

富士山頂短期滞在時の安静および運動時生理的応答 (第3報)

水野 康, 浅野勝己, 菊地和夫*, 奥平進之**

Physiological responses at rest and during submaximal exercise at the top of Mt. Fuji for 6 days sojourn (3rd report)

MIZUNO Koh, ASANO Katsumi, KIKUCHI Kazuo*,
and OKUDAIRA Nobuyuki*

Physiological responses including cerebral blood flow and cardiorespiratory function at rest and during exercise were examined in 3 healthy male subjects (54, 38 and 27 yrs) during 6 days' sojourn at the top of Mt. Fuji (3,776 m). Submaximal pedaling exercise (heart rate : 100-110 beats/min at sea level for 30 min) was performed before, during (on the 2nd and 5th day) and after the sojourn. Subjects replied to the questionnaire of acute mountain sickness (AMS) score that was the index of subjective symptom of AMS, before and after sleep during the sojourn, successively.

Heart rate during exercise increased to 120-140 beats/min at the top of Mt. Fuji. Cerebral blood flow velocity (V_m) measured by transcranial Doppler ultrasound during exercise showed the highest value on the 2nd day during the sojourn in 2 subjects whose AMS score were relatively high. However, in one subject who showed few symptoms of AMS, V_m during exercise revealed no significant change during the sojourn compared to the value at sea level. Arterial oxygen saturation during exercise decreased to 75-80% on the 2nd day at the top of Mt. Fuji, thereafter, it increased to 80-85% on the 5th day.

From these results, it might be suggested that imbalance of intracranial dynamics owing to hypoxia appeared during the first few days under hypobaric hypoxia, and that cerebral blood flow was an index of vulnerability of acute mountain sickness.

Key Words : Hypobaric hypoxia, Cerebral blood flow, Oxygen saturation of arterial blood

1. 緒言

高所では、大気圧の低下に伴う酸素分圧の低下から様々な生理的諸応答が認められるが、特に3,000m以上の高度では、頭痛、吐き気、食欲不振、および呼吸困難などが引き起こされる場合があり、これが急性高山病である^{7,12)}。急性高山病のうち、命にもかかわる重篤なものの一つに脳水腫

がある。これは、脳血管から水分が浸潤して脳の機能障害をもたらすものであり、脳血管の水分透過性、脳血流量、および脳の毛細血管圧などの変化が原因であろうと考えられている^{5,6,9,11)}。その要因の一つである脳血流量については、低圧下で安静時に増大するという報告があり、脳水腫との関連について検討されている^{14,15)}。高所登山

*九州芸術工科大学
一般教育系列

**独協医科大学第2生理学講座

* Laboratory of exercise physiology, Department of general education,
Kyushu Institute of Design

** Department of 2nd physiology, Dokkyo University School of Medicine

は滞在と活動の両者からなるため、脳水腫発症の原因とも考えられる脳血流量の動態を安静時のみならず運動時の両者について検討する必要があるが、低圧環境下における運動時脳血流量に関する報告はない。また高所滞在中の順応過程におけるこれらの変化についても未だ検討はなされていない。

著者らはこれまで2回に渡り日本最高峰である富士山頂(高度3,776m)に滞在し、安静および運動時の各種生理応答について報告して来た^{1,2)}。今回は3回目の試みとして、非侵襲性のドップラー血流計を用いた脳血流動態を中心に、5泊6日の山頂滞在中の安静および運動時生理的応答について検討することを目的とした。

II. 方法

1) 被験者: 定期的な運動習慣を持たない健康男子3人(K. A.: 54歳, K. K.: 38歳, および K. M.: 27歳)とした。

2) 運動負荷法および環境条件: 運動は、モナーク社製自転車エルゴメーターを用い、心拍数が常圧下で100~120拍/分になるような固定負荷の30分間のペダリングとした(50rpm)。各被験者の負荷は、K. A., K. K., および K. M. で各112.5, 125, および112.5Wとした。この運動を登山前に常圧下で行い、その後、富士山頂に登山して6日間の山頂滞在中の第2および5日目、および下山当日の常圧下においても同様の運動を行った。山頂滞在前後の常圧下における測定は体育科学系環境制御装置(61m², 島津製作所製)にて常圧, 室温20℃, 湿度60%の条件で行い、富士山頂では気象庁富士山頂測候所の仮設庁舎内にて平均気圧487.2±1.4, 室温20℃, 湿度60%の低圧環境で実施した。

