

原著論文

低圧環境における長時間運動時の発揮パワーと生理応答

金谷和幸¹、村川増代²、河端隆志³

抄録

高地という低圧低酸素環境への急性暴露は運動時の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) の低下、運動パフォーマンスの低下を引き起こす。本研究では低圧環境下において長時間運動時の発揮パワーの維持及び低下に対する呼吸・心臓循環器系機能および体温調節機能の影響を検討することを目的とした。被験者は成人7名（男性3名、女性4名）で常圧環境（標高0m）、低圧環境（標高3000m相当）2種類の環境下で60% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の運動強度で50分間の自転車運動を実施した。運動中はペダルの回転数を60rpmに維持するように指示し、60rpm時に60% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の負荷になるようにギアを設定し、運動時の発揮パワーを測定した。発揮パワーは低圧環境において運動開始40分（常圧環境：114 ± 11W、低圧環境：105 ± 8W）より常圧環境と比較して有意な低下がみられた ($p < 0.05$)。心拍数は安静時から運動終了時まで低圧環境で有意に高値を示した。1回心拍出量では運動開始5分より（常圧環境：115 ± 0ml、低圧環境：104 ± 0ml）、有意な減少がみとめられた ($p < 0.05$)。食道温においては有意な差は見られなかった。呼吸器系では分時換気量が運動開始10分後（常圧環境：53 ± 7l/min、低圧環境：66 ± 9l/min）から運動終了時（常圧環境：56 ± 9l/min、低圧環境：64 ± 10l/min）まで有意な増加がみられた ($p < 0.05$)。これらのことから低圧環境では、常圧環境と同等の負荷の運動は呼吸・心臓循環器系への負荷が大きくなり、自転車運動でのパワー発揮を落として、被験者が絶対負荷を下げたことが示唆された。

キーワード：急性低圧環境、1回心拍出量、発揮パワー

¹ 関西大学大学院人間健康研究科 博士課程後期課程

² 関西大学大学院人間健康研究科、明治国際医療大学

³ 関西大学大学院人間健康研究科

Effects of Acute Hypobaric Hypoxia on Biological Responses Function and Power Output During Prolonged Exercise

Kazuyuki Kanatani, Masuyo Murakawa and Takashi Kawabata

Abstract

Effect of acute hypoxia decrease maximal oxygen uptake ($\text{VO}_2 \text{ max}$) and performance during exercise. We aimed to determine the effect of cardiorespirator, cardiovascular and thermoregulatory responses on maintaining and reducing performance during prolonged exercise in an acute hypobaric hypoxia. Seven trained subjects (3 males, 4 females) completed a submaximal ($60\% \text{VO}_2 \text{ max}$ at sea level) constant load exercise test for 50 min at sea level (SL) and 3,000 m simulated altitude (HH). Instructed to keep revolutions of bicycle at 60 rpm during exercise, set the gear so that the load is $60\% \text{VO}_2 \text{ max}$ at 60 rpm and measured power output during exercise. During exercise in the HH, compared to that in the SL, the power output was not maintained from 40 min (SL: $114 \pm 11 \text{ W}$, HH: $105 \pm 8 \text{ W}$) and decreased significantly ($p < 0.05$). HR in HH increased significantly at rest to the end of exercise. Stroke volume was decreased from after 5 minutes of exercise (SL: $115 \pm 0 \text{ ml}$, HH: $104 \pm 0 \text{ ml}$) compared to SL ($p < 0.05$). Esophageal temperature and cardio output were no significant difference between SL and HH. Minute ventilation increased significantly from 10 min (SL: $53 \pm 7 \text{ l/min}$, HH: $66 \pm 9 \text{ l/min}$) at started exercise to the end of exercise (SL: $56 \pm 9 \text{ l/min}$, HH: $64 \pm 10 \text{ l/min}$) in a HH compared with SL ($p < 0.05$). These results suggest that in hypoxia, exercise intensity measured at sea level greater burden on the cardiorespirator, cardiovascular function. It was suggested that the subjects reduced the absolute load by reduce the power output in the bicycle exercise.

