

短時間の低酸素吸入が随意的筋力発揮能力に及ぼす影響

The Effect of Acute Hypoxia on the Voluntary Muscle Exertion

石田 浩司* 宮村 実晴* 矢部 京之助*

Koji ISHIDA *, Miharu MIYAMURA *, Kyonosuke YABE *

To elucidate the effects of acute hypoxia on neuromuscular functions, 7 male volunteers exerted their maximal plantar flexions for 5 times within 3 min interval with inhaling gas of 12% O₂+88% N₂. Maximal voluntary contraction (MVC), maximal rate of force development (+dF/dt) and relaxation (-dF/dt), reaction time, root mean square value of EMG (RMS) in soleus and gastrocnemius muscles and mean power frequency of EMG (MPF) were calculated by computer routines. Additionally, minute ventilation (V_E) was measured for the last 3 min. These values were compared with those in normoxic (control) condition obtained by the same procedure.

During hypoxia, MVC of the subject who showed most enlargement of V_E increased successively, but mean value of MVC in hypoxic condition was slightly (4%) increased. +dF/dt was rather increased (12%) while reaction time, MPF and RMS showed little change compared with control condition. Relative changes in MPF and RMS during first 3 min showed significant ($p < 0.05$) negative correlation with each other. These results suggest that the ability to exert maximal voluntary contractions itself show little change, but the way of exerting maximal force may change during hypoxia.

緒 言

高い山に登ると、息が苦しくなり、時にはへばってしまうこともある。このように高所における作業能力、特に持久性能力は、平地に比べてかなり低下することはよく知られている。この原因については、呼吸・循環機能の面からかなり研究されており、高地または低圧環境下では、持久性能力の指標である最大酸素摂取量は著しく低下することが報告^{4,6,19)}されている。しかし、高地においてすべての生体の機能が低下するとは限らないように思われる。例えばメキシコ・オリンピックにおける陸上競技短距離種目の好記録は、必ずしも空気抵抗の減少だけでなく、神経・筋機能に対して、低酸素がなんらかの影響を与えていたのかもしれない。すなわち、低酸素により瞬発的な能力は増大することも考えられる。これまでの研究では、標高 5000m 以上の高高度においてはヒ

トの視神経機能や筋協応機能が阻害されることが報告されているが^{13,17,18)}、それよりも低い高度において、神経・筋機能がどのように変化するかについてはあまり明らかにされていない。

脳は低酸素の影響を最も受けやすい器官であるとされている。心理学的研究によると、高地登山中の登山者の気分や性格は、高度により大きく変化することが報告されている。例えば 1500~2400m では大多数の人が興奮状態になり、爽快感や運動意欲の亢進がみられ、さらに 2400~5500m では陰うつ状態と爽快感が交互に現れ、倦怠感や眠気を感じるかと思えば、興奮しやすくなるなどの変化がみられることなどが報告¹⁷⁾されている。このような精神状態の変化の原因として、脳への血流量の変化^{13,17,18)}や呼吸性アルカローシス¹³⁾の影響などが挙げられている。このように、低酸素により脳は大きな影響を受けるが、その脳からの命令で行なわれている随意的な

*名古屋大学総合保健体育科学センター

* Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University

筋力発揮能力にも、なんらかの変化がみられるのではないかと考えられる。

我々は先行研究⁸⁾において、15%の低酸素を15分間吸入している時の誘発張力およびH反射を測定し、中枢神経系が関与しない末梢の筋収縮機能や脊髄興奮レベルが、低酸素によりどのように変化するか検討した。その結果、短時間の低酸素吸入は末梢の筋機能にはあまり影響を及ぼさず、主に神経系に影響を与えることが示唆された。そこで本研究では、先行研究に引き続き、低酸素が神経・筋機能に及ぼす影響を明らかにするため、中枢神経系が関与する随意的筋力発揮能力及び反応時間が、低酸素吸入によりどのように変化するか検討することを目的とした。