山頂への登山は新5合目までは乗用車で、そこからは約5時間の徒歩により山頂測候所へ到達し、5泊した後に登山時と同様の手段で下山した。早朝安静時の測定は、登山前から山頂滞在中、および下山後に渡って登山当日を除いて経日的に行った。

3) 測定項目:

(1) 中大脳動脈血流速度: EME社製TC 2-64を用い、超音波ドップラー法にて運動前、運動中および回復時の測定を行った。運動中の測定は5分毎とし、回復時は運動終了後3分まで1分毎に記録した。血流の測定深度は、各被験者毎に最も

感度の良い50~55mmのところとし、測定プローブが運動中に動かないように専用の固定バンドで側頭部に固定した。

(2) 動脈血酸素飽和度(SaO₂): Biox III (Ohmeda社製)を用い、イアー・オキシメーター法による測定を運動前、運動中および回復時に行った。運動中の測定は5分毎とし、回復時は運動終了後3分まで1分毎に記録した。

(3) 換気量(VE): ダグラスバッグ法により、安静時は5分間、運動時は4分から5分毎に各1分間採気し、乾式ガスメーターにてVEを求めた。

(4) 心拍数(HR)および血圧(BP): 日本コーリン社製自動血圧計STBP 780を用い、運動前、運動中および回復時の測定を行った。運動中の測定は5分毎とし、回復時は運動終了後3分まで1分毎に記録した。

(5) 早朝安静時の経日的測定: 中大脳動脈血流速度, SaO₂, VE, HR, およびBPを前述の方法で起床後の早朝安静時に測定した。

(6) 急性高山病指数(Acute Mountain Sickness Score: AMS score): Hackett⁴⁾によって考案された頭痛, 消化器症状, 疲労, めまい, 睡眠障害の5項目で各0~4点の5段階からなる質問紙を富士山頂滞在中の睡眠前と起床時に実施した。各項目とも数字の大きさが症状の悪化度を表し、全項目の合計点(0~20点)により評価するものとした。

(7) 血液性状: 登山前および下山直後常圧下にて肘正中皮静脈から2ml採血し、(株)江東微生物研究所に依頼して赤血球数(RBC), ヘモグロビン(Hb), ヘマトクリット(Hct), 平均赤血球容積(MCV), 平均赤血球ヘモグロビン含有量(MCH), および平均赤血球ヘモグロビン含有率(MCHC)を測定した。

III. 結果

1) 登山前, 富士山頂滞在中, および下山後における運動時生理的応答:

各測定項目の被験者毎の結果を図1に示した。

(1) 中大脳動脈血流速度(CBF):

運動時CBFは3人中2人の被験者(K. A.およびK. M.)で富士山頂滞在中の第2日に最高値を示す結果となった。一方、被験者K. K.では4回の測定間に明らかな差異は認められなかった。安静時と運動時の比較では、被験者K. M.においては全

