

富士山登頂と山頂短期滞在中の 安静および運動時生理的応答

筑波大学体育科学系運動生理学研究室

浅野 勝己

I. はじめに

人間の低圧低酸素環境における安静および運動時の生理的応答に関する研究には、低圧シミュレーターによる方法と実際の高所滞在による両方法が用いられて来ている。前者は人工的に温度、湿度および高度設定を自由に調節できる利点を有するが、自然環境下で長時間にわたり測定のできる後者の実地研究には及ばないのである。欧米には標高4,000 m級の山頂に高所医学研究所が常設されており、高所順応や高所トレーニングに関する研究が系統的に進められている。しかしわが国にはこの種の研究所は設けられていない。

そこで当教室では従来の低圧シミュレーターによる低圧低酸素環境下の運動生理学研究に並行して、実地の高所医学研究を行うことを企画し1986年度より富士山頂滞在中の安静および運動時生理的応答の研究を開始したわけである。富士山頂（標高3,776 m）の大気圧は平地の約60%（480 mmHg）であるため、肺胞の酸素分圧は平地の100 mmHgに対し約60 mmHgに減少している。これは平地で約12%の低濃度酸素を吸入する状態に相当しているために、体内で酸素需要の高い脳および心臓の酸素不足をもたらし、頭痛や心拍高進などの高山病症状が現われるのである。このような低圧低酸素環境における安静および運動時の呼吸循環血液系に及ぼす生理的応答について、登山前、山頂および下山後の変化を中心に検討¹⁾したい。

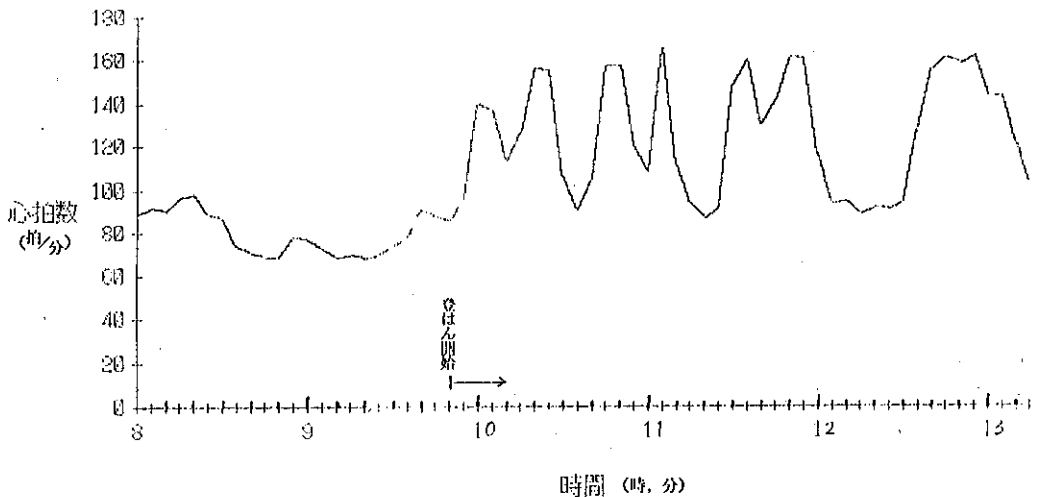


図1. 富士山登頂時の心拍数変動 <被検者K.M. (22才)>

II. 登山時、山頂滞在時および下山時の心拍数応答

ホルター心電計（フクダ電子製）を装着し、18日朝の登山前約2時間、登山開始より頂上までの約5時間および頂上滞在中（18日午後～21日昼まで）さらに下山時について3泊4日間にわたる連続的な心電図記録をK.M. (22才) とK. A. (50才) の男子2人について実施した。

