



## 活動筋酸素化動態に対する低酸素環境下での間欠的 激運動の影響

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-10-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高橋, 生季, 苫米地, 伸泰, 森田, 憲輝 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.32150/00007069">https://doi.org/10.32150/00007069</a>

## 活動筋酸素化動態に対する低酸素環境下での間欠的激運動の影響

高橋 生季・苫米地伸泰\*・森田 憲輝\*\*

一般社団法人SLDI

\*日本体育大学 体育学部 スポーツトレーニングセンター

\*\*北海道教育大学岩見沢校

## Effects of Sprint Interval Exercises in Hypoxia on Muscle Oxygenation Responses

TAKAHASHI Ibuki, TOMABECHI Nobuyasu\* and MORITA Noriteru\*\*

A General Incorporated Association SLDI, Iwamizawa 068-8642

\*Sports Training Center, Faculty of Sport Science, Nippon Sport Science University, Yokohama, 227-0033

\*\*Department of Sports Cultural Studies, Iwamizawa Campus, Hokkaido University of Education, Iwamizawa 068-8642

### ABSTRACT

**Objective:** This study aimed to examine the effects of sprint interval training (SIT) exercise under 13.6%O<sub>2</sub> hypoxic conditions on muscle tissue oxygenation responses in male college students.

**Methods:** Thirteen active male students participated in the study. SIT exercises consisted of 4 sets of 30-sec cycling exercises with three 4.5-min active recoveries. Participants were instructed to cycle as fast as possible in the 1st and 4th sets; the targeted cycling speed (rpm) in the 2nd and 3rd set of exercises was set at 80% of the peak cycling speed in the 1st set. Near-infrared spectroscopy was attached to the right vastus lateralis muscle, and oxygenation hemoglobin (OxyHb) responses were measured.

**Results:** The mean power output in the hypoxic condition was lower than that in the normoxic condition. OxyHb decreased from the 1st to 3rd SIT exercises in both conditions. OxyHb slightly increased from the 3rd to the 4th SIT exercises in the normoxic condition but not in the hypoxic condition.

**Conclusion:** These results showed that SIT exercises under hypoxic conditions caused greater oxygen deficiency in active skeletal muscles, suggesting that hypoxic SIT could lead to metabolic adaptation in skeletal muscles. However, because of the lower power output of the hypoxic SIT, these results should be interpreted with caution.

キーワード：高強度インターバルトレーニング, NIRS, 近赤外線分光法, 有酸素性能力, Wingate

## I. 緒言

持久性競技選手の競技力を向上させるために有効なトレーニング方法のひとつとして、低酸素トレーニングがある<sup>1)</sup>。低酸素環境下でのトレーニングは、運動自体の刺激に加え、血中に取り込まれる低濃度酸素による血中酸素飽和度低下、それに伴う骨格筋内低酸素化に対する呼吸循環機能や筋機能の順応によってトレーニング効果を高める目的として導入されている<sup>1-4)</sup>。先行研究では、低酸素環境下（15.2%O<sub>2</sub>、標高2500m相当）において持久性トレーニングを行ったところ、常酸素条件下と比して最大酸素摂取量（VO<sub>2</sub>max）が改善したことが報告されている<sup>3-4)</sup>。一方で、低酸素環境での持久性トレーニングでも、VO<sub>2</sub>maxの向上程度が常酸素条件と同等であったという報告もある<sup>5)</sup>。現在では、低酸素発生装置が商品化され、様々な施設・機関に設置されてきていることから、一流の競技選手だけでなく一般のスポーツ愛好者でも低酸素環境下でのトレーニングを利用できるようになりつつある。このような状況から、低酸素トレーニングのより効果的な方法を明らかにすることはスポーツ選手の持久性能力向上に有意義な研究である。

間欠的激運動（sprint interval training, SIT）も短時間で持久性能力を改善するトレーニングの一つであり、さらに時間効率の高さから注目されているトレーニング方法である。先行研究では、最大心拍数（HRmax）の90-95%程度で4分走行×4セットの運動群（SIT群）と70%HRmaxで45分間連続走行群に分け、8週間行なったところ、SIT群はよりVO<sub>2</sub>maxが改善したと報告されている<sup>6)</sup>。また、SITは総運動量が中強度有酸素性運動より減少するにも関わらず骨格筋酸化能を改善するという報告もある<sup>7-8)</sup>。

さらに上記の二つのトレーニング方法を組み合わせた低酸素環境でのSIT（低酸素SIT）を実施した先行研究では、低酸素SITが常酸素環境でのSITに比べ、持久性能力を改善したとされている<sup>9-10)</sup>。他方、低酸素SITが持久性能力に及ぼす

