

栃木県高体連中国崑崙ムージュ・ムズターグ峰登山隊員への 高所順応トレーニングの経緯と成果をめぐって

浅野 勝己

I はじめに

1990年7月下旬から8月下旬にわたる中国崑崙の未登峰ムージュ・ムズターグ峰への登山活動の中で、8月18日に渡辺隊長および石沢登攀隊長が6,638mの頂上に立たれて永年の宿願であった初登頂の夢を達成され、しかも24人の隊員全員が無事に帰還されましたことを心よりお慶び申し上げます。

まさに6年前の1984年8月2～8日にかけてのインド・ヒマラヤCB31峰(6,096m)に隊員の16人全員が初登頂を遂げられたのに次ぐ快挙であり、登山部創立30周年記念事業としてこの上ない成果であったと存じます。

このCB31峰への遠征に際し、7月上旬の出発の直前3ヶ月間に、当大学低圧シミュレーターにより4,000m～6,000m相当高度での11回にわたる高所順応トレーニングを実施し高所障害の予防に貢献させて戴きましたが、今回のムージュ・ムズターグ峰への登攀に際しましても、4月より約3ヶ月間にわたり4,000mから7,000m相当高度において計15回の高所順応トレーニングを実施することができました。ほぼ全員の隊員の方々が何回かの高所順応トレーニングに参加されましたが、特に6人の隊員については、トレーニング前、中およびトレーニング後さらに登攀時と帰国後にわたり生理的および心理的な指標について詳細な測定をさせて戴くことができましたので、高所順応トレーニングの高所障害予防への効果をめぐってその成果をご報告いたします。

II 高所順応トレーニングに関する研究方法

(1) 隊員の体力特性：

本研究に参加した健常な成人男子21～51歳(平均35.5歳)の6人の隊員、すなわち菅又(H.S.)、後藤(H.G.)、神島(Z.K.)、石沢(Y.I.)、渡辺(Y.W.)および茂呂(S.M.)の各隊員のトレーニング前の身長、体重および4,000m相当高度での最大酸素摂取能力($\dot{V}O_2\max$)を表1.に示した。

5. 高所医学, 運動生理

表1. 隊員の年齢, トレーニング前の身長, 体重
および4,000m高度での最大O₂摂取能力

Subjects (male)	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	$\dot{V}O_{2max}$ (l/min)	$\dot{V}O_{2max}/Weight$ (ml/kg/min)
H.S.	21	167.2	61.4	2.16	35.2
H.G.	28	175.9	71.7	2.59	36.1
Z.K.	36	178.6	70.9	2.16	30.4
Y.I.	38	179.5	72.0	2.20	30.6
Y.W.	39	168.5	68.2	2.71	39.7
S.M.	51	167.5	64.7	(1.44)	(22.2)
Mean	35.5	172.9	68.1	2.36	34.4
S.D.	9.4	5.3	3.9	0.24	3.5

(2) トレーニング前後, 登山中および帰国後の生理的指標の測定:

トレーニング前(4月15日), 後(7月6日)および下山後の帰国1週間後(9月8日)に常圧下で形態計測, 採血を行い, 次いで4,000m相当高度で最大運動を行った。最大運動は, モナーク社製自転車エルゴメーター(50rpm)を用い, 最初50Wから始め, 150Wまでは3分毎に25Wずつの, 150Wからは3分毎に12.5Wずつの多段階漸増負荷法により, 最大下および最大運動時のO₂摂取量($\dot{V}O_2$)および血中乳酸濃度(La)の分析, さらに血圧(BP), 心拍数(HR), 動脈血O₂飽和度(SaO₂)および主観的運動強度(RPE)などを測定した(図1.)。

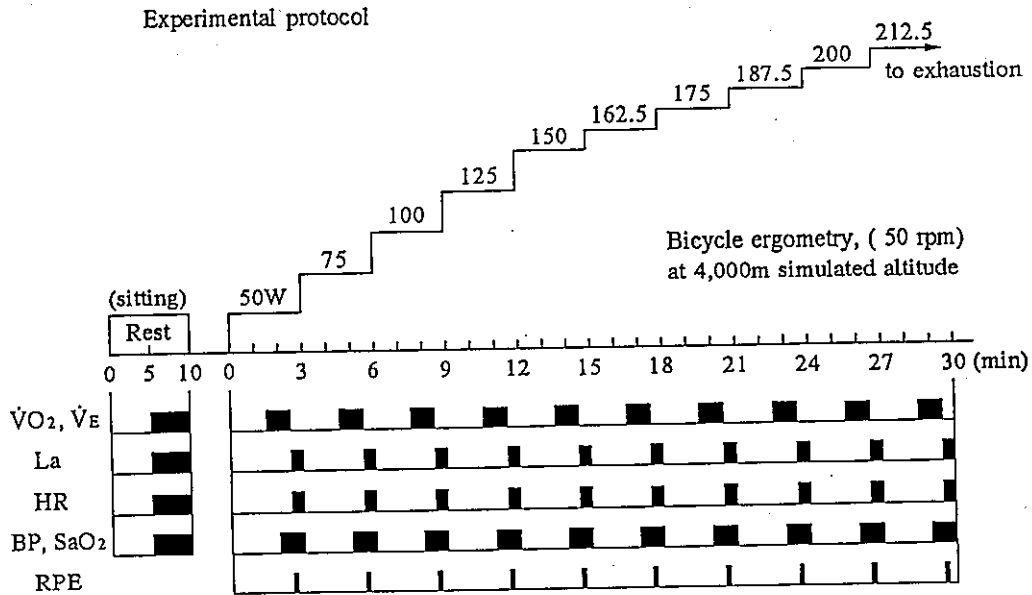


図1. 4,000m相当高度における自転車ペダリングによる負荷漸増
最大運動テストのプロトコール

帰国時(8月31日)には成田空港で形態計測および採血を行った。また登山期間中(7月27日～8月23日)の基礎体温(BBT), 基礎心拍数(BHR), 基礎呼吸数(BRR), 基礎血圧(BBP)および高山病症状について毎日起床時に各隊員に測定記録して戴いた。

(3) 高所順応トレーニングの内容:

トレーニングには自転車エルゴメーターを用い, 1分間に50回転で, 30分間のペダリング運動を4,000～7,000m高度にわたり週1回行った。運動強度は, 高度4,000mでは, トレーニング前に4,000mで測定した最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)の60%, 70%および80%の3種の強度で行った。一方, 5,000m以上の高度では, 高度1,000m上昇するごとに最大酸素摂取量が3%減少するものと仮定して, 各高度における予測 $\dot{V}O_{2max}$ を算出し, 同様にその60%, 70%および80%の各相対強度を設定した。

トレーニング高度は, 4,000m, 5,000m, 5,500m, 6,000m, 6,700mさらに7,000mの6高度で, 6,700mおよび7,000m以外は, 各高度について3回ずつ60%, 70%および80% $\dot{V}O_{2max}$ の強度を用いて, 計15回のトレーニングを行った。運動中, 5分毎に主観的運動強度(RPE)を聴取した。また胸部双極誘導による室外での心電図監視装置により, 心電図異常の有無および心拍数のチェックを行い, さらに室内の検者が隊員の生理的・心理的状況に十分な注意をはらった。

III 結果および考察

(1) 高所順応トレーニングおよび登攀による高地順応効果:

5. 高所医学, 運動生理

高所順応トレーニングおよび登攀による高地順応の呼吸循環代謝系機能に及ぼす影響を明らかにするために、4,000mにおける最大下および最大運動時の呼吸、心臓循環系、血中乳酸応答および主観的運動強度を測定した。さらに有酸素的作業能の指標として $\dot{V}O_2\max$ 、OBLA-W.L. (血中乳酸蓄積開始点における運動強度 (W))、総仕事量 (疲労困憊に至るまでに遂行した仕事量; Total work (kJ))および、Time to exhaustion (疲労困憊に至るまでの作業時間 (min)) さらに主観的運動強度 (RPE) をトレーニング前後および下山後について比較検討した。

① 高度4,000mにおける最大有酸素的作業能 ($\dot{V}O_2\max$) に及ぼす影響:

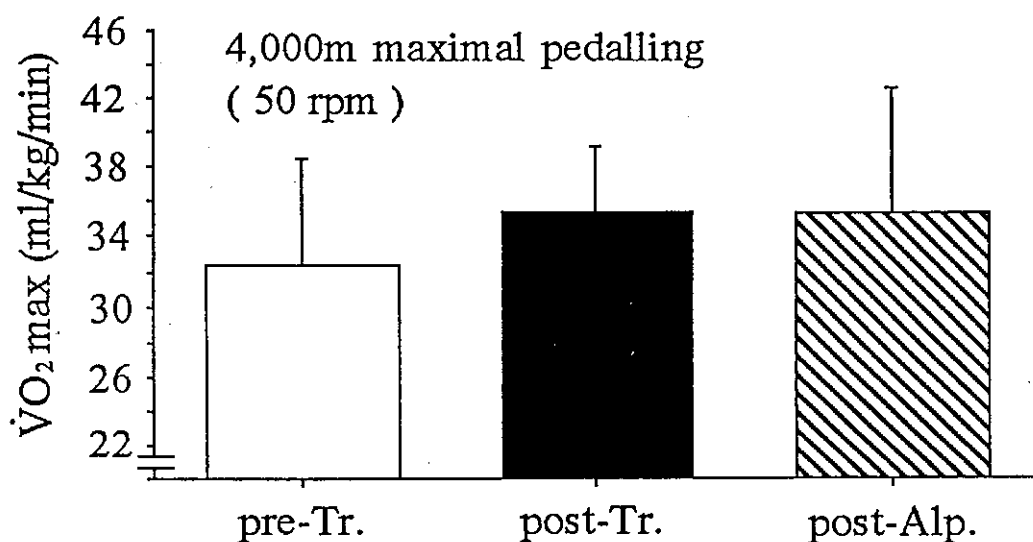


図2. 高所順応トレーニングの前、後および下山後の4,000m高度における最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) の比較

