

ペダリング運動時の吸気—呼気比の設定が呼吸困難に及ぼす影響

西村志穂・久松弥生・藤原優大

要旨

本研究の目的は、ペダリング運動において、呼吸数一定の条件で吸気と呼気の比率の相違が呼吸困難に及ぼす影響を明らかにすることである。若年健常者 20 名を対象に、吸気—呼気比が 1:1 と 1:3、自由呼吸の 3 条件で最大仕事量の 60% に相当する定常運動負荷試験を実施した。呼吸困難、下肢疲労感、心拍数、呼気ガス分析から得られる各種指標を測定し、吸気—呼気比の相違、ならびに自由呼吸との比較を行った。結果、1:1 と 1:3 の 2 条件では呼吸困難、下肢疲労感、心拍数、分時換気量、換気効率に有意差は認められなかったが、自由呼吸と比較すると、いずれも有意に低値であった。以上より、吸気—呼気比の相違は呼吸困難に影響しないが、運動と呼吸を同調させることが呼吸困難の軽減に有効である可能性が示唆された。

目的

慢性呼吸器疾患患者では、労作時の呼吸困難と、それによる身体活動量が減少することで日常活動 (activities of daily living: 以下, ADL) や生活の質 (quality of life: 以下, QOL) が障害される。このような患者に対して、呼吸リハビリテーションが推奨されており、その主要な構成要素である運動療法と呼吸法の指導を中心として、呼吸困難の軽減を図る。運動療法では呼吸困難をきたしやすいために、運動に呼吸法を組み合わせることで呼吸困難を抑制する「呼吸パターンと運動のリズムを合わせる」方法がある。(本稿では以下、同調とする)。たとえば、持久カトレニングとしての歩行時に 4 歩で呼気を、2 歩で吸気を行うなどである。歩行では歩数を基準として同調を行いやすい。しかし、他の運動の種類である自転車エルゴメーターにおいては、ペダル回転の頂点あるいは最下点を基準にするのか、また、呼吸パターンを調整する際にペダル 1 回転や半回転との同調とするのか、といった問題が生じ、同調の方法は困難となる。

自転車エルゴメーターにおける同調について、健常成人を対象として様々な報告がある。ペダリング運動における同調は、ペダル 2 回転に対して 1 呼吸、ペダル 3 回転に対して 1 呼吸とした場

合に生じやすく、特に前者において最も同調率が高かったことが示されている¹⁾。さらに、ペダリングの同調が良好であった対象者群と不良であった対象者群を比較した研究では、呼吸数が前者では平均 19.8 回/分、後者では 24.8 回/分と有意な差を認めるとともに、前者では後者と比較して呼吸困難が低値を示していた²⁾。このように、ペダリング運動ではペダルの回転と呼吸の比率を設定することで必然的に呼吸数に差が生じるため、この結果は、呼吸数の相違が呼吸困難の軽減に影響した可能性がある。

一方、臨床現場ではしばしば、横隔膜呼吸や口すぼめ呼吸の指導が行われ、吸気と比較して呼気を延長した呼吸パターンが換気の効率を改善し、呼吸困難軽減に有用である可能性が報告されている³⁾。しかしながら、ペダリング運動の同調において、吸気と呼気の比率を設定することが呼吸困難にどのような影響を及ぼすかは不明である。

そのため本研究では、ペダリング運動での同調において、呼吸数を一定にした条件のもとで、吸気と呼気の比率の違いが、呼吸困難に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

対象

本研究の趣旨を理解し、研究の参加に同意が得られた若年健常者 20 名(男性, 女性それぞれ 10 名)を対象とした。除外基準は呼吸器疾患や循環器疾患の既往, ペダリング運動に影響する運動器疾患の併存, 過去および現喫煙者, 上気道炎の症状から 1 週間以上経過していない者, 事前練習でペダリング運動の同調が困難な者とした。対象者には, 本研究の目的および手順, 内容, リスクについて口頭および文書で十分に説明し, 書面にて同意を得た上で実施した。本研究は, 長崎大学大学院医歯薬学総合研究科倫理委員会の承認を得て実施した(許可番号 20070904)。

