

常圧低酸素環境における 登山熟練者の登坂歩行運動と呼吸スキル

井上 摩紀 星野 聡子 小森 康加

1. はじめに

かつて中高年者を中心としたレジャーであった登山は、今や老若男女問わず多くの世代に広がりを見せている。手軽な日帰り登山から山小屋やテントに宿泊しての縦走登山など、その内容も様々である。本来ならば経験を積み、技術や体力を向上させ、登山計画を立ててから望むべき高地登山についても、装備の改善や簡単に参加できる旅行会社の催行ツアー実施などのおかげで初心者や初級者までもが、富士山などの国内3000m級の頂への登山や、さらなる高みを目指して海外トレッキング・登山に参加している現状がある。夏期富士登山者は2005年には約20万人であったが、2008年にブームがおとずれ、2013年まで約30万人前後で推移していた。近年はやや登山者数は減少して2015年は約23.4万人であった（環境省関東地方環境事務所 2015）

しかし、高地では空気中の酸素濃度が地表と比べて低く、血中の酸素濃度が低下する。この体内の低酸素状態が登山者の活動レベルを下げ、時には高山病を引き起こす。

富士宮市によると、2012年度までの5年間に、富士山衛生センターで毎年300～500人の患者を受け入れ、うち7割が高山病だった（中日新聞夕刊2013年8月1日付）という。日本旅行医学会も、2012年と2013年に富士登山から5合目に下山してきた5歳から12歳の児童245人に聞き取り調査をしたところ、134人（55%）に高山病の症状が見つかった（日本経済新聞電子版2014年6月21日付）という。また、笹子・山本（2011）は、経験の少ない高齢者を対象とした調査において、富士山頂付近の歩行で標準ペースの約45%も速く、高地登山に適したペースで歩けなかったことが報告している。知識や技術のないまま登山に参加する初心者が危険な目に遭うケースがあると想定できる。

その一方で、経験を積み、技術を高めた熟練者は高山病の対策として、体内の低酸素状態を予防するいくつかの方法を用いている。一般的に言われている「水分を多く取る」、「ゆっくりと歩く」、「立ち止まって深呼吸をする」、などがそうである。本研究では、一般的に行われている予防法を超えて、熟練者の歩行中の登山技術についてさらに深く検証する。

本研究に先行して行った標高5000mの行程を含む長期トレッキングの参加者のSpO₂（動脈血酸素飽和度）値の変化調査と健康調査（井上 2015）では、登山熟練者の中には、標高が上がるにつれて朝夕の安静時SpO₂値が低下するものの行程中の健康状態に大きな問題はなく、日中の歩行について高い活動レベルを示す群があった。そのことから、低酸素環境の中でも運動時に効率よく身体を動かし、かつ、酸素を体内に効率よく取り込む身体の処し方を登山熟練者は身につけているのではないだろうかという仮説を立てた。

高地での運動はその高度の違いに対応して高山病のさまざまな症状を引き起こすことがある（Hultgren 1997）。登山熟練者は高度順化の必要性を強く認識しており、意図的に遅いペースでの歩行を行っている（山本 2001）。しかし、1日の歩行時間が10時間近くに渡るような行程の場合、熟練者はさらに、継続した運動によって引き起こされる疲労や体内の酸素濃度の低下に対応するような呼吸運動を含む独自の身の処し方を行っているのではないだろうか。

そこで、本研究では、登山熟練者の被験者に対し、酸素濃度と登坂傾斜を変化させ、登山を想定した登坂運動時の呼吸に関わるスキル（呼吸時使用部位、歩行運動リズムとの関連）について検証する実験を行う。実験では、被験者の呼吸運動を胸部と腹部に分けて測定することで呼吸運動を細かく分析する。これまで高所登山では腹式呼吸が有効である（山本 2001）と言われてきたが、本研究では、胸部を使った呼吸の有効性を検討し、高地登山において呼吸方法を含む真に効率の良い身の処し方はいかなるものかを科学的に究明する。