Keywords: Acute hypobaric hypoxia, Stroke volume, Power output

I 緒言

近年、健康ブームやアクティブな余暇の過ごし方など中高齢者含む幅広い世代でトレッキングや登山をする人が増えてきている。スポーツシーンにおいては自転車競技におけるロードレースで中程度の標高を横断するステージ（コース中に標高 1000～3000m を越す山岳コースなど）があり、高所環境（低圧環境）における運動・スポーツはより身近なものになりつつある。しかし、酸素分圧が低下した低酸素環境で酸素消費量の大きい運動を長時間行うことは生体に大きなストレスを与えるため、登山者の事故が増加傾向にあり（警察庁, 2020）、スポーツシーンでは平地と比較して運動パフォーマンスに大きな影響を及ぼす。

低圧環境下への急性暴露は、肺泡の酸素分圧や動脈血酸素飽和度の低下、心拍数、換気量、心拍出量の増加を引き起こす（宮村, 2000）。最大酸素摂取量 ($VO_2 \text{ max}$) は低下し（Murphy et al., 1989; Mollard et al., 2007）、常圧環境と同等の負荷で運動を行うと酸素分圧の低下により相対的に運動負荷が高くなり（Maher et al., 1974）、長時間パワーを発揮することは難しい。また、気圧が低いと空気中の総蒸気圧が低くなるため、高地では皮膚と環境の間の蒸気圧勾配が広くなり、皮膚表面からの汗の蒸発を促進する傾向があり、皮膚の温度を低下させ、体温調節機能にも影響を及ぼす（Charkoudian et al., 2019）。このように低圧環境下では常圧もしくは常圧低酸素の環境とは異なった生理反応を引き起こし、気圧が低下することによってより厳しい環境条件になることが示唆されている（Millet et al., 2012）。

そこで本研究では低圧低酸素環境において、常圧環境と同等の運動負荷時の発揮パワーの経時変化を測定し、一定量の運動強度の維持を要求しても維持できず発揮パワーが低下する局面を時系列に応じて示す。そして、活動筋への酸素運搬の役割のある呼吸・心臓循環器系機能（Piiper, 1988; Wagner et al., 1987; Ferretti and di Prampero, 1995）および低圧低酸素環境での活動筋の代謝性産熱の熱放散による体温調節機能（Charkoudian et al., 2019）が発揮パワーの維持および低下に及ぼす影響を検討することを目的とした。

II 方法

1. 被験者

被験者は、喫煙習慣の無い恒常的に運動を行っている成人 7 名（男性 3 名、女性 4 名）を対象とした。被験者には、まず本研究に関するインフォームドコンセントについて十分に説明し、同意を得たものについて被験者とした。女性の被験者は月経周期の影響を受けないよう周期を統一し、卵胞期と黄体期の間を生じる体温調節の違いを制御した（Stephenson and Kolka, 1985）。

実験に先立ち、相対的運動強度を算出するために、人工気候室（ T_a : 25°C、RH40%）にて常圧環境下で $VO_2 \text{ max}$ の測定を行った。 $VO_2 \text{ max}$ は自転車エルゴメーター（コナミ社製、エアロバイク 75XL III）を用いて、斬増負荷法（20W/2min）による測定を行った。

2. 環境条件と運動様式

環境条件は、常圧環境（標高 0m: 気圧 1013hpa）と低圧環境（標高 3000m: 気圧 700hpa）の2つの環境条件を設定し、低圧室（株式会社京伸社、K-MAX）を用いて実施した。また、運動様式は、プレテストで計測した $VO_2 \text{ max}$ の60%に相当する負荷強度を算出し、10分間の安静の後、一定負荷（常圧環境下60% $VO_2 \text{ max}$ ）による最大下運動を50分間遂行した。運動終了後の回復期は10分間とした。実験は2条件とも同時刻に、2条件の実験間隔は、前の運動の影響がないように十分な期間（1週間以上）を空けて実施した。

3. 測定項目

測定項目は、酸素摂取量（ VO_2 ）、分時換気量（VE）、心拍数（HR）、心拍出量（CO）、1回心拍出量（SV）、食道温（ T_{es} ）、経皮的動脈血酸素飽和（ SpO_2 ）を安静時より1分ごとに連続測定を行った。また、50分間の運動中は自転車運動による仕事量の測定も行った。

