緩徐なペース呼吸がガス代謝に及ぼす影響¹

福井赤十字病院

寺井 堅祐

放送大学福井学習センター

梅沢 章男

Effects of Progressive Slow Breathing on Gas Exchange

Kensuke TERAJ

Japanese Red Cross Fukui Hospital

Akio UMEZAWA

Fukui Study Center, the Open University of Japan

Although self-controlled breathing is a widely used relaxation technique, little is known about the mechanisms underlying its clinical effects. Thus, the purpose of this study was to clarify the effect of paced breathing (PB) on the respiratory system. Following a 20-min rest, 10 healthy males and females engaged in slow PB, moving progressively from 12 through 2 cpm. We found the following: 1) subjects progressively reduced their respiration rate (RR) ($p < .05$); 2) the pressure of the end-tidal CO₂ (PetCO₂) was maintained under PB conditions, whereas the constant error and coefficient of variation of RR increased markedly under the 2-cpm PB condition ($p < .05$); 3) minute ventilation ($\dot{V}_E$), CO₂ output ($\dot{V}_{CO_2}$), and CO₂ equivalence ($\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$) decreased significantly under the 2-cpm condition ($p < .05$), demonstrating gas-exchange efficiency; and 4) the total power of heart rate variability and baroreflex sensitivity were highest under the 4-cpm breathing condition. These results suggest that PB does not affect the respiratory gas-exchange system but does affect respiratory sensations, such as suffocation.

Key words: self-controlled breathing, paced breathing, gas exchange, heart rate variability, respiratory sensation

2015.9.28受稿, 2016.1.18受理, 2016.4.5 J-STAGE 早期公開, doi: 10.5674/jjppp.1509oa

連絡者及び連絡先: 〒918-8501 福井県福井市月見2-4-1 福井赤十字病院 寺井堅祐

E-mail: kterai@fukui-med.jrc.or.jp

¹ 本研究の一部は, 科学研究費挑戦的萌芽研究(課題番号 No. 24650373) の補助を受けて実施した。

【要 約】呼吸セルフコントロールは幅広く使われているリラクセーション技法であるが、臨床効果が生まれる機序については未知な部分が多い。そこで本研究は、ペース呼吸 (PB) が呼吸系に与える影響を明らかにすることを目的とした。健康な男女10名は、20分の安静に続き、12 cpmから2 cpmまで段階的に呼吸を遅くするPB条件に参加した。その結果以下の諸点が明らかにされた。1) 実験参加者は呼吸数 (RR) を段階的に落とすことに成功した ($p < .05$)。2) 呼気終末炭酸ガス分圧 ($P_{et}CO_2$) はPBを通じて維持されていたが、RRの恒常誤差と変動係数は2 cpmで明らかな増加を示した ($p < .05$)。3) 分時換気量 ($\dot{V}_E$)、炭酸ガス排出量 ($\dot{V}CO_2$)、炭酸ガス換気当量 ($\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$) が2 cpmにおいて有意に減少したことから ($p < .05$)、ガス交換が効率化したことが示唆された。4) 心拍変動の総パワー及び圧受容体反射感度は4 cpmで最大値を示した。以上の結果から、呼吸セルフコントロールは、呼吸困難感のような呼吸感覚に影響を及ぼすことと、動脈血中炭酸ガスには影響しないことが示唆された。

はじめに

呼吸セルフコントロール (self-control: SC) は、代表的なリラクセーション技法のひとつである。これまでに、呼吸SCは、パニック障害 (Meuret et al., 2008)、喘息 (Ritz et al., 2009)、高血圧 (Bertisch et al., 2011)、線維筋痛症 (Hassett et al., 2007) の治療に応用され、一定の治療効果が確認されている。しかし、呼吸SCが如何なる機序により臨床効果を発揮するかについては、ほとんど明らかにされていない。

呼吸SCを実施している先行研究では、ゆっくりした呼吸 (Sawada, 2000)、腹式呼吸 (Fumoto et al., 2004; Grossman et al., 1985)、口すぼめ呼吸 (Garrod et al., 2005)、呼気を強調した呼吸 (Ceugniet et al., 1994) という異なる呼吸パターンを目標としている。これらのなかで最も多く行われているのは、呼吸数をゆっくりした一定の値に維持するペース呼吸である。先行研究が用いているペースは、禅の修行で行われている2 cpm (Lehrer et al., 1999; Sugi & Akutsu, 1968) から、不安障害の治療で行われている12 cpm (Salkovskis et al., 1986) まで大きな幅がある。

呼吸系測度は、換気量測度とガス代謝測度に大別できる。呼吸SCでペースを落とすと、呼吸サイクルごとの換気量が増加して、単位時間当たりの総換気量を維持しようとする (Cooke et al., 1998; Prihan, 1963)。ガス代謝測度のなかでは、炭酸ガス排出量が全身の代謝レベルを反映する。代謝レベルを上回る過換気が生じたときには呼気終末炭酸ガス分圧 (pressure end-tidal carbon dioxide: $P_{et}CO_2$) が下降する (寺井・梅沢, 2003)。呼吸SCで生じる呼吸反応について、換気量とガス代謝の両面から評価することが必要になる。