呼吸運動の測定について、星野（1999、2001）は身体の膨張変化を呼吸の相対的な変化としてとらえ、熟練者のピストル射撃時の呼吸運動測定に腹部にカーボンチューブ式呼吸ピックアップセンサを装着して腹囲の容量変化を測定している。本研究では、腹部のみならず、胸部を用いた呼吸運動記録を行うため、呼吸ピックアップセンサを胸部と腹部の両方に装着する。

呼吸と連動した歩行運動については、高地登山の技術書（中村 2007）に登

る速さとして「ゆっくり登る」とあり、「1歩ごとに1呼吸のリズムでゆっくり歩く」としている。1呼吸をゆっくりと大きく吐けば自然にたくさんの空気を吸うことが出来るからである。「1歩ごと」はかなりの標高での行動時であるが、中村は「ゆっくりと遅いはやや異なる」として「リズムカルに脈を上げずに持続して」歩くことが有効であるとしている。本研究でも、登山熟練者が行っていた歩行運動と呼吸運動とのリズム運動に着目し分析を進める。

2. 実験方法

目 的

長年に渡り高地登山を経験している者は、空気中の酸素濃度や登坂の傾斜など状況の違いに合わせ、長時間歩行を行うための熟達した身体の処し方を行っており、特に、低酸素環境での効率の良い歩行と呼吸の方法を経験から身につけているのではないかと仮定した。

そこで、本研究では、標高3000m程度の高地登山を想定した低酸素環境での歩行運動時における呼吸の仕方および呼吸運動と歩行運動との関連性に着目して登山熟練者の特徴を明らかにすることを目的とした。

方 法

【被験者】

登山熟練者 1名（72歳男性 登山経験50年以上である。62歳でエベレスト、70歳でキリマンジャロなど、その他多数の海外高地登山経験がある）

【課題および教示】

トレッドミル（竹井器械社製）上で10分間の歩行運動を以下の2条件で行った。歩行速度は被験者が自由に変えるセルフペースで行った。

①平地条件：常圧通常酸素濃度環境（温度20℃ 湿度40％）

②低酸素条件：常圧低酸素環境（O₂濃度15％ 温度20℃ 湿度40％：約30分間の低酸素環境への暴露を行ったのち歩行運動開始）

両条件とも、立位での安静時測定（5分間）後、「1日10時間行程の登山を行っている」と想定して歩いて下さい」「途中、速度は自由に変更してください。速めても遅くしてもかまいません」と教示した。2条件それぞれについて、傾斜を0度、5度、15度と順に変化させ、各10分間3回の歩行運動を行った。実

験順は平地条件→低酸素条件、それぞれ傾斜 0 度→5 度→15 度とした。

【測定項目と測定器械】

・SpO₂と HR および RPE

トレッドミル表示で歩行速度を、フクダ電子製オキシメータで動脈血酸素飽和度 (SpO₂) と心拍数 (HR) を測定した。また、各条件での実験実施後に主観的運動強度 (RPE) を質問した。

・呼吸運動測定

呼吸曲線 (胸部および腹部) は (株) デジテックス研究所製 Polymate AP1000 を用いて胸部と腹部にカーボンチューブ式呼吸ピックアップセンサを装着し、時定数 3 秒で胸郭および腹囲の容量変化をサンプリングタイム 100ms で捉え、呼吸運動とした。

・歩行運動測定

左右の歩行運動をモニタするために、(株) DKH 社製 4ch FS アンプ PH-450 を用いて左右足底踵骨下部に感圧センサ (DKH 社製 road/switch sensor S100) を貼付し、サンプリングタイム 5ms で記録した。これらを、歩行運動に支障のないように装着した。測定事象は Polymate AP1000 に外部入力し、分析した。

【データの処理】

各条件・傾斜毎に一定の歩行速度で呼吸運動が安定した 1 分間を抽出し、歩行速度の変化を記録した。SpO₂ と HR は安定時の測定値を求めた。RPE は運動終了直後の数値を示す。速呼吸運動については胸部・腹部の平均呼気時間と平均吸気時間を求め、特徴的な呼吸曲線 2 サイクルを抜粋した。歩行運動については 1 呼吸あたりの平均歩数を算出し、先の呼吸曲線と歩行リズムを合わせて特徴を分析した。

