

運動—呼吸同調現象の発生に関連する因子の検討

岡田紗也花・吉野友恵・渡部 翼

要旨 【目的】運動—呼吸同調現象 (Locomotor Respiratory Coupling: 以下, LRC) において, その発生率には対象者によって大きなばらつきがあると報告されている. 本研究では, LRC 発生率と運動様式の慣れ, 有酸素能力, 運動年数, 肺機能, 消費エネルギー量との関連性を検討した. 【方法】若年健常者 22 名を対象とし, 事前調査, 肺機能検査, 心肺運動負荷試験を行った後, 無酸素性代謝閾値検出時点から 1 分前の強度 (W) で自由呼吸と LRC 誘発 (呼吸: 運動 = 1:2) の 2 種類の呼吸様式にて定常運動負荷試験を行った. ペダル周期と呼吸フローを測定し, LRC 発生率と各因子との関連を分析した. 【結果】対象者 22 名中, 誘発により LRC が発生した 14 名を解析対象とした. 自由呼吸時に比べ, LRC 誘発時で LRC 発生率は有意に上昇し, 最大酸素摂取量, 運動年数, 最大換気量との間に正の相関を認めた. 【結論】最大酸素摂取量, 運動年数, 最大換気量は LRC 発生率を推測する因子になることが示唆された.

目的

慢性閉塞性肺疾患 (Chronic Obstructive Pulmonary Disease: 以下, COPD) を代表する呼吸器疾患患者の理学療法は, コンディショニング, ADL トレーニング, 全身持久力および筋力トレーニングといった運動療法によって構成される. 中でも運動療法は必須のプログラムであり, 頻度, 強度, 種類, 時間の設定が重要である¹⁾. これらに加え, 様々な動作と呼吸パターンを同調させるように呼吸方法を考慮する必要性も指摘されている²⁾. 呼吸方法を指導することで, 息こらえや浅くて速い呼吸パターンの出現を防ぐことができ, 呼吸困難の軽減に有用であるとされる³⁾. その機序の 1 つとして運動—呼吸同調現象 (Locomotor Respiratory Coupling: 以下, LRC) の関与が考えられる.

LRC とは, 歩行や自転車運動, 車いす駆動といった一定のテンポで行う四肢の運動と呼吸リズムが影響を受け, お互いの位相が同期化していく現象である⁴⁾. LRC の発生の程度は, 全呼吸数から運動と同調した呼吸数の割合で示され, これを LRC 発生率という⁴⁾. LRC を意図的に誘発することにより, LRC 発生率は上昇し, それに伴って呼吸困難⁵⁾や酸素摂取量⁴⁾, 運動時心拍数⁶⁾

の減少が報告されており, さらにその発生率が高いほど換気効率の改善がみられるとの報告⁷⁾もある. これらのことから, LRC による効果を得るためには, LRC 発生率を高めることが重要であると考えられる.

LRC を意図的に誘発することで LRC 発生率は上昇する. 先行研究での LRC 発生率に関して, 解良ら⁵⁾は 38.3~98.0%, 安福ら⁸⁾は 66.3±25.8%と報告しており, 対象者によって大きなばらつきが認められている. これには, LRC 誘発時の LRC 発生率に関連する因子があると考えられるが, これらに関する検討を行っている研究は少ない.

意図的な誘発を行わずに, 自然に LRC が発生する場合においては, 運動様式の慣れ⁴⁾や有酸素能力⁷⁾が LRC 発生率に関連する因子であると報告されている. また, 有酸素能力については, 運動年数⁹⁾や肺機能¹⁰⁾, 消費エネルギー量¹¹⁾との関連が指摘されている.

