

ニンチンカンサ峰登頂への高山病予防の為の高所 順応トレーニングおよび登山中・後の生理的応答 に関する高所生理学研究

浅野 勝己

I はじめに

1995年8月17日、19日および20日にわたり栃木県高等学校体育連盟登山部の11人の登攀隊員全員が中国チベット・ニンチンカンサ峰(7,206m)北西稜の初登頂に成功された。

今回の遠征においても、インドヒマラヤCB31峰(1984年)、崑崙ムージュムズターグ峰(1990年)およびパミール・コルジュネクスカヤ峰(1992年)の各遠征時と同様に6人の隊員を対象として約3か月にわたり計12回の高所順応トレーニングを実施した。この高所順応トレーニング前後および登山後の計3回にわたり測定を行い、その影響の検討を行った。さらに今回の学術遠征では当研究室より浅野および遠藤が隊員(学術担当)とし同行させていただき、現地において生理的応答と高山病発症との関係について調査測定を行った。これらの成果についての概略を報告したい。

II 研究(1): 高所順応トレーニング前後および登山の有氣的作業能に及ぼす影響

1. 目的

- 1) 低圧シミュレーターによる5,000~7,000m相当高度における1回30分間の運動を、週1回で約3ヶ月間にわたり計12回行う高所順応トレーニングの生理的影響について、トレーニング前後および登山後の4,000m相当高度での最大運動時生理的応答から検討した。
- 2) 近赤外分光法(near infrared spectroscopy: NIRS)を用いて、高所順応トレーニングの前後および登山後の低圧低酸素環境下における安静および運動時筋内酸素動態を検討した。また核磁気共鳴分光法(magnetic resonance spectroscopy: MRS)による常圧下における筋の有氣的エネルギー代謝能を検討して、筋組織の機能と有氣的作業能について総合的に検討することを目的とした。さらに高所順応トレーニングの前後および登山後における大腿部の組成および形態を核磁気共鳴映像法(magnetic resonance imaging: MRI)を用いて測定し、有氣的作業能との関係について検討した。

2. 方法

1) 被検者

本研究に参加した健常成人男性6人(平均年齢 33.8 ± 9.6 歳)の隊員、すなわち石澤(Y.I)、神島(J.K)、川崎(M.K)、後藤(H.G)、菅又(H.S)および深谷(A.F)の各隊員の身体特性を表1に示した。

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

被検者	年齢(yr)	身長(cm)	体重(kg)			体脂肪率(%)		
			Pre	Post 1	Post 2	Pre	Post 1	Post 2
Y.I	43	179.3	72.4	71.5	67.7	11.6	11.4	10.7
J.K	41	179.0	75.4	75.5	66.8	15.1	13.4	14.4
M.K	39	170.0	61.1	60.5	57.0	13.0	12.3	12.3
H.G	33	174.8	74.1	70.5	65.6	17.2	13.9	15.8
H.S	26	167.9	63.0	61.5	60.1	14.1	12.5	14.1
A.F	19	166.1	61.4	65.3	61.1	12.5	14.1	15.3
Mean	33.5	172.9	67.9	67.5	63.1*#	13.9	12.9	13.7
±S.D.	9.4	5.7	6.7	5.5	4.3	2.0	1.0	1.9

Pre : トレーニング前、Post 1 : トレーニング後、Post 2 : 登山後

* : Post 1 vs. Post 2 (p<0.05)
: Pre vs. Post 2 (p<0.05)

表1 トレーニング前後および登山後の体重と体脂肪率の変化

2) 高所順応トレーニングの概要

1995年4月から7月までの約3か月間に週1回の頻度で計12回の高所順応トレーニングを実施した。トレーニングに用いた高度は5,000m (405Torr)~7,000m相当高度(308 Torr)である。トレーニング実施高

期間; 1995年4月~7月
頻度; 1回/週
実施回数; 12回
運動形式; 自転車エルゴメーター (モナーク社製)
自転車負荷; 60~70% $\dot{V}O_{2max}$ at 4000m, 60rpm
時間; 30分
高度; 5000m相当高度4回, 6000m相当高度4回
6500m相当高度3回, 7000m相当高度1回

表2 高所順応トレーニングの内容

度の詳細は表2に示した。なお目標高度到着後直ちに30分間の運動を開始し運動終了後には復圧を開始した。運動形式は自転車エルゴメーター (Monark社製) を用い、運動強度は各被検者の4,000m (462Torr) 相当高度での60~70% $\dot{V}O_{2max}$ とし、回転数は60rpmに一定とした。

3) 測定項目および方法

全ての測定項目について、高所順応トレーニング前 (Pre : 4月8~9日)、高所順応トレーニング終了後 (Post 1 : 7月1~2日) そして高所登山後 (Post 2 : 9月2~3日) において3回とも同様の手順、同一機器にて測定した。

(1) 形態

体重、体脂肪率および右大腿部組成の測定を行った。右大腿部組成の測定にはMRI (Signa 1.5T, GE社製) を用い、大腿部の全面積 (全横断面積)、各筋面積の合計値 (筋断面積)、大腿骨断面積および脂肪断面積を求め、これらの面積から組成の判定を行った。

