

高度0～3,500m相当の常圧低酸素環境下における 登山をシミュレーションした上り坂歩行時の生理・心理応答

宮崎 喜美乃¹⁾, 山本 正嘉²⁾

¹⁾鹿屋体育大学大学院 (現 (株)ミウラ・ドルフィンズ)

²⁾鹿屋体育大学スポーツ生命科学系

I. 研究目的

日本では、登山人口が600万人以上いると推計され、特に中高年や若い女性の間で人気が高い。そして、彼らが登山を実施する大きな理由として、健康の維持増進のため、ということがある。

登山は、歩行運動の一種ではあるが、日常生活で健康のために行われるエクササイズウォーキング（平地での早歩き）と比べると、その様相は大きく異なる。すなわち、坂道を、荷物を背負って、長時間歩くという特徴があり、身体への負担度はより大きい。平地ウォーキングの運動強度は約4 Metsとされる¹⁾。これに対して、登山の場合、ハイキングは6 Mets、バックパッキングは7 Mets、雪山や岩山での登山は8 Mets程度とされ¹⁾、運動強度は1.5～2.0倍くらい高い。

したがって、登山を安全・快適・健康的に行うためには、その運動強度を坂道の傾斜、速度、担荷重量と関連づけて把握し、過大な負担がかからないように配慮しつつ歩くことが求められる。これに加えて登山では、山の高さに応じて相応の低酸素環境で運動を行うという特徴があるので、高度が人体に与える負担についても把握しておくことが求められる。

先行研究を見ると、傾斜、速度、担荷重量を様々なに変化させた場合に、運動強度や生理応答にどのような影響があるかについては、トレッドミルを用いたシミュレーション歩行を用いて、すでに多く研究がある^{5,10,19)}。しかし、これらの先行研究は、いずれも通常酸素環境で行われたものであり、低酸素の影響も加味した検討はほとんど行われていない。

そこで本研究では、常圧低酸素室を用いて、異なる

酸素分圧（高度0～3,500m相当）を設定し、その中でトレッドミルを用いて、様々な歩行速度で登山（上り）のシミュレーション歩行を行った。そして、その際の生理・心理応答について比較検討し、安全かつ健康的な登山を行うための示唆を得ることを目的とした。

II. 方法

A. 被検者

健康な男子大学生7名を対象とした（身長 167.2 ± 10.6 cm, 体重 57.8 ± 5.8 kg, 年齢 22 ± 1 歳）。各被検者は、2,000m以上の低酸素環境での滞在や運動を、少なくとも6ヶ月間以上行ったことのない者であった。すべての被検者には、本研究の目的、方法、およびそれに伴う危険性を説明し、本研究に参加する同意を得た。

B. 実験プロトコル

大型トレッドミル（Quasar, h/p/cosmos社製, Germany）を用いて、歩行速度を6段階に変化させるような上り坂歩行を行った。なお、傾斜は16%、担荷重量は1回目の測定時における各被検者の体重20%相当の重さ（9.4～12.6kg）に固定した。

トレッドミルは、常圧低酸素室（トレーニング環境シミュレーター, エスペック社製, Japan）の中に設置した。高度は0m（酸素濃度20.9%）、1,500m相当（同17.5%）、2,500m相当（同15.4%）、および3,500m相当（同13.6%）の4条件に設定した。気温は20℃、湿度は50%に統一した。各被検者は、これら4種類の運動を、それぞれ1週間以上の

間隔をあけ、同一の時間帯に行った。

C. 漸増負荷試験

低酸素室に入室し、30分間の安静を保った後に運動を開始した。トレッドミルの歩行速度は30m/minから開始し、5分ごとに10m/minずつ漸増させ、80m/minに到達するまで、6種類の速度で歩行を行った（計30分間）。1時間当たりの鉛直方向への移動速度（登高速度）は、284, 379, 474, 569, 664, 758m/hであった。

