

# 常圧低酸素室を用いた低酸素運動負荷試験による高所身体適性の予測

前川剛輝<sup>1)</sup>, 入江初舟<sup>2)</sup>, 山本正嘉<sup>3)</sup>

鹿屋体育大学 <sup>1)</sup>スポーツパフォーマンス系 <sup>2)</sup>大学院 <sup>3)</sup>スポーツトレーニング教育研究センター

## I. 緒言

高所において高所順応がうまくいかない場合、高度障害に悩まされたり、肺水腫や脳浮腫、さらには死の危険性も増してくる。事前に高所に対する自らの適性がわかっているならば、予防策を準備してより安全に高所登山を遂行することが可能になる。このような高所でのトラブルを回避するために、換気応答や内分泌の応答といった側面から多くの研究 (Moore LG et al. 1986, 菅沼ら1993, Bartsch P et al. 1991) がなされてきた。しかし高所順応には非常に個人差が大きいため、科学的に法則化しにくいと言われている。

近年では、高所順応の個人差や高所に対する適性について、遺伝子レベルの研究 (Montgomery HE et al. 1998, Hanaoka M et al. 2000) も行われている。しかしこのような調査には、採血や高価な測定機器が必要であり、その費用も安価とは言えない。そのため、簡便かつ非侵襲的な方法により、高所に対する適性を予測する試みもなされている (菊池ら 1992, Grant S et al. 2002, 野口1993)。

菊池ら (菊池ら 1992) は低圧室を利用した高所順応トレーニングにより、高所身体適性予測の可能性を示唆している。彼らは低圧室を利用した高所順応トレーニング時の動脈血酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>) の変化と、実際の高所でのAMSスコアとの関連を認めている。しかしこの方法は、30分程度の運動を、高度を変えて (6種類の高さ: 3500~5500m) 行うために、適性を予測するまでに非常に時間がかかるというデメリットを含んでいる。

また野口 (野口1993) やGrantら (Grant S et

al. 2002) は、高所での心拍数 (HR) やSpO<sub>2</sub>の変化を観察することで、高所での体調予測を試みている。しかしこれらの研究は、現地に行っただけからのHRやSpO<sub>2</sub>の変化から体調を予測するという方法であるため、高所に赴く前に適性を予測し、個々に応じた予防策を準備することは難しいといえる。

そこで本研究では、高峰の登頂を目指す登山者を対象に、実験室 (常圧低酸素室) において低酸素暴露試験と低酸素運動負荷試験を行わせ、その際のHRやSpO<sub>2</sub>の結果から実際の高所に対する身体適性をあらかじめ予測できるかを検討した。

## II. 方法

### 1. 被検者

被検者は日本人の男性登山家8名であった。彼らは日ごろから多くの登山を行うとともに、ウォーキングやジョギング等のトレーニングを継続的に実施し、幾度かの高峰登山 (海拔3000m以上) の経験を有している。被検者の身体的特性はTable 1に示した。なお、全ての被検者には本研究の目的、方法、危険性を十分説明し、研究に参加することの同意書にサインを得た。

### 2. 実験室での測定

#### 2-1. 最大酸素摂取量 (VO<sub>2</sub>max) および最高心拍数 (HRmax) の測定

VO<sub>2</sub>maxおよびHRmaxの測定のために、トレッドミル歩行を用いた運動負荷試験を行った。傾斜は15%、30m・min<sup>-1</sup>から毎分10m・min<sup>-1</sup>ずつ負荷を増加させる速度漸増負荷法を用い、100m・min<sup>-1</sup>に達してからは、斜度を2%ずつ漸増させ

Table 1 Physical and physiological characteristics of the subjects

Subjects	Age(yr)	Height (cm)	Weight (kg)	%Fat(%)	VC(mL)	$\dot{V}O_2\max$			HRrest (bpm)	HRmax (bpm)
						(L·min <sup>-1</sup> )	(mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	Comparison with same generation		
A	33	169.0	60.8	20.8	4400	3.12	51.3	very good	62	190
B	34	170.3	61.6	13.1	3620	3.35	54.4	excellent	58	180
C	38	170.2	67.2	20.1	4440	3.27	48.6	very good	58	175
D	45	170.6	70.8	19.8	4380	2.58	36.5	average	60	162
E	50	164.6	58.0	13.6	4920	2.95	50.9	excellent	58	182
F	63	163.8	57.8	17.0	3020	2.06	35.6	good	51	152
G	63	159.8	60.8	18.9	3200	2.18	35.9	good	68	167
H	64	162.3	63.0	18.3	3320	2.16	34.3	average	72	168
mean	48.8	166.3	62.5	17.7	3912.5	2.71	43.4		60.9	172.0
SD	13.3	4.2	4.5	2.9	706.1	0.53	8.6		6.5	12.2