方 法

被検者：被検者には20～28才の健康な成人男子7名を選んだ。被検者に、あらかじめ本研究の目的、危険性などについて説明し、同意を得た後、本実験を実施した。

実験方法：被検者に椅子姿勢をとらせ、腓腹筋の内側頭と外側頭及びヒラメ筋筋腹上に2cmの間隔で表面電極（Ag-AgClタイプ）を取り付け、双極で筋放電を導出した。足部にフォース・トランスジューサー（共和電業、LU-SB34D）を取り付け、足関節角度10度底屈、膝関節角度60度屈曲肢で固定した。被検者前方1mの目の高さのところに2つの赤色LED発光体をつるし、それぞれ準備シグナルとスタート・シグナルとした。被検者は準備シグナルにより注意を集中し、1.5秒後のスタート・シグナルにより最大努力による足底屈動作を3秒間保持した。得られた筋放電はバイオアンプ（日本電気三栄、1253A）を用いて、時定数0.03で1KHz以上をカットした後、増幅した。また、張力信号はDCアンプ（共和電業、DPM-110A）で増幅した。これらの信号は一旦データ・レコーダ（NF回路設計ブロック、RP-882）に取り込み、測定終了後、1KHzでA/D変換（カノーブス、ADX-98E）し、コンピュータ(NEC, PC-

9801VX4)を用いて分析した。

測定項目：測定項目として、張力曲線より、最大筋力(MVC)、筋力の立ち上がり部分の最大の傾き(+dF/dt)、同じく弛緩の部分の最大の傾き(-dF/dt)を求めた。また、スタート・シグナルが点灯してから張力が立ち上がるまでの時間をReaction timeとした。一方、筋放電については、スタート・シグナル点灯0.5秒後から2.048秒間の積分値(Root Mean Square; RMS)およびパワー・スペクトルの平均周波数(Mean Power Frequency; MPF)を求めた。

実験プロトコール：被検者に呼吸マスクを装着し、室内空気を吸入させながら3分おきに12分まで計5回、1回の測定に、10秒間隔で2回随意的最大筋力発揮を行なわせた（コントロール条件）。次に15分以上の休憩の後、まず最初に室内空気を吸入させながらデータをサンプリングした後、あらかじめダグラス・バッグに貯留しておいた200ℓの低酸素ガス(O₂ 12% + N₂ 88%)を吸入させながら、コントロール条件と同じように3分毎に12分まで測定を行なった（低酸素条件）。なお、この12%という酸素濃度は、標高約4200mに相当するものである。また、被検者の呼気ガス中の酸素濃度については酸素分析器（モーガン、MS-3A）を用いて連続的にモニターし、さらに両条件とも最後の3分間の換気量をダグラス・バッグを用いて測定した。なお、同じ測定時での2つのデータのうち、Reaction timeについてのみ早い方のデータを、その他の項目についてはMVCが大きい値が出現した方のデータを分析した。

結 果

表1に各被検者の年令、身長、体重およびコントロールと低酸素条件の最後の3分間の換気量を示した。換気量は低酸素吸入により21.3ℓから25.9ℓへと5%水準で有意に増加していたが、平均して21.6%程度の増加であった。しかし、被検者K.M.は約35%も増加していた。

MVC及びReaction timeについてコントロール条件と低酸素条件それぞれの個人値と平均値を図1

Table 1. Physical characteristics of the subjects and minutes ventilation (\dot{V}_E) during control and hypoxic conditions for the last 3 min.

subject	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	\dot{V}_E (BTPS) Control (ℓ / min)	\dot{V}_E (BTPS) Hypoxia (ℓ / min)
S. A.	23	175	61.5	17.4	20.3
G. M.	24	170	50.0	11.5	13.8
K. I.	27	167	61.0	19.1	25.0
N. K.	21	173	67.5	16.2	18.6
R. S.	20	183	67.0	32.6	34.5
K. M.	28	167	66.0	40.3	54.4
H. M.	21	170	62.0	12.3	14.8
Mean	23.4	172.1	62.1	21.3	25.9
± SD	± 3.1	± 5.6	± 6.0	± 10.9	± 14.4