1) 登山時および下山時の心拍数変化：

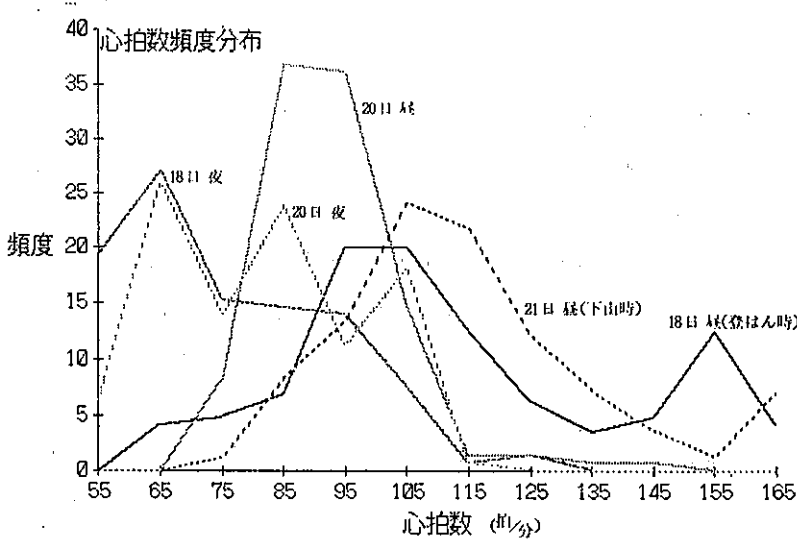


図2. 登頂時、山頂滞在中および下山時心拍数の頻度分布
 <被検者, K. M. (22才)>

図1は男子K.M. (22才) の登山前および登山中の心拍数変化を示している。登山開始地点は5合目(標高2,500 m)であり頂上までの約1,280 mの高度差をおよそ15kgの荷物を背負い約5時間を要して登はんしている。数回におよぶ休息のために心拍の上昇下降を繰返しているが、最高水準では約165拍/分に達している。また当人の心拍変化のヒストグラムをみると、18日の登はん時には約100拍/分と約155拍/分をピークとする2峰性を示している(図2)。図3には男子K.A. (50才) の心拍数ヒストグラムを示したが、登はん時には約85拍/分と130～135拍/分をピークとするなだらかな上昇傾向で

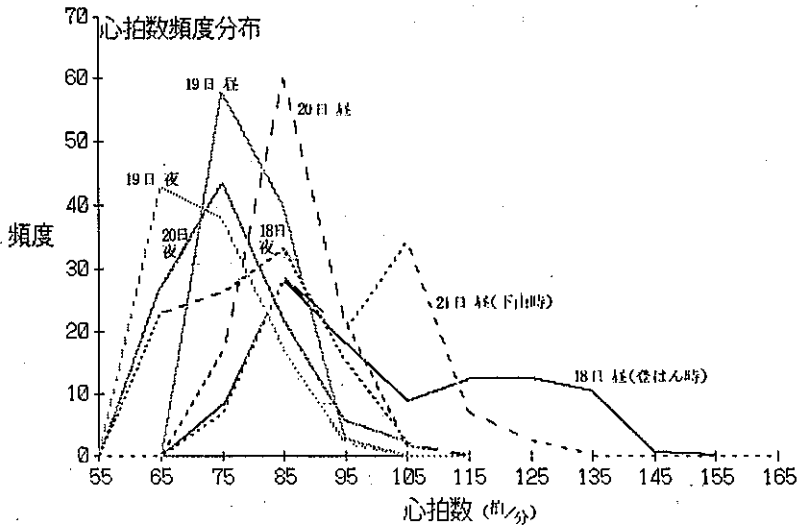


図3. 登頂時、山頂滞在中および下山時心拍数の頻度分布
 <被検者, K. A. (50才)>

あり、K.M. に比べ心拍数高進は緩やかである。これはK.A. の荷重がK.M. の約 $1/2$ の軽量であった為と考えられる。一方、下山時では21日午後約1時間半で下山したが、K.M. とK.A. 共にヒストグラム上で105～110拍/分の一つのピークを示している(図2,3)。すなわち下山時の心拍数変化は、登はん時に比べ明らかに低水準にあることがわかる。