る斜度漸増負荷法を用いた。酸素摂取量は自動呼気ガス分析装置 (Vmax29c, SensorMedics, USA) を用いて分析し、心拍数は心電図モニター (BSM-7200, Nihon Koden, Japan) を用い、胸部双極誘導により導出した心電図から求めた。HRmaxは $\dot{V}O_2\max$ 出現時のHRを用いた。

## 2-2. 安静時心拍数 (HRrest) の測定

HRrestの測定にはパルスオキシメーター (PULSOX3si, MINOLTA, Japan) を用いた。 $\dot{V}O_2\max$ の測定に先立ち、任意の日に、起床後10分間の座位安静を保ちHRの測定を行った。なおHRrestは、この際の10分間の値を平均化して算出した。

## 2-3. 低酸素暴露試験

低酸素環境下における安静時のHRおよびSpO<sub>2</sub>の応答を知るために、高度4000m相当 (O<sub>2</sub>: 12.7%) に設定された常圧低酸素室で低酸素暴露試験を行った。被検者は座位安静で60分間の安静を保ち、パルスオキシメーターを用いて指尖でのSpO<sub>2</sub>とHRを測定した。

## 2-4. 低酸素運動負荷試験

低酸素環境下における身体活動中のHRおよびSpO<sub>2</sub>の応答を知るために、自転車エルゴメーター (Aerobike 75XL, Combi, Japan) による多段階負荷試験を行った。測定に先立ち、HRrest

およびHRmaxの値から、各被検者の70~80%HRreserveの値を算出した。運動は15Wで5分間のW-upの後、15Wずつ負荷を増加させ、70~80%HRreserveに達する負荷まで行った (Fig. 1)。なおペダルの回転数は50rpmとした。SpO<sub>2</sub>はパルスオキシメーターを用い、W-up開始から運動終了まで、連続的に測定した。HRの測定は自転車エルゴメーターに内蔵された耳朶用透過型脈拍計を用い、SpO<sub>2</sub>と同様に測定した。なお、運動はトレーニング環境シミュレーター (Training environment simulator, Espec Engineering, Japan) を用い、高度4000mに相当

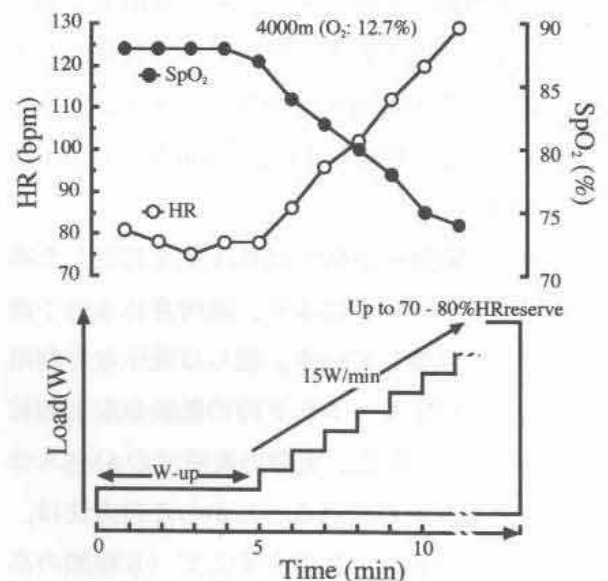


Fig.1 Experimental protocol of incremental pedaling exercise test under a hypoxia and an example of changes in heart rate (HR) and arterial oxygen saturation (SpO<sub>2</sub>).

する低酸素ガス (O<sub>2</sub>:12.7%) をダクトを介して吸入させながら行なった。

### 3. Yala Peakでの測定

被検者は実験室での測定を終えた11日後に、ネパール・ヒマラヤのYala Peak (標高5520m) に出かけた (Fig. 2)。そして、高所での身体活動中の健康状態を知るために、以下の2種類の測定を行った。

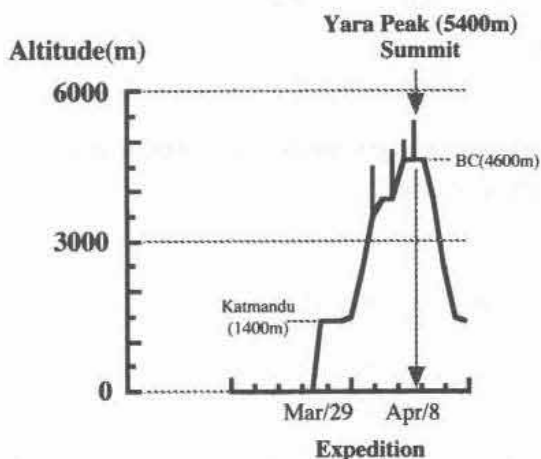


Fig.2 Altitude ascent profiles of subject H.

