

高所の医学；研究の歴史ならびに自験例

—なぜ無酸素でエヴェレスト登頂に成功したか—

山崎 元、鈴木美貴、大西祥平、大林千代美、勝川史憲、木下訓光、味村 純、
堀井昌子(大和市大和保健所)

1. バックグラウンド

ヒトが激しい環境変化に遭遇した際、どのような現象が身体に起こりまた環境変化に身体がどう対応するか、それら病態生理の解明はスポーツ医学に課せられた一つのテーマである。環境変化の具体的な例として、わが国だけでもスポーツ人口が数十万人といわれるスキューバダイビングにみられる潜水病、あるいは登山による高山病、高温・多湿下における高温症、さらには宇宙における微重力に関する研究、などが挙げられる。

世界各地で起るエピソードが臨床研究の進歩をもたらすことは少なくない。猛暑のサウジアラビアで行われるイスラム教メッカの巡礼は、熱射病の臨床治療の経験の場として大いに役立った。ごく最近の1999年3月にも、メッカの巡礼が猛暑の中で行われテレビの画面一杯に溢れる多数のイスラム教徒の巡礼の様子が放映された。熱射病を起こしやすい環境にあることは画面上からも容易に想像できた。さらには、高山病については、ダライ・ラマの名前が突然のようにクローズアップされた1964年のインドとチベットの国境紛争の裏に、医学的進歩が隠されていた。すなわち、紛争現地へ赴いた多数のインド兵が高所肺水腫を経験し、その統計学的成績が後の研究に大きな影響を与え、生理学的な研究も進歩したのである^{1,2)}。

1953年にイギリスのエヴェレスト登山隊の2人、ニュージーランド人ヒラリーとシェルパのテンジンがエヴェレスト初登頂に成功した快挙は、当時小学生であった筆者の一人山崎にとって忘れることのできない思い出である。酸素マスクを着けた二人が氷ついた急斜面を這うようにして登っ

ていく姿は今でもはっきりと脳裏に焼き付いている。しかし、その登山隊に研究者Pughが随行し緻密な医科学的な研究を行ったことを知ったのは20年も後であった。1870年頃から慶應笹本内科で低酸素時の肺循環の勉強をするようになった時である。そのPughは、後にアマダブラム山脈5,800mの高地にSilver Hutと呼ばれる研究室を設置してすばらしい研究成果³⁻⁵⁾を残した。

2. 研究の歴史(表1)

高所における医科学研究はアメリカでは戦後すぐに本格的に取り組み、めざましい速さで進歩した。1946年、つまり終戦直後にアメリカ海軍の援助により行われたプロジェクト“Operation Everest”では、平地に小さな減圧室(10×10×7ft)をつくり徐々に減圧を行い、エヴェレスト山頂(8,848m,気圧240Torr)をシミュレートした235 Torrの環境下で、被験者4人中2人が酸素補助なしでcycle ergometerをこいだ⁶⁾。のちのエヴェレスト初登頂、さらにはエヴェレスト無酸素登頂への大きな動機づけとなった研究であった。その研究の中心的役割を果たしたHouston CSは、40年も経た後の1980年代後半に、再び“Operation Everest II”プロジェクトを展開し、高所シミュレート実験を究めた⁷⁻¹⁰⁾。40年前とは比較にならない大きな減圧室の中に8人の被験者を40日間滞在させて多くのプロトコールを実践した。高度が上がるにつれてまた滞在時間が経つにつれて、低酸素換気応答(低酸素を感受して換気量を増やす反応)が増強することを明らかにした。Swan-Ganzカテーテルを挿入して減圧による低酸素下における心機能を評

併し心機能は平地とほぼ同様に保たれることを明らかにした⁷⁾。高所でのガス交換機能低下は拡散能の障害と換気血流比(\dot{V}_A/\dot{Q})の不均衡によって起こり、また肺高血圧の存在を考慮すると肺胞間質の浮腫がその原因であることを示唆した⁹⁾。骨格筋のバイオプシーを行い、高所では激しい運動を行っても乳酸の産生が起こりにくい理由として無酸素性解糖能の低下を証明した¹⁰⁾。低圧下(240Torr)では平地と比較した \dot{V}_{O_2max} は著しく低下し(49→15ml/kg/min)、酸素飽和度は46%まで下がるが運動時の分時換気量・呼吸数・残気量には変化無かった。また、その状態から正常気圧に戻っても \dot{V}_{O_2max} は上昇がみられないどころかむしろ以前より低い値になることを示した¹¹⁾。それらの成果は数多くの論文に記されている。“Operation Everest II”プロジェクトの総括はHouston CS自身の論文に書かれている⁸⁾。

