



Title	抵抗負荷呼吸時の酸素摂取動態
Author(s)	柚木, 孝敬; 肖, 錚; 白川, 和希 他
Citation	北海道大学大学院教育学研究院紀要, 123, 91-98
Issue Date	2015-12-25
DOI	https://doi.org/10.14943/b.edu.123.91
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/60567
Type	departmental bulletin paper
File Information	AA12219452-123 (9).pdf



抵抗負荷呼吸時の酸素摂取動態

柚木 孝 敬* 肖 錚** 白 川 和 希**
連 長 順** 矢 野 徳 郎*

【要旨】 一定負荷高強度運動では酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の過剰な増加 (excess $\dot{V}O_2$) が起こる。本研究では、高強度運動時の呼吸筋活動に由来する $\dot{V}O_2$ の抽出・再現を試み、excess $\dot{V}O_2$ と呼吸筋活動の関連を検討した。健康男性 8 名が、吸気抵抗が負荷された呼吸マスクを装着して 6 分間の随意的過呼吸を 3 回繰り返した (inspiratory resistive breathing, IRB)。3 回の IRB 時の換気量は同水準 ($\sim 70\text{L}/\text{min}$) に維持された。IRB の反復により、呼吸筋の疲労指標 (呼吸努力感と最大吸気圧) は有意に変化した。 $\dot{V}O_2$ は、IRB 開始直後に一過性のオーバーシュートを示した後、IRB 終了時まで定常状態を示した。3 回の IRB 中の $\dot{V}O_2$ 動態に有意差は認められなかった。これらの結果から、呼吸筋疲労は、呼吸の仕事が一定である限り、高強度運動時の excess $\dot{V}O_2$ に関与しないと考えられた。

【キーワード】 高強度運動, 呼吸筋疲労, 酸素摂取量, 過剰酸素摂取量

I. 緒言

走運動や自転車運動のような脚が主働筋となる運動を、一定の低～中程度の強度 (= 無酸素性作業閾値 (Anaerobic Threshold, AT) 以下の強度) で開始すると、肺レベルの酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) は指数関数的に増加し、2～3 分程度で定常状態に達する。一方、高強度 (= AT 以上の強度) の運動では、 $\dot{V}O_2$ の定常状態は遅延して生じるか、あるいは $\dot{V}O_2$ は、定常状態を示すことなく運動終了時まで徐々に増加し続ける²¹。この $\dot{V}O_2$ の漸増は、過剰 $\dot{V}O_2$ (excess $\dot{V}O_2$) と呼ばれている。excess $\dot{V}O_2$ の発生は、運動強度が一定であっても、時間の経過に伴って徐々にエネルギー効率が低下する (より多くの酸素が必要になる) ことを意味する。これはまた、運動時の $\dot{V}O_2$ をその上限値である最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2\text{max}}$) に接近させることによって、運動耐性 (exercise tolerance) の低下をもたらすと考えられている^{16, 17}。ゆえに、excess $\dot{V}O_2$ の発生機序の解明は、高強度運動の持続を制限する因子の理解に重要な意味を持つと考えられている¹⁷。

excess $\dot{V}O_2$ の主要な発生源は主働筋 (脚筋) であることが明らかにされている¹²。より具体的には、筋疲労^{5, 20}や速筋線維動員²が excess $\dot{V}O_2$ の発現に関与していることが報告されている。その他の発生源として、呼吸筋があげられる。安静時の肺換気 (呼吸筋の仕事) に要する酸素量は全酸素摂取量の 1～3% にすぎないが、高強度運動時には全酸素摂取量の約 20% が呼吸筋のみで消費されることが知られている¹⁹。右田と平木場¹⁰は、excess $\dot{V}O_2$ の 7-23% は呼吸筋由来であると試算している。このように、excess $\dot{V}O_2$ に対する呼吸筋の関与は小さくない。