結 果

【歩行速度】

各傾斜における任意での速度変化を Fig. 1 に示す。

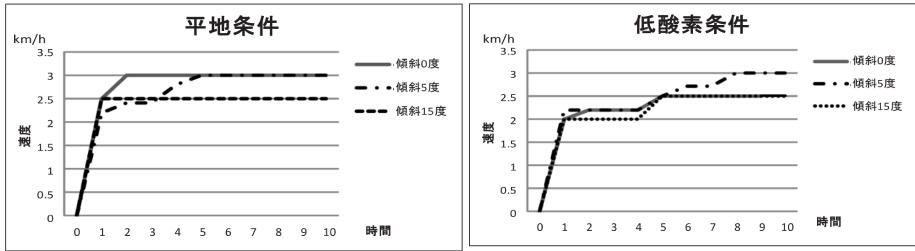


Fig. 1 各条件での速度変化

安定した速度は、平地条件傾斜0度では3 km/h、5度では3 km/h、15度では2.5km/hを、低酸素条件傾斜0度では2.5km/h、5度では3 km/h、15度では2.5km/hとして各1分間を抽出した。

【SpO₂とHRおよびRPE】

安定した速度のうち抽出した1分間中のSpO₂とHRおよびRPEの値をTable 1に示す。

Table 1 安定した速度でのHRとSpO₂

	平地条件			低酸素条件		
	HR	SpO ₂	RPE	HR	SpO ₂	RPE
安静時	68	98		76	92	
傾斜0度	82	98	8	88-85	90-89	9
傾斜5度	85-88	98	8	87-90	89-87	11
傾斜15度	93-103	98	10	110-119	85-86	12

【呼吸運動】

抽出した1分間の胸部・腹部の平均吸気時間（以下、Ti）と平均呼気時間（以下、Te）をFig.2に、全条件全傾斜（安静時を含む）のTeとTiの比率（Te/Ti）をFig.3に示す。また、1分間の呼吸曲線をFig.4に示す。

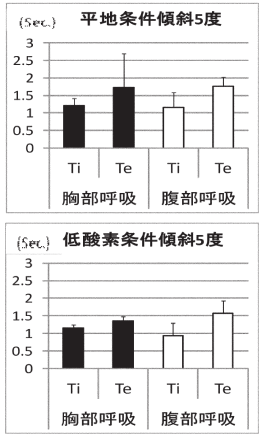


Fig. 2 1呼吸あたりの平均吸気時間 (Ti) と平均呼気時間 (Te)

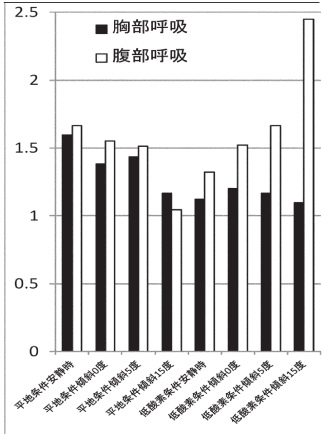


Fig. 3 Ti と Te の比率 (Te/Ti)

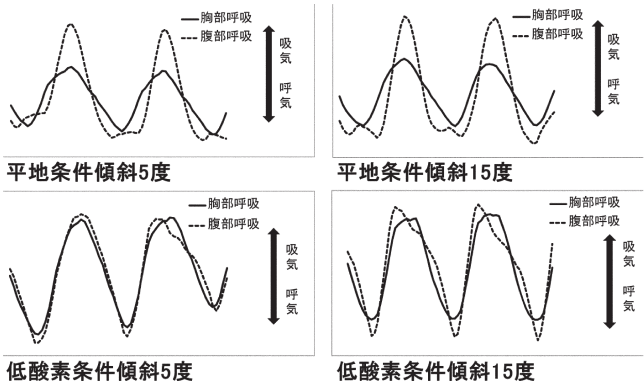


Fig. 4 呼吸曲線の条件間比較 (2 サイクルを抜粋)