(2) 最大運動負荷テスト

最大運動負荷テストは、4,000m相当高度 (以下4,000m) で行った。

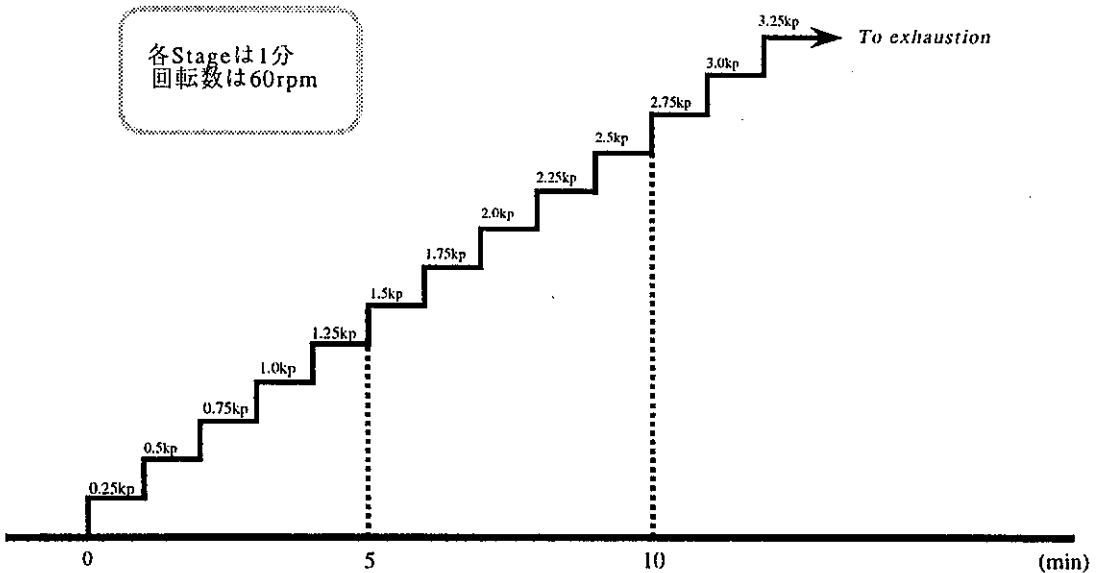


図1 トレーニング前後および登山後のテストプロトコール

自転車エルゴメーター (Monark社製) による負荷漸増最大運動を図1のプロトコールにより行った。すなわち、回転数を60rpmとし、開始時の負荷を0.25kp, その後1分毎に0.25kpずつ漸増して疲労困憊 (exhaustion) に至らしめた。運動中は呼吸代謝測定装置 (Oxycon, MIJNHARDT社製) により連続的に換気量 ($\dot{V}E$) と酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) を測定し、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) および換気性作業閾値 (Ventilatory threshold: VT) を求めた。また1kp (4~5分), 2kp (9~10分), 3kp (14~15分) および運動終了3分後の4点において血中乳酸濃度 (HLA) を測定した。運動中は1分毎にSaO₂をBiox III (Ohmeda社製) を用いear-oxymeter法により測定した。心拍数 (HR) は胸部誘導の心電図R-R間隔より測定し、1分毎にRPE聴取した。

さらに、座位安静時および運動中の組織酸素飽和度 (StO₂), 総ヘモグロビン量 (THb), 酸素化ヘモグロビン量 (OxyHb) および脱酸素化ヘモグロビン量 (DeoxyHb) を組織SO₂・Hb量モニター (PSA-III, バイオメディカルサイエンス社製) により連続的に測定した。プローブは外側広筋中央部に装着した。

(3) 大腿四頭筋の有気的エネルギー代謝能

超伝動MR装置 (Signa 1.5T, GE社製) を用いて筋内³¹P NMRの測定を行い, PCr再合成の時定数 (time constant: TC) を, PCr/(PCr+Pi)の値を一次の指数関数モデルにフィットさせることにより算出した。

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

(4) 血液性状

測定項目は赤血球数 (RBC), 血色素量 (Hb), ヘマトクリット (Hct), 平均赤血球容積 (MCV), 平均血色素含有量 (MCH) および平均血色素濃度 (MCHC) であり, 採血は, Pre, Post 1, および Post 2 のいずれも常圧下で座位安静後に肘正中皮静脈より行った。

3. 結果および考察

高所順応トレーニングの前後に体重と体脂肪率の変化は認められなかった。しかし, その後に行われた登山後では, 体重にのみ平均約 4 kg の有意な減少が認められた。(表 1)。また MRI を用いて高所順応トレーニング前後と登山後の右大腿部組

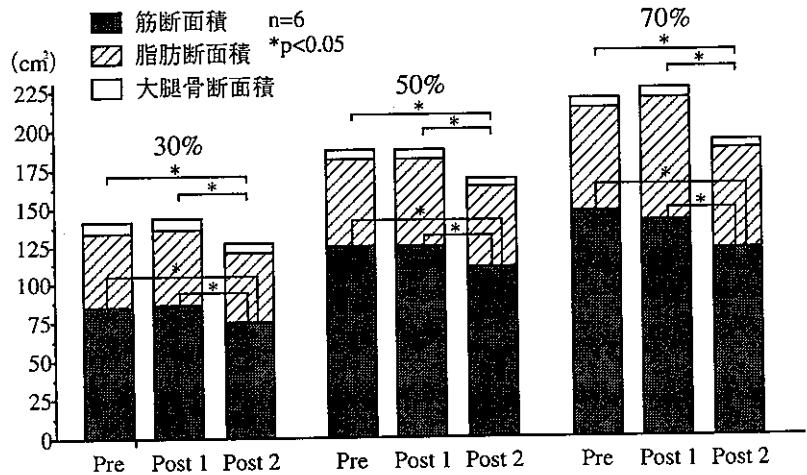


図 2 トレーニング前後および登山後における右大腿部組成の変化

成の変化を検討したところ, 右大腿部の全横断面積と筋断面積は登山後に有意な減少を示したが, 脂肪断面積と大腿骨断面積には変化が認められず大腿部筋量の減少が示唆された(図 2)。大腿部の筋群は登攀活動において使用される。従って大腿部筋量の減少は廃用性による筋萎縮の結果というよりもその他の要因により引き起こされたものと思われる。すなわち食欲低下による摂食量低減, あるいは消化不良などが考えられるが, 筋萎縮の原因が低圧低酸素の直接的な作用であるのか, 摂食量低減や消化不良などを介した間接的な作用であるのかについては明らかではなく今後の検討が必要である。

トレーニング前後および登山後の 3 回の測定で, 4,000m 相当高度での $\dot{V}O_2\max$ および VT に変化は認められなかった(図 3)。また運動中の同一負荷強度と回復 3 分での血中乳酸濃度 (HLA) (図 4) にもトレーニング前後および登山後に明らかな変化が認められなかったことから, 4,000m での最大および最大下有氣的作業能は, 週 1 回の高所トレーニングと約 40 日間の高所滞在によって明らかな影響を受けなかった