上田ら⁵⁾(1986)のハケ岳(2,400 m)登はん時心拍数変化の研究によると、21～22才の男子学生4人が荷物10kgを背負い1,900 mの地点より約2時間を要して頂上に至るまでの心拍数は135～140拍/分であり、下山時では1時間40分を要し、150～160拍/分を示し、下山時が登はん時より高い傾向を示したという。登はん時の心拍数は、本研究の値とほぼ同等であるが、下山時については逆の傾向にある。これは上田ら⁵⁾の登はん時に曇りで、下山時に強雨であったという気象条件が何らかの影響を及ぼしていた為とも考えられる。本研究では登はん時および下山時ともに快晴無風の気象条件であった。

2) 頂上滞在時の心拍数変化:

18日の夜、19日の昼、夜および20日の昼、夜(K.M. は19日の昼、夜の記録なし)についてK.M. とK.A. の心拍数ヒストグラムを示したのが図2,3である。18日夜と19日夜は兩人とも約65拍/分のモードであるが、20日夜では兩人とも約75～85拍/分を示し上昇傾向にある。また19日昼と20日昼ではともに75～95拍/分のモードを示して上昇傾向にあり低酸素による影響および運動負荷による交感神経の高進傾向が示唆された。

Ⅲ. 山頂滞在中安静時の生理的応答

とくに定期的トレーニングを行っていない健康成人男子5人(22～50才、平均33.4才)(表1)について登山前、山頂滞在中および下山後の安静時生理的応答を経日的に示したのが図4,5である。まず山頂到着直後に動脈血酸素飽和度(SaO₂)は、平地の98%より84%に急減しその後やや回復傾向にあるが滞在中は約88%の水準を持続し、平地帰還後98%に回復している。つぎに呼吸数(RR)および心拍数(HR)は、山頂到着後に急増し各18回/分、92拍/分を示し平地の値より30～40%高い値である。

表1. 被検者の身体特性と負荷強度

| Subject | Age (yrs) | Height (cm) | Weight (kg) | Load (Walt) | | |
|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|
| KM | 22 | 176.0 | 65.5 | 125.0 | 175.0 | 200.0 |
| TM | 27 | 169.0 | 65.0 | 75.0 | 100.0 | 125.0 |
| KH | 29 | 164.0 | 55.5 | 100.0 | 125.0 | 150.0 |
| YK | 39 | 170.4 | 61.0 | 100.0 | 125.0 | 137.5 |
| KA | 50 | 166.5 | 69.5 | 100.0 | 125.0 | 162.5 |
| Mean | 33.4 | 169.2 | 63.9 | 100.0 | 130.0 | 155.0 |
| S. D. | 10.0 | 4.1 | 4.6 | 15.8 | 24.5 | 25.7 |

その後滞在中、漸減傾向にあるが平地よりも高い水準にある。つぎに拡張期圧(DP)は登山前、および下山後も変化はないが、収縮期圧(SP)は山頂到着後低下し、その後滞在中と共に

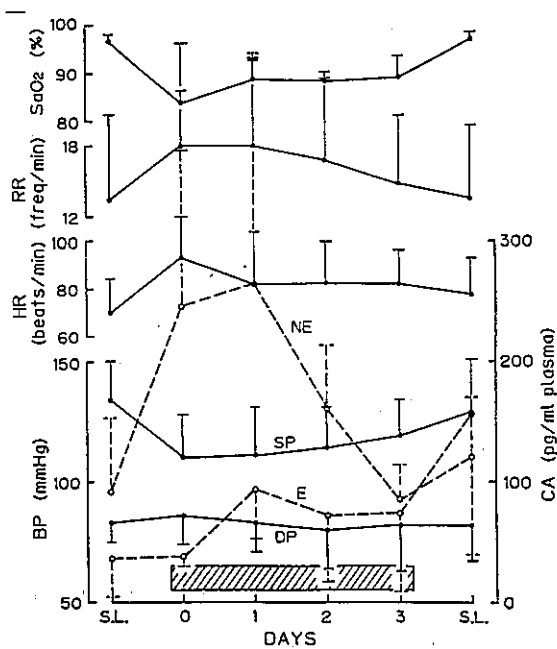


図4. 登山前, 山頂滞在中および下山後の呼吸循環血液ホルモン系の経日的変化

上昇する傾向にあった。一方, 血中ノルエピネフリン (NE) は到着後から翌日にかけて平地の約2.5倍の急増を示した。またエピネフリン (E) はやや遅れて滞在1日目より増加し, その後一定値を示し, 下山後に増加を示している。低圧低酸素環境滞在時にとくに血中および尿中のノルエピネフリンの急増することは, Cunninghamら³⁾やPaceら⁴⁾の報告と一致するが, これ