これらのことから私たちは, LRC 誘発時の LRC 発生率に関連する因子として, 運動様式の慣れや有酸素能力, さらに有酸素能力と関連する運動年数や肺機能, 消費エネルギー量が挙げられるのではないかと仮説を立てた. そのため本研究では, 運動様式の慣れ, 有酸素能力, 運動年数, 肺機能, 消費エネルギー量と LRC 発生率と

が関連するか検討することを目的とした。

対象

対象者数と除外基準は先行研究^{12,13)}に従った。すなわち、本研究への参加の同意が得られた若年健常者(長崎大学学生)24名を研究対象とし、除外基準は、呼吸器疾患、心疾患およびその既往、運動器疾患、喫煙歴を有する者とした。24名のうち2名が除外基準に該当し、22名(男性11名、女性11名)を対象者とした。対象者には、本研究の目的および手順、内容、リスクについて十分に説明し、書面にて同意を得た上で、安全面を重視して測定を行った。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(承認番号16041401)。

方法

1. 研究デザイン

測定は2日間に分けて実施した。1日目に事前調査、肺機能検査、心肺運動負荷試験(cardiopulmonary exercise test:以下、CPX)を実施し、2日目はランダムに2群に分け、クロスオーバー方式で①自由呼吸、②呼吸:運動=1:2によるLRC誘発の2種類の条件による定常運動負荷試験を同日に行った(図1)。これらすべての測定は同一の学内研究室で行い、2日以上の間隔を空けて実施した。

2. 測定項目

1) 事前調査

対象者には、測定日までの運動年数、自転車使用年数を事前調査用紙に記入させた。また、国際標準化身体活動質問票^{14,15)}を用いて、消

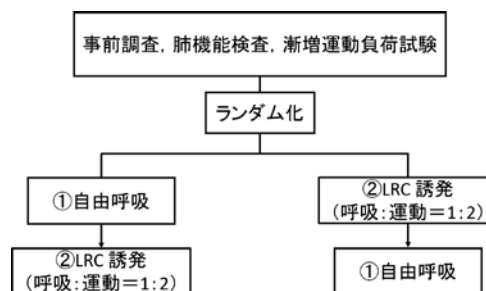


図1 研究プロトコル

費エネルギー量を算出した。

2) 肺機能検査

スパイロメータ(ミナト医科学社製, AUTOSPIRO AS-507)を用いて、比肺活量(percent predicted vital capacity:以下, %VC), 努力性肺活量(forced vital capacity:以下, FVC), 1秒率(percent predicted forced expiratory volume in one second:以下, %FEV₁), 1秒率(FEV₁/FVC), 最大換気量(maximal voluntary ventilation:以下, MVV)を測定した。

3) CPX

自転車エルゴメータ(COMBI社製, ERGOMETER 232CXL), 呼吸ガス分析装置(ミナト医科学社製, エアロモニタ AE-300S), 心電図モニター(フクダ電子社製, BIO-SCOPE M100)を用いて、回転数を50rpmとし、20W/分のランプ負荷で行った。終了基準は、被験者が疲労困憊に至り、回転数50rpmを維持できなくなった時点とし、中止基準は参考文献¹⁾に従った。CPXによって得られた結果から、V-slop法を用いて無酸素性代謝閾値(anaerobic threshold:以下, AT)を算出した。また、最大酸素摂取量($\dot{V}O_2\max$)は運動終了30秒前から運動終了までの酸素摂取量($\dot{V}O_2/W$, kg/ml/min)の平均値を用いた。なお、呼吸

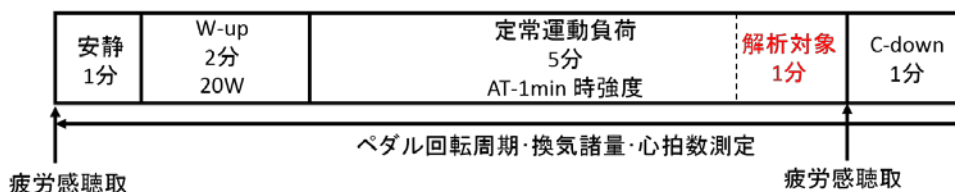


図2 定常運動負荷試験

W-up:ウォーミングアップ C-down:クーリングダウン

ガス分析装置はすべての測定前に自動校正を行った。

4) 定常運動負荷試験

安静 1 分、強度 20W でウォーミングアップ 2 分間の後、定常運動負荷を 5 分間、クーリングダウンを 1 分間行った(図 2)。定常運動負荷の強度は、CPX により算出した AT ポイントから 1 分前の運動強度 (W) で行った。回転数は、先行研究¹²⁾を参考に 40rpm とした。①から②(もしくは②から①)の測定の間は、安静時の血圧や心拍数(heart rate: 以下, HR)、自覚症が運動前の数値に戻るまで十分な休息をとった。②の呼吸様式においては、事前に練習を行った。具体的には、測定前に 1~2 分程度、メトロノームでリズムを取り、研究者で呼吸のタイミングを指導するとともに、対象者は足踏み等を行いながら呼吸と運動のタイミングをとる練習を行った。

