{14-17, 81-83, 86-88)}、鉄吸収率の低下^{29, 40)}、汗中への排泄鉄量の増加^{20, 21, 29)}、および心筋や骨格筋の需要鉄量の増加^{40, 41)}などがあげられている。これらは、いずれも運動それ自体に起因するものである。したがって、各種の激しい運動を行った場合には、鉄欠乏貧血、潜在性鉄欠乏症、および体内鉄の再配分などを回避することは不可能であると考えられる。しかし、運動性貧血の提唱者である吉村ら^{81, 82)}は、運動によって貧血の生じる可能性はあるにしても、蛋白摂取量が豊富な場合には、生体の持つ恒常性の原則や過剰回復の原則によって、新生赤血球は増加し、心筋や骨格筋のミオグロビン量は増加すると報告している。また、運動性貧血の主要な原因である機械的な作用による溶血は、柔かな路面を走ること¹⁵⁾、衝撃部位にスポンジラバーを装着すること¹⁶⁾などによって軽減できると報告されている。上述の報告は、運動が鉄代謝に及ぼす影響には、運動以外の要因も関与していることを示している。その最も重要な要因は、スポーツ選手の貧血が、摂取カロリーの不足および蛋白と鉄摂取量の不足に起因していること^{20, 21, 23, 24, 26, 28)}を考慮すると、栄養の質と量であると考えられる。

本研究では、正常食雌雄ラットの鉄代謝は自発走運動の影響を受けなかった。この原因の一つは蛋白、鉄栄養ともに正常であったことが考えられる。また、鉄欠乏食雄ラットの鉄代謝も自発走運動の影響を受けなかった。これは、吉村ら^{81, 82)}の蛋白欠乏食の結果と異なる。吉村らは、運動時には筋の蛋白合成が著しく亢進するので、蛋白欠乏状態では溶血によって遊離した血色素蛋白をも筋の蛋白合成に利用することを明らかにし、これが運動性貧血の主な原因であると報告している。本研究では、鉄欠乏状態における鉄代謝が自発走運動の影響を受けなかった原因を明示することはできない。しかし、一つの原因として、鉄代謝は主に閉鎖系で行われる⁵³⁾ので、本研究のように蛋白摂取水準が正常な場合には、溶血によって遊離した鉄を、ヘモグロビンやミオグロビンの合成などに再利用できることが考えられる。本研究および吉村らの結果をもとに

すると、運動が鉄代謝に及ぼす影響は、鉄欠乏状態よりも蛋白欠乏状態において顕著に現れると考えられる。しかし、このことは鉄栄養が重要でないことを意味するものではない。前述のように、激しい運動では汗中への排泄鉄量の増加と鉄吸収率の低下が認められている。また、本研究では、鉄代謝は食餌鉄水準の影響を著しく受けることが認められている。以上のことを考慮すると、激しい運動を行う場合には、蛋白栄養、鉄栄養ともに留意することが重要であると考えられる。

本研究では、自発走運動は肥満を防止するのに有効であることが認められた。しかし、自発走運動の強度は必ずしも高いとはいえない。このことが、鉄代謝に影響を与えなかった原因の一つになっていると考えられる。したがって、今後、強度の高い定量化できる運動を用いて、緒言に示した二つの課題を検討することが必要であると考えられる。

なお、伊藤⁴⁴⁾はスポーツ選手における Hb 低値者の有気的持久力が高いことから、運動性貧血は運動による合目的な適応現象であると報告している。この理由として、Hb の低下は血液粘度を低下させ、血流量を増加させることをあげている。また、伊藤は吉村が定義した運動性貧血を発展的にとらえ、Hb が 10~11 g/dl に維持されている状態も、運動性貧血の特徴の一つになると報告している。Hb が 11 g/dl 以下になると、有気的持久力が低下することは Edgerton ら¹²⁾も認めている。しかし、本研究の除鉄食ラットでは Hb は 10~11 g/dl で、自発走運動量は多かったにもかかわらず貯蔵鉄は枯渇状態にあった。また、スポーツ選手には潜在性鉄欠乏症の者が多いこと^{20~23, 25~29)}、鉄剤投与⁷⁾、輸血⁸⁾、血液ドーピング⁹⁾、低酸素暴露¹⁰⁾などによって Hb は増加し、有気的持久力は増大すること、あるいは血流量は Ht が約 50% 以上になるまで低下しないこと⁹⁾などの報告もある。したがって、現段階では、運動性貧血が運動による適応現象であるとは断定できないと考えられる。