による交感神経高進が心拍数および呼吸数の上昇をもたらしているものと考えられる。つぎに登山前, 山頂滞在時および下山後の安静時血液性状の経日的変化を測候所職員5人(20~35才, 平均28才, 山頂滞在3週目)の値との比較で示した(図5)。山頂滞在時平均値を登山前と比べると赤血球数(RBC)は約4%, 血色素(Hb)は約5%, さらに血球容積比(Hct)は約4%それぞれ減少傾向にあった。これらの各項目は下山後に共に回復傾向を示すことから, 山頂におけるこれら各値の低減は, 動脈血酸素分圧低下の骨髓細胞への血球異化促進作用によるものと考えられ, 同時にこの結果としての血漿量の増加傾向は山頂での一回拍出量の増大をもたらすものと思われる。なお山頂に3週間滞在中の測候所職員5人の各血液性状値は, 本研究の5人の滞在時各平均値に比べ各値とも約8~10%高値を示している。これは山頂における高所順応を獲得した結果と考えられる。

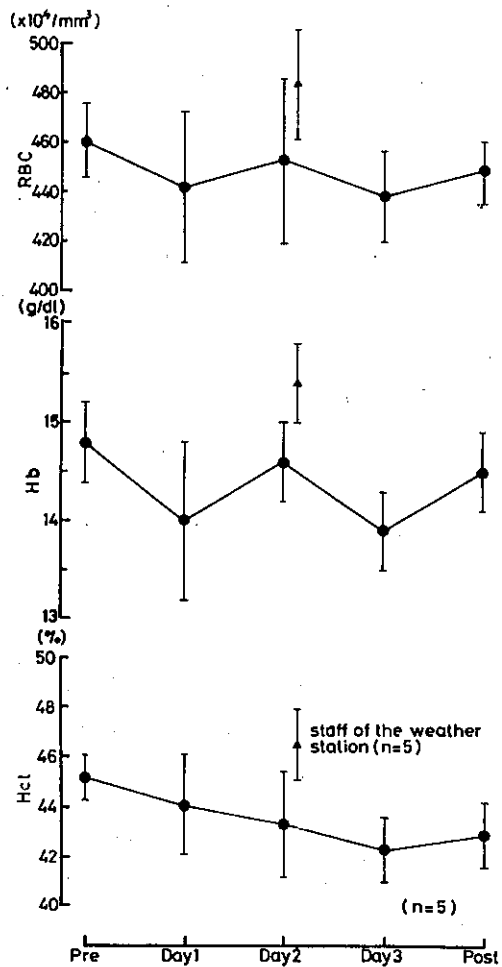


図5. 登山前, 山頂滞在中および下山後の安静時の血液性状の経日的変化(測候所員の値との比較)

IV. 山頂滞在中運動時の生理的応答

1) 方法と結果:

運動負荷テストはモナーク社製エルゴメーターを用い12分間のペタリング (50rpm) を行った。すなわち負荷強度は4分間毎の負荷漸増法により、運動開始後4分間は平均100 watt (3~4分目で心拍数120~140拍/分)、つぎの4分間は平均130 watt (7~8分目で140~160拍/分)、最後の4分間は平均155 watt (11~12分目で160~180拍/分) の各負荷を設定した (図6, 表1), このテスト