#### 3-1. 高山病の判定

Yala Peak登山中の病的症状 (高山病) の判定には、急性高山病重症度自己判定表を用いてAMS スコアを調査した。AMS スコアは登山期間中毎日、その日の夕方に一日の状況をふり返って記入させた。

#### 3-2. ストレスの判定

ストレスの尺度として、Hashimoto et al. (1994) が作成した精神的健康パターン診断検査 (Mental Health Pattern: MHP-1) のStress Check List (SCL) を用いてSCL scoreを調査した。SCL scoreの記入は、ヤラピークトレッキング中、ベースキャンプにて行った。

MHP-1尺度はストレスと生きがい (Quality of Life: QOL) の2次元から構成される尺度であり、SCL尺度は6つの下位尺度 (こだわり, 注意散漫, 対人回避, 対人緊張, 疲労, 睡眠・起

床障害), QOL尺度は2つの下位尺度から (生活の満足感, 生活意欲) で構成されている。本研究では、SCLのみを用いた。このMHP-1の信頼性と妥当性はHashimotoらの報告により認められている (Hashimoto K and Tokunaga M 1999)。

### 4. 統計処理

結果はすべて平均値±標準偏差 (mean±SD) で示した。各指標の相関分析はPearson's correlation coefficient を用いた。なお、危険率5%未満 ( $p<0.05$ ) を有意とした。

## Ⅲ. 結果

### 1. 実験室における測定結果

被検者の身体的特性をTable 1に示した。被検者の $\dot{V}O_{2max}$ は、日本人の $\dot{V}O_{2max}$ の同年代評価値と比較するとaverageが2名, goodが2名, very goodが2名, excellentが2名であった。

高度4000m相当で1時間の安静による低酸素暴露試験を行った結果,  $SpO_2$ は $83.3\pm 4.7\%$ , HRは $72.8\pm 6.8\%$ ,  $SpO_2/HR$ 比は $1.15\pm 0.13$ であった。なお、今回1名 (被検者D) が測定に失敗したため、低酸素暴露試験の結果に限り7名の値を採用した。

Fig. 1に低酸素運動負荷試験中の $SpO_2$ とHRの一変化の例を示した。両者はW-up時 (5分間の定常負荷運動時, 以下steady-state exercise) にはほぼ一定の値を推移したが、その後、運動強度の増大に伴い $SpO_2$ は低下し、HRは上昇した。

低酸素運動負荷試験中のHRと $SpO_2$ の結果を検討した結果、両者の間には高い直線性が認められた (Fig. 3)。そこでこの回帰直線を“HS-slope”, 傾きを“HS-slope value”と名付けることにした。各被検者で見るとHS-slope が緩やかな被検者と急な被検者とが存在し、HS-slope valueには個人差が観察された (Fig. 3)。また、HS-slope valueと $\dot{V}O_{2max}$ の間には有意な相関関係が認められた ( $r=0.813$ ,  $p<0.05$ )。