4種類の環境条件の試行順序は、高度に未経験の者が行うため、ランダムな順序とはせず、実際の登山で徐々に高度を上げていく様相を考慮し、高度0m相当から順に高い高度の試行を行うこととした。なお、実験に先立って、各被検者はトレッドミル歩行に慣れるために練習を行った。

D. 測定項目

安静時から運動の終了時まで、動脈血酸素飽和度 (SpO_2)、換気量 ($\dot{V}\text{E}$)、酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_2$)、心拍数 (HR) を連続的に測定した。 SpO_2 は、パルスオキシメーター (Pulsox-Me300, Teijin社製, Japan) を用いて測定した。 $\dot{V}\text{E}$ と $\dot{V}\text{O}_2$ は、自動呼気ガス分析機 (Vmax29c, Sensor Medics社製, USA) を用いて、Breath-By-Breath法により測定した。HRは、心拍モニター (X6-HR, Suunto社製, Finland) を用いて測定した。各負荷条件とも、5分間の運動の4～5分における1分間の平均値をデータとして採用した。なお、各運動強度での $\dot{V}\text{O}_2$ から、Metsを算出した。その際、安静時の $\dot{V}\text{O}_2$ は3.5ml/kg/minとして計算した。

血中乳酸濃度 (La) は、各負荷条件とも5分間の運動の4～5分の間に、指先から微量の血液を採血し、簡易血中乳酸測定器 (Lactate Pro, Arkray社製, Japan) を用いて測定した。

主観的運動強度 (RPE) は、Laとほぼ同じタイミングで、Borg²⁾の主観的運動強度を用いて尋ね、記録した。その際に、Borg et al.³⁾の報告に基づき、脚および心肺の2種類に分けてRPE値を尋ねた。

E. 統計処理

基本統計量は、平均値±標準偏差で示した。統計では二元配置分散分析（4高度×7歩行速度）を用い、その後の検定には、Tukeyの多重比較検定を実施した。なお、有意水準は全ての場合において5%未満とした。

Ⅲ. 結果

図1は、高度0mから3,500mまでの4条件での、安静時と運動時の SpO_2 を示したものである。同じ高度条件の中で見た場合、4条件とも、安静時と歩行時の SpO_2 値を比べると、後者の方がより低値を示した。歩行時の SpO_2 については、速度が増加するほど低下した。

また SpO_2 値は、高度の上昇に伴い明瞭な低下を示し、安静時および同一の運動強度で比較した場合、多くの条件間で有意差が見られた。特に高度3,500mと他の高度間では、ほぼ全ての条件間で有意差が認められた。

なお、図1の中に描いた破線は、6 Mets（ハイキング）と8 Mets（岩山や雪山の登山）に相当する運動強度である。体重の20%に相当するザック（9.4～12.6kg）を背負って歩くという本実験条件では、登高速度が337m/hのときに6 Mets、464m/hの時に8 Metsとなった。

図2は、同様に、各高度条件での、安静時と運動時におけるHR (A)、 $\dot{V}\text{O}_2$ (B)、 $\dot{V}\text{E}$ (C)、La (D) の応答を示したものである。同じ高度条件の中で見た場合、高度の違いによらず、HR、 $\dot{V}\text{O}_2$ 、 $\dot{V}\text{E}$ については歩行速度の増加に伴い直線的に増加し、Laは曲線的に増加した。また、異なる高度間で、同一の運動強度における値を比べると、 $\dot{V}\text{O}_2$ についてはどの高度でもほぼ同じ値を示したが、HR、 $\dot{V}\text{E}$ 、Laでは高度の上昇に伴い、高値を示す傾向が見られた。ただし、0～2,500mの3条件ではその差は明瞭ではなく、有意差も見られなかったのに対して、高度3,500mになると、他の高度条件よりも明瞭に高値を示すようになり、いくつかの歩行速度では有意差も見られた。