呼吸は、化学調節と行動調節という2種類の調節系からコントロールされている。化学調節は、中枢と末梢の化学受容器が動脈血中炭酸ガス分圧 (pressure arterial carbon dioxide: $PaCO_2$) の変化を感知して換気を変える働きである。一方、行動調節は、主に会話や運動時に換気を変える働きであるが、これに加えて呼吸困難感と呼吸努力感という呼吸感覚が増強するときにも働くと考えられている (Oku et al., 1995)。この考えを拡大して、Cherniack et al. (1991) は、行動調節が呼吸感覚を最小化するように働くという仮説を提案している。

呼吸SC実施中に如何なるガス代謝の変化が生じるかという問題については知見が錯綜している。 $P_{et}CO_2$ は $PaCO_2$ を反映すると考えられているが (Gardner, 1994)、呼吸SC訓練が $P_{et}CO_2$ を上昇させるとする報告 (Meuret et al., 2008; Sawada, 2000)、下降させるとする報告 (Fried, 1987)、あるいは影響を与えないとする報告 (de Ruiter et al., 1989) が提出されている。このように呼吸SC訓練がガス代謝にどのような影響を与えるのかという基本的な事項さえ確認されていないのが現状である。

呼吸SCは行動調節にあたるが、行動調節により CO_2 量が増加すれば、化学調節を駆動することになる。このように行動調節と化学調節は、相互に作用し、場合によって両者が拮抗する可能性がある。すなわち呼吸SCが $PaCO_2$ の上昇や呼吸感覚の増大を誘発すれば、その影響が行動調節に及び、コントロール成績の低下をまねくと予想される。Denot-Ledunois et al. (1988) は、ペースの速さをランダムに変化させる呼吸SCを行い、課題の難易度と呼吸SC実施中の不快感との関係性を検討している。その結果、呼吸SC

の難易度が高いほど不快感は強くなり、課題が容易であれば不快感が小さいことを見出している。

呼吸SCが心臓血管系に如何なる影響を及ぼすかという問題については、これまで知見が集積され、一定の見解が得られている。ペース呼吸を実施している先行研究では、心拍変動および呼吸性洞性不整脈の増大 (Cooke et al., 1998; Novak et al., 1993; Song & Lehrer, 2003), 圧受容体反射感度の増加 (Gerritsen et al., 2000; Joseph et al., 2005) が報告されている。Lehrer et al. (2000) は、6 cpm前後のペース呼吸が心拍と圧受容体反射の変動を最大化することから、このペースを共振周波数 (resonant frequency) と呼んでいる。

本研究の目的は、先行研究で採用されている2—12 cpmのペース呼吸が、呼吸系の行動調節と化学調節に与える影響を明らかにすることにある。具体的には、呼吸SCのコントロール成績から行動調節を評価し、換気とガス代謝から化学調節を総合的に評価しようとした。また先行研究が報告している心臓血管系変化が生じることを確認することも目的とした。

方 法

実験参加者 健康な男女10名 (男性5名, 女性5名) が実験に参加した (年齢: 23—29歳, 平均 $\pm$ SD: 25.4 ± 2.9 歳)。

生理指標 呼吸系測定は、換気と呼気ガス変化をエアロモニター (ミナト医科学, AE-300S) により測定し、呼吸数 (respiration rate: RR), 1回換気量 (tidal volume: TV), ドライブ (Drive), デューティ比 (Timing), 分時換気量 (minute ventilation: $\dot{V}E$), $PetCO_2$, 炭酸ガス排出量 (carbon dioxide production: $\dot{V}CO_2$), 炭酸ガス換気当量 (ventilatory equivalence for carbon dioxide: $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$) をそれぞれ求めた。Driveは吸気量を吸気時間で除して算出し、Timingは吸気時間を呼吸時間で除して求めた (黒原ら, 2001)。心臓血管系測定は、心電図を標準第II誘導により時定数0.1 sで導出した。また、動脈血圧波形は、非利き手第3指にカフ (オメガ社, 2300フィナプレス血圧モニタ) を装着して連続記録した。心電図と動脈血圧の増幅出力を2 msのサンプリング間隔でデジタル変換した後、WinCPRS (Absolute Alien製) を用いて分析

した。具体的には、拍動ごとに、R波間隔から心拍数 (heart rate: HR) を求めた。心拍変動は、R波間隔について線形補間を施して500 msごとの等間隔データに変換した後、FFT法によるパワースペクトル解析を実施した。分析区間を256 sに設定し、各条件におけるパワースペクトル密度を求めた。得られたスペクトル密度について、0.003—0.04 Hzを超低周波数成分 (very low frequency: VLF), 0.04—0.15 Hzを低周波数成分 (low frequency: LF), 0.15—0.40 Hzを高周波数成分 (high frequency: HF) とし、すべての周波数帯域を総パワー (total power: TP) として算出した。圧受容体反射感度 (baroreflex sensitivity: BRS) は、R波間隔と最高血圧の時系列データについて、伝達関数法 (Robbe et al., 1987) を用いてクロススペクトルを算出した。このとき、信頼性を担保するため、Eckberg & Kuusela (2005) に倣い、R波間隔と最高血圧のコヒーレンスが0.5以上かつ位相が負の値を示すデータのみを分析対象とした。ゆっくりしたペース呼吸は、呼吸性洞性不整脈やHFの増大をもたらす (Grossman et al., 1991) ことから、本研究ではBRSを心臓迷走神経活動の指標とした。

