

〈研究資料〉

低酸素環境下における動脈血酸素飽和度 (SaO₂) とパルスオキシメータで計測された経皮的酸素飽和度 (SpO₂) との対応性に関する研究

A Study of Correspondence between Saturation of Arterial Blood Oxygen and Peripheral Oxygen Saturation Measured by Pulse Oximeter in Hypoxic Environment

夏井 裕明¹, 井筒 紫乃¹
HIROAKI NATSUI¹, SHINO IZUTSU¹

Abstract

The aim of this study was to evaluate correspondence between saturation of arterial blood oxygen measured invasively (SaO₂) and saturation of arterial blood oxygen measured non-invasively by pulse oximeter (SpO₂) under hypoxic and normobaric environments. Seven young adult females were exposed to three graded hypoxic conditions with an interval of normobaric condition. The hypoxic condition was made by the equipment of portable altitude simulator (AltoLab ELITE Kit, AltoLab USA) which provides hypoxic environments simulating high altitude conditions of 1500 m, 3000 m, and 4500 m. Partial pressure of arterial blood oxygen (PaO₂), carbon-dioxide (PaCO₂), and SaO₂ were measured in a spot during normobaric and hypoxic conditions, while SpO₂ was continuously monitored by a pulse oximeter through experiments. From the normobaric environment to the severe hypoxic condition equivalent to 4500 m altitude, PaO₂ decreased significantly from 91.5±3.5 mmHg to 43.0±6.1 mmHg despite stable PaCO₂ from 39.4±3.8 mmHg to 41.5±4.9 mmHg, suggesting that the device of hypoxic simulator was able to produce a relevant hypoxic condition in arterial blood. Continuously collected data of SpO₂ measured by pulse oximeter were significantly decreased 89.0±2.9% (1500 m), 75.3±5.4% (3000 m), and 73.7±4.7% (4500 m). After 6 minutes of each hypoxic training, SpO₂ were recovered during 4 minutes of rest (0 m). In addition, SpO₂ at the altitude of 4500 m was almost identical to 75.3±5.6% measured in SaO₂. These results suggest that SpO₂ reflects accurately SaO₂ even under severe hypoxic condition and, therefore, portable pulse oximeter is useful to medical evaluation of arterial oxygenation in hypoxic environment.

Key words: Pulse Oximeter, PaO₂, SaO₂, SpO₂, High altitude

¹日本女子体育大学
Japan Women's College of Physical Education
8-19-1 Kita-karasuyama, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8565, JAPAN

緒言

血液は肺循環において大気から酸素を取り込み、体循環において組織に酸素を供給する役目を担っている。血液は赤血球、白血球、血小板の細胞成分と、電解質、蛋白質、糖質、脂質などを溶解している血漿成分とで構成されている。酸素運搬の96%は赤血球に含まれるヘモグロビンによって担われ、残りの4%は血漿に溶解している酸素による。動脈血中の酸素分圧(PaO_2)と、ヘモグロビンの酸素飽和度(SaO_2)は直線関係にはなく、軽いS字カーブを描くことが知られており、酸素解離曲線と呼ばれる。なぜ直線関係ではなく軽いS字カーブを描くのかについては、ヘモグロビンの4つのグロビン蛋白間の結合状態が、酸素分圧によって変化するためと考えられている。肺胞の酸素分圧は約100 mmHgでその時の酸素飽和度は約98%、組織での酸素分圧は約40 mmHgでその時の酸素飽和度は約75%である。この差分の23%がヘモグロビンによる組織への酸素供給量に相当する(小坂 2009)。

パルスオキシメータとは経皮的酸素飽和度モニターとも呼ばれ、耳垂もしくは指尖にプローブを装着し、665 nmの赤色光と880 nmの赤外光を照射し、その反射光の強さから経皮的にヘモグロビンの酸素飽和度(SpO_2)を計算する装置である。その装置の原理は青柳ら(1974)によって見い出されたが、装置の発展はアメリカにおいて進み、現在では医療現場のみならず救急隊から登山家まで幅広く活用される必須の医療機器となっている。経皮的に無侵襲で SpO_2 を計測することができれば、酸素解離曲線から動脈血酸素分圧を推定することができ、肺における酸素の取り込み、すなわち呼吸状態の評価が可能となる。

