

吸気負荷強度の違いが最大下一定負荷走運動中の 換気応答及び循環応答に及ぼす影響

こ ぎょうえつ¹ ・ こいけ じゅん² ・ おがわ たけし³
胡 曉越¹ ・ 小池 潤² ・ 小川 剛司³

¹教養学科スポーツ科学専攻（卒業）・²教育学研究科健康科学専攻・³表現活動教育系（保健体育部門）

(2023年4月20日 受付)

(2023年8月25日 査読完了)

抄録：本研究の目的は、最大下一定速度での走運動における異なる強度の吸気負荷が呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにすることであった。健康な若年の男女12名が実験に参加した。実験は、トレッドミルを用いた漸増負荷走行試験によって最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)を測定した。また、スパイロメーターを用いて最大随意努力吸気圧(MIP)を測定した。その後、別日に60% $\dot{V}O_{2max}$ 速度での一定負荷走行を、吸気負荷装置を用いて吸気負荷を加えながら行った。このときの吸気負荷は20%MIPから開始し、60呼吸毎に20%MIPずつ負荷を漸増させ、吸気疲労を起こすまで走行を継続した。この時、ガス分析により酸素摂取量($\dot{V}O_2$)および換気量(\dot{V}_E)を、インピーダンス法により心拍出量(CO)および心拍数(HR)を測定した。その結果、運動中の $\dot{V}O_2$ および \dot{V}_E は20%MIP以上の吸気負荷で吸気無負荷時よりも有意に高かったが($P<0.05$)、吸気負荷が増加してもそれ以上増加しなかった。呼吸困難感は吸気負荷の増加に伴って増加した($P<0.05$)。COは40%MIP以上、HRは20%MIP以上の吸気負荷強度から吸気負荷の増加に伴って高まった($P<0.05$)。これらの結果から、最大下運動時の吸気負荷の高まりとともに循環応答は高まる一方で、換気量は高められないことが示唆された。

キーワード：運動、呼吸循環、呼吸筋、酸素摂取量

I 諸言

近年、運動パフォーマンスの改善を目的として安静時に吸気に負荷を加える吸気筋トレーニング(Inspiratory muscle training, IMT)が試みられている(McConnell 2011, Sheel 2002, HajGhanbari et al. 2013)。多くの先行研究では、約5週間のIMTによる吸気筋力の向上(Sonetti et al. 2001, Romer et al. 2002, Downey et al. 2007)や持続的運動パフォーマンスの改善(Esposito et al. 2010, Sonetti et al. 2001, Romer et al. 2002)が報告されており、これらの適応は、最大随意努力吸気圧(maximal inspiratory pressure, MIP)の50-60%強度の吸気負荷によるIMTによって生じることが報告されている(Sheel 2002, McConnell and Romer 2004)。さらに、近年ではIMTの新たな手法として最大下強度(最大運動強度の60-70%)での運動中に吸気負荷を加える吸気負荷運動トレーニング(Inspiratory muscle loaded exercise training, IMLET)が考案されている(McEntire et al. 2016, Ogawa et al. 2020)。McEntireら(2016)は、自転車運動中に15%MIPの吸気負荷を加えるIMLETを行い、呼吸筋力の改善及びタイムトライアルのパフォーマンス改善を報告している。一方で、Ogawaら(2020)は自転車運動中に50%MIPの吸気負荷を加え、呼吸筋力の改善及び低酸素下での運動能力低下を抑制したことを報告している。これらのIMLETの効果は、運動中に吸気負荷を加えた際の呼吸循環応答に身体が適応した結果であると考えられる。しかしながら、IMLETに用いられる吸気負荷の強度は先行研究が少なく、トレーニング効果を得るために適切と考えられる吸気負荷強度は明らかでない。また、運動中に加える吸気負荷強度の違いが呼吸循環応答に及ぼす影響は十分に明らかでない。

運動中は安静時と比較して、換気量(\dot{V}_E)が高まるとともに、心拍出量(CO)が増加するなど、呼吸循環応答

は運動の必要な酸素摂取量($\dot{V}O_2$)に対して合理的に調節される。運動時の \dot{V}_E の増加に着目すると、呼吸筋仕事量(WOB)は換気量の増加に対して、指数関数的に増加することが知られている。運動時の \dot{V}_E 増大は横隔膜や肋間筋をはじめとした呼吸筋の活動を高め、呼吸筋での酸素需要が増加する。特に高強度運動時では、呼吸筋の $\dot{V}O_2$ は、全身の $\dot{V}O_2$ の約 10-15%にまで達することが知られている(Aaron et al. 1992)。さらに、高強度自転車運動中に呼吸アシスト、あるいは吸気負荷を加え、WOBを増減させた研究では、WOBを増減に伴って全身の $\dot{V}O_2$ 及び心拍数(HR)に変化は見られなかったものの、WOBの変化率と脚の血流量の変化率の間に負の相関がみられたことが報告されている(Harms et al. 1997)。このように、COが逼迫するような高強度運動時では、高い呼吸筋の仕事量によって、呼吸筋と活動筋の間で血流競合が生じることが示唆されている(Sheel et al. 2018, Dominelli et al. 2017)。一方で、最大下強度での自転車運動中にWOBを増減させた研究では、WOBを増加させたとしても通常呼吸時と比較して脚の血流量に変化がみられないものの、全身の $\dot{V}O_2$ 及びHRは増加したことを報告している(Wetter et al. 1999)。したがって、最大下運動時の吸気負荷による、呼吸筋活動の増加に伴う呼吸筋の $\dot{V}O_2$ の増加は、COの増加によって生じた可能性があると考えられる。しかしながら、最大下運動中に吸気負荷を加えた際のCOの変化は明らかでない。