* 北海道大学大学院教育学研究院人間発達科学分野 ** 北海道大学大学院教育学院
DOI: 10.14943/b.edu.123.91

二酸化炭素血症の誘発を防ぐため、IRB中は呼吸マスクに約500mM容量の外部死腔を付加した。その結果、IRB中の呼気終末二酸化炭素濃度は約4%に維持された。

吸気筋疲労を評価するために、IRB前後に最大吸気圧 (maximal inspiratory pressure: PImax) を測定した。被験者は、実験室到着後30分程度の安静を保った後、電子スパイロメータ (AS-507, Minato Ikagaku) に連結された口腔内圧計 (AAM377, Minato Ikagaku) を用いて、PImaxの測定を行った。図1に示したように、IRB開始前 (IRB-pre) の7分の間に5回のPImax測定が2分の休息を挟んで2回繰り返された (合計10回)。同様の測定が各IRB終了30秒後からの7分の間にも行われた。合計10個のデータの中で高い方から6個のデータの平均値をPImaxとして採用した。このようにして合計32例 (IRB前 (1回) + IRB後 (3回)) × 8名のPImaxが決定されたが、そのうち2例については、6個のデータの変動係数 (CV) が5%⁸を超えたため、最も高いデータを除外し、2番目に高いデータから7番目に高いデータの6個のデータ (CV < 5%) を用いてPImaxを決定した。また、吸気筋疲労の主観的な評価のために、1回目のIRB開始前および各IRB終了直後に、ボルグの主観的運動強度 (rating of perceived exertion, RPE) 尺度 (0-10段階)³を用いて呼吸のRPE (RPE-Breath) を測定した。

実験初日の安静時および実験2日目と3日目のIRB時に、呼吸代謝測定器 (AE-280s, Minato Medical Science) を用いてガス交換変量および換気変量をbreath-by-breathモードで測定した。ガス濃度センサーおよび換気流量センサーの校正には標準ガス (酸素濃度: 15.0%, 二酸化炭素濃度: 5.0%) およびシリンジ (2 L) を用いた。 $\dot{V}O_2$ および換気変量のbreath-by-breathデータは、Stineman補間法を用いて1秒毎のデータに変換した後、30秒毎に平均した。

2名の被験者においてはガス交換変量の測定に失敗したため、データ分析には6名のデータが用いられた。結果は平均値±標準誤差で示した。IRBの反復によるPImaxとRPE-Breathの変化に関する分析には、反復測定一元配置分散分析を用いた。主効果が認められた場合には、Bonferroni Post Hoc testを用いてIRBの反復の影響を検定した。3回のIRB中の $\dot{V}O_2$ および換気変量の変化に関する分析には、反復測定二元配置分散分析を用いた。統計学的有意水準は5%未満 ($p < 0.05$) とした。

Ⅲ. 結果

図2にIRB中の呼気換気量 (expired ventilation, $\dot{V}E$) と吸気換気量 (inspired ventilation, $\dot{V}I$) の変化を示した。両変量ともIRB開始後30秒以内に約70L/minまで増加し、その後はその水準がほぼ一定に保たれた。3回のIRB中の換気量動態に有意差は認められなかった。

図3に吸気筋疲労の指標として測定されたBreath-RPEとPImaxの変化を示した。Breath-RPEはIRBによって増加し、IRB前と各IRB後のBreath-RPEの間に有意差が認められた ($p < 0.01$)。3回のIRB後のBreath-RPEに有意差は認められなかった。PImaxはIRBによって低下し、IRB前と2回目および3回目のIRB後のPImaxの間に有意差が認められた ($p < 0.01$)。3回のIRB後のPImaxに有意差は認められなかった。

図4にIRB中の $\dot{V}O_2$ の変化を示した。 $\dot{V}O_2$ はIRB開始後30秒の間に一過性のオーバーシュートを示し、その後は定常状態を示した。3回のIRB中の $\dot{V}O_2$ 動態に有意差は認められなかった。