換気諸量は呼気ガス分析装置を用い、breath by breath 法で $\dot{V}O_2/W$ 、換気効率($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)、分時換気量(\dot{V}_E)、呼吸数(respiratory rate: 以下, RR)を測定した。HR は心電図モニターを用いて測定した。測定値は後述する解析時間内の平均値を用いた。また、定常運動負荷試験の前後に対象者の自覚症(呼吸困難、下肢疲労感)を、修正ボルグスケールを用いて聴取した。

3. LRC の解析方法

LRC の解析は、運動テンポと呼吸リズムの同期を評価した。解析対象は、先行研究⁷⁾に従って定常運動負荷の最後の 1 分間とした。運動テンポと呼吸リズムは小型 9 軸ワイヤレスモーション

センサおよびワイヤレス 8ch ロガー(ロジカルプロダクト社製)を用いてサンプリング周波数 100Hz でデータ化し、コンピュータへ取り込んだ。この 2 つは無線信号により同時に測定を開始した。ワイヤレス 8ch ロガーはプラス領域のデータしか取り込めないため、1.5V の電圧を負荷して、呼吸フローの波形がすべて記録できるようにした。運動テンポは小型 9 軸ワイヤレスモーションセンサをエルゴメータのペダルに取り付け、ペダル位置が最上部から再び最上部に至るまでを 1 周期として測定した。呼吸リズムは、呼気ガス分析装置で測定した呼吸フローのアナログ信号をワイヤレス 8ch ロガーによりデジタル化した。その後、パーソナルコンピュータ上で運動テンポと呼吸リズムを同期表示させた(図 3)。

LRC 発生の基準は、先行研究^{13,16)}に基づき、運動と呼吸周期の位相差が安定していること(±0.1 秒以下の変動)、LRC 比が整数倍になっていること、これらの連続性(4 呼吸以上)が認められること、を満たす場合とした。LRC の発生率は、解析時間内で同調した呼吸数/解析時間内の呼吸数×100(%)とした。

4. 統計学的解析方法

LRC 発生率と運動年数、自転車使用年数、消費エネルギー量、%VC、FVC、%FEV₁、FEV₁/FVC、MVV、 $\dot{V}O_2\max$ との関連、 $\dot{V}O_2\max$ と運動年数、消費エネルギー量、%VC、FVC、%FEV₁、FEV₁/FVC、MVV については Pearson の積率相関係数を用いた。①と②の LRC 発生率、換気諸量、HR、自覚症の比較は対応のある t 検定もしくは Wilcoxon の符号付き順位検定を用いた。データ