図3は、同様に、各高度条件でのRPEの応答を、

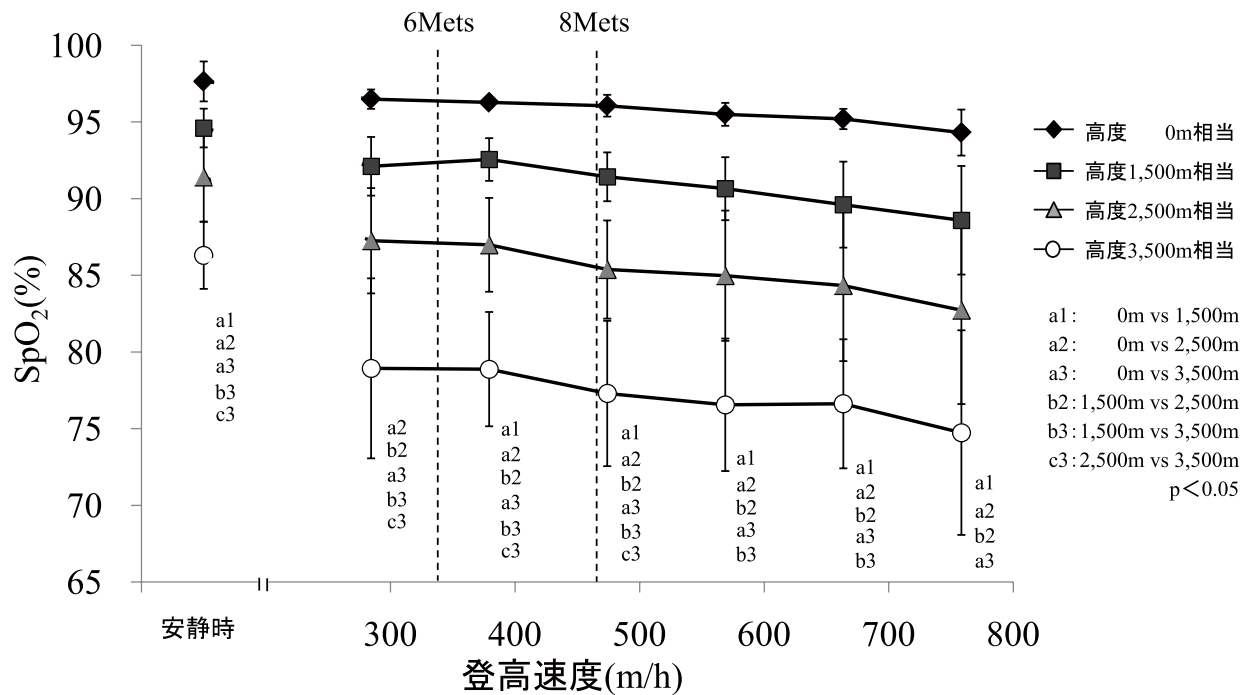
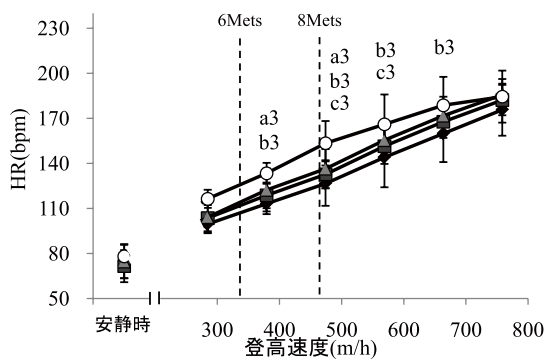
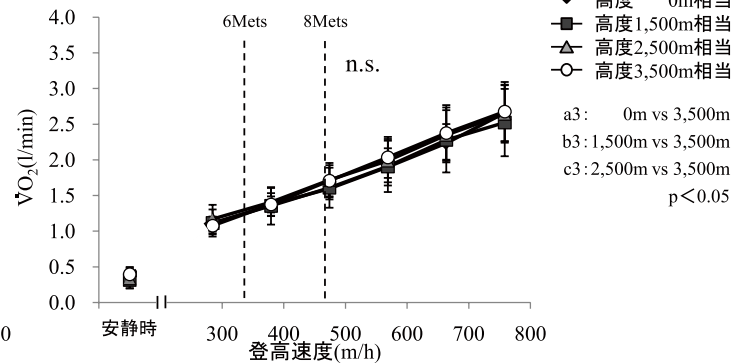