高所に移動すると標高に応じて気圧が低下する。富士山山頂(3776 m)では平地の約3分の2に、エベレスト山頂(8848 m)では約3分の

1に低下する。このことは肺における酸素を取り込む力が減少することを意味し、低酸素血症をひきおこし、急性高山病・高所肺水腫・高所脳浮腫の原因となる。この病態に対する根本的な治療法は下山することであるが、予防法としては肺における酸素の取り込みを増加させる呼吸法である「口すぼめ呼吸法」を習得することである。口すぼめ呼吸法とは、ろうそくを吹き消す要領で呼気を出す呼吸法である。口をすぼめて呼気を出すことにより、終末呼気肺胞気圧を意図的に増大させ、終末呼気における肺胞の虚脱を軽減させることにより換気不均等分布を改善し、ひいては酸素の取り込みを増加させる効果がある。慢性閉塞性換気障害の患者が自然と身につけている呼吸法である。ところが呼吸中枢を刺激して換気量を増大させる要因は、低酸素血症ではなく主に高二酸化炭素血症とそれに付随するアシドーシスである(有田 2009)。このことは、動脈血の二酸化炭素分圧が正常であれば、低酸素血症であっても換気量を増大させる反応はおきにくいことを示している。そのため、動脈血酸素分圧が低下していることを数値で示せられれば最良であるが、痛みを伴う動脈穿刺や特殊な機械を必要とし、不便な高所においては現実的ではない。一方パルスオキシメータを用いて非侵襲的に、かつ連続的にモニターすることにより、動脈血酸素飽和度の低下すなわち動脈血酸素分圧の低下を数値で示すことができ、また「口すぼめ呼吸法」を意図的に行うことにより肺における酸素の取り込みが増大することを数値で実感できる。機種にもよるが、軽量かつコンパクトで高所へ携帯するのにも便利である。このため公募登山や準高所へのトレッキング・ツアーにおいて、健康管理・安全管理に必須のアイテムとなっている。しかし元々医療機器として開発された経緯から平地における使用を前提としており、高所における測定値の精度は十分検討されていない。

かつては海外高所登山といえは登山のエキスパートらによる大規模な遠征隊が主であった

が、高所における生理学的な知見の蓄積、高所馴応のノウハウの獲得や移動手段の発達などの要因が加わり、近年ではコマースベースでの公募登山隊が主となってきている。また、高所専門の旅行会社による一般登山愛好家を対象とした準高所へのトレッキング・ツアーも盛んになってきている一方で、高所における死亡事故も起きている(原田 2008)。この高所登山や高所トレッキングツアーに参加する際には、予め日本で低酸素トレーニングを行うことが有用であるとされている(山本 2004)。初期の平地における低酸素トレーニング方法は、低圧・低酸素室におけるシミュレーションによって行われていたが、建設費と維持費が高額であることなどから、世界的に見てもごく一部にしか設置できなかった。1990年代後半より、フィルターを使って酸素を取り除くことにより常圧で低酸素環境を作り出せるようになり、日本の研究機関のみならず高所ツアーを主催する旅行会社にも普及していった(山地 2004)。しかし気密性の高い空間を必要とし、いつでもどこでも低酸素トレーニングを積むことはできなかった。2000年代前半頃より、自呼吸をリザーバに貯め再呼吸することにより低酸素環境を作り出す装置が考案され始めた(柴田 2006)。この装置は簡便で、いつでもどこでも低酸素トレーニングが行え、かつマスクを外すことにより直ちに平地環境に戻ることが可能となる装置である。しかし健康及び安全管理上、連続した動脈血酸素分圧のモニタリングが必要であるが、動脈血採血や高価な測定機器が必要となるため、簡便にかつ経皮的に酸素飽和度をモニタリングできるパルスオキシメータは欠かせない。

このように高所の低酸素環境においてパルスオキシメータは健康チェックに欠かせない医療機器ではあるが、その測定精度はSpO₂が70~100%の範囲で±2% (PULSOX -300i取扱説明書)とされており、70%未満における測定精度の保証はない。そこで、低酸素環境下においてパルスオキシメータによるSpO₂と、動脈