影響は大きくないとする報告も存在する<sup>11-12)</sup>。これらの報告には、低酸素濃度条件の相違とともに運動時間の相違も存在している。具体的には、一方は10秒未満の短時間運動かつ13.0~13.8% O<sub>2</sub>という低酸素SITで効果がみられ<sup>9-10)</sup>、他方30秒程度の短時間運動かつ14.4~15.0% O<sub>2</sub>では効果がみられていない<sup>11-12)</sup>というものである。しかしながら、効果の見られていない30秒程度の運動時間で、効果の見られている14%O<sub>2</sub>を下回る酸素濃度という条件では、低酸素SITの持久性能力への影響について検討がなされていない。さらに、低酸素SITという組み合わせで、低酸素環境という酸素濃度がより影響するのか、それともSITという運動形態がより影響しているのかも明らかとは言えない。したがって、低酸素SITの酸素濃度と運動時間のより良い組み合わせを見出す研究が待たれている。

活動筋への酸素供給能力及び活動筋の酸素利用能力は、持久性能力を決定するための重要な生理学的因子である。近赤外線分光装置（near infrared spectroscopy, NIRS）は、運動中の骨格筋内酸素濃度を非侵略的かつ連続的に評価できる<sup>13)</sup>。先行研究では、NIRSによって計測された筋への酸素供給量の減少や、筋の酸素消費量の増加は、筋内酸素の減少を引き起こすことが報告されている<sup>14)</sup>ため、NIRSは持久性能力の評価において有用なツールである。

そこで本研究では、約13.6%O<sub>2</sub>（標高3500m相当）での30秒の運動時間での低酸素SITの持久性能力への影響を検討するに先立ち、基礎検討として低酸素SIT時の活動筋酸素化動態を測定・評価することを目的とした。

## II. 方法

### 1. 被験者

被験者は日常的に運動を行っている男子大学生13名（年齢20.3±1.3歳、身長171.1±6.2cm、体重69.1±6.6kg、平均±標準偏差）を対象とした。実験に先立ち被験者に研究の目的、安全性について

説明し、十分に理解した上で、研究への参加同意を書面による同意書にて得た。なお、本研究は本学研究倫理委員会（北教大研倫2015115001）の承認を得て実施された。

## 2. 実験の概要

本研究は、本実験である2条件のSIT実験と、被験者の有酸素性能力評価のための最高酸素摂取量（ $VO_{2peak}$ ）測定で構成されている。なおSIT実験は、常酸素環境下（対照条件、常酸素20.5～20.9% $O_2$ ）および低酸素環境下（約13.6% $O_2$ 、標高3500m相当）にて実施した。いずれの実験も北海道教育大学岩見沢校低温・低酸素実験棟内の低温・低酸素実験室（ESPEC社製）にて実施された。実験プロトコルの概要をFig. 1に示した。

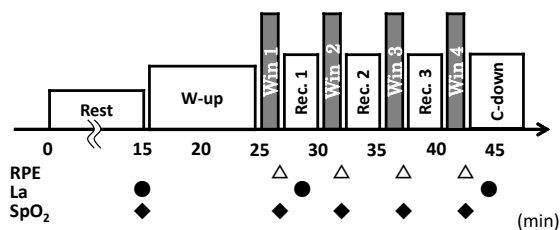


Figure 1. Schematic diagram of experimental protocols. RPE, rating of perceived exertion; La, blood lactate; SpO<sub>2</sub>, oxygen saturation; W-up, warm up exercise; C-down, cool down exercise, Rec., recovery.

## 3. 運動プロトコル

### (1) $VO_{2peak}$ 測定

本実験に先立ち被験者の有酸素性能力評価のため、漸増負荷法（Bruce法、1ステージ2分間）による随意最大走行運動テストを実施した。被験者は実験室に入室後、体組成計（TANITA社製MC-980A）を使用して体重測定を行い、ストレッチを各自で行った。その後、5～10分ほどのウォーミングアップをトレッドミル（竹井機器工業社製WELL ROAD 200E）上で行った。その後、全被験者が大型低床トレッドミル（竹井機器工業社製T.K.K1245）で随意最大走行運動テストを実施した。運動中の呼気ガスは自動呼気ガス分析装置（ミ

ナト医科学社製エアロモニタAE-310S）を用い、breath-by-breath法で酸素摂取量（ $VO_2$ ）、二酸化炭素排泄量、換気量を評価した。測定された呼気データは30秒ごとに単純平均し分析に用いた。 $VO_{2peak}$ は①運動中 $VO_2$ のレベリングオフ、②呼吸交換比1.1以上、③年齢予測の最高心拍数（220-年齢）の90%以上のうち2項目以上を満たしていることで判定し、全被験者がこの条件を満たした。  
(2) SIT