図2. は、高度4,000mにおける体重当りの最大酸素摂取量 (ml/kg/min) について、トレーニング前後および下山後で比較したものである。トレーニングにより5.5%の増加傾向を示したが、総計的に有意な差は認められなかった。また下山後の値は、トレーニング後の値とほぼ同等であり、高所順応トレーニングの影響を保持していることが認められた。

② 4,000mにおける最大下および最大運動時の血中乳酸濃度 (La) に及ぼす影響:

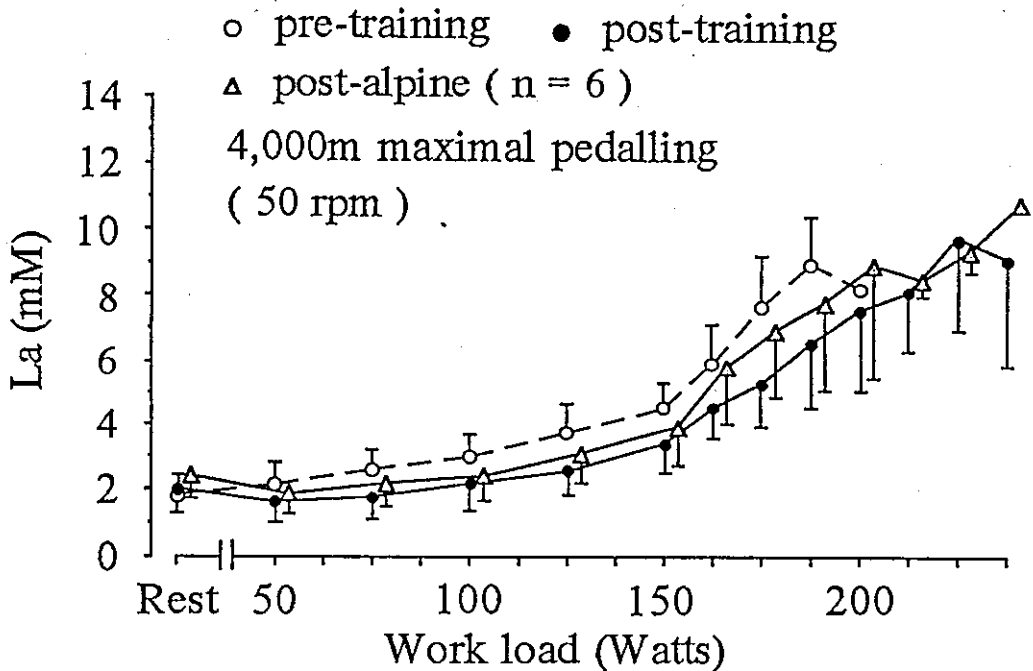


図3. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の4,000m高度における運動時血中乳酸濃度 (La) の比較

最大下および最大運動時の血中乳酸応答を図3. に示す。横軸は運動強度 (Work load; 1 Watts=6.12kpm/min), 縦軸は血中乳酸濃度 (La) である。濃度の単位mMはmmol/lを示す。白丸の点線がトレーニング前, 黒丸の実線がトレーニング後, 三角の実線が下山後の値を示している (以後, 同様である)。また各々の印から出ている棒は標準偏差を示す。運動強度が増加するにつれて血中乳酸濃度は指数関数的に増加するが, この曲線は, トレーニング前に比較してトレーニング後に明らかに右方にシフトしていることがわかる。すなわち, 有酸素的作業能の指標として用いたOBLA-W.L.は, トレーニング前の 132.3 ± 20.8 (W) から, トレーニング後の 161.1 ± 17.8 (W) へ統計的に有意な増加 ($p < 0.01$) を示した。

すなわち, 同じ絶対運動強度に対してトレーニング後に血中乳酸濃度が低下を示したのである。この原因としては, 運動強度の増加に伴って筋肉内での乳酸の産生が抑制されたか, あるいは血液中からの乳酸の除去が促進されたか, あるいはその両者が同時に生じたことが考えられる。これについては高所順応トレーニングにより, 第一のエネルギー源としてのグリコーゲンよりも遊離脂肪酸によるエネルギー供給機能への移行が起こったことが一つの原因と考えられる。OBLA-W.L. (W) は, 通常, 血中乳酸濃度が4 mMでの運動強度を用いる。前回のインド・ヒマラヤCB31峰のトレーニング時と比べて異なるのは, 前回は平地で最大運動を行っており,

5. 高所医学, 運動生理

今回はより酸素分圧の低い4,000mで行ったことから, トレーニング前後での血中乳酸応答の差がより明確に出たものと思われる。一方, 下山後の値はトレーニング後と同等, もしくはトレーニング後の値よりも150W以降でやや高い値を示す傾向にあった。

③ 4,000mにおける最大下および最大運動時の心拍数および血圧応答に及ぼす影響:

最大下および最大運動時の心拍数 (HR) 応答, 収縮期血圧 (SBP) および拡張期血圧 (DBP) 応答を, それぞれ図4. および図5. に示す。運動強度が増加するにつれて, 心拍数および収縮期血圧は増加する傾向を示し, 拡張期血圧は減少する傾向を示した。トレーニング前後および下山後と比較すると, トレーニング後に運動時心拍数は同一強度に対し, 10~20拍, 収縮期血圧は10~20mmHgの減少傾向を示した。これに対し拡張期血圧は約150Wまでは変化は認められなかったが, 150W以上ではトレーニング後および下山後に漸減傾向を示している。トレーニング後の運動時心拍数, 収縮期血圧の減少傾向は, 心筋の酸素消費量と相関が高いとされるPRP (収縮期血圧×心拍数; Double product) の減少を結果としてもたらし, このことは最大下運動での心筋への酸素供給の効率化を示唆するものである。一方, 下山後の心拍数はトレーニング前に比べ低下傾向にあるが, 約150W以上ではトレーニング前の値に近似する値を示した。

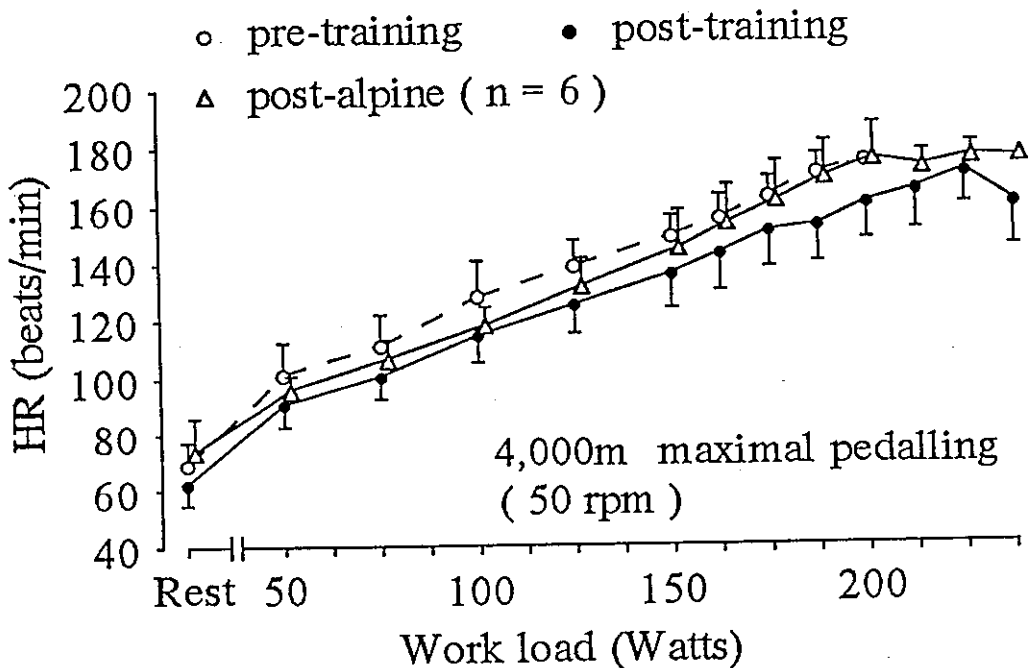


図4. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の4,000m高度における運動時心拍数 (HR) の比較

