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

松 本 卓 也 松 永 篤 彦 原 美 弥 子
齊 藤 正 和 米 澤 隆 介 石 井 玲
忽 那 俊 樹 山 本 竜 弥 増 田 卓

EFFECTS OF THE BREATHING MODE CHARACTERIZED BY PROLONGED EXPIRATION ON RESPIRATORY AND CARDIOVASCULAR RESPONSES AND AUTONOMIC NERVOUS ACTIVITY DURING THE EXERCISE

TAKUYA MATSUMOTO, ATSUHIKO MATSUNAGA, MIYAKO HARA,
MASAKAZU SAITOH, RYUSUKE YONEZAWA, AKIRA ISHII,
TOSHIKI KUTSUNA, KAZUYA YAMAMOTO and TAKASHI MASUDA

Abstract

PURPOSE : The purpose of this study was to clarify the effects of prolonged expiration(PE)on respiratory and cardiovascular responses and autonomic nervous activity during the exercise.

METHODS : Twenty-five healthy men(22 ± 1 years)were classified according to the breathing mode during the exercise : 2-second inspiration and 4-second expiration in 1 : 2 group, 3-second inspiration and 3-second expiration in 1 : 1 group and normal breathing in control group. The 6-minute exercise was performed at anaerobic threshold(AT)and 60%AT using a cycle ergometer as an exercise protocol. Respiratory rate(RR)and tidal volume(TV)were measured by the expired gas analysis. The power of low-(LF)and high-frequency components(HF)was analyzed from a Holter electrocardiogram to assess the heart rate variability.

RESULTS : RR and LF/HF were significantly lower, TV and HF were significantly higher during the exercise of 60%AT and AT in the 1 : 1 and 1 : 2 groups than in the control group($P < 0.05$ or $P < 0.01$). The increase of HR was significantly lower and that of HF was significantly higher during the exercise at 60%AT in the 1 : 2 group than in the 1 : 1 group($P < 0.05$).

CONCLUSION : PE activated the parasympathetic nervous activity and consequently restrained an excessive increase of HR during the exercise at 60%AT.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2008, 57 : 315~326)

key word : prolonged expiration, autonomic nervous activity, exercise, heart rate variability, cardiovascular response

I . は じ め に

運動によって変化する自律神経活動は、呼吸循環応答を規定する因子として知られ、自律神経活動の不均衡が生じると運動耐容能が低下すると報告されている^{1~3)}。一般に、健常者では運動強度に応じた適切な酸素供給を維持するために、交感神経と副交感神経の均衡を変化させ呼吸循環応答を制御している^{4~6)}。一方で、慢性心不全の患者、特に重度の心機能低下を示す患者では、安静時から副交感神経活動は減弱し交感神経活動が亢進しているた

め^{1~3,6,7)}、低強度の運動においても交感神経活動が過剰に亢進して、血圧上昇や頻脈を生じ重篤な不整脈を惹起する場合がある^{8,9)}。そのため、低心機能患者に対して運動を処方する際には、過剰な心血管応答を引き起こさないように、自律神経活動の変化を考慮した適切な運動処方を行う必要がある。

一方、心拍数が吸気時に早くなり呼気時に遅くなるという呼吸性洞性不整脈の発生には、呼吸中枢による迷走神経節前ニューロンへの直接干渉と、肺の伸展受容体からの副交感神経への刺激が関与するといわれている^{10~12)}。この自律神経活動を評価する

方法として心拍変動解析が知られ, そのスペクトル解析によって抽出される高周波成分(HF)は呼吸性洞性不整脈を反映するため, 純粋な副交感神経活動の指標として広く受け入れられている^{11,12)}. 呼吸による肺からの求心性インパルスの変化を検討した研究では, 呼気時間を意識的に延長させた腹式呼吸を安静時に行うと, 副交感神経活動が亢進して血圧や心拍数が低下し不整脈の出現が減少すること^{13,14)}, さらにこの呼吸を運動中に行うと換気効率が改善することが報告されている¹⁵⁾. しかしながら, 運動中に吸気時間と呼気時間の比率を変化させると同時に呼吸数や分時換気量も変化するため, 呼吸様式の変化そのものが呼吸循環応答および自律神経活動に与える影響については未だ一定の見解が得られていない.