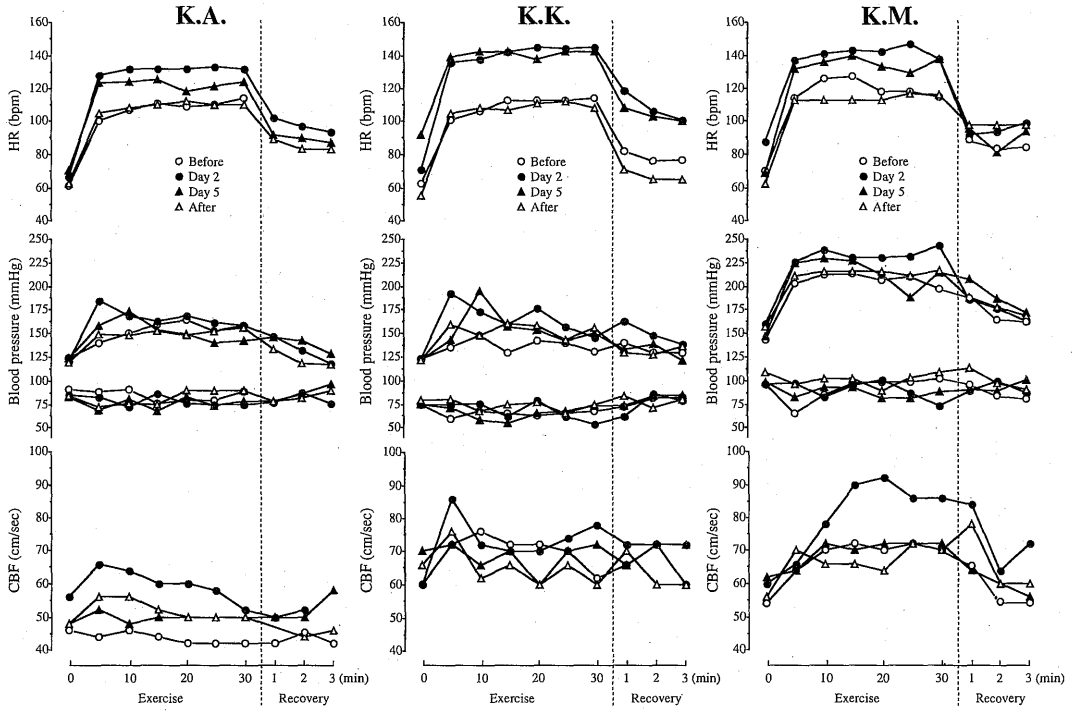


Fig. 1-1 Comparison of heart rate, blood pressure and cerebral blood flow velocity during exercise before, during and after the sojourn at the top of Mt. Fuji.

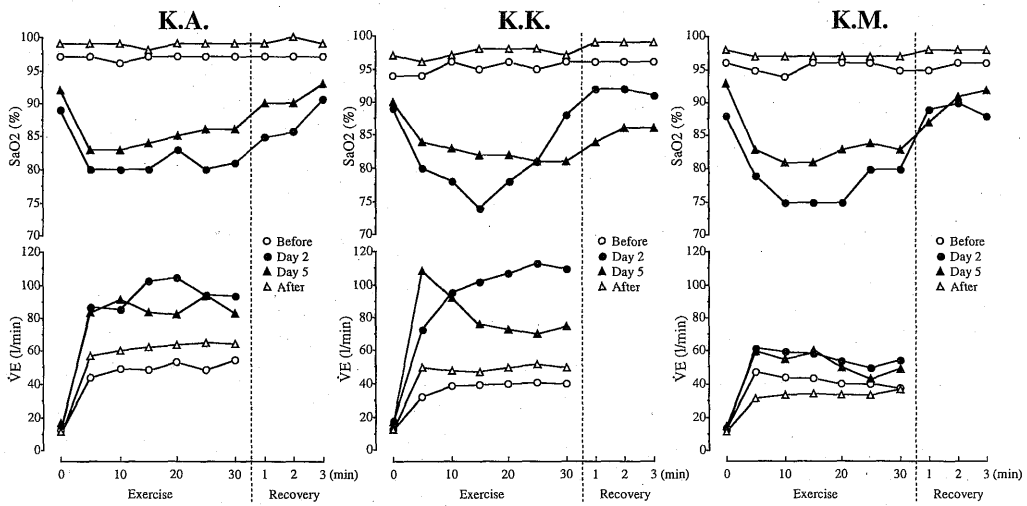


Fig. 1-2 Comparison of ventilation and oxygen saturation of arterial blood during exercise before, during and after the sojourn at the top of Mt. Fuji.

ての条件下で安静時から運動時にかけて増大する傾向が認められたが、他の2人の被験者では富士山頂滞在第2日を除いてこの傾向が認められなかった。

(2) 心拍数 (HR) :