最大下一定強度での運動中の吸気負荷は、吸気負荷の高さによって全身の $\dot{V}O_2$ 及びCO増加の程度が異なることが予想されるが、これまでのIMT及び最大下運動時に吸気負荷を加えた研究での吸気負荷強度は一定であり(Wetter et al. 1999, Turner et al. 2012)、吸気負荷の強度の違いによって運動時の呼吸循環応答に変化がみられるかは明らかでない。さらに、運動中の吸気負荷が呼吸循環応答に及ぼす影響を検討した先行研究の多くは自転車エルゴメーターを用いた自転車運動時のものであり(Harms et al. 1997, Wetter et al. 1999, Nielsen et al. 2001, Turner et al. 2012)、トレッドミルを用いた走運動中の吸気負荷が呼吸循環応答に及ぼす影響を検討した研究はされていない。これらを調べることはIMLETの奏効メカニズムを明らかにする上で重要なことであると考えられる。そこで、本研究はトレッドミルを用いて、最大下一定強度での走運動中における吸気負荷が呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

II 方法

1. 被験者

日常的に運動を行っている呼吸循環器疾患のない健康な若年の男女を募り、計12名(男性:10名, 女性:2名)が実験に参加した。被験者の最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)は、男性で $71.6 \pm 5.4 \text{ ml/kg/min}$ 、女性で $46.0 \pm 1.5 \text{ ml/kg/min}$ であった。被験者には、実験参加前に本研究の目的及び実験実施上で起こり得る危険性について、文書及び口頭で十分に説明し、実験同意書への署名及び実験参加の同意を得た。本研究はヘルシンキ宣言に則り、被験者の倫理・人権・個人情報の保護への配慮し実験を実施した。また、本研究は大阪教育大学倫理委員会の承認を得て実施された(審査番号20060)。

2. 実験手順

本研究では、一定負荷運動中の運動強度を決定するための $\dot{V}O_{2max}$ テストを行い、後日に最大吸気口腔内圧測定及び吸気負荷運動テストを行った。すべての実験は室温 $23.1 \pm 0.6^\circ\text{C}$ に設定された実験室にて行った。全ての被験者は実験に参加する前に実験手順について説明を受け、実験装置や運動様式に慣れるために、少なくとも2回の実験プロトコルの練習を行った。また、実験期間中は被験者の日常的なトレーニングなどを制限しなかったが、それぞれのテスト前日から激しい運動や、カフェイン及びアルコールの摂取は避けるように指示した。

3. 測定項目

換気応答は、質量分析装置(ARCO-2000N, ARCO, 日本)を用いて呼気ガスを分析した。質量分析装置は校正ガス(大気相当の O_2 : 20.92%; CO_2 : 0.038%; N_2 , Balance)を用いて校正した。それぞれのテスト中の $\dot{V}O_2$ 、二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$)、 \dot{V}_E 、酸素換気当量($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)、二酸化炭素換気当量($\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$)、一回換気量(V_T)、呼吸数(f_R)、呼気終末二酸化炭素分圧($P_{Et}CO_2$)を連続的に測定した。

循環応答はインピーダンス式心拍出量計 (Physio Flow Q-Link, Manatec, Biomedical, France) を用いて, HR, 一回拍出量 (SV), CO を一拍ごとに測定した。動脈血酸素飽和度 (SaO_2) は被験者の前額からパルスオキシメーター (N-560, Covidien Med, Ireland) を用いて測定し, 60 秒毎に記録した。

主観的運動強度 (RPE) は Borg スケール (Borg & Linderholm et al. 1967) を, 呼吸困難感 (Dyspnea) は Modified Borg スケール (Kendrick et al. 2000) を用いて, 60 秒ごとに対象者に尋ね, 記録した。

