高地作業のエネルギー代謝

Energy Metabolism at High Altitude

東京医科歯科大学医学部衛生学教室（主任：北 博正教授）

伊 藤 良 夫・朝 比 志 郎
鈴 木 聡 男・北 博 正

Yoshio Ito, Shiro Asahi, Toshio Suzuki and Hiromasa Kita

*Department of Hygiene, Tokyo Medical and
Dental University School of Medicine, Tokyo*

During construction work of a drive way near Tateyama Murodo (ca. 2400 m above the sea-level), a good many, not yet acclimatized, labourers suffered from mountain sickness. To establish reasonable labour conditions for them, we have carried out some basic studies on the physiological responses to high altitude stress. Six healthy male adults were chosen as subjects, and ventilation, oxygen consumption, respiratory quotient, pulse rate and blood pressures were measured, and, as for the control data, those of the same subjects at Senju-ga-hara (ca. 460 m above the sea-level) were measured. The following results were obtained:

- 1) After a 4-5 day duration at Murodo, the BTPS ventilation and STPD oxygen consumption increased approximately 30% more than at sea-level.
- 2) After a 1-2 day duration at Murodo, however, the STPD ventilation decreased.
- 3) After a 1-2 day duration at Murodo, the mean values of RQ ranged from 0.90 to 0.96 at rest.
- 4) After a 4-5 day duration at Murodo, systolic blood pressure and pulse rate were higher than those at sea-level but the diastolic pressure showed no change.

ま え が き

高地には平地とちがった環境因子があるため、高地に滞在する場合には生体に異常な反応がおこる。高地における環境因子には、気圧、気温、気湿、気流、紫外線などの物理的なものがあげられ、さらに地理的な制約から、交通、産業、文化なども未開発であるため、栄養摂取の面や、また精神的にも平地とはかなり異なった点が多い。

現在、富山県、立山の室堂地区と関西電力の黒部第四ダムの間に路線の新設工事がすすめられている。室堂、二の沢間 3.5km は自動車専用道路で、このうち 2.7km が地下道となり、二の沢、新丸山間 1.6km はロープ・ウェイ、新丸山、黒部ダム左岸の間 0.7km は地下ケーブル・カーで結ばれる。この工事で室堂、二の沢間は、高度 2,433m から、下り平均勾配 3.3% の全長約 2.7km に及ぶ隧道掘さく作業であるため、至難な工事の一つとされている。

本研究は『高度 2,433m の室堂地域における高地作業

図 1 測定地点略図

者に対し、とくに入山初期の健康管理はいかにあるべきか』その根拠となる基礎的な資料を得るために計画されたものである。

実験は昭和40年10月と41年10月の2度にわたって、同一項目について実施されたが、40年度においては、現地に電源設備もなく、しかも実験は屋外で行なわざるを得なかった。幸い連日好天にめぐまれたとはいえ、10月末

の室堂は実験中（午前10時から午後4時まで）の外気温が最高20℃、最低3℃と、はげしく変動し、成績に個人差が大きく現われた。したがって初回の成績からは、高地滞在における人体に対する影響のうち、ある傾向を知るにとどまった。41年度においては、現地の宿舎、電灯、暖房及び給食等の諸設備が完備され、前年とは異なり、衣食住に関しては平地におけるものと大差ない実験を行なうことができた。

本文の実験成績は41年10月に行なったものを記載することとし、40年10月の結果については、考察で触れることにする。

実験条件と実験項目

被検者は東京都内居住の年齢26～48歳の健康男子6名である。

平地の対照値を得るために、立山への入口である千寿

ヶ原（高度約460m）で、実験、計測を行なった。翌朝、ケーブル・カーとバスを使用して約2時間で室堂（高度約2,400m）到着し、当日の午後、高地での1日目の実験を行なった。2日目からの実験は午前と午後にわたり、5日目の最終日の実験は午前中に行なわれた。したがって実験時刻は日によって多少のずれがある。千寿ヶ原と室堂の諸条件は表1のとおりである。

実験項目は坐位安静時と運動負荷時について、それぞれ分時呼気量、酸素摂取量、炭酸ガス排出量、呼吸商、脈拍数、血圧（安静時のみ）などである。呼気の分析にはショランダー・ガス分析器を使用し、運動負荷にはマスター階段を毎分40歩のピッチで昇降させた。運動中の呼気は運動開始の2分後から3分間の呼気をダグラス袋に採った。運動時の脈拍数は運動直後（運動時間は5分）の30秒間値を2倍し、血圧測定にはリバ・ロッチ水銀血圧計を用いた。

実 験 結 果

表2の成績は被検者6名の計測値の平均を示したもので、高地の計測値に*のあるものは平地の計測値と比較して、危険率5%で有意差のあったもの、**のあるものは、危険率1%で有意差を示したものである。

表 1 屋内実験場所の諸条件

項 目	地 点	千寿ヶ原	室 堂
高 度		465m	2433m
気 圧		720mmHg	568～572mmHg
気 温		10～20℃	17～19℃
相 対 湿 度		66%	50～68%
酸 素 分 圧 減 少 度		5%	25%

