

〈原著論文〉

呼吸抵抗が有酸素運動中のエネルギー消費量に及ぼす影響

小泉潤* 荒牧勇** 大家利之**

Effect of resistive breathing on energy consumption during aerobic exercise

Jun KOIZUMI*, Yu ARAMAKI**, Toshiyuki OHYA**

Abstract

This study aimed to investigate the effects of resistive breathing on energy consumption during aerobic exercise. Nine healthy females performed constant load cycling exercise tests at 60% HR_{max} [$206.9 - (0.67 \times Age)$] for 30 min under the following four different resistive breathing intensity conditions, which could be adjusted by using different filters while wearing the mask: 1) no mask (CON); 2) 2.16 cm H₂O (1FIL); 3) 2.67 cm H₂O (15FIL); and 4) 3.18 cm H₂O (30FIL). The heart rate (HR), percutaneous oxygen saturation (SpO₂), blood lactate concentration ([la]_b), rating perception of exertion (RPE), and maximal inspiratory mouth pressure (MIP) were measured. Total energy consumption under 30FIL (225±26 kcal) was significantly higher than that under CON (210±30 kcal) condition during the constant load cycling exercise test. RPE (dyspnea) under all mask conditions were significantly higher than the CON condition (p<0.05). However, SpO₂, RPE (leg), MIP, ([la]_b) did not differ among the different mask conditions (p>0.05). Aerobic exercise performed resistive breathing conditions enhanced energy consumption about 15 kcal during constant load cycling exercise.

1. 緒言

呼吸には空気を取り込む吸息と排出する呼息の局面があり、吸息筋と呼息筋によって胸郭の拡大・縮小が行われ間接的に肺を伸縮させている。呼吸時に主に働く吸息筋と呼息筋を総称して呼吸筋と呼ぶ。安静時の呼吸では、横隔膜の収縮および弛緩の貢献度が最も大きい。運動強度の増加に伴い外肋間筋や胸鎖乳突筋などの呼吸補助筋群の活動が活発になる。中強度の運動では呼吸筋の酸素消費量は全体の酸素消費量の3～5%ほどであるが、最大運動時では10

～15%の酸素を呼吸筋が消費する¹⁾。このように運動強度が上がると、呼吸筋の活動が増加し呼吸筋での酸素消費量が増加する。

呼吸筋の活動は全身運動の強度が増加することだけでなく、呼吸に抵抗を与えることによっても増加する。抵抗を与えた呼吸は通常の呼吸とは異なり呼吸が深くなるため呼吸補助筋がより多く動員され^{2, 3)}、安静時に抵抗を与えて呼吸を行うと心拍数が増加することが報告されている⁴⁾。また、呼吸抵抗を与えながら最大酸素摂取量の85%強度で全身運動を行ったTurnerらの実験では、呼吸抵抗を与えない時と比較し

*中京大学体育学研究科、**中京大学スポーツ科学部

て酸素摂取量が増加すると報告されている⁵⁾。同強度の運動でも呼吸抵抗を与えることによって呼吸筋や呼吸補助筋の活動が増加し、運動全体の酸素消費量が増加することを示唆している。

人が健康であるためには少なくとも週合計1000kcalの運動が推奨されている⁶⁾。これは中強度の有酸素運動を1日30分以上、週に5日以上(週合計150分以上)に相当する。また、アメリカスポーツ医学会はさらなる体力の向上や体重の維持、減少を目的とするなら週合計2000kcal以上の運動が必要であるとしている⁷⁾。これらの運動時間を確保するためには中強度の運動では1日50～60分、週250～300分の運動時間を要することになる。先述したように呼吸抵抗を与えると呼吸筋や呼吸補助筋の活動が活発になり酸素消費量が増加すると考えられるため、呼吸抵抗を付けて有酸素運動をすることによって短時間で効率よく運動を行うことが可能であるかもしれない。そこで本研究では呼吸抵抗が有酸素運動中のエネルギー消費量に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

本研究では呼吸抵抗を与えるためにくればぁ社製のオーダーメイドマスク(Pittarich)を用いた。このマスクは顎と鼻の隙間をなくすためにゴムを調整することができるため、呼吸時に息が漏れにくく、マスクの中にフィルターを入れることができる構造になっている。本研究では、マスクの中に通気性を変えることができる特別なフィルターを入れて、呼吸抵抗量を調整して実験を行った。