方法

1. 研究デザインと実施手順

以下の測定を 3 日間に分けて実施した。1 日目, 事前調査と漸増運動負荷試験(cardiopulmonary exercise test:以下, CPX)を実施した。2 日目に自由呼吸による定常運動負荷試験(ア)を実施した後, 十分な休息を設け, ペダリング運動と同調で吸気と呼気の比率を 1:1(イ), または 1:3(ウ)とする同調の条件で定常運動負荷試験のうちからいずれかの 1 条件を実施し, 残る一方の条件での定常運動負荷試験を 3 日目に行った(図 1)。これらすべての測定は, 1 日以上の間隔を空けて実施し, (イ)と(ウ)の条件は封筒法によるランダムな順序とした。

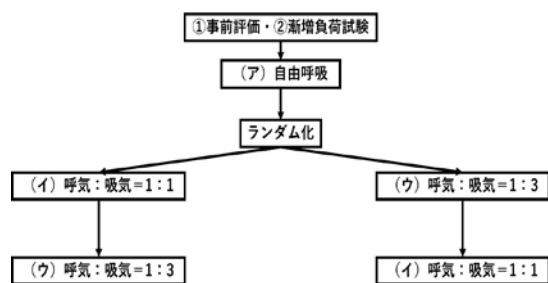


図 1 研究プロトコル

2. 事前調査

長崎大学医学部保健学科内部障害系理学療法研究室内にて, 研究説明書を用いて対象者に測定の手順, 目的, リスク等について十分なオリエンテーションを行った。その後, 身長, 体重, バイタルサインを測定した。また呼吸機能の評価としてスパイロメーター(ミナト医科学社製 オートスパイロ AS507)を用い, 静的肺活量, 努力性肺活量を測定した。

3. 漸増運動負荷試験

定常運動負荷試験の運動強度を決定するために, 自転車エルゴメーター(COMBI 社製 232CXL)による CPX を実施した。負荷プロトコルには 20W/分のランプ負荷を適用し, 回転数 50 回/分とした。試験中は, 呼気ガス分析装置(ミナト医科学社製, エアロモニタ AE-300S)にて酸素摂取量(oxygen consumption; 以下 $\dot{V}O_2$)ならびに換気諸量を, 心電図モニター(フクダ電子社製 FUKUDA M-E BIO-SCOPE M100)を用いて心拍数(heart rate: 以下, HR), パルスオキシメーターにて酸素飽和度(percutaneous oxygen saturation; 以下, SpO₂)を連続的に測定した。また, 試験開始時から 1 分毎に修正 Borg スケールにて呼吸困難と下肢疲労感を聴取した。運動終了基準は, 対象者が症候限界に至った時点とし, 中止基準は成書⁴⁾に従った。

4. 定常運動負荷試験のプロトコル

1) 測定および同調の方法

自転車エルゴメーターを使用し, 安静 1 分, 強度 20W でウォーミングアップ 2 分間の後, 定常負荷による運動を 20 分間, クールダウンを 1 分間行った(図 2)。運動の強度は, CPX にて得られた最高仕事量の 60%に相当する負荷を適用し, 回転数は 50rpm とした。まず(ア)の条件下で, その後同調を行う(イ)および(ウ)の条件で実施した。同調の条件は先行研究¹⁾の結果から, ペダル 2 回転に対して 1 呼吸と設定し, (イ)は吸気と呼気をそれぞれペダル 1 回転で吸気と呼気が 1:1, (ウ)は吸気をペダル半回転, 呼気を 1 回転半で 1:3 とした。その結果, 呼吸数は 25 回/分と算出された。

(イ)と(ウ)の条件においては、事前に 5 分程度、同調の練習を実施した。具体的には、メトロームの発信音にあわせてノートパソコンのモニターに表示される「吸う」、「吐く」にあわせて、ペダルの踏み込みと吸気と呼気のタイミングを両条件でそれぞれ練習した。