SIT運動のプロトコルは30秒×4セットの高強度間欠的自転車運動とし、セット間休息を4分30秒とした。安静時から運動終了後まで被験者の右大腿部外側に近赤外線分光装置（ダイナセンス社製PocketNIRS Duo）を装着し、外側広筋部の酸素化／脱酸素化ヘモグロビン（OxyHb / DeoxyHb）濃度変化を測定した。また心拍数（HR）は心拍数計（POLAR社製M400）を手根部に、そして心拍センサー（POLAR社製H10）を胸部に装着して測定した。SIT運動時の負荷は体重の7.5%（kp）とした。運動実験は、各条件での実施を最低5日以上の間隔を設け、順序の影響を除くため各条件でカウンターバランスをとって実施した。

SIT運動はパワーマックスエルゴメーター（COMBI社製POWERMAX-V II）を用いて実施した。被験者は実験室入室後、15分間の座位安静とした後、指先から微量の血液を採取し、血中乳酸濃度（La）を測定した。La測定の際には、酒精綿での指尖部の消毒後、採血用穿刺器具（三和科学研究所 ジェントレット II）にて被験者本人が採血し、血中乳酸測定キット（ARKLAY社製ラクテート・プロLT-1710）によってLa濃度を求めた。安静時La測定後、NIRSを被験者の右側外側広筋に装着し、その後、NIRS装着部の近位部に空気圧式駆血帯（大腿部用カフ：幅21.5cm）を装着し、加圧装置（SunTech社製：Model 222）を用いて200mmHgまで加圧し、約10分間の阻血処置を行った。この阻血処置9～10分間の値を骨格筋組織内での最低OxyHbおよび最高DeoxyHb状態と規定し、その後の分析に用いた<sup>13,15)</sup>。その

後に、被験者は5～10分ほどのウォーミングアップを自転車エルゴメーター（MONARK社製Manual 828 E）で行った。SITの1セット目（Wingate test 1, Win1）及び4セット目（Wingate test 4, Win4）は全力漕ぎとし、2セット目（Wingate test 2, Win2）及び3セット目（Wingate test 3, Win3）はWin1の最大回転数の80%を目標回転数として行った。ただし、80%の回転数より低下した場合には80%に近づけるように指示・激励した。なお、セット間休息は50 wattsとし、任意の回転数で積極的回復となるように自転車運動を行った。セットごとに最大回転数、最高パワー（PeakW）、平均パワー（MeanW）、主観的運動強度（RPE）、動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）、HRを記録し、PeakWおよびMeanWは体重で除した値を算出した。RPEは20段階のボルグスケールを使用した。SpO<sub>2</sub>の測定にはパルスオキシメーター（NIHON KOHDEN社 製Oxypal mini SAT-2200）を使用した。Laは安静15分後、Win1および