4. 実験プロトコル

被験者は、入室後、短パンとTシャツに着替えてから約300mlの水を摂取した後排尿をして体水分の平衡を行った。次に、低圧室にて椅坐位安静を取り、その間に計測機器を装着した。計測機器の装着には、まず、心拍センサー（ポラール・エレクトロ、PolarH10）を装着した。次に呼気ガス分析装置（COSMED社、K4b2）を装着した。SV、CO、平均動脈圧（MAP）の測定のため左手中指の指尖部にカフ（Edward life science Ltd., EV-1000）を装着し、ボリュームクランプ法およびフィジオキナル法により指尖動脈圧から上腕動脈圧を算出して連続的に測定を行った（Panzarino et al., 2017; Bartels et al., 2011）。 T_{es} はサーミスター（Gram Corporation, LT-8）を鼻腔より身長1/4cm挿入し測定した。 SpO_2 はベッドサイドモニタ（日本光電工業株式会社、BSM-6000シリーズ）を使用し左手人差し指に装着し測定を行った。

被験者はすべての測定機器を装着した後、計測用の自転車に移動して実験を遂行した。

5. 発揮パワーの測定

発揮パワーの測定は、ダイレクトトランスミッション方式パワーメーター（ELITE社、DRIVO）とサイクルコンピューター（GARMIN社、EDGE1030）をセットで使用し、運動時の仕事量の変化を1秒ごとに測定した。運動中はメトロノームのリズムおよび被験者前面に表示され

るデジタル式回転数を確認しながらペダルの回転数を 60rpm にできる限り維持するように指示を行った。回転数が 60rpm 時に 60% VO_2 max の負荷になるようにギアを設定し、運動時の発揮パワーを測定した。

6. 皮膚血管コンダクタンス (FVC) の算出

皮膚血管拡張の程度を表す FVC は前腕皮膚血流量 (FBF) を MAP で除して算出した。FBF はレーザードップラー法による血流測定器 (アドバンス社, ALF21) を左前腕外側部に装着して測定した。

7. 統計解析

本研究の測定値は平均値±標準誤差 (mean ± SE) で示した。低圧環境における発揮パワーは、時間を要因とした一元配置分散分析を行った。また、常圧および低圧環境における運動条件の平均値の差の分析については、環境条件と時間の 2 つを要因とする二元配置反復測定分散分析を用いた。有意差が検出された場合においては Bonferoni を用いて多重比較検定を行い、交互作用の有無を確認した。すべての統計処理における有意水準は $p < 0.05$ とした。

なお本実験は関西大学人間健康学部研究倫理委員会の承認 (2019-18) を得て実施した。

Ⅲ 結果

被験者 7 名の身体的特徴を表 1 に示した。実験に先立ち、相対的運動強度を算出するために行った常圧環境下における VO_2 max は $3.27 \pm 0.331/\text{min}$ であった (表 1)。

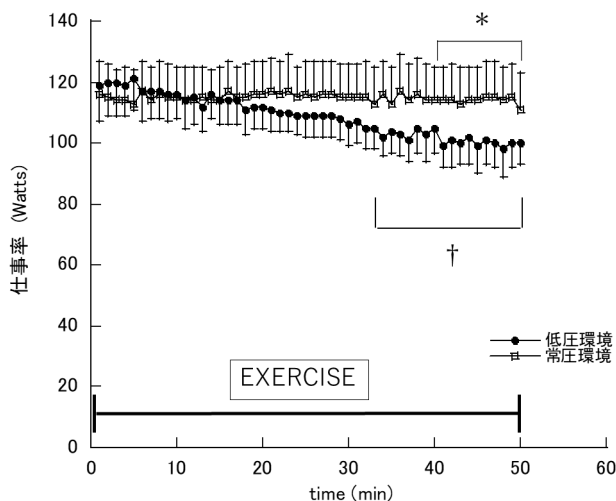
表 1 被験者の身体的特徴と VO_2 max

被験者	性別	年齢	身長(cm)	体重(kg)	VO_2 max(l/min)
A	M	29	184	84.3	3.15
B	M	21	187	67.5	3.98
C	M	21	180	77.1	4.86
D	F	21	161	58.0	2.26
E	F	21	164	55.4	2.67
F	F	22	162	73.0	3.14
G	F	21	165	62.1	2.82
Ave±SE		22±1	171.9±4.3	68.2±4	3.27±0.33