2. 方法

2.1. 被検者

被検者は、運動習慣のある健康な女性9名(年齢 20 ± 1 歳、身長 161.7 ± 3.2 cm、体重 60.7 ± 4.7 kg)であった。被検者には事前に本研究の内容および危険性を口頭と書面で十分に説明し、実験参加の承認を得た。なお、本研究は中京大学体育学研究科「人を対象とする研究

に関する倫理委員会」の承認を得て実施した。

2.2. 実験および測定方法

2.2.1 実験の概要

被検者は合計6回実験室に来た。実験の1回目の内容は肺機能検査と漸増負荷テストであった。2回目は、一定負荷運動テストの習熟を目的として、一定の負荷で30分間自転車こぎ運動を行った。3～6回目は、一定負荷運動テストを行った。

一定負荷運動テストはマスクをつけない条件(Con)、被検者のオーダーメイドのマスク(Pittarich くればぁ社製, 日本)に日常生活でマスクを着用する時に用いられるフィルター1枚(2.16cmH₂O)を着用して運動を行う条件(1枚)、日常生活でマスクを着用する時に用いられるフィルターの15枚分(2.67cmH₂O)の呼吸抵抗がかかるマスクを着用して運動を行う条件(15枚)、30枚分(3.18cmH₂O)の呼吸抵抗がかかるマスクを着用して運動を行う条件(30枚)の4種とした。各条件での運動の順番は無作為に設定し、マスクを着用する条件の運動では、被検者にはどのフィルターを使用しているかわからないように配慮して実験を行った。一定負荷運動テストではそれぞれの被検者において日内変動の影響を最小限にするために同じ時間帯に行った。なお、被検者には実験当日のカフェインの摂取および激しい運動を控えるように指示した。

2.2.2 肺機能検査

肺機能検査は、オートスパイロメーター(AS-507, MINATO 医科学社製, 日本)を用いて、肺活量(VC)、努力性肺活量(FVC)、1秒量(FEV_{1.0})、1秒率(FEV₁/FVC)の測定を行った。全ての肺機能検査の測定はAmerican Thoracic Societyのガイドラインに沿って行った⁸⁾。

2.2.3 漸増負荷テスト

漸増負荷テストは、自転車エルゴメーター(AEROBIKE 75XL III, KONAMI 社製, 日本)を用いて、PWC₁₇₀テストを行った。心拍数が170拍/分に達したときの運動負荷(W)を求

め、運動負荷と心拍数との回帰式および心拍数と酸素摂取量との回帰式を算出した。漸増負荷テストの運動開始時の負荷は25Wとし、次のステージは75W、最終ステージは125Wに設定した。各ステージの運動時間は4分間に設定した。被検者には、ペダルの回転数が60～80回転/分になるようにこぐことを指示した。運動中の心拍数、酸素摂取量を測定した。

2.2.4 一定負荷運動テスト

一定負荷運動テストは自転車エルゴメーター(AEROBIKE 75XL III)を用いて行った。運動強度は漸増負荷テストで求めた運動負荷と心拍数との回帰式を用いて、最大心拍数の60%に相当する負荷に設定した。最大心拍数はGellrshの方法(206.9-(0.67×歳))を用いて求めた⁹⁾。被検者はすべての一定負荷運動テストの前に、統一されたウォーミングアップを行った。ウォーミングアップは、5分間のストレッチを行い、50Wに設定された自転車エルゴメーターで5分間こぐ内容であった。その後、一定負荷運動テスト開始した。運動中の心拍数、動脈血酸素飽和度、血中乳酸濃度、主観的運動強度を測定した。主観的運動強度は、呼吸のきつさ(呼吸RPE)と脚のきつさ(脚RPE)、と2種に分けて測定した。

2.3. 測定項目

2.3.1 呼吸代謝

漸増負荷テストの酸素摂取量は、呼吸代謝測定装置(AE-310s, MINATO 医科学社製, 日本)を用いて、breath-by-breath法にて行った。呼気ガスのサンプリング間隔は、30秒間に設定した。呼吸代謝測定装置のガス校正は、標準ガスを用いて、流量の校正は2Lのシリンジを用いて行った。漸増負荷テストおよび一定負荷運動テスト中の心拍数は、心拍計(POLAR A300, POLAR社製, フィンランド)を用いて、サンプリング間隔を30秒間に設定して測定した。一定負荷運動テスト中の5分ごとの心拍数を算出し、30分間の平均心拍数を求めた。漸増負荷テストで求めた回帰式を用いて、一定運動負荷テスト中の総酸素摂取量を推