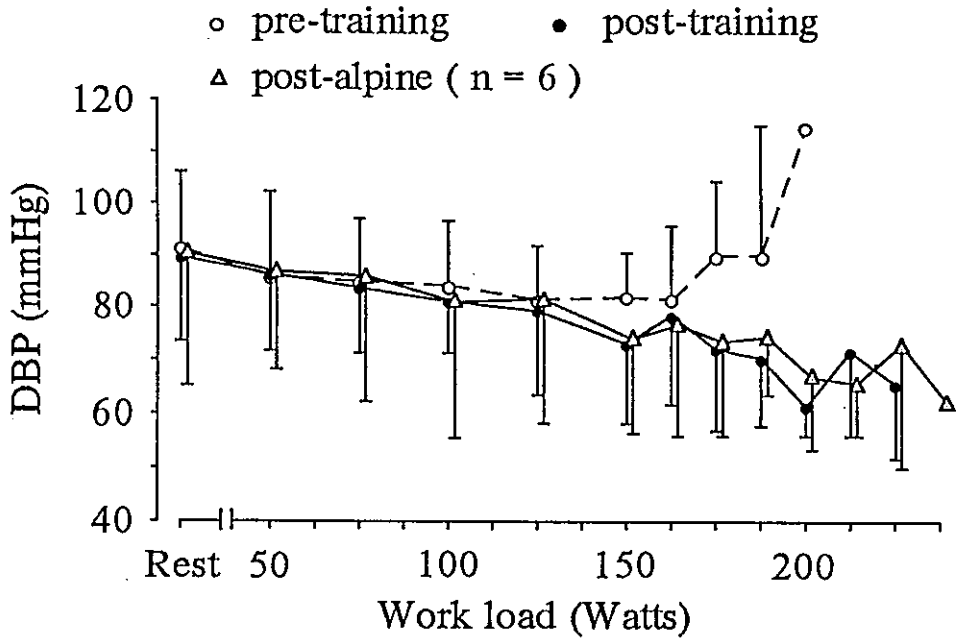
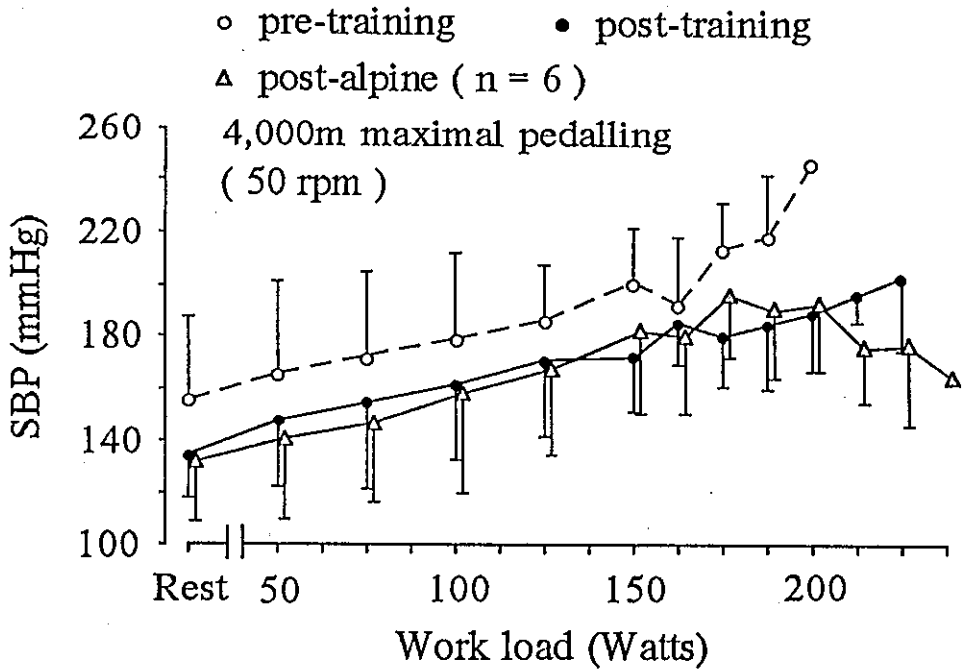


図5. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の4,000m高度における運動時収縮期血圧 (SBP) および拡張期血圧 (DBP) の比較

5. 高所医学, 運動生理

④ 4,000mにおける最大下および最大運動時の心理的応答および有酸素的作業能に及ぼす影響

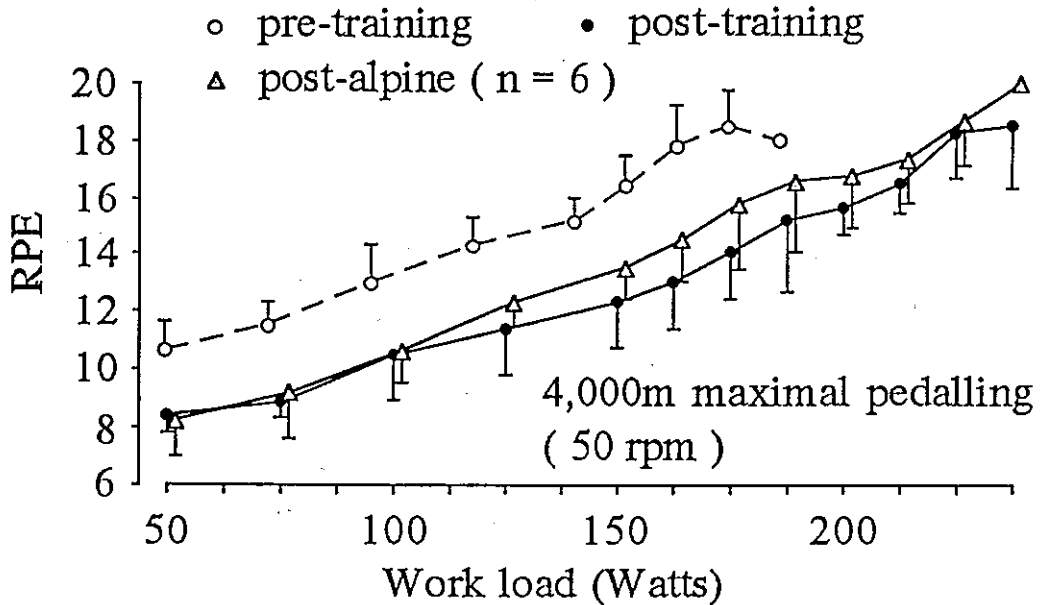


図6. 高所順応トレーニングの前、後および下山後の4,000m高度における運動時主観的運動強度 (RPE) の比較

最大下および最大運動時の主観的運動強度をトレーニング前後および下山後で比較したものを図6. に示す。4,000mの低圧低酸素環境で運動を行うことから、ここでの主観的運動強度は、低圧環境の負荷および運動両者の相加的ストレスに対する心理的応答を反映するものとなっている。この図はトレーニング後および下山後における、低圧環境下および同一運動強度に対する感覚的ストレスの軽減を示唆している。

また $\dot{V}O_{2max}$ よりも有酸素的作業能と相関が高いとされるOBLA-W.L.および有酸素的作業能の指標としての疲労困憊に至る点までの最大作業時間と総仕事量は、いずれもトレーニング後に有意な増加を示した(図7.)。さらに、下山後もトレーニング前に比べ最大作業時間と総仕事量では有意な増加を示し、OBLA-W.L.は増加傾向にあった。このような高所順応トレーニング後の有酸素的作業能の増大は、登山活動時の呼吸循環系予備力の向上に貢献し、高所障害の予防に資するものと考えられる。

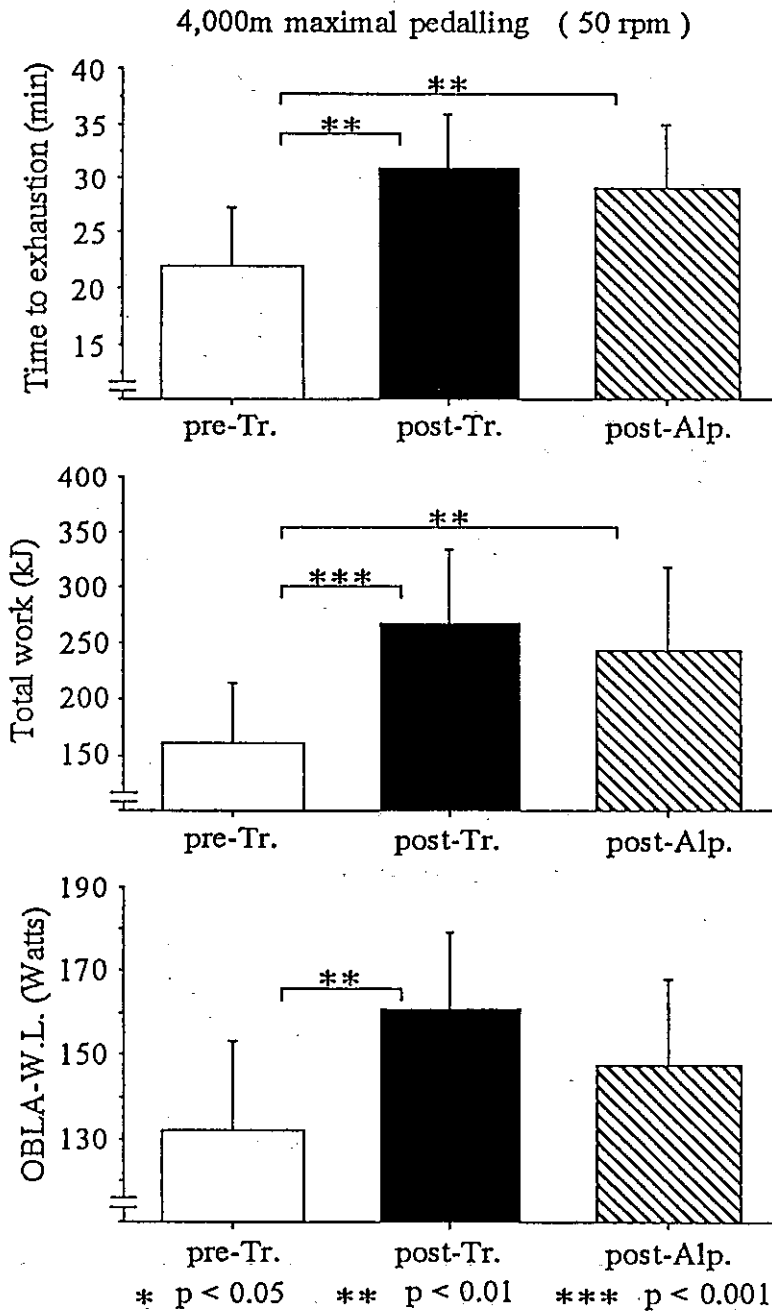


図7. 高所順応トレーニングの前、後および下山後の4,000m高度における最大作業時間、総作業量および無氣的作業閾値時作業量 (OBLA-WA) の比較

5. 高所医学, 運動生理

⑤ 4,000mにおける最大下および最大運動時の換気応答に及ぼす影響:

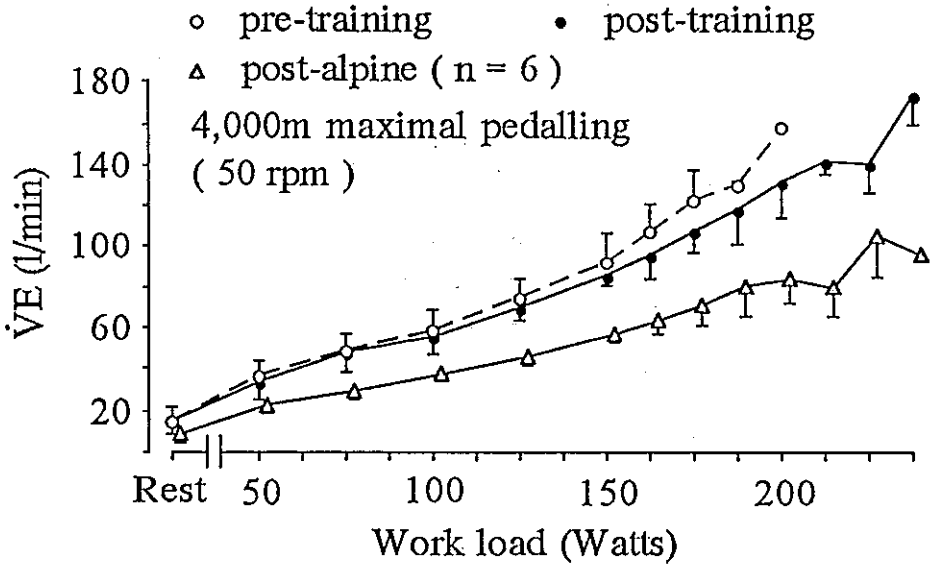


図8. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の4,000m高度における ($\dot{V}E$) の比較

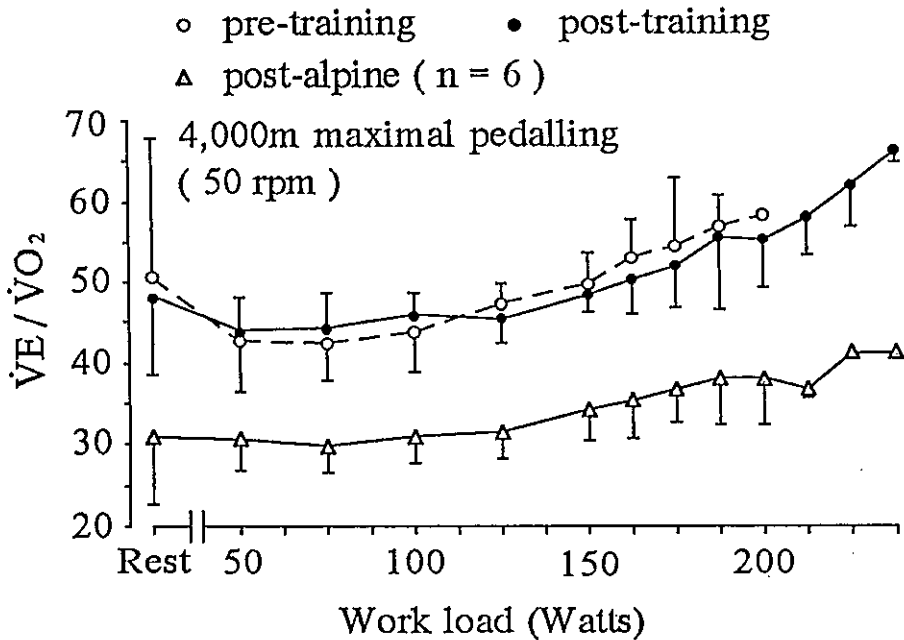


図9. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の4,000m高度における運動時 O_2 換気当量 ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$) の比較

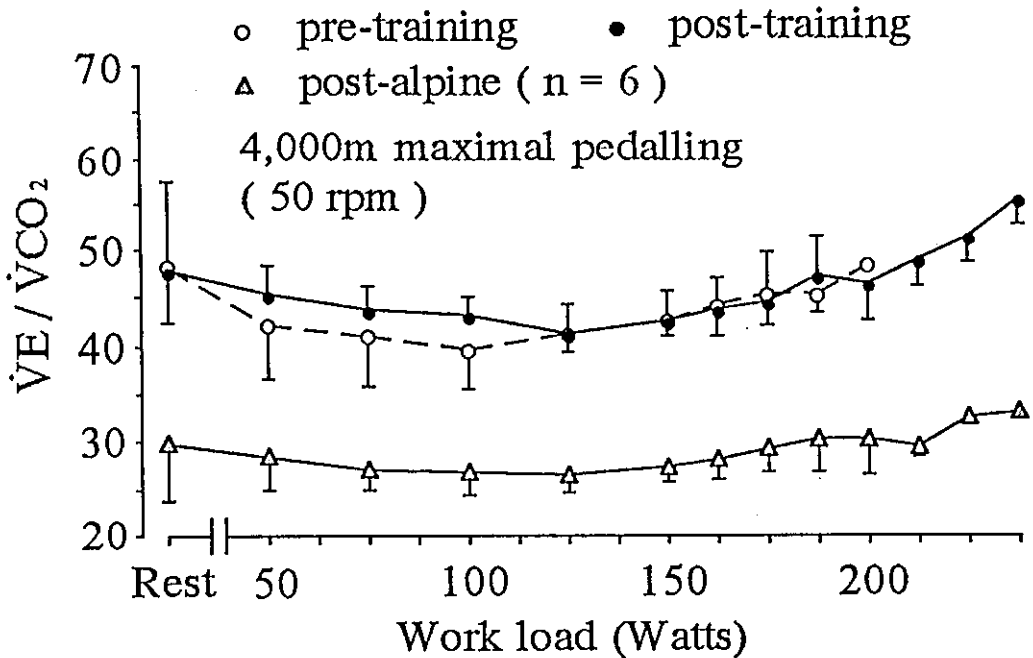


図10. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の4,000m高度における運動時 CO_2 換気当量 ($\dot{V}E / \dot{V}CO_2$) の比較

最大下および最大運動時の換気応答をトレーニング前後および下山後について比較したものが図8~10.である。図8., 図9. および図10. は, それぞれ運動強度の増加に伴う換気量 ($\dot{V}E$), 換気当量 ($\dot{V}E / \dot{V}O_2$) および炭酸ガス換気当量 ($\dot{V}E / \dot{V}CO_2$) の変化を示している。

トレーニング前後では明らかな変化は認められなかったが, トレーニング前, 後の値に比較して, 下山後には安静, 最大下および最大運動時の応答はいずれも著しい減少を示した。酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) に大きな変化が認められなかったことから, これらの変化は, 換気量の減少に起因し, またこの減少は高地順応による換気の抑制によるものと考えられる。さらに下山後の赤血球, ヘモグロビンおよび動脈血酸素飽和度の明らかな増加が認められたことから (図11.), 約1カ月間の高地滞在には, 適応の結果として, 呼吸筋の仕事量の減少および酸素運搬系の効率化がもたされたと考えられる。

⑥ 4,000mでの最大下および最大運動時の動脈血酸素飽和度 (SaO_2) に及ぼす影響:

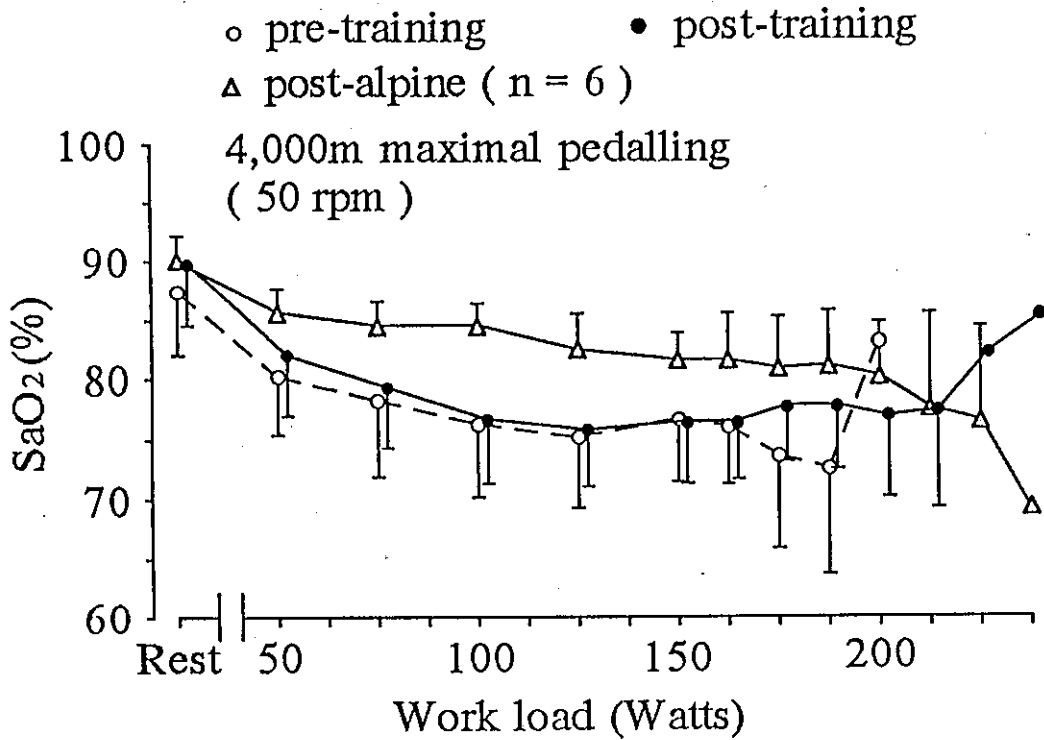
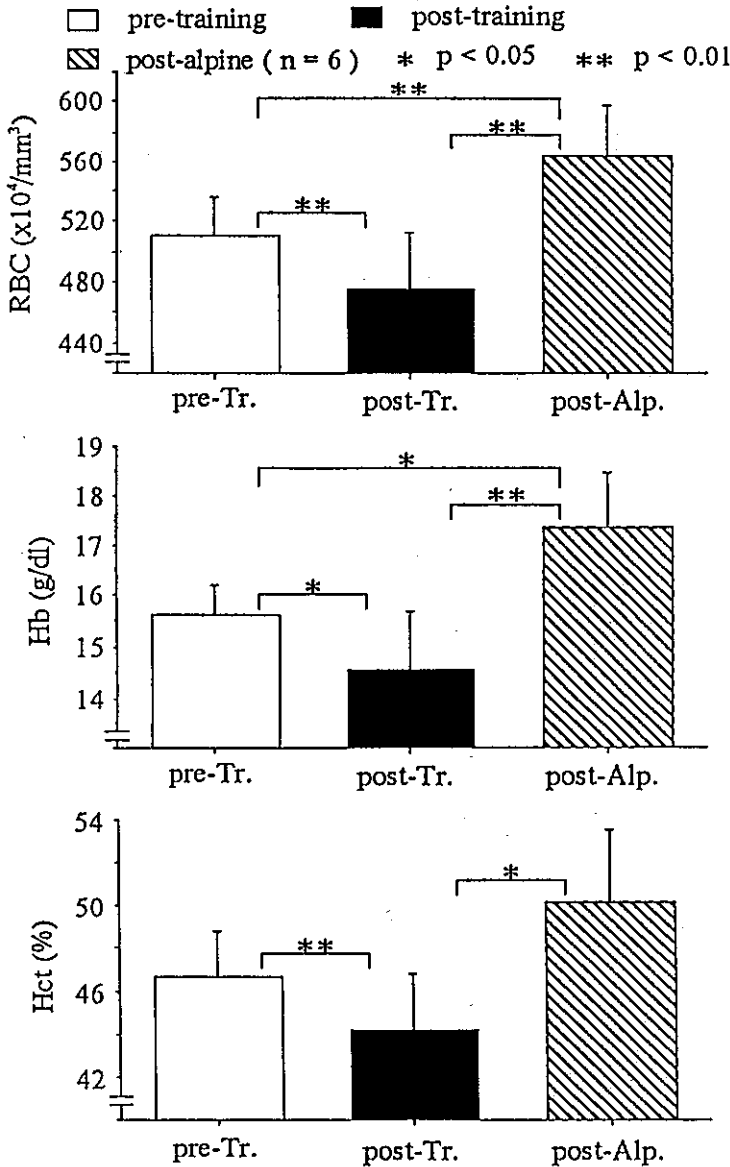


図11. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の4,000m高度における運動時動脈O₂飽和度 (SaO₂) の比較

図11. は, 4,000mにおける最大下および最大運動時の動脈血酸素飽和度 (SaO₂) をトレーニング前後および下山後について比較したものである。トレーニング前後ではほとんど変化は認められなかったが, 下山後には, 特に最大下運動時のSaO₂が約5%以上の増加傾向を示した。これも前述のように高所順化による酸素運搬系の効率化に起因するものと考えられる。

⑦ 高所順応トレーニングおよび高地順化の血液性状に及ぼす影響:



赤血球数, ヘモグロビンおよびヘマトクリットをトレーニング前後および下山後と比較したものが図12. である。高所順応トレーニングにより赤血球数, ヘモグロビンおよびヘマトクリットは, トレーニング前の $511 \pm 26 (\times 10^4/\text{mm}^3)$, $15.6 \pm 0.6 (\text{g}/\text{dl})$ および $46.6 \pm 2.2(\%)$ から $475 \pm 38 (\times 10^4/\text{mm}^3)$, $14.6 \pm 1.1 (\text{g}/\text{dl})$ および $44.2 \pm 2.6(\%)$ へそれぞれ有意な減少を示した。激しいストレスによる赤血球の破壊も考えられるが, これらの変化は, 平地での持続性トレーニングにも認められる血漿量の増加 (心機能, 体温調節機能および筋の代謝機能などを正常に保つための適応現象) によるものと考えられる。

図12. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の常圧下安静時の赤血球 (RBC), 血色素 (Hb) および血球容積比 (Hct) の比較

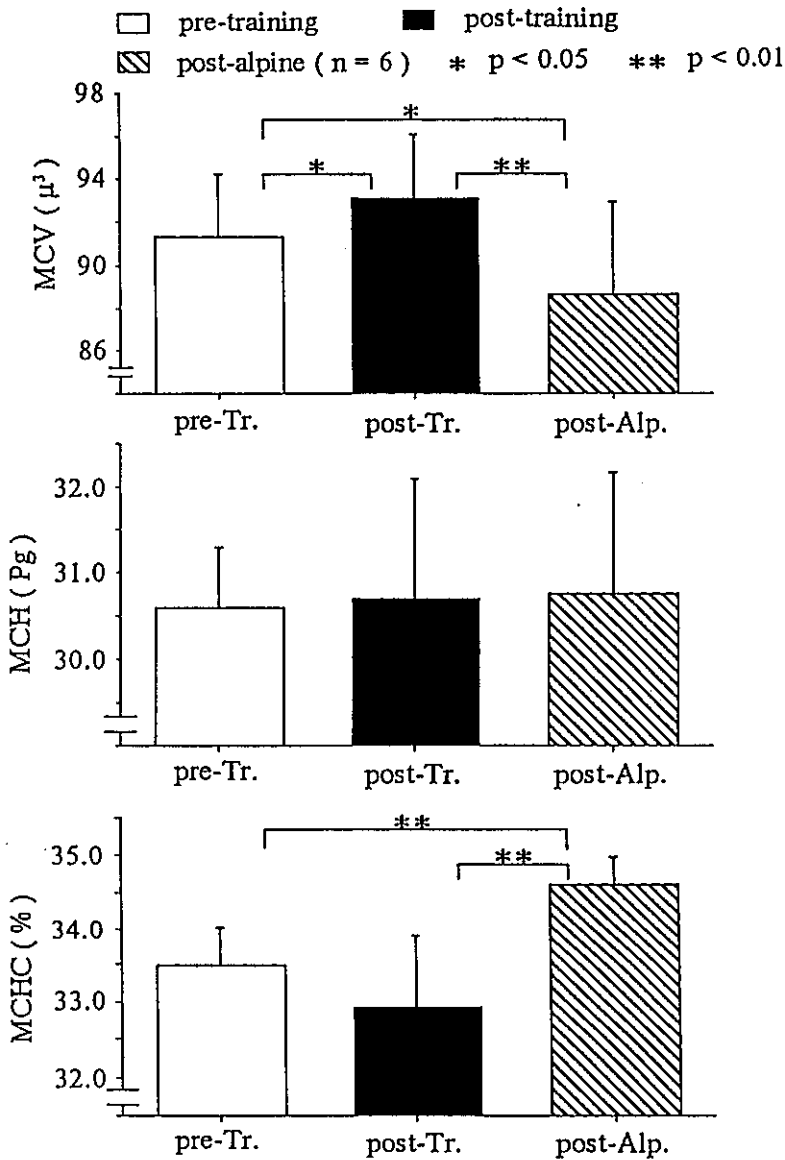


図13. に平均赤血球容積 (MCV), 平均血色素含有量 (MCH) および平均血色素濃度 (MCHC) のトレーニング前後および下山後の比較を示す。MCVはトレーニングにより有意な増加を示したが, MCHおよびMCHCに明らかな変化は認められなかった。一方, 下山後には, MCVが有意に減少し, MCHは変化せず, MCHCは有意な増加を示した。これにより下山後には, 赤血球一個当たりの容積が減少し, 血球成分に占める血色素濃度の割合が増加 (高色素性適応) したことが示唆された。

図13. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の常圧下安静時の平均赤血球容積 (MCV), 平均血色素含有量 (MCH) および平均血色素濃度 (MCHC) の比較

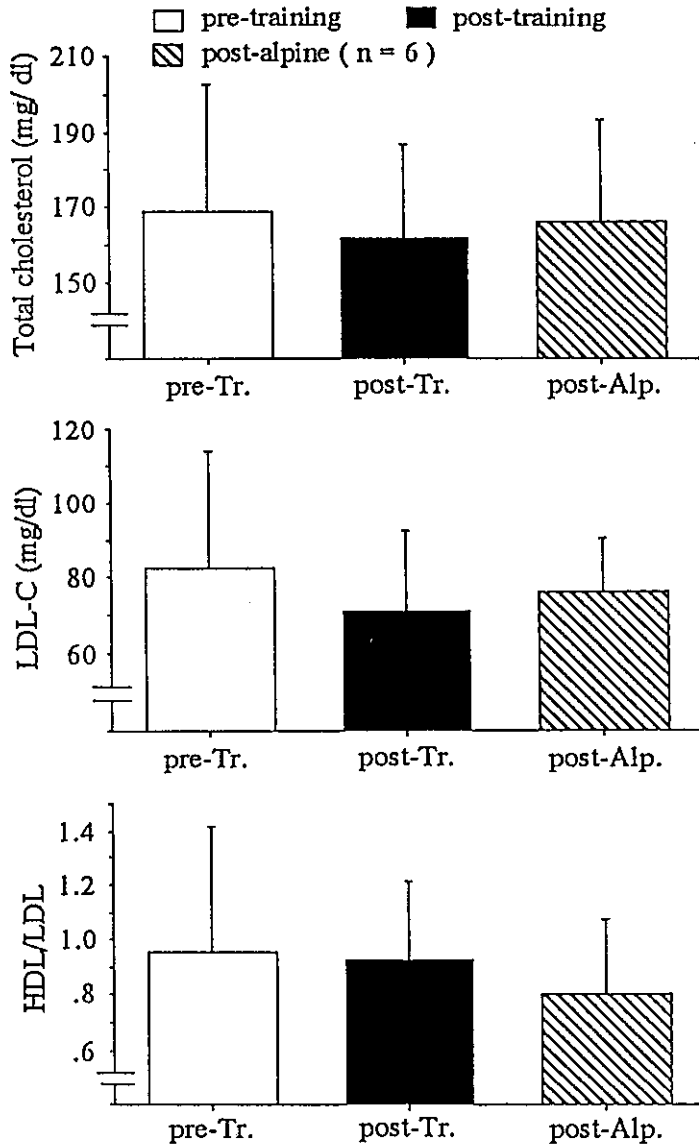


図14. 高所順応トレーニングの前, 後および下山後の常圧下安静時の総コレステロール, 低比重リポ蛋白 (LDL) コレステロールおよび高比重リポ蛋白 (HDL) コレステロール比較