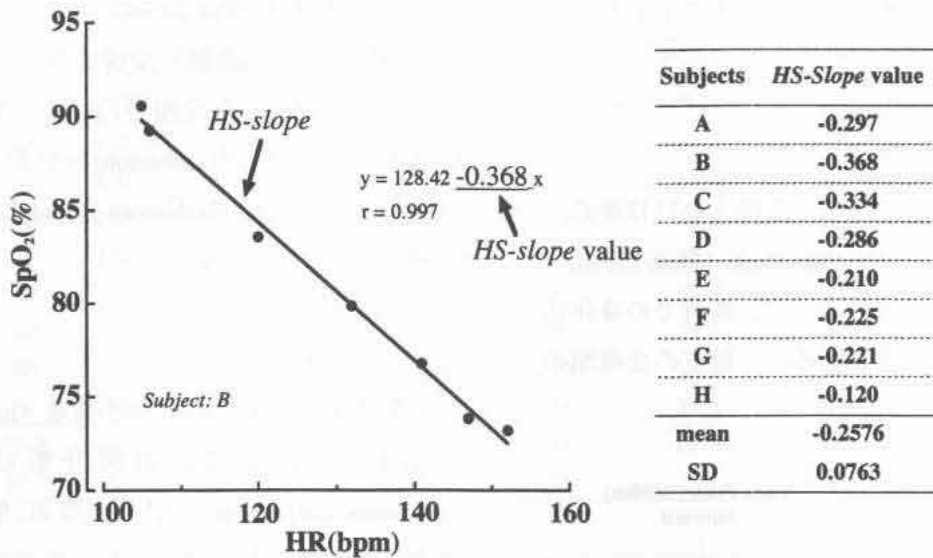


Fig.3 Relationship between heart rate (HR) and arterial oxygen saturation (SpO<sub>2</sub>) and determination of *HS-slope* value and individual value.

2. 現地での測定の結果

Table 2 に登山中のAMSスコアおよびSCLスコアの結果を示した。SCLスコアは8人の平均で50.0, 最低値が32, 最高値は65であり, 被検者間のばらつきが大きかった。SCLスコアは心理的ストレス, 身体的ストレス, 社会的ストレスの3要因に分けられ, その合計スコアがSCLスコアとなる。心理的ストレスは8人の平均で15.3, 同様に身体的ストレスは23.3, 社会的ストレスは11.5であった。社会的ストレスは8名中5名が最低値(10)を示し, 他の2要因と比べ低値を示した。

Table 2. Mean acute mountain sickness (AMS) score and Stress check list (SCL) score of expedition.

Subjects	Average AMS score (score)	SCL score (score)
A	1.9	50
B	2.5	65
C	2.5	60
D	3.2	65
E	2.9	37
F	1.6	32
G	1.9	49
H	0.8	42
mean	2.17	50.0
SD	0.76	12.6

3. 実験室での測定結果と現地での測定結果との関係

Table 3 に実験室での生理指標の測定結果と, 現地で行った自覚指標の測定結果との関係を示した。数値は相関係数を示している。

低酸素暴露試験および低酸素運動負荷試験時のSpO<sub>2</sub>とAMSスコア, SCLスコアとの関係を検

Table 3. Correlations between AMS, SCL and the physiological responses under a hypoxia (O<sub>2</sub>: 12.7%).

	AMS Score	SCL Score
VO <sub>2</sub> max	0.557	0.573
4000m Rest	0.062	0.294
SpO <sub>2</sub> steady-state exercise	0.308	<b>0.713*</b>
70%HRreserve	0.038	<b>0.708*</b>
4000m Rest	0.380	0.480
HR steady-state exercise	0.620	0.612
70%HRreserve	0.259	0.280
4000m Rest	0.235	0.385
SpO <sub>2</sub> /HR steady-state exercise	0.635	0.482
70%HRreserve	0.228	0.200
HS-slope value	0.653	<b>0.734*</b>

\*: p<0.05



討した結果, steady-state exercise時および70% HRreserve時のSpO<sub>2</sub>とSCLスコアとの間に有意な正の相関関係が認められた( $r=0.713$ ,  $p<0.05$ ,  $r=0.708$ ,  $p<0.05$ )。これはsteady-state exercise時および70% HRreserve時のSpO<sub>2</sub>の値が高い被検者ほど, SCLスコアが高値を示すという結果である。

*HS-slope* valueとSCLスコアの間にも有意な相関関係が認められた( $r=0.734$ ,  $p<0.05$ ) (Fig. 4)。これは*HS-slope* valueが低い (*HS-slope* の傾きが急である) 被検者ほどSCLスコアの値が高いという結果を示している。

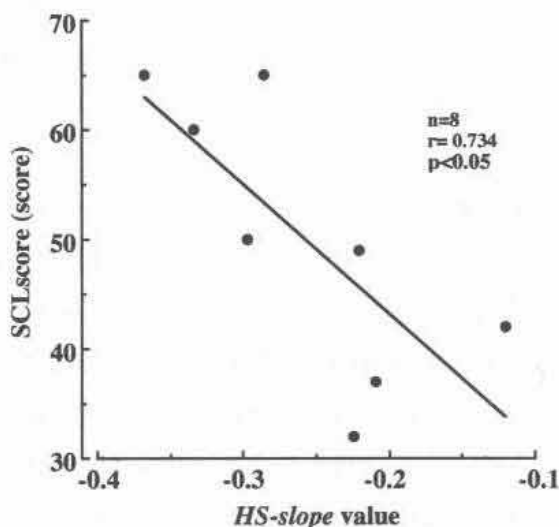


Fig.4 Relationship between *HS-slope* value and SCL (stress check list) score.