そこで, 本研究は呼吸数や分時換気量を制御した上で, 嫌気性代謝閾値(anaerobic threshold, AT)である中強度の運動と, ATの60%である低強度の運動を行い, 呼気延長を特徴とした呼吸様式が運動中の呼吸循環応答ならびに自律神経活動に与える影響について検討した.

Ⅱ. 方 法

A. 対 象

研究参加者は喫煙者を除外した若年健常男性25名(年齢 21.2 ± 1.4 歳, 身長 174.6 ± 9.0 cm, 体重 67.0 ± 8.9 kg, body mass index 22.1 ± 1.7 kg/m²)とした. 本研究のプロトコルは, 北里大学の倫理委員会の承認を得た後, 研究参加者に対して研究の趣旨を十分に説明し, 書面にて同意を得て実施した. 測定条件として, 研究参加者は測定前夜からアルコールの摂取や激しい運動を避け, また測定の2時間前からは禁食とした. 測定は, 午後の決まった時間帯に, 室温23~25℃, 湿度40~60%に保たれた部屋で実施された.

B. 研究プロトコル

自転車エルゴメータに乗って自然呼吸のまま15分間の安静座位をとった後, 呼吸様式を制御しながら自転車エルゴメータによる運動を6分間行い, 運動後には自然呼吸による5分間の安静座位を設けた. 自転車エルゴメータによる運動強度は, AT強度およびATの60%強度の2種類とし, ATの値は同年

齢の日本人男性の平均値を用いた¹⁶⁾. また, 自転車の回転速度は毎分50回転を保つように指示した. 呼吸様式は, 運動中の呼吸数と分時換気量を一定に保つために1呼吸周期を6秒間とし, 吸気時間と呼気時間の比が2秒対4秒の呼気延長の呼吸を行った被験者10名を呼気延長群, 吸気時間と呼気時間の比が3秒対3秒の同比率である呼吸を行った被験者10名を同比率群, さらに対照として特別な指示をせずに自然呼吸のまま運動を行った被験者5名を自然呼吸群として3群に分類した. 指定した呼吸様式は, 運動中の6分間において実施され, 研究参加者は1秒に1回のリズムのピッチ音と呼気ガス分析器にリアルタイムで表示される吸気時間・呼気時間に合わせて呼吸するように指示された. 各群の研究参加者は, AT強度と60%AT強度の2種類の運動を24時間以上の間隔をあけて順不動に実施した.

C. 測定項目

Breath-by-breath方式による呼気ガス分析装置(AE300S, ミナト医科学, 大阪)を用いて, 呼吸数(respiratory rate, RR), 吸気時間(inspiratory time, Ti), 呼気時間(expiratory time, Te), 吸気時間と呼気時間の比(Te/Ti), 1回換気量(tidal volume, TV), 分時換気量(respiratory minute volume, $\dot{V}_E$), 酸素摂取量(uptake oxygen, $\dot{V}O_2$)および二酸化炭素排出量(carbon-dioxide emission, $\dot{V}CO_2$)を運動開始前の安静座位の時点から測定した. それぞれの測定値から10秒毎の平均値を算出して呼吸応答の指標とし, さらに $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ を算出して換気効率の指標とした. 自動血圧計(FB300, 日本コーリン, 愛知)を用いて, 運動前は5分毎に, 運動中および運動後は1分毎に収縮期血圧(systolic blood pressure, SBP)と拡張期血圧(diastolic blood pressure, DBP)を測定し, 心血管応答の指標とした. また, ホルター心電図(FM300, フクダ電子, 東京)を測定開始時に装着して心拍数(heart rate, HR)を記録し, そのR-R間隔からMemCal(TARAWA/WIN, GMS社, 東京)による最大エントロピー法で周波数解析を行った. 周波数解析は, 0.04-0.15 Hzの低周波成分(low-frequency component, LF)と0.15-0.40 Hzの高周波成分(high-frequency component, HF), その比であるLF/HF, さらにエントロピーを10秒毎の平均値として算出し, HFを副交感神経活動の指標, LF/