定した。一定負荷運動テスト中のエネルギー消費量は、酸素1Lの消費を5kcalと仮定して算出した。

2.3.2 血中乳酸濃度

一定運動負荷運動テスト開始から10、20、30分後に指尖から採血し、血中乳酸濃度分析装置(Lactate Pro 2LT-1730, Arklay社製, 日本)を用いて血中乳酸濃度を測定し、一定運動負荷運動テスト中の平均血中乳酸濃度を求めた。

2.3.3 最大吸気口腔内圧

最大吸気口腔内圧(Maximal inspiratory mouth pressure: MIP)はオートスパイロメーター(AS-507, MINATO 医科学社製, 日本)の呼吸筋測定デバイス(AAM-377, MINATO 医科学社製, 日本)を用いて一定負荷運動前(pre)、一定負荷運動後(post)に測定した。被検者には座位にて、鼻を抑えさせた状態でできるだけ息を吐き切った後、最大努力で1.5秒以上吸気するように指示をした。測定は最低5回、最大7回行い、誤差が10%以内の高値3つ中の最大値を最大吸気口腔内圧とした。preの最大吸気口腔内圧を基準とし、最大吸気口腔内圧の変化率 $\{\Delta = (\text{post-pre})/\text{pre} \times 100\}$ を算出した。

2.3.4 経皮的動脈血酸素飽和度

一定負荷運動テスト中の経皮的動脈血酸素飽和度はパルスオキシメーター(Rad-5, MASIMO, アメリカ)を用いて測定した。経皮的動脈血酸素飽和度は、5分ごとに算出し、30分間の平均値を求めた。

2.3.5 主観的強度

(Rating of Perceived Exertion: RPE)

呼吸の息苦しさに対する主観的な強度(呼吸RPE)と脚の疲労度合いに対する主観的強度(脚RPE)はBorg scale¹⁰⁾を用いて一定負荷運動テスト開始から5分ごとに記録し、30分間の平均値を求めた。

2.4. 統計処理

得られた測定データは平均値±標準偏差で示した。統計処理はIBM SPSS (Version23)を

用いた。一定負荷運動前および運動中の生理学的指標には、Con 条件を対照群、その他の条件を実験群としてダネット法を用いて多重比較検定を行った。RPE および最大吸気口腔内圧の変化率はマスク着用条件間（1枚、15枚、30枚）で比較するため対応のある一元配置分散分析を行った。なお、有意水準は危険率5%未満とした。

3. 結果

一定負荷運動前および一定負荷運動中の生理学的指標を表1および表2にそれぞれ示した。一定負荷運動中のエネルギー消費量は、Con 条件と30枚条件で有意な差があった（図1、 $P<0.05$ ）。一定負荷運動中の30分間の平均RPE（呼吸）は、Con 条件とすべてのマスク

表1 一定負荷運動前の生理学的指標

	Con	1枚 (2.16cmH ₂ O)	15枚 (2.67cmH ₂ O)	30枚 (3.18cmH ₂ O)
HR (bpm)	66 ± 10[53-80]	66 ± 8[57-82]	65 ± 11[52-82]	68 ± 11[55-83]
RPE 脚	7 ± 2[6-10]	7 ± 2[6-11]	7 ± 1[6-9]	8 ± 2[6-11]
RPE 呼吸	7 ± 1[6-8]	7 ± 1[6-9]	7 ± 1[6-8]	7 ± 1[6-8]
MIP (cmH ₂ O)	95 ± 17[72-115]	100 ± 15[75-118]	95 ± 13[74-114]	96 ± 21[62-128]
SpO ₂ (%)	99 ± 1[97-100]	98 ± 1[96-99]	99 ± 1[97-100]	98 ± 1[95-100]
[La] _b (mmol/l)	1.4 ± 0.3[1.1-1.9]	1.3 ± 0.3[0.9-1.9]	1.6 ± 0.2[1.1-1.8]	1.4 ± 0.3[1.0-1.9]