運動時 HR は、富士山頂では常圧下よりも高値を示し、3人中2人の被験者 (K. A. および K. M.) で富士山頂滞在第2日に最高値を示す結果となった。

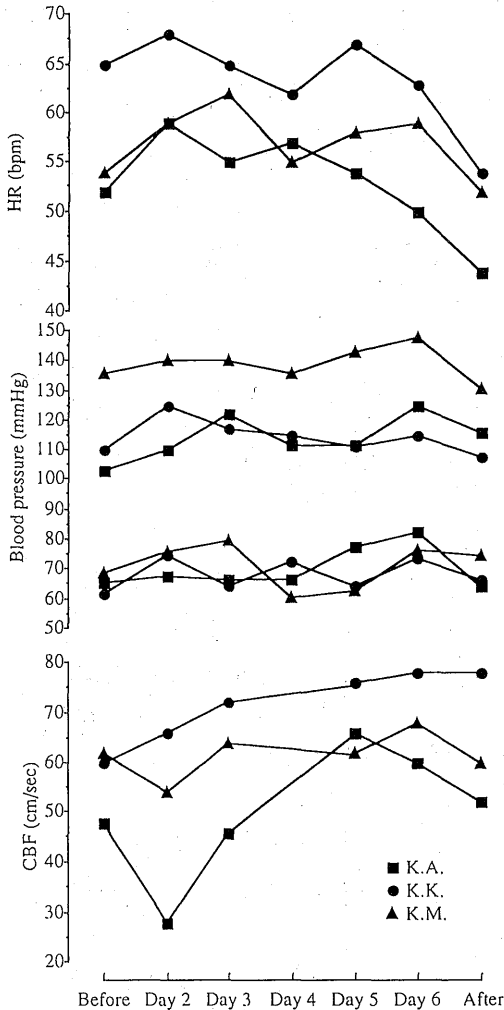


Fig. 2-1 Comparison of heart rate, blood pressure and cerebral blood flow velocity at rest in early morning before, during and after the sojourn at the top of Mt. Fuji.

た。一方、被験者 K. K. では山頂滞在第2日と第5日がほぼ同値であった。

(3) 血圧 (BP) :

収縮期血圧は、被験者 K. K. および K. M. では山頂滞在第2日に最高値を示す傾向にあったが、それ以外では大きな差は認められなかった。拡張期血圧は4回の測定間に顕著な差は認められなかった。

(4) 動脈血酸素飽和度 (SaO₂) :

SaO₂ は、常圧下では安静および運動時ともに95~99%の一定値を示したが、富士山頂では運動時は安静値よりも低値を示し、全被験者で山頂滞在第2日に75~80%の最低値が認められた。運動時 SaO₂ は、山頂滞在第5日には増大し、80~85%となった。また登山前に比して下山後の SaO₂ は、わずかに高値を示す傾向が認められた。

(5) 換気量 (VE) :

運動時 VE は、全被験者で常圧下よりも富士山頂において高値が認められた。被験者 K. A. および K. K. では山頂滞在第2日が5日より高値傾向となり、山頂滞在前後の比較では下山後の値が登山前の値を上回る結果となった。一方、被験者 K. M. は山頂滞在中の2回の測定値がほぼ同様であり、滞在前後の比較では、他の2人とは逆に下山後に登山前値を下回る傾向が認められた。

2) 早朝安静時の生理的諸指標の変化 :

山頂滞在前後および滞在中の各測定項目の被験者毎の結果を図2に示した。

CBF は、被験者 K. M. では滞在中および前後とも大きな変化は認められなかったが、K. K. では登山前から下山後まで経時的に漸増する傾向を示し、K. A. では滞在第2日にいったん低下し、その後5日まで漸増、以後漸減する傾向が認められた。

HR は被験者 K. A. および K. K. では山頂滞在第2日に、K. M. では山頂滞在第3日に最高値が認められ、それ以後低下する傾向を示した。

収縮期血圧は山頂滞在中にわずかに増大する傾向にあったが、山頂滞在中、時間経過に伴う一定の傾向は認められなかった。拡張期血圧には全ての測定間に大きな差異は認められなかった。

