

3 週間の高地トレーニングが大学水泳選手の血液性状に与える影響

小早川ゆり*・藤森善弘**・中里浩一***・圓吉夫****

(平成 13 年 10 月 29 日受付, 平成 13 年 12 月 10 日受理)

The Effect of the Three-Week Altitude Training on Characteristics of Sera in University Swimmers

Yuri KOBAYAKAWA, Yoshihiro FUJIMORI, Koichi NAKAZATO
and Yoshio EN

The effect of the three week altitude training (Flagstaff, Arizona State, USA, height: 2,150 m) on characteristics of sera was examined in this study. The objects were university swimmers (female: $N=5$, male: $N=4$). Although changes were not statistically significant, the hemoglobin concentration, the number of reticulocyte, Ht (hematocrit) after the altitude training, were higher than before. MCH (mean corpuscular hemoglobin) was significantly higher after altitude training (female: $p<0.01$, male: $p<0.01$). MCV (mean corpuscular volume) was also higher than that before the training (female: $p<0.01$, male: $p<0.01$). Above all, we concluded that the altitude training for university swimmers should increase ability of the oxygen transportation.

Key words: Altitude training, Swimmer, Characteristics of sera

キーワード: 高地トレーニング, 水泳選手, 血液性状

序 論

高地トレーニングは通常標高 1,500 m 以上の高地において行われる。高地における低圧・低酸素環境に暴露されることにより呼吸・心肺機能が向上することが報告されている。また近年, 多くの種目において競技選手はパフォーマンスの向上を期待して高地トレーニングを取り入れている。

高地トレーニングの生理学的研究は数多くなされている (Rusco 1996, Wilber 2001)。高地環境の中でも低酸素条件は呼吸・心肺機能を向上させる反面, トレーニング強度の低下を余儀なくされるため特にパフォーマンスの向上に関して一致した見解が得られなかった。Levine らは高地での低酸素暴露と平地での高強度トレーニングを同時に行う 'Living High-Training Low' を行い, パフォーマンスにおいても向上が得られたことを報告した

(Levine *et al.* 1997)。すなわち, 高地トレーニングは低酸素暴露によるエリスロポエチンの増生とそれに伴う血球細胞の増加による酸素運搬能の向上が主な生理学的変化であり, トレーニング強度の低下は低地にて補うという方法により, 競技力の向上が得られると考えられている。したがって, 高地トレーニングにおいては血液性状における変化が最も期待され, かつ高地トレーニングの評価において血液性状の検討は必須である。

水泳選手を対象にした高地トレーニングの影響に関する報告に関して, Roberts & Smith は 3 週間の高強度での高地トレーニング (1,000 m) の結果, 網状赤血球の増加を報告した (Roberts *et al.* 1992)。Haykowsky らは 1,848 m あるいは 1,050 m での 3 週間の高地トレーニングを実施し, それぞれの高度でのトレーニング後の心臓の形態上の特徴を検討

* 日本体育大学水泳研究室, ** 日本体育大学スポーツ局, *** 日本体育大学大学院健康科学・スポーツ医科学系, **** 日本体育大学運動生理学研究室

し、トレーニング前後での変化は観察されなかったことを報告している (Hayakowsky *et al.* 1998)。高度 1,500 m から 3,000 m 程度のいわゆる moderate な高度の高地トレーニングにおける血液性状の変化に関しては、水泳選手に限らずさらなる検討を要するといえる。

本研究はアメリカ合衆国フラッグスタッフ (高度 2,150 m) にて 3 週間の高地トレーニングを行った大学男女水泳選手を対象に、トレーニング前後での血液性状の変化を検討することを目的とした。

対象と方法

本研究のすべては日本体育大学倫理規定に従った。全被験者に対し測定前に本研究の趣旨を説明し承諾を得た。

1. 対象

N 大学水泳部 (女子: 6 名, 男子: 5 名) を対象とした。トレーニング前の身体特性 (年齢・身長・体重・BMI) を表 1 に示す。

表 1 各選手の身体特性

	年齢 (yrs)	身長 (m)	体重 (kg)	BMI
A	18	163	59	22.2
B	18	166	53	19.2
C	18	178	72	22.7
D	19	166	56	20.3
E	19	165	54	19.8
F	19	172	67	22.6
G	19	174	67	22.1
H	19	189	70	21.1
I	20	160	54	19.6