HF を交感神経活動の優位性の指標, エントロピーを心拍変動の乱雑性の指標とした^{17~20)}。さらに, Borg Scale²¹⁾を用いて運動前は5分毎, 運動開始時から運動後の安静終了時までは1分毎に自覚的運動強度(rating of perceived exertion, RPE)を測定した。

D. 解析方法

呼吸応答の各指標と RPE は, 運動中の6分間の平均値を使用した。心血管応答と自律神経活動の各指標は, 運動前の安静15分間の最初と最後の1分間を除いた13分間の平均値を安静時とし, 運動中と運動後は1分毎に平均値を求め, 各指標を経時的な変化で表示した。次に, 6分間の運動における各指標

の平均値から安静時に対する変化率(%)を算出した。統計学的処理は, 運動中の3群間の比較には一元配置分散分析, および Scheffe の多重比較を用いた。また, 群間(呼吸延長群, 同比率群, 自然呼吸群)と時間(安静時, 運動中と運動後の1分毎の経時的変化)の2要因, さらに群間(呼吸延長群, 同比率群, 自然呼吸群)と強度(60%AT 強度, AT 強度)の2要因についてはそれぞれ二元配置分散分析, および Scheffe の多重比較を行った。なお, 統計計算には SPSS 11.0J for Windows を用いて, 統計学的有意水準は5%未満とした。

Ⅲ. 結 果

60%AT 強度と AT 強度の運動における呼吸応答

Table 1. Respiratory responses and RPE during the exercise of 60%AT or AT.

	control group	1:1 group	1:2 group	F (ANOVA)	P (ANOVA)
No. of subjects	5	10	10		
Age (years)	21.3 ± 1.2	22.6 ± 1.6	22.6 ± 1.6	1.0	NS
Height (cm)	176.7 ± 9.5	172.5 ± 8.5	172.5 ± 8.5	0.2	NS
Weight (kg)	66.2 ± 7.7	67.7 ± 10.1	67.7 ± 10.1	0.1	NS
BMI	21.2 ± 0.6	22.6 ± 1.5	22.6 ± 1.5	0.9	NS
exercise of 60%AT					
Ti (sec)	1.24 ± 0.04	2.90 ± 0.03 **	2.06 ± 0.04 **,###	372.8	P < 0.01
Te (sec)	1.70 ± 0.04	3.06 ± 0.03 **	3.94 ± 0.04 **,###	407.5	P < 0.01
Te/Ti	1.37 ± 0.07	1.07 ± 0.02 **	1.96 ± 0.04 **,###	216.6	P < 0.01
RR (breath/min)	21.0 ± 0.8	10.3 ± 0.1 **	10.1 ± 0.1 **	491.0	P < 0.01
TV (l)	1.01 ± 0.08	2.02 ± 0.14 **	2.05 ± 0.17 **	6.2	P < 0.01
VE (l/min)	20.7 ± 1.1	20.4 ± 1.4	20.6 ± 1.8	0.0	NS
VO ₂ (ml/min/kg)	12.1 ± 0.4	11.7 ± 0.2	11.9 ± 0.2	0.7	NS
VE/VO ₂	35.8 ± 0.6	29.1 ± 0.5 **	29.3 ± 0.6 **	19.7	P < 0.01
RPE	10.2 ± 1.0	7.3 ± 0.5 **	7.3 ± 0.5 **	4.9	P < 0.05
exercise of AT					
Ti (sec)	1.22 ± 0.10	2.90 ± 0.03 **	2.07 ± 0.05 **,###	239.0	P < 0.01
Te (sec)	1.65 ± 0.15	3.10 ± 0.03 **	3.99 ± 0.04 **,###	366.6	P < 0.01
Te/Ti	1.36 ± 0.10	1.08 ± 0.02 **	1.96 ± 0.06 **,###	97.0	P < 0.01
RR (breath/min)	21.7 ± 1.4	10.1 ± 0.1 **	10.0 ± 0.1 **	298.4	P < 0.01
TV (l)	1.26 ± 0.13	2.37 ± 0.14 **	2.38 ± 0.13 **	9.4	P < 0.01
VE (l/min)	26.5 ± 2.6	23.7 ± 1.4	23.6 ± 1.3	0.6	NS
VO ₂ (ml/min/kg)	17.5 ± 0.4	15.7 ± 0.2	15.8 ± 0.3	1.3	NS
VE/VO ₂	34.1 ± 0.6	27.2 ± 0.3 **	27.6 ± 0.2 **	77.1	P < 0.01
RPE	10.7 ± 0.9	7.8 ± 0.7 **	7.8 ± 0.6 **	2.8	P < 0.05