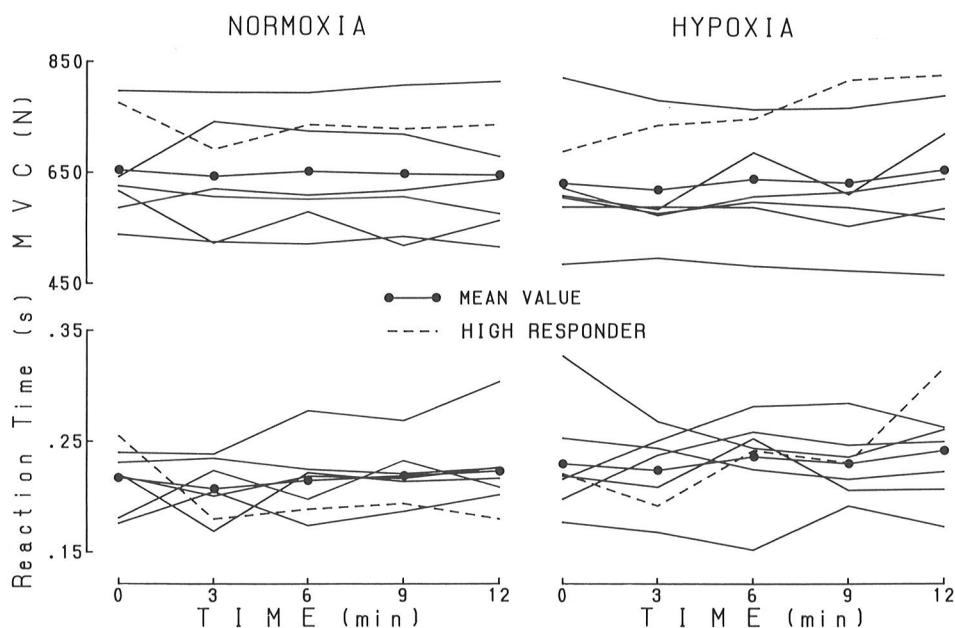


Fig. 1 Time course of changes in Maximal voluntary contraction (MVC) and reaction time during normoxic (control) and hypoxic conditions for each subject.

—●— shows mean value of all subjects and - - - - - shows high responder, respectively.

に示した。ここで破線は低酸素吸入により換気量が最も増大した被検者（ここでは High responder と呼ぶ）K. M. のデータである。MVCについて、コントロール条件は各被検者ともほとんど変化していなかった。低酸素条件では、最初の3分で低下し、その後増加する傾向がみられるが、有意な変化は認められなかった。しかし、低酸素条件での High responder の MVC は漸次増加しており、室内空気を吸入している0分の690Nから、低酸素吸入12分後には830Nと大きく増大していた。また、Reaction time は両条件とも最初の3分は低下し、その後増加する傾向がみられたが、有意な変化ではなかった。

図2に $+dF/dt$ 及び $-dF/dt$ についてコントロール条件と低酸素条件での個人値と平均値を示す。 $+dF/dt$, $-dF/dt$ ともコントロール条件において減少する傾向がみられたが、有意な変化ではなかった。一方、低酸素条件では、 $+dF/dt$

は最初の3分でやや低下し、その後徐々に増大する傾向がみられたが、被検者により変動が大きく、有意な変化は認められなかった。また、 $-dF/dt$ も変動が大きく、有意な変化は認められなかった。High responder については、両方のパラメータとも低酸素吸入によりかなり増大した。

RMS 及び MPF については、腓腹筋の内側頭、外側頭及びヒラメ筋の3筋を合計したものを図3に示す。両方のパラメータともコントロール条件では被検者により多少の変動がみられるものの、大きな変化は認められなかった。一方、低酸素条件では RMS は最初の3分で低下し、その後増大する傾向がみられた。また、MPF は、最初の3分では RMS とは逆にやや増加し、その後増大する傾向がみられたが、どちらのパラメータも被検者により変動が大きく、有意な変化は認められなかった。