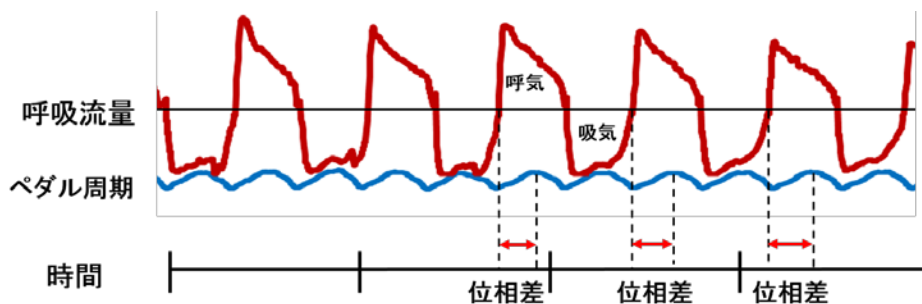


図 3 運動・呼吸同期解析

加速度計により測定したペダル周期と、呼気ガス分析装置より測定した呼吸フローの時間的变化を示す。呼気開始の点とペダリング最大点の差を位相差とした。

表 1 対象者の特性

	全体 (n=14)	男性 (n=8)	女性 (n=6)
年齢(歳)	21.6±1.8	22.1±2.2	21.0±0.9
BMI(kg/m ²)	21.0±2.5	21.9±2.9	19.7±0.9
AT-1min 時強度 (W)	73.9±24.3	88.5±17.9	54.3±17.0
運動年数(年)	6.0±4.6	7.9±4.3	3.5±4.0
自転車使用年数(年)	2.8±3.1	2.7±2.8	3.0±3.8
消費エネルギー量(kcal)	253.5±243.1	338.4±259.0	140.4±181.3
%VC(%)	93.3±12.4	97.8±12.0	87.3±11.0
FVC(L)	4.1±1.0	4.9±0.6	3.1±0.4
%FEV ₁ (%)	94.2±11.0	95.7±9.3	92.2±13.6
FEV ₁ /FVC(%)	88.1±4.7	87.0±4.7	89.6±4.5
MVV(L)	99.9±27.4	117.6±11.3	76.3±24.7
$\dot{V}O_2$ max (ml/min/kg)	35.6±7.1	40.6±4.7	29.0±2.6

Mean±SD

の値は平均値±標準偏差で示し、解析には IBM SPSS Statics Ver.21 を使用し、有意水準 5% 未満をもって統計学的有意とした。

結果

1. 対象者の特性

誘発で LRC が発生した 14 名を解析対象とした。解析対象者の特性を表 1 に示す。

2. LRC 発生率と各項目との相関

定常運動負荷試験の条件②での LRC 発生率と運動年数、自転車使用年数、消費エネルギー量、肺機能、 $\dot{V}O_2$ max との相関係数を表 2 に示した。LRC 発生率と運動年数、MVV、 $\dot{V}O_2$ max との間に有意な相関を認めた(図 4~6)。また、 $\dot{V}O_2$ max と運動年数、消費エネルギー量、肺機能との相関係数を表 3 に示した。運動年数、%VC、FVC、MVV が $\dot{V}O_2$ max と有意な正の相関がみられたが、その他の項目では有意な相関はみられなかった。

3. 自由呼吸と LRC 誘発時の比較

定常運動負荷試験の条件①と②の LRC 発生率、換気諸量、HR、自覚症を表 4 に示した。LRC 発生率のみ②で有意に高値を示した

表 2 ②LRC 誘発での LRC 発生率と各項目との相関係数

	相関係数
運動年数(年)	0.727*
自転車使用年数(年)	-0.147
消費エネルギー量(kcal)	0.532
%VC(%)	0.035
FVC(L)	0.434
%FEV ₁ (%)	0.418
FEV ₁ /FVC(%)	-0.187
MVV(L)	0.544*
$\dot{V}O_2$ max (ml/min/kg)	0.550*