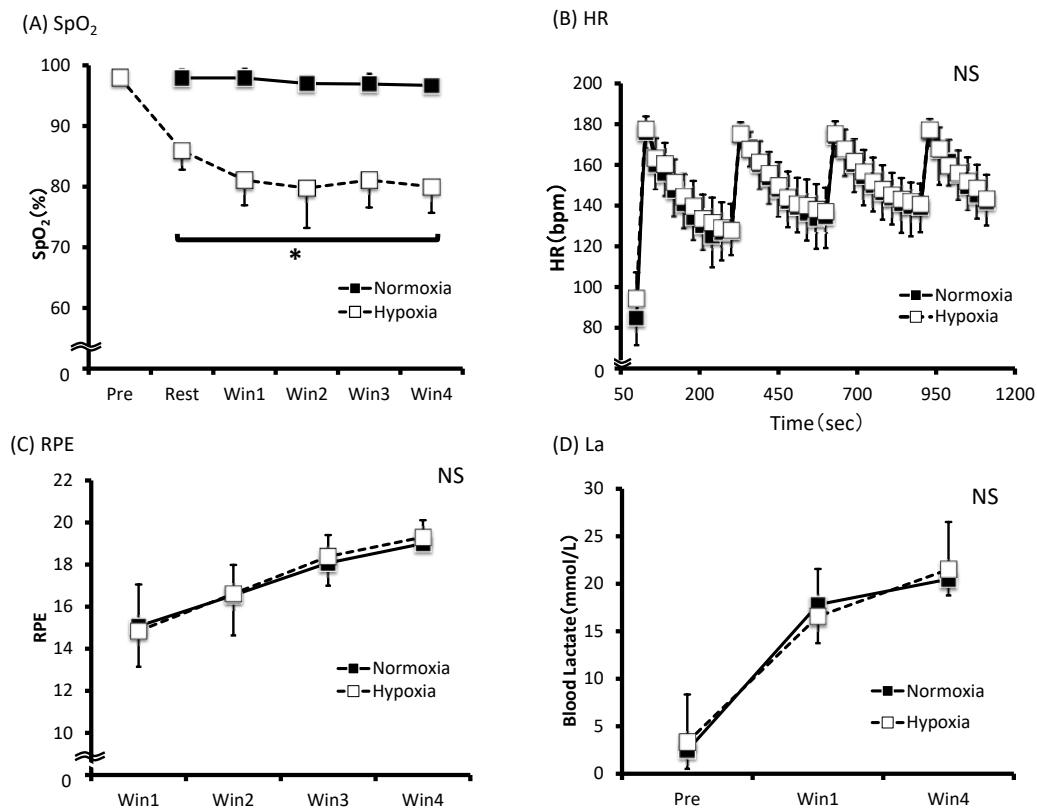
Win4終了3分後の計3回測定を行った。

#### 4. 統計処理

測定結果は、全て平均値±標準偏差で表した。常酸素SIT条件と低酸素SIT条件間でのHR、RPE、SpO<sub>2</sub>、PeakW、MeanW、LaおよびOxyHb低下率の動態比較には、二元配置分散分析（セット間×条件間）を用いた。2変数間での比較には対応のあるt検定を用いた。また、変数間の関係の分析にはPearsonの積率相関分析を用いた。統計処理はExcel用統計処理アドインソフトHAD16.0およびMicrosoft Excel for Mac 2016を使用した。なお、有意水準 $\alpha$ は5%とし、 $p < 0.1$ の結果は有意傾向として報告する。

### Ⅲ. 結果

Fig. 2にSIT中のSpO<sub>2</sub>(a)、HR(b)、RPE(c)、La(d)の推移を示した。



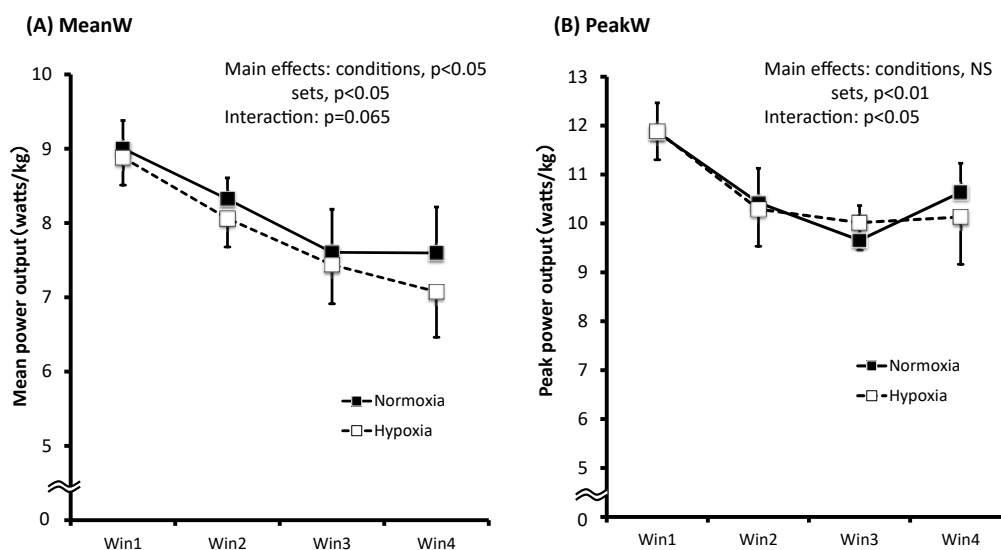
**Figure 2.** Changes of physiological variables during sprint interval exercise tests. Panel A, B, C, and D denote SpO<sub>2</sub>, HR, RPE, and La, respectively. ■, normoxic condition; □, hypoxic condition. \* indicates  $p < 0.05$  in comparison between normoxic and hypoxic conditions.

低酸素条件でのSIT中のSpO<sub>2</sub>は安静時で85.9%, Win4終了時点で約80%まで低下しており, 被験者が低酸素状態にあることが確認された。一方, 常酸素条件では安静時に97.9±0.9%でその後SIT運動中もほぼ一定の状態だった。SIT中のHRは常酸素条件では安静時84.8±13.3bpmから運動中には176.0±7.7bpmまで上昇した。低酸素条件でのHRは安静時の94.5±12.7bpmから運動中に177.5±6.3bpmまで上昇しており, 運動中はいずれの条件においても年齢予測のHRmaxの80%を上回っていた。SIT中のRPEは常酸素条件のWin4では19.0±1.1, 低酸素条件のWin4では19.3±0.6であった。また, SIT中のLaは, 常酸素条件と低酸素条件では安静時の2.9±2.1mmol/L, Win1終了3分後には17.2±4.0mmol/L, Win4終了3分後には21.0±1.7mmol/Lまで上昇した。HR, RPE, Laに常酸素条件と低酸素条件の間に有意な差は認められなかった。