図4は、6つのパラメータについて、両条件と

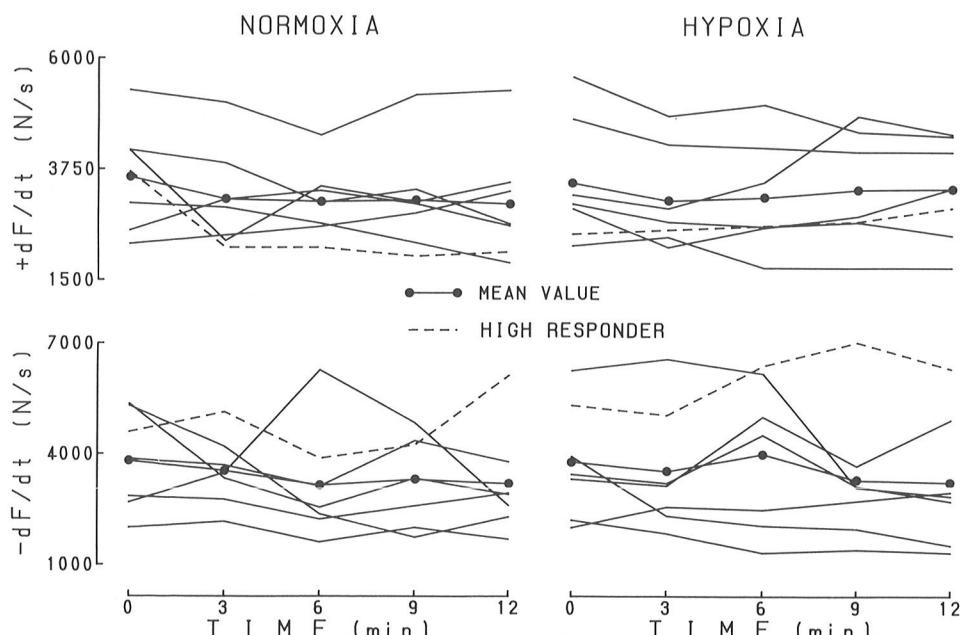


Fig. 2 Time course of changes in $+dF/dt$ and $-dF/dt$ during normoxic (control) and hypoxic conditions.

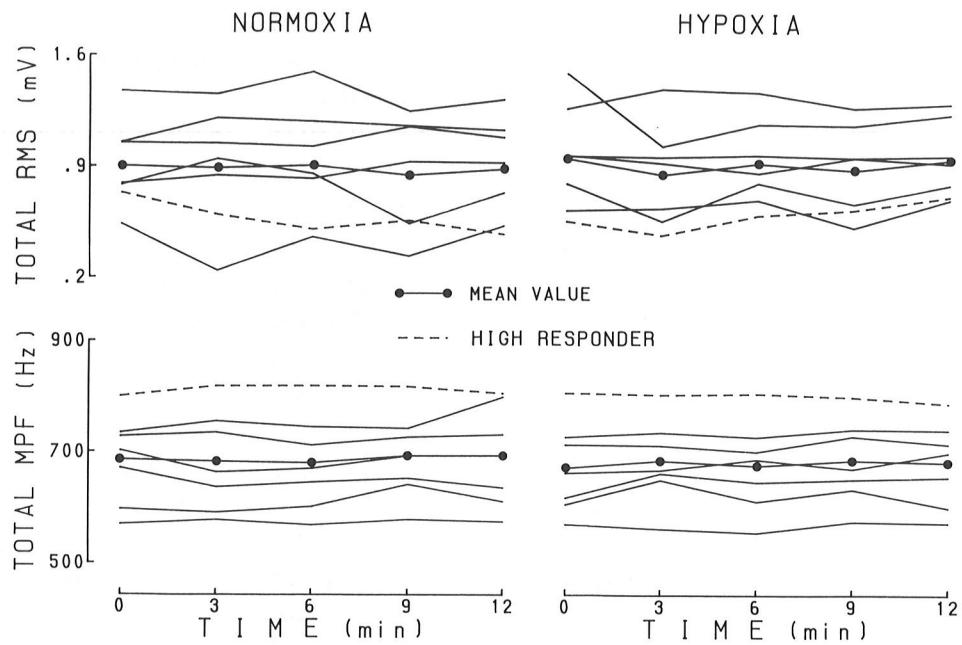


Fig. 3 Time course of changes in total root mean square value of EMG (RMS) and total mean power frequency (MPF) during normoxic (control) and hypoxic conditions.