Data are mean ± SEM, 1:2 group; controlled respiration of 2-second inspiration and 4-second expiration, 1:1 group; controlled respiration of 3-second inspiration and 3-second expiration, control group; normal breathing without a controlled respiration, **P < 0.01 vs. control group, ###P < 0.01 vs. 1:1 group, not significant, NS; anaerobic threshold, AT; body mass index, BMI; inspiratory time, Ti; expiratory time, Te; respiratory rate, RR; tidal volume, TV; respiratory minute volume, VE; oxygen uptake, VO₂; carbon-dioxide emission, VCO₂; rating of perceived exertion, RPE.

と RPE を表 1 に示す. 60%AT および AT 強度の運動において, 同比率群と呼気延長群の T_i は, 自然呼吸群に比べて有意に高値を示し(いずれも $P < 0.01$), 呼気延長群の T_i は同比率群に比べて有意に低値を示した(いずれも $P < 0.01$). いずれの運動強度においても, 呼気延長群の T_e と T_e/T_i は自然呼吸群や同比率群に比べて有意に高値を示し(いずれも $P < 0.01$), 同比率群の T_e と T_e/T_i は自然呼吸群に比べて T_e は有意に高値を(いずれも $P < 0.01$), T_e/T_i は有意に低値を示した(いずれも $P < 0.01$). いずれの運動強度においても, 同比率群と呼気延長群の RR , $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ と RPE は両群間で有意差を認めなかったが, 自然呼吸群と比べて有意に低値を示した(いずれも $P < 0.01$). いずれの運動強

度においても, 同比率群と呼気延長群の TV は両群間で有意差を認めなかったが, 自然呼吸群と比べて有意に高値を示した(いずれも $P < 0.01$).

60%AT 強度と AT 強度の運動における血圧の経時的変化を図 1a と図 1b に, それぞれの安静時に対する運動中の血圧の変化率を図 1c に示す. いずれの運動強度においても, SBP は 3 群ともに安静時に比べて運動中に有意に増加したが(いずれも $P < 0.01$) (図 1a, 図 1b), 安静時に対する運動中の SBP の上昇の程度は 3 群間で有意差を認めなかった(図 1c). いずれの運動強度においても, DBP は 3 群ともに安静時に比べて運動中に有意に低下したが(いずれも $P < 0.05$) (図 1a, 図 1b), 安静時に対する運動中の DBP の低下の程度には 3 群間で有意