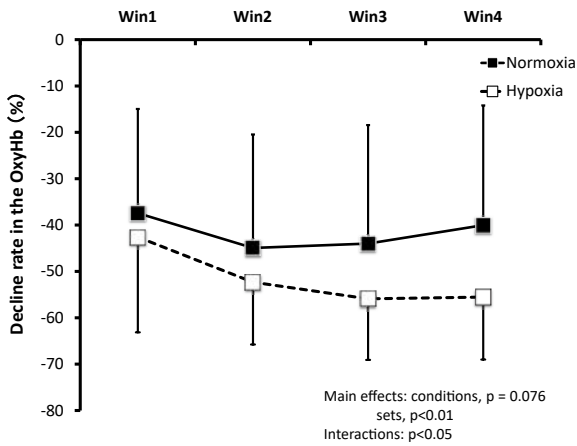
Fig. 3にSIT中のMeanW(a), PeakW(b)の推移を示した。SIT中のMeanWは常酸素条件ではWin3からWin4にかけてほぼ同等レベルの発揮パワーであったが, 低酸素条件ではWin3からWin4にかけてMeanWの低下傾向を示していた。MeanWについてのSIT運動の遂行(セット間)

および条件間にはいずれも有意な主効果が確認された ( $p < 0.05$ )。また, この両条件でのMeanWの交互作用は統計的に有意でなかったものの  $p = 0.068$  と有意傾向であった (偏  $\eta^2 = 0.212$ ,  $F_{(3,36)} = 3.234$ )。SIT中のPeakWは常酸素条件ではWin3からWin4にかけての上昇がみられた (9.7→10.6watts/kg) もの, 低酸素条件ではそのような変動はみられなかった。また, このPeakWの低下動態の交互作用効果は統計的に有意であった (交互作用, 偏  $\eta^2 = 0.200$ ,  $F_{(3,36)} = 3.003$ ,  $p < 0.05$ )。post hoc検定の結果, Win4におけるMeanWおよびPeakWは低酸素条件が常酸素条件より有意に低値であった (both  $p < 0.05$ )。SIT運動の総仕事量は, 常酸素条件32.5±1.4watts/kgに対し, 低酸素条件は31.5±1.5watts/kgであり, 低酸素条件が常酸素条件より有意に低値であった ( $p < 0.05$ )。

Fig. 4にSIT中のOxyHb低下率の推移を示した。SIT中のOxyHb低下率において, セット間での主効果 (偏  $\eta^2 = 0.507$ ,  $F_{(3,30)} = 10.304$ ,  $p < 0.05$ ) およびセット間×条件間での有意な交互作用効果が認められた (偏  $\eta^2 = 0.366$ ,  $F_{(3,30)} = 5.763$ ,  $p < 0.05$ )。また, Win3およびWin4のOxyHb低下率は常酸素条件に比較して, 低酸素条件が有意に低値を示した (常酸素Win3, -36.4% vs. 低酸素



**Figure 3.** Changes of power output during sprint interval exercise tests. Panel A and B show MeanW and PeakW, respectively. MeanW, mean power output during a 30 sec cycling exercise session; PeakW, peak power output during a 30 sec cycling exercise session. ■, normoxic condition; □, hypoxic condition.



**Figure 4.** Changes of oxygenation hemoglobin during sprint interval exercise tests. OxyHb, oxygenation hemoglobin; ■, normoxic condition; □, hypoxic condition.