結 論

自発走運動がラットの鉄代謝と体組成に及ぼす影響を、2種の飼育実験を通して検討した。実験1では、生後31日齢のウィスター系雌雄ラット92匹を正常飼料で10週間および20週間飼育した。前者は10週間非運動群と運動群の2群、後者は20週間非運動群、20週間運動群、後半10週間運動群、前半10週

間運動群の4群から成った。実験2では、生後35日齢のウィスター系雄ラット37匹を、食餌鉄水準の異なる3種の飼料で10週間飼育した。3群ともに非運動群と運動群から成った。運動群には、回転式運動装置を併設したケージ内で自発走運動を行わせた。

得られた結果は次のとおりである。

1) 正常食雌雄ラットのヘム系および非ヘム系鉄代謝に関連する因子、すなわち Hb, Ht, RBC, SI, トランスフェリン飽和率, FEP, 肝臓フェリチン量は、成長期の自発走運動、成長期から成熟期にわたる自発走運動、および成長終了時期に開始または中止した自発走運動の影響を受けなかった(実験1)。

2) 鉄欠乏食雄ラットのヘム系および非ヘム系鉄代謝は、食餌鉄水準の影響を受けたが、成長期の自発走運動の影響を受けなかった(実験2)。

3) 成長期または成熟期の自発走運動によって、正常食雌雄ラットおよび鉄欠乏食雄ラットの体重の増加は抑制され、体重当たりの心臓とヒラメ筋の重量は増大した。これは、脂肪組織重量の増加の抑制に起因した(実験1, 2)。

本研究から、自発走運動は鉄欠乏貧血または潜在性鉄欠乏症を招来する直接の要因にならないこと、および肥満を防止するのに有効な手段になることなどが示唆された。

稿を終るに際して、御助言を賜った筑波大学体育科学系勝田茂助教授、日本医科大学第2生化学教室平井幸彦助手および教室員各位に深く感謝の意を表します。

なお、本研究の要旨は日本栄養・食糧学会総会(1981, 1982年)で発表した。

文 献

- 1) 山岡誠一, 米田幸雄, 蜂須賀弘久, 樹岡義明: 運動性貧血が競技能力におよぼす影響について。体育学研究, 9, 117~123, 1966.
- 2) Anderson, H.T., and Barkve, H.: Iron deficiency and muscular work performance. Scand. J. Clin. Lab. Invest. [Suppl.], 114, 1~62, 1970.
- 3) Vellar, O.D., and Hermansen, L.: Physical performance and hematological parameters. Acta Med. Scand. [Suppl.], 522, 1~40, 1971.
- 4) Davies, C.T.M., Chukweumeka, A.C., and Van Haaren, J.P.M.: Iron deficiency anaemia; Its effect on maximum aerobic power and responses to exercise in African males aged 17~40 years. Clin. Sci., 44, 555~562, 1973.
- 5) Wranne, R., and Woodson, R.D.: A graded treadmill test for rats; Maximal work performance in normal and anemic rats. J. Appl. Physiol., 34, 732~735, 1973.