表 2 トレーニングカテゴリーの分類

エアロビック (AE)	HR-140	
エンデュランス (EN)	EN1	HR130~150
	EN2	HR150~170
	EN3	HR160~Max
アナロビック (AN)	HR~Max	

表 3 各選手における高地トレーニング前後での血液検査値の変化

	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
A	13.8	14.5	1.0	1.1	471	477	32.2	32.7	42.8	44.4
B	13.5	14.4	1.2	1.4	446	463	32.8	32.1	41.1	44.9
C	14.0	14.8	0.8	1.0	448	462	31.4	30.8	44.6	48.1
D	13.5	13.9	0.9	1.4	456	451	32.7	32.2	41.3	43.2
E	12.2	14.1	1.7	1.6	391	433	31.9	31.8	38.3	44.3
F	16.7	16.9	0.9	1.1	575	562	32.6	32.9	51.2	51.4
G	15.9	16.2	1.0	1.1	527	522	31.9	32.0	49.8	50.7
H	14.5	15.1	0.6	0.8	480	481	31.6	32.1	45.9	47.0
I	14.8	15.7	0.8	0.6	510	520	32.0	32.2	46.2	48.8

	MCH (pg)		MCV (fl)		WBC (number/ μ l)		Fe (μ g/dl)	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
A	29.3	30.4	91	93	6,360	6,230	130	166
B	30.3	31.1	92	97	5,060	5,060	183	80
C	31.3	32.0	100	104	7,990	7,770	74	64
D	29.6	30.8	91	96	5,570	5,270	86	103
E	31.2	32.6	98	102	4,990	4,560	142	89
F	29.0	30.1	89	91	6,440	5,380	163	130
G	30.2	31.0	94	97	7,130	8,860	102	96
H	30.2	31.4	96	98	4,530	5,780	52	125
I	29.0	30.2	91	94	5,110	4,550	125	135

2. 方法

2.1 高地トレーニング

高地トレーニングは2001年3月15日から2001年4月6日までアメリカ合衆国アリゾナ州フラッグスタッフ（高度2,150 m）にて行った。高地トレーニング時における総泳距離およびトレーニングカテゴリー（表2）に従った分類による総泳距離の変化を図1, 2に示す。なおトレーニングカテゴリーの分類は選手個人の自己申告による心拍数(HR)に従い、HR-140までの練習をエアロビック(AE)、HR130-Maxの練習をエンデュランス(EN1-3)、HR-Maxの練習をアナエロビック(AN)とした(若吉ら2000)。

2.2 血液採取および測定

血液採取は2001年3月8日および4月9日、日本体育大学にて行った。医師の指示書の下、前腕静脈より採血を行った。測定項目は一般生化学検査、尿検査とした。各検査項目の測定は(株)BMLに委託した。

2.3 統計処理

統計的検定は対応のあるt検定(両側)を用いた。P値は5%を有意水準とした。

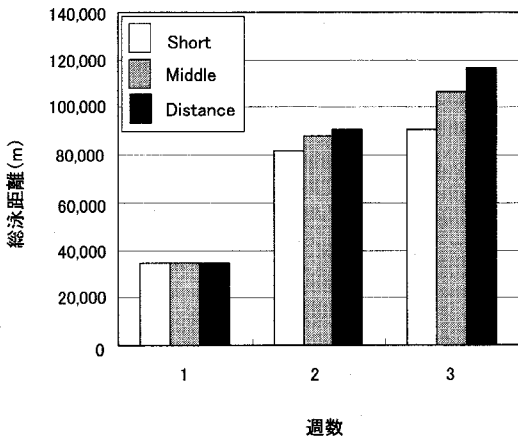


図1 トレーニング期間中の総泳距離(積算)
Short Middle Distance はそれぞれ専門種目の距離を示し、Short: 短距離(50~200 m), Middle: 中距離(200~800 m), Distance: 長距離(800~1,500 m)である。