値は平均値±標準偏差 (n=9)、[] の中は値の範囲を表している。統計処理には、Con 条件を対照群、その他の条件を実験群としてダネット法を用いて多重比較検定を行った。

表2 一定負荷運動中の生理学的指標

	Con	1枚 (2.16cmH ₂ O)	15枚 (2.67cmH ₂ O)	30枚 (3.18cmH ₂ O)
HR (bpm)	142 ± 4[124-156]	145 ± 4[132-163]	146 ± 4[135-156]	149 ± 4*[142-164]
RPE 脚	12 ± 1[9-15]	12 ± 1[10-14]	13 ± 1[9-15]	13 ± 1[11-16]
Δ MIP (%)	3.4 ± 7.1[-1.9-18.9]	0.7 ± 9.1[-21.7-8.8]	5.4 ± 9.4[-7.4-19.1]	6.1 ± 8.7[-6.4-20.0]
SpO ₂ (%)	98 ± 0[96-99]	97 ± 0[94-99]	97 ± 0[94-99]	97 ± 0[94-100]
[La] _b (mmol/l)	3.7 ± 0.6[2.0-5.8]	3.6 ± 0.1[2.4-5.0]	3.7 ± 0.2[2.5-5.0]	3.7 ± 0.4[2.8-4.8]

値は平均値±標準偏差 (n=9)、[] の中は値の範囲を表している。* vs Con ($p<0.05$)。統計処理には、Con 条件を対照群、その他の条件を実験群としてダネット法を用いて多重比較検定を行った。さらに、RPE 脚とΔ MIP についてはマスク着用条件間で対応のある一元配置分散分析も行った。

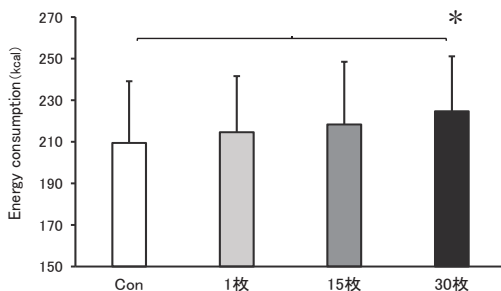


図1 一定負荷運動中の総エネルギー消費量

値は平均値±標準偏差 (n=9) で表している。*Con vs. 30枚 ($p<0.05$)。統計処理には、Con 条件を対照群、その他の条件を実験群としてダネット法を用いて多重比較検定を行った。

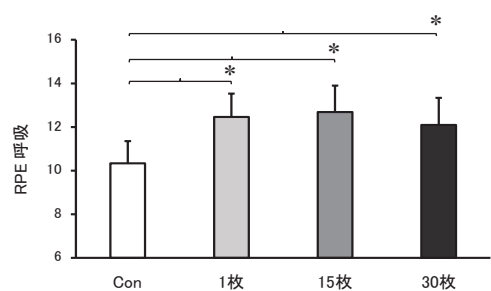


図2 一定負荷運動中の30分間の平均RPE（呼吸）

値は平均値±標準偏差 (n=9) で表している。* vs. Con ($p<0.05$)。統計処理には、Con 条件を対照群、その他の条件を実験群としてダネット法を用いて多重比較検定を行った。マスク着用条件間の比較には、対応のある一元配置分散分析を行った。

条件との間に有意な差があった（図2、 $P < 0.05$ ）。一定負荷運動中の30分間の平均の経皮的動脈血酸素飽和度、RPE（脚）、血中乳酸濃度は、実験群とCon条件とを比較して全ての条件間において有意な差はなかった（表2、 $P > 0.05$ ）。最大吸気口腔内圧の変化率は、実験群とCon条件とを比較して全ての条件間において有意な差はなかった（表2、 $P > 0.05$ ）。また、最大吸気口腔内圧の変化率は、マスク着用条件間での対応のある一元配置分散分析を行った結果においても、フィルターの条件間で有意な差はなかった（表2、 $P > 0.05$ ）。