【歩行運動】

抽出した 1 分間について、1 呼吸あたりの平均歩数を算出し、特徴の分析を行った結果を Table 2 に示す。また、Fig. 4 において特徴的であり、安定したリズムを示した低酸素条件15度について 1 呼吸周期あたりの呼吸曲線と歩行リズムの関連を Fig. 5 に示す。

Table 2 1呼吸あたりの平均歩数と歩数の特徴

	1呼吸あたりの平均歩数		歩数の特徴
	胸部呼吸	腹部呼吸	
平地条件傾斜0度	4. 85歩	4. 85歩	4歩または6歩
平地条件傾斜5度	4. 45歩	4. 5歩	4歩または6歩
平地条件傾斜15度	3. 55歩	3. 45歩	リズム不一致
低酸素条件傾斜0度	4. 79歩	4. 74歩	4歩・5歩・6歩が混在
低酸素条件傾斜5度	4. 26歩	4. 26歩	ほぼ4歩、一部5歩・6歩
低酸素条件傾斜15度	4. 0歩	4. 0歩	安定して4歩

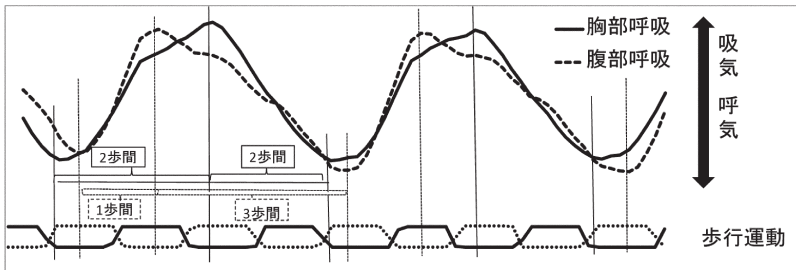


Fig. 5 低酸素条件傾斜 15 度の呼吸曲線と歩行リズムの関連

考 察

【歩行速度と HR・RPE】

歩行速度は平地条件の15度と低酸素条件の0度と15度で2.5km/hであり、その他は3.0km/hとなるまで速度を上げた。傾斜が初めてついた平地条件5度の歩行時や、低酸素条件での1つめの実験となった0度で歩行時など、初めて状況が変化する条件下では速度上昇が緩やかであった。その特徴が最も顕著に示されたのは低酸素条件5度であり、3.0km/hまで時間をかけて速度を挙げていた。このことから、登山熟練者は環境の変化と自身の身体の状態を合わせるよう探りながら速度を変化させている様子がうかがえる。

HRとRPEについては、平地条件で最も傾斜が大きい15度でも1分間あたりの心拍数93—103でありRPEは10（強度の感じ方「やや楽である」と「楽である」との中間）であった。また、より身体への負担が大きい低酸素条件15度では110—119であり、被験者が自覚する運動強度を測るRPEは12（強度の感じ方「やや楽である」と「ややきつい」の中間）あった。

伊藤（1990）は心拍数と運動強度のとらえ方の関連について、60歳代では1分間あたりの心拍数が100の運動強度の感じ方を「非常に楽である」とし「楽しく気持ちがよいがものたりない」という感覚を持つとしている。心拍数が

120では「やや楽である」と感じ「いつまでも続く、充実感、汗が出る」という感覚を持つとしている。HR と RPE の結果からは、70歳代である本実験の被験者はこれよりも強度を強く感じていると思われるが、上手く速度をコントロールして感覚的には運動に対する充実感を持ちながら長時間持続可能な歩行運動を行っているといえる。

【低酸素条件での SpO_2 の比較】

安静時の92から運動直後の SpO_2 は歩行時の傾斜が大きくなるにつれて少しずつ低下し、傾斜15度では85—86であった。歩行速度をコントロール出来る熟練者であっても運動による体内の酸素消費のために身体は低酸素状態となり、運動強度が上がれば SpO_2 は低下することが示された。