1. 発揮パワーの動態：

常圧環境では、運動開始より 60% VO_2 max のパワーを運動終了まで定常に維持していた。低圧環境での動態は、運動開始から定常状態 ($119 \pm 12\text{W}$) を維持していたが、運動開始後 33 分

(105 ± 7W) から低圧環境での運動開始時と比較して有意な低下がみられた。常圧環境と比較してみると、運動開始後40分(常圧環境:114 ± 11W、低圧環境:105 ± 8W)から50分(常圧環境:111 ± 12W、低圧環境:100 ± 7W)における最後の10分間で、低圧環境で有意に低い値がみとめられたが、交互作用は認められなかった(図1)。



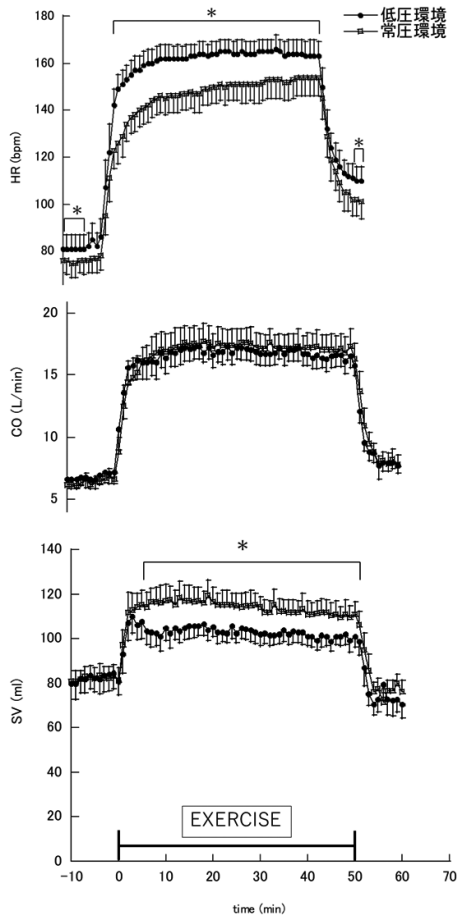
* $p < 0.05$ vs 常圧環境, † $p < 0.05$ vs 低圧運動開始時

図1 運動時の発揮パワーの動態

2. 低圧環境下運動時の生理的反応：

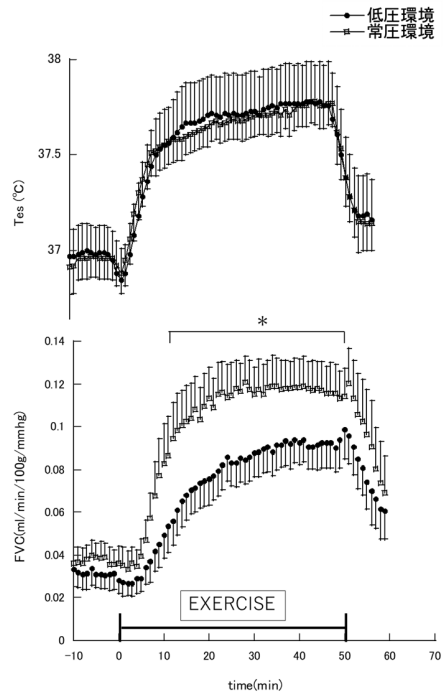
常圧環境と低圧環境の心臓循環器系機能の動態を示したものが図2である。安静時(安静時10分間の平均値)では低圧環境(81 ± 6bpm)のHRが、常圧環境(76 ± 5bpm)と比較して有意に高値を示したが、交互作用は認めなかった。運動開始よりHRの応答は増加を示した。およそ運動開始10分で常圧環境では141 ± 7bpm、低圧環境では159 ± 6bpmに達し、その後両環境下のHR応答は運動終了時まで上昇を示した。C0は、安静時(安静時10分間の平均値)の常圧環境(6.2 ± 0.4L/min)と低圧環境(6.6 ± 0.7L/min)との間に有意な差はみとめられなかった。また、運動時においても、運動開始よりC0は増加し、常圧環境(17.6 ± 1.4L/min)および低圧環境(17.2 ± 1.1L/min)それぞれに定常状態を示すも両環境の間に有意な差はみとめられなかった。しかし、SVの応答については、安静時(安静時10分間の平均値)において低圧環境(80 ± 7ml)と常圧環境(81 ± 5ml)で有意な差はみとめられなかったが、運動開始5分より低圧環境(104 ± 0ml)が常圧環境(115 ± 0ml)と比較して交互作用は認めなかったものの有意に低い値を示した。