4. 考察

本研究では、呼吸抵抗が有酸素運動中のエネルギー消費量に及ぼす影響を調べた。マスクフィルター30枚の条件（ $3.18\text{cmH}_2\text{O}$ ）のエネルギー消費量は、Con条件と比較して有意に増加した。Turnerらは、健康な成人男性を対象として、呼吸抵抗を伴う全身運動（ $\text{VO}_2\text{max}80\%$ 強度）を3分間行わせた結果、呼吸抵抗を伴わない時と比べて、平均心拍数が161拍/分から168拍/分に増加したと報告している⁵⁾。本研究においてもCon条件と30枚条件を比較すると、一定負荷運動テスト中の30分間の平均心拍数は、142拍/分から149拍/分に増加（表2）し、先行研究と同様な心拍数の増加であった。呼吸抵抗値を比較すると、Turnerら⁵⁾の研究では $6\text{cmH}_2\text{O}$ 、本研究の30枚条件は $3.18\text{cmH}_2\text{O}$ であった。Turnerら⁵⁾の研究ではMIPは測定されていないが、18～29歳の健康な成人男性の最大吸気口腔内圧は $128\text{cmH}_2\text{O}$ と報告されていることから推察すると¹¹⁾、Turnerらの研究での運動中の呼吸抵抗は、MIPの約4.6%である。本研究の被検者のMIPの平均値は $83\text{cmH}_2\text{O}$ であり、30枚条件での運動中の呼吸抵抗はMIPの約3.8%である。MIPの4%程度の呼吸抵抗を与えながら有酸素運動を行うと、通常の呼吸と比較して有酸素運動中の心拍数が増加することが示唆された。

呼吸抵抗を与えると呼吸が深くなるため、横隔膜の収縮の増加や肋間筋、胸鎖乳突筋などの呼吸補助筋の活動量の増加が報告されている^{2,3)}。また、呼吸抵抗を伴う運動中の呼吸筋の酸素動態を調べた実験では、呼吸抵抗を伴わない時と比べ肋間筋の脱酸素化ヘモグロビン量の増加が報告されている⁵⁾。呼吸抵抗を伴う有酸素運動は呼吸筋の収縮の増加や呼吸補助筋がより動員されることによって呼吸筋の消費エネルギー量が増加すると考えられる。

呼吸筋の疲労は代謝受容器反射を引き起こし、活動筋への血流量や酸素供給量を制限することから持久的運動の制限因子になると考えられている¹²⁾。呼吸筋を事前に疲労させてから運動を行うと、疲労困憊に至るまでの運動時間に減少や、運動後の血中乳酸濃度やRPE（脚）が増加すると報告されている¹³⁾。本研究では、どの条件においても運動後にMIPは低下しなかった（表1）。そのため呼吸抵抗付き運動によって呼吸筋は疲労しなかったと考えられる。また、表2よりRPE（脚）、血中乳酸濃度に有意な差はなかった。これより本研究では呼吸筋の疲労は生じなかったため、RPE（脚）、血中乳酸濃度に影響を及ぼさなかったと考えられる。30枚条件（ $3.18\text{cmH}_2\text{O}$ ）では呼吸筋の疲労は引き起こさないが、有酸素運動中の心拍数が増加する程度の負荷であると考えられる。

図2より、マスク着用条件は、Con条件と比較してRPE（呼吸）は有意に高いが、マスク着用条件間に有意な差はなかった。これらは、RPE（呼吸）の増加は呼吸抵抗値の増加と関連しないことを示唆し、マスクを着用することによってRPE（呼吸）が増加したと考えられる。また、RPE（呼吸）は感度が低くフィルターによる呼吸抵抗値の差異を検出できなかった可能性も考えられる。一方で、心拍数は30枚条件のみ、Con条件と比較して有意に増加した。呼吸抵抗を与えながら有酸素性運動を行わせて、生理的負荷を高めるためには一定負荷以上の抵抗値が必要であることを示唆する。本研究の結果から $3.18\text{cmH}_2\text{O}$ （30枚条件）の抵抗値は、マスクを着用して30分間の有酸素

運動中の心拍数を増加させるためには十分な負荷であると考えられる。

人が健康であるための最低限の運動による身体活動は1週間に約1000kcalであり、これは1日30分以上の中程度の有酸素運動を週に5日以上(週合計150分以上)行うことに相当する⁶⁾。本研究の結果から、30枚条件とCon条件を比較すると、30分の運動でおよそ15kcalほど多くエネルギーを消費している(図1)。週合計1000kcalを目的とし運動した場合、30枚条件では1週間あたりおよそ10分間運動時間を短縮することができる。また、さらなる体力の向上や体重の維持、減少を目的とするなら週合計2000kcal以上が必要である⁷⁾。そのため週合計2000kcalの消費を目的とするならば1週間に20分ほど運動時間を短縮できる。これらは運動中に呼吸抵抗を与えることによって、同強度の運動においても短時間で効率よくエネルギーを消費できる可能性を示唆している。