Reinhold MessnerとPeter Habelerは、1978年5月8日に酸素ボンベ無しでエヴェレストの登頂に成功して、生理学者たちのそれまでの常識を覆した(表1)。生理学者たちの間では、エヴェレスト山頂における気圧はせいぜい250Torr、血中の酸素分圧は35Torrもしくはそれ以下であり、その環境で大気のみにより自力で動くことは不可能であると信じられていた。また前述のHouston CSを中心としたシミュレーション実験は、数多くの指標を得ることは可能であったか酸素運搬能を規定する最も重要な因子となる気圧などの気象現象については当然のことながら推定値を用いており実測値ではなかった。Westを中心とするグループが1981年に行った大プロジェクトAmerican Medical

Research Expedition to Everest(米国エヴェレスト医学登山隊)¹²⁻¹⁴⁾は、エヴェレスト登山隊を6名の登山専門家と6名の科学者兼登山家そして8人の科学者で構成し、登頂に際してベースキャンプ(5,400m)とキャンプII(6,300m)に各種測定機器を運び、しかも頂上における呼気ガスを測定した。その成績¹²⁾が無酸素エヴェレスト登頂が可能であることを生理学的に裏付けたのである。

日本における登山の歴史と研究もすばらしい。1953年の日本山岳会マナスル登山隊の名前は中高年者には馴染み深い。詳細は雑誌「臨床スポーツ医学」の1987年6月号の特集登山の医学(特集編集 中島道郎)と1996年6月号の特集高所登山の医学(同堀井昌子)に詳しく書かれている^{15,16)}。1983年には日本人登山家5人がエヴェレストの無酸素登頂に成功した。20-30歳代の人達である。

3. なぜ酸素無しでエヴェレスト登頂ができたか^{12,17)}

この疑問に関しては、Westらの一つの論文¹²⁾が答えを出している。極めて興味深いものなので詳しく紹介してみたい。図1はICAO(国際民間航空機関)の設定した各高度での気圧とWestらが実測した気圧とを比較したものである。気圧はICAOの値よりも実測値の方が高くエヴェレスト山頂(8,848m)では17Torrも実測値が大であった。図2は、Pughら⁵⁾が1964年に発表した7,440mの高度までの最大酸素摂取量の実測値と気圧との関係である。対数で表した大気圧は最大酸素摂取量と直線関係にあり、その延長線上でエヴェレスト山頂の気圧と思われる250Torrの最大酸素摂取量を推測すると、ほとんど基礎代謝量に近い値の酸素摂取量になってしまう。つまり山頂でじっとしているならば耐えられるが山頂まで自力で登っていくことは不可能であることを意味している。しかしながら、上述の米国エヴェレスト医学登山隊が登頂した際に記録した成績が、酸素ボンベ無くしてエヴェレストに登頂できる答えを出した。

図3にはインドのニューデリーで打ち上げた気象観測気球で得られた高度8,848mの気圧を1年間の変化として示した。ニューデリーはエヴェレス

表1. 登山医学の歴史

1946	USA project [Operation Everest] 10×10×7ft 低圧室 240Torrで酸素無しでcycl ergometer
1953	Everest 初登頂GB In 1960, Dr Pugh LGCE [Silvre Hut] at 5800m
1964	インド・チベット国境紛争 Dr Singh
1978	Everest 無酸素登頂 Messner R & Habeler P
1981	American Medical Research Expedition to Everest (米国 Everest 医学登山隊 Dr JB West) 5400, 6300, 8848m
1985	USA project [Operation Everest II] 再び Dr Houston CS

トから約1,000km離れているが、緯度はエヴェレスト山頂と同じである。図から冬期と夏期では10Torr以上も差があることがわかる。Westらが登頂した1981年10月24日の実測値を星印★で示してあり、通常よりも高い。気圧は夏期がもっとも高いが、その時期はモンスーンの季節に一致するため、モンスーンの前後が登頂に適した期間である。すなわち、Messnerらが無酸素登頂に成功した5月、あるいは米国医学登山隊が登頂した10月は最適な時期であったことになる。しかも、図4