4. $\text{VO}_{2\text{max}}$ テスト

$\text{VO}_{2\text{max}}$ テストは, トレッドミル (T.K.K.1245; 竹井機器工業株式会社; 日本) を用いて漸増負荷運動を疲労困憊まで継続した。対象者は $\text{VO}_{2\text{max}}$ テスト開始前に任意のストレッチを行った。その後, トレッドミルでの 3 分間のウォーミングアップを行った。このときの走速度は男性が 180m/min (0% 傾斜), 女性が 160m/min (0% 傾斜) であった。ウォーミングアップ終了後, 被験者は, 質量分析装置センサーに蛇管で接続された呼気マスク (601M, ARCO, 日本) 及び心拍計 (H10, POLAR, Finland) を取り付けた。テスト開始後はトレッドミル上で 3 分間の安静を保ち, その後, 分速 180m の運動負荷から走運動を開始した。走速度は 1 分毎に 10m ずつ漸増させ, 被験者が疲労困憊に至るまで継続した。疲労困憊の基準は, 対象者が走行位置を維持できず, 80cm 以上後方に下がった時点として運動を中止した。テスト中は VO_2 及び HR, SaO_2 , RPE を測定し, 60 秒毎に平均して解析に用いた。また, SaO_2 , RPE は 60 秒毎に記録した。 $\text{VO}_{2\text{max}}$ の出現の判定は, 1) 運動負荷が増加しているにもかかわらず VO_2 が増加しない。2) 呼吸交換比が 1.1 より大きい。3) HR が年齢から推定された最大 HR (220-年齢) の 90% を上回るうち 2 つを達成しているかとし, 全ての被験者において確認された。

5. 最大随意努力吸気圧測定

最大随意努力吸気圧 (Maximum Inspiratory Pressure, MIP) は, スパイロメーター (AS-507, ミナト医科学, 日本) を用いて測定した。測定肢位は立位姿勢とし, 残気量位から最大吸気努力を約 1.5 秒間継続した。その際, 対象者はノーズクリップを装着した。MIP の測定は, 3 回行い, その平均値を算出した。

6. 吸気負荷走運動テスト

被験者は, 実験当日, 実験室に入室後, 任意のストレッチとトレッドミルを用いて 3 分間の走運動によるウォーミングアップ [男性: 180m/min (0% 傾斜), 女性: 160m/min (0% 傾斜)] を行った。ウォーミングアップ終了後に, 実験装置を装着し, 吸気負荷走運動テストを開始した (Figure 1)。測定開始後, トレッドミル上で 5 分間の立位安静を保った後, 主運動を行った。主運動は, 60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 強度速度での走運動中に吸気負荷 (Inspiratory resistive loading, IRL) を疲労困憊に至るまで断続的に加えるものとした。走行開始から 3 分間は IRL なしでの走運動を行った (Baseline)。IRL は圧閾値負荷呼吸筋トレーナー (Power breatheK5; IMT Technologies, Birmingham; UK) を用いて, 20% MIP から開始し, 60 呼吸毎に 20% MIP (20% MIP-80% MIP) ずつ負荷を増加させた。80% MIP 負荷時には, ほとんどの被験者が呼吸を継続することができず, 解析から除外した。疲労困憊の基準は, 対象者が走行位置を維持できず, 80 cm 以上後方に下がった時点, または IRL 時に吸気圧の不足によって呼吸筋トレーナーのシャッターが開かず, 3 回連続で吸気に失敗した時点とした。テスト中は, 換気応答 (VO_2 , VCO_2 , V_E , V_E/VO_2 , V_E/VCO_2 , V_T , f_R , $P_{\text{ET}}\text{CO}_2$) 及び循環応答 (HR, SV, CO), SaO_2 及び RPE, Dyspnea を測定し, 換気応答及び循環応答は 1 秒毎に, SaO_2 は 30 秒毎に, RPE, Dyspnea は 1 分毎に平均して解析に用いた。

7. 統計解析

実験によって得られたデータはすべて平均値 ± 標準偏差で示した。全ての統計解析は解析ソフトウェア Prism 9 (GraphPad Software, Boston, MA) を用いて行った。 VO_2 及び VCO_2 , V_E , V_T , f_R , $P_{\text{ET}}\text{CO}_2$, HR, SV, CO, SaO_2 , RPE, 呼吸困難感は一元配置分散分析 (ANOVA) を用いて統計解析し, 事後検定はボンフェローニ法 (Bonferroni) を用いた。また, 2 変量の相関分析はピアソン相関係数 (r) を使用した。全ての統計解析の有意水準は 0.05 未満とした。