図1. 4種類の高度条件での多段階負荷歩行時の動脈血酸素飽和度 (n = 7)

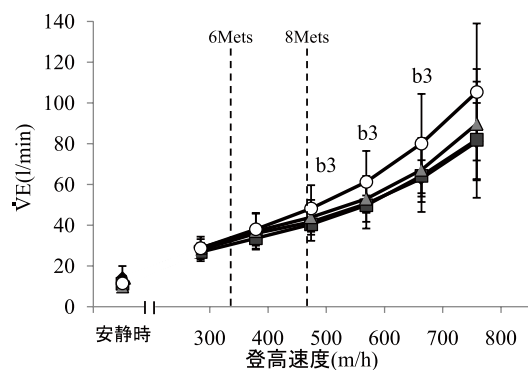
A. 心拍数



B. 酸素摂取量



C. 換気量



D. 血中乳酸濃度

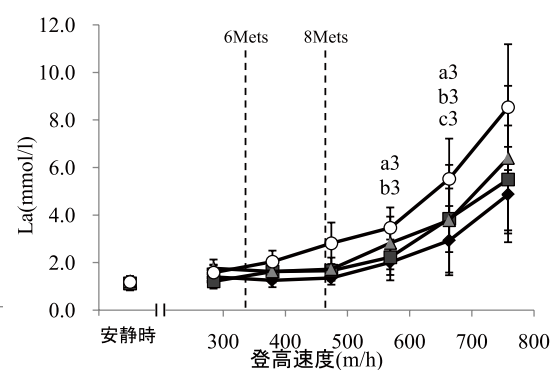
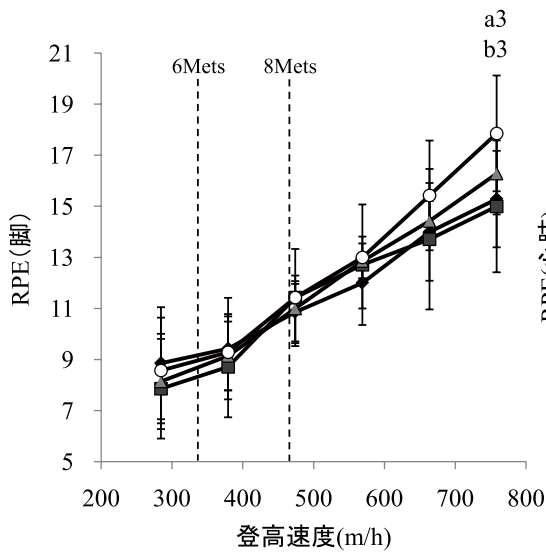


図2. 4種類の高度条件での多段階負荷歩行時の生理応答 (n = 7)