IV. 考察

3回のIRB中の換気量 ($\dot{V}E$, $\dot{V}I$) に有意差は認められなかった。これは、呼吸筋の仕事が3回のIRBで同等であったことを意味する。この呼吸筋の仕事によってなされた換気量は約70L/minであった(図2)。我々の実験室に蓄積されたデータに基づくと、本研究の被験者のATおよび $\dot{V}O_{2max}$ 強度の換気量は、それぞれ、約40–50 L/minおよび約100–150L/minの範囲にあったと推測される。よって本研究は、高強度(=AT以上の強度)の脚運動を行った時の換気量を再現したと考えられる。しかしながら本研究の被

験者に要求された呼吸タスクは、自然呼吸ではなく、吸気に抵抗が負荷された随意的過呼吸(IRB)であった。IRB中の換気量が約70L/minに維持されていた間、 $\dot{V}O_2$ は約600ml/minの定常状態を示した。換気量および $\dot{V}O_2$ の安静時から増加量をそれぞれ60L/minおよび300ml/minとして(図2&4)、換気(呼吸筋の仕事)に対する酸素コストを計算すると、その値は5 ml/Lになる。Aaron et al. (1992)¹は、61–75% $\dot{V}O_{2max}$ および75–92% $\dot{V}O_{2max}$ 強度の脚運動時の換気(自然呼吸)に対する酸素コストを1.81ml/Lおよび2.11ml/Lと報告している。つまり、IRB時の酸素コストは自然呼吸時のその約2.5倍だったことになる。このことは、IRB時の換気量は約70L/minであったが、これを自然な呼吸で行われる脚運動時の換気量に置き換えると、約175L/min (70×2.5) に相当する呼吸筋の仕事が行われていたことを意味する。したがって、本研究では、少なくとも $\dot{V}O_{2max}$ 強度の脚運動時の呼吸筋活動が再現されたと考えられる。

高強度脚運動時の $\dot{V}O_2$ は運動開始後2–3分かけて指数関数的に増加した後、遅延して定常状態に至るか、あるいは定常状態を示すことなく運動終了時まで増加し続けることが知られている²¹。本研究では、高強度脚運動時の呼吸筋活動を再現したものの、その $\dot{V}O_2$ はIRB開始直後に一過性のオーバーシュートを示し、その後は定常状態を示した。すなわち、呼吸筋の単独

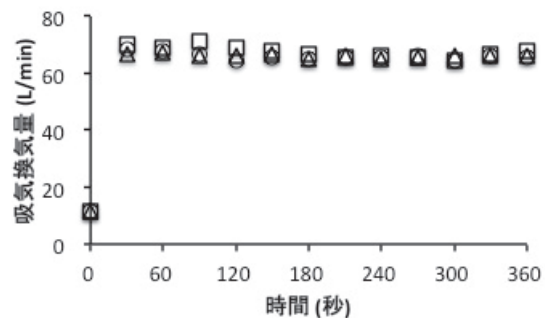
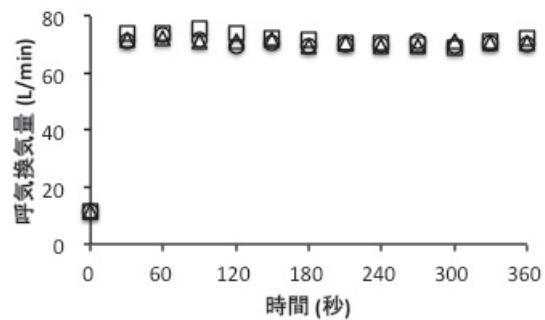


図2 吸気抵抗負荷呼吸 (IRB) 時の換気量
(上図: 呼吸換気量 ($\dot{V}E$), 下図: 吸気換気量 ($\dot{V}I$))
○: 1回目, □: 2回目, △: 3回目。0秒時点のデータは安静時のデータである。データは6名の被験者の平均値であるが、プロットを見やすくするために標準誤差は示していない。