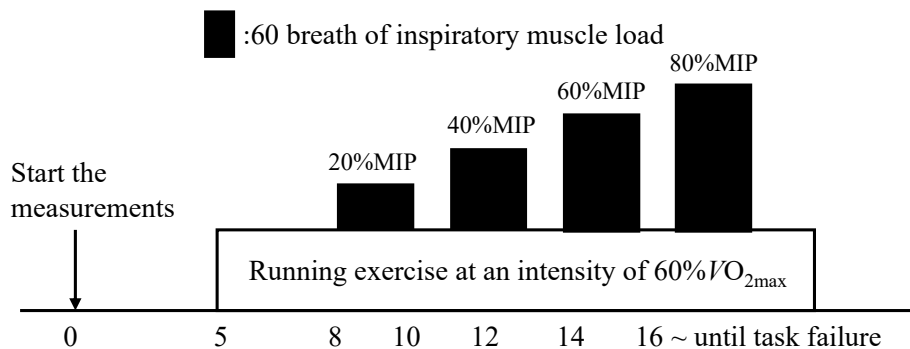


Figure 1: Inspiratory loaded exercise testing protocol

Inspiratory loaded exercise testing protocol: The inspiratory load exercise test was started after 5 minutes resting period. The inspiratory loading exercise was designed to involve the continuous application of inspiratory load during running exercise at an intensity of 60% VO_{2max} . The intensity of inspiratory loading was started at 20% of maximal inspiratory mouth pressure (20%MIP), and the load was increased by 20%MIP every 60 breaths until breathing failure.

Ⅲ 結果

吸気負荷運動テストにおける呼吸循環応答の結果を Table 1 及び Figure 2, 3 に示す. 換気応答については, VO_2 及び VCO_2 , V_E , V_T にそれぞれ主効果が認められ, 事後検定では, VO_2 及び VCO_2 , V_E で 20%MIP 及び 40%MIP, 60%MIP は Baseline と比較して有意に高値を示した (Table 1 及び Figure 2). V_T は 40%MIP で Baseline と比較して有意に高値を示した. Figure 4 に 20, 40, 60%MIP 吸気負荷による Baseline からの VO_2 の増加率と V_E の増加率の相関関係を示す. すべての吸気負荷において, VO_2 の増加率と V_E の増加率の間に有意な相関関係がみられた. 循環応答については, HR 及び CO に主効果が認められたが, SV に有意な差はみられなかった (Figure 3). 呼吸困難感の主効果が認められた (Figure 2). さらに, RPE に主効果が認められ, Baseline を含む全ての強度間に有意な差がみられ, IRL の強度が高まるにつれて有意に高値を示した (Table 1).

Table 1: Results of the Inspiratory loading exercise test

	Baseline	20%MIP	40%MIP	60%MIP	F value	P value
VO_2 [ml/min]	2204.1 ± 299.7	2509.3 ± 354.3*	2593.9 ± 395.7*	2601.5 ± 373.6*	$F = 49.19$	$P < 0.0001$
VCO_2 [ml/min]	1699.4 ± 273.0	2211.0 ± 381.9*	2384.2 ± 384.7*†	2329.9 ± 343.9*	$F = 57.44$	$P < 0.0001$
V_T [L]	1.5 ± 0.3	1.7 ± 0.5	1.8 ± 0.4*	1.7 ± 0.4	$F = 4.89$	$P = 0.0176$
f_R [b/min]	34.1 ± 5.8	39.0 ± 9.3	40.6 ± 9.1	39.4 ± 8.2	$F = 3.00$	$P = 0.0648$
$P_{ET}CO_2$ [mmHg]	28.9 ± 6.3	31.0 ± 6.0	32.8 ± 6.0	34.3 ± 5.9	$F = 1.71$	$P = 0.1665$
SO_2 [%]	94.8 ± 3.3	95.1 ± 3.9	96.1 ± 2.7	94.1 ± 3.1†	$F = 3.81$	$P = 0.0448$
RPE	7.9 ± 0.7	9.5 ± 1.5*	11.5 ± 2.3*†	13.0 ± 2.8*††	$F = 35.23$	$P < 0.0001$

Values are mean ± SD. VO_2 , oxygen uptake: VCO_2 , carbon dioxide elimination: V_T , tidal volume: f_R , respiratory rate: $P_{ET}CO_2$, end-tidal carbon dioxide pressure: SO_2 , arterial oxyhemoglobin saturation: RPE, Rating of Perceived Exertion. MIP, maximum inspiratory pressure: *, significantly different from Baseline ($P < 0.05$): †, significantly different from 20%MIP ($P < 0.05$): ††, significantly different from 40%MIP ($P < 0.05$).

Ⅳ 考察

本研究はトレッドミルを用いて, 最大下一定強度での走運動中における吸気負荷の強度の違いが, 呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした. 本研究の主な結果は, 1) 呼吸困難感は吸気負荷強度の増加に伴って増加していく傾向がみられた, 2) VO_2 および V_E は Baseline と比較して, 20%MIP で有意に高値を示したが, 吸気負荷強度による違いはなかった, 3) HR は 20%MIP 以上, CO は 40%MIP 以上の吸気負荷時に

Baselineと比較して有意に高値を示し、吸気負荷強度が高まるにつれてHRおよびCOの増加は高くなる傾向がみられた。これらの結果から、最大下運動時の吸気負荷は、呼吸困難感の増加を伴って、呼吸循環応答および酸素摂取量を増加させるものの、循環応答と呼吸代謝応答では吸気負荷強度の影響が異なることが示唆された。