呼吸SCのコントロール成績を評価するため、すべての実験参加者について、条件ごとにRRの恒常誤差 (constant error of RR: CE_{RR}) と変動係数 (coefficient of variation of RR: CV_{RR}) を求めた。 CE_{RR} は、サイクルごとのRRと目標呼吸数の差の平均値であり、平均RRが目標ペースに等しくなると0になり、早くなると正、遅くなると負の値を示す測定である (Schmidt & Lee, 1999)。 CV_{RR} は、各実験参加者について、条件ごとに求めた標準偏差を平均値で除したものに100を乗じて算出した。コントロール成績が低下してRRのばらつきが大きいほど、 CV_{RR} は大きい値を示す。

手続き 実験参加者をシールドルーム内の安楽椅子に着席させ、生理反応測定用の電極、トランスデューサ及び呼吸測定用マスクを装着した。20 minの安静状態 (REST) を記録した後、段階的に呼吸数を落とす呼吸SCを30 min実施した。呼吸SCの手掛かりとして、シールドルーム内のスピーカーから、周波数の異なる2種類の純音を交互に呈示した。高音 (440 Hz) に合わせて息を吸い、低音 (220 Hz) で吐くように教示した。目標ペースと安静時の呼吸数の差が大きいと、呼吸SCの成績が低下するおそれがあるため

Figure 1. Means and standard deviations of RR (left), constant error of RR (center), and coefficient of variation of RR (right) under experimental conditions. Asterisks indicate significant differences between two paced-breathing (PB) conditions ($p < .05$).

(Denot-Ledunois et al., 1988), 12 cpmから2 cpmずつ段階的にペースを減少させた。課題時間は各ペースともに5 minに設定した。高音と低音の呈示時間の比率は、各実験参加者のRESTにおけるTimingの平均値になるように設定した(平均 $\pm$ SD: $40.7 \pm 3.2\%$)。課題中に強い息苦しさを感じたときには、直ちにペース呼吸を中断するように教示した。実験終了後、ペース呼吸6条件のなかで、最も心地よさを感じた条件について内省報告を求めた。以上の実験手続について、福井大学教育地域科学部倫理審査委員会の承認を得た(第8号, 平成27年3月9日承認)。

処理方法 呼吸系測度は、エアロモニタから出力された呼吸サイクルごとの分析値から、条件ごとの平均値を求めて代表値とした。心臓血管系測度は、WinCPRSから出力された条件ごとの平均値を用いた。なお、CV_{RR}は、正規分布に近似させるために角変換を施し、統計処理に供した。

繰り返しのある分散分析を行うにあたり、タイプIエラー増加の危険性を避けるため、Greenhouse-Geisserの方法で自由度を調整した。条件の主効果が認められた場合には、乱塊法による下位検定(Tukey's HSD)を施した。下位検定の危険率は5%に設定した。

結 果

呼吸SCのコントロール成績と主観評価 はじめに各呼吸ペースにおけるコントロール成績を比較した。各実験条件におけるRR, CE_{RR}, CV_{RR}の平均値をFigure 1に示した。各呼吸ペースに合わせてRRの平均値が漸減しているのがわかる。CE_{RR}は、12 cpmから6 cpmにかけて0付近を推移した後、4 cpmから2 cpmにかけて増加した。またCV_{RR}は、8 cpmから次第に増加し、2 cpmにおいて約50%とRESTを上回る値を示した。RR, CE_{RR}, CV_{RR}の平均値について、条件(2/4/6/8/10/12 cpm)を要因とした繰り返しのある分散分析を施した結果、有意な条件の主効果と大きい効果量を認めた(RR: $F(5, 45) = 284.54, p < .0001, \varepsilon = .34, \eta_p^2 = 0.97$; CE_{RR}: $F(5, 45) = 4.09, p = .0435, \varepsilon = .33, \eta_p^2 = 0.31$; CV_{RR}: $F(5, 45) = 7.08, p = .0047, \varepsilon = .42, \eta_p^2 = 0.44$)。下位検定で有意差を認めた条件をFigure 1にアスタリスクで示した。RRは、すべての条件間で有意差を認めた($1.43 \leq ds \leq 29.00$)。CE_{RR}は、2 cpmにおいて8—12 cpmを有意に上回る値を示した($0.95 \leq ds \leq 1.24$)。CV_{RR}は、2 cpmにおいて6—12 cpmを有意に上回る値を示した($1.25 \leq ds \leq 1.62$)。実験参加者はRRを段階的に減少させることに成功したが、2 cpmにおいてコントロール成績が急激に悪化するという結果が得られた。

実験参加者が最も心地良いと評価した呼吸SCの条

Figure 2. Means and standard deviations of $\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$, $\dot{V}_{CO_2}$, $P_{et}CO_2$, $\dot{V}_E$, Drive, and TV under experimental conditions. Asterisks indicate significant differences between the 12-cpm PB condition and each PB condition ($p < .05$).