図14. にトレーニング前後および下山後における血清総コレステロール (TC), 高比重リポ蛋白コレステロール (HDL C), 低比重リポ蛋白コレステロール (LDLC) およびHDL C/LDLC比を示す。高所順応による血中乳酸濃度の減少が高所暴露による脂質代謝の高進に起因すると考えられること, 高所住民には冠状動脈疾患の罹患率が低いことおよび高所滞在中の登山者に高比重リポ蛋白コレステロール (HDL C) の増加が報告されていることから, 本研究では, 血清脂質, リポ蛋白コレステロールなど脂質代謝に及ぼす高所順応トレーニングおよび高地順化の影響について検討を試みた。HDL C, LDL CおよびHDL C/LDL C比などは冠状動脈疾患の危険因子として知られてお

5. 高所医学, 運動生理

り, 通常激しい持久性トレーニングを行うことによりこれらの指標の改善される (HDL C ↑, LDL C ↓, HDL / LDL ↑) ことが知られている。しかし, 本研究では, トレーニング後および下山後に TC と LDL C にやや減少傾向が認められたが, 明らかな脂質代謝の高進を示唆する結果は得られなかった。また TC, HDL C および LDL C はいずれも正常範囲にあり, 明らかな変化を示さなかったことは, トレーニングの頻度, 強度および期間さらに高地滞在が脂質代謝に影響を及ぼす閾値に達していなかったとも考えられる。

(2) ムーシュ・ムズターグ峰登攀過程における生理的応答の検討:

高所では, 寒冷および低酸素環境への暴露によるストレスおよび精神的ストレスを蒙ることになる。すなわち体温の低下, 心拍数および呼吸数の増加, 血圧の増大, さらに神経心理的障害などが引き起こされる。前回のインド・ヒマラヤ CB 3 1 峰登攀時と同様に, 1990年7月23日より8月20日に至るムーシュ・ムズターグ峰登攀の全過程において, 早朝起床時の仰臥位での生理的応答を, 基礎体温 (Basal body temperature ; BBT), 基礎収縮期血圧 (Basal systolic pressure ; BSP), 基礎拡張期血圧 (Basal diastolic pressure ; BDP), 基礎心拍数 (Basal heart rate ; BHR) 及び基礎呼吸数 (Basal respiratory rate ; BRR) について測定し, さらに高山病症状についても記録して戴いた。その資料をもとに, 各隊員の生理心理的応答の経日的な変化を登攀行動表と対応して示したものが図15~図20. である。