Figure 1. Changes of BP at the exercise of 60%AT (a) or AT (b) and percent changes in BP (c). Data are mean $\pm$ SEM, $\bullet$: 1:2 group; controlled respiration of 2-second inspiration and 4-second expiration, $\triangle$: 1:1 group; controlled respiration of 3-second inspiration and 3-second expiration, $\square$: control group; normal breathing without a controlled respiration, $\boxtimes$: exercise of 60%AT, $\blacksquare$: exercise of AT, $\dagger\dagger$ $P < 0.01$ vs. rest, $\ddagger\dagger$ $P < 0.01$ vs. exercise of 60%AT, anaerobic threshold, AT; blood pressure, BP; systolic blood pressure, SBP; diastolic blood pressure, DBP. The results of the two-way ANOVA for repeated measures were as follows; time effects in SBP and DBP at the exercise of 60%AT (SBP: $F=8.6$, DBP: $F=4.4$, $P < 0.01$, respectively) and AT (SBP: $F=7.9$, DBP: $F=8.0$, $P < 0.01$, respectively) and exercise intensity effect in the increase of SBP during the exercise of 60%AT and AT ($F=7.4$, $P < 0.01$).

差を認めなかった(図1c). 一方, 60%AT 強度と AT 強度の運動における血圧の変化を比較すると, 3 群ともに 60%AT 強度に比べて AT 強度で有意に高値を示したが(いずれも $P<0.01$), DBPは強度間に有意差を認めなかった(図1c).

60%AT 強度と AT 強度の運動における HR の経時的変化を図2aと図2bに, それぞれの安静時に対する運動中の HR の変化率を図2cに示す. いずれの運動強度においても, HR は3群ともに安静時に比べて運動中に有意に増加した(いずれも $P<0.01$) (図2a, 図2b). 安静時に対する運動中の HR の上昇の程度は, 60%AT 強度の運動では呼吸延長群は同比率群に比べて有意に低値を示したが($P<0.05$), AT 強度では3群間で有意差を認めなかった(図2c). 一方, 60%AT 強度と AT 強度の運動における HR の変化を比較すると, 3 群ともに

60%AT 強度に比べて AT 強度で有意に高値を示した(いずれも $P<0.01$) (図2c).

60%AT 強度と AT 強度の運動における HF の経時的変化を図3aと図3bに, それぞれの安静時に対する運動中の HF の変化率を図3cに示す. 60%AT 強度では, 自然呼吸群の HF は安静時に比べて運動中に有意に低下したが($P<0.01$), 同比率群と呼吸延長群の HF は運動3分目から6分目に有意に増加した(いずれも $P<0.05$) (図3a). AT 強度では, 自然呼吸群の HF は安静時に比べて運動中に有意に低下したが($P<0.05$), 同比率群と呼吸延長群の HF は運動中に有意な変化を示さなかった(図3b). 安静時に対する運動中の HF の上昇の程度は, 60%AT 強度では呼吸延長群の HF は自然呼吸群と同比率群に比べて有意に高値を示し($P<0.01$, $P<0.05$), 同比率群の HF は自然呼吸群に比べて有意

Figure 2. Changes of HR at the exercise of 60%AT (a) or AT (b) and percent changes in HR (c). Data are mean $\pm$ SEM, $\bullet$: 1:2 group; controlled respiration of 2-second inspiration and 4-second expiration, $\triangle$: 1:1 group; controlled respiration of 3-second inspiration and 3-second expiration, $\square$: control group; normal breathing without a controlled respiration, $\square$: exercise of 60%AT, $\blacksquare$: exercise of AT, # $P<0.05$ vs. 1:1 group, $\dagger\dagger$ $P<0.01$ vs. rest, $\ddagger\dagger$ $P<0.01$ vs. exercise of 60%AT, anaerobic threshold, AT; heart rate, HR. The results of the two-way ANOVA for repeated measures were as follows; time effect in HR at the exercise of 60%AT ($F=162.5$, $P<0.01$) and AT ($F=183.2$, $P<0.01$), and exercise intensity effect in the increase of HR during the exercise of 60%AT and AT ($F=12.6$, $P<0.01$).