- 6) Viteri, F.E., and Rotun, B.: Anaemia and physical work capacity. *Clin. Haematol.*, **3**, 609~625, 1974.
- 7) Gardner, G.W., Edgerton, V.R., Barnard, R.J., and Bernauer, M.: Cardiorespiratory, hematological and physical performance responses of anemic subjects to iron treatment. *Am. J. Clin. Nutr.*, **28**, 982~988, 1975.
- 8) Edgerton, V.R., Ohira, Y., Hettiarachchi, J., Senewiratne, B., Gardner, G.W., and Barnard, R.J.: Elevation of hemoglobin and work tolerance in iron-deficient subjects. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* (Tokyo), **27**, 77~86, 1981.
- 9) Buick, F.J., Gledhill, N., Froese, A.B., Spriet, L., and Meyers, E.C.: Effect of induced erythrocythemia on aerobic work capacity. *J. Appl. Physiol.*, **48**, 636~642, 1980.
- 10) 猪飼道夫: 高地トレーニング. *医学のあゆみ*, **64**, 551~556, 1968.
- 11) Edgerton, V.R., Diamond, L.B., and Olson, J.: Voluntary activity, cardiovascular and muscular responses to anemia in rats. *J. Nutr.*, **107**, 1595~1601, 1977.
- 12) Edgerton, V.R., Byrant, S.L., Gillespie, C.A., and Gardner, G.W.: Iron deficiency anemia and physical performance and activity of rats. *J. Nutr.*, **102**, 381~400, 1972.
- 13) Ohira, Y., Koziol, B.J., Edgerton, V.R., and Brooks, G.A.: Oxygen consumption and work capacity in iron-deficient anemic rats. *J. Nutr.*, **111**, 17~25, 1981.
- 14) 北村李軒: 武道, 特に剣道練習後に見られる血色素尿について. *武道学研究*, **10**, 21~27, 1978.
- 15) Davidson, R.J.L.: Exertional haemoglobinuria; A report on three cases with studies on the haemolytic mechanism. *J. Clin. Pathol.*, **17**, 536~540, 1964.
- 16) Streeton, J.A.: Traumatic haemoglobinuria caused by karate exercises. *Lancet*, **II** (7508), 191~192, 1967.
- 17) Siegel, A.J., Hennekens, C.H., Solomin, H.S., and Boeckel, B.V.: Exercise-related hematuria; Findings in a group of marathon runners. *JAMA*, **241**, 391~392, 1979.
- 18) Schiff, H.B., MacSearraigh, E.T.M., and Kallmeyer, J.C.: Myoglobinuria, rhabdomyolysis and marathon running. *Quart. J. Med.*, New series XLVII, No. 188, 463~472, 1978.
- 19) 脇坂一郎, 伊藤亨, 今村純男, 塩田勲: アジア競技大会選手の血液所見について. *体力科学*, **8**, 301~305, 1959.
- 20) 長嶺晋吉, 井川幸雄, 磯貝行秀, 香川芳子, 黒田善雄, 鈴木一正: スポーツ選手における貧血の発生と予防に関する研究. 第1報 貧血発生の実態について. 昭和50年度日本体育協会スポーツ科学研究報告, No. VI, p. 1~25, 1975.
- 21) 長嶺晋吉, 井川幸雄, 磯貝行秀, 伊藤朗, 香川芳子, 黒田善雄, 鈴木一正, 吉野芳夫: スポーツ選手における貧血の発生と予防に関する研究. 第2報 貧血の発生要因の検討. 昭和51年度日本体育協会スポーツ科学研究報告, No. III, p. 1~40, 1976.
- 22) 井川幸雄, 山口幸雄, 鈴木政登, 伊藤朗: ヘモグロビン低値女子高校生の体力と健康・体力意識. *体育科学*, **6**, 219~228, 1978.
- 23) 南部敏江, 中村磐男, 西田典子, 鏡光長: 運動部に所属する女子高校生の貧血調査: 発生要因とその栄養学的考察. *聖マリアンナ医大誌*, **9**, 129~137, 1981.
- 24) Steel, J.E.: A nutritional study of Australian Olympic athletes. *Med. J. Aust.*, **7**, 119~123, 1970.
- 25) DeWijn, J.F., DeJongste, J.J., Mosterd, W., and Willebrand, D.: Hemoglobin, packed cell volume, serum iron and iron binding capacity of selected athletes during training. *J. Sports Med.*, **11**, 42~51, 1971.
- 26) Stewart, G.A., Steel, J.E., Tayne, M.B., and Stewart, M.J.: Observations on the haematology and the iron and protein intake on Australian Olympic athletes. *Med. J. Aust.*, **2**, 1339~1343, 1972.
- 27) Brotherhood, J., Brozovic, B., and Pugh, L.G.C.: Haematological status of middle and long distance runners. *Clin. Sci. Mol. Med.*, **48**, 139~145, 1975.
- 28) Clement, D.B., Asmundson, R.C., and Medhurst, C.W.: Hemoglobin values; Comparative survey of the 1976 Canadian Olympic team. *Can. Med. Assoc. J.*, **117**, 614~616, 1977.
- 29) Ehn, J., Carlmark, B., and Hoglund, S.: Iron status in athletes involved in intense physical activity. *Med. Sci. Sports*, **12**, 61~64, 1980.
- 30) Dufaux, B., Hoederath, A., Streitberger, I., Hollmann, W., and Assmann, G.: Serum ferritin, transferrin, haptoglobin, and iron in middle- and long-distance runners, elite rowers, and professional racing cyclists. *Int. J. Sports Med.*, **2**, 43~46, 1981.
- 31) 吉村寿人: 運動鍛練時の貧血に関する研究. *体力科学*, **8**, 167~168, 1958.
- 32) Yoshimura, H.: Anemia during physical training (sports anemia). *Nutr. Rev.*, **28**, 251~256, 1970.
- 33) 田中信雄, 辻田純三, 齋誠, 東隆暢, 山田敏男, 堀清記: 身体鍛練者と非鍛練者の激運動時における赤血球数, ヘマトクリット値, エリトロポエチン濃度の変化の比較. *体育学研究*, **25**, 119~126, 1980.
- 34) Weswig, P., and Winkler, W., Jr.: Iron supplementation and hematological data of competitive swimmers. *J. Sports Med.*, **14**, 112~119, 1974.
- 35) Wirth, J.C., Lohman, T.G., Avalone, J.P., Shire, T., and Boileau, R.A.: The effect of physical training on the serum iron levels of college age women. *Med. Sci. Sports*, **10**, 223~226, 1978.
- 36) Lindemann, R., Ekanger, R., Opstad, P.K., Nummestad, M., and Ljosland, P.: Hematological changes in normal men during prolonged severe exercise. *Am. Correct. Ther. J.*, **37**, 107~111, 1978.
- 37) Radomski, M.W., Sabiston, B.H., and Isoard, P.: Development of "sports anemia" in physically fit men after daily sustained submaximal exercise. *Aviat. Space Environ. Med.*, **51**, 41~45, 1980.
- 38) Vidnes, A., and Opstad, P.K.: Serum ferritin in young men during prolonged heavy physical exercise. *Scand. J. Haematol.*, **27**, 165~170, 1981.
- 39) Bowering, J., and Norton, G.: Relationships