件を検討した。10名中4名が4—6 cpmを選び、3名が4 cpm、2名が6 cpm、残る1名が8 cpmを選択していた。2, 10, 12 cpmを選択した参加者はいないという結果を得た。

呼吸SCによる呼吸系変化 各実験条件における呼吸測度の推移をFigure 2に示した。平均値で見ると、呼吸SCにおいてTVは漸増し、 $\dot{V}_E$ は漸減していた。すべての呼吸測度について、条件(2/4/6/8/10/12

cpm)を要因とした繰り返しのある分散分析を施した。Timingと $P_{et}CO_2$ を除くすべての呼吸測度に有意な条件の主効果と大きい効果量を認めた(Drive: $F = 28.65$, $p < .0001$, $\epsilon = .43$, $\eta_p^2 = 0.76$; $P_{et}CO_2$: $F = 1.53$; Timing: $F = 1.69$; TV: $F = 51.33$, $p < .0001$, $\epsilon = .38$, $\eta_p^2 = 0.85$; $\dot{V}_{CO_2}$: $F = 8.36$, $p = .0024$, $\epsilon = .41$, $\eta_p^2 = .48$; $\dot{V}_E$: $F = 25.32$, $p < .0001$, $\epsilon = .36$, $\eta_p^2 = .74$; $\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$: $F = 19.30$, $p = .0004$, $\epsilon = .28$, $\eta_p^2 = 0.68$ 。すべて $df = 5$, 45)。下位検定で12 cpmとの間に有意差を認めた条件をFigure 2にアスタリスクで示した。2 cpmと12 cpmを比較すると、2 cpmではTVが有意に増大し、Drive, $\dot{V}_E$, $\dot{V}_{CO_2}$, $\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$ が有意に下回る値を示した($1.18 \leq d \leq 2.29$)。

呼吸SCによる心臓血管系変化 各実験条件における心臓血管系測度の平均値と標準偏差をTable 1に示した。すべての条件において、HRは70 bpm前後、MBPは100 mmHg前後の値を維持していた。すべての心臓血管系測度について、条件(2/4/6/8/10/12 cpm)を要因とした分散分析を施した。条件の主効果と効果量の結果をTable 1に併せて示した。HR, SBPを除くすべての測度で有意な条件の主効果と大きい効果量を認めた。下位検定の結果、12 cpmに比べると、2—8 cpmでのHFは有意に小さく、4 cpmでのLF, LF/HF, TP, そしてBRSは有意に増加していた($1.03 \leq ds \leq 2.85$)。また、2 cpmにおけるVLFは、その他すべての条件に比べて有意に大きい値を示していた($1.95 \leq ds \leq 2.05$)。

考 察

呼吸SCの行動評価 本研究では、実験参加者に対して、RRを12 cpmから2 cpmまで段階的に低下させる呼吸SCを求めた。呼吸SCが呼吸の行動調節に及ぼす影響を調べるために、各ペース条件におけるコントロール成績を比較した。呼吸SC実施中のRRは各ペース条件間で有意な差異を示したことから、RRが段階的に低下したことを確認した。また、Figure 1に示したように、 CE_{RR} は、4—12 cpmの条件で ± 0.5 cpmの範囲にあり、 CV_{RR} は、6—12 cpmの条件で20%を超えることがなかった。しかし、2 cpmでは、 CE_{RR} と CV_{RR} がいずれも8—12 cpmを有意に上回る値を示し、 CE_{RR} が+1.3 cpm、 CV_{RR} が48.3%にまで増加

Table 1. Means and standard deviations of cardiovascular measures under each PB condition.

Parameter	Unit	12 cpm	10 cpm	8 cpm	6 cpm	4 cpm	2 cpm	<i>F</i>	η_p^2
Heart rate	bpm	69.5 (11.1)	70.3 (8.5)	70.1 (8.1)	70.0 (8.7)	69.9 (8.5)	70.9 (8.3)	0.55 _a	0.06
HF power	ms ²	2189.1 (2594.1)	1801.0 (1389.1)	215.1 (187.9)	371.6 (317.7)	198.4 (318.4)	136.5 (136.7)	7.55 _a *	0.46
LF power	ms ²	369.4 (284.0)	490.9 (513.5)	3258.4 (2083.8)	5561.5 (3696.6)	6847.2 (4917.6)	1536.8 (987.1)	16.83 _a **	0.65
VLF power	ms ²	642.8 (546.6)	450.6 (296.7)	539.3 (435.5)	545.9 (462.4)	623.1 (443.1)	5240.9 (3463.7)	18.76 _a **	0.68
LF/HF	—	34.8 (27.5)	42.5 (49.9)	1930.8 (726.9)	1786.1 (485.0)	6566.7 (3416.9)	1561.1 (717.8)	29.59 _a ***	0.77
Total power	ms ²	3327.9 (3115.9)	2853.9 (1645.5)	4208.8 (2723.5)	6540.7 (4178.6)	7859.1 (5285.3)	7015.1 (4370.6)	12.17 _a ***	0.57
Diastolic blood pressure	mmHg	80.6 (11.5)	79.3 (12.9)	78.7 (13.0)	77.0 (13.2)	76.3 (13.1)	77.3 (12.6)	4.02 _a *	0.31
Mean blood pressure	mmHg	99.6 (13.9)	98.2 (16.2)	97.7 (16.7)	95.9 (17.1)	94.8 (16.5)	95.4 (15.5)	4.11 _a *	0.31
Systolic blood pressure	mmHg	137.0 (14.1)	136.3 (18.5)	137.2 (20.7)	135.5 (21.2)	133.2 (19.7)	133.2 (18.4)	1.87 _a	0.17
Baroreflex sensitivity	ms/ mmHg	9.7 (5.8)	9.5 (4.5)	15.2 (10.9)	14.4 (6.5)	15.9 (5.0)	13.3 (6.2)	5.83 _b **	0.42

Notes. ^a*df* = 5,45., ^b*df* = 5,40. ****p* < .001, ***p* < .01, **p* < .05.