*p<0.05

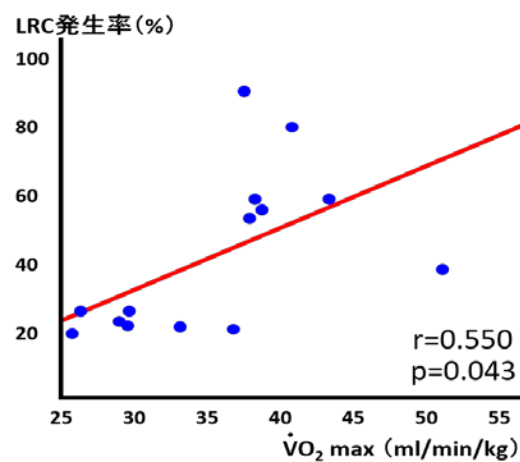


図 4 LRC 発生率と $\dot{V}O_2$ max の相関

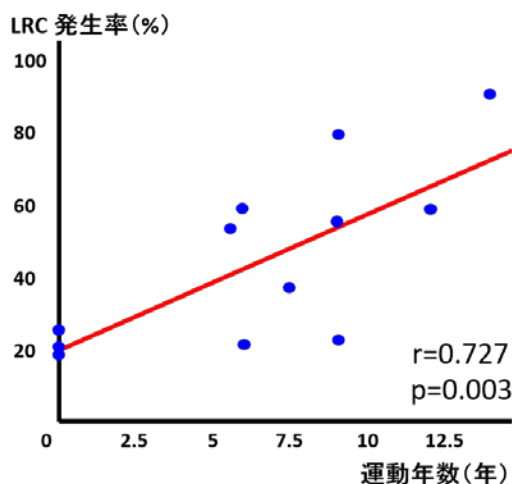


図 5 LRC 発生率と運動年数の相関

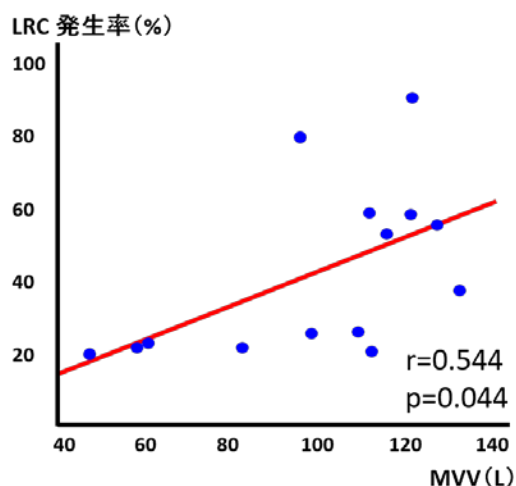


図 6 LRC 発生率とMVVの相関

表 3 $\dot{V}O_2\max$ と運動年数, 消費エネルギー量, 肺機能との相関係数

	相関係数
運動年数(年)	0.545*
消費エネルギー量(kcal)	0.392
%VC(%)	0.573*
FVC(L)	0.828**
%FEV ₁ (%)	0.253
FEV ₁ /FVC(%)	-0.290
MVV(L)	0.747*

*p<0.05 **p<0.01

表 4 ①自由呼吸と②LRC 誘発の換気諸量, HR, 自覚症の比較

	①自由呼吸	②LRC 誘発
LRC 発生率(%)	8.8±11.2	41.6±23.7*
$\dot{V}O_2/W$ (ml/min/kg)	18.2±5.2	18.0±5.4
$\dot{V}_E/\dot{V}O_2$	27.0±2.9	28.5±5.0
\dot{V}_E (l/min)	28.4±7.4	29.0±7.0
RR (rpm)	23.6±6.0	20.9±1.4
HR (bpm)	119.6±15.9	118.9±17.1
呼吸困難	2.5±1.2	2.6±1.1
下肢疲労	3.0±1.3	3.2±1.8

Mean±SD *p<0.05

(p<0.05). しかし, それ以外の項目では有意差はみられなかった.

考察

本研究では, LRC を意図的に誘発した際に, LRC が発生した対象者において LRC 発生率に関連する因子を検討した. その結果, LRC 発生率と関連が認められている有酸素能力の指標である $\dot{V}O_2\max$ との間に正の相関を確認することができた. さらに, LRC 発生率と運動年数および MVV との間にも正の相関が認められ, 先行研究にない新たな知見が得られた. 一方, LRC 発生率は, 意図的に誘発することにより上昇したものの, 先行研究^{4,7)}で確認されているような生理学

的効果は得られなかった.

LRC 発生率と関連する因子として, $\dot{V}O_2\max$, 運動年数, MVV が認められた. LRC 発生率と有酸素能力との関連は, Tamaki⁷⁾によって報告されており, 本研究では LRC 発生率と $\dot{V}O_2\max$ との間に正の相関を確認することができた. また, LRC 発生率との関連が認められた運動年数や MVV は, $\dot{V}O_2\max$ とも相関が認められたことから, 有酸素能力は LRC 発生率に関連する重要な因子であると考えられた. さらに, MVV については, $\dot{V}O_2\max$ との関連の他に, 健常者における運動時の換気予備能の因子の 1 つである¹⁷⁾とされていることから, 運動時の換気予備能が高いほど LRC 発生率が高くなるのではないかと考える.