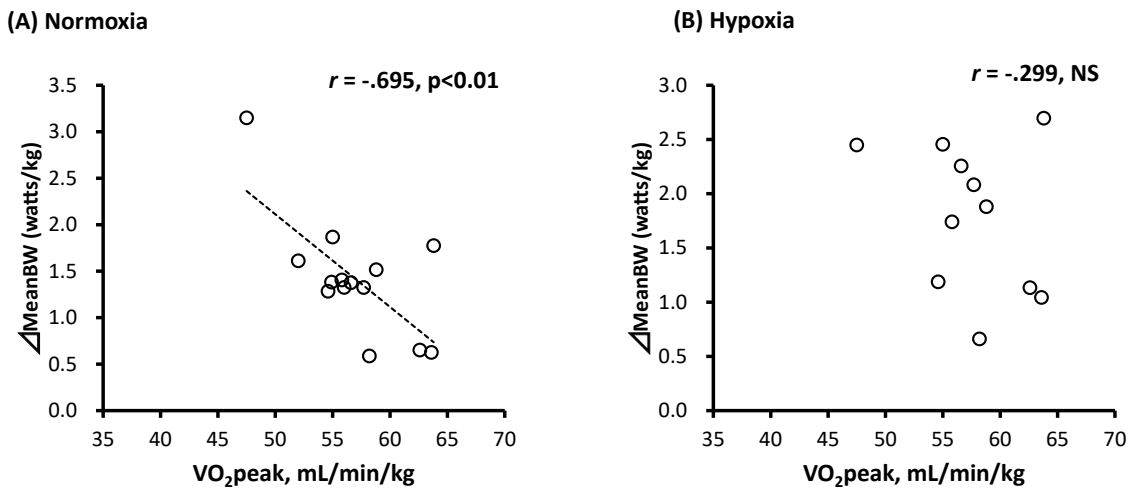
win3, -57.0%,  $p < 0.05$ ; 常酸素Win4, -34.7% vs. 低酸素Win4, -56.4%,  $p < 0.05$ ).

SIT運動への有酸素能力の影響を検討するためMeanWのWin1からWin4までの低下率 ( $\Delta$ MeanW)を両条件で算出した。その結果、常酸素条件での $\Delta$ MeanWと $VO_{2peak}$ に有意な負の相関関係が認められた(図5a,  $r = -0.695$ ,  $p < 0.01$ )。一方、低酸素条件での $\Delta$ MeanWと $VO_{2peak}$ の間には $r = -0.299$  ( $p = 0.371$ )と統計学的に有意な相関関係ではなかった。また、両条件での

OxyHb低下率と $VO_{2peak}$ の間にも有意な相関関係は認められなかった。

#### IV. 考 察

本研究は標高3500m相当(約13.6% $O_2$ )の低酸素環境での複数セットでのSITが、活動筋酸素化動態に及ぼす影響を検討した。その結果、低酸素環境下では骨格筋内は常酸素環境下でのSIT運動よりも大きな割合で低酸素化状態が生じ、それとともにSIT運動中の運動量である発揮パワーも低下していた。このことは低酸素環境下での複数セットにわたるSIT運動は、常酸素環境下でも生じる骨格筋組織に対する低酸素刺激をより強く負荷できることを示すといえる。しかしながら、トレーニング効果は運動量にも影響を受けるとされていることを踏まえると、低酸素SIT条件ではSIT運動の総仕事量が低下していることから、本研究で用いた低酸素SITを一定期間実施した場合、常酸素環境下でのSITより高い有効性を示すのかを推測することは困難であった。以上の結果を踏まえると、本研究で用いた低酸素SIT運動は骨格筋代謝への低酸素刺激は十分に与えることができること、一方で運動量低下が生じることからトレーニングの目的を精査し、特に骨格筋代謝



**Figure 5.** Relationships between decline rate of power output from 1st to 4th sets and peak oxygen uptake. Panel A and B denote hypoxic and normoxic conditions, respectively.  $\Delta$ MeanBW, difference between 1st and 4th sets of mean power output relative to body weight.

系への負荷を目的とした場合には有効性が望める可能性があると考えられた。

本研究ではSIT中のOxyHb低下率に、セット間と条件間に交互作用がみられた。この結果は低酸素SITを常酸素条件と比較した場合、セット数を重ねていくことでのOxyHb動態が両条件間で異なることを意味する。Fig. 4を参照すると、常酸素SITではWin4でOxyHbの上昇傾向、つまり低酸素状態の改善がみられ、OxyHbが40%を上回っていた。一方、低酸素条件ではSITの進行（セット進行）に伴うOxyHbの低下が生じ、Win3では10分間阻血処置の50%程度までOxyHbが低下していた。さらに常酸素条件とは異なりWin3からWin4における上昇傾向は生じず、Win4でのOxyHbは50%を下回るほどの低酸素状態が継続していた。低酸素条件は、常酸素環境に比して酸素濃度が7%ほど少なく、その低濃度酸素によって骨格筋に供給される酸素が常酸素条件よりも少ない。実際にFig. 2にあるように動脈血酸素飽和度であるSpO<sub>2</sub>も約80%と低値を示しており、肺胞での酸素取り込み量の減少が生じたことは確実といえる。そのような環境下では、セット間でのリカバリー時にも骨格筋内での低酸素状態の改善が十分には生じなく、その状態で次のセットの運動を実施することでより強い低酸素状態が骨格筋内に負荷されていたことが推察される。