なお、これら 3 条件での定常運動負荷試験中は安全性を考慮し、運動前後に血圧測定を行い、SpO₂を連続的にモニターした。

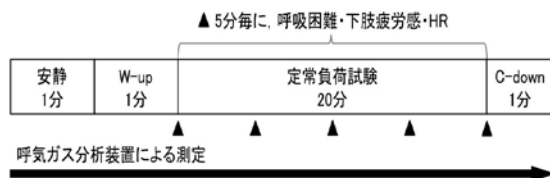


図 2 定常運動負荷試験のプロトコル

2) 測定項目

① 呼吸困難・下肢疲労感

修正 Borg スケールを用いて、安静時、定常負荷運動開始から終了時(20分)まで 5 分毎、クールダウン(以下、C-down)終了後に評価した。

② HR

前述の心電図モニターにて連続的にモニターし、安静時、定常運動負荷開始から終了まで 5 分毎、C-down 終了後に記録した。

③ 呼吸数、酸素摂取量および換気諸量

呼気ガス分析装置を用いて、呼吸数(respiratory rate; 以下、RR)、 $\dot{V}O_2$ 、分時換気量(minute ventilation; 以下、 V_E)、1 回換気量(tidal volume; 以下、 V_T)、換気効率(V_E /carbon dioxide output; 以下、 V_E/VCO_2)、死腔換気率(ration of dead space to tidal volume; 以下、 V_D/V_T)を安静時から C-down 終了まで連続的に測定した。

□および□は定常運動負荷開始後 10 分および 20 分の時点での測定値を、□は、運動開始後 10 分、20 分のそれぞれ 1 分前からの平均値を解析に用いた。

5. 統計学的解析方法

条件(イ)および(ウ)の 2 条件における各指標の比較には Wilcoxon 符号付順位検定を用い、

(ア)を加えた 3 条件の比較には Friedman 検定を使用し、Bonferroni の調整を行った。

測定値は平均値±標準偏差、または中央値[四分位範囲]で示し、統計学的有意水準は 5% とした。これらの解析には統計解析ソフトウェア SPSS ver.25 を使用した。

結果

1. 対象者背景(表 1)

事前調査ならびに CPX の結果を全対象者ならびに男女別に分けて表 1 に示す。なお、CPX の実施において有害事象等の発生は認めなかった。

2. 定常運動負荷試験の実施状況(図 3)

3 条件での定常運動負荷試験においても、有害事象の発生はなく、全対象者が試験を完遂した。 $\dot{V}O_2$ はおよそ 5 分以降で定常状態を示し、条件によらず定常運動負荷となっていた。また、RR は自由呼吸では運動終了時まで上昇しているのに対し、(イ)と(ウ)の条件では 25 回/分を維持できていた。

3. 2 条件(イ)と(ウ)の比較

定常運動開始 10 分および 20 分の時点での呼吸困難は両条件でいずれも有意な相違は認めなかった(表 2, 3)。また、その他の測定項目も有意差はなかったが、 V_D/V_T のみ、10 分および 20 分の時点で(イ)が(ウ)と比較して有意に低値を示した。

4. 同調による 2 条件(イ)、(ウ)と自由呼吸(ア)との比較

1) 10 分の時点での比較(表 2)

呼吸困難において、同調による 2 条件(イ)、(ウ)は自由呼吸(ア)と比較していずれも有意な低値を示した。また、下肢疲労感では(ウ)は(ア)と比較して有意に低値を示した。

HR と RR では、2 条件は(ア)と比較して有意な低値を、 V_T は有意な高値を示した。 V_E ならびに V_D/V_T においては、(イ)のみ(ア)と比較していずれも有意に低値を示した。 V_E/VCO_2 は 2 条件で

(ア)と比較して減少する傾向にあったが、有意差は認められなかった。

2) 20 分の時点での比較(表 3)

呼吸困難において、2 条件(イ), (ウ)は自由呼吸(ア)と比較していずれも有意に低値を示した。下肢疲労感においても同様であった。

HR においては、(イ)のみが、RR では 2 条件とも、(ア)と比較して有意に低値を示した。V_T は 2 条件とも(ア)と比較して有意に高値を、V_E においては有意に低値を示した。また、V_D/V_T は、(イ)のみが(ア)と比較して有意に低値を示した。