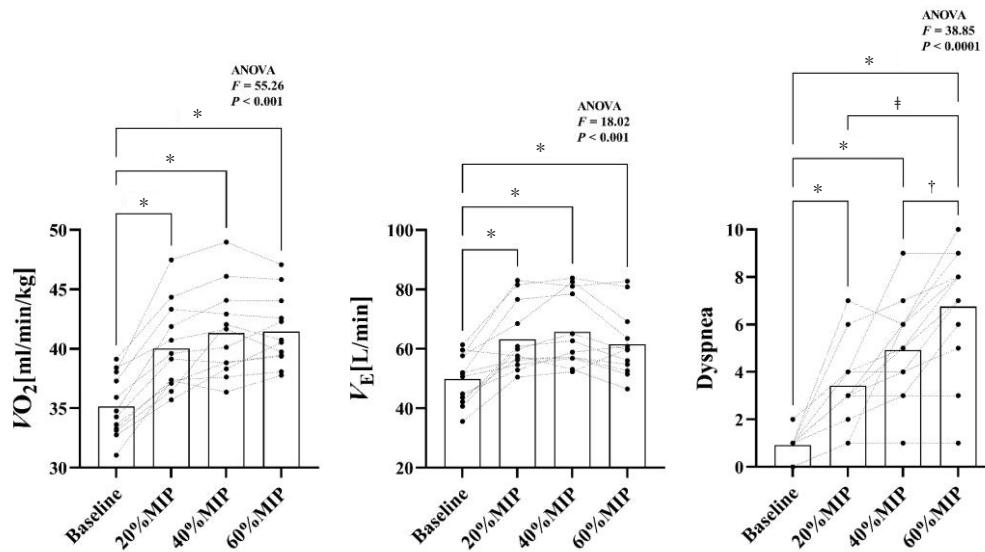


Figure 2: Results of the $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E and Dyspnea responses with the inspiratory loading

Values are mean \pm SD. $\dot{V}O_2$, oxygen uptake: \dot{V}_E , minute pulmonary ventilation: MIP, maximum inspiratory mouth pressure:

*, significantly different from Baseline; †, significantly different from 20%MIP; ‡, significantly different from 40%MIP.

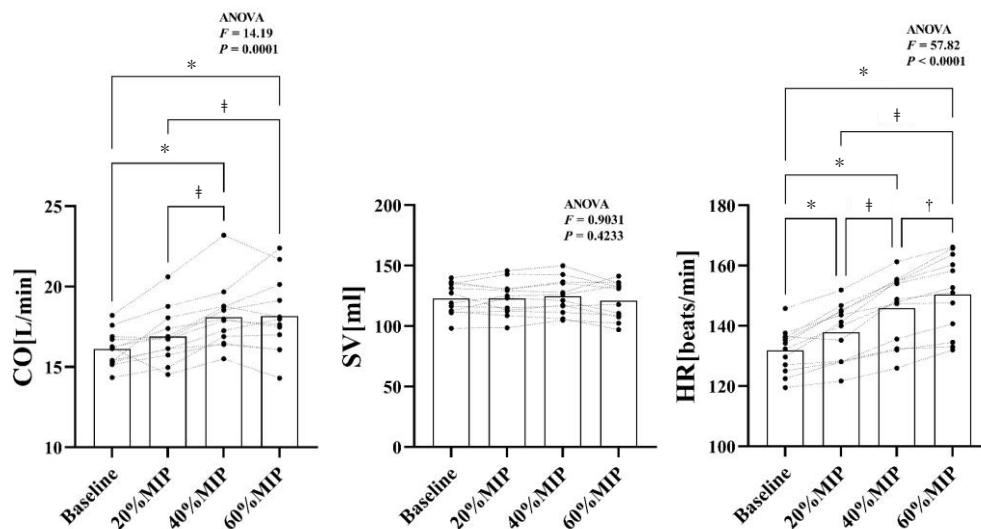


Figure 3: Results of the circulatory responses with the inspiratory loading

Values are mean \pm SD. CO, cardiac output: SV, stroke volume: HR, heart rate: MIP, maximum inspiratory mouth pressure:

*, significantly different from Baseline; †, significantly different from 20%MIP; ‡, significantly different from 40%MIP.

運動中の吸気負荷が代謝応答に及ぼす影響として、50% $\dot{V}O_{2max}$ の運動強度で約-35 cmH₂Oの吸気負荷を加えることにより、全身の $\dot{V}O_2$ が増加したことが報告されている (Wetter et al. 1999). 本研究では60% $\dot{V}O_{2max}$ 強度の運動中に吸気負荷を加え、20%MIP以上の強度で通常呼吸時と比較して $\dot{V}O_2$ が増加し、Wetterら(1999)の結果と一致した。 $\dot{V}O_2$ が増加した要因として、吸気負荷によってWOBが増加することで、呼吸筋の酸素需要量が増加したことが考えられる。Wetterら(1999)は、50% $\dot{V}O_{2max}$ での自転車運動時に約-35 cmH₂Oで吸気負荷を行ったところ、通常呼吸時と比較してWOBが約70%増加し、 $\dot{V}O_2$ は100 mL/min増加したことを報告している。-35