A. 脚のきつさ



B. 心肺のきつさ

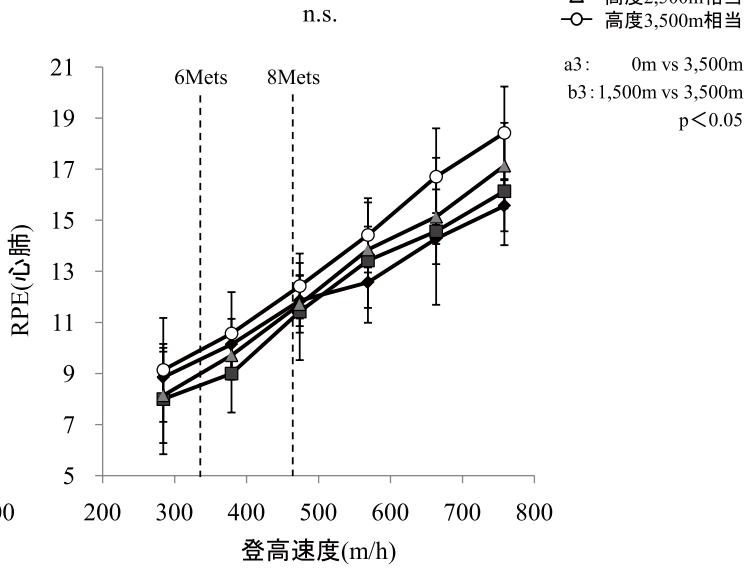
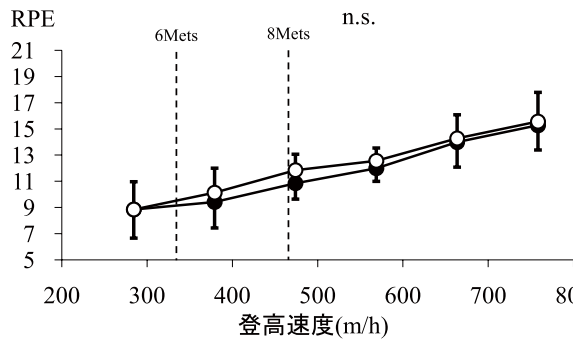
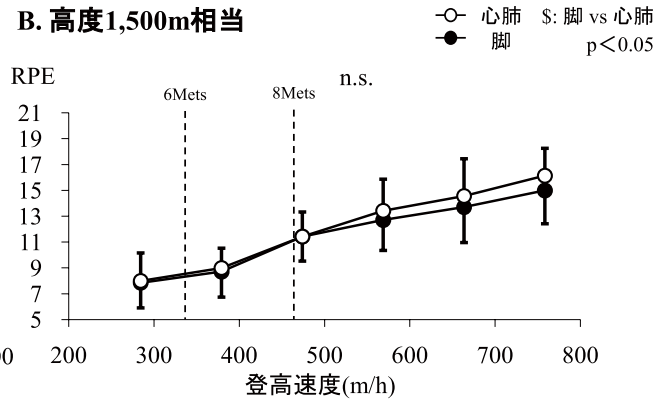


図3. 4種類の高度条件での多段階負荷歩行時の脚と心肺の主観的運動強度 (n = 7)

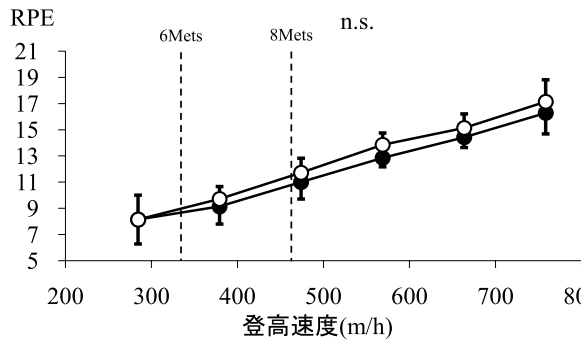
A. 高度0m相当



B. 高度1,500m相当



C. 高度2,500m相当



D. 高度3,500m相当

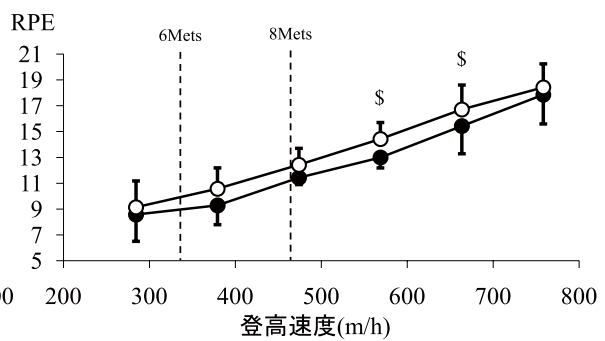


図4. 4種類の高度条件での脚と心肺との主観的運動強度の対応性 (n = 7)

脚と心肺とに分けて示したものである。脚、心肺のいずれにおいても、歩行速度の増加に伴いRPEは増加した。また高度間で比較すると、脚、心肺とも、 $\dot{V}E$, HR, Laの変化と同様、高度が上がるほどやや増加する傾向が見られた。ただし、その差は不明瞭であり、ほとんどの条件間で有意差は見られなかった。唯一、最も速い速度条件のところで、0 mと3,500m条件との間に、脚のみで有意差が認められた。