図3にはTesおよびFVCの安静時及び運動時の動態を示した。安静時(安静時10分間の平均値)のTesは、低圧環境(36.97 ± 0.14°C)と常圧環境(36.92 ± 0.15°C)の両環境の間に有意な差はみられなかった。運動時の両環境下のTesの応答を比較すると、10分から25分まで低圧環境下のTesの反応が常圧環境と比較して高値を示していたが両環境の間に有意な差はなく、運動終了時まで差は認められなかった。FVCにおいては低圧環境において運動開始13分(低圧環境:0.06 ± 0.01ml/min/100g/mmHg、常圧環境:0.1 ± 0.02 ml/min/100g/mmHg)から運動終了時(低圧環境:0.09 ± 0.01ml/min/100g/mmHg、常圧環境:0.11 ± 0.01ml/min/100g/mmHg)まで常圧環境と比較して有意に低い値を示したが、交互作用は認めなかった。



* p < 0.05 vs 常圧環境

図2 HR、SV、COの安静時及び運動時の動態



* p < 0.05 vs 常圧環境

図3 Tes および FVC の安静時及び運動時の動態

表2 VO₂、VE、SpO₂の安静時及び運動時の動態

	time (min)	安静		運動					安静
		-10	0	10	20	30	40	50	60
VO ₂ (ml/min)	低圧環境	357 ± 46	413 ± 55	2092 ± 204	2083 ± 185	2082 ± 196	2103 ± 209	1979 ± 174	472 ± 81
	通常環境	397 ± 61	329 ± 36	1988 ± 237	2048 ± 241	2056 ± 223	2083 ± 223	2078 ± 244	455 ± 80
VE (l/min)	低圧環境	11 ± 1	11 ± 2	66 ± 9*	68 ± 9*	68 ± 9*	67 ± 10*	64 ± 10*	16 ± 3
	通常環境	12 ± 2	11 ± 1	53 ± 7	56 ± 8	55 ± 8	57 ± 9	56 ± 9	15 ± 2
SpO ₂ (%)	低圧環境	87 ± 1*	86 ± 1.4*	80 ± 2.2*	80 ± 2*	80 ± 1.6*	80 ± 2.1*	80 ± 1.6*	87 ± 0.8*
	通常環境	99 ± 0	98 ± 0.3	97 ± 0.6	96 ± 0.5	96 ± 0.4	96 ± 0.4	96 ± 0.4	97 ± 0.3

* p < 0.05 vs 常圧環境

呼吸循環器系機能では、VO₂では運動開始10分で低圧環境：2092 ± 204ml/min、常圧環境：1988 ± 237ml/minまで増加し、その後運動終了時まで両環境下において定常状態を示した。VEでは安静時（低圧環境：11 ± 1l/min、常圧環境：12 ± 2l/min）では有意な差は認められなかったが、低圧環境において運動開始10分（低圧環境：66 ± 9l/min、常圧環境下：53 ± 7l/min）から運動終了時（低圧環境下：64 ± 10l/min、常圧環境下：56 ± 9l/min）まで常圧環