他方で、常酸素SITも10分間阻血処置後を100%とした低酸素状態の40%程度の低酸素状態が生じていたことは興味深い。SITは有酸素性能力の向上にも有効との先行研究の知見があるが、SIT運動はエネルギー消費量が大きく、主に嫌氣的エネルギー供給系が動員される。これまでは嫌氣的エネルギー供給系が消費したエネルギーの回復に好氣的エネルギー供給系が動員され、それによって嫌氣的エネルギー供給系だけでなく好氣的エネルギー供給系にも適応が起こるとされていた。しかし、本研究の結果からは常酸素SITのセットが進んだ状態（Win2やWin3）では低酸素条件のWin1と同等程度までの低酸素状態が活動筋内で生じていた。このことはSITという運動が骨格筋内の低

酸素状態を誘導する運動プログラムであることを示し、それによって上述のSIT回復期に動員される有酸素性代謝亢進による有酸素性能力向上という生理学的メカニズムに、SIT運動による筋内低酸素状態も付加的に作用していることを示すものと推察される。

先行研究では、持久性能力の向上には血流量の増加や毛細血管の発達が関与していること<sup>16)</sup>、骨格筋における血管新生には組織の低酸素化が起因していることが報告されている<sup>17)</sup>。低酸素環境では血中成長ホルモンの分泌促進<sup>18)</sup>およびその血中濃度増加は、より多くの骨格筋肥大を誘発すると報告されている<sup>19)</sup>。さらに、低酸素環境での有酸素性トレーニングは単位面積当たりの毛細血管密度をより増加させることも報告されている<sup>20)</sup>。これらのような低酸素環境への骨格筋や末梢循環応答がみられうることを考慮すると、低酸素環境での一定期間のSITは有酸素性能力の向上が望める可能性は十分あると考える。

本研究では、SIT運動の総仕事量、MeanWそしてPeakWは常酸素条件と比して低酸素条件で低下していた。先行研究においてはWingateテストでの常酸素条件と低酸素条件の比較でSIT中のPeakW、MeanWに差がみられず<sup>21)</sup>、さらに等速性自転車運動においても常酸素条件と低酸素条件で最大トルクの平均値に差がみられなかったことを示している<sup>22)</sup>。しかし、それらの研究では、複数セットでなく1セットでの運動実験となっており、本研究とは実験条件が異なる。低酸素環境での複数セットで構成されるSITでは、セットの進行によって骨格筋内の低酸素状態が進行し、さらに低酸素状態であるため回復も十分には生じない。これによって筋収縮のためのエネルギーを十分に供給できず、結果として総仕事量の低下につながったと考える。長期的なトレーニング効果の改善には、代謝応答だけでなく総仕事量（トレーニング量）も関連している<sup>23)</sup>ため、本実験条件であった13.6%O<sub>2</sub>の低酸素環境は総トレーニング量の減少を誘発することで長期的なトレーニング効果として代謝応答に見合った結果をもたらさな



い可能性もあると考える。

本研究では、常酸素条件でのSIT中のMeanWの低下量と被験者の有酸素性能力指標であるVO<sub>2</sub>peakの間に負の相関関係がみられた。このことはSITという運動形態の運動能力には有酸素性能力が重要な要素であるとともに、有酸素性能力を高めることがSIT能力向上に資する可能性を示唆するといえる。しかしながら、低酸素条件においてはWin1からWin4までのMeanW低下量とVO<sub>2</sub>peakの間の相関関係は統計学的に有意ではなかった。これは低酸素条件でのSITは常酸素条件でのSITに比して有酸素性能力への依存度が低下している可能性を示唆すると考える。さらに、このことを踏まえるとトレーニングプログラムとしての低酸素SITは、嫌氣的エネルギー供給系の動員が大きくなり、結果として嫌氣的エネルギー供給系の代謝応答を高めるような順応が生じうるとも考えられる。嫌氣的エネルギー代謝を高めるとともに有酸素性能力の向上を高めることが要求されるようなスポーツ競技を専門とする選手にとっては、低酸素SITプログラムは効果的なトレーニングとなるかもしれない。今後はより多くの被験者を募り、介入実験として数週間行なったときの低酸素SITの効果をさらに検討していく必要がある。

## V. 結 語

本研究は、日常的に運動を行っている男子大学生13名を対象とし、常酸素条件と低酸素条件でSITを行なった。その結果、低酸素環境下では骨格筋内は常酸素環境下でのSIT運動よりも大きな割合で低酸素化状態が生じ、それとともにSIT運動中の運動量である発揮パワーも低下していた。このことは低酸素環境下での複数セットにわたるSIT運動は、常酸素環境下でも生じる骨格筋組織に対する低酸素刺激をより強く負荷可能なことを示す。本研究からは、有酸素性能力の向上に低酸素SITが資する可能性はあるものの、他方で低酸素SITでは運動量低下もあり、一概に有効性のみ