- between iron status and exercise in male and female growing rats. *J. Nutr.*, **111**, 1648~1657, 1981.
- 40) Ruckman, K.S., and Sherman, A.R.: Effects of exercise on iron and copper metabolism in rats. *J. Nutr.*, **111**, 1593~1601, 1981.
- 41) Strause, L., Hegenauer, J., and Saltman, P.: Effects of exercise on iron metabolism in rats. *Nutr. Res.*, **3**, 79~89, 1983.
- 42) 伊藤朗: 運動鍛練者に多い貧血. *Mod. Med.*, **83**, 96~104, 1983.
- 43) 吉野芳夫, 平松芳子, 柳下晃, 寺戸国昭: 貧血ラットにみられる鉄吸収の亢進について. *栄養と食糧*, **24**, 206~210, 1971.
- 44) International committee for standardization in hematology: Proposed recommendations for measurement of serum iron in human blood. *Blood*, **37**, 598~600, 1971.
- 45) 中根清司, 井口健次, 小田原美津, 斉藤宏: 血清鉄および鉄結合能に関する検討. 第1報 不飽和血清鉄結合能 (UIBC) 測定上の問題点. *臨床病理*, **20**, 433~438, 1972.
- 46) Piomelli, S.: A micromethod for free erythrocyte porphyrins; The FEP test. *J. Lab. Clin. Med.*, **81**, 932~940, 1973.
- 47) Laurell, C.B.: Quantitative estimation of proteins by electrophoresis in agarose gel containing antibodies. *Anal. Biochem.*, **15**, 45~53, 1966.
- 48) 鈴木慎次郎, 大島寿美子: 高血圧自然発症ラットの血圧におよぼす運動の影響. 第2報 自由運動および強制運動について. *体育科学*, **5**, 89~95, 1977.
- 49) 徳山薫平, 奥田拓道: 生体内における脂肪酸合成に対する自発運動 (Wheel Running) の影響. *体力科学*, **31**, 291~298, 1982.
- 50) 勝田茂, 高橋徹三, 高松薫, 緒方道彦, 吉野芳夫, 橋本薫, 村松成司, 樋口満: 成熟ラットの持久性トレーニング効果に関する性差の検討. 運動処方研究 (筑波大学運動処方特別プロジェクト研究報告書), p. 107~130, 1982.
- 51) 勝田茂, 田中守, 高松薫: ラットの自発的運動が骨格筋線維におよぼす影響の組織化学的研究. 筑波大学体育紀要, **5**, 125~134, 1982.
- 52) 和田攻: 鉄代謝異常と低色素貧血. “貧血のすべて” (中尾喜久編), p. 69~80, 南江堂, 東京, 1974.
- 53) Harper H.A.: ハーパー・生化学. 三浦義彰監訳, p. 459~462, 丸善, 東京, 1975.

(受付: 1984 年 1 月 10 日)