cmH₂Oの吸気負荷強度は本研究における20%MIPに相当するものの、本研究での20%MIPにおける $\dot{V}O_2$ の増加は約300 mL/minであり、運動強度の違いはあるものの(50% vs. 60% $\dot{V}O_{2max}$)、本研究の $\dot{V}O_2$ の増加量はWetterら(1999)の約3倍であった。この結果の不一致は、 \dot{V}_E の違いが影響していることが考えられる。Wetterら(1999)の研究において、 \dot{V}_E は吸気負荷時に通常呼吸時と比較して、約10 L/min低下したが、本研究では、吸気負荷時は約13.5 L/min増加し(Figure 2)、その分だけ、本研究では、Wetterら(1999)よりも大きく、 $\dot{V}O_2$ が増加した可能性がある。

本研究では、吸気負荷の強度の増加に対して、 \dot{V}_E は20%MIPでBaselineと比較して高値を示したが、それ以上の吸気負荷を増加しても \dot{V}_E は増加しなかった。一方で、Dyspneaは増加し続けており、吸気負荷増加によって呼吸努力を増加させても \dot{V}_E を増加させられなかった可能性がある。すなわち、強い呼吸努力によって、呼吸筋活動自体は増加していたものと考えられる。また、本研究では、各吸気負荷強度時において $\dot{V}O_2$ の変化率と \dot{V}_E の変化率間に有意な正の相関関係が見られた(Figure 4)。換気量自体は吸気負荷増加による $\dot{V}O_2$ の増大と関係があることが示された。

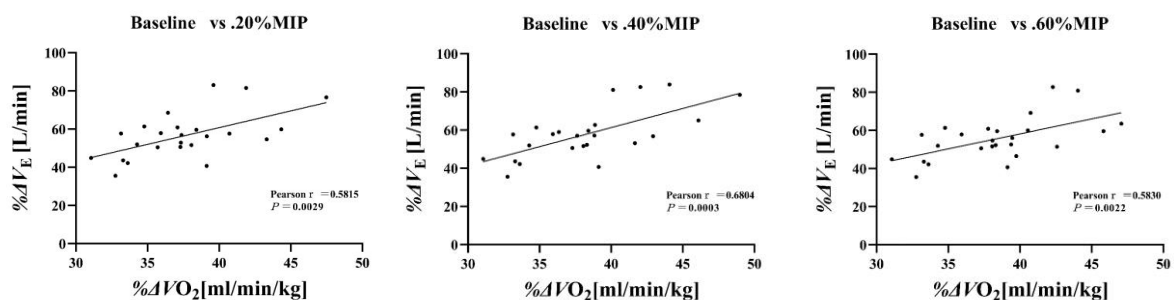


Figure 4: The relationship between the percentage change of oxygen uptake ($\% \Delta \dot{V}O_2$) and minute ventilation ($\% \Delta \dot{V}_E$) with each the inspiratory load

吸気負荷時の循環応答について、通常呼吸時と比較してSVは有意な増加が見られなかったものの、HRの増加によってCOは有意に増加した。したがって、最大下運動時の吸気負荷による、呼吸筋活動の増加に伴う呼吸筋の $\dot{V}O_2$ の増加は血流の増加によって生じたものと考えられる。一方で、20%MIP負荷時には循環応答に有意な高まりは見られていない。先行研究においては、脚の自転車運動中に腕エルゴメーターを用いた腕の運動を組み合わせた研究では、脚と腕の運動を組み合わせた条件は脚の自転車運動のみの条件と比較して、COが増加する一方で、動静脈酸素較差も増加することが報告されている(Secher et al. 1977)。さらに、Vogiatzisら(2009)は、漸増負荷運動時に呼吸筋の酸素レベル(StO_2)を測定し、 StO_2 は筋組織への酸素供給と抽出のバランスを表すが(Horiuchi et al. 2019)、最大運動の約60%の運動強度から呼吸筋の StO_2 が低下し始めることが報告されている(Vogiatzis et al. 2009)。この時の StO_2 の低下は組織での酸素抜き取りが増加するか、血流の低下によって生じる。本研究においても、吸気負荷によって、血流増加なしに組織での酸素抜き取りが増加した可能性があるが、呼吸筋の動静脈酸素較差を測定していない。

高強度運動時は換気増大により、呼吸筋の血流需要量が高まり、呼吸筋と主働筋の間で血流競合が生じることや(Harms et al. 1997, 1998)、呼吸筋疲労が生じることが報告されており(Babcock et al. 1995, Johnson et al. 1996)、血流の分配に影響を及ぼすことが示唆されている(Sheel 2002, Sheel et al. 2018)。実験参加者のうち12名が60%MIP以上の吸気負荷強度に吸気継続に失敗、すなわち呼吸筋が疲労困憊に陥っていると考えられる。そのため、呼吸筋活動由来の代謝受容器反射が生じ(Dempsey et al. 2006, Fregosi & Dempsey 1986)、活動筋において末梢血管が収縮し、血流が制限されていた可能性がある(Harms et al. 1997, 1998)。実際に全身の疲労状態の指標であるRPEは吸気負荷の増加に伴って高まっている。したがって、強い吸気負荷でも $\dot{V}O_2$ が大きく増加しなかった原因として、活動筋での血流制限が推察される。