した。CE_{RR}はエラーの方向と量を反映し、CV_{RR}はコントロールの安定性を反映することから、12 cpmから4 cpmまでの条件では良好な成績が維持されていたが、2 cpmではRRを十分に落とすことができず、安定したペース呼吸が難しくなったと考えられる。

呼吸SCの成績を検討している先行研究は少ないが、わずかに、Denot-Ledunois et al.(1998)が、安静時を基準にして40—250%の範囲でペース呼吸を実施している。目標RRと実測したRRとの差を示す恒常誤差率と絶対恒常誤差率からコントロール成績を評価している。その結果、目標RRが安静時の60%まではコントロール成績が良好であるが、40%に落とすと、恒常誤差率と絶対恒常誤差率はいずれも約12%急増してコントロール成績が低下したと報告している。これは本研究で得られたコントロール成績の結果と一致する知見である。呼吸ペースを落としていくと、あるペースまでは一定の精度でRRのコントロールが可能であるが、さらにペースが低下すると、コントロールが困難になると考えられる。

ペースを4 cpm以下の値に設定している先行研究の

多くはヨガや座禅に熟達した者を対象としており(Lehrer et al., 1999; Sugi & Akutsu, 1968), 本研究のように一般成人を対象に実施した例は少ない。ペースを4 cpmから2 cpmに落とすときには、呼吸時間を15 sから30 sまで延長することが求められた。このペースの大きな変更がコントロール成績の低下をもたらしたと考えられる。今後は、ペースをより細かく条件設定したときのコントロール成績を検討する必要がある。

呼吸SCに伴う呼吸系の変化 行動指標で観察されたコントロール成績の低下を裏付ける呼吸系変化がないかを検討したところ、4 cpmと2 cpmでは、すべての呼吸測度に違いが認められず、2 cpmで特定の呼吸系変化が生じているとは考えられなかった。RRを段階的に落としていくと、6 cpmを下回るペース条件において、TVは有意に増加するが、Driveは有意に減少していた。1回の吸気量は増えるものの、吸気の流速は減少し、ゆっくりと吸うように変化したと考えられる。このため、単位時間当たりの総換気量である $\dot{V}E$ は、6 cpm以下のペースで減少していた。 $\dot{V}E$ が有意に減少したが、PetCO₂は39 mmHg前後の値に維持

されていた。以上から、呼吸動態、とくにPetCO₂が反映しているPaCO₂の変化が、コントロール成績に影響を及ぼすという予想は否定された。

呼吸SC実施中のPetCO₂変化を検討している先行研究はわずかであり、その結果も一貫していない。Cooke et al. (1998) は、RRを18 cpmから3 cpmまで段階的に減少させたとき、PetCO₂は39 mmHg前後で推移して有意に変化しないことを報告している。一方、Sawada (2000) は、安静時15 cpmのRRを約半分の7 cpmに落としたとき、PetCO₂が36 mmHgから39 mmHgまで有意に上昇したことを報告している。PetCO₂の正常値は36—44 mmHgの範囲(Grossman, 1983)と考えれば、Sawada(2000)では、ゆっくりしたペース呼吸がPetCO₂を正常な値に回復させたとも考えられる。

$\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ は、単位量当たりの炭酸ガス消費に必要な換気量を意味し、呼吸効率を反映する測度として用いられている(Habedank et al., 1998)。 $\dot{V}CO_2$ は代謝活動を反映するので、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ が小さい場合は、一定の代謝に必要な換気量が少なく、大きい場合は、より多くの換気を必要としたことを意味する。従って、前者はより少ない換気で同じ代謝活動が行われたことになり、呼吸効率が高いことになる。Sin et al. (2010) は、健康成人に対して6 cpmと15 cpmのペース呼吸を実施し、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ は、15 cpmよりも6 cpmで有意に小さいことを報告している。本研究においても、Figure 2に示したように、8 cpm以下のペースで $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ が有意に減少していた。呼吸SCは、呼吸効率を高めるように働くと考えられる。ゆっくりした深い呼吸は、胸腔内の陰圧を強めて右心房への静脈還流を促進し(富田・高井, 2005)、吸気に占める死腔の比率を落として外呼吸に有効な換気量を増やすようにも働く(Ganong, 2012; 梅沢, 1998)。ゆっくりしたペース呼吸による静脈還流の増加と、より多くの外気の肺胞への取り込みが相俟ってガス交換の効率性が高まると推測される。

本研究では、2 cpmのペース条件においてコントロール成績が急激に低下するという行動調節の変化が見られた。しかし、化学調節を駆動するPaCO₂の変化は示されなかった。行動調節と化学調節に乖離した結果が得られた。化学調節以外の因子が行動調節の破綻をもたらしたと考えざるを得ない。Chonan et al.