SaO₂ は、被験者 K. M. および K. K. では滞在第2日に最低値となり、以後漸増する傾向となったが、K. A. では滞在第5日に最低値を示した。

VE は、山頂滞在中、常圧下よりも高値傾向を

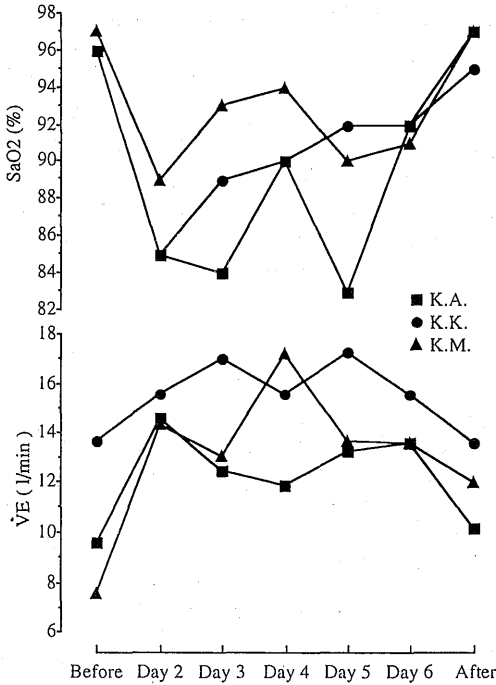


Fig. 2-2 Comparison of ventilation and oxygen saturation of arterial blood at rest in early morning before, during and after the sojourn at the top of Mt. Fuji.

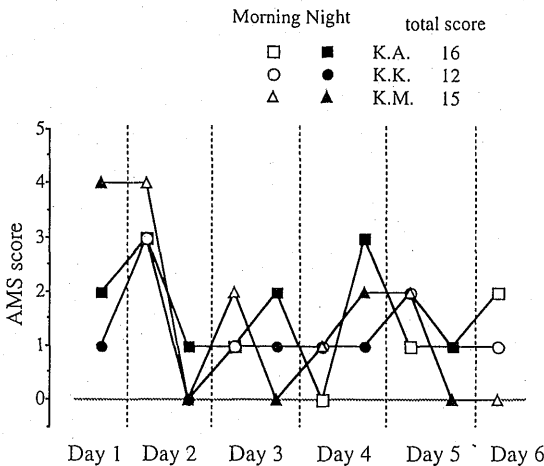


Fig. 3 Changes in acute mountain sickness score during the sojourn at the top of Mt. Fuji.

示したが、時間経過に伴う一定の変化は認められなかった。また滞在中と常圧下の値の相違は被験者 K. K. において最も少ないものとなった。滞在前後の比較では、被験者 K. M. では下山後にやや増加したが、他の 2 人ではほぼ同値を示した。

3) 山頂滞在中の急性高山病指数 (AMS score) の変化:

就寝前および起床後の AMS score を図 3 に示した。滞在中の得点の合計は被験者 K. A., K. M., K. K. の順に高く、各 16, 15, 12 点であった。各被験者の最高値は K. A. で滞在第 2 日の起床後および第 4 日の就寝前 (3 点), K. M. で滞在第 1 日目の就寝前および第 2 日の起床後 (4 点), K. K. で滞在第 2 日の起床後 (3 点) であった。

4) 富士山頂滞在前後の血液性状の変化:

各測定項目の結果を表 1 に示した。RBC, Hb, Hct, および MCV は下山後に増大する傾向を示し, MCH はほぼ同値, MCHC は減少する傾向が認められた。

IV. 考察

脳浮腫は生命をも脅かす重篤な急性高山病の一つであるが、急性低圧低酸素環境下では脳水分量、脳血流量、および脳内圧などが増大し、これらが脳浮腫発症の要因であろうと指摘されている^{6,14,15}。登山は、高所での滞在 (安静低酸素暴露) と登山 (低酸素環境下での運動) の 2 つから成り立つものであるが、低酸素環境下における運動時脳血流動態に関する報告は未だなされていない。常圧下における運動時脳血流動態については、運動強度の増大とともに増大し、概ね無酸素性作業閾値の強度をピークにそれ以上の強度では逆に低下することが報告されている¹⁰。本研究の目的は、低酸素環境下で、登山に近い比較的低強度の運動を行った時の脳血流動態を中心とした生理的応答を検討するとともに、その高所順応に伴う変化を検討することである。

本研究の運動時 CBF は、3 人中 2 人の被験者 (K. A. および K. M.) で山頂滞在第 2 日に最高値を示し、第 5 日には低下する傾向が認められた。一方被験者 K. K. の運動時 CBF は、滞在第 2 日にわずかに増大する傾向ではあったが、常圧下と大きな差異は認められなかった。このように、ほぼ同一の相対運動強度でありながらも低酸素環境下における運動時脳血流動態には個人差のあること