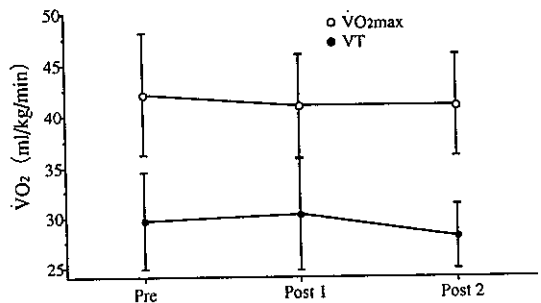


図 3 4,000m 相当高度におけるトレーニング前後および登山後の最大酸素摂取量と換気性閾値の変化

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

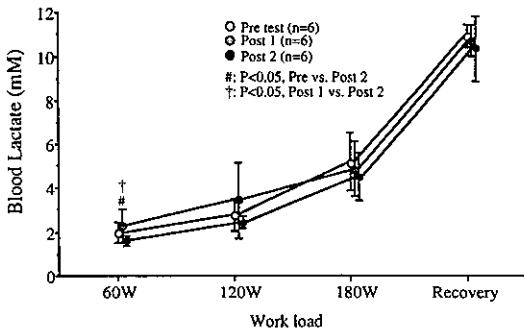


図4 4,000m相当高度におけるトレーニング前後と登山後の最大運動時および回復期の血中乳酸濃度の変化

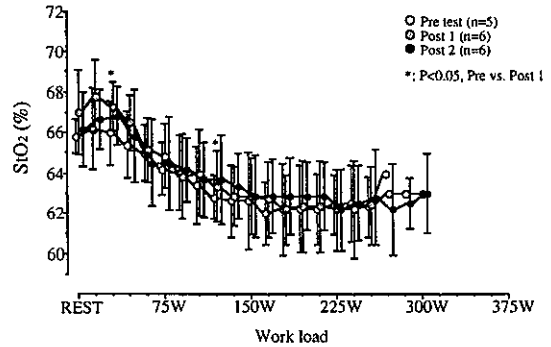


図5 4,000m相当高度におけるトレーニング前後と登山後の最大運動時のStO₂の変化

ことが推察された。組織酸素飽和度 (StO₂) は約8%の誤差範囲で静脈血酸素飽和度 (SvO₂) とほぼ同等とされ、組織での酸素の抜き取り能力を反映している。このことから有気的作業能が高い者のStO₂は低値を示すと考えられる。本研究では、最大および最大下運動時のStO₂に全ての測定で変化は認められなかった(図5)。すなわち、大腿四頭筋の有気的代謝能に差異が認められなかったことを支持している。

MRSを用い、トレーニング前後および登山後に大腿四頭筋のエネルギー代謝を測定した。その結果、運動終了後のPCr回復速度を表す時定数 (TC) は、い

	pH			PCr/PCr+pi			TC(s)		
	Pre	Post 1	Post 2	Pre	Post 1	Post 2	Pre	Post 1	Post 2
Y,I	6.8	6.9	7.0	0.48	0.51	0.63	51.2	55.1	37.7
J,K	6.9	7.0	7.0	0.54	0.59	0.60	39.4	38.2	32.9
M,K	6.9	6.9	7.0	0.57	0.56	0.62	46.4	48.4	43.4
H,G	6.9	6.9	7.0	0.51	0.52	0.61	36.1	34.4	35.1
H,S	6.8	6.9	7.0	0.52	0.57	0.63	44.6	45.2	43.6
A,F	6.8	6.9	7.0	0.50	0.61	0.62	71.7	48.2	51.4
Mean	6.9	6.9	7.0	0.52	0.56	0.62	48.2	44.9	40.7
±SD	±0.05±0.03±0.02			±0.03±0.04±0.01			±12.7±7.5±6.8		

表3 トレーニング前後および登山後における時定数の変化

ずれの測定においても統計的有意差は認められなかった(表3)。しかしトレーニングの前後では変化がないものの登山後ではPCr相対値の増加傾向およびPCr回復速度の指標とされる時定数の短縮傾向がみとめられた。これらの傾向は、長期間の高所滞在と登山活動は大腿四頭筋の酸化的代謝能を全体として亢進する傾向を示唆している。

一方、4,000mでの安静および運動中のSaO₂は被検者全員がトレーニング前、後および登山後に増加する傾向を示した(図6)。長期間の高所滞在により血液性状の適応が起こることはよく知られているが、本研究においてもRBC、HbおよびHctの有意な増加が認められ(表4)、登山後のSaO₂

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

の増加はHbの増加が一因と考えられる。しかしトレーニング前後では血液性状に変化は認められなかったことから、他の要因の関与していることが示唆された。すなわちその一つとして換気量の増大が挙げられる。図7にトレーニング前後と登山後における最大下および最大運動時の換気量の変化を表した。すなわちトレーニング前に比べトレーニング後で有意に増大した。このことがトレーニング前後でのSaO₂の増加に貢献したものと考えられた。次に動静脈酸素較差と考えられているSaO₂-StO₂はトレーニング前、後および登山後と順を追って高値を示した(図8)。

これはトレーニング前後と登山後の運動時のすべての測定でStO₂に差が認められなかったことから、高度の上昇に伴うSaO₂-StO₂の増大はSaO₂の増加に起因している。

従来の研究では、高所環境への長期の滞在により筋の酸化能力衰退し、有気的作業能の低下することが報告されている。また本研究でも登山後に大腿部の筋量が明らかに

減少し、 $\dot{V}O_2\max$ およびVTの低減することが予想された。しかしこれらの値はトレーニング後と登山後で有意差が認められず、高所滞在と登山活動により獲得される有気的作業能を向上させる因子により補償されたものと考えられる。

従来より行われてきた高所順応トレーニングは急性高山病(AMS)の発症予防を第一の目的としている。本研究では高所順応トレーニング後に有気的作業能の明らかな向上は認められなかったが、4,000m相当高度における安静および運動時のSaO₂はトレーニング前から後および登山後と明らかな増加を示した。AMSの発症は疲労や栄養などの影響もあると考えられるが、最大の原因は低