(1990) は、実験参加者のPetCO₂を50 mmHgに維持するように吸入ガス中の酸素と炭酸ガスの量を調整しながら、安静ペースの40—250%に設定した呼吸SCを実施している。ペースが安静よりも遅くなると、呼吸SCの成績と心地良さの主観評定値は低下することを見出している。PetCO₂は50 mmHgに維持されていたことから、呼吸SCの成績低下は、化学調節ではなく、心地良さ、すなわち呼吸感覚の影響を受けて生じたと考えられる。このように、ゆっくりした呼吸SCは、化学調節ではなく、呼吸感覚に影響を与え、結果として行動調節を乱すように機能したと推論できる。2 cpmのペース条件において、心地良さに関する主観評価が得られないという結果がこれを裏付けている。

呼吸SCが心臓血管系に及ぼす影響 呼吸SC実施中に観察された心拍変動とBRSの変化は、先行研究と一致していた。具体的には、Table 1に示したように、HFは10—12 cpm、LFは4—8 cpm、そしてVLFは2 cpmで大きい値を示していた。このように、心拍変動の周波数帯域は各条件の呼吸ペースと同期していた(Grossman et al., 1991; Sisto et al., 1995; Sawada, 2000; Stark et al., 2000)。また、4—6 cpmというゆっくりしたペースにおいて、TPが有意に増加することと(Cooke et al., 1998; Novak et al., 1993; Song & Lehrer, 2003; Vaschillo et al., 2006)、BRSが有意に増加することを確認した(Reyes del Paso et al., 2006; Vaschillo et al., 2006)。このように、本研究で実施した呼吸SCは、これまで報告されている知見と同様の心臓血管系変化をもたらしたことから、先行研究においても同様の呼吸反応が生じていたと推測できる。

BRSの有意な増加から、心臓迷走神経活動は4 cpmで高まったと考えられた。このとき、TPも有意に増加していた。Lehrer et al. (2003) は、共振周波数でのペース呼吸が、BRSとTPを有意に増加させると報告している。また、そのメカニズムについて、共振周波数のペース呼吸で増大した心拍変動が、迷走神経性の圧受容体反射を強めるように影響したと説明している。

本研究では、すべてのペース条件において、HRは一定の値に維持されるという結果も得られた。BRSの結果から示唆されたように、ゆっくりしたペース呼吸が心臓迷走神経活動を強めたとすると、HRも低下

することが予想される。BRSとHRの一見矛盾したような変化は、Vaschillo et al.(2012)でも報告されている。彼らは、6 cpmのペース呼吸実施中に、BRSとHRがいずれも有意に増加したと報告している。本研究とVaschillo et al. (2012)の結果から、呼吸SCは圧受容体反射感度を強めるが、HRに影響を与えない可能性が考えられる。これに関連して、Porges (1995)は、心臓迷走神経活動が大きく2つの調節系から構成されるというpolyvagal theory (多重迷走神経理論)を提唱している。このモデルは、迷走神経活動のphasicな変動を調節する系と、tonicな変動を調節する系を想定している。早野(2003)は、2つの調節系が独立してコントロールされており、phasicな調節系が主に呼吸性洞性不整脈やHFに反映するのに対して、tonicな調節系がHRに反映すると考えている。この理論に従えば、本研究で実施した呼吸SCは、主にphasicな調節系に影響を与えたと解釈できる。

本研究では、ゆっくりしたペースの呼吸SCが化学調整と行動調整に及ぼす影響を明らかにしようとした。ペースを12 cpmから2 cpmまで広範囲で変化させるスケジュールを用いたにも関わらず、呼吸系は安定した状態を維持し、ペースの変化が化学調節に大きな影響を与えないことが明らかにされた。こうした呼吸系の変化は、少しずつ時間をかけてペースを落とすというスケジュールによりもたらされた可能性がある。コントロール成績から評価した行動調節は、2 cpmというもっとも遅いペースで悪化した。行動調節が悪化した要因として、化学調節ではなく、呼吸感覚の関与を想定せざるを得ない結果が得られた。一方、生理指標の結果からは、呼吸SCが、呼吸系ではガス交換の効率を高め、心臓血管系では心臓迷走神経活動を強めるように働くことが明らかにされた。以上の結果をまとめると、生理的に見ると、呼吸SCは全身を休息に導くことで臨床効果を発揮すると考えられる。このとき、呼吸感覚の増強を避けることが特に重要であることが示唆された。

今後は、呼吸SC実施中に生じる呼吸感覚の変化を評価して、行動調節に及ぼす影響を詳細に分析することが課題になる。呼吸困難感や呼吸努力感が増強しないペースと、心地良さやリラクセス感を強めるペースを選択する評価手続きを加えることで、呼吸SCのより有効な臨床応用につながることを期待される。