Figure 3. Changes of HF at the exercise of 60%AT (a) or AT (b) and percent changes in HF (c). Data are mean $\pm$ SEM, $\bullet$: 1:2 group; controlled respiration of 2-second inspiration and 4-second expiration, $\triangle$: 1:1 group; controlled respiration of 3-second inspiration and 3-second expiration, $\blacksquare$: control group; normal breathing without a controlled respiration, $\square$: exercise of 60%AT, $\blacksquare$: exercise of AT, * P <0.05, ** P <0.01 vs. control group, # P <0.05 vs. 1:1 group, † P <0.05, †† P <0.01 vs. rest, ‡‡ P <0.01 vs. exercise of 60%AT, anaerobic threshold, AT; high-frequency components in heart rate variability, HF. The results of the two-way ANOVA for repeated measures were as follows; group $\times$ time interactions in HF at the exercise of 60%AT ($F=2.4$, P <0.01) and AT ($F=3.3$, P <0.01), and group effect ($F=6.5$, P <0.01) and exercise intensity effect ($F=4.2$, P <0.05) in the increase of HF during the exercise of 60%AT and AT.

に高値を示した(P <0.01)(図3c). AT強度では同比率群および呼気延長群のHFは自然呼吸群に比べて有意に高値を示したが(いずれも P <0.01), 同比率群と呼気延長群の間には有意差を認めなかった(図3c). 一方, 60%AT強度とAT強度の運動におけるHFの変化を比較すると, 3群ともに60%AT強度に比べてAT強度で有意に低値を示した(いずれも P <0.01)(図3c).

60%AT強度とAT強度の運動におけるLF/HFの経時的变化を図4aと図4bに, それぞれの安静時に対する運動中のLF/HFの変化率を図4cに示す. いずれの運動強度においても, 自然呼吸群のLF/HFは安静時に比べて運動1分目に有意に増加したが(P <0.01), 同比率群と呼気延長群のLF/HFは運動中に有意に低下した(いずれも P <0.05)(図

4a, 図4b). 安静時に対する運動中のLF/HFの上昇の程度は, いずれの運動強度においても, 自然呼吸群に比べて同比率群と呼気延長群で有意に低値を示した(いずれも P <0.01)(図4c). 一方, 60%AT強度とAT強度の運動におけるLF/HFの変化を比較すると, LF/HFは3群ともに60%AT強度とAT強度の間で有意差を認めなかった.

60%AT強度とAT強度の運動におけるエントロピーの経時的变化を図5aと図5bに, それぞれの安静時に対する運動中のエントロピーの変化率を図5cに示す. 60%AT強度では, 自然呼吸群のエントロピーは安静時と比べて運動中に有意に低下したが(P <0.05), 同比率群と呼気延長群のエントロピーは運動中に有意な変化を示さなかった(図5a). AT強度では, 3群のエントロピーは安静時と比べ

Figure 4. Changes of LF/HF at the exercise of 60%AT(a) or AT(b) and percent changes in LF/HF(c)

Data are mean $\pm$ SEM, $\bullet$: 1:2 group; controlled respiration of 2-second inspiration and 4-second expiration, $\triangle$: 1:1 group; controlled respiration of 3-second inspiration and 3-second expiration, $\square$: control group; normal breathing without a controlled respiration, $\boxtimes$: exercise of 60%AT, $\blacksquare$: exercise of AT, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ vs. control group, $\dagger P < 0.05$, $\dagger\dagger P < 0.01$ vs. rest, anaerobic threshold, AT; low-frequency components in heart rate variability, LF; high-frequency components in heart rate variability, HF; the ratio of LF to HF in heart rate variability, LF/HF. The results of the two-way ANOVA for repeated measures were as follows; group $\times$ time interactions in LF/HF at the exercise of 60%AT ($F = 1.9$, $P < 0.05$) and AT ($F = 2.0$, $P < 0.01$) and group effect in the increase of LF/HF during the exercise of 60%AT and AT ($F = 6.5$, $P < 0.01$)

て運動中に有意に低下した(いずれも $P < 0.01$) (図 5 b). 安静時に対する運動中のエントロピーの低下の程度は、いずれの運動強度においても 3 群間で有意差を認めなかった(図 5 c). 一方、60%AT 強度と AT 強度の運動におけるエントロピーの変化を比較すると、3 群ともに 60%AT 強度と比べて AT 強度で有意に低値を示した(いずれも $P < 0.05$) (図 5 c).