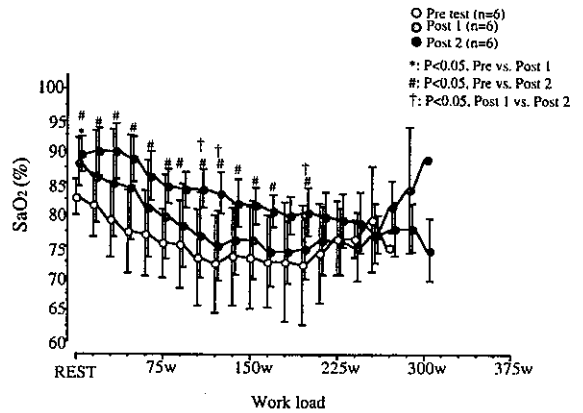


図6 4,000m相当高度におけるトレーニング前後と登山後の最大運動時のSaO₂の変化

		Pre	Post 1	Post 2
RBC	($\times 10^6/\text{mm}^3$)	479.2 \pm 25.5	476.2 \pm 16.0	536.1 \pm 9.3 ^{†*}
Hb	(g/dl)	14.8 \pm 0.8	14.6 \pm 0.7	16.4 \pm 1.0 ^{†*}
Hct	(%)	44.2 \pm 2.4	44.7 \pm 1.6	48.7 \pm 2.0 ^{†*}
MCV	(μm^3)	92.3 \pm 4.1	93.8 \pm 4.0 [#]	90.7 \pm 3.3 [*]
MCH	(Pg)	31.2 \pm 2.1	30.7 \pm 1.4	31.1 \pm 1.7
MCHC	(%)	33.3 \pm 0.6	32.7 \pm 0.6 [#]	33.6 \pm 0.7 [*]

* P<0.05 (Post 1vs. Post 2) ; # P<0.05 (Pre vs. Post 1) ;
† P<0.05 (Pre vs. Post 2) (n=6)

表4 トレーニング前後および登山後の血液性状の変化

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

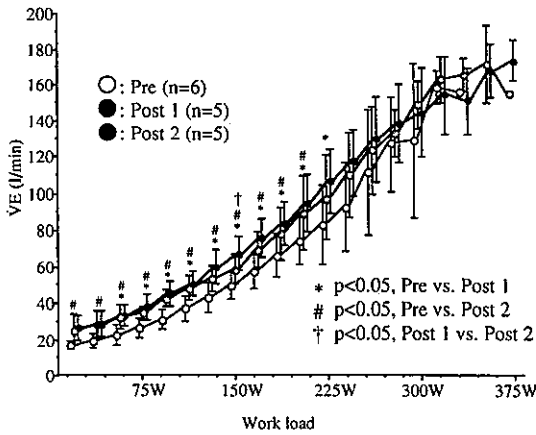


図7 4,000m相当高度におけるトレーニング前後と登山後の最大運動時の換気量の変化

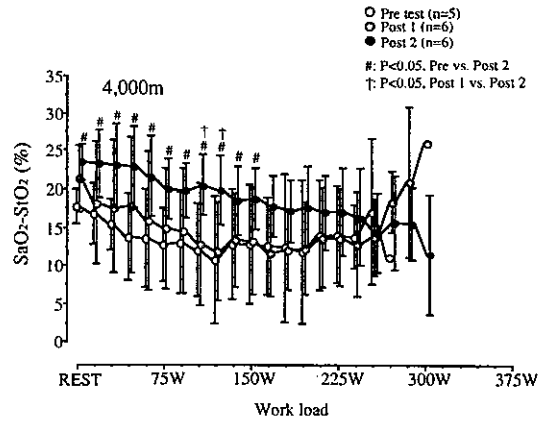


図8 4,000m相当高度におけるトレーニング前後と登山後の最大運動時のSaO₂-StO₂の変化

酸素であり、高所における運動時のSaO₂の著しい低下がAMS発症の引き金になっている。したがって本高所順応トレーニングおよび高所登山は、4,000m相当高度における安静および運動時のSaO₂の増加をもたらし、AMS予防に貢献したものと考えられる。

Ⅲ 研究(2): ニンチンカンサ峰登山における高所順応時の生理的応答

1. 目的

本研究では、ニンチンカンサ峰登山時における生理的応答および急性高山病 (acute mountain sickness: AMS) との関係について検討したものである。ベースキャンプまではヒマラヤ山系登山時の最も主要なルートを利用し、その後30日間にわたる高所登山時の生理的順応過程について、滞在日数と高度から検討することを目的とした。

2. 方法

1) 被検者

実験1と同様の6人である(表1)。

2) 測定および方法

測定はカトマンズ出発日(7月23日)より開始してBC撤収日(8月26日)までは毎日、その後はラサ(8月27日)と北京(8月30日)で各1回行った。測定時刻は起床時の活動前安静状態とした。なおカトマンズからBC2泊目までは全員の平均値、それ以降は行動が異なるため個人値を検討した。

測定項目とその方法(器具)はそれぞれ以下に示す通りである。

(1) 心拍数(HR): 触診法

(2) 動脈血酸素飽和度(SaO₂): パルスオキシメーター (Pulsox-5, ミノルタ社製)

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

(3) 体温(BT)：体温計

(4) 血色素量(Hb)：ヘモグロビン
フォトメーター（ヘモキュー，
Hemocue AB社製）…※BC以降で
隔日に測定した。

(5) 急性高山病重症度スコア

(AMS-s)

3. 結果と考察

1) カトマンズからBC 2日目までの行
程における生理的応答（平均値）

動脈血酸素飽和度（ SaO_2 ）は高度の上
昇に伴い明らかな低減を示した。一方心
拍数(HR)および体温(BT)は、 SaO_2 とほ
ぼ鏡像的に高度の上昇とともに増加した
（図9）。これらはそれぞれ低酸素に対
する適応の現れであるが、この増減の変
化を高度との関係からみるとまずニエラ
ム（3,700m）からシガール（4,300m）
にかけて急変していることがわかる。ま
た高山病の自覚症状を示すAMS-sの変
化も同様な傾向を示し（図10）、この高
度がある種の臨界点になっていることが
示唆された。これは低圧シミュレーター
内での4,000m前後で生理的応答が急変
するとした先行研究の結果とも一致して
いる。ギャンツェ（4,000m）以降では高
度の上昇にも関わらず生理的応答を示す
各指標に顕著な変化は認められなかった。
このことは低酸素環境に対する生理的応
答の軽減を意味し、高所順応の獲得を示
唆しているものと考えられた。