【呼吸時間と吸気時間】

Fig. 2 の平地条件では、胸部・腹部とも T_e がやや長いものの、その差は少ない。Fig. 3 に示した T_e/T_i の比率は胸部と腹部でほぼ一致しており、胸部と腹部が同じようなりズムで運動していることがわかる。特に傾斜15度の腹部においては、比率は1に近くなり、吸う息と吐く息はほぼ同じ時間をかけて行っていることが示された。合わせて Fig. 4 の呼吸波形を見ると、吸気には一致したピークが現れ、胸部・腹部が同時に動く吸気運動をしていることがわかった。しかし、腹部呼吸のボトムは傾斜角度に関わらず、2つのピークが認められた。これは、被験者が「腹部を2段階に使う（長時間かけて）しっかりと吐く」といういわゆる「腹式呼吸」を行っていることを示している。

一方、低酸素条件では、Fig. 2 に示した様に、 T_i が短く T_e が長い特徴が認められた。その特徴は特に腹部で顕著であった。Fig. 3 にある T_e と T_i の比率は傾斜角度が大きくなるにつれ、値が大きくなった。つまり、短い時間で吸い、長い時間をかけて吐く特徴が認められた。また、Fig. 4 から、胸部と腹部が同時に動くことは減少し、傾斜5度の一部や傾斜15度のほぼ全てにおける呼吸では、腹部吸気のピークが先行し、やや遅れて胸部吸気のピークが生じている。かつ、胸部吸気最高値は2段階になる特徴も認められた。これは腹式呼吸と連動して自然に肺に流入する空気だけでなく、その次に肺自体を大きく活用してさらに多くの空気を肺に取り込む空気を取り込む運動であり、低酸素条件でのみ現れた運動であった。

被験者は、通常の酸素濃度下でそれほど登坂傾斜が大きい状況での歩行

時であっても「ゆっくり・しっかりと腹部を使って吐く」といういわゆる「腹式呼吸」を行っており、腹部を使いしっかりと吐く方法を身につけていることが示された。空気中の酸素濃度が低い高地登山歩行技術について、腹部を使ってゆっくりと吐く「腹式呼吸」の重要性はこれまでも指摘されていた(山本 2001)。その腹式呼吸に加え、今回の被験者である登山熟練者は、低酸素環境下での登坂傾斜がきつい歩行時に「腹式呼吸で一気に吸った後、もう一段、肺を使って吸う胸部呼吸」を行うことが明らかとなった。

ここでイメージする胸部を使った呼吸方法に類するものとして、歌唱の技術指導時の呼吸方法がある。意図的に肋間筋を働かせ、肋骨を持ち上げながら胸郭の容積を拡大することである。さらに、無意識の呼吸ではほとんど非能動的である「腹側呼吸」で下部胸骨弓に両手を横からあてがいがいながら「いっぱい」になるまで腹の深くに息を吸う(齊藤 2002)というものである。また、ヨガなどを行う場合も呼吸方法は重要な技術であり、吸う・吐く運動を意識化し、胸部・腹部といった身体の部位を意図的に使用することがある。歌唱やヨガ同様、高地登山においても、胸部・腹部両方の呼吸が効率的に運動することが体内の低酸素状態を改善または、低酸素状態の中で運動し続けるために有効であると考えられる。腹部を使った呼気と胸部を使った吸気を組み合わせた意図的な呼吸方法が高山病予防のヒントとなる可能性が見出された。

【呼吸運動と歩行リズムの関連性】

呼吸運動パターンと歩行リズムが顕著な関連性が認められたのは、低酸素条件傾斜15度のみであった。高地での活動経験が豊富な被験者にとって、この条件でのみ、前述の RPE が12(強度の感じ方「やや楽である」と「ややきつい」の間)と自覚しており、その他の条件では「楽」に行える運動であったため、運動パターンやリズムを整える必要性がなかったと推測する。

低酸素条件15度では1呼吸で4歩というリズムが安定的に持続されている。さらに、胸部呼吸と腹部呼吸を分けて、歩行リズムとの関連を見ると、胸部では「2歩間で吐き、2歩間で吸う」、腹部では「3歩間で吐き、1歩間で吸う」という複雑な呼吸運動パターンを保っていることが明らかとなった。