IV. 考 察

呼吸様式と自律神経活動の関係を検討した従来の報告では、副交感神経活動を反映する HF は深呼吸あるいは腹式呼吸で増大し、この賦活化した副交感神経活動によって BP や HR が低下することが知ら

れている^{11,13,14,22~27}). 逆に、頻呼吸や TV を減少させた呼吸あるいは呼吸を止めると、副交感神経活動は減弱し BP や HR が増加すると報告されている^{11,26~28}). しかし、呼吸時間を変化させて呼吸を行うと、吸気時間と呼気時間の比率ばかりでなく同時に RR, TV, $\dot{V}E$ も変化するため、吸気時間と呼気時間の比率だけを变化させて呼吸循環応答および自律神経活動を検討した報告は極めて少ない. そこで、本研究では呼吸周期を 6 秒に設定し、運動中の RR を一定にした上で吸気時間と呼気時間の比率を変更した. その結果、60%AT 強度および AT 強度のいずれの運動においても、自然呼吸群の RR は約 20 回/分であったのに対し呼吸延長群と同比率群の RR は約 10 回/分と一定に保たれていた. さらに、

Figure 5. Changes of entropy at the exercise of 60%AT(a) or AT(b) and percent changes in entropy(c)

Data are mean $\pm$ SEM, $\bullet$: 1:2 group; controlled respiration of 2-second inspiration and 4-second expiration, $\triangle$: 1:1 group; controlled respiration of 3-second inspiration and 3-second expiration, $\blacksquare$: control group; normal breathing without a controlled respiration, $\square$: exercise of 60%AT, $\blacksquare$: exercise of AT, $\dagger$ $P < 0.05$ vs. rest, $\ddagger$ $P < 0.05$ vs. exercise of 60%AT, anaerobic threshold, AT; complexity of heart rate variability, Entropy. The results of the two-way ANOVA for repeated measures were as follows; group $\times$ time interaction in Entropy at the exercise of 60%AT ($F = 1.7$, $P < 0.05$), and time effect in Entropy at the exercise of AT ($F = 2.0$, $P < 0.01$), and exercise intensity effect in the decrease of Entropy during the exercise of 60%AT and AT ($F = 4.8$, $P < 0.01$).

呼吸延長群と同比率群の運動中の $\dot{V}_E$ および TV にも有意差は認められなかったことから, 本研究では RR や TV を一定に保った上で吸気時間と呼気時間の比率を変化できたと考えられた.

一方, 本研究では心疾患患者に対し運動療法開始時に処方される低強度の 60%AT と, 一般的な運動療法として処方される中等度強度の AT を運動強度として設定した. その結果, 60%AT 強度および AT 強度の呼吸応答は, いずれの運動強度においても呼吸延長群と同比率群は自然呼吸群と比較して RR と $\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$, RPE が有意に低値を, TV は有意に高値を示したことから, 呼吸延長群と同比率群の呼吸様式は換気効率が向上した深呼吸であり, 自覚的に楽な運動であることが示された.