境と比較して有意に高い値を示した。しかし、交互作用は認められなかった（表2）。SpO₂は低圧環境下において安静時（低圧環境：87 ± 1%、常圧環境：99 ± 0%）から運動終了後安静時（低圧環境：87 ± 0.3%、常圧環境：97 ± 0.3%）まで常圧環境と比較して有意に低い値を示し、交互作用においても有意差が認められた（F（1, 69）=1.52, p < 0.05, η²=0.26）（表2）。

IV 考察

今回の実験では常圧環境下で測定した60% VO₂ maxの値を用いて常圧環境と低圧環境で50分間の運動を行い、運動中の発揮パワー、生体応答の変化について検討を行った。

50分間の長時間運動における運動時の発揮パワーは常圧環境下では維持できていたが、低圧環境では常圧環境と比較して運動開始後40分（常圧環境：114 ± 11W、低圧環境：105 ± 8W）から運動終了50分（常圧環境：111 ± 12W、低圧環境：100 ± 7W）まで有意に低い値を示した。低圧環境の発揮パワーだけをみても継続的にパワーを発揮できず運動開始時（119 ± 12W）と比較して運動開始33分（105 ± 7W）から有意に低い値を示した（図1）。

低圧環境では酸素分圧の低下によって、一定強度の有酸素運動を行った際、常圧環境と比較して相対的運動強度は増加する（Maher et al., 1974）。Piiper（1988）の報告では常圧環境では運動時の酸素運搬は70%が心臓血管系に依存するが、低圧環境では肺からの酸素の取り込みの役割が次第に大きくなり、Wagner et al.（1987）によれば高度4,000mでは両要因は半々でありエベレスト山頂では肺での拡散障害が85%関与すると述べている。Ferretti and di Prampero（1995）も平地では主に心臓循環系がVO₂ maxの制限要因となるが、低圧環境では吸入気酸素分圧が減少すると、VO₂ maxの制限における肺の役割が大きくなり、心血管系の役割が小さくなり、換気量がVO₂ maxの制限要因となることを示唆していることを報告している。

本研究においてもVEの有意な増加がみられた（表2）。低圧環境下では酸素分圧の低下に伴い吸入気酸素分圧および動脈酸素分圧の低下により体内の酸素供給量が低下し、それを補うためとVEが増加することが報告されており（Adams et al., 1975; Welch, 1987）、近似した結果が得られた。VO₂は常圧環境と比較して有意な差がみられなかった（表2）。VO₂は低圧環境下への急性暴露時の最大下運動中は常圧環境下と差がないということが報告されている（Peltonen et al., 2001; Stenberg et al., 1966）。

体温調節および心臓循環器系機能に対する低圧環境の影響は、Greenleaf et al.（1969）は、T_{es}は運動時において高度差における吸入気酸素分圧の影響は受けないと報告している。Kolka et al.（1987）によると気圧の低下により蒸散性熱放散が促進されたことで皮膚温が低下することが報告されており、Miyagawa et al.（2011）の報告においても、平地に比べ低圧環境では運動時の皮膚血管拡張反応が抑制される一方、発汗量の反応の感度は変わらなかった。

た。すなわち、高地では皮膚の血流が抑制されるので、発汗量を増加させ体温調節機能を補うことが報告されている。本研究においても Tes、FVC では近似した結果が認められたが（図 3）、低圧環境と常圧環境を比較して Tes に有意な差は見られなかったため、体温上昇の差による発揮パワーの低下は確認できなかった。

低圧環境では同強度の運動をしても、乳酸などの産生が促進し、動脈血中の酸素分圧が低下することで筋の血管が拡張し、毛細血管圧を上昇させる。これは、血管内から血管外への水分の移動を促し、血漿量を減少させ、血液の心臓への還流量を減少させ SV が減少する（能勢, 2014）。そして、低圧環境下では運動時 HR が有意な上昇を示している。常圧環境下において HR の上昇が心室充満時間と心室拡張末期容積を減少させ、SV が減少することが報告されている（Sheriff et al., 1993; Fritzsche et al., 1999）。低圧環境下においても Reeves et al. (1987) が最大心室充満の減少によって SV が減少したことを報告している。Boussuges et al. (2000) も左心室機能の低下によって SV が減少したことを報告しており、本研究においても近似した結果が得られた。また HR 応答においては両環境ともに長時間の運動継続とともに HR が増加する cardiovascular drift を示していたが運動終盤において低圧環境では増加が抑制されていた（図 2）。Reeves et al. (1987) の報告でも低圧環境下の運動終了近くで HR 増加が抑制され発揮パワーの低下がみられたことが報告されている。