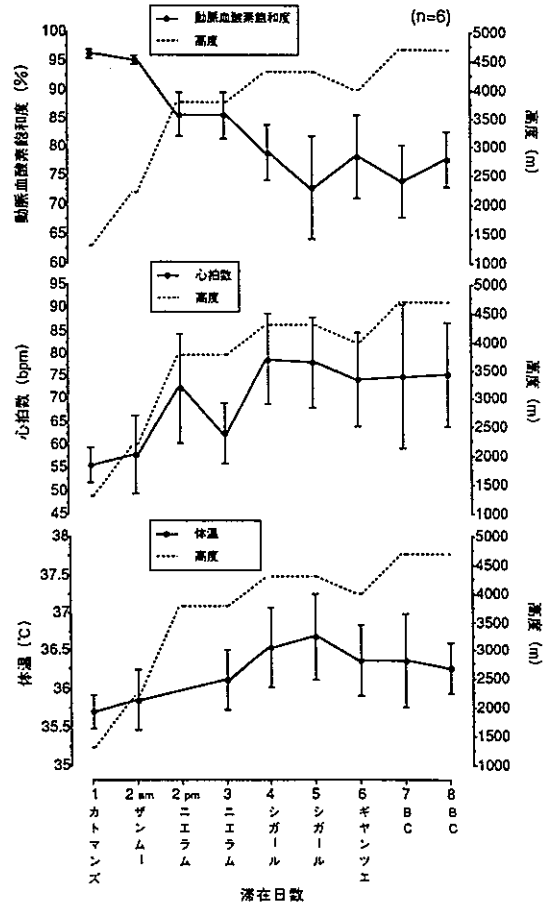


図9 カトマンズからBC 2泊目までの SaO_2 、
心拍数、および体温の変化と滞在高度

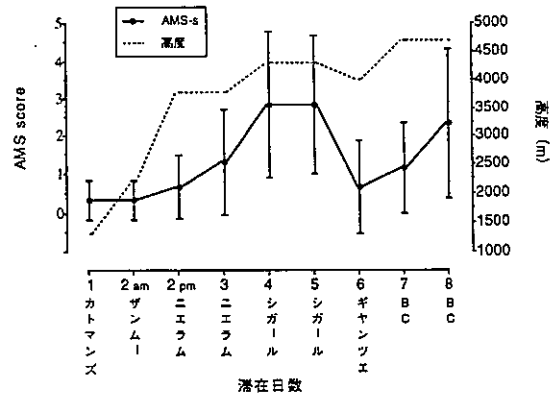


図10 カトマンズからBC 2泊目までのAMS-s
の変化と滞在高度

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

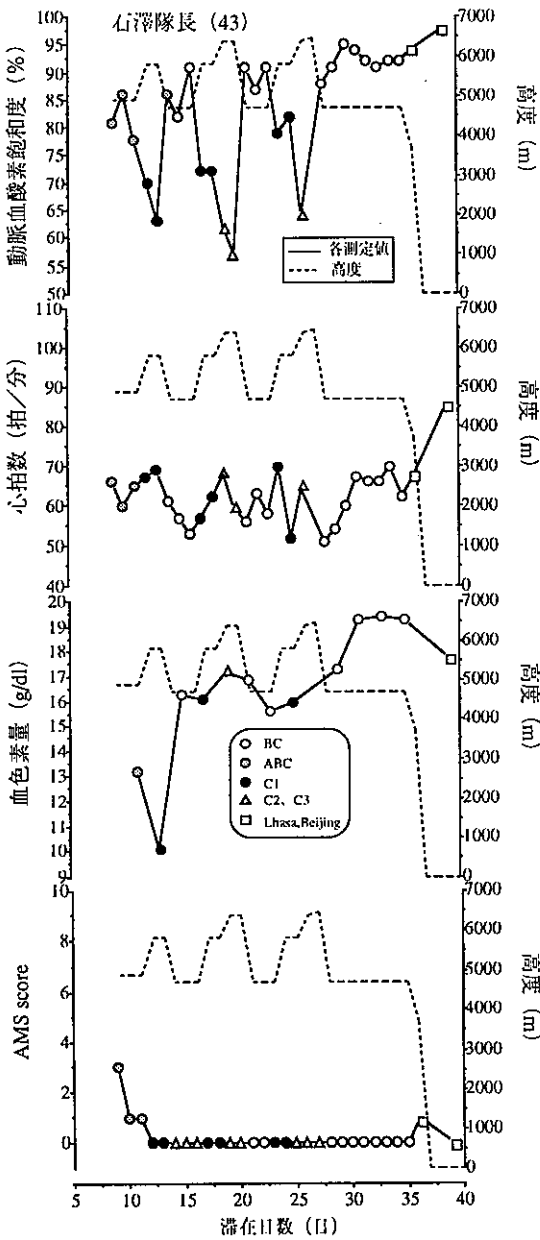


図11 ベースキャンプ3泊目以降の動脈血酸素飽和度、心拍数、血色素量、およびAMSスコア（石澤隊長）

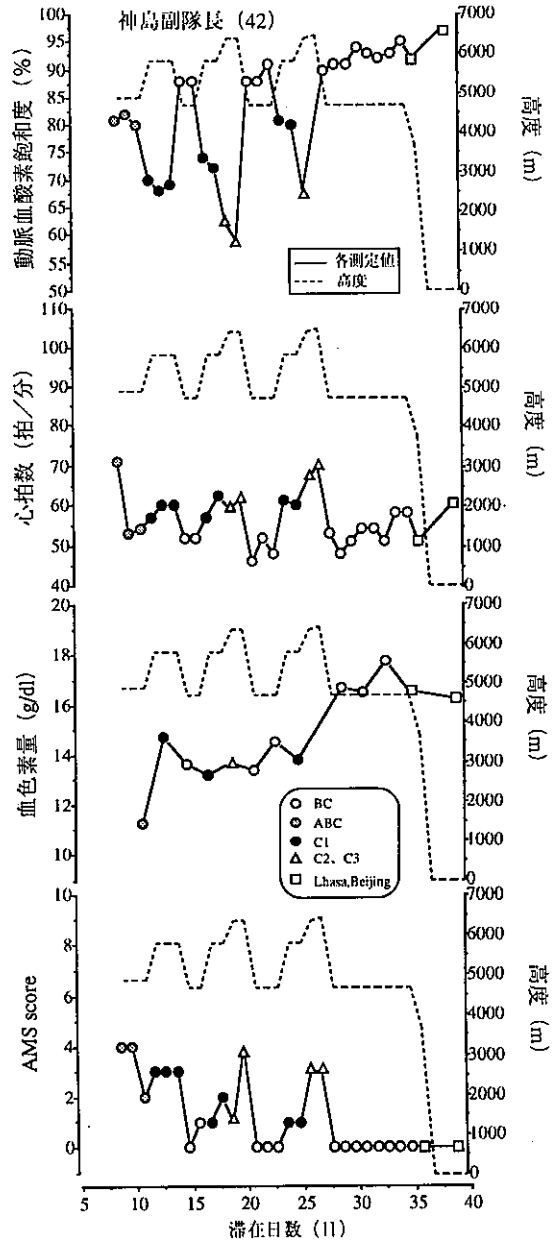


図12 ベースキャンプ3泊目以降の動脈血酸素飽和度、心拍数、血色素量、およびAMSスコア（神島副隊長）