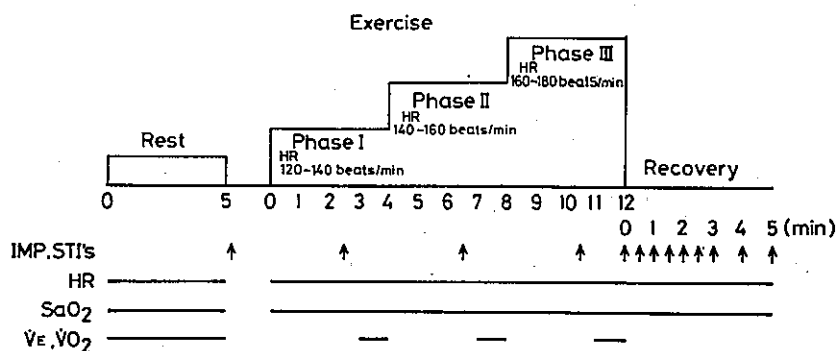


図6. 登山前, 山頂滞在中および下山後の運動負荷テスト・プロトコール

を登山前および下山後は温度21°C湿度60%の本学体育科学系環境制御室で行い, また山頂では測候所内仮設庁舎を用い平均気圧485.2 ± 1.4 mmHg, 21°Cおよび50%の低圧環境において実施した。また本測定は山頂滞在2~3日目および下山後は2~3日目に行った。測定項目と測定時点は図6に示した。酸素摂取量 (VO₂), 換気量 (VE) および (RR) はダブルスバグ法により呼気ガスの質量分析計による分析から求めた。心拍数 (HR), 一回拍出量 (SV) および心拍出量 (Q) は, インピーダンスカルディオグラフによるインピーダンス法により求めた。また動脈血酸素飽和度 (SaO₂) はBioxIIIを用いクリップ状の光学プローブを耳介に装着して1分毎に測定した。また身体作業能力 (PWC₁₇₀) および予測最大酸素摂取能 (VO₂max) は運動時各3段階負荷の最終1分目の各心拍数と運動強度から最小自乗法による回帰式を求め心拍数170拍/分時の運動強度 (PWC₁₇₀) を算出

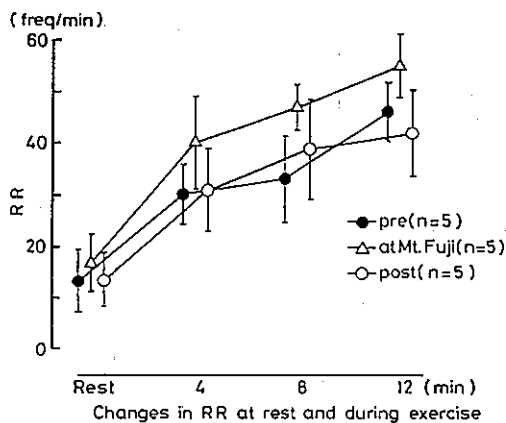


図7. 安静時および運動時呼吸数変化の比較

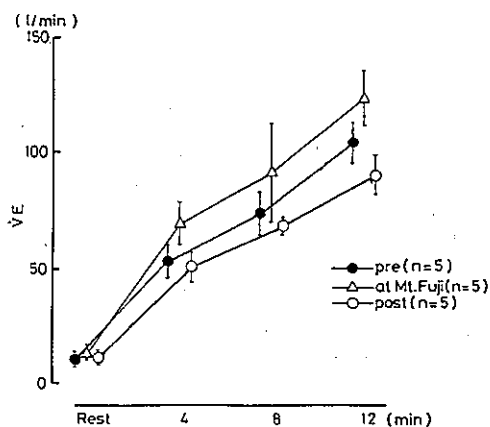


図8. 安静時および運動時換気量変化の比較

した。またこの心拍数と運動強度をオストラッド・1モグラム²⁾に代入して予測 VO_2max を求めた。

まず呼吸数(RR)は、安静時で登山前と下山後が13.5~13.6回/分ではほぼ同等であるが、山頂では平均17回/分を示し増加傾向にある。一方、運動時には登山前と下山後は各負荷段階ともほぼ同等の傾向を示し、11~12分目でも各平均46回/分と43回/分であった。また山頂においては各負荷段階とも約10回/分の高値を示し、11~12分目では平均55回/分で登山前に対し約20%の増加傾向にある(図7)。つぎに換気量(VE)は安静時には各3回共にほぼ同等な10~14 ℓ /分を示した。運動時には山頂で最高値を示し、11~12分目で平均123 ℓ /分に達している。この値は登山前に比べ約20 ℓ /分多