本研究の 60% $\dot{V}O_2$ max の負荷での最大下長時間運動時において SpO_2 の低下、VE や HR の増大がみられたことから（図 2、表 2）、呼吸筋や心筋の酸素消費の増大をもたらし、常圧環境での運動よりもこれらの酸素消費が上乘せされたと考えられる。酸素分圧の低下による運動時の有意な FVC の低下（皮膚血管拡張の抑制）、HR の増加、SV の減少を引き起こし、常圧環境下と比較して活動筋への十分な血流供給も維持できていないと示唆され（図 2、3）、運動時の発揮パワーの維持を制限したと考えられる。これらのことから相対的負荷が高くなった低圧環境では呼吸・心臓循環器系機能の両者に大きな負荷がかかり、50 分間継続して発揮パワーを維持することができず、被験者が自転車運動での発揮パワーを落として絶対負荷を下げたことが示唆される。

V 結論

相対的に負荷が高くなる低圧環境では運動時の発揮パワーの維持は難しく有意な低下を示した。Tes において有意な差は見られなかったが、呼吸・心臓循環器系では低圧環境下で有意な VE の増加、HR の増加、SV の減少がみられ、常圧環境下と同等の負荷の運動は生体への負荷が大きくなり、被験者が自転車運動での発揮パワーを落として下肢筋群の活動量を減らし、絶対負荷を下げたことが示唆された。

これらのことから、低圧環境で運動負荷を維持しようとする、生体には負荷がかかり、常圧環境下と同等の力を発揮しようとしてもあるところから発揮パワーが低下し始める。常圧環境と比較し相対的な運動負荷が高くなり早期の疲労へと繋がる。そして、低圧環境下での運動中の事故・運動パフォーマンスの低下に繋がること示唆される。そのため、低圧環境下で長時間運動時には、適切な負荷設定が必要となってくる。

参考文献

- Adams, W. C., Bernauer, E. M., Dill, D. B., and Bomar, J. B. (1975). Effects of equivalent sea-level and altitude training on VO_2 max and running performance. *Journal of Applied Physiology.*, 39: 262-266.
- Bartels, S. A., Stok, W. J., Bezemer, R., Boksem, R. J., Van Goudoever, J., Cherpanath, T. G. V., Van Lieshout, J. J., Westerhof, B. E., Karemaker, J. M., and Ince, C. (2011). Noninvasive cardiac output monitoring during exercise testing: Nexfin pulse contour analysis compared to an inert gas rebreathing method and respired gas analysis. *Journal of Clinical Monitoring and Computing.*, 25: 315-321.
- Boussuges, A., Molenat, F., Burnet, H., Cauchy, E., Gardette, B., Sainty, J. M., Jammes, Y., and Richalet, J. P. (2000). Operation Everest III (Comex '97): Modifications of cardiac function secondary to altitude-induced hypoxia. An echocardiographic and Doppler study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine.*, 161: 264-270.
- Charkoudian, N., Mitchell, K. M., Yurkevicius, B. R., Luippold, A. J., Bradbury, K. E. and Kenefick, R. W. (2019). Influences of hypobaric hypoxia on skin blood flow and sweating responses during exercise in neutral and hot environments. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology.*, 317: R571-R575.
- Ferretti, G., and di Prampero, P. E. (1995). Factors limiting maximal O_2 consumption: effects of acute changes in ventilation. *Respiration Physiology.*, 99: 259-271.
- Fritzsche, R. G., Switzer, T. W., Hodgkinson, B. J. and Coyle, E. F. (1999). Stroke volume decline during prolonged exercise is influenced by the increase in heart rate. *Journal of Applied Physiology.*, 86: 799-805.
- Greenleaf, J. E., Greenleaf, J., Card, D. H., and Saltin, B. (1969). Exercise-temperature regulation in man during acute exposure to simulated altitude. *Journal of Applied Physiology.*, 26: 290-296.
- 警察庁 (2020). 令和2年における山岳遭難の概況. <https://www.npa.go.jp/publications/sta> (参照日 2021年10月15日)