引用文献

- Bertisch, S. M., Schomer, A., Kelly, E. E., Baloa, L. A., Hueser, L. E., Pittman, S. D., & Malhotra, A. (2011). Device-guided paced respiration as an adjunctive therapy for hypertension in obstructive sleep apnea: A pilot feasibility study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **36**, 173-179.
- Ceugniet, F., Cauchefer, F., & Gallego, J. (1994). Do voluntary changes in inspiratory-expiratory ratio prevent exercise-induced asthma? *Biofeedback and Self-Regulation*, **19**, 181-188.
- Cherniack, N. S., Oku, Y., Saidal, G. M., Bruce, E. N., & Altose, M. D. (1991). Optimization of breathing through perceptual mechanisms. In T. Takishima, & N. S. Cherniack (Eds.), *Control of breathing and dyspnea. Advances in the biosciences Vol 79*. New York: Pergamon Press.
- Chonan, T., Mulholland, M. B., Altose, M. D., & Cherniack, N. S. (1990). Effects of changes in level and pattern of breathing on the sensation of dyspnea. *Journal of Applied Physiology*, **69**, 1290-1295.
- Cooke, W. H., Cox, J. F., Diedrich, A. M., Taylor, J. A., Beightol, L. A., Amesiv, J. E., Hoag, J. B., Seidel, H., & Eckberg, D. L. (1998). Controlled breathing protocols probe human autonomic cardiovascular rhythms. *American Journal of Physiology*, **274**, H709-H718.
- Denot-Ledunois, S., Vardon, G., Perruchet, P., & Gallego, J. (1988). Effects of voluntary changes in breathing frequency on respiratory comfort. *Biological Psychology*, **49**, 71-82.
- Eckberg, D. L., & Kuusela, T. A. (2005). Human vagal baroreflex sensitivity fluctuates widely and rhythmically at very low frequencies. *The Journal of Physiology*, **567**, 1011-1019.
- Fried, R. (1987). Relaxation with biofeedback-assisted guided imagery: The importance of breathing rate as an index of hypoarousal. *Biofeedback and Self-Regulation*, **12**, 273-279.
- Fumoto, M., Sato-Suzuki, I., Seki, Y., Mohri, Y., & Arita, H. (2004). Appearance of high-frequency

- alpha band with disappearance of low-frequency alpha band in EEG is produced during voluntary abdominal breathing in an eyes-closed condition. *Neuroscience Research*, **50**, 307-317.
- Ganong, W. F. (2012). *Ganong's review of medical Physiology*. New York: A Lange Medical Book/McGraw-Hill Medical.
- Gardner, W. (1994). Measurement of end-tidal PCO₂ and PO₂. *Biofeedback and Self-Regulation*, **19**, 103-113.
- Garrod, R., Dallimore, K., Cook, J., Davies, V., & Quade, K. (2005). An evaluation of the acute impact of pursed lips breathing on walking distance in nonspontaneous pursed lips breathing chronic obstructive pulmonary disease patients. *Chronic Respiratory Disease*, **2**, 67-72.
- Gerritsen, J., TenVoorde, B. J., Dekker, J. M., Kostense, P. J., Bouter, L. M., & Heethaar, R. M. (2000). Baroreflex sensitivity in the elderly: Influence of age, breathing and spectral methods. *Clinical Science*, **99**, 371-381.
- Grossman, P. (1983). Respiration, stress, and cardiovascular function. *Psychophysiology*, **20**, 284-300.
- Grossman, P., de Swart, J. C., & Defares, P. B. (1985). A controlled study of a breathing therapy for treatment of hyperventilation syndrome. *Journal of Psychosomatic Research*, **29**, 49-58.
- Grossman, P., Karemaker, J., & Wieling, W. (1991). Prediction of tonic parasympathetic cardiac control using respiratory sinus arrhythmia: The need for respiratory control. *Psychophysiology*, **28**, 201-216.
- Habedank, D., Reindl, I., Vietzke, G., Bauer, U., Sperfeld, A., Glaser, S., Wernecke, W., & Kleber, F. X. (1998). Ventilatory efficiency and exercise tolerance in 101 healthy volunteers. *European Journal of Applied Physiology*, **77**, 421-426.
- Hassett, A. L., Radvanski, D. C., Vaschillo, E. G., Vaschillo, B., Sigal, L. H., Karavidas, M. K., Buyske, S., & Lehrer, P. M. (2007). A pilot study of the efficacy of heart rate variability (HRV) biofeedback in patients with fibromyalgia. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **32**, 1-10.
- 早野順一郎 (2003). 呼吸性洞性不整脈はなぜ心臓迷走神経活動と関連するのか? 循環制御, **24**, 195-201.
- Joseph, C. N., Porta, C., Casucci, G., Casiraghi, N., Maffei, M., Rossi, M., & Bernardi, L. (2005). Slow breathing improves arterial baroreflex sensitivity and decreases blood pressure in essential hypertension. *Hypertension*, **46**, 714-718.
- 黒原 彰・寺井堅祐・竹内裕美・梅沢章男 (2001). 虚偽検出における呼吸系変容——裁決質問に対する抑制性呼吸の発現機序—— 生理心理学と精神生理学, **19**, 75-86.
- Lehrer, P., Sasaki, Y., & Saito, Y. (1999). Zazen and cardiac variability. *Psychosomatic Medicine*, **61**, 812-821.
- Lehrer, P. M., Vaschillo, E., & Vaschillo, B. (2000). Resonant frequency biofeedback training to increase cardiac variability: Rationale and manual for training. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **25**, 177-191.
- Lehrer, P. M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S. E., Eckberg, D. L., Edelberg, R., Shih, W. J., Lin, Y., Kuusela, T. A., Tahvanainen, K. U., & Hamer, R. M. (2003). Heart rate variability biofeedback increases baroreflex gain and peak expiratory flow. *Psychosomatic Medicine*, **65**, 796-805.
- Meuret, A. E., Wilhelm, F. H., Ritz, T., & Roth, W. T. (2008). Feedback of end-tidal pCO₂ as a therapeutic approach for panic disorder. *Journal of Psychiatric Research*, **42**, 560-568.
- Novak, V., Novak, P., de Champlain, J., Le Blanc, A. R., Marin, R., & Nadeau, R. (1993). Influence of respiration on heart rate and blood pressure fluctuations. *Journal of Applied Physiology*, **74**, 617-626.
- Oku, Y., Saidel, G. M., Cherniack, N. S., & Altose, M. D. (1995). Model of respiratory sensation and willful control of ventilation. *Medical and Bio-*