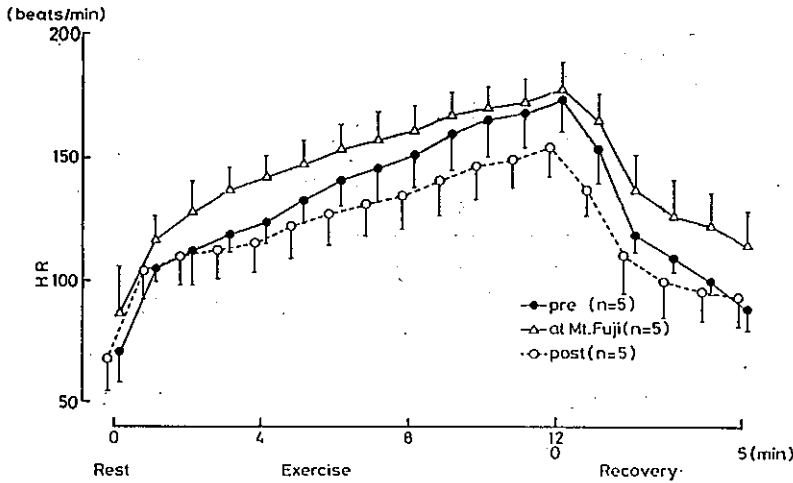


図9. 安静時および運動時心拍数変化の比較

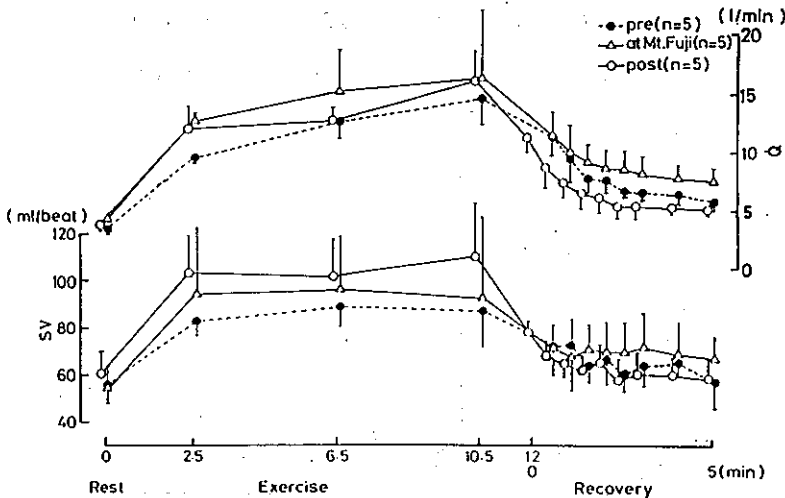


図10. 安静時および運動時一回拍出量と心拍出量変化の比較

く約20%の増加傾向を示した。下山後には山頂時に比べ約25%低減傾向にあった(図8)。つぎに心拍数(HR)は山頂において安静時では約15拍/分運動時では8分目までは10~15拍/分それぞれ登山前より高値を示している。一方、下山後では運動時には各負荷段階で山頂よりも約20拍/分低減している(図9)。また一回拍出量(SV)および心拍出量(Q)は、安静時には3時点ともほぼ同等であった。一方、運動時にはSVは山頂では各負荷とも登山前より約10%高値を示し、またQも約20%の高値に達している(図10)。つぎに動脈血酸素飽和度(SaO_2)は

表2. 登山前, 山頂滞在中および下山後の身体作業能力 (PWC₁₇₀)

| Subject | pre (Kpm/min) | at Mt. Fuji | post |
|---------|------------------|-------------|--------|
| KM | 1142.2 | 1004.7 | 1229.9 |
| TM | 673.9 | 613.6 | 870.8 |
| KH | 871.8 | 856.8 | 1003.3 |
| YK | 764.1 | 781.9 | 884.5 |
| KA | 1217.5 | 1123.0 | 1437.4 |
| Mean | 933.9 | 876.0 | 1085.2 |
| S. D. | 211.7 | 176.4 | 218.1 |