一方で、%VC、FVCは $\dot{V}O_2\max$ との相関は見られたが、LRC発生率との相関はみられなかった。LRC誘発時の呼吸数は、誘発する際の呼吸と運動の比によって定められる。玉木ら¹⁸⁾は、LRCを誘発する際に定められた呼吸数が少ないほど1回換気量の代償が大きくなり、その場合に肺活量とLRC発生率に相関が認められると述べている。本研究では1:2によるLRC誘発であり、①自由呼吸と②LRC誘発での呼吸数に有意差はなく、この際に定められた呼吸数においては1回換気量による代償が大きくはなかったと考えられ、相関がみられなかったと推測する。そのため、適切なLRC比を選択すれば、LRC発生率は肺活量に左右されないと考える。

また、消費エネルギー量と $\dot{V}O_2\max$ およびLRC発生率との相関は認められなかった。本研究において、消費エネルギー量は国際標準化身体活動質問票の回答から算出した予測値を用いており、実測値ではなかったため、実測による消費エネルギー量を必ずしも正確に表しているとはいえない。そのため、 $\dot{V}O_2\max$ と消費エネルギー量との相関はみられず、LRC発生率とも相関しなかったと推察する。

自転車使用年数についてもLRC発生率との相関は認められなかった。Bernasconiら⁴⁾は、LRC発生率と運動様式への慣れの効果を報告しており、本研究でも自転車エルゴメータを使用したことから、自転車を長年使用しペダリング運動に慣れた人の方が同調させやすいのではないかと考えた。しかし、この報告は、プロのサイクリストと一般人との比較であり、今回の対象者は測定日までの通学等で自転車を使用するといった程度であった。以上のことから、一般人の自転車使用年数はLRC発生率に関連する因子とならない可能性がある。

LRC発生率は意図的に誘発することにより上昇した。本研究では、下肢エルゴメータにおいて、自然にLRCが発生する場合に出現しやすい1:2の比率で誘発を行った¹⁹⁾。また、視覚および聴覚的刺激によって、LRCを誘発させることが容易になるため²⁰⁾、メトロノームを用い、研究者からの声かけも行うとともに測定実施前に練習を実施した。これらのことから、同調させやすい条件であ

ったため、誘発時で有意にLRC発生率の上昇がみられたと考えられる。一方、誘発を行ってもLRCが発生しなかった対象者もいた。本研究では、自然にLRCが発生しやすいAT強度⁷⁾よりも低強度で行ったことが原因として考えられ、このことから誘発において強度の調整も重要であることが示唆された。

本研究においてはLRCによる生理学的効果が認められなかった。解良ら²¹⁾は低強度での運動負荷ではLRCを誘発する利得が少ないと報告しており、また、岩本ら²²⁾は健常者においては低および中等度の運動では同調の効果がみられなかったと報告している。本研究の対象者も健常者であり、AT-1min時の強度は健常者にとっては低強度である可能性が大きく、LRCが発生しても生理学的効果は得られなかったのではないかと考える。

本研究の制限としては、対象者数が少なく十分な解析を行えなかったことや、消費エネルギー量が実測値でなかったことが挙げられる。今後は対象者数を増やし、消費エネルギー量の実測に基づいたデータを用いて詳細な解析を実施する必要があると考える。さらに、臨床現場においてCOPDを代表する呼吸器疾患患者への運動療法において、LRCを応用するための検討が必要である。