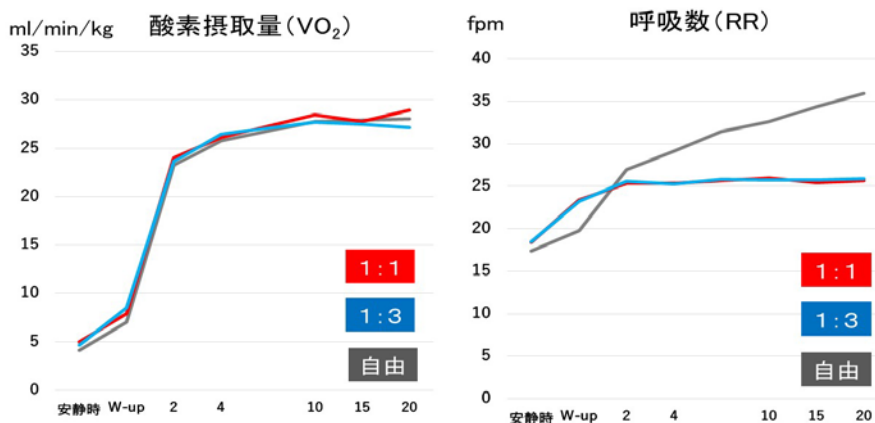


図 3 定常運動負荷試験における酸素摂取量と呼吸数の推移

表 1 対象者背景

	全体 (n = 20)	男性 (n = 10)	女性 (n = 10)
年齢, 歳	21.3 ± 1.2	21.3 ± 0.9	21.4 ± 1.5
BMI	21.1 ± 2.0	20.8 ± 2.5	21.3 ± 1.3
%肺活量, %	89.7 ± 10.4	87.8 ± 11.1	91.7 ± 9.3
1 秒率, %	86.5 ± 8.2	88.8 ± 7.8	84.1 ± 8.0
peak $\dot{V}O_2$, ml/kg/min	51.9 ± 25.0	68.9 ± 22.7	34.9 ± 12.6
peak WR, W	176.7 ± 42.2	210.0 ± 29.4	143.4 ± 21.8

平均値±標準偏差

BMI: body mass index, peak $\dot{V}O_2$ (oxygen consumption): 最高酸素摂取量, peak WR (work rate): 最高仕事量

表 2 定常運動負荷試験 10 分の時点での各測定項目の比較

測定項目	吸気—呼気比 1:1	吸気—呼気比 1:3	自由呼吸	p 値
呼吸困難	4 ± 1.8*	3.5 ± 1.0**	4.5 ± 1.0	.003
下肢疲労感	5 ± 2.8	5 ± 2.0*	5.5 ± 2.0	.049
HR , bpm	158.8 ± 9.2**	160.5 ± 10.2*	164.7 ± 9.3	.001
$\dot{V}O_2$, ml/kg/min	28.5 ± 10.7	27.7 ± 7.1	27.8 ± 10.8	.276
RR , fpm	25.9 ± 1.7**	25.8 ± 0.9**	32.6 ± 6.0	.000
V_T , L	1694.1 ± 382.4**	1730.6 ± 365.1**	1471.9 ± 345.0	.000
V_E , L/min	43.4 ± 9.5**	44.7 ± 9.2**	46.8 ± 11.0	.041
V_E/VCO_2	34.0 ± 15.3	29.3 ± 6.5	38.3 ± 19.0	.867
V_D/V_T	0.25 ± 0.02**††	0.28 ± 0.02	0.28 ± 0.03	.000

呼吸困難・下肢疲労感:中央値[四分位範囲], その他:平均値±標準偏差

*:vs 自由呼吸 p<0.05, **:vs 自由呼吸 p<0.01, †:vs1:3 p<0.05, ††:vs1:3p<0.01

HR (heart rate):心拍数, $\dot{V}O_2$ (oxygen consumption):酸素摂取量, RR(respiratory rate):呼吸数, V_T (tidal volume):1 回換気量, V_E (minute ventilation):分時換気量, V_E/VCO_2 (minute ventilation/carbon dioxide output):換気効率, V_D/V_T (ratio of dead space to tidal volume):死腔換気率