#### IV. 考察

高所に対する身体適性や体調を予測する試みはいくつかなされているが, 採血等を伴わない非侵襲的な方法による研究は少ない (菊池ら1992, Grant et al. 2002, 小川ら1999, 野口ら1994)。本研究では, 高峰の登頂を目指す登山者を対象に, 実験室 (常圧低酸素) において低酸素暴露試験と低酸素運動負荷試験を行わせ, その際のHRやSpO<sub>2</sub>の結果から実際の高所に対する身体適性が予測できるかを検討した。その結果, 低酸素運動負荷試験により得られた*HS-slope* valueが, 実際の高所でのストレス指標との相関が最も高く, 統計的にも有意であった。

#### 1. 高所に対する身体適性予測の可能性

実験室での生理指標の測定結果と, 現地で行った自覚指標の測定結果との関連を検討した結果, 最も高い相関を示したのは, *HS-slope* valueとSCLスコアとの関係であった ( $r=0.734$ ,  $p<0.05$ ) (Fig. 4)。これは*HS-slope* valueが低い (*HS-slope* の傾きが急である) 者ほど実際の高所で感じるストレスの程度が高くなることを意味している。一方, *HS-slope* valueとAMSスコアとの間には有意な相関関係は認められなかった。

菊池ら (菊池ら1992) は, 低圧低酸素環境へ急性暴露した際のSpO<sub>2</sub>の動態から, 実際の高所における身体パフォーマンス予測の可能性を示唆している。彼らは低圧低酸素室を用い3,500m, 4,000m, 4,500m, 5,000m, 5,500m および6,000mで50~70%  $\dot{V}O_{2max}$ 強度のペダリング運動を行わせた。そして各高度での運動中のSpO<sub>2</sub>の平均値を算出し, 高度上昇に伴うSpO<sub>2</sub>の低下割合を一時回帰直線で表した。その結果, ベースキャンプ (4300m) 以上での平均AMSスコアと各高度におけるSpO<sub>2</sub>の低下割合 (回帰直線の傾き: Slope of SaO<sub>2</sub>) との間に関連があると述べているが, 有意な相関 ( $n=8$ ,  $r=0.641$ , NS) ではなかった。

AMSスコアと*HS-slope* valueとの相関係数は0.653, AMSスコアとSlope of SaO<sub>2</sub>との相関係数は0.641であることから, *HS-slope* valueのAMS症状に対する予測精度は, 菊池らの研究と同程度であると考えられる。

高所でのSpO<sub>2</sub>の低下や改善は, 高所順応や高所耐性の指標となる可能性が示されている。しかし, 高所でのHRの増加や改善がそれらの指標となるかは意見が分かれている。高所での脈拍増加率が高い場合は高山病症状の発現頻度が高かったとする報告もあるが, AMS症状予測のパラメーターを検討した研究では, HRだけがAMSスコアと相関を示さなかったとも述べている (野口ら1994)。HRとSpO<sub>2</sub>は低酸素に対す

る生体の軌を一にした反応と考えられ、両値を参考にする必要があると思われる。そこで野口は、両方の指標を組み合わせることで高所での体調予測を試みている。

野口(野口ら1994)はインド・デマンド山(5,671m)登山時のSpO<sub>2</sub>、HRおよび体調スコアの調査を行った。その中で、体調スコアはSpO<sub>2</sub>とHRを個別に検討した場合よりも、SpO<sub>2</sub>/HR比(SpO<sub>2</sub>をHRで除した値)とよく相関し、体調の予測や高所馴化の程度を表すのに有効であると述べている。本研究でもSCLスコアはHRとの有意な相関は認められず、SpO<sub>2</sub>とは有意な相関が認められたがHS-slope valueとの方が高い相関を示した。したがって、高所における体調やストレスの程度を予測するのに、HRとSpO<sub>2</sub>を組み合わせた指標を用いることで、その予測精度は高くなると考えられる。

HS-slope valueは、AMS症状の予測に対しては先行研究と同程度であるが、高所でのストレスの程度を予測するのに有効な指標であると考えられる。したがって、低酸素運動負荷試験を行うことで、高所に対する身体適性がある程度予測できると考えられる。