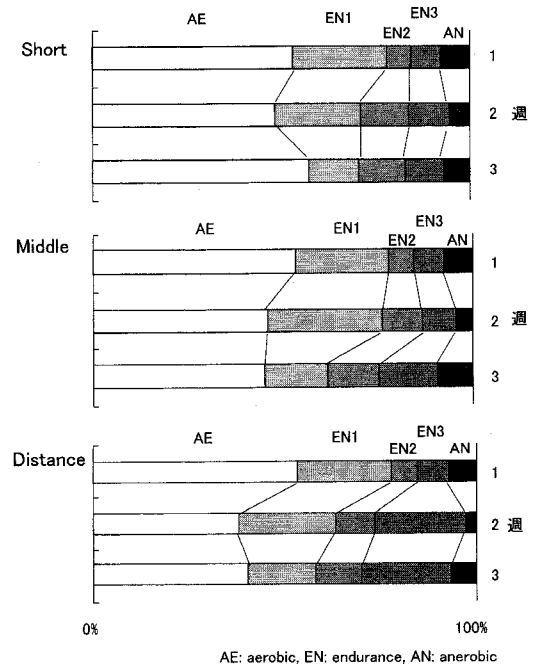


図2 トレーニングカテゴリーごとの総泳距離に占める割合

Short Middle Distance はそれぞれ専門種目の距離を示し、おおまかに Short: 短距離(50~200 m), Middle: 中距離(200~800 m), Distance: 長距離(800~1,500 m)である。

AE, EN1-3, AN は表2のトレーニング分類に従った練習内容であり、AE: aerobic, EN: endurance, AN: anerobic である。

結 果

1. トレーニング内容

3週間のトレーニング期間中の総泳距離およびトレーニングカテゴリー別の練習内容を図1および2に示す。トレーニング期間中、練習日数は19日、練習回数は28回であった。3週間の総泳距離は短距離(short)、中距離(middle)、長距離(distance)においてそれぞれ90,700 m, 106,600 m, 116,300 mであった。週ごとの泳距離は2週目において最も長かった。

トレーニングカテゴリー別の分類では Middle あるいは Distance の選手においては EN1-3 の練習を徐々に増加させることができたが、Short の選手においては EN2-AN の練習を増加することができなかった。

2. 高地トレーニング前後での血液性状の変化

高地トレーニング前後での血液検査の結果を、特に血算およびヘマトクリット値の値を中心に個人別に表2に示す。以下、男女別に統計処理した結果を示す。

高地トレーニング前後でのHb値の平均値を図3に示す。平均Hb値は高地トレーニング後男女ともが高かった。特に女子において有意($P=0.0209$)であり、トレーニング前は 13.4 ± 0.7 g/dlであったのが、トレーニング後は 14.3 ± 0.4 g/dlとなった。

高地トレーニング前後での網状赤血球 (reticulocyte) 数の平均値を図4に示す。男女とも高地トレーニング後の平均値が高かったが、 P 値は有意水準以下であった。

高地トレーニング前後での赤血球数の平均値を図5に示す。高地トレーニング後の値は女子において高値であり男子では低値であったがともに有意な差ではなかった。

表4 各選手における高地トレーニング前後での成績の推移

種目	高地トレーニング後の記録の向上
A 200 m 個人メドレー	—
400 m 個人メドレー	—
B 50 m 平泳ぎ	—
100 m 平泳ぎ	—
200 m 平泳ぎ	—
C 50 m 自由形	—
100 m バタフライ	0"15
200 m 自由形	—
D 400 m 自由形	—
800 m 自由形	—
E 50 m 背泳ぎ	—
100 m 背泳ぎ	0"61
200 m 背泳ぎ	0"82
F 100 m 平泳ぎ	—
200 m 個人メドレー	2"70
400 m 個人メドレー	5"85
G 50 m 自由形	—
100 m 自由形	—
H 1,500 m 自由形	—
400 m 自由形	—
I 200 m 背泳ぎ	—

※記録が向上した選手のみその絶対値の差を記した

高地トレーニング前後でのHt値の平均値を図6に示す。男女共に高地トレーニング後にその値は増加し、特に女子において有意($P=0.0130$)な増加を示した。女子に関して、トレーニング前は $41.6 \pm 2.3\%$ であったが、トレーニング後は $45.0 \pm 1.9\%$ となった。