表 2 計 測 値 の 平 均 値 と 偏 差

検 査 項 目	状 態	平 地 (高度 468m)	高 地 (高 度 2,433m)				
			1 日 目	2 日 目	3 日 目	4 日 目	5 日 目
分 時 呼 気 量 BTPS (l/min)	安 静	9.02±0.85	10.07±1.33	10.31±1.21*	11.97±1.14**	12.29±1.60**	11.97±1.26**
	運 動	19.30±1.70	23.26±2.79*	24.49±2.31**	26.08±3.24**	26.40±2.44**	23.73±1.69**
分 時 呼 気 量 STPD (l/min)	安 静	7.56±0.73	6.12±0.59*	6.28±0.36**	7.28±0.62	7.48±0.94	7.28±0.77
	運 動	16.07±1.44	14.14±1.70	14.90±1.42	15.87±1.95	16.06±1.50	14.44±0.96
酸 素 摂 取 量 STPD (cc/min)	安 静	258±17	256±32	259±25	334±38**	339±43**	329±44**
	運 動	683±20	738±67	794±38**	873±115**	889±69**	792±75**
炭 酸 ガ ス 排 出 量 STPD (cc/min)	安 静	217±13	237±37	233±29	276±29**	280±32**	283±40**
	運 動	553±19	656±70**	665±50**	699±89**	705±78**	622±65*
呼 吸 商 (CO ₂ /O ₂)	安 静	0.84±0.02	0.96±0.04**	0.90±0.04*	0.83±0.03	0.83±0.02	0.86±0.02
	運 動	0.81±0.03	0.89±0.04**	0.84±0.06	0.80±0.04	0.79±0.03	0.78±0.05
脈 拍 数 (freq/min)	安 静	71.2±8.0	75.0±8.3	80.7±11.0	80.7±8.4	83.7±11.0	83.8±8.9*
	運 動	76.8±11.1	84.5±10.6	91.0±16.7	91.3±13.7	95.3±11.2*	87.7±10.4
安 静 時 血 圧 (mmHg)	最高血圧	107.0±4.6	111.0±6.0	112.0±2.8	111.3±5.7	115.3±5.1*	114.0±3.1*
	最低血圧	68.0±7.2	71.3±9.4	68.7±7.6	69.3±6.2	70.7±6.7	74.3±4.4

考 察

はじめに千寿ヶ原の計測値を平地の対照値としたことについて考察する。該地は表1に示すように海拔465mで、0m地点よりも酸素分圧が約5%減少しているわけであるが、今回の実験で2,400mほどの高地においてすら、滞在第1日目の呼気量、その他の値が平地と大差ないことよりみて、千寿ヶ原の滞在第1日目の値を平地の代表値とみなしても、大きな誤りとはならないものと考えられる。

つぎに、高地環境が生体に及ぼす影響については、高度2,400~2,500m(約8,000ft)が一つのcritical pointとされており、8,000ftの高地住民では血中酸素飽和度が減少しているものが多い¹⁾、急性及び慢性高山病は、8,000ft以上の高地におこるといわれている²⁾。われわれの実験と類似した過去の報告例をみると、小川らによれば³⁾、槍ヶ岳3,180mに1週間滞在後の基礎代謝および安静時の換気量がかわらない。中野らは⁴⁾、岩手山1,771mに4週間滞在後では、呼吸数および肺活量に著変を認めていない。万木らによれば⁵⁾、4,000m相当の低圧室に60分滞留した場合、分時換気量は減少したが、酸素摂取量は変らない。勝木⁶⁾らは、室堂における実験で、呼吸容量増大、酸素消費量増大、炭酸ガス排出量の増大を報告している。Anderson L. ら⁷⁾は5,200ft(約1,600m)に順化した男子では、酸素消費量の不変を報告している。Hultgren H. ら⁸⁾は、12,300ft(約3,750m)の住民とsea levelの住民とを比較し、前者は換気量と酸素消費量が多いが、血圧と脈拍数は同じであると報告している、など多くの報告があるが、これらのものはいずれも被験者の入山方法、現地生活条件などに、われわれの場合と相違があるため、結果についての比較は慎重でありたい。本実験では高地滞在の影響のうち、低酸素負荷による変化を知ること重点をおき、気温、気湿、気流、衣、食、住などの因子は、できるだけ平地と同じになるように心掛けて行なわれたものだからである。

われわれの成績では、高地でのBTPS呼気量は滞在第数と共に増加し、安静時、運動時とも4日目が高くとなり、平地の呼気量よりも約36%増加した。しかし、この呼気量をSTPD量に換算して比較すると、高地での1~2日目はやや減少傾向を示し、とくに安静時において減少が明らかとなり、3日目以後は平地の値に復するが、高地滞在の全体を通じて安静時および運動時のSTPD呼気量が平地よりも多くなることはなかった。これは呼気量の絶対量は高地滞在中に増加しなかったということに