まとめ

本研究では、LRC発生率と運動様式の慣れ、有酸素能力、運動年数、肺機能、消費エネルギー量の関連性を検討した。その結果、LRC発生率と $\dot{V}O_2\max$ 、運動年数、MVVとの間に正の相関を認めた。これらはLRC発生率を推測する因子になると考えた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を賜りました神津玲教授、鶴崎俊哉准教授、依祐一助教、田中貴子助教、ならびに研究の実施にご協力とご指導をいただきました関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会, 日本呼吸器学会, 他: 呼吸リハビリテーションマニュアルー運動療法ー(第2版). 照林社, 東京, 2012, pp.25-41.
- 2) 玉木彰, 長谷川聡, 他: COPD医療スタッフからの提言 COPD急性増悪後の呼吸リハビリテーションと運動呼吸リズム同調を意識した運動トレーニング. COPD Frontier. 2004; 3(2): 181-185.
- 3) Bott J, Blumenthal S, et al.: Guidelines for the physiotherapy management of the adult, medical, spontaneously breathing patient. Thorax. 2009; 64(suppl 1): 1-51.
- 4) Bernasconi P, Kohl J: Analysis of co-ordination between breathing and exercise rhythms in man. J Physiol. 1993; 471: 693-706.
- 5) 解良武士, 長谷川聡, 他: 呼吸同調現象(LRC)の気道閉塞圧($P_{0.1}$)からの検討. 日本生理人類学会誌. 2008; 13(4): 219-226.
- 6) 長谷川聡, 玉木彰, 他: Locomotor Respiratory Coupling が運動中の呼吸循環応答に及ぼす影響. 理学療法学. 2001; 28(suppl 2): 345.
- 7) Tamaki A, Hasegawa S, et al.: Study of Locomotor Respiratory Coupling during Pedaling. Acta Med Hyogo. 2005; 30(2): 161-166.
- 8) 安福祐一, 玉木彰, 他: 定常運動負荷試験における運動開始時の運動ー呼吸リズム同調の誘発が酸素動態に及ぼす影響. 理学療法学. 2014; 41(suppl 2): 617.
- 9) 柴原拓哉, 大場友裕, 他: 最大酸素消費量レベルは持久性運動パフォーマンスにどれだけ貢献するのか? Doshisha Journal of Health & Sports Science. 2015; 7: 52-66.
- 10) 佐々木孝夫: 肺活量の測定. 呼吸. 1983; 2(1): 56-59
- 11) 内藤義彦: わが国における男性勤労者の身体活動量と循環器検診成績の関連: 身体活動量の把握方法の開発とその応用. 大阪大学 博士論文要旨集 Doctoral thesis abstracts. 1995.
- 12) 解良武士, 大島洋平, 他: ペダル回転数が運動呼吸同調現象誘導時の換気諸量と唾液クロモグラニン A の分泌に与える影響. 理学療法科学. 2011; 26(4): 531-535.
- 13) 宮本俊朗, 玉木彰, 他: 運動ー呼吸リズムが上肢エルゴメーター運動時の呼吸・換気応答に及ぼす影響. 理学療法学. 2012; 39(2): 67-72.
- 14) 国際標準化身体活動質問票 - 東京医科大学 | 公衆衛生学分野. [http://www.tmu-ph.ac/pdf/IPAQ%20Japanese%20version\(short%20version%20usual%20week\).pdf](http://www.tmu-ph.ac/pdf/IPAQ%20Japanese%20version(short%20version%20usual%20week).pdf) (2015年12月1日引用)
- 15) 村瀬訓生, 勝村俊仁, 他: 身体活動量の国際標準化ーIPAQ 日本語版の信頼性, 妥当性の評価ー. 厚生指標. 2002; 49(11): 1-9.
- 16) Hill AR, Adams JM, et al.: Short-term entrainment of ventilation to the walking cycle in human. J Appl Physiol. 1988; 65: 570-578.
- 17) 伊東真理, 木村雅彦, 他: 健常若年者における最大換気量検査後の呼吸終末二酸化炭素分圧の変化. 臨床理学療法研究. 2012; 29: 11-14
- 18) 玉木彰, 大島洋平, 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. 理学療法科学 2008; 35(suppl 2): 571.
- 19) Bramble DM, Jenkins FA, Jr.: Mammalian locomotor- respiratory integration; implications for diaphragmatic and pulmonary design. Science. 1993; 262: 235-240.
- 20) Takano N, Deguchi H.: Sensation of breathlessness and respiratory oxygen cost during cycle exercise with and without conscious entrainment of the breathing rhythm. Eur J Appl Physiol. 1997; 76(3): 209-213.
- 21) 解良武士, 玉木彰, 他: 低強度での呼吸運動同調現象誘発が呼吸運動出力へ与える影響. 理学療法学. 2008; 35(suppl 2): 570.

- 22) 岩本えりか, 関川清一,他:低強度および中強度下肢運動時の呼吸様式の違いは運動-呼吸同調に影響を与えない. 理学療法学. 2009; 36(7): 341-347.

(指導教員:神津 玲)