血中Hb値、赤血球数、Ht値よりMCHC値およびMCH値を算出した結果を図7に示す。血球成分体積当たりのヘモグロビン濃度を示すMCHC値の平均値はトレーニング後では女子において低値、男子では高値を示した(図7a)。特に男子における変化は有意水準以下($P=0.0486$)であった。男子はトレーニング前 $32.0 \pm 0.4\%$ であったがトレーニング後は $32.3 \pm 0.4\%$ となった。

一方、赤血球数当りのヘモグロビン濃度の指標であるMCH値は男女ともにトレーニング後有意(女子 $P=0.0015$, 男子 $P=0.0013$)に高値であった(図7b)。女子はトレーニング前後がそれぞれ 30.3 ± 0.9 pg, 31.4 ± 0.9 pgであり、男子はトレーニング前後がそれぞれ 29.6 ± 0.7 pg, 30.7 ± 0.6 pgであった。

Ht値および赤血球数からMCV値を算出した結果を図8に示す。赤血球の体積の指標であるMCV値は高地トレーニング後男女ともに有意(男子 $P=0.0032$, 女子 $P=0.0019$)に高かった。女子はトレーニング前後がそれぞれ 94.4 ± 4.3 fl, 98.4 ± 4.5 flであり、男子はトレーニング前後がそれぞれ 92.5 ± 3.1 fl, 95.0 ± 3.1 flであった。

3. 高地トレーニング前後での選手の成績

高地トレーニング前のベストタイムおよび高地トレーニング直後に行われた大会における選手の成績の比較の結果を表4に示す。3名において成績の向上が確認された。

考 察

今回の高地トレーニングは高度2,150 mであり、高度的には中程度の条件であった。また今回のトレーニングは同じ高度の条件で行ったため、いわゆるLiving-High, Training-Highの条件となった。トレーニング内容は図1, 2に示したごとくであり、総泳距離は2週目が最も高い結果となった。3週目は特に疲労度が高かったためにこのような結果になったことが示唆される。またカテゴリー別の分類