本研究の結果を運動中に吸気に負荷する呼吸筋トレーニングとして扱うならば、中程度の運動強度において吸気負荷をすることで、呼吸循環応答および代謝応答に適応をもたらす可能性がある。この時、吸気負荷は

20%MIPであっても、呼吸困難感や呼吸代謝応答に負荷を与えることができるが、循環器への負荷は40%MIP以上が必要であることが示唆され、今後の呼吸筋トレーニング法の開発に寄与する結果となった。

V 結論

本研究はトレッドミルを用いて、最大下一定強度での走運動中における吸気負荷が呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的として行った。その結果、 $\dot{V}O_2$ および \dot{V}_E は20%MIP吸気負荷で有意に増加したが、吸気負荷強度間で有意な変化はなかった一方で、HRおよびCOは吸気負荷強度が高まるに従って増加した。これらの結果から、少なくとも20%MIP強度以上の吸気負荷によって代謝および循環応答が変化するとともに、循環応答は吸気負荷が高まるとともに亢進することが示唆された。

謝辞

本研究を行うにあたって、実験に協力していただいた大阪教育大学体育会陸上競技部の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Aaron, E. A., Seow, K. C., Johnson, B. D., & Dempsey, J. A. (1992). Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *Journal of applied physiology*, 72(5), 1818-1825.
- [2] McConnell, A. (2011). Breathe strong, perform better. *Human Kinetics*.
- [3] Borg, G., & Linderholm, H. (1967). Perceived exertion and pulse rate during graded exercise in various age groups. *Acta Medica Scandinavica*, 181(S472), 194-206.
- [4] Babcock, M. A., Pegelow, D. F., McClaran, S. R., Suman, O. E., & Dempsey, J. A. (1995). Contribution of diaphragmatic power output to exercise-induced diaphragm fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 78(5), 1710-1719.
- [5] Dempsey, J. A., Romer, L., Rodman, J., Miller, J., & Smith, C. (2006). Consequences of exercise-induced respiratory muscle work. *Respiratory physiology & neurobiology*, 151(2-3), 242-250.
- [6] Dominelli, P. B., Archiza, B., Ramscook, A. H., Mitchell, R. A., Peters, C. M., Molgat-Seon, Y., & Sheel, A. W. (2017). Effects of respiratory muscle work on respiratory and locomotor blood flow during exercise. *Experimental physiology*, 102(11), 1535-1547.
- [7] Downey, A. E., Chenoweth, L. M., Townsend, D. K., Ranum, J. D., Ferguson, C. S., & Harms, C. A. (2007). Effects of inspiratory muscle training on exercise responses in normoxia and hypoxia. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 156(2), 137-146.
- [8] Esposito, F., Limonta, E., Alberti, G., Veicsteinas, A., & Ferretti, G. (2010). Effect of respiratory muscle training on maximum aerobic power in normoxia and hypoxia. *Respiratory physiology & neurobiology*, 170(3), 268-272.
- [9] Fregosi, R. F., & Dempsey, J. A. (1986). Effects of exercise in normoxia and acute hypoxia on respiratory muscle metabolites. *Journal of applied physiology*, 60(4), 1274-1283.
- [10] HajGhanbari, B., Yamabayashi, C., Buna, T. R., Coelho, J. D., Freedman, K. D., Morton, T. A., ... & Reid, W. D. (2013). Effects of respiratory muscle training on performance in athletes: a systematic review with meta-analyses. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(6), 1643-1663.
- [11] Harms, C. A., Babcock, M. A., McClaran, S. R., Pegelow, D. F., Nিকে, G. A., Nelson, W. B., & Dempsey, J. A. (1997). Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *Journal of applied physiology*, 82(5), 1573-1583.
- [12] Harms, C. A., Wetter, T. J., McClaran, S. R., Pegelow, D. F., Nিকে, G. A., Nelson, W. B., & Dempsey, J. A. (1998). Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *Journal of*