表 3 定常運動負荷試験 20 分の時点での各測定項目の比較

測定項目	吸気—呼気比 1:1	吸気—呼気比 1:3	自由呼吸	p 値
呼吸困難	4 ± 2.0*	4 ± 2.0**	5 ± 2.0	.003
下肢疲労感	6 ± 2.0*	6 ± 3.8**	7 ± 2.8	.001
HR , bpm	162.4 ± 11.1**	163.9 ± 11.1	168.4 ± 10.4	.003
$\dot{V}O_2$, ml/kg/min	28.9 ± 9.7	27.2 ± 7.9	28.1 ± 12.1	.476
RR , fpm	25.6 ± 1.6**	25.9 ± 1.5**	35.9 ± 10.1	.000
V_T , L	1721.2 ± 380.8**	1695.8 ± 364.2**	1418.3 ± 346.8	.001
V_E , L/min	43.9 ± 10.3**	43.7 ± 9.8**	48.7 ± 11.4	.001
V_E/VCO_2	32.8 ± 11.8	31.1 ± 9.6	44.0 ± 27.9	.172
V_D/V_T	0.25 ± 0.02**††	0.28 ± 0.03	0.29 ± 0.03	.000

呼吸困難・下肢疲労感:中央値[四分位範囲], その他:平均値±標準偏差

*:vs 自由呼吸 p<0.05, **:vs 自由呼吸 p<0.01, †:vs1:3 p<0.05, ††:vs1:3 p<0.01

HR (heart rate):心拍数, $\dot{V}O_2$ (oxygen consumption):酸素摂取量, RR(respiratory rate):呼吸数, V_T (tidal volume):1 回換気量, V_E (minute ventilation):分時換気量, V_E/VCO_2 (minute ventilation/carbon dioxide output):換気効率, V_D/V_T (ratio of dead space to tidal volume):死腔換気率

考察

本研究では若年健常者を対象に, 呼吸数を一定にした条件下で, ペダリング運動時の吸気—呼気比の相違が呼吸困難へ及ぼす影響を検

討した. その結果, 吸気と呼気の比率が 1:1 と 1:3 の条件では, 呼吸困難に及ぼす影響には相違がないことが明らかとなった. しかし, 自由呼吸と比較して両条件ではいずれも, 呼吸困難の有意な軽減を認めた.

これにはまず, 運動呼吸同調現象 (locomotor

respiratory coupling:以下, LRC)の関与が考えられた. LRC は, 呼吸のリズムが運動のテンポの影響を受け互いの位相が同期化していく現象⁵⁾であり, 呼吸困難や自覚的運動強度の軽減が得られることが示されている^{6,7)}. また, LRC の関与に加えて吸気—呼気比を設定した2条件では, V_E の低下や V_E/V_{CO_2} が減少傾向にあったことが呼吸困難の軽減に関与した可能性も考えられる. さらに, 吸気—呼気比を設定した条件においてRRを一定に維持させた結果, 自由呼吸と比較してRRが有意に低下し, V_T が増加した. これは, 呼吸パターンが自由呼吸と比較して, 大きくゆっくりとなったことを示しており, この結果も呼吸困難の軽減に寄与したのではないかと推察した. 解良ら⁹⁾の報告では, RRを減少させることで呼吸中枢の出力を示す気道閉塞圧が減少し, 呼吸困難の軽減が得られたことが示されており, この関与を裏付けているものと考えた.

HRは, 吸気—呼気比を設定した2条件で低値を示した. これには副交感神経活動の賦活化が考えられる. 松本ら⁸⁾は, 深呼吸あるいは腹式呼吸で副交感神経活動が増大し, HRが低下することを報告している. 今回, 吸気—呼気比を設定した2条件は自由呼吸と比較してRRが有意に低値を示しており, 副交感神経活動の増大による影響を受けた可能性がある.