Table 1 Hematological values before and after the sojourn at the top of Mt. Fuji

Subj.	RBC ($\times 10^4/\text{mm}^3$)		Hb (g/dl)		Hct (%)		MCV (μ^3)		MCH (pg)		MCHC (%)	
	before	after	before	after	before	after	before	after	before	after	before	after
K.A.	465	484	14.4	15.1	42.1	45.8	91	95	31.0	31.2	34.2	33.0
K.K.	510	538	15.6	16.0	44.5	48.9	87	91	30.6	29.7	35.1	32.7
K.M.	419	475	14.3	15.2	39.8	46.3	95	98	34.1	32.0	35.9	32.8

が示唆された。先行研究によれば、脳血流量の増大が急性高山病の一つである脳浮腫発症の要因となることが示唆されているため¹⁴⁾、被験者 K. K. に比して他の 2 人の被験者はより急性高山病発症に近い状態であったのかもしれない。この傾向は、各被験者の AMS score の 6 日間の合計点に現われており、K. A. および K. M. の各 16 および 15 に比して、K. K. の値は 12 と低いものとなった。血液性状に関しても、K. K. は他の 2 人の被験者よりも滞在前後ともに RBC および Hb が高値であり、低酸素環境により適した状態であったことが推察される。また運動時 HR は、K. K. 以外の被験者では山頂滞在第 2 日から第 5 日にかけて低下する傾向を示したのに対して K. K. ではほぼ同値であり、滞在第 2 日で既に高所順応がかなり進行していたものとも考えられる。著者らは、低酸素耐性には個人差があり、安静低酸素暴露時よりも運動負荷を加えることによって、より個人差が明確に現われることを内分泌応答の面から報告している^{8,13)}。本研究においても、早朝安静時の各測定では被験者間の特異的な相違は認められなかったが、運動時 CBF の応答において AMS score との対応関係が認められたことは興味深い。このことは、低酸素環境下における運動時 CBF が低酸素耐性の指標となる可能性を示唆している。また、高所における登山活動が脳血流の増大を招き、脳浮腫発症の原因となる可能性も考えられる。

被験者 K. A. および K. M. の運動時 CBF は山頂滞在第 5 日にはほぼ常圧下の水準に低下した。低酸素環境下における運動時脳血流動態の順応に伴う変化に関する報告は未だないが、本研究における滞在第 5 日の結果は、高所滞在により脳血流動態

の高所順応が獲得されたことによるものと考えられる。また滞在第 5 日には両被験者の AMS score も 0 ~ 2 と低値傾向が示された。

運動時 VE は、いずれの被験者においても富士山頂では常圧下より高値を示し、被験者 K. A. および K. K. では滞在第 2 日から 5 日へと減少する傾向が認められたのに対し、K. M. では両日ともほぼ同値を示した。また運動時 SaO₂ は、全被験者で滞在第 2 日から第 5 日へと増加する傾向にあった。これらのことは、高所順化に伴う運動時 SaO₂ の変化が VE とは独立した関係にあることを示唆するが、Bender ら³⁾も高度 4,300 m に 22 日間滞在し、その際の運動時 VE および SaO₂ に同様の現象を報告している。彼等は VE の増大なしに SaO₂ が増加する機序として、肺毛細血管における赤血球通過時間の延長、換気還流比 (換気量/心拍出量) の増大、および肺拡散能力の亢進などを挙げている。本研究では下山後に Hct の増大が認められたが、これは血液粘性の増大を招き、肺毛細血管における赤血球通過時間の延長につながると考えられるので、SaO₂ 増大の一要因であることが示唆される。

SaO₂ は組織への酸素運搬能の一つの指標であり、低酸素環境下においては SaO₂ が高い程、急性高山病発症の危険も少ないものと思われる。しかし、本研究においては AMS score と運動時および早朝安静時 SaO₂ との間に関連は認められなかった。この理由として、被験者 3 人の AMS score が比較的 low 値であった、すなわち急性高山病発症に至るような顕著な兆候が現われなかったため、関連が明確に示されなかったことが考えられる。高所登山を目指す人口は年々増加の一途を

たどっており、今後の課題として低酸素耐性および低酸素順応度のより妥当な評価法の開発が急務だと考えられる。

V. 要約

健康男子3人(27, 38, および54歳)を対象に、富士山頂5泊6日間滞在中の滞在第2日と第5日の脳血流動態を中心とした安静および最大下運動時生理的応答を測定し、滞在前後との比較検討を行った。