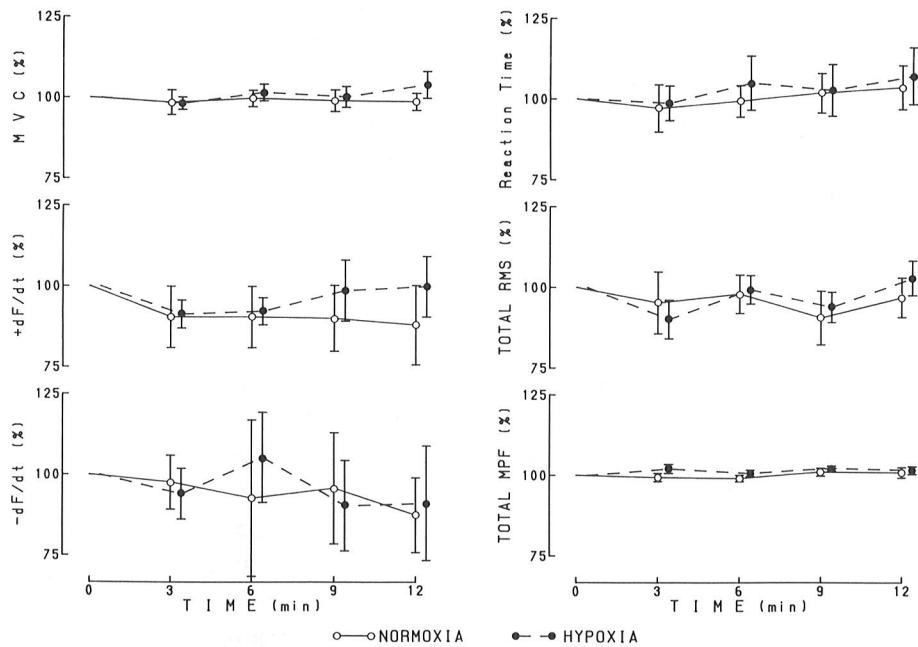


Fig. 4 Relative changes in MVC, $+dF/dt$, $-dF/dt$, Reaction time, Total RMS and Total MPF.

○—○ shows normoxic (control) and ●—● shows hypoxic conditions, respectively. Values are mean \pm SE.

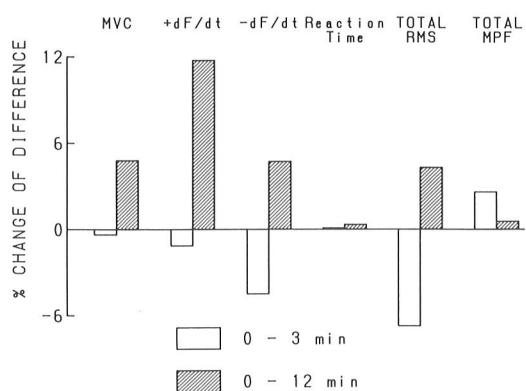


Fig. 5 The rate of difference between hypoxic and control conditions. Refer to the text for details.

も最初の0分の値を100%とした時の相対的变化率について7名の平均値と標準誤差を示したものである。MVCはコントロール条件においてほとんど变化を示さないが、低酸素条件では平均値で4%ほど増加していた。 $+dF/dt$ はコントロール条件では時間経過に伴い減少する倾向がみられるのに対し、低酸素条件では最初の3分は同じように減少するが、その後増大する傾向が認められ、12分目には両条件でかなりの差が認められた。Reaction time, MPFについても、低酸素条件の方がコントロール条件よりも高い傾向がみられた。

図1～4で示したように、コントロール条件においても多少の値の変化がみられるため、コントロール条件の0分の値に対する、3分後及び12分後の両条件の差（低酸素条件からコントロール条件を差し引いたもの）から、両条件の0分の値の差を差し引いたものの割合を求めて正規化した（図5）。最初の3分間では、低酸素吸入により、MVC, $+dF/dt$, $-dF/dt$ 及びRMSはやや減少傾向を示すが、12分後には逆に増大する傾向がみられ、特に $+dF/dt$ は12%も増大した。