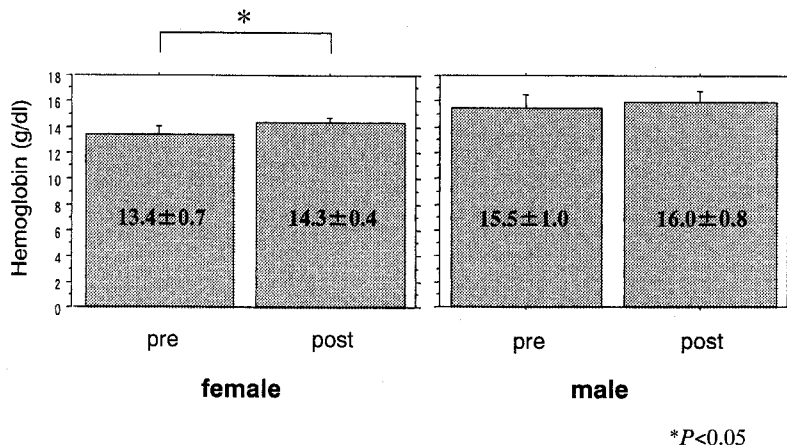


図3 高地トレーニング前後でのHb (hemoglobin) 値
pre: トレーニング前, post: トレーニング後

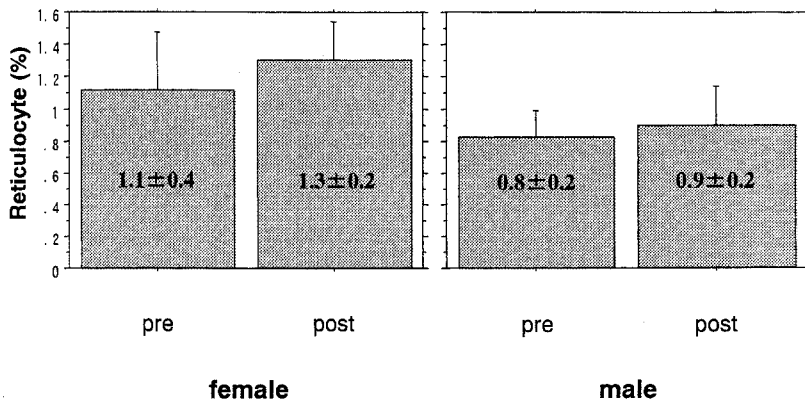


図4 高地トレーニング前後でのRet (reticulocyte) 値
pre: トレーニング前, post: トレーニング後

においては特に短距離系の選手における疲労度が高く高強度の練習 (AN) の導入が困難であったため、種目特性が十分に反映されない結果になったと考えられる。

今回は特に血液性状の変化に着目して検討を行った。高地トレーニングにおいて期待される血液性状とくに血球細胞の変化は、低酸素刺激を起点としたエリスロポエチンの血中濃度の増加とそれに伴う網状赤血球数増加および赤血球数の増加といった一連の赤血球増生過程応答が主な現象であると考えられている。今回の高地トレーニングにおいてエリスロポエチンは測定しなかったが、血球細胞産生の亢進を示す網状赤血球数は有意ではなかったものの平均値において増加した。しかし赤血球数において明らかな増加は見られなかった。一方、血球当たりのヘ

モグロビン量を示す MCH 値と平均赤血球体積の目安である MCV 値は有意に増加した。このような血液性状の変化から見る限り高地トレーニング後に酸素運搬能の向上が期待される結果が得られたが、厳密には低酸素刺激による血球数増加だけでは解釈できない結果であったと考えられる。以下にこの結果に対する考察を加える。

低酸素刺激に関しては酸素分圧が重要であり、トレーニングを行った場所の高度が重要である。今回の高地トレーニングは高度 2,150 m にて行われた。Piehl-Aulin らは高度 2,000 m における酸素分圧を設定した低酸素室を利用して 1 日 12 時間の低酸素刺激を 10 日間行ったところ血中エリスロポエチン濃度は低酸素刺激と比較して 80% 増加したことを報告している (Piehl-Aulin *et al.* 1998)。今回の高地

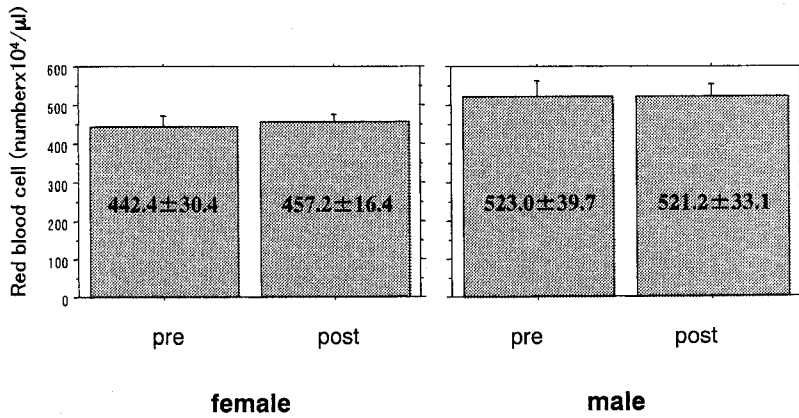
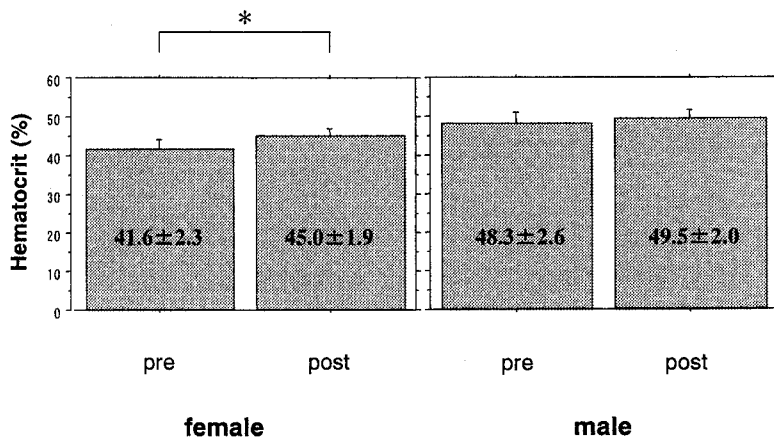