なる。

酸素摂取量と炭酸ガス排出量を、STPD量について比較してみると、酸素摂取量は安静時、運動時とも、滞在第数にしたがって増え、4日目が高くとなり(安静時、運動時とも平地の約30%増)、5日目になってやや減少している。炭酸ガス排出量は高地滞在中で増えるが、酸素摂取量の変動と違う点は、高地1日目からの大幅な増加であり、とくに運動時の増加がいちじるしかった。この1日目からの酸素と炭酸ガスの変動の相違は呼吸商の変化として表わされている。

脈拍数と安静時の血圧は1~2日目でも多少の上昇を認めるが、はっきりした増加は4~5日であり、循環系の変化はガス代謝の変化よりもおくれであられるのが高地滞在中の特徴かと思われる。

一般に、平地における運動負荷の場合、エネルギー代謝の面からみて、STPD呼気量と酸素摂取量は両者がほぼ平行して増えて行き、これがある時期になると一定となり、その後やや下降し、しかも酸素摂取量の増加は運動量にほぼ比例するのである。高地に滞在中ときは、これと同様な現象がみられるわけで、高地に安静にしているだけで、酸素摂取量が日とともに増加し、4日目が高くとなり、5日目にやや減少している。STPD呼気量は平地の運動負荷の時の様には増えず、むしろ少なくなる時期がある(高地でのBTPS呼気量滞在第数とともに増加するが、入山初期にはこの増加量は、気圧低下の割合を下まわるのでSTPD換算量は平地よりも少なくなる)。しかしながら、高地における脈拍数の増加傾向や、最高血圧の上昇、最低血圧の不変などの諸点はいずれも平地の運動時にみられる共通した現象であるので、高地滞在中の1~2日目はやや問題があるとしても、高地滞在中による低圧負荷は平地の運動負荷と同じ性質のものであると考えてよいと思われる。

さらに、室堂にただ単に滞在中ということが平地のどの程度の運動量になるかということであるが、高地での低酸素負荷は高地滞在中は、たとえ睡眠中といえども加わるため、『このような負荷は、具体的に平地の運動量のどのくらいに相当する』、という表現は不可能であるが、おおよその見当をつけるならば、高地4日目の酸素摂取量が、安静時339±43cc/min、運動時889±69cc/minで、これらがともに平地の摂取量の約30%増しに当ることよりみて、高地滞在中の約1週間は、平地よりも約30%増の熱量を必要とするものと考えられる。したがってこの程度の高地労働の場合は、平地で算出されたRMRの1.3倍を実際の作業の強度とし、1週間後は漸次この係

数を低下させ、2週間以後は平地と同様に考えて支障ないものと推測される。また高地労働で注意すべきことは、高地滞在の1~2日目である。これは初回の実験で経験したことであるが、高地1日目の午後に安静時の呼吸商が1.0以上のもの2名いたが、これらのものは当日の夜半から2日目の夜まで頭痛、悪心、嘔吐、食欲不振など、いわゆる高山病の症状をあらわした。平地の場合の呼吸商は、中等度の運動でもあまり増減しないといわれているが、本実験では表2の成績が示すように、高地1~2日目の呼吸商は高く、明らかに酸素不足の反応がみられる(酸素摂取量は増えていない)。つまりこの期間は、生体は酸素欠乏を来しているが、それを補うことが困難な時なのであるから、高地労働に際しては、1~2日は就労させないで、現地での健康診断、作業現場の見学、オリエンテーションなどに当てるのが安全な対策であると考えられる。

結 論

高度約2,400mに滞在するとき、その初期の低酸素負荷による生体反応は平地の運動時の負荷と同じ性質のものと考えられるが、しかし、この低酸素負荷は睡眠中にも休憩中にも加わるものであるため、平地の運動量のようにRMRとして表現することは不可能である。

高地滞在により、安静時においてもSTPD酸素摂取

量は次第に増え、また平地と同じ運動をした場合のSTPD酸素現取量も同様に増加する。この増加の割合は4~5日で最も高く、安静時、運動時ともに平地の30%増に相当した。したがって、高地滞在初期(約1週間)の作業強度は平地における同一作業のRMRの1.3倍量で算出するのが適当と考えられる。また休憩時間も3割程度平地よりも長くする必要があり、とくに第1~2日目は酸素不足の影響が強いので、就労させない方がよい。

この研究の一部は、昭和40年度の労働省災害医学に関する委託研究費により行なわれたものであり、また本論文の要旨は第37回日本衛生学会総会において発表した。

文 献

- 1) Hultgren, H. et al. : J. Appl. Physiol. 20, 233-238 (1965)
 - 2) Hultgren, H. et al. : Medicine 40, 289-313 (1961)
 - 3) 小川新吉他 : 日本生理学雑誌, 18, 741-742 (1957)
 - 4) 中野友興他 : 岩手医学雑誌, 5, 114-119 (1954)
 - 5) 万木良平他 : 体力科学, 11, 29-30 (1962)
 - 6) 勝木建次他 : 十全医学雑誌, 46, 458-474 (1941)
 - 7) Anderson, L. et al. : J. Clin. Invest. 32, 490-496 (1953)
 - 8) Frank Consolazio C. : Physiological Measurements of Metabolic Functions in Man, McGraw-Hill Book Company, Inc. New York (1963)
- (受付1968年9月4日)