図4は、同様に、各高度条件での、脚と心肺のRPEを比較したものである。各高度とも、同じ運動強度であっても、心肺のRPEの方がやや高値を示す傾向が見られた。ただし、0 mから2,500m条件の間では有意差は見られず、3,500m条件での歩行速度4、5段階目（登高速度569m/hと664m/h）でのみ有意差が見られた。

IV. 考 察

A. 高度の上昇に伴う生理応答の変化

SpO_2 を見ると、安静時同士、あるいは同じ歩行速度同士で比べた場合、高度が上がるほど明瞭な低下が見られた（図1）。特に、実際の登山が行われる運動強度である6～8 Metsの区間を見ると、4種類の高度間の全てにおいて有意差が認められた。

このことは登山中、高度が上昇していくほど、体内は低酸素状態になることを意味する。高度の上昇に伴い SpO_2 が低下する理由は、吸気の酸素分圧の低下により肺毛細血管から血液へ十分に酸素を拡散できなくなり、ヘモグロビンとの酸素分子結合が少なくなるためと説明されており¹⁷⁾、同様の現象はClark et al⁴⁾、奥島ら¹²⁾も報告している。

SpO_2 を見ると、安静時の場合、0 mでは98%程度、1,500mでは95%程度、2,500mでは91%程度、3,500mでは86%程度であった。また運動時の場合、6～8 Metsの区間で見ると、0 mでは96%程度、1,500mでは91～93%程度、2,500mでは85～87%程度、3,500mでは77～79%程度であった。

医療界では、安静時の SpO_2 が90%を下回った場合、急性の場合には救急救命治療⁹⁾、慢性の場合には在宅酸素療法¹³⁾が行われる。本研究の結果を見る

と、2,500m以上の高度ではこのような状況に該当するといえる。したがって2,500m以上で登山をする際には、体内の酸素が著しく欠乏していることを自覚した行動や生活が必要になるといえる。

$\dot{V}O_2$ については、どの高度でも値はほぼ同じであり、有意差は見られなかった（図2-B）。この現象は、同じ強度の運動を行うための酸素需要量は、高度が異なっても同じであるためと説明され¹¹⁾、同様の報告は過去にもいくつかある^{4,12)}。一方、HR、 $\dot{V}E$, Laについては、高度が高くなるほど高値を示す傾向がみられたが（図2-A, C, D）。これは、高度の上昇に伴う SpO_2 の低下を、呼吸循環系や代謝系の働きを高進させて補償し、低地での運動と同等量の酸素を身体に取り込んでいると説明できる。

先行研究を見ると、HRと $\dot{V}E$ の高進については、運動による $\dot{V}O_2$ の低減を補うために、これらの値が増加することが報告されている¹⁵⁾。Laの増加については、低酸素環境下で持続的運動を行うと、その運動強度に見合った酸素の供給が遅延、あるいは不足するため、身体が著しい低酸素状態に追い込まれることによると報告されている¹⁵⁾。

ただし、0 m～2,500mまでの高度間で比べると、上記の各指標の値の差は明瞭ではなく、有意差は見られなかった。これに対して、3,500mの値には、他の高度と比べて明瞭な差を示し、一部には有意差も見られた（図2-A, C, D）。

これらの事から、同じ運動強度であっても高度が上昇するにつれて、身体にかかる生理的な負担度は大きくなるが、呼吸循環系や代謝系の指標（HR、 $\dot{V}E$, La）から見ると、2,500m以下ではその差は明瞭ではないといえる。一方、3,500mくらいの高度になると、これらの値は2,500m以下での値と比べて明瞭に大きくなるといえる。

Hultgren⁸⁾は、1,500～2,500mを準高所、2,500m以上を高所と定義している。これに本研究で用いた高度を当てはめると、1,500m条件は低地と準高所との境界付近、2,500m条件は準高所と高所との境界付近、3,500m条件は典型的な高所の領域ということになる。