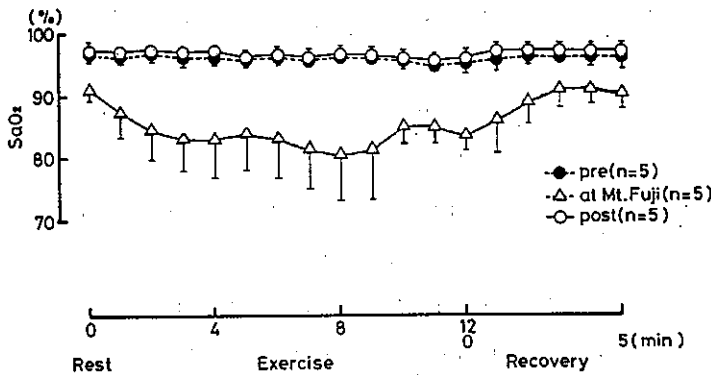


図11. 安静時および運動時の動脈血酸素飽和度の比較

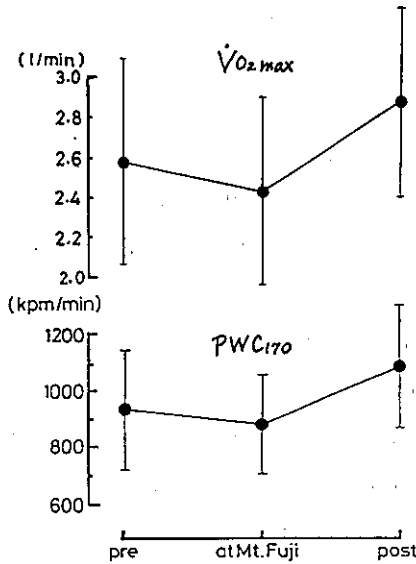


図12. 身体作業能力 (PWC₁₇₀) および予測最大酸素摂取能力 (VO₂max) の比較

登山前と下山後は, 安静時, 運動時および回復時ともにはほぼ同値の95~97%を維持している。一方, 山頂においては, 安静時の平均92%から運動開始と共に徐々に低減し, 運動9分目では最低値の81%に達している。運動後は徐々に回復傾向を示すが, 回復5分目の平均値は約90%である。山頂における全過程でのSaO₂値は登山前および下山後の各値に対し有意に低値(P<0.05)であった(図11)。つぎにPWC₁₇₀は山頂では平均876 Kpm/分で登山前の平均934 Kpm/分に対し約6%低減し, 下山後に平均1,085 Kpm/分と登山前の16%増を示している

る(表2, 図12)。また予測VO₂maxでは山頂では平均2.4 l/分で登山前の平均2.6 l/分に対し約8%低減し, 下山後に平均2.9 l/分と登山前の12%増を示している(図12)。

2) 考察:

山頂における運動時換気応答は, 平地時の値に対し約20%高い。これは運動時呼吸数の約20%の増加に起因している(図7)。このような低圧低酸素環境下における運動時換気高進の機序については, 動脈血酸素分圧の低下による末梢受容器(大動脈体, 頸動脈体)への刺激が呼吸中枢を賦活したものと考えられる。つぎに山頂における運動時心拍応答は, 登山前値に対し10~15拍/分の高値(図9)を示している。このような低圧低酸素環境下における最大下運動時心拍高進の機序については,