運動では $\text{excess } \dot{V}\text{O}_2$ は発生しないことが示された。脚運動時の $\text{excess } \dot{V}\text{O}_2$ の原因の一つとして、脚筋速筋線維の漸増的な動員があげられている²。速筋線維は遅筋線維に比べてエネルギー効率が低い⁴ため、より多くの酸素を必要とすると考えられている。本研究のIRBでは吸息筋である横隔膜が主働筋であったと考えられる。横隔膜の筋線維組成は、脚筋（外側広筋）に比べて、速筋の割合が高いようである^{14, 18}。しかしながら、呼吸筋の酸化系酵素活性は下肢骨格筋のトレーニング後よりも高いことが報告されている¹³。おそらく、酸化系酵素活性の高い速筋線維がIRB開始時から動員されたため、 $\text{excess } \dot{V}\text{O}_2$ が発生しなかったのかもしれない。

本研究では、呼吸筋の $\dot{V}\text{O}_2$ 動態に特徴的な変化、初期のオーバーシュート、が観察された。本研究では、吸気に抵抗を加えた特殊な呼吸タスクを被験者に課した。しかも、そのタスクにおいては、呼吸数とTVIをそれぞれの目標値にコントロールすることが求められた。被験者にとっては、通常の無意識的な呼吸と異なり、意識的な呼吸制御が必要とされる難易度の高いタスクであったと考えられる。同時に、強い呼吸努力が必要とされるため（図3）、同じ70L/minの換気量であっても、不随意的な呼吸が行われる通常の高強度運動時に比べて非常に苦しい呼吸であったようである。したがって、被験者は、可能な限り楽な呼吸法を探りながら目標の換気量を維持していたと推察される。そのようなタスクにおいて、おそらく、運動の初期においては無駄の多い呼吸がなされていたのかもしれない。つまり、より多くのあるいは種

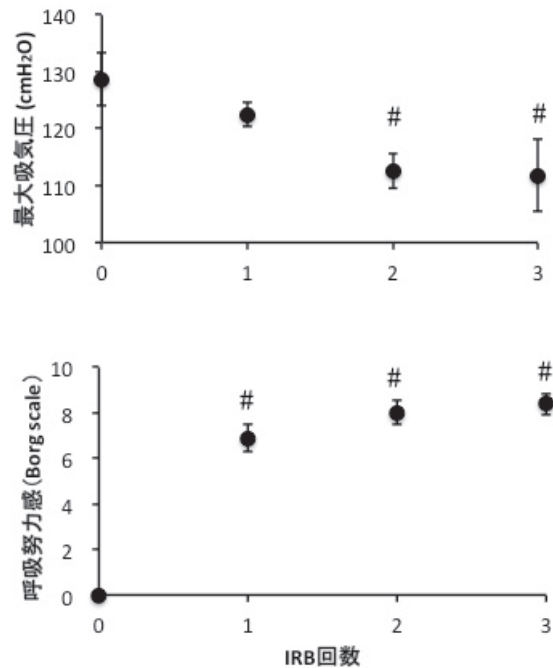


図3 吸気抵抗負荷呼吸（IRB）による最大吸気圧（PImax）および呼吸努力感（RPE-Breath）の変化
データは6名の被験者の平均値±標準誤差である。#はIRB前（横軸の0）の値と有意（ $p < 0.01$ ）に異なることを示す。