が示唆される結果ではなかった。今後介入研究を実施しなければ、その有効性を明らかにすることは困難であり、その必要性がより高まったと考える。

## 利益相反

本論文について開示すべき利益相反状態はない。

## 参考文献

- [1] Dufour SP, Ponsot E, Zoll J, et al. Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. I. Improvement in aerobic performance capacity. *J Appl Physiol*, 100: 1238-1248, 2006.
- [2] Hendriksen IJ, Meeuwse T. The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur J Appl Physiol*, 88: 396-403, 2003.
- [3] Czuba M, Waskiewicz Z, Zajac A, Poprzecki S, Cholewa J, Rocznik R. The effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance in cyclists. *J Sports Sci Med*, 10:175-183, 2011.
- [4] Stray-Gundersen J, Chapman RF, Levine BD. "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J Appl Physiol*, 91: 1113-1120, 2001.
- [5] Robach P, Bonne T, Fluck D, et al. Hypoxic training: effect on mitochondrial function and aerobic performance in hypoxia. *Med Sci Sports Exerc*, 46: 1936-1945, 2014.
- [6] Helgerud J, Høydal K, Wang E, et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO<sub>2</sub>max more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc*, 39: 665-671, 2007.
- [7] Gibala MJ, McGee SL. Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exerc Sport Sci Rev*, 36: 58-63, 2008.
- [8] Freece EC, Gist NH, Cureton KJ. Physiological responses to an acute bout of sprint interval cycling. *J Strength Cond Res*, 27: 2768-2773, 2013.
- [9] Galvin HM, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, Bowtell JL. Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br J Sports Med*, 47 Suppl 1: i74-i79, 2013.
- [10] Faiss R, Willis S, Born DP, et al. Repeated double-pole sprint training in hypoxia by competitive cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc*, 47:

- 809-817, 2015.
- [11] Richardson AJ, Relf RL, Saunders A, Gibson OR. Similar inflammatory responses following sprint interval training performed in hypoxia and normoxia. *Front Physiol*, 3:7332, 2016.
- [12] Puype J, Van Proeyen K, Raymackers JM, Deldicque L, Hespel P. Sprint interval training in hypoxia stimulates glycolytic enzyme activity. *Med Sci Sports Exerc*, 45: 2166-2174, 2013.
- [13] Hampson NB, Piantadosi CA. Near infrared monitoring of human skeletal muscle oxygenation during forearm ischemia. *J appl Physiol*, 64: 2449-2457, 1988.
- [14] Kawaguchi K, Tabusadani M, Sekikawa K, Hayashi Y, Onari K. Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake? *Eur J Appl Physiol*, 84:158-161, 2001
- [15] Sahlin K. Non-invasive measurements of O<sub>2</sub> availability in human skeletal muscle with near-infrared spectroscopy. *Int J Sports Med*, 13 Suppl 1: S157-S160, 1992.
- [16] Kagaya A, Ikari M. Training effects on muscular endurance with respect to blood flow in males and females of different ages. *Res J Phys Ed*, 14: 129-136, 1970.
- [17] Hoppeler H. Vascular growth in hypoxic skeletal muscle. *Adv Exp Med Biol*, 474: 277-286, 1999.
- [18] Nishimura A, Sugita M, Kato K, Fukuda A, Sudo A, Uchida A. Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. *Int J Sports Physiol Perform*, 5: 497-508, 2010.
- [19] Kurobe K, Huang Z, Nishiwaki M, Yamamoto M, Kanehisa H, Ogita F. Effects of resistance training under hypoxic conditions on muscle hypertrophy and strength. *Clin Physiol Funct Imaging*, 35: 197-202, 2015.
- [20] Mizuno M, Juel C, Bro-Rasmussen T, et al. Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol*, 68: 496-502, 1990.
- [21] Oguri K, Fujimoto H, Sugimori H, et al. Pronounced muscle deoxygenation during supramaximal exercise under stimulated hypoxia in sprint athletes. *J Sports Sci Med*, 7: 512-519, 2008.
- [22] Kawahara Y, Saito Y, Kashimura K, Muraoka I. Relationship between muscle oxygenation kinetics and the rate of decline in peak torque during isokinetic knee extension in acute hypoxia and Normoxia. *Int J Sports Med*, 29: 379-383, 2008.
- [23] Granata C, Oliveira RS, Little JP, Renner K, Bishop DJ. Mitochondrial adaptations to high-volume exercise training are rapidly reversed after a reduction in training volume in human skeletal muscle. *FASEB J*, 30: 3413-3423, 2016.
- (高橋 生季 本学岩見沢校大学院教育学研究科令和元年度修了)
- (苫米地伸泰 日本体育大学助教)
- (森田 憲輝 岩見沢校教授)