血採血によるSaO₂を比較検討することにより、低酸素環境下におけるパルスオキシメータの精度を検証することを研究目的とした。

研究方法

対象は日本女子体育大学生7名(年齢19~21歳)とした。被検者の身体特性は、身長156.96±4.13 cm、体重47.33±5.30 kg、体脂肪率17.18±4.03%であった。大学による健康診断で異常を指摘されていないことを確認した上で研究への参加同意を得た。なお、本研究は日本女子体育大学ファカルティ・ディベロップメント委員会による人を対象とする実験・調査等に関する倫理審査の承認(承認番号2016-13)を得て実施した。

低酸素環境は、携帯型低酸素トレーニング器(AltoLab ELITE Kit, AltoLab社製)(Fig. 1)を用いた。この携帯型低酸素トレーニング器の原理は、自己の呼吸を貯めておき、大気と混合させたうえで再呼吸することにより常圧低酸素環境を作り出している。大気の圧力は760 mmHg、窒素分圧:600 mmHg、酸素分圧:160 mmHg、二酸化炭素分圧:0.3 mmHgであり、呼吸の圧力は大気圧とほぼ同等、窒素分圧:



Fig. 1 AltoLab: Portable Altitude Simulator.

570 mmHg, 酸素分圧: 110 mmHg, 二酸化炭素分圧: 30 mmHg, 水蒸気圧: 50 mmHg である。この呼気をそのまま再呼吸すると動脈血中の二酸化炭素分圧が上昇してしまうため、呼気中の二酸化炭素を低酸素 Silo 中に含まれる薬剤 (ソーダライム) に吸着させて取り除いた上で呼気を AltoMixer に貯蔵し、さらに大気と混合することにより低酸素かつ常二酸化炭素の気体を吸入するものである。この呼気を貯めておく AltoMixer の数を増減することにより大気との混合比率を変化させることができ、AltoMixer 1 個が標高約 1500 m に相当する。

実験プロトコルを Fig. 2 に示す。6 分間の常圧低酸素吸入と 4 分間の常圧常酸素吸入 (rest) を 1 セットとし、1 セットごとに AltoMixer を 1 個から 3 個 (標高約 1500 m~4500 m 相当) に増加させた。SpO₂ は、酸素飽和度モニター (PULSOX-300i, コニカミノルタ) を用いた。プローブは最も一般的に使用されているフィンガークリッププローブ (SR-5C, コニカミノルタ) を右または左示指指尖に装着した。一連の低酸素環境前・中・後において連続的に SpO₂ をモニターし、データ収集と実験中の安全管理を図った。SpO₂ のデータは、定常状態に達したと考えられる低酸素開始前 (Pre), 1500 m 5 分後, 休息 3 分後, 3000 m 5 分後, 休息 3 分後, 4500 m 5 分後, 低酸素終了 3 分後 (Post) の 7 回記録した。動脈血採血は低酸素開始前 (Pre) と低酸素 3 セット目 (4500 m 相当) 5 分後の 2 回行った。PaO₂, 動脈血二酸化炭素分圧 (PaCO₂) と SaO₂ の測定は、血液ガス分析装置 (i-STAT, Abbot) とカートリッジ G3+ を用い

て行った。プローブを装着していない側の橈骨動脈からテルモ社製プレザパック II に約 0.5 ml 採血し、直ちに G3+ カートリッジに動脈血を封入, i-STAT にカートリッジを挿入して測定を行った。

得られたデータは平均±標準誤差で表記し、PaO₂, PaCO₂, SaO₂ は、Pre の値と標高 4500 m 相当の値を比較するため、それぞれの指標で対応のある t 検定を行った。SpO₂ に関する統計学的検討方法は、記録した 7 回のデータのうち低酸素開始前 (Pre), 1500 m 5 分後, 3000 m 5 分後, 4500 m 5 分後の 4 つのデータを用いて、一元配置の分散分析を行い、有意であった場合さらにどの標高から有意となったかを Pre と各標高との間で t 検定を行った。SaO₂ と SpO₂ は、標高 4500 m 相当の値同士を対応のある t 検定を用いて比較した。いずれも有意水準は 0.05 未満を有意差ありとした。