- logical Engineering and Computing*, **33**, 252–256.
- Porges, S. W. (1995). Orienting in a defensive world: Mammalian modifications of our evolutionary heritage. A Polyvagal Theory. *Psychophysiology*, **32**, 301–318.
- Priban, I. P. (1963). An analysis of some short-term patterns of breathing in man at rest. *The Journal of Physiology*, **166**, 425–434.
- Reyes del Paso, G. A., Cea, J. I., Gonzalez-Pinto, A., Cabo, O. M., Brazal, J., Martinez, B., Hernandez, J. A., & Gonzalez, M. I. (2006). Short-term effects of a brief respiratory training on baroreceptor cardiac reflex function in normotensive and mild hypertensive subjects. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **31**, 37–49.
- Ritz, T., Meuret, A. E., Wilhelm, F. H., & Roth, W. T. (2009). Changes in pCO₂, symptoms, and lung function of asthma patients during capnometry-assisted breathing training. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **34**, 1–6.
- Robbe, H. W., Mulder, L. J., Ruddel, H., Langewitz, W. A., Veldman, J. B., & Mulder, G. (1987). Assessment of baroreceptor reflex sensitivity by means of spectral analysis. *Hypertension*, **10**, 538–543.
- de Ruiter, C., Ryken, H., Garssen, B., & Kraaimaat, F. (1989). Breathing retraining, exposure and a combination of both, in the treatment of panic disorder with agoraphobia. *Behaviour Research and Therapy*, **27**, 647–655.
- Salkovskis, P. M., Jones, D. R., & Clark, D. M. (1986). Respiratory control in the treatment of panic attacks: Replication and extension with concurrent measurement of behaviour and pCO₂. *British Journal of Psychiatry*, **148**, 526–532.
- Sawada, Y. (2000). A preliminary study of the comfort of paced respiration. *The Japanese Psychological Research*, **42**, 123–127.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. 3rd ed. Champaign, Ill: Human Kinetics.
- Sin, P. Y., Webber, M. R., Galletly, D. C., Ainslie, P. N., Brown, S. J., Willie, C. K., Sasse, A., Larsen, P. D., & Tzeng, Y. C. (2010). Interactions between heart rate variability and pulmonary gas exchange efficiency in humans. *Experimental Physiology*, **95**, 788–797.
- Sisto, S. A., Tapp, W., Drastal, S., Bergen, M., DeMasi, I., Cordero, D., & Natelson, B. (1995). Vagal tone is reduced during paced breathing in patients with the chronic fatigue syndrome. *Clinical Autonomic Research*, **5**, 139–143.
- Song, H. S., & Lehrer, P. M. (2003). The effects of specific respiratory rates on heart rate and heart rate variability. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **28**, 13–23.
- Stark, R., Schienle, A., Walter, B., & Vaitl, D. (2000). Effects of paced respiration on heart period and heart period variability. *Psychophysiology*, **37**, 302–309.
- Sugi, Y., & Akutsu, K. (1968). Studies on respiration and energy-metabolism during sitting in zazen. 体育学研究, **12**, 190–206.
- 寺井堅祐・梅沢章男 (2003). 呼吸セルフコントロールのリラクセーションに及ぼす効果——呼気終末炭酸ガス分圧のバイオフィードバックによる検討 バイオフィードバック研究, **30**, 31–37.
- 富田忠雄・高井 章 (2005). 生命維持機能の生理学 昭和堂.
- 梅沢章男 (1998). 呼吸活動 藤澤 清・柿木昇治・山崎勝男 (編) 新生理心理学1巻 生理心理学の基礎 北大路書房 pp. 196–209.
- Vaschillo, E. G., Vaschillo, B., & Lehrer, P. M. (2006). Characteristics of resonance in heart rate variability stimulated by biofeedback. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, **31**, 129–142.
- Vaschillo, E. G., Vaschillo, B., Buckman, J. F., Pandina, R. J., & Bates, M. E. (2012). Measurement of vascular tone and stroke volume baroreflex gain. *Psychophysiology*, **49**, 193–197.