2) BC 3日目以降の行程における生理的応答

隊員6人のBC3泊目以降の登山時生理的応答およびAMS-sの経日的変化を図11~16に示した。各隊員とも同一高度での SaO_2 およびHbの増加とHRおよびAMS-sの低減傾向が認められ、全

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

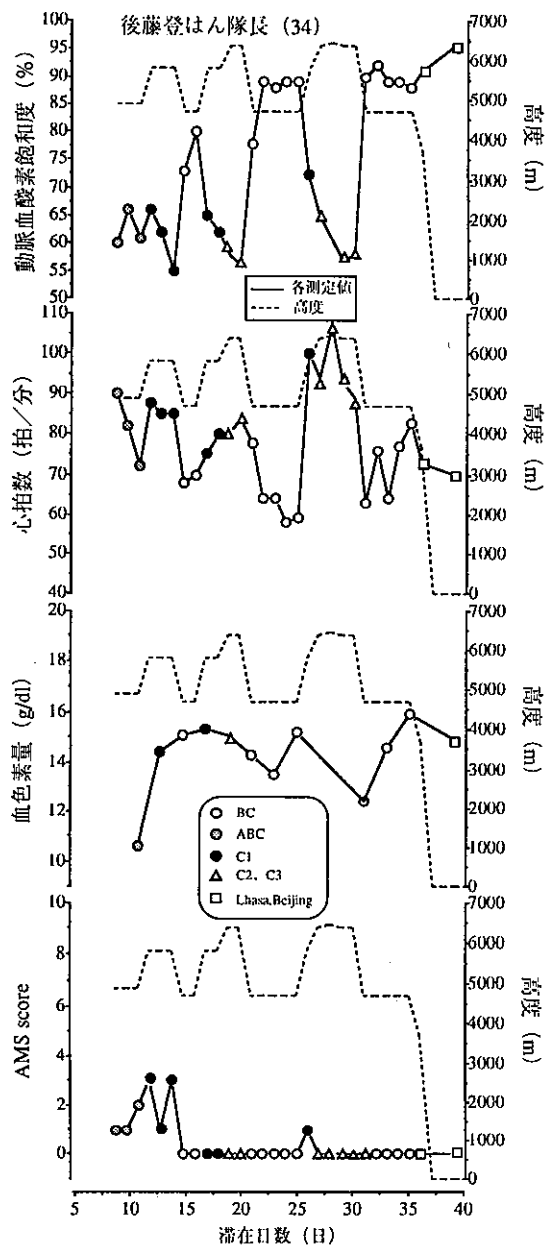


図13 ベースキャンプ3泊目以降の動脈血酸素飽和度、心拍数、血色素量、およびAMSスコア (後藤登攀隊長)

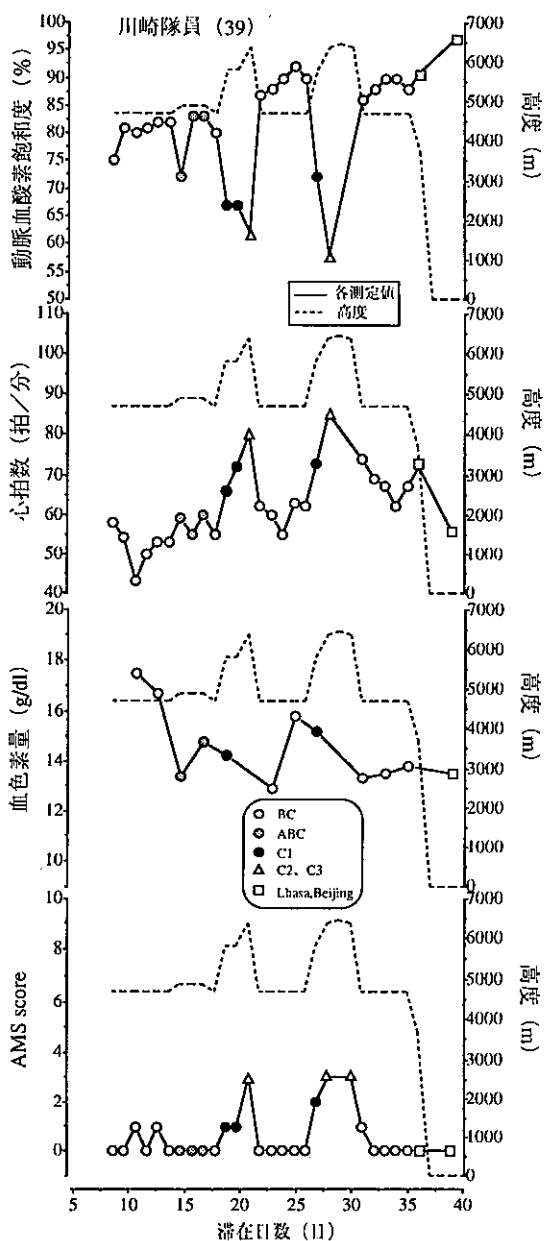


図14 ベースキャンプ3泊目以降の動脈血酸素飽和度、心拍数、血色素量、およびAMSスコア (川崎隊員)