に示すように、夏も冬も緯度によって気圧が異なり緯度が高くなるにしたがって気圧が低くなる。さらには夏と冬の差はエヴェレスト山頂(8,848m)あたりの高度でもっとも顕著である。そのように、いくつもの要素が加わって、図5で示すようにPughら⁹⁾が1964年に実測した7,440mまでの値とは異なって3-4 METsの最大酸素摂取量が期待できるわけである。登頂の季節により気圧が異なり、また気圧は日々変化する。酸素解離曲線のもっとも急峻なところでの酸素分圧を議論しているの

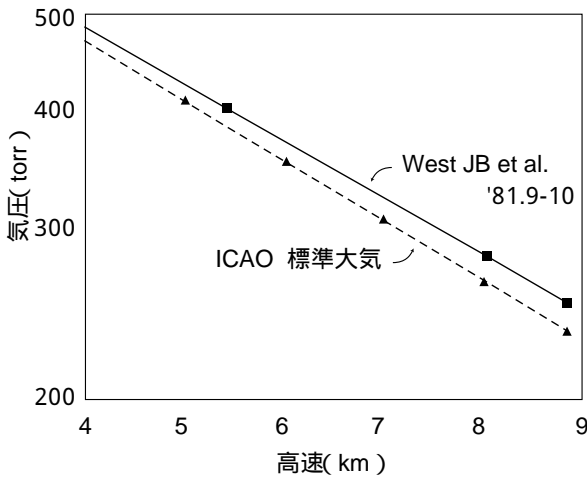


図1 1981年9-10月におけるエベレスト登山での高度と気圧の関係。Westらの実測値は(実線)は国際民間航空機関(ICAO)によるものより各高度における気圧は高い。

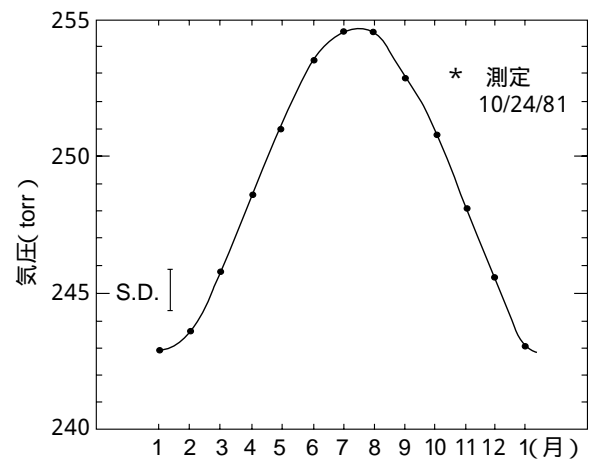


図3 インドのニューデリーから飛ばした気象観測気球によって測定した高度8,848mにおける月別平均気圧。夏期に高く冬期に低い。10月24日に山頂で実測された気圧は、例年よりも高い。