図5 高地トレーニング前後でのRBC (red blood cell) 値
pre: トレーニング前, post: トレーニング後



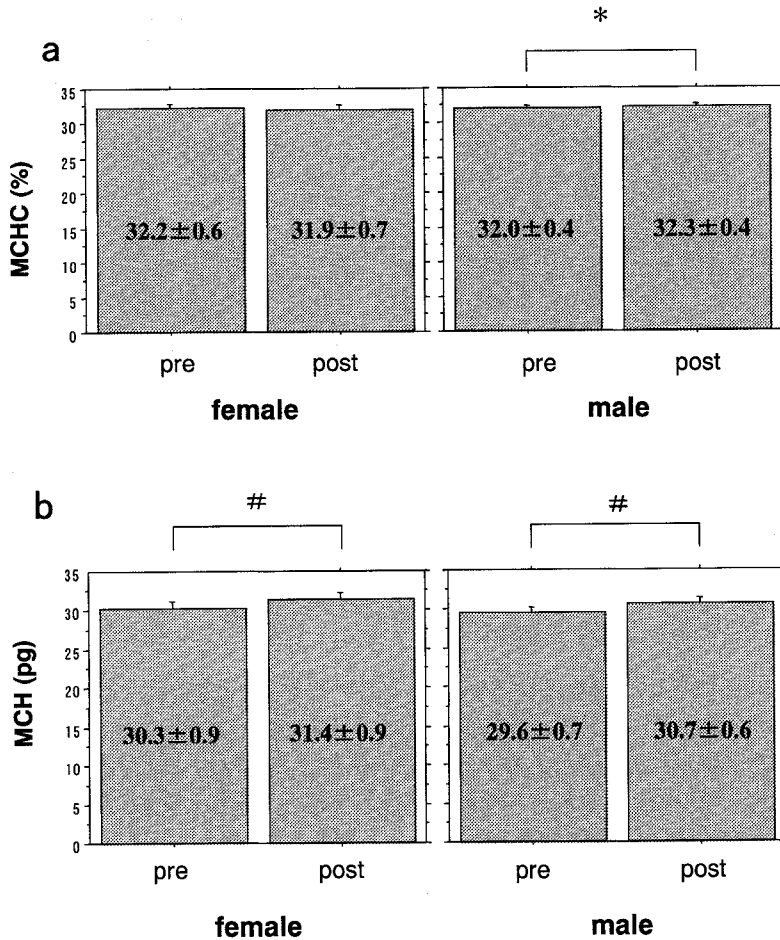
*P<0.05

図6 高地トレーニング前後でのHt (hematocrit) 値
pre: トレーニング前, post: トレーニング後

トレーニングにおける高度は血中エリスロポエチン濃度上昇に十分な条件であったといえる。統計的に有意な増加ではなかったが網状赤血球数の増加はエリスロポエチン濃度の増加による結果であると考えられる。Ashendenらは高度2,000 m程度を想定した低酸素刺激によりエリスロポエチン濃度の増加は得られるが、網状赤血球数は値が増加しても有意ではなかったことを報告している (Ashenden *et al.* 2000)。高度2,000 m程度の高地においては低酸素刺激によるエリスロポエチンの血中濃度増加は結論されるものの、その後の血球細胞における変化は明確な関連性を結論づけるには至っていない。網状赤血球数に加えて今回の結果では赤血球数も明確な増

加が得られていない。以上のような結果は高度2,000 m程度の moderate な条件におけるエリスロポエチンの増分では、平均的に血球数を与えるに至らない可能性があることを示唆している。

今回赤血球の平均体積の目安であるMCV値の増加と血中および赤血球当たりのヘモグロビン濃度の増加が最も顕著な変化として現れた。これらはエリスロポエチンの濃度上昇に引き続いて起きた可能性も否定できないが、それ以外の可能性も併せて考慮する必要がある。すなわちMCV値はヘマトクリット(Ht)値に依存するため、高地において一般的に起きる脱水などによる血漿量の減少の結果である可能性も高い。また、Hahnらは1,500から3,000 m