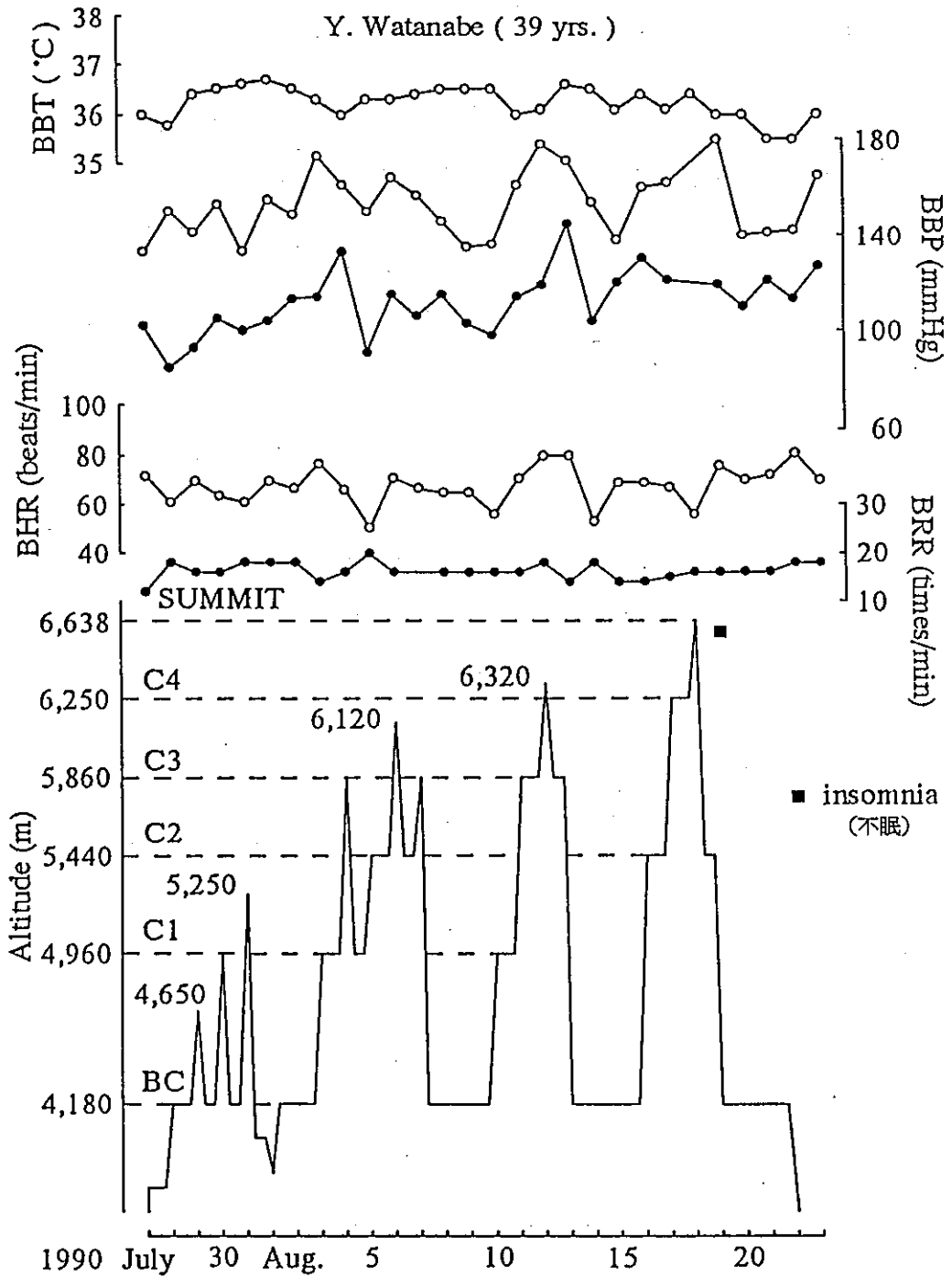


図15. 渡辺隊長の登はん中の生理的応答変化

5. 高所医学, 運動生理

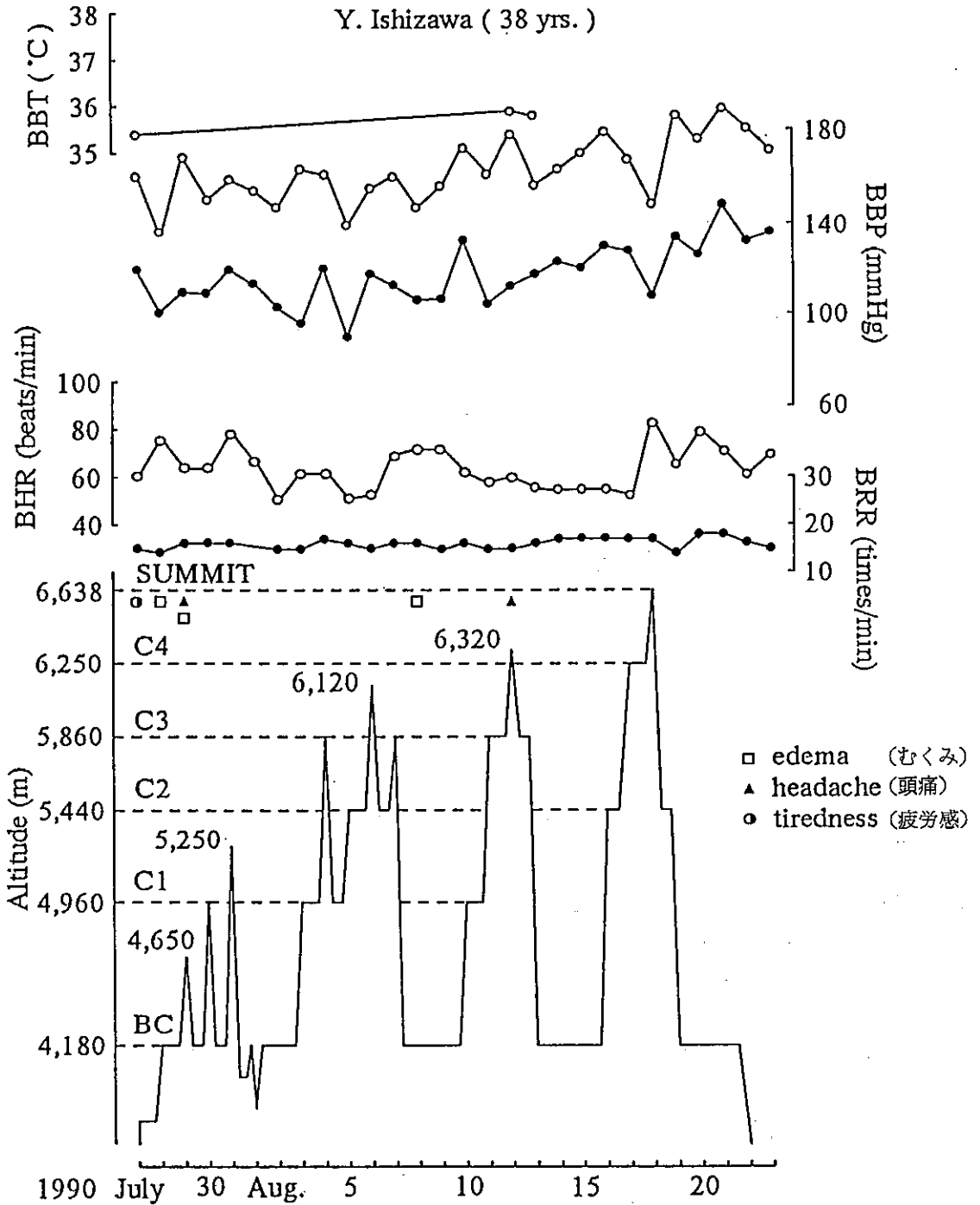


図16. 石沢登山隊長の登山中の生理的応答変化

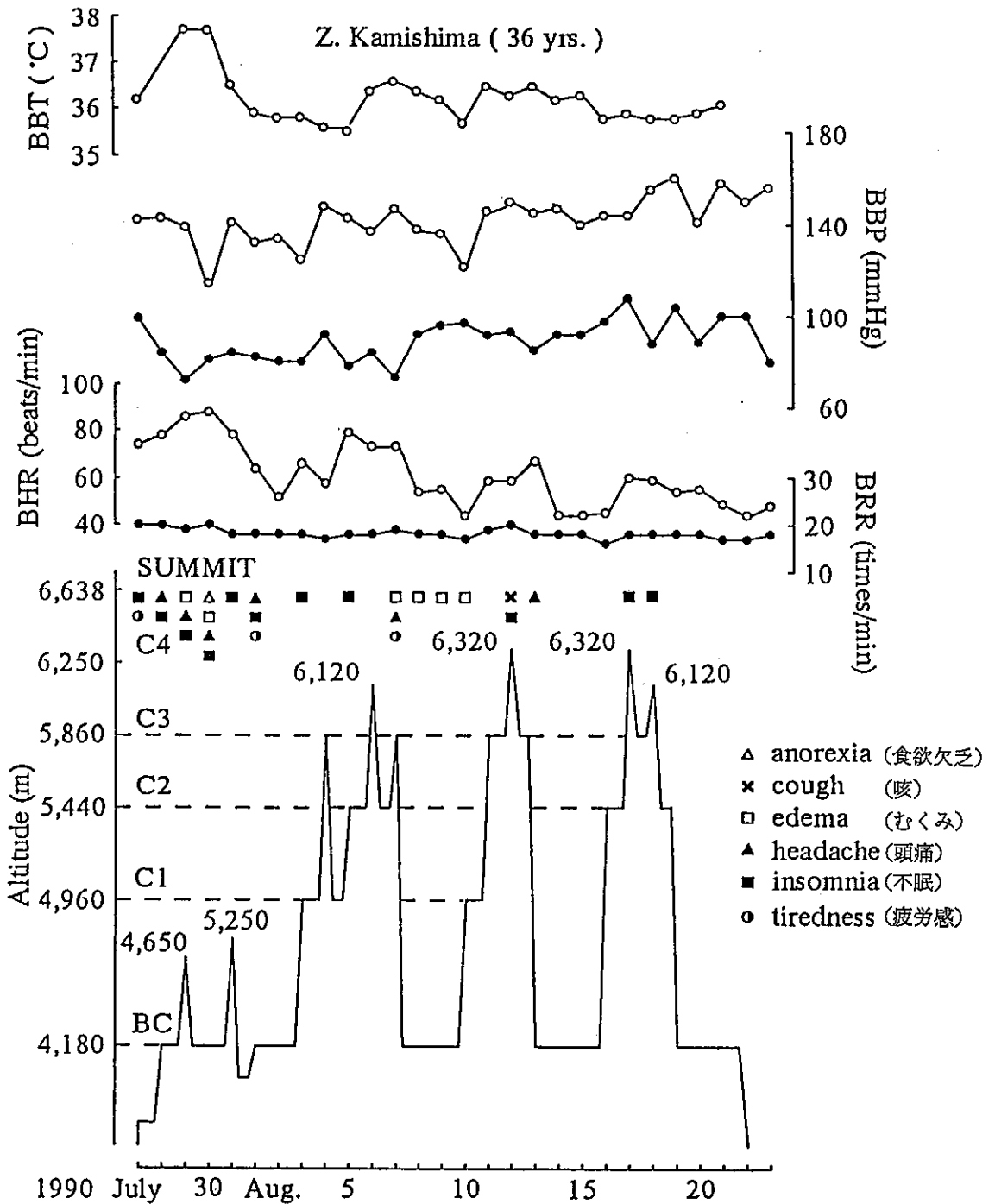


図17. 神島隊員の登はん中の生理的応答変化

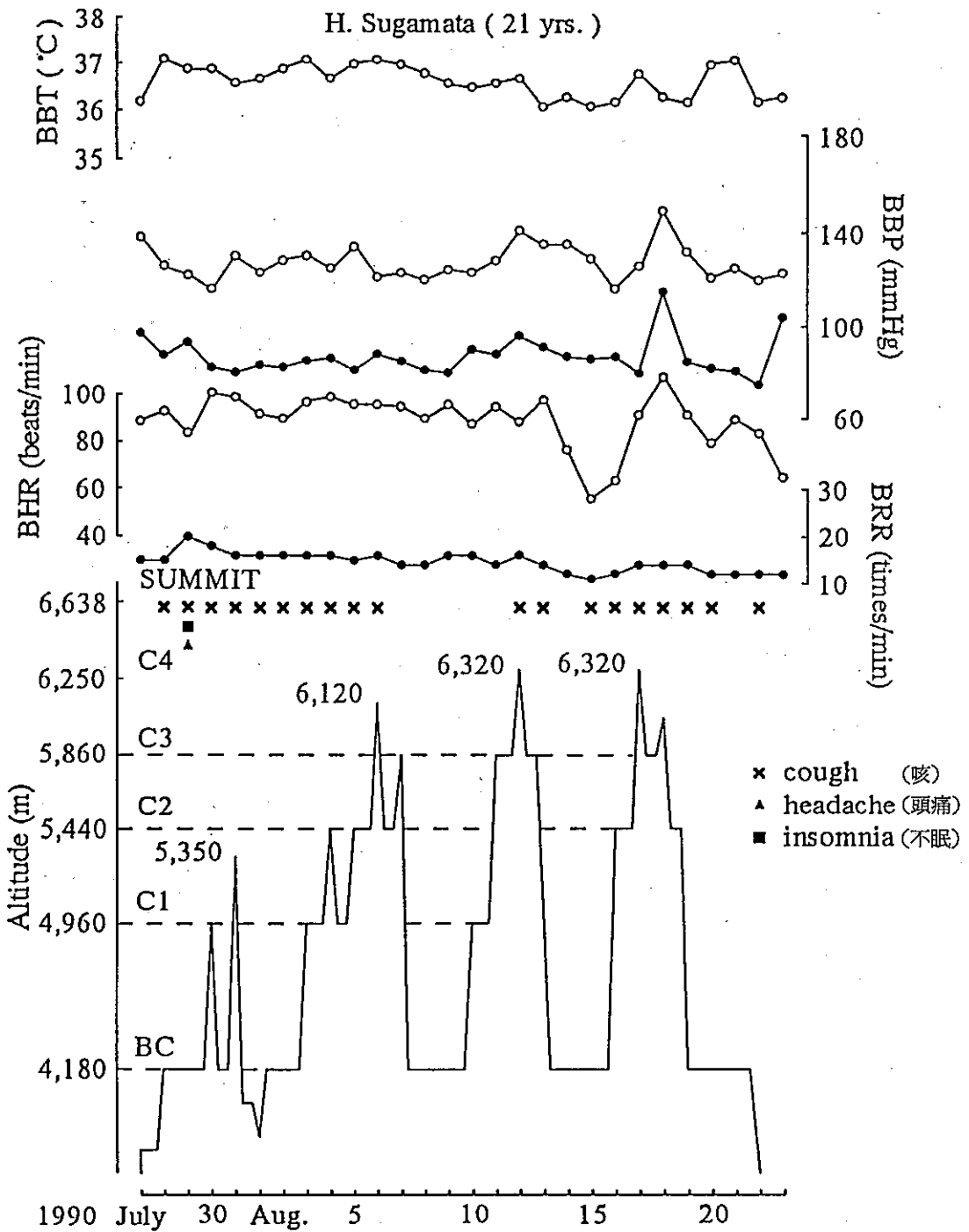


図18. 菅又隊員の登はん中の生理的応答変化

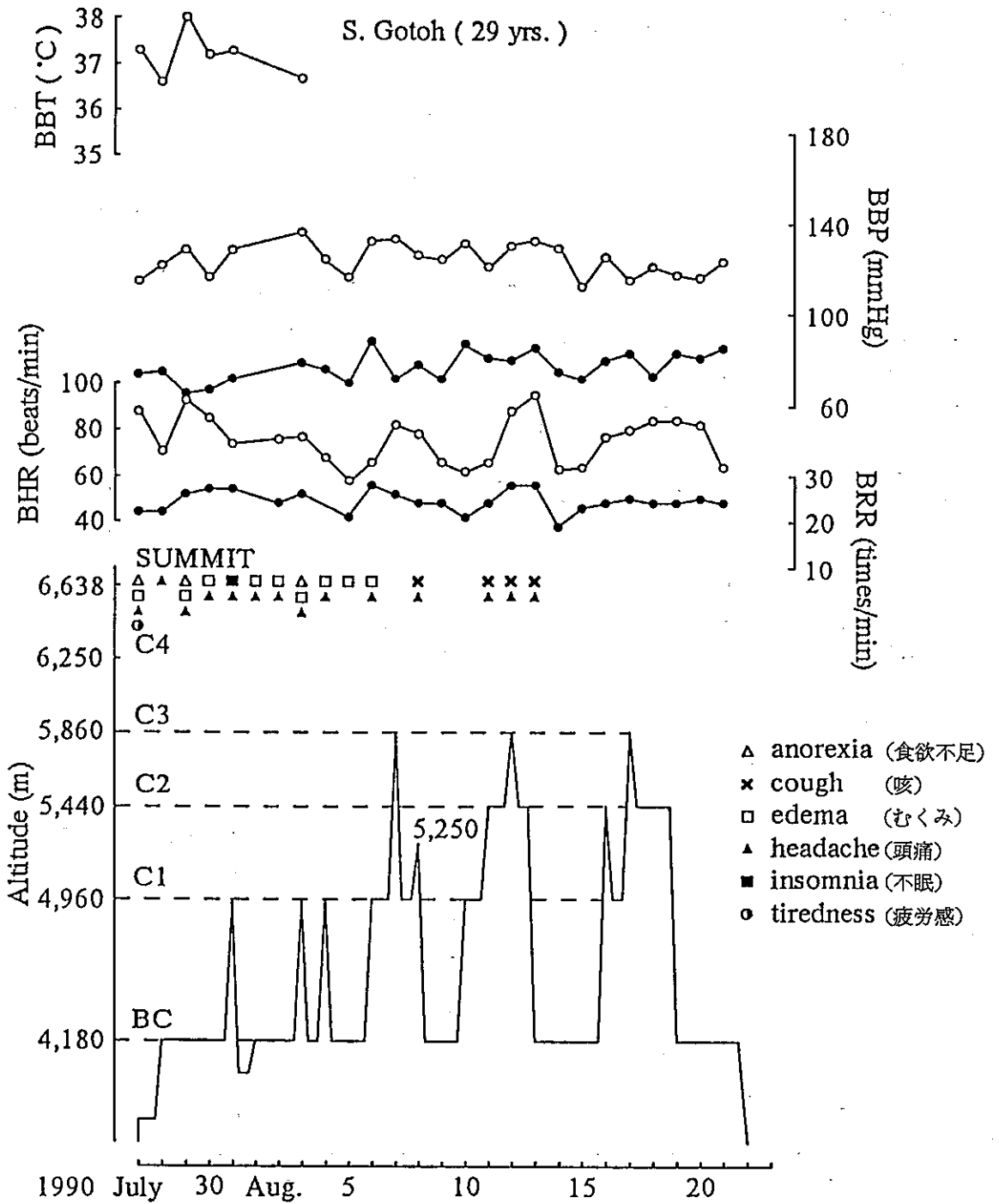


図19. 後藤隊員の登はん中の生理的応答変化

5. 高所医学, 運動生理

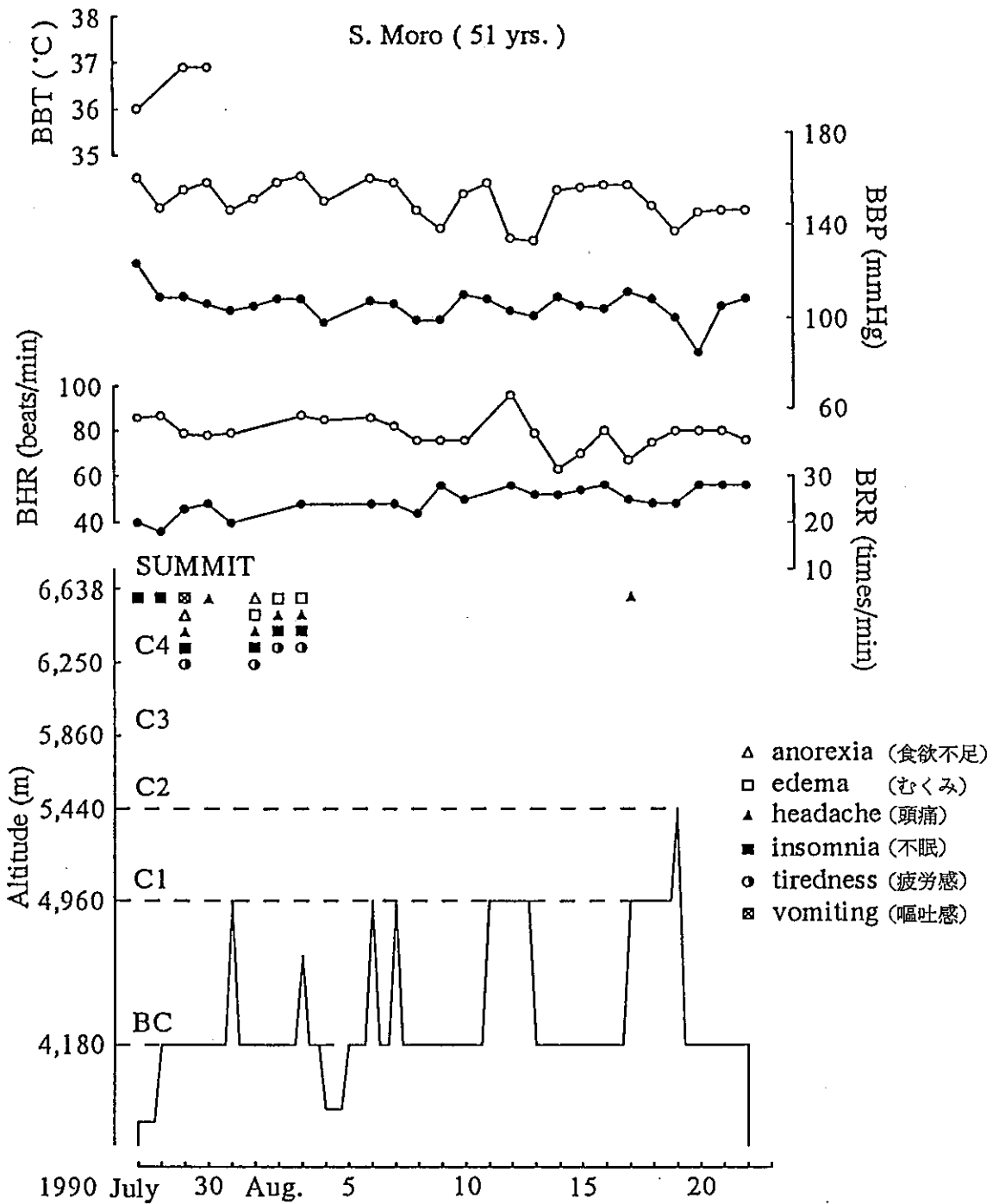


図20. 茂呂隊員の登はん中の生理的応答変化

渡辺隊長以外の隊員では, おもに登山活動初期に高山病症状が比較的多く認められた。石沢隊員は, 登山活動の初期に高山病症状がわずかに認められていたが, その後, 円滑に高地順応して, その後の登山活動を有利に展開していることが伺える。また全過程において渡辺, 石沢両隊員は基礎心拍数が80拍/分以下に抑えられており, 他の隊員に比較して高山病症状が軽微であったことが示唆される。他方, 渡辺, 石沢隊員以外の隊員においても, 基礎収縮期血圧および拡張期血圧が比較的低値を示していることは, 高所順応トレーニングの効果が現れていたものと考えられる。