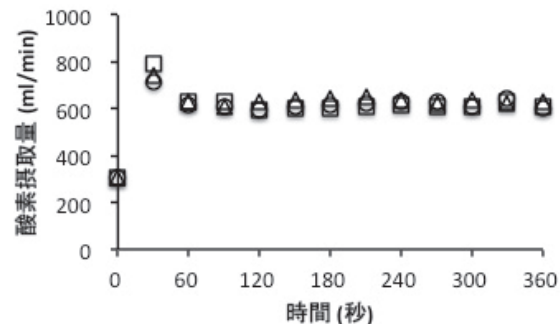


図4 吸気抵抗負荷呼吸（IRB）時の酸素摂取量（ VO_2 ）

○：1回目，□：2回目，△：3回目。0秒時点のデータは安静時のデータである。データは6名の被験者の平均値であるが、プロットを見やすくするために標準誤差は示していない。

類の呼吸筋がその初期には動員され、その結果、 $\dot{V}O_2$ が一過性に高くなったと考えられる。

高強度脚運動時（80% $\dot{V}O_{2\max}$ 以上）における換気量の増加は、呼吸筋に疲労をもたらすことが報告されている^{7, 15}。本研究では、呼吸筋の疲労を主観的指標であるRPEと間接的ではあるが客観的指標とされるPI_{max}によって評価した。両指標ともIRBを重ねるにしたがって有意に変化し（図3）、呼吸筋疲労が誘発されたと考えられる。高強度脚運動においては、脚筋の疲労に伴ってexcess $\dot{V}O_2$ が生じる^{5, 20}。よって、呼吸筋疲労が誘発されるであろうIRB 3回目と疲労前のIRB 1回目とでは、 $\dot{V}O_2$ 動態が異なると本研究では予想していた。しかしながら実際には、両 $\dot{V}O_2$ 動態に差はなく、3回目においてもexcess $\dot{V}O_2$ は認められなかった。筋疲労は一般的に筋動員を増やす。それは筋電図積分値（IEMG）の増加となって顕在化する。先行研究によると、呼吸筋の事前疲労により呼吸筋のIEMGが増加することが報告されている⁶。本研究では呼吸筋の筋電図を測定しなかったが、疲労にともなってIEMGが増加、すなわち、筋動員が増加していた可能性は高い。したがって、本研究結果は、たとえ呼吸筋疲労によって呼吸筋の筋線維動員が増加したとしても、呼吸筋の仕事量が一定（図2）である限り、その $\dot{V}O_2$ 動態は変化しないことを示唆する。

V. 結論

呼吸筋活動はその活動レベルが高くても $\dot{V}O_2$ が過剰に増加することはなかった。また、呼吸筋疲労は、呼吸の仕事が一定である限り、高強度運動におけるexcess $\dot{V}O_2$ の発現に関与しないと考えられた。

VI. 文献

- 1 Aaron EA, Seow KC, Johnson BD, Dempsey JA (1992) Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J Appl Physiol* 72: 1818-1825
- 2 Barstow TJ, Jones AM, Nguyen PH, and Casaburi R (1996) Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J Appl Physiol* 81: 1642-1650
- 3 Borg G (1982) Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14: 377-381
- 4 Crow MT, Kushmerick MJ (1982) Chemical energetics of slow- and fast-twitch muscle of the mouse. *J Gen Physiol* 79: 147-166
- 5 Gaesser GA, Poole DC (1996) The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 24, 35-71
- 6 Hawkes EZ, Nowicky AV, McConnell AK (2007) Diaphragm and intercostal surface EMG and muscle performance after acute inspiratory muscle loading. *Respir Physiol Neurobiol* 155: 213-219
- 7 Johnson BD, Babcock MA, Suman OE, Dempsey JA (1993) Exercise-induced diaphragmatic