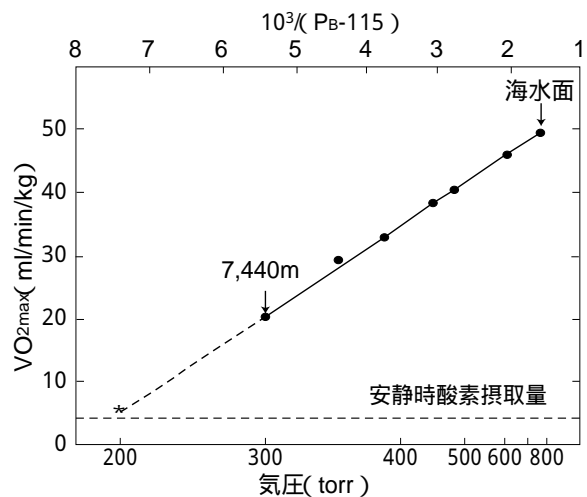


図2 高度馴化した被験者の各気圧レベルにおける最大酸素摂取量。エベレストの高度では最大酸素摂取量が安静時の酸素摂取量に極めて近い値である。

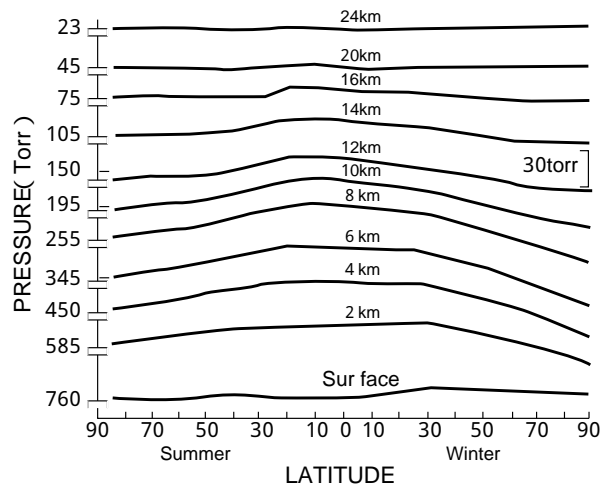


図4 緯度による夏期と冬期の気圧の違い。

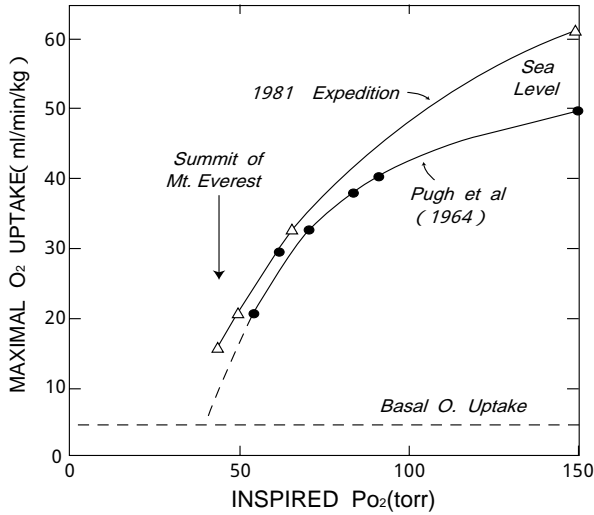


図5 エベレスト山頂における最大酸素摂取量。Pughらの予測値に比較して高い。

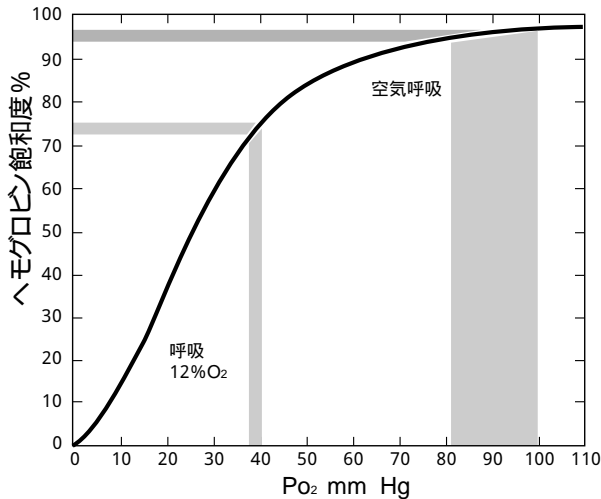


図6 酸素解離曲線

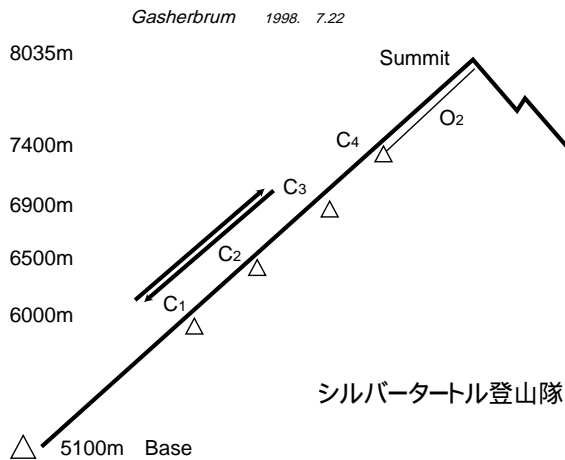


図7 シルバータートル登山隊Gasherbrum II の登山実績。

で、図6に示すように少しの気圧の違いが動脈血酸素分圧つまり酸素含量に影響を及ぼすのである。

当然のことながら、登山者が心身ともにずば抜けた適応力の持ち主であることは必須である。加えて図4からも想像できるように、もしエベレストが北緯36度の日本にあったら無酸素登頂は不可能なのであろう。神様は世界最高峰を人間が酸素の助けなしで登れるぎりぎりの緯度につくったと考えることができるのかも知れない。