* $P < 0.05$, # $P < 0.01$

図7 高地トレーニング前後における MCHC (mean corpuscular hemoglobin concentration) 値 (a) と MCH (mean corpuscular hemoglobin) 値 (b)

a: MCHC¹, b: MCH²

pre: トレーニング前, post: トレーニング後, 1: $MCHC = Hb \times 100 / Ht$, 2: $MCH = Hb \times 10 / RBC$

のいわゆる moderate な高度では低酸素刺激に加えてトレーニングによる血液性状への影響を考察している (Hahn & Gore 2001)。すなわち、高度 1,500 から 3,000 m 程度の高地トレーニングでかつ Living-High, Training-Low の条件でトレーニングを行う場合、高強度のトレーニングが可能になるため運動時において指摘されている赤血球体積の増加やヘモグロビン濃度の上昇 (Sawka *et al.* 2000) が同時に起きる可能性があることを指摘している。実際、今回の結果は網状赤血球数に関しては男女とも

有意ではないが増加しており低酸素暴露の効果も示唆されたが、赤血球数の有意な増加までには至らなかった。一方で MCH 値や MCV 値は有意に増加した。トレーニング内容から見ても今回の高地におけるトレーニングは通常練習と比較してその運動強度が高いものとはいえないが、トレーニングも同様に血液性状の変化に影響を与えたと考えることも可能である。例えば造血系の初期には低酸素刺激が後期にはトレーニングがそれぞれ支配的に影響を与えるようなモデルを想定できる。

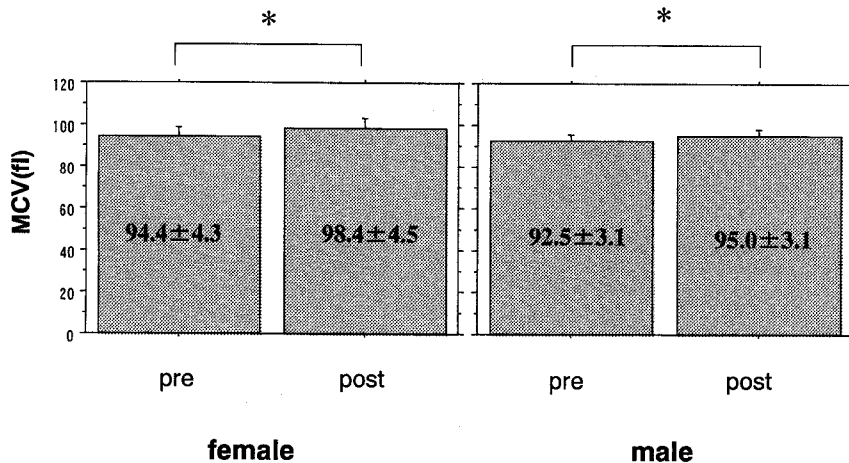
* $P < 0.01$

図 8 高地トレーニング前後での MCV (mean corpuscular volume) 値
pre: トレーニング前, post: トレーニング後, 1: $MCV = (Ht \times 10) / RBC$

今回の高地トレーニングによる影響は男女差があり、特に女子において高地トレーニングの効果がより顕著に現れた。低酸素刺激による造血効果はエリスロポエチンの血中濃度の増加によるものと考えられる。一般にエリスロポエチンなどの液性因子（ホルモン、インターロイキン）は受容体と結合することでその濃度変化がシグナルとして伝達される。多血症あるいは貧血症を主な症状とする疾患の多くはエリスロポエチン受容体異常であることが報告されている（中村 1997）。Zeng らは通常時におけるヘマトクリット値の男女差に着目し、エリスロポエチンおよびエリスロポエチン受容体の性差を検討した（Zeng *et al.* 2001）。その結果、特にエリスロポエチン受容体に性差があることを報告した。また Ifudu らは合成エリスロポエチン投与に対する応答能に性差があり、男性と比較して女性の血中エリスロポエチン濃度が有意に高値であってもヘマトクリット値における性差はなかったことを報告している（Ifudu *et al.* 2001）。高地トレーニングにおける造血効果に関して、エリスロポエチン濃度のみでなくエリスロポエチン受容体およびその後の造血経路は高地トレーニングにおける個人差の問題も含めて今後の重要な検討課題になると考えている。