V_D/V_T においては, 吸気—呼気比を設定した2条件で相違がみられ, (イ, 1:1)が有意に低値を示した. その要因として, (イ)では吸気時間が全呼吸時間の1/2, (ウ, 1:3)では全呼吸時間の1/4であり, 吸気時間の違いが今回の結果に関与しているのではないかと考えた. しかし, 本研究では吸気時間に関する指標, 例えば全呼吸時間に対する吸気時間の割合などの指標を測定しておらず, この結果の機序を明らかにすることはできなかった. また, (ウ)では半回転での調整や吸気時間が短いといった面から, 調整のしやすさに個人差が生じ, ばらつきが生じた可能性が影響したことも考えられた.

下肢疲労感は, 吸気—呼気比を設定した2条件は自由呼吸と比較して下肢疲労感の有意な軽減を認めた. この結果は筆者らの予想外のものであり, その機序を考察することは困難である.

これは, 同調の際に聴覚および視覚の刺激によって疲労信号に対する中枢神経の感覚注意の焦点が変わった, または部分的にそらされたこと⁹⁾が考えられる. 中枢の感覚領域では, 感覚焦点が運動疲労よりも興味の強い音を優先的に選択した場合, より少ない疲労感として知覚されるといわれている¹⁰⁾. この聴覚(および視覚)刺激が, 下肢疲労感の軽減に寄与した可能性がある.

本研究の限界として, 対象者が少なく十分な統計解析が実施できなかったことや, V_D/V_T が(イ)で有意な低値を示したことについての機序が十分に明らかにできなかったことである. しかし, ペダリング運動においても, 運動と呼吸パターンを同調させることが呼吸困難の軽減に有用であることが明らかとなった.

まとめ

本研究では若年健康者を対象として, 呼吸数を一定とした条件で, ペダリング運動における吸気—呼気比の相違による同調が呼吸困難へ及ぼす影響を検討した結果, その違いはなかった. しかし, 自由呼吸と比較して両条件ではいずれも呼吸困難の有意な軽減を認めた. 今後は, 臨床応用のため呼吸器疾患を有さない高齢者や, 慢性呼吸器疾患患者を対象として, 同様の検討を行う必要があると考えた.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 研究の実施にご協力いただいた被験者の皆様, ご指導を賜りました田中貴子准教授, 新貝和也氏, 内部障害理学療法学研究室の方々ならびに関係各位に厚く御礼申し上げます.

参考文献

- 1) 玉木彰, 解良武士, 他: ペダリング運動における運動—呼吸同調現象と肺機能の関係. 理学療法学. 2008; 35(Suppl): A1090.
- 2) 解良武士, 長谷川聡, 他: 呼吸同調現象(LRC)気道閉塞圧($P_{0.1}$)からの検討. 日本生理人類学会誌. 2008; 13: 219-226.

- 3) 横山茂樹, 千住秀明, 他: 運動中において腹式呼吸による呼吸コントロールが呼吸循環動態に及ぼす影響. 長崎大学医学部保健学科紀要. 2002; 15: 63-68.
- 4) 吉尾雅春, 高橋哲也, 他: 内部障害理学療法学. 医学書院. 2016. pp. 52-59.
- 5) Bernasconi P, Kohl J: Analysis of co-ordination between breathing and exercise rhythms in man. *J Physiol.* 1993; 471: 693-706.
- 6) 解良武士, 玉木彰, 他: 呼吸同調現象の出現が呼吸運動出力に与える影響. 理学療法学. 2007; 34(Suppl).
- 7) 岩本えりか, 関川清一, 他: 低強度及び中強度下肢運動時の呼吸様式の違いは運動一呼吸同調に影響を与えない. 理学療法学. 2009; 36: 341-347.
- 8) 松本卓也, 松永篤彦, 他: 運動時の呼気延長呼吸が呼吸循環応答と自律神経活動に与える影響. 体力科学. 2008; 57: 315-326.
- 9) 新貝和也, 千住秀明: 運動中の音楽が呼吸困難感と下肢疲労感に与える影響. 理学療法科学. 2011; 26: 353-357.
- 10) Nethery VM: Competition between internal and external sources of information during exercise: influence on RPE and the impact of the exercise load. *J Sports Med Phys Fitness.* 2002; 42: 172-178.

(指導教員: 神津 玲)