4. 登山者にフィットネスと体組成

当慶應義塾大学スポーツ医学研究センターでは、塾外部から委託される検査や測定が少なからずある。その中で、1997年の10月中旬に珍しい集団を対象とした検査・測定を行った。シルバータートルと称する中高年者を中心とした登山隊のグループである。亀のようにゆっくり登ることを意図して命名した登山隊である。彼らの本隊は翌1998年6月1日に日本を出発し、カラコルム山脈で世界第2の高峰K2(8,611m)をはじめとする8,000mの巨峰が並び立つバルトロ氷河に入り、そして世界11番目の高峰であるGasherbrum II(標高8,035m)を南西稜から登頂することを目指す予定になっていた。グループのリーダーから当研究センターに、メデイカルチェックを含めたフィットネスレベルや体組成などの評価の依頼があったわけである。登山隊には比較的若年の人々が含まれていたが、当センターに依頼があった対象13名は中年・高齢者のみであり、もっとも若年で46歳、最高齢者は63歳であった。トレッドミルを用いたフィットネスレベルの評価、水中体重秤量法による体組成の測定、そして断層心エコー検査による心臓の機能・形態の評価を行った。

結論を述べると、1998年7月22日Gasherbrum IIの登頂にメンバーのうち第1アタック隊4人が成功した。登頂の経過を図7に示した。海拔5,100mの高地にベースキャンプをはり、7月16日に6,000mの第一キャンプ(C1)に到達、おおよそ500mづつ登った所にC2、C3をつくって、7,400mのC4

表2 第2キャンプ (6,500m) 以上に到達した6名の各指標

name	(cm) height	(kg) weight	age	career	BMI	%fat	(kg) BM	(kg) LBM	(mmHg) SBP	(mmHg) DBP	HR max	(L/min) VE	(cc/min) VO2max	VO2/kg	(mm) LVDD	(mm) LVDS	(mm) IVS	(mm) PWT	(g) LVM	LVM/m ²
H.A.	163.7	68.5	54	山登り	25.6	21.4	14.6	53.9	123	68	172	113	2127.3	30.9	50	30	10	10	212.7	121.9
K.I.	170.5	79.2	58	グリーンランド北極マッキンレー (6194) チョーオーユー (8153) タウラギリ (8167) エベレスト (8848)	27.2	19.7	15.6	63.6	158	88	150	96	3149.3	39.5	55	30	11	11	287.8	150.6
T.I.	164.6	67.2	60	ライラ (6986) チョーオーユー (8153) タウラギリ (8167) シンパノマ (8012) エベレスト (8848) エングラウ (4158) ヤン	24.8	20.6	13.8	53.4	142	80	181	85	2499.0	37.0	55	33	10	10	251.7	144.9
T.H.	161.5	60.1	62	マッキンレー (6194) ケニア山 (5200) アコンカグア (6960)	23.0	19.8	11.9	48.2	142	78	170	110	2785.0	45.6	50	31	11	11	244.2	149.4
M.K.	167.1	62.1	61	グリーンランド フルマラン	22.2	14.9	9.3	52.8	148	85	173	99	2618.0	42.1	49	33	10	10	205.3	120.9
I.T.	181.1	62.4	61	マッターホルン (4471) カザフスタン	19.0	20.7	12.9	49.5	128	75	170	56	2073.3	33.1	49	31	10	10	205.3	113.8

%fat：体脂肪率、FM：体脂肪量、LBM：除体脂肪体重、SBP：収縮期血圧、DBP：拡張期血圧、VE：最大換気量、VO2max：最大酸素摂取量、LVDD：左室拡張末期径、LVDS：左室収縮末期径、IVS：中隔厚、PWT：左室後壁厚、LVM：左室心筋重量

から一挙に登頂を試みたわけである。その間、高地順応のためC1とC3の間を何回か往復した。酸素はC4から登頂を目指すとき初めて使用したが、登頂まで要した時間は5時間であった。

まず、少なくともC2(6,500m)まで登ることができた50歳半ば以上の高齢登山者6人についての各指標を、過去の登山キャリアも含めて、表2に示した。K.I.が今回の登山隊の隊長であり、T.I.がGasherbrum IIの登頂に成功した4人のうちの1人である。隊長であるK.I.は、表に挙げたH.A.がC4で動けなくなったうえに意識がなくなったためC4に留まって、登頂をあきらめた。しかし十分に登頂に成功しえたとは判断できる者である。T.H.はC4まで到達し、C4に留まった隊長に代わって第2アタック隊のリーダーとして山頂まで320mの所まで到達したが悪天候に阻まれてやむなく下山をしている。M.K.はC1からC2へは隊の先頭で登ったが、高度馴化に失敗して視野狭窄など典型的な高山病症状を呈したため、C1に戻っている。最後のI.T.はC3で馴化に失敗しベースキャンプへ降りている。過去のキャリアについては、K.I. T.I.の2人がずば抜けていることが表からわかる。