動脈血酸素分圧の低下による末梢受容器への刺激が循環中枢を賦活すること、あるいは交感神経系を高進し血中カテコラミン濃度を上昇させることなどが考えられる。本研究の安静時血漿ノルエピネフリンが山頂滞在中上昇し、登山前値の約2.5倍に急増している事実から、山頂滞在中の交感神経高進が心拍増加を誘起していることが示唆される。つぎに山頂における運動時一回拍出量(SV)および心拍出量(Q)応答は、登山前値に対し各約10%および20%の増加傾向にある(図10)。この機序については動脈血酸素分圧低下刺激の末梢血管拡張効果が平均血圧を降下させて血流増加をもたらすこと、あるいは低圧環境下の過換気によるPco₂低下が拍出量増加をもたらすことなどが考えられる。さらに山頂での運動時SaO₂が、約80%水準に低下したことも心拍出量増加の一因とも考えられる。このように山頂での運動時心拍出量は増加を示したが、身体作業能力(PWC₁₇₀)およびVO₂maxは各約6%および8%の減少傾向(図12)を示し、山頂での組織での動静脈酸素較差の低減が示唆される。

V. 要 約

22~55才(平均34才)の健常男子5人を被検者とし、富士山頂(3,776 m)に3泊4にわたり滞在し安静時および最大下自転車運動時の呼吸循環、血液、内分泌系応答について、登山前および下山後の値との比較検討を行った。また同時に登はん中および下山中さらに3泊4日間の山頂滞在中の心拍数変化の特性について明らかにした。

1) 22才と50才の2人の登はん中心拍数は、145~165拍/分の最高値を示し、135拍/分および155拍/分の範囲に高頻度の傾向がみられた。一方、下山中は105~110拍/分にピークが示され、登はん中に比べ生理的負荷の軽度なことが示唆された。つぎに山頂滞在中の安静時心拍数は経日的に上昇傾向にあり、75~95拍/分のモードを示した。

2) 山頂での安静時動脈血酸素飽和度は到着後83%に急減し、その後やや回復し滞在中平均86%の値を維持した。また最大下運動時には平均80%水準まで有意な低減を示した。

3) 山頂での安静時血漿ノルエピネフリン濃度は、到着後および1日目に登山前値の平均約2.5倍の増加を示しその後漸減したが、エピネフリン濃度は1日目より増加し滞在中その水準を維持した。山頂でのカテコラミン動態ではノルエピネフリンの変動が著明であり、低圧低酸素環境が交感神経系に対し強く高進的に作用していることが認められた。

4) 山頂での運動時換気量は、登山前値に対し約20%高値であり、これは運動時呼吸数の約20%の高進に起因し、山頂における動脈血酸素分圧の低いことが呼吸中枢を賦活していることが示唆された。

5) 山頂での運動時心拍数は、登山前値に比べ10~15拍/分高値を示し、また運動時一回拍出量および心拍出量は登山前値に対し、各約10%および20%の増加傾向を示した。これは山頂における低い動脈血酸素分圧が、循環中枢および交感神経系への賦活をもたらした為と考えられる。

6) 山頂での身体作業能力(PWC₁₇₀)および最大酸素摂取能力(VO₂max)は、登山前値に比べ各6%および8%の減少傾向にあった。これは運動時心拍出量の増加にもかかわらず、山頂の筋組織に

おける動静脈酸素較差の低減の著しい結果と考えられる。

本研究の要旨は、第64回日本生理学会大会(1987)および日本体育学会第38回大会(1987)において発表したものである。

終りに本研究にご協力載いた気象庁東京管区気象台長、浅田暢孝氏および富士山測候所加藤左右治班長ら諸兄に深謝する。

なお共同研究者は、菊池佑二(基礎医学系)、水野 康(大学院生)、松井 正(大学院生)、松坂 晃(茨城大)および平木場浩二(鹿児島経済大)の諸氏

文 献

- 1) 浅野勝己ら(1988): 富士山頂短期滞在時の安静および運動時生理的応答に関する研究, 筑波大学体育科学系紀要 11:185-193
- 2) 浅野勝己訳, 朝比奈一男監訳(1976): 「オストランド運動生理学」(大修館): 468
- 3) Cunningham W.L. et al (1965): Catecholamine in plasma and urine at high altitude. *J. Appl. Physiol* 20:607-610
- 4) Pace, N et al (1964): Increase in urinary norepinephrine excretion during 14 days sojourn at 3,800m elevation. *Federatim Proc* 23:521
- 5) 上田五雨他(1986): ハケ岳登山時の男子学生の心拍数変動, 日本生理誌48(12):795