体的には15日以降に高所順応が獲得されているものと考えられる。

このように登山活動中の全行程においてAMSの発症が軽減して全員の登頂が達成された。この原因の一つとしてHctの値が約48%と比較的低値であったことが考えられる。これは、研究1

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

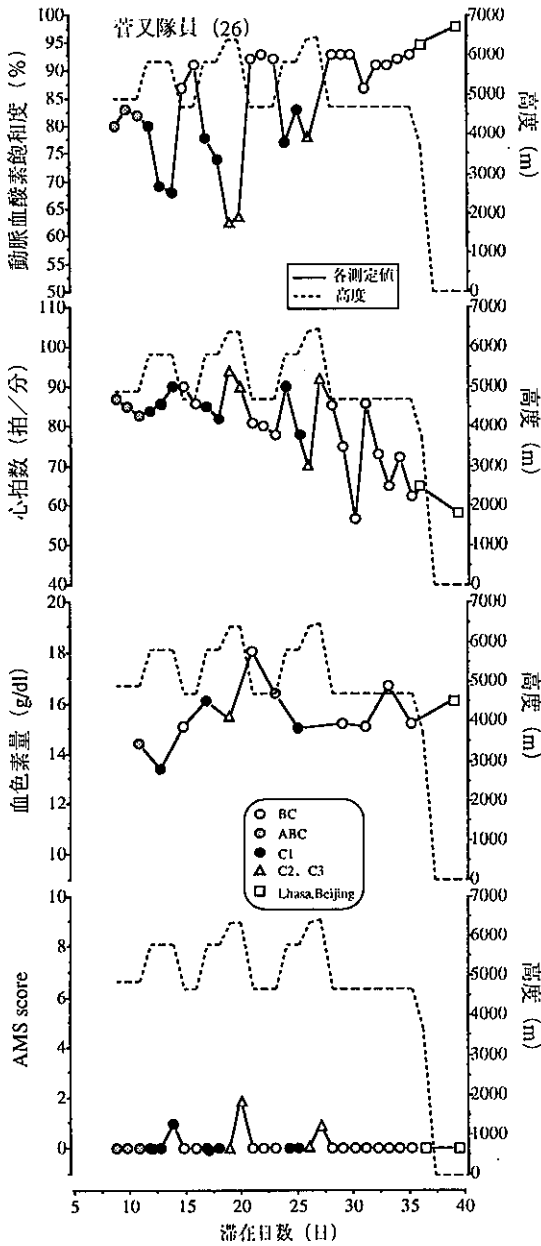


図15 ベースキャンプ3泊目以降の動脈血酸素飽和度、心拍数、血色素量、およびAMSスコア（菅又隊員）

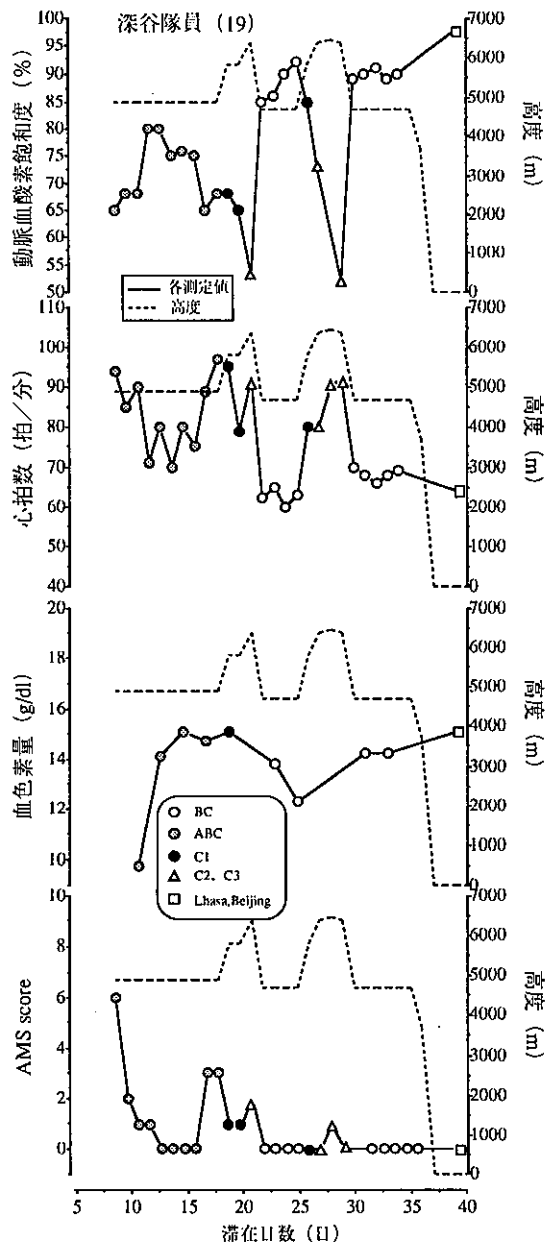


図16 ベースキャンプ3泊目以降の動脈血酸素飽和度、心拍数、血色素量、およびAMSスコア（深谷隊員）

で行った登山後の血液性状の分析結果（表4）から高色素性適応により粘性を低下させ血流循環の促進が生じていたものと推察された。

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

IV 研究(3)：ニンチンカンサ峰登頂アタック時の心拍応答

石澤隊長および神島副隊長については、C2(6,400m)を8月17日午前9時30分に出発し午前11時56分にC3(6,470m)に達し、午後5時37分に登頂するまでの約8時間にわたる登山時の心拍数変化を検討した。