本研究の結果を見ると、0～2,500mまでは各種

生理応答の値に有意差は見られないことから、「高所」の領域が始まる2,500m付近までは、生理応答には顕著な増大は起こらないといえる。しかし、典型的な高所である3,500m付近では、酸素の欠乏を補うために、呼吸循環系や代謝系の応答が大きく高進することを示すものと考えられる。

3,500mの高度とは、日本の場合でいうと、富士山の8～9合目に相当する。富士山には毎夏、数十万人の登山者が登るが、その多くは初心者である。初心者の場合、適切なペース配分ができず、かなり高い運動強度で登高するケースが多い¹⁴⁾。本研究結果は、このような初心者が富士登山をする際などに、特に慎重な行動が必要であることを示唆するものである。

B. 高度の上昇に伴う心理応答の変化

主観的な運動強度の指標であるRPEについて、6～8 Metsでの値を見ると、心肺、脚ともに、4つの高度間で有意差は見られなかった(図3)。このことは、高度が上昇するにつれて生理的な負担度は大きくなるにも関わらず(図1, 図2)、その変化を自覚症状によっては十分に把握できないことを示唆する。

登山者が山道を登る時、傾斜や荷物の重さに応じて、無意識のうちに同じきつさを保って歩いている。しかし、高度が上昇していった場合、特に3,500mくらいの高度になると、同じきつさで歩いた場合、HRや $\dot{V}E$ といった呼吸循環系への負担度は、それまでよりも大きくなってしまふといえる。

高所で、呼吸循環系に過度な負担をかける運動をすると、急性高山病(AMS)にかかりやすくなる¹⁶⁾。また、AMSのある状況で激しい運動を続けると、重症高山病である肺水腫や脳浮腫を引き起こす可能性もある^{6, 18)}。

このような意味で、本研究の結果は、3,500m前後の高度では主観強度を0～2,500mまでの登高時よりも落として歩くことが求められるといえる。本実験結果(図3)を元に計算すると、心肺のRPEを1～2ランク程度軽減して歩くと、2,500m以下の負担度と同等になる。

なお図4を見ると、心肺と脚との関係について、3,500m条件の4, 5段階目では、脚に比べて心肺の方が有意に高い値を示した(図4)。Horstman et al.⁷⁾は、高地(低酸素)では、努力感と筋肉の生理学的強度との関係と、努力感と心臓の生理学的強度との関係が、相違することを示唆している。そして、特にHRが170bpm以上では、肺換気量($\dot{V}E$)のような肺の負担度が、RPEを支配すると報告している。

本研究で有意差が見られた歩行速度におけるHRは、166bpmと179bpmであった。また呼吸循環系(HR, $\dot{V}E$)の応答が、特に3,500mになると大きくなっていることから(図2-A, C)、主観強度においても3,500mを超えるような高度になると、明瞭な変化が現れると考えられる(最も速い速度では、脚と心肺との有意差は見られなくなるが、この理由は、脚、心肺ともにRPEが上限に近い値(脚・心肺ともに18)に到達していたためと考えられる)。

1,500mと2,500mの高度条件では、有意差は見られなかった。しかし、どちらの高度においても、HRが170bpm以上となった歩行速度におけるRPEは、脚よりも心肺の方が高値を示しており、Horstman et al.⁷⁾の報告と同様の傾向を示していた。

以上のことから、登山においてRPEを用いる場合、特に高度が上昇するほど、脚と心肺とを区別して捉えることが必要であり、特に、心肺への負担度をできるだけ抑えたペースで登高することが望ましいと考えられる。

V. まとめ

常圧低酸素室を利用して、0～3,500mまでの4種類の相当高度を設定し、トレッドミルを用いて登山をシミュレーションした上り坂歩行を行わせた。そして、その際の生理・心理応答について、運動強度や高度との関係から検討した。

登山で通常経験する6～8 Metsの運動強度領域で比較した場合、 SpO_2 は高度上昇に伴い明瞭に低下した。HRについては、高度の上昇と共に増加傾向を示したが、0～2,500mまではその差は明瞭で