体格、体組成については、K.I.が明かな過体重

であるが体脂肪率は19.4%と低く、徐脂肪体重が多い。重い荷物を背負って山を登るには適した身体形態といえるのかもしれない。年齢を考慮に入れると、全体として体脂肪率は低値である。断層心エコーによる左室肥大診断のもっともよい指標といえる左室心筋重量指数(LVmass index)が125 g/m²を越す例が半数に及び運動歴の関与が示唆された。K.I.は血圧がやや高めであり、それを反映してか左室壁厚が11mmとやや厚かった。フィットネスレベルを表す最大酸素摂取量は、H.A.とI.T.がやや低めであるが一方で高い者もいた。優れた登山者と思われるK.I.とT.I.については、他

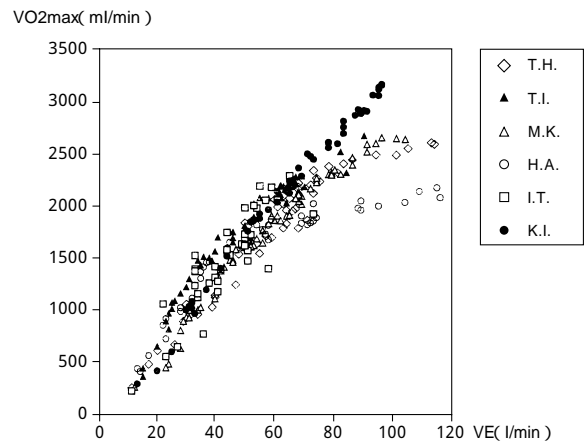


図8 換気量と酸素摂取量の関係。優れた登山家であるK.I.とT.I.を黒で示した。

表3 3群の比較

		(cm)	(kg)		BMI	%fat	(kg)	(kg)	(mmHg)	(mmHg)		(L/min)	(cc/min)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	
		height	weight	age			FM	LBM	SBP	DBP	HRmax	VE	V _{O2} max	V _{O2} kg	LVDD	LVDS	IVS	PWT	LVM	LVM _{nt}
Climber	mean	168.1	66.6	59.3	23.6	19.5	13.0	53.6	140.2	79.0	169.3	93.2	2542.0	38.0	51.3	31.3	10.3	10.3	234.5	133.6
	S.D	7.1	7.0	2.9	2.9	2.3	2.2	5.4	12.9	7.2	10.3	20.8	406.7	5.5	2.9	1.4	0.5	0.5	32.9	16.5
Active	mean	165.8	62.4	56.9	22.8	19.4	12.2	50.2	131.5	75.7	173.0	101.1	2735.9	44.0	49.1	30.4	9.9	10.0	204.6	121.9
	S.D	3.8	5.9	2.1	2.5	3.0	2.8	4.4	18.9	8.5	10.3	11.8	337.6	6.2	4.2	3.8	1.2	1.0	30.6	15.6
Sedentary	mean	164.8	70.5	56.5	26.7	25.9	18.6	53.3	126.3	77.0	172.8	82.8	2177.4	30.8	48.0	28.8	10.6	10.6	215.4	121.3
	S.D	4.5	4.5	2.8	0.6	6.6	4.6	5.8	10.0	7.5	12.5	20.2	241.9	2.0	1.6	2.3	0.9	0.9	16.7	9.4

略に関しては表2を参照

の者と比較して特別に高いわけではなく、マラソンのようなスポーツとは異なり、高地登山には最大酸素摂取量以外の種々の要素が能力を規定するものと考えられた。また、換気応答の指標では、表からもわかるように、エリートといえるK.I.は、最大酸素摂取量の絶対量が高い割に最大換気量が明らかに低かった。運動負荷中の換気量と酸素摂取量の関係を6例で検討してみると、K.I.とT.I.は換気量の割に酸素摂取量が各負荷時に高値を示しており、肺の拡散能が優れていることを示唆された。