- Kolka, M. A., Stephenson, L. A., Rock, P. B., and Gonzalez, R. R. (1987). Local sweating and cutaneous blood flow during exercise in hypobaric environments. *Journal of Applied Physiology*, 62: 2224-2229.
- Maher, J. T., Jones, L. G., and Hartley, L. H. (1974). Effects of high-altitude exposure on submaximal endurance capacity of men. *Journal of Applied Physiology*, 37: 895-898.
- Millet, G. P., Faiss, R. and Pialoux, V. (2012). Point: Hypobaric hypoxia induces different physiological responses from normobaric hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, 112: 1783-1784.
- Miyagawa, K., Kamijo, Y. I., Ikegawa, S., Goto, M., and Nose, H. (2011). Reduced hyperthermia-induced cutaneous vasodilation and enhanced exercise-induced plasma water loss at simulated high altitude (3,200 m) in humans. *Journal of Applied Physiology*, 110: 157-165.
- 宮村実晴 (2000). 高所 運動生理学的基礎と応用. ナップ社.
- Mollard, P., Woorons, X., Letournel, M., Lamberto, C., Favret, F., Pichon, A., Beaudry, M., and Richalet, J. P. (2007). Determinants of maximal oxygen uptake in moderate acute hypoxia in endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 100: 663-673.
- Murphy, P. C., Cuervo, L. A., and Hughson, R. L. (1989). A study of cardiorespiratory dynamics with step and ramp exercise tests in normoxia and hypoxia. *Cardiovascular Research*, 23: 825-832.
- 能勢博 (2014). 山に登る前に読む本 運動生理学からみた科学的登山術. 講談社.
- Panzarino, M., Gravina, A., Carosi, V., Crobeddu, P., Tiroli, A., Lombardi, R., D'Ottavio, S., Galante, A., and Legramante, J. M. (2017). Cardiovascular and hemodynamic responses to adapted physical exercises in very old adults. *Aging Clinical and Experimental Research*, 29: 419-426.
- Peltonen, J. E., Tikkanen, H. O., and Rusko, H. K. (2001). Cardiorespiratory responses to exercise in acute hypoxia, hyperoxia and normoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 85: 82-88.
- Piiper, J. (1988). Pulmonary diffusing capacity and alveolar-capillary equilibration. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 227: 19-32.
- Reeves, J. T., Groves, B. M., Sutton, J. R., Wagner, P. D., Cymerman, A., Malconian, M. K., Rock, P. B., Young, P. M., and Houston, C. S. (1987). Operation Everest II: Preservation of cardiac function at extreme altitude. *Journal of Applied Physiology*, 63: 531-539.
- Rowell, L. B., Marx, H. J., Bruce, R. A., Conn, R. D., and Kusumi, F. (1966). Reductions in

- cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *Journal of Clinical Investigation.*, 45: 1801-1816.
- Sheriff, D. D., Zhou, X. P., Scher, A. M. and Rowell, L. B. (1993). Dependence of cardiac filling pressure on cardiac output during rest and dynamic exercise in dogs. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology.*, 265: H316-H322.
- Stenberg, J., Ekblom, B., and Messin, R. (1966). Hemodynamic response to work at simulated altitude, 4,000 m. *Journal of Applied Physiology.*, 21: 1589-1594.
- Stephenson, L. A. and Kolka, M. A. (1985). Menstrual cycle phase and time of day alter reference signal controlling arm blood flow and sweating. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology.*, 249: R186-R191.
- Wagner, P. D., Sutton, J. R., Reeves, J. T., Cymerman, A., Groves, B. M., and Malconian, M. K. (1987). Operation Everest II: pulmonary gas exchange during a simulated ascent of Mt. Everest. *Journal of Applied Physiology.*, 63: 2348-2359.
- Welch, H. G. (1987). Effects of hypoxia and hyperoxia on human performance. *Exercise and Sport Sciences Reviews.*, 15: 191-221.