- fatigue in healthy humans. *J Physiol* 460: 385-405
- 8 Katayama K, Iwamoto E, Ishida K, Koike T, Saito M (2012) Inspiratory muscle fatigue increases sympathetic vasomotor outflow and blood pressure during submaximal exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 302: R1167-R1175
- 9 Matsunaga S, Inashima S, Tsuchimochi H, Yamada T, Hazama T, Wada M (2002) Altered sarcoplasmic reticulum function in rat diaphragm after high-intensity exercise. *Acta Physiol Scand* 176: 227-232
- 10 右田孝志, 平木場浩二 (2004) 一定負荷運動時の酸素摂取動態の生理的意義. *日本運動生理学雑誌* 11: 39-60
- 11 Moore RL, Gollnick PD (1982) Response of ventilatory muscles of the rat to endurance training. *Pflugers Arch* 392: 268-271
- 12 Pool DC, Schaffartzik W, Knight DR, Derion T, Kennedy B, Guy HJ, Prediletto R, Wagner PD (1991) Contribution of exercising legs to the slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *J Appl Physiol* 71: 1245-1260
- 13 Powers SK, Criswell D (1996) Adaptive strategies of respiratory muscle in response to endurance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 28: 1115-1122
- 14 Powers SK, Demirel HA, Coombes JS, Fletcher L, Calliaud C, Vrabas I, Prezant D (1997) Myosin phenotype and bioenergetic characteristics of rat respiratory muscles. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1573-1579
- 15 Romer LM, Polkey MI (2008) Exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance. *J Appl Physiol* 104: 879-888
- 16 Rossiter HB, Ward SA, Howe FA, Kowalchuk JM, Griffiths JR, Whipp BJ (2002) Dynamics of intramuscular ^{31}P -MRS Pi peak splitting and the slow components of PCr and O_2 uptake during exercise. *J Appl Physiol* 93: 2059-2069
- 17 Sahlin K, Sorensen JB, Gladden LB, Rossiter HB, Pedersen PK (2005) Prior heavy exercise eliminates $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ slow component and reduces efficiency during submaximal exercise in humans. *J Physiol* 564: 765-773
- 18 辰喜亮介 (1990) ヒト横隔膜の筋線維構成について. *昭医学会誌* 50: 513-521
- 19 玉木伸和 (1985) ラット横隔膜の筋線維タイプ組成および毛細血管分布の特徴. *昭医学会誌* 45: 421-429
- 20 Yano T, Yunoki T, Ogata H (2001) Relationship between the slow component of oxygen uptake and the potential reduction in maximal power output during constant-load exercise. *J Sports Med Phys Fitness* 41: 165-169
- 21 Whipp BJ (1994) The slow component of O_2 uptake kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1319-1326

Oxygen-uptake kinetics during inspiratory resistive breathing

Takahiro YUNOKI, Zheng XIAO, Kazuki SHIRAKAWA,
Chang-Shun LIAN, Tokuo YANO

Key words

high-intensity exercise, respiratory muscle fatigue, oxygen uptake, slow component

Abstract

It is known that a constant-load high-intensity exercise brings about an excessive increase in oxygen uptake ($\dot{V}O_2$; excess $\dot{V}O_2$). Most of the excess $\dot{V}O_2$ has been reported to originate in an exercising muscle (e.g., leg muscle). However, respiratory muscles also require oxygen to do a ventilatory movement necessary for the leg exercise. We tried to extract and reproduce $\dot{V}O_2$ resulting from respiratory muscle activity, and we examined the relationship between respiratory muscle activity and excess $\dot{V}O_2$. Eight healthy subjects performed a 6-min voluntary hyperventilation three times by using a breathing mask with an inspiratory resistive load (40cmH₂O; inspiratory resistive breathing, IRB). Ventilation during the IRB performed three times was maintained at the same level (~ 70 L/min). Fatigue indexes of respiratory muscles (effort sense of breathing and maximal inspiratory pressure) were significantly changed by the repetition of IRB, indicating the development of respiratory muscle fatigue. $\dot{V}O_2$ overshoot transiently for 30 sec after the start of IRB and then showed a steady state until the end of IRB. There was no significant difference in $\dot{V}O_2$ kinetics during the IRB performed three times. These results suggest that fatigue of inspiratory muscles is not involved in excess $\dot{V}O_2$ during constant-load high-intensity exercise as long as the work of breathing stays constant.