エベレストの無酸素初登頂に成功した前述のMessnerとHabelerを含む8,500m以上の高山に無酸素登頂を経験したエリート登山家6人について、スイス内3箇所の別々の施設で最大酸素摂取量、断層心エコー、骨格筋バイオプシー、さらには低酸素に対する換気応答の変化を調べたOelzらの有名な論文がある¹⁸⁾。彼らの年齢は、34歳から50歳(平均40.6歳)であった。6人の最大酸素摂取量は平均58.3ml/min/kgと高く、この値は同年齢のおおよそアマチュアのマラソンランナーのそれに相当する値であった。もっともすばらしいキャリアーの持ち主である測定当時39歳のMessnerは48.8ml/min/kgであり、6人中もっとも低い値であった。しかしながら、低酸素時の運動負荷、つまりP_{IO2}が77Torrで90wのサイクルエルゴメータ負荷時において、Messnerは血中% HbO_2 が92.6%と高値を保った。6人のエリート登山家の平均が同じ環境下で75.4ml/min/kg、一般人で69.3ml/min/kgであったことから、Messnerが低酸素時において抜群に優れた肺拡散能を有していたことになる。

Oelzらの論文¹⁸⁾では、エリート登山者は、安静時の換気量が多く、しかも低酸素や高炭酸ガス環境に対する換気応答が優れていることを考察している。

中高年のエリート登山者を検討した今回の成績では、大気中での運動負荷では、むしろ換気量は少なく、その割に酸素摂取量が高いことが示された。低酸素状態での負荷を我々は行っていないが、拡散能が優れていることが高地登山の順応に必要な因子の一つと考えられた。

表3では、当研究センターにおいて、上記シルバートル登山隊の測定・検査を行ったほぼ同じ時期に同じ内容の検査を施行した同年齢層のうち、長距離走などの運動習慣があり日常の身体活動量が多い群(active; n=10)ならびに普段の身体活動量が少ない群(sedentary; n=6)を抽出して、今回の登山者達の諸指標と比較した。

年齢は登山者群が他の2群に比してやや高いが、体組成では体脂肪率がactive群とほぼ同じで徐脂肪体重が大きかった。血圧がやや高めであり、体格で補正した心筋重量係数も大きかった。フィットネスのもっとも良い指標である最大酸素摂取量(ml/min/kg)はactive群とsedentary群との中間値であった。

5. まとめ

本論文の冒頭で述べたように、環境変化に身体がどのように対応するか、変化した環境の中で身体内外から関与する因子にはどのようなものがあるのか、について知ることは臨床上意義深いもの

表4 全13例の各指標

name	height	weight	sex	age	BMI	%fat	FM	LBM	SBP	DBP	HRmax	VO ₂ max	VO ₂ kg	LVDD	LVDS	IVS	PWT	LVM	LVMm ²
I. T	181.1	62.7	M	61	19.1	20.7	12.9	49.8	128	75	170	2073.3	33.1	49	31	10	10	205.3	113.5
M. M	173.4	76.3	M	56	25.4	22.5	17.2	59.1	102	69	169	2329.5	30.5	50	32	13	10	260.6	136.8
K. F	164.4	64.8	M	63	24.0	21.2	13.7	51.1	136	65	170	2264.8	35.0	49	30	10	10	205.3	120.1
T. I	164.6	76.5	M	60	24.9	20.6	13.9	53.6	142	80	181	2499	37.0	55	33	10	10	251.7	144.6
H. A	163.7	68.8	M	54	25.7	21.4	14.7	54.1	123	68	172	2127.3	30.9	50	30	10	10	212.7	121.7
N. O	163.5	51.7	M	56	19.3	25.1	13.0	38.7	142	81	153	1216.7	23.5	44	32	12	10	196.4	127.0
Y. O	160.4	63.3	M	61	24.6	27.0	17.1	46.2	140	83	169	1891.3	29.9	46	30	10	10	183.8	110.5
K. I	170.5	79.7	M	58	27.4	19.7	15.7	64.0	158	88	150	3149.3	39.5	55	30	11	11	287.8	150.2
J. T	151.5	54.2	F	58	23.6	20.9	11.3	42.9	128	71	176	1835.7	33.9	46	30	8	8	132.6	88.8
T. H	161.5	61.1	M	62	23.4	19.8	12.1	49.0	142	78	170	2785	45.6	50	31	11	11	244.2	148.4
M. K	167.1	62.2	M	61	22.3	14.9	9.3	52.9	148	85	173	2618	42.1	49	33	10	10	205.3	120.8
O. K	160.2	56.1	M	46	21.9	14.1	7.9	48.2	122	68	174	2742	48.9	52	27	11	10	236.1	149.6
K. H	158.1	56.8	M	57	22.7	14.3	8.1	48.7	123	71	181	2672.3	47.0	40	25	10	10	144.1	91.7
mean	164.6	63.5		57.9	23.4	20.2	12.8	50.6	133.4	75.5	169.8	2323.4	36.7	48.8	30.3	10.4	10.0	212.8	124.9
S. D	7.4	8.2		4.5	2.4	3.9	3.1	6.5	14.4	7.4	9.1	505.3	7.6	4.2	2.3	1.2	0.7	44.1	20.7