結果

携帯型低酸素トレーニング器 (AltoLab ELITE Kit) により作製した 4500 m 相当の常圧低酸素の吸入により、PaO₂ は 91.5 ± 3.5 mmHg から 43.0 ± 6.1 mmHg に低下していた。一方、PaCO₂ は 39.4 ± 3.8 mmHg から 41.5 ± 4.9 mmHg とほとんど変化しなかった (Fig. 3)。パルスオキシメータによる SpO₂ の測定結果では、1500 m 相当の標高では 89.0 ± 2.9%, 3000 m 相当では 75.3 ± 5.4%, 4500 m 相当では 73.7 ± 4.7% であった。これらの一連の変化に対して一元配置の分散分析を行ったところ、標高が高くなると有意に SpO₂ が低下することがわかった。さらに Pre と各標高における SpO₂ を比較したところ、標高 1500 m 相当から有意に低下していた。また、6 分間の低酸素トレーニング後の 4 分間の休息において、速やかに SpO₂ は回復した。一方、動脈血採血による SaO₂ の測定結果とパルスオキシメータによる SpO₂ の測定結果を比較したとこ

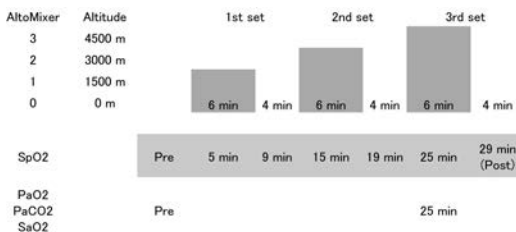


Fig. 2 Experimental protocol

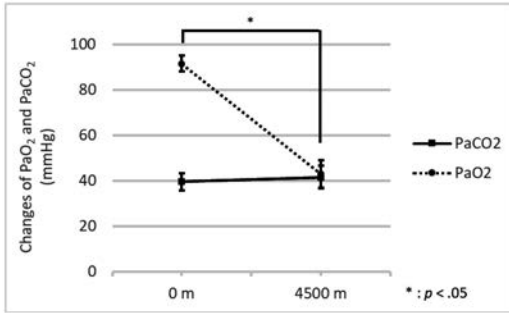


Fig. 3 Change of Arterial Oxygen and Carbon-Dioxide Pressure between Normoxia and Hypoxia.

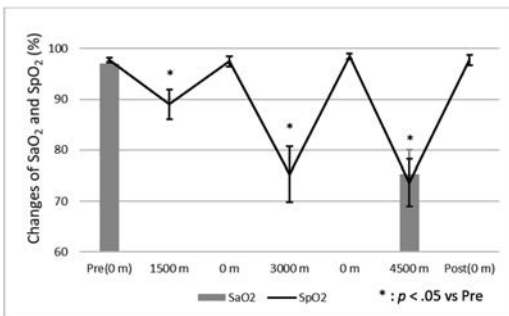


Fig. 4 Changes of Arterial and Peripheral Oxygen Saturation through Experiment.

ろ、4500 m 相当の常圧低酸素吸入の条件下では、SaO₂が75.3±5.6%であり、若干パルスオキシメータの方が低値を示した (Fig. 4)。この測定結果に対して対応のある t 検定を行ったところ $p=0.77$ であった。

考察

今回の研究では、約 4500 m 相当の低酸素環境を携帯型低酸素トレーニング器で作製し、パルスオキシメータによる SpO₂の連続的モニタリング値と、動脈血採血による低酸素環境暴露前後の SaO₂測定値を比較検討したところ、SpO₂値の方が若干低値を示す傾向がみられたものの両者の測定結果はほぼ一致した。この結果から、高所においてもパルスオキシメータは十分に有用な医療機器であることが示唆された。また PaCO₂は変化せず、ソーダライムによ