本研究は、呼吸抵抗を与えながら有酸素運動を行うことによって、同程度の運動負荷においても生理学的負荷を増加させ、エネルギー消費量が大きくなることを明らかにした。本研究の知見は、エネルギー消費を増やす観点からすると、短時間で効率よく有酸素運動を行う有効な手段の一つであることを示した。日常生活においても、本研究で用いたマスクを着用することによって、エネルギー消費量を増やすことができるかもしれない。しかしながら、運動強度に応じて呼吸筋の活動やエネルギー消費量が異なるため¹⁾、本研究とは異なる運動強度では、同様の呼吸抵抗を与えてもエネルギー消費量が増加しない可能性がある。今後はさまざまな運動強度と呼吸抵抗との条件で実験を行い、呼吸抵抗、運動強度と生理学的負荷との関連について詳細に検討する必要がある。

5. 結論

呼吸抵抗を与えながら有酸素運動を行うとエネルギー消費量が増加することが明らかになった。呼吸抵抗を与えながら有酸素運動を行うこ

とは、より短い時間で効率よくエネルギーを消費する手段の一つであることが示唆された。

6. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 17K13178 および中京大学先端共同研究機構(体育研究所)の研究費より助成を受けて実施した。また、株式会社くればから資金提供を受けて実施した。

参考文献

- 1) Dempsey JA, Harms CA, Ainsworth DM. Respiratory muscle perfusion and energetics during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 28 (9): 1123-1128, 1996.
- 2) 福井 智, 大倉 和, 高橋 亜, 堀水 湧, 伊東 知, 佐竹 将, et al. 負荷圧の違いによる吸気抵抗負荷呼吸中の呼吸筋活動の特性. *日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌.* 2018; 27 (3): 349-352.
- 3) 一場 友, 解良 武, 島本 隆, 糸数 昌, 丸山 仁, 大久保 隆. 呼吸抵抗負荷の相違による呼吸筋活動の分析. *理学療法科学.* 17 (3): 195-198, 2002.
- 4) McConnell AK, Griffiths LA. Acute cardiorespiratory responses to inspiratory pressure threshold loading. *Med Sci Sports Exerc.* 42 (9): 1696-1703, 2010.
- 5) Turner LA, Tecklenburg-Lund S, Chapman RF, Stager JM, Duke JW, Mickleborough TD. Inspiratory loading and limb locomotor and respiratory muscle deoxygenation during cycling exercise. *Respir Physiol Neurobiol.* 185 (3): 506-514, 2013.
- 6) Haskell WL, Lee IM, Pate RR, Powell KE, Blair SN, Franklin BA, et al. Physical activity and public health: updated recommendation for adults

- from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation*. 116 (9): 1081, 2007.
- 7) Akicic JM, Clark K, Coleman E, Donnelly JE, Foreyt J, Melanson E, et al. American College of Sports Medicine position stand. Appropriate intervention strategies for weight loss and prevention of weight regain for adults. *Med Sci Sports Exerc*. 33 (12): 2145-2156, 2001.
 - 8) ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *Am J Respir Crit Care Med*.;166 (4): 518-624, 2002.
 - 9) Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, McDonald A, Russi GD, Moudgil VK. Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. *Med Sci Sports Exerc*. 39 (5): 822-829, 2007.
 - 10) Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*. 14 (5): 377-381, 1982.
 - 11) Sclausser Pessoa IM, Franco Parreira V, Fregonezi GA, Sheel AW, Chung F, Reid WD. Reference values for maximal inspiratory pressure: a systematic review. *Can Respir J*. 21 (1): 43-50, 2014.
 - 12) Rome r LM, Polkey MI. Exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance. *J Appl Physiol (1985)*. 104 (3): 879-888, 2008.
 - 13) Taylor BJ, Romer LM. Effect of expiratory muscle fatigue on exercise tolerance and locomotor muscle fatigue in healthy humans. *J Appl Physiol (1985)*. 104 (5): 1442-1451, 2008.