略に関しては表2を参照

である。一般臨床家には目に触れる機会の少ない内容の論文を紹介し、それに加えてシルバートール登山隊のような特徴ある集団の検査・測定成績を示した。中高年の高地登山者の身体的特性を明らかにした成績はいまだ無い¹⁹⁾。ここに提示した内容は極めて貴重な成績であると信じている。シルバートール登山隊に参加し、ベースキャンプに待機した隊員もいる。その方々の身体特性も含めて表4に検査・測定した全13例についてまとめて示した。のちのための保存をも目的としたからである。

文 献

- 1) Singh I. High altitude pulmonary edema. *Lancet* 1965;1:229-234,1965.
- 2) Singh I. Acute mountain sickness. *N Eng J Med* 1969;280:175-218.
- 3) Pugh LGCE, Ward MP. Some effects of high altitude on man. *Lancet* 1956;2:1115-1121.
- 4) Pugh LGCE. Physiological and medical aspects of Himalayan Scientific and Medical Expedition 1960-61. 1962; *Br Med J* 2:612-617.
- 5) Pugh LGCE, Grill MB, Lahiri S, Milledge JS, Ward MP, West JB. Muscular exercise at great exercise. *J Appl Physiol* 1964;19:431-440.
- 6) Houston CS, Riley RL. Respiratory and circulatory changes during acclimatization to high altitude. *Am J Physiol* 1947;140:565-588.
- 7) Reeves JT, Groves BM, Sutton JR, Wagner PD, Cymerman A, Malconian MK, Rock PB, Young PM, Houston CS. Operation Everest II: preservation of cardiac function at extreme altitude. *J Appl Physiol* 1987;63:531-539.
- 8) Houston CS, Sutton JR, Cymerman A, Reeves JT. Operation Everest II: Man at extreme altitude. *J Appl Physiol* 1987;63:877-882.
- 9) Wagner PD, Sutton JR, Reeves JT, Cymerman A, Groves BM, Malconian MK. Operation Everest II: pulmonary gas exchange during a simulated ascent of Mt Everest. *J Appl Physiol* 1987;63:2348-2359.
- 10) Green HJ, Sutton J, Young P, Cymerman A, Houston CS. Operation Everest II: Muscle energetics during maximal exhaustive exercise. *J Appl Physiol* 1989;66:142-150.
- 11) Cymerman A, Reeves JT, Sutton JR, Rock PB, Groves BM, Malconian MK, Young PM, Wagner PD, Houston CS. Operation Everest II: Maximal oxygen uptake at extreme altitude. *J Appl Physiol* 1989;66:2446-2453.
- 12) West JB, Rahiri S, Maret KH, Peters RM, Pizzo CJ. Barometric pressure at extreme altitudes on Mount Everest: physiological significance. *J Appl Physiol* 1983;54:1188-1194.
- 13) West JB, Hackett PH, Maret KH, Milledge JS, Peters RM, Pizzo CJ, Winslow RM. Pulmonary gas exchange on the summit of Mount Everest. *J Appl Physiol* 1983;55:678-687.
- 14) West JB, Boyer SJ, Graver DJ, Hackett PH, Maret KH, Milledge JS, Peters RM, Pizzo CJ, Samaja M, Sarnquist FH, Schoene RB, Winslow RM. Maximal exercise at extreme altitudes on Mount Everest. *J Appl Physiol* 1983;55:688-698.
- 15) 特集「登山の医学」臨床スポーツ医学 1987;4:609-677.
- 16) 特集「高所登山の医学」臨床スポーツ医学 1996;13:601-670.
- 17) Peacock AJ. Oxygen at high altitude. *BMJ* 1998;317:1063-

1066.

- 18) Oelz O, Howald H, Prampero PE, Hoppeler H, Claassen H, Jenni R, Buhlmann A, Ferratti G, Bruckner J-C, Veicsteinas A, Gussoni M, Cerretelli. Physiological profile of world-class high-altitude climbers. *J Appl Physiol* 1986;60:1734-1742.
- 19) Menard D. The aging athletes. In: *Oxford Textbook of Sports Medicine*. Harries M, Williams C, Stanish WD, Micheli LJ (Eds). Oxford: Oxford University Press, 1994, pp. 598-620.