考 察

随意的な最大筋力は、末梢の筋機能と中枢神経系が関与するが、我々はすでに末梢の筋機能は15

%程度の低酸素吸入では変化しないことを報告⁸⁾した。したがって、低酸素吸入中のMVCは主に中枢神経系によって影響を受けると考えられる。本研究において、随意的最大筋力(MVC)は、平均値でみると低酸素吸入によりあまり変化しなかった。先行研究では、4500m以上の高度において筋力および筋協応機能の低下¹³⁾、3600～5400mでは筋力の低下、さらに酸素飽和度が平地の85%以下で筋協応機能の低下、75%以下では筋機能障害などがみられる¹⁷⁾ことが報告されており、一定以上の高度では筋力が低下するとされてきた。しかし近年、エベレストと同高度にシュミレートした低圧室において、本研究と同じ下腿三頭筋のMVCは変化しないことが報告²⁾されている。このように結果が異なる原因として、実際の登山と低圧室といった環境条件、実験高度、被検者、被検筋などの違いが考えられる。本研究では、図1にみられるように、低酸素条件において個人内での変動が大きかったため、平均値でみるとMVCは有意な変化を示さなかったと思われる。本研究では足底屈動作を用いたが、BelangerとMcComas¹⁾は、この動作はmotor unitsを全て動員することが困難であることを報告している。また、人間の精神状態は、標高2400m以上になると、興奮し、爽快な気分になって運動意欲が亢進する状態と、陰うつになって運動意欲が減退する状態が交互に現れることが報告¹⁷⁾されている。最大筋力は動機づけによって変化する⁷⁾ことから、低酸素吸入中に精神状態が変化することによって、個人内の最大筋力も変動することが考えられる。

先行研究によれば、高所に登山する時に精神状態が変化するのは、低酸素により中枢神経系がなんらかの影響を受けることが原因であるとされている。動物実験において、低酸素により血中のヘモグロビンの酸素飽和度または酸素分圧(PO₂)が低下すると、脳血管が拡張して脳血流量が増加することにより、脳への酸素供給を確保する機能が働くことが報告^{3,9,12)}されている。このようにして、酸素飽和度が70%以下になるまで脳のPO₂はほとんど変化しないとされている^{14,18)}。一方、低酸素により呼吸中枢が刺激されて換気が亢進し、

ヘモグロビンと酸素の飽和度が高まるが、換気が促進すると CO_2 の排出が増大するため、いわゆる低炭酸ガス血症 (hypocapnia) となり、からだはアルカリ性に傾く。その結果、脳血管は収縮し、血流量が低下することにより、脳への酸素供給が逆に妨げられることも報告^{9,14,15,18)}されている。このように、 PO_2 と PCO_2 の相互関係で脳への酸素の供給が変化することにより、中枢神経系が影響を受けるとされている¹⁴⁾。本研究では、酸素飽和度は 85~90% であり、また、換気量も High responder 以外の被検者は、コントロール条件に対し低酸素条件では 10~20% しか増加しておらず、脳への酸素供給は、室内空気吸入時に比べあまり変化していなかったものと思われる。実際、High responder 以外の被検者は低酸素を吸入してもあまり眠気を感じておらず、12% 程度の低酸素では脳での低酸素を引き起こすまでは至らなかったと思われる。さらに、Kobrick^{10,11)}は低酸素により反応時間 (Response time) が延長することを報告しているが、本研究では低酸素条件とコントロール条件で Reaction time はあまり大きな差がみられなかった。この原因是、本研究で用いた低酸素濃度では、光刺激に対する反応の中枢にはあまり大きな影響を及ぼさなかつたためと考えられる。このように、12% 程度の低酸素を 12 分間吸入しても、筋力発揮や刺激一反応を支配する中枢、すなわち、運動や感覚に関与する中枢はあまり影響を受けないことが推察される。

High responder の MVC は低酸素吸入中に時間経過に伴って増加していたが、その原因は次のように考えられる。まず、他の被検者では、低酸素吸入により換気量は 10~20% 程度増加していたのに対し、High responder では 35% も増大した。これは、この被検者の酸素に対する末梢化学受容器（頸動脈体と大動脈体）の感受性が高いためか、あるいは、低酸素に対する不安感などから、換気量が大きく増大したものと思われる。こうした過換気により炭酸ガスが過剰に排出され、血液がアルカリ性に傾き、脳の血管が収縮し、脳に対する酸素の供給が不足していたのではないかと考えられる。実際、High responder は低酸素吸入中に非