高地トレーニングの最終的な目標は競技成績の向上であることは言うまでもない。今回高地トレーニ

ングに参加した選手 11 名の中で実際に競技成績が向上した選手は 3 名であった。この 3 名に関しては Hb 値、RBC 数、MCH 値のすべてにおいて増加しており、血液性状の変化が決定要因ではないにしても競技成績向上の一因を担っていること可能性がある。ただし、1 秒以上のタイムの向上が得られている選手はそのうち 2 名であり、より効果的な高地トレーニングの導入法が検討されるべきともいえる。今回高地トレーニングを初めて経験した選手が多く、いわゆる慣れや高地トレーニングに対する向き不向きといった個人に依じた適用も考慮に入れていくべきであると思われる。特に高地トレーニングの適用が有効と思われる選手に対しては、より簡便な手段として本学にも導入されている低酸素室の利用なども積極的に考慮していくべきであると考えている。

結 語

3 週間の高地トレーニング（アメリカ合衆国アリゾナ州、フラッグスタッフ、高度 2,150 m）が水泳選手の血液性状に与える影響を検討した。その結果、特に赤血球当たりのヘモグロビン濃度の指標となる MHC および赤血球の体積の指標である MCV において高地トレーニング後に有意な増加が観察された。特に赤血球当たりのヘモグロビン量が増加した

ことから、高地トレーニングは血液性状の面において酸素運搬能の向上に与えることが示唆された。

参考文献

- Ashenden, M. J., Core, C. J., Dobson, G. P., *et al.*: Simulated moderate altitude elevates serum erythropoietin but does not increase reticulocyte production in well-trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **81**, 428-435, 2000.
- Hahn, A. G. and Gore, C. J.: The effect of altitude on cycling performance: A challenge to traditional concepts. *Sports Med.*, **31**(7), 533-57, 2001.
- Haykowsky, M. J., Smith, D. J., Malley, L., Norris, S. R. and Smith, E. R.: Effects of short-term altitude training and tapering on left vent morphology in elite swimmers. *Can. J. Cardiol.*, **14**(5), 678-681, 1998.
- Ifudu, O., Uribarri, J., Rajwani, I., Vlacich, V., Reydel, K., Delosreyes, G. and Friedman, E. A.: Gender modulates responsiveness to recombinant erythropoietin. *Am. J. Kidney Dis.*, **38**(3), 518-522, 2001.
- Levine, B. D. and Stray-Gundersen, J.: 'Living high-training low' effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J. Appl. Physiol.*, **83**, 102-112, 1997.
- 中村 滋: EPO 受容体とアポトーシス, *医学のあゆみ*, **182**(13), 925-928, 1997.
- Piehl-Aulin, K., Svedenhag, J., Wide, L., *et al.*: Short-term intermittent normobaric hypoxia—haematological, physiological and mental effect. *Scan. J. Med. Sci. Sports*, **8**, 132-137, 1998.
- Roberts, D. and Smith, D. J.: Training at moderate altitude: iron status of elite swimmers. *J. Lab. Clin. Med.*, **120**(3), 359-360, 1992.
- Rusco, H. K.: New aspects of altitude training. *Am. J. Spo. Med.*, **6** (Suppl. 24), S48-S52, 1996.
- Sawka, M. N., Convertino, V. A., Eichner, E. R., Schnieder, S. M. and Young, A. J.: Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **32** (2), 332-48, 2000.
- Wilber, L. R.: Current trends in altitude training. *Sports Medicine*, **31**(4), 249-265, 2001.
- 若吉浩二, 荻田 太, 田中孝夫, 有吉 讓, 清田隆毅, 鈴木陽二: 水泳競技の高地トレーニング医・科学サポート, 平成10年度日本オリンピック委員会スポーツ医・科学研究報告, 21-39, 1999.
- Zeng, S. M., Yankowitz, J., Widness, J. A. and Strauss, R. G.: Etiology of difference in hematocrit between males and females: sequence-based polymorphisms in erythropoietin and its receptor. *J. Gen. Specif. Med.*, **4**(1), 35-40, 2001.