はなく、3,500mになると明瞭な差が見られた。一方、主観的な運動強度（心肺と脚のRPE）については、4つの高度間で有意差は見られなかった。

以上のことから、典型的な「高所」の領域といえる3,500m付近（日本の場合、富士山の8～9合目以上に相当）では、自覚症状を伴わずに、身体への生理的な負担度が増大すると考えられる。このような高山で登山をする際には、主観強度（特に心肺のきつさ）を意図的に落として登高するといった、慎重な行動が求められるといえる。

引用文献

- 1) American College of Sports Medicine：運動処方
の指針：運動負荷試験と運動プログラム（原
書第8版）。日本体力医学会体力科学編集委員
会監訳、南江堂、東京、pp. 157-213, 2011
- 2) Borg G.: Perceived exertion; a note on "history"
and method. Med. Sci. Sports 5: 90-93, 1973
- 3) Borg E. et al. : An index for breathlessness
and leg fatigue. Scand. J. Med. Sci. Sports 20:
644-640, 2010
- 4) Clark S. A. et al.: The effect of acute simulated
moderate altitude on power, performance and
pacing strategies in well-trained cyclists. Eur,
J. Appl. Physiol. 102: 45-55, 2007
- 5) 萩原正大ら：歩行路の傾斜、歩行速度、およ
び担荷重量との関連からみた登山時の生理的
負担度の体系的な評価：トレッドミルでのシ
ミュレーション歩行による検討。体力科学60：
327-341, 2011
- 6) 原田智紀ら：蝶ヶ岳から長堀尾根を下山中に標
高2350m付近で死亡した16歳男性について。登
山医学33：139-152, 2013
- 7) Horstman D. H. et al. : The nature of the
perception of effort at sea level and high
altitude. Med. Sci. Sports. 11: 150-154, 1979
- 8) Hultgren, H. N. : High Altitude Medicine.
Hultgren Pub., Stanford, California, pp. 212-320,
1997
- 9) 西川正憲：急性呼吸不全。日本内科学会雑誌
100：2000-2005, 2011
- 10) 前川亮子ら：各種生理応答および歩行様式から
見た登山とウォーキングの対応性に関する研
究。ウォーキング研究9：187-194, 2005
- 11) Lunday C. et al.: Exercise economy does not
change after acclimatization to moderate to
very high altitude, Scand. J. Med. Sci. Sports
17: 281-291, 2007
- 12) 奥島大ら：高度0 m, 1500m, 2500m, 3500m
相当の常圧低酸素環境下における運動時の生理
応答；高度、絶対的および相対的な運動強度、
および生理応答の相互関係。トレーニング科学
24：203-215, 2012
- 13) 佐久間哲也ら：在宅酸素療法の新しい適法基
準。日本内科学会雑誌84：813-818, 1995
- 14) 笹子悠歩ら：登山経験の少ない高齢者における
富士登山時の生理応答；運動時、安静時、睡眠
時を対象として。登山医学31：132-144, 2011
- 15) 寺尾保ら：低圧環境下における持久的運動負荷
時に気圧変動をさせた場合の血中乳酸濃度およ
び心拍応答に及ぼす影響。東海大学スポーツ医
科学雑誌9：28-33, 1997
- 16) Ward M. P. et al.: Acute mountain sickness
(High Altitude Medicine and Physiology: 3rd
Ed). Oxford University Press, pp. 215-231,
2000
- 17) Wilber R. L. 著、川原貴・鈴木康弘監訳：高地
トレーニングと競技パフォーマンス。講談社サ
イエンティフィック、東京、pp. 230-237, 2008
- 18) Wilkerson J. A. 著、赤須孝之監訳：改訂新版
登山の医学。東京新聞出版局、東京、pp. 114-
136, 1990
- 19) 山本正嘉：登山を模擬したトレッドミル歩行時
の無酸素性作業閾値；速度、傾斜、担荷重量と
の関連から。国際武道大学研究紀要9：9-16,
1993