常な眠気を感じており、脳の酸素不足によって中枢神経系で興奮レベルが増大し、いわゆる脱制止によってより大きな筋力が発揮できるようになったのではないかと考えられる。

興味ある結果として、最大筋力そのものは大きな変化を示さないが、その最大筋力の発揮の仕方、すなわち力の出し方は、低酸素条件とコントロール条件ではかなり異なっていた。すなわち、図 5 に示したように、筋力の立ち上がりの最大の傾き ($+dF/dt$) は、コントロール条件では最初が高く、その後減少する傾向がみられる。一方、低酸素条件では最初同じように低下するが、その後再び増加している。コントロール条件では、最初は一気に力を発揮するが、時間経過に伴い、徐々に最大筋力に達するような力の出し方を行なっている。これに対し低酸素条件では、最初同じようにゆっくりと力を発揮するが、時間経過に伴い、早く力を発揮しようとしていると思われる。この原因として、一つには、低酸素の影響で motor units の閾値が変化し、運動神経細胞が興奮しやすくなっていることが考えられる。しかし、我々の先行研

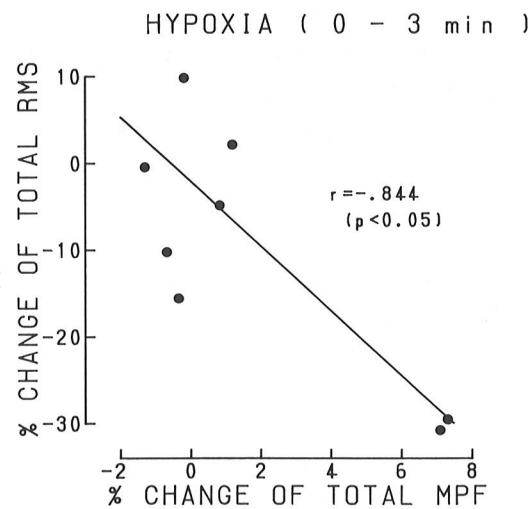


Fig. 6 Correlation coefficient between relative changes in total RMS and total MPF during first 3 min in hypoxia.

究⁸⁾では、電気刺激による twitch 曲線の立ち上がりの最大の傾きは、低酸素によってもほとんど変化しなかったことから、motor units の閾値は変化していないと考えられる。従ってこれは主に上位中枢が原因ではないかと考えられる。すなわち、低酸素吸入により精神的に興奮しやすくなっていたために、一気に力を発揮するようになったのかもしれない。

また、低酸素吸入により最大筋力はほとんど変化しない場合でも、motor units の動員や発火頻度が変化していることも考えられる。図6は、低酸素吸入最初の3分間の RMS と MPF の変化率の相関をみたもので、両者の変化率に有意な負の相関が認められ、RMS が低下した被検者は MPF が増加し、MPF が減少した者は RMS が増加していた。RMS や MPF は motor units の動員や発火頻度を反映していることから、たとえ MVC が一定であっても、motor units の参加様式や発火頻度などが変化していることも考えられる。しかし、表面筋電図からこれらのこと推察するのは限界があり、今後より一層の検討が必要であると思われる。

以上のように、本研究では、短時間の低酸素吸入により、最大の筋力自体はあまり変化しないが、その筋力の発揮の仕方はかなり変化すること、さらに、低酸素に対する換気応答の高い者は最大筋力が増加する傾向があることが明らかになった。これらの結果から、随意的な筋力発揮能力は、低酸素を吸入することにより変化することが示唆された。