り十分に呼気中の二酸化炭素が除去されていることも確認された。

高所で低酸素血症が引き起こされると急性高山病・高所肺水腫・高所脳浮腫の発症につながりやすい。この機序は、低酸素血症による過換気とそれに伴う呼吸性アルカローシスに対する腎における代償反応として、重炭酸イオンの排泄促進による利尿がおこる。この利尿に対して他の体液調整に関与するホルモンも相互に影響を受けるが、急激な低酸素暴露に対してレニン-アンジオテンシン-アルドステロン系は分泌促進に傾く。このことは体液が貯留する原因となり、高所肺水腫・高所脳浮腫を引き起こすと考えられている。急性高山病の発症には個人差があることから、アンジオテンシン変換酵素の遺伝子多型に関する研究も進められている (花岡 2017)。このような重篤な症状を予防するにあたり、非侵襲的で小型なパルスオキシメータを携帯し、SpO₂を経時的にモニターしながら登山をすることが次のように有効である。本研究の結果からパルスオキシメータが動脈血酸素飽和度の低下すなわち動脈血酸素分圧の低下を示すことが確かめられたので、登山者は値の低下に応じて肺における酸素の取り込みを増加させる「口すばめ呼吸」を意図的に行うことができる。また動脈血酸素分圧の低下を知ることによって、実際には低酸素血症以上に換気量増加を引き起こす要因となる高二酸化炭素血症とそれに付随するアシドーシス (有田 2009)を防ぐことができると考えられる。この点は、動脈血二酸化炭素分圧が正常であれば低酸素血症であっても換気量を増大させる反応はおきにくいことから、重要である。

本研究では、低酸素暴露中、連続的に SpO₂をモニタリングしたところ、1500 m 相当の標高から有意に SpO₂は低下し始め、標高が高くなるのに伴ってさらに SpO₂は低下することがわかり、十分な低酸素環境を作成できることがわかった。6分間の低酸素トレーニング後の4分

間の休息では、SpO₂は速やかに上昇し、平地相当となることもわかった。このことは、低圧・低酸素室や常圧・低酸素室においてトラブルがあった場合に比べて、携帯型低酸素トレーニング器ではマスクを外すだけで平地の環境に戻れることを示しており、より簡便でかつ安全な低酸素トレーニング方法となる可能性が示唆された。

結論

低酸素環境下におけるパルスオキシメータによるSpO₂の測定結果は、動脈血採血によるSaO₂の測定結果に比べて若干低値を示すもののほぼ一致し、高所においてもPaO₂を推定する医療機器として有用であることが示唆された。

利益相反自己申告：申告すべきものはありません。

謝辞

本研究の一部は平成28年度日本女子体育大学共同研究費の補助を受けて行われた。

本研究を行うに当たり、低酸素環境暴露や動脈血採血を承諾して研究に参加していただいた

日本女子体育大学陸上競技部中・長距離ブロックの学生に深謝いたします。

文献

- 青柳卓雄, 岸道男, 山口一夫, 渡辺真一：イヤープースオキシメータの改良. 第13回日本ME学会予稿集, 90-91, 1974.
- 有田秀穂：標準生理学 呼吸の神経性調節 (小澤澗司, 福田康一郎編). 医学書院, 東京, pp.664-668, 2009.
- 花岡正幸 他：高山病と関連疾患の診療ガイドライン. 中外医学社, 東京, pp.116, 2017.
- 原田智紀 他：「JSM 登山者検診ネットワーク」試験運用の一年六ヶ月を検証する. 登山医学, **28**：178-185, 2008.
- 小坂博昭：標準生理学 赤血球 (小澤澗司, 福田康一郎編). 医学書院, 東京, pp.507-518, 2009.
- 酸素飽和度モニタ PULSOX-300i 取扱説明書. コニカミノルタ株式会社, 東京, 2016.
- 柴田幸一, 大澤拓也, 山本正嘉：携帯型の低酸素トレーニング機器を用いた Intermittent Hypoxic training の効果. 登山医学, **26**：123-130, 2006.
- 山地啓司：高所トレーニングの科学 高所トレーニングの研究史 (浅野勝巳, 小林寛道編). 杏林書院, 東京, pp.31-41, 2004.
- 山本正嘉：常圧低酸素室を利用した Living Low-Training High 方式の高所トレーニング：その有効性とトレーニングの実際. 登山医学, **21**：31-37, 2004.