1) 富士山頂における運動時中大脳動脈血流速度は3人中2人の被験者で滞在第2日に増加し、第5日にはほぼ常圧下の値まで低下したが、1人の被験者では滞在中も常圧下とほぼ同様の値が認められた。

2) 質問紙による急性高山病指数では、運動時中大脳動脈血流速度に増加の認められた2人の被験者の値が他の被験者よりも高値傾向を示し、低酸素環境下における運動時中大脳動脈血流速度の増加と急性高山病発症との関連が示唆された。

3) 運動時動脈血酸素飽和度は滞在第2日の75~80%から滞在第5日の80~85%へと全被験者で滞在時間経過とともに増加する傾向が認められた。一方、運動時換気量は、2人の被験者では滞在第2日から第5日にかけて減少する傾向を示したものの、1人の被験者ではほぼ同値であった。これらのことから、運動時動脈血酸素飽和度に影響する換気量以外の要因のあることが示唆された。

文献

- 1) 浅野勝己, 水野 康, 朴 兌渉, 松坂 晃, 平木場浩二, 菊池佑二, 村井 正 (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 : 187-195.
- 2) 浅野勝己, 水野 康, 菊池佑二, 菊地和夫, 松坂 晃 (1991) : 富士山頂短期滞在時の安静および運動時生理的応答 (第2報). 筑波大学体育科学系紀要14 : 167-178.
- 3) Bender, P. R., McCullough, R. E., McCullough, R. G., Huang, S., Wagner, P. D., Cymerman, A., Hamilton, A. J., and Reeves, J. T. (1989) : Increased exercise SaO₂ independent of ventilatory acclimatization at 4,300m. *J. Appl. Physiol.* 66 : 2733-2738.
- 4) Hackett, P. (1992) : The Lake Louise consensus on the definition and quantification of altitude illness. In : *Hypoxia and Mountain Medicine*, edited by Sutton, J. R., Coates, G., and Houston, C. S. Burlington, VT : Queen City Printers, p.327-330.
- 5) Hansen, J. E. and Evans, W. D. (1970) : A hypothesis regarding the pathophysiology of acute mountain sickness. *Arch. Environ. Health* 21 : 666-669.
- 6) Houston, C. S. (1989) : Incidence of acute mountain sickness at intermediate altitude (Letter to Editor). *J. Am. M. Assoc.* 261 : 3551-3552.
- 7) Johnson, T. S. and Rock, P. B. (1988) : Current concepts. Acute mountain sickness. *N. Engl. J. Med.* 319 : 841-845.
- 8) 水野 康, 菅沼 勲, 熊崎泰仁, 浅野勝己 (1993) : 6,000 m相当高所順応トレーニングの当高所における安静および運動時内分泌応答に及ぼす影響. *宇宙航空環境医学*30 : 117-125.
- 9) Lassen, N. A. and Harper, A. M. (1975) : High altitude cerebral edema. *Lancet* 2 : 1154.
- 10) Moraine, J. J., Lamotte, M., Berre, J., Niset, G., Leduc, A., and Naeije, R. (1993) : Relationship of middle cerebral artery blood flow velocity to intensity during dynamic exercise in normal subjects. *Eur. J. Appl. Physiol.* 67 : 35-38.
- 11) Ross, R. T. (1985) : The random nature of cerebral mountain sickness. *Lancet* 11 : 990-991.
- 12) Singh, I., Kapila, C. C., Khanna, P. K., Nanda, R. B., and Rao, B. D. P. (1969) : Acute mountain sickness. *N. Engl. J. Med.* 280 : 175-184.
- 13) 菅沼 勲, 水野 康, 熊崎泰仁, 浅野勝己 (1993) : 6,000 m相当高所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.
- 14) Yang, Y., Sun, B., Yang, Z., Wang, J., and Pong, Y. (1993) : Effects of acute hypoxia on

- intracranial dynamics in unanesthetized goats. *J. Appl. Physiol.* 74 : 2067-2071.
- 15) Yang, S., Bergo, G. W., Krasney, E., and Krasney, J. A. (1994) : Cerebral pressure-flow and metabolic responses to sustained hypoxia : effect of CO₂. *J. Appl. Physiol.* 76 : 303-313.