本研究の一部は「平成元年度宇宙基地利用基礎実験費」の援助により行なわれた。

参考文献

- 1) Belanger, A. Y., and A. J. McComas : Extent of motor unit activation during effort. *J. Appl. Physiol.*, 51 : 1131-1135, 1981.
- 2) Bigland-Ritchie, B., and N. K. Vollestad : Hypoxia and fatigue : How are they related? In : Hypoxia : the tolerable limits. J. R. Sutton, C. S. Houston, and G. C. Coates (eds.). Indianapolis : Benchmark Press, 1988., pp. 315-328.
- 3) Borgström, L., H. Jóhannsson, and B. K. Siesjö : Relationship between arterial PO₂ and cerebral blood flow in hypoxic hypoxia. *Acta Physiol. Scand.*, 93 : 423-432, 1975.
- 4) Cymerman, A., J. T. Reeves, J. R. Sutton, P. B. Rock, B. M. Groves, M. K. Malconia, P. A. Young, P. D. Wagner, and C. S. Houston : Operation Everest II : maximal oxygen uptake at extreme altitude. *J. Appl. Physiol.*, 66 : 2446-2453, 1989.
- 5) Harper, A. M., and H. I. Glass : Effect of alternations in the arterial carbon dioxide tension on the blood flow through the cerebral cortex at normal and low arterial blood pressures. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*, 28 : 449-452, 1965.
- 6) Houston, C. S., J. R. Sutton, A. Cymerman, and J. T. Reeves : Operation Everest II : man at extreme altitude. *J. Appl. Physiol.*, 63 : 877-882, 1987.
- 7) Ikai, M., and A. H. Steinhaus : Some factors modifying the expression of human strength. *J. Appl. Physiol.*, 16 : 157-163, 1961.
- 8) 石田浩司, 宮村寛晴, 矢部京之助 : 短時間の低酸素吸入が誘発張力およびH反射に及ぼす影響。総合保健体育科学 12 : 57-64, 1989.
- 9) Kety, S. S., and C. F. Schmidt : The effects of altered arterial tensions of carbon dioxide and oxygen on cerebral blood flow and cerebral oxygen consumption of normal young men. *J. Clin. Invest.*, 27 : 484-492, 1948.
- 10) Kobrick, J. L. : Effects of hypoxia on voluntary response time to peripheral stimuli during central target monitoring. *Ergonomics*, 15 : 147-156, 1972.
- 11) Kobrick, J. L. : Effects of hypoxia on peripheral visual response to dim stimuli. *Perc. Mot. Skill*, 41 : 467-474, 1975.
- 12) Kogure, K., P. Scheinberg, O. M. Reinmuth, M. Fujishima, and R. Busti : Mechanisms of cerebral vasodilatation in hypoxia. *J. Appl. Physiol.*, 29 : 223-229, 1970.
- 13) 黒島晨汎 : 環境生理学。理工学社, 1981., pp. 94-112.
- 14) Lassen, N. A. : The Brain : cerebral blood flow. In : Hypoxia : Man at altitude. J. R. Sutton, N. L. Jones, and C. S. Houston. (eds.). Georg Thieme Verlag : Thieme-Stratton, 1982., pp. 9-13.
- 15) Severinghaus, J. W. : Role of cerebrospinal fluid pH in normalization of cerebral blood flow in chronic hypoxia. *Acta Neurol. Scand.*, 41 (suppl 14) : 117-120, 1965.

- 16) Townes, B. D., T. F. Hornbein, R. B. Schoene, F. H. Sarnquist, and I. Grant : Human cerebral function at extreme altitude. In : High altitude and man. J. B. West and S. Lahiri (eds.). Bethesda : Amer. Physiol. Soc., 1984., pp. 31-36.
- 17) Ward, M. P. : Mountain Medicine. 「高所医学」 御手洗玄洋, 中島寛(訳), 山と渓谷社, 1987., pp. 380-392.
- 18) Ward, M. P., J. S. Milledge, and J. B. West : High altitude medicine and physiology. London : Chapman and Hall Medical, 1989., pp. 311-325.
- 19) West, J. B., S. J. Boyer, D. J. Gruber, P. H. Hackett, K. H. Maret, J. S. Milledge, R. M. Peters Jr, C. J. Pizzo, M. Samaja, F. H. Sarnquist, R. B. Schoene, and R. M. Winslow : Maximal exercise at extreme altitude on Mount Everest. J. Appl. Physiol., 55 : 688-698, 1983.
- 20) 万木良平, 井上太郎 : 異常環境の生理と栄養. 光生館, 1980., pp. 142-146.

(1989年11月30日受付)