表2. に, 4,000mでの $\dot{V}O_2\text{max}$ およびOBLA-W.L.のトレーニング前後における個人値と各々の増加率を示している。渡辺隊長はトレーニング前の $\dot{V}O_2\text{max}$ およびOBLA-W.L.とも隊員の中で最高値を示しているが, このように体力が高水準にあっても, 高所順応トレーニングにより, $\dot{V}O_2\text{max}$ およびOBLA-W.L.がそれぞれ約3%および18%増加したことは注目に値する。このように有酸素的作業能の高いことが高地での高所障害を予防し, 作業能を向上することに貢献したものと考えられる。一方, 石沢隊員については $\dot{V}O_2\text{max}$ およびOBLA-W.L.ともに, 有酸素的作業能の水準は渡辺隊員に次いでいるが, 現地での高山病症状が比較的軽微であったことから, 動脈血酸素飽和度を高めるような補償作業があったものと思われる。また他の隊員においてもトレーニング後に $\dot{V}O_2\text{max}$ およびOBLA-W.L.がそれぞれ約5%及び18%の増加傾向を示しており, この有酸素的作業能の向上が高所障害を比較的軽微に抑制したものと考えられる。したがって, 4,000~7,000m相当高度における15回にわたる高所順応トレーニングは, ムーシュ・ムズターグ峰登山における高所障害予防に貢献できたものと結論されよう。

IV 謝 辞

ムーシュ・ムズターグ峰登攀に際し, 全隊員の方が毎朝起床時に生理的・心理的項目の測定を正確かつ着実に記録して戴きましたことを厚くお礼申し上げます。

なお本高所順応トレーニング研究に際し, 献身的に強力してくれた本学運動生理学研究室の熊崎泰仁, 水野 康, 正岡俊文, 李 基哲, 鮮干 攝, 竹田正樹の各氏に感謝します。(筑波大学教授)