- applied physiology, 85(2), 609-618.
- [13] Horiuchi, M., Handa-Kirihara, Y., Abe, D., & Fukuoka, Y. (2019). Combined effects of exposure to hypoxia and cool on walking economy and muscle oxygenation profiles at tibialis anterior. *Journal of Sports Sciences*, 37(14), 1638-1647.
 - [14] Johnson, B. D., Aaron, E. A., Babcock, M. A., & Dempsey, J. A. (1996). Respiratory muscle fatigue during exercise: implications for performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 28(9), 1129-1137.
 - [15] Kendrick, K. R., Baxi, S. C., & Smith, R. M. (2000). Usefulness of the modified 0-10 Borg scale in assessing the degree of dyspnea in patients with COPD and asthma. *Journal of Emergency Nursing*, 26(3), 216-222.
 - [16] McConnell, A. K., & Romer, L. M. (2004). Respiratory muscle training in healthy humans: resolving the controversy. *International Journal of Sports Medicine*, 25(4), 284-293.
 - [17] McEntire, S. J., Smith, J. R., Ferguson, C. S., Brown, K. R., Kurti, S. P., & Harms, C. A. (2016). The effect of exercise training with an additional inspiratory load on inspiratory muscle fatigue and time-trial performance. *Respiratory physiology & neurobiology*, 230, 54-59.
 - [18] Nielsen, H. B., Boesen, M., & Secher, N. H. (2001). Near-infrared spectroscopy determined brain and muscle oxygenation during exercise with normal and resistive breathing. *Acta Physiologica Scandinavica*, 171(1), 63-70.
 - [19] Ogawa, T., Nagao, M., Fujii, N., & Nishiyasu, T. (2020). Effect of inspiratory muscle-loaded exercise training on peak oxygen uptake and ventilatory response during incremental exercise under normoxia and hypoxia. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 12, 1-10.
 - [20] Romer, L. M., McConnell, A. K., & Jones, D. A. (2002). Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists: effects of inspiratory muscle training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(5), 785-792.
 - [21] Secher, N. H., Clausen, J. P., Klausen, K., Noer, I., & Trap-Jensen, J. (1977). Central and regional circulatory effects of adding arm exercise to leg exercise. *Acta physiologica scandinavica*, 100(3), 288-297.
 - [22] Sheel, A. W., Boushel, R., & Dempsey, J. A. (2018). Competition for blood flow distribution between respiratory and locomotor muscles: implications for muscle fatigue. *Journal of applied physiology*, 125(3), 820-831.
 - [23] Sheel, A. W. (2002). Respiratory muscle training in healthy individuals: physiological rationale and implications for exercise performance. *Sports Medicine*, 32, 567-581.
 - [24] Sonetti, D. A., Wetter, T. J., Pegelow, D. F., & Dempsey, J. A. (2001). Effects of respiratory muscle training versus placebo on endurance exercise performance. *Respiration Physiology*, 127(2-3), 185-199.
 - [25] Turner, L. A., Tecklenburg-Lund, S. L., Chapman, R. F., Stager, J. M., Wilhite, D. P., & Mickleborough, T. D. (2012). Inspiratory muscle training lowers the oxygen cost of voluntary hyperpnea. *Journal of Applied Physiology*, 112(1), 127-134.
 - [26] Vogiatzis, I., Athanasopoulos, D., Habazettl, H., Kuebler, W. M., Wagner, H., Roussos, C., & Zakynthinos, S. (2009). Intercostal muscle blood flow limitation in athletes during maximal exercise. *The Journal of Physiology*, 587(14), 3665-3677.
 - [27] Wetter, T. J., Harms, C. A., Nelson, W. B., Pegelow, D. F., & Dempsey, J. A. (1999). Influence of respiratory muscle work on VO₂ and leg blood flow during submaximal exercise. *Journal of Applied Physiology*, 87(2), 643-651.

Effect of Inspiratory Loading during Moderate Constant Running on Cardio-Respiratory Responses

HU, Xiaoyue¹, KOIKE, Jun², and OGAWA, Takeshi³

¹School of Sports Science, Osaka Kyoiku University, ²Graduate school, Osaka Kyoiku University,

³Division of Art, Music, and Physical Education, Osaka Kyoiku University

Summary: The current study aimed to determine the effects of inspiratory loading at various intensities during a submaximal constant-speed running on the respiratory and circulatory responses. Twelve healthy young men and women participated in the experiment. As a pretest, maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) was measured by an incremental running test on a treadmill to exhaustion, and maximal voluntary effort inspiratory pressure (MIP) was measured using a spirometer. A constant-load running test was conducted on a separate day at 60% $\dot{V}O_{2\max}$ with the inspiratory load. The inspiratory load was started at 20% MIP, which gradually increased by 20% every 60 breaths until inspiratory failure occurred. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and minute ventilation (\dot{V}_E) were measured using a gas analyzer, and cardiac output (CO) and heart rate (HR) were measured by an impedance method. As a result, both $\dot{V}O_2$ and \dot{V}_E were significantly higher above 20%MIP compared to those without an inspiratory load ($P<0.05$). However, they did not increase further with increasing inspiratory loads. Dyspnea grew with the increase of inspiratory load ($P<0.05$), and CO and HR increased with inspiratory loads above 40%MIP and 20%MIP, respectively ($P<0.05$). These findings indicate that the circulatory response increases with increasing inspiratory load during submaximal exercise but not ventilatory volume in submaximal speed running.

keywords: exercise, cardio-respiratory response, respiratory muscle, oxygen uptake