## 2. 低酸素運動負荷試験の実用性とその意義

高所に対する身体適性を予測する試みで、採血などを伴わない非侵襲的な方法はいくつかある(菊池ら1992, Grant et al. 2002, 小川ら1999, 野口ら1994)。しかし、そのほとんどが、実際の高所に行ってからのHRやSpO<sub>2</sub>の結果から、体調やAMS症状を予測しようとするものである。この方法では、実際の高所に行く前にその対処法、また事前準備を行うことは困難である。また先述の菊池らの方法は、高所に赴く前に適性の予測を試みているが、適性予測までに、非常に時間がかかるというデメリットを含んでいる。

先にも述べたが、低酸素運動負荷試験でHS-slope valueを算出することにより、高所に対する

適性を予測することが可能であると考えられる。事前に高所に対する自らの適性がわかれば、予防策を準備して安全に高所登山を遂行することが可能であると考えられる。また、本研究の低酸素運動負荷試験は、常圧低酸素室を利用して10~15分程度で行うことができ、パルスオキシメーターを利用すればSpO<sub>2</sub>とHRとを同時に、それも簡単に測定できる。常圧低酸素室は安全性やコスト面からも、低圧低酸素室よりも使い勝手がよく、今後広く普及すると考えられる。

以上のことから、本研究の低酸素運動負荷試験は、高所に対する身体適性の予測が可能であり、先行研究よりも簡便かつ短時間で実施することができることから、実用性の高い方法であると考えられる。

## V. まとめ

常圧低酸素室を用いて、高度4,000m相当の低酸素環境下で多段階の運動負荷試験を行った。その結果、HS-slope valueが実際の高所でのストレス指標と相関が高く、統計的にも有意であった。これは高所に対する身体適性を予測できる可能性を示唆するものである。また本研究の方法は、簡便かつ短時間で実施することができることから、実用性の高い方法であると考えられる。

## 引用文献

- Bartsch P, Maggiorini M, Schobersberger W, Shaw S, Rascher W, Girard J, Weidmann P, Oelz O. Enhanced exercise-induced rise of aldosterone and vasopressin preceding mountain sickness. *J Appl Physiol*; 71: 136-143, 1991.
- Grant S, MacLeod N, Kay JW, Watt M, Patel S, Paterson A, Peacock A. Sea level and acute responses to hypoxia: do they predict physiological responses and acute mountain sickness at altitude?. *Br J Sports Med*; 36:141-146, 2002.

Hanaoka M, Tanaka M, Ge RL, Droma Y, Ito A, Miyahara T, Koizumi T, Fujimoto K, Fujii T, Kobayashi T, Kubo K. Hypoxia-induced pulmonary blood redistribution in subjects with a history of high-altitude pulmonary edema. *Circulation* 28; 101: 1418-1422, 2000.

Hashimoto K and Tokunaga M: Development of a diagnostic inventory for mental health pattern (MHP): Reliability and validity of the MHP scale. *J Health Sci*; 21: 53-62, 1999.

菊池和夫, 佐藤方彦, 藤原睦弘: ムスターグ・アタ峰登山隊に対する高所順応トレーニングについて。登山医学12: 59-66, 1992.

Montgomery HE, Marshall R, Hemingway H, Myerson S, Clarkson P, Dollery C, Hayward M, Holliman DE, Jubb M, World M, Thomas EL, Brynes AE, Saeed N, Barnard M, ell JD, Prasad K, Rayson M, Talmud PJ, Humphries SE. Human gene for physical performance. *Nature* 21; 393(6682): 221-222, 1998.

Moore LG, Harrison GL, McCullough RE, McCullough RG, Micco AJ, Tucker A, Weil JV, Reeves JT. Low acute hypoxic ventilatory response and hypoxic depression in acute altitude sickness. *J Appl Physiol*; 60: 1407-1412, 1986.

野口いづみ: 動脈血酸素飽和度/脈拍比の体調予測としての可能性, イラン・デマバンド山(5,671m)登山における検討。登山医学13: 99-106, 1993.

小川実, 石田良樹, 吉岡浩, 吉岡尚文: 高所トレーニングにおける急性高山病の把握と予測。登山医学19: 59-68, 1999.

菅沼勲, 水野康, 熊崎泰仁, 浅野勝己: 6,000m相当高度における安静および最大下運動時の水・電解質代謝と内分泌応答。宇宙航空環境医学 30: 109-116, 1993.