胸部と腹部が独自の運動パターンを保ちながら安定的な歩行リズムに合わせた呼吸を行っており、そのような歩行の仕方と呼吸方法が高地登山時に効果的に作用する可能性が考えられる。前述した胸部を使った効率の良い吸気方法と

呼吸と歩行との協調リズムの獲得が、高所登山での換気効率や疲労軽減に寄与しうること、また、熟練者の胸部使用の呼吸方法が過酷な環境から発現した無意識の運動とするならば、この胸部の呼吸運動のメカニズムを解明することは新たな登山技術の提案につながると考える。

3. おわりに

本研究の目的は、高所登山では腹式呼吸が有効とされている（山本 2001）これまでの通説に一石を投じ、胸部を使った呼吸の有効性を検討し、高地登山において呼吸方法を含む真に効率の良い身の処し方はいかなるものかを科学的に究明することであった。空気中の酸素濃度が15%（標高3000m相当）や12%（標高5000m相当）、それよりも低い酸素濃度（高い標高）で山を登るという運動時には、すでに有効とされている意識的な腹式呼吸の実践にとどまらない、長年の経験や過酷な環境下で追い込まれた人間が無意識のうちに発現させた効率の良い呼吸方法が存在すると考える。

本研究で、呼吸運動を胸部と腹部を分離して計測したところ、空気中の酸素濃度が平地と同じか、酸素濃度15%（高度3000m相当）においても傾斜が少ない（0度あるいは5度）条件時には確かに被験者は腹式呼吸のみを特徴的に行っていたのだが、15%の低酸素環境下で強い傾斜の歩行運動（15度）では吸気のピークは腹部が先行し、少しずつ胸部でのピークが生じるという2段階吸気を行っているという結果を得た。さらに歩行運動のリズムに合わせ、時間をかけて胸部を拡張させて吸うという結果が得られた。

今後はさらに検証するため、複数の登山熟練者を対象に、呼吸に関わるスキル（呼吸時使用部位、歩行運動リズムとの関連）についての実験を行い、呼吸の仕方を含む熟練者が持つ低酸素状態の改善に役立つ効率のよい身の処し方の特徴をより深く明らかにしていきたい。

また、腹部を使った呼気と胸部を使った吸気を組み合わせた意図的な呼吸方法を確立できればあらたな高山病予防の方策ともなる。今後は、低酸素環境での登坂運動中に「胸郭を開いて吸うことを意識したゆっくりとした胸式呼吸」と歩行リズムを関連させ、胸郭を効果的に使える呼吸方法を実現するために、低酸素環境でも運動中の SpO_2 値が下がらず、身体的な疲労やストレスが軽減され、登山未経験者や初心者の高山病予防につながる効果的なトレーニングの

方法の開発を目指したい。

付記

本研究の一部は、日本体育学会64回大会で発表したものである。

本研究に協力いただいた被験者の方に心より感謝いたします。

文献

星野聡子（1999）高ストレス試合条件下におけるピストル射撃熟練者の精神生理学的過程，研究年報（奈良女子大学文学部），43，137-150.

星野聡子（2001）連続射撃課題における熟練者の射撃動作と生理指標の関係，研究年報（奈良女子大学文学部），45，109-127.

Hultgren N.H.（1997）High Altitude Medicine.（山本 2001から引用）

井上摩紀（2015）バルトロ氷河トレッキング時の SpO_2 値の測定と健康調査の記録，大谷大学研究 年報第66集，131-178.

伊藤朗（1990）図説・運動生理学入門，医歯薬出版.

環境省関東地方環境事務所（2015）平成27年夏期の富士山登山者数について（お知らせ）. http://kanto.env.go.jp/to_2015/29.html（2015年1月3日アクセス）

中村進（2007）登山技術全書12海外登山，山と溪谷社.

齊藤祐（2002）力強い，脱力した歌唱のための技術的指導書，鹿児島大学教育学部研究紀要，教育科学編，53：31-39.

笹子悠歩・山本正嘉（2011）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，131，132-144.

山本正嘉（2001）登山の運動生理学百科，東京新聞出版局.