また後藤登攀隊長についてはC3(6,470m)を8月19日午前6時30分に出発し午後12時10分に登頂するまでの約5時間半にわたる登山時の心拍数変化を検討した(図17)。

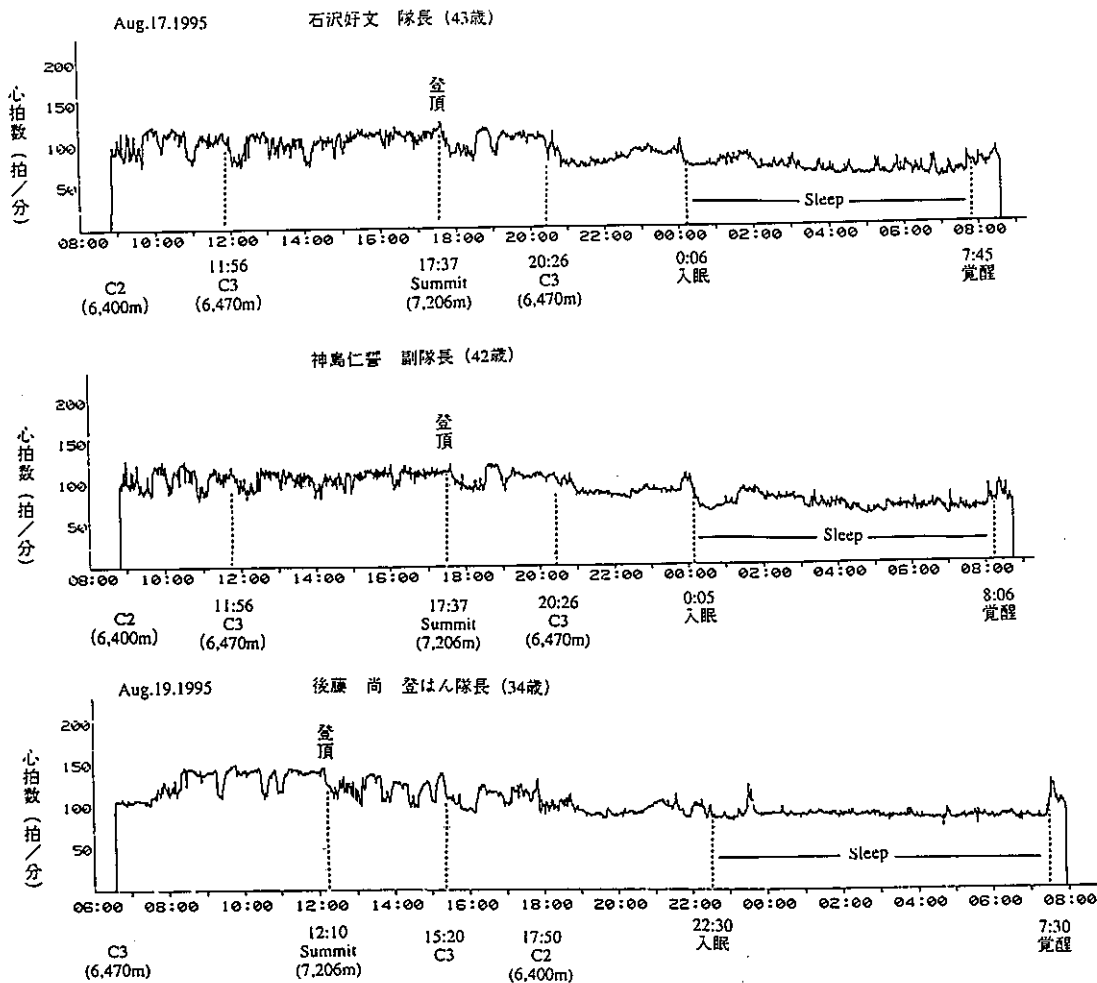


図17 石澤隊長、神島副隊長および後藤登攀隊長の登山活動中における心拍数の変化

石澤隊長および神島副隊長は共に登攀中の平均心拍数は120~125拍/分を示し、心電図上にST降下などの異常は認められなかった。

また後藤登攀隊長についても登攀中の心電図上に異常は認められず、登攀中の平均心拍数は140~150拍/分を示した。

5. 高所登山と低圧環境トレーニング

これら登頂者3人の下山時の心拍数は約100～110拍/分を示し、C3およびC2における睡眠時の心拍数は90～100拍/分と比較的頻脈傾向にあった。

V まとめ

- 1) 本高所順応トレーニングおよび高所登山は、高所環境における安静および運動時の動脈血酸素飽和度の増加をもたらした。また長期の高所滞在にも拘らず血球容積比(Hct)が、約60%の報告値よりも明らかに低値の約48%を示したことは、血液粘性の低減による血液循環の促進が示唆される。これらの成果は本高所順応トレーニングによりもたらされたものと思われ、登山時の急性高山病の発症予防に貢献したものと考えられる。
- 2) 核磁気共鳴装置(MR)による大腿部組成の測定から、高所登山により脂肪量は変化しないが筋量が著明に減少することが明らかになった。また、大腿筋の酸化的代謝能の亢進する傾向が認められた。
- 3) 3人のニンチンカンサ峰登頂者の登攀中の心電図を連続的にホルター心電計により測定した結果、心電図上に異常は認められなかった。また、登攀中の平均心拍数は2人は120～125拍/分であり、他は140～150拍/分を示した。

VI 謝辞

ニンチンカンサ峰登攀にさいし、カトマンズおよびラサからの高所順応トレッキングを始めとして、全隊員の方が毎朝起床時の生理的・心理的項目の測定を正確かつ着実に実施して頂き、さらに血液性状測定のための採血にも協力して頂きましたことに対し厚くお礼申し上げます。

また、本高所順応トレーニングおよび登山中・後の生理的応答に関する研究にさいし、献身的に協力してくれた本学運動生理学研究室の遠藤洋志、水野 康、岡本三郎、三村達也、胡 楊、柳 亘の各氏および大学院医学研究科の高橋英幸氏に感謝したい。

(筑波大学教授〈運動生理学〉)