60%AT 強度の運動における循環応答と自律神経

活動の検討では, SBP は 3 群ともに安静時に比べて運動中に有意に増加したが, その運動中の SBP の増加率には 3 群間で有意差を認めなかった. 一方, HR は 3 群ともに安静時に比べて運動中に有意に増加し, その運動中の HR の増加率を比較すると, 呼吸延長群は同比率群に比べて有意に低値を示した. この時の呼吸延長群の HF は, 安静時に比べて運動中に有意に増加し, 同比率群や自然呼吸群の HF に比べても有意に高値を示していた. また, 自然呼吸群の LF/HF は安静時に比べて運動中に有意に増加したのに対して, 呼吸延長群と同比率群の LF/HF は安静時に比べて運動中に有意に低下していた. さらに, エントロピーは自然呼吸群では安静時と比べて運動中に有意に低下したのに対し, 呼吸延長群と同比率群では安静時と比べて運動中に有意

な変化を示さなかった。一般に、呼吸に伴う副交感神経活動の変化は、肺の伸展受容器からの入力によって吸気時に遮断され呼気時に刺激されるため、その活動は呼気時に賦活化されることが知られている¹¹⁾。本研究において、自然呼吸群と比較して同比率群や呼吸延長群で副交感神経活動がより賦活化した理由として、RRの減少^{11,26,27)}やTVの増加^{11,26,27)}による呼気時の副交感神経活動の亢進が考えられた。さらに、同比率群と比べて呼気時間のより長い呼吸延長群において、副交感神経活動の亢進がより顕著に表れたと思われた。これらの結果から、60%ATのような低強度の運動に呼吸延長の呼吸様式を導入すると、副交感神経活動が賦活化し相対的に交感神経活動が減弱するため、運動中に生じるHR上昇が抑制されることが示された。我々は、既に若年健常男性を対象に、呼吸延長群と同比率群に分類し、65%AT強度で30分間の自転車エルゴメータ負荷を行い、呼吸延長群は同比率群と比べて運動中ならびに運動後の副交感神経活動を賦活化し、運動中のHRとRPEの上昇を抑制すると報告した²⁹⁾。本研究は、この予備研究と同様の結果であり、呼吸延長の呼吸様式が副交感神経活動を賦活化し運動中のHRを抑制するという事実を確認できたと考えられた。しかし、自然呼吸群と比較して呼吸延長群の副交感神経活動は賦活化したにもかかわらず、HRに有意差を認めなかった。運動時における循環調節機序の一つであるcentral commandは、中枢性に副交感神経活動を抑制することで運動初期あるいは低強度の運動時のHR上昇を調節すると報告されている⁴⁾。60%AT強度のような低強度の運動でも、central commandによる上位中枢からの副交感神経活動の抑制によっていずれの群においてもHRが増加するように作用している。一方で、呼吸延長群では主に心臓の副交感神経活動の賦活化によるHR上昇に対する抑制が加わるが、central commandの作用による上位中枢からの副交感神経活動抑制を上回るほどの副交感神経活動の賦活化は得られなかったため、呼吸延長群と自然呼吸群のHRに有意差を認めなかったと考えられた。エントロピーに関しては、交感神経を遮断するとエントロピーは増大し、交感神経と副交感神経の双方を遮断すると著しく低下することから、心拍変動の乱雑性を表す指標とされている^{17~20)}。健常者における運動とエ

ントロピーの関係を検討した報告では、平均21歳の女性アスリートに自転車エルゴメータを用いてAT程度の運動を30分間行ったところ、運動開始から交感神経活動は亢進し副交感神経活動が減弱して、エントロピーは速やかに低下することが示された。また、運動が終了すると交感神経活動の亢進は徐々に回復し副交感神経活動は賦活化するため、エントロピーは増加すると報告している¹⁷⁾。本研究においては、呼吸延長の呼吸様式では、60%AT強度の運動で副交感神経活動は賦活化し交感神経活動の亢進は抑制されたことから、エントロピーの低下は生じなかったと思われた。

一方、AT強度の運動における循環応答と自律神経活動の検討では、SBPとHRは3群ともに安静時に比べて運動中に有意に増加し、その増加の程度は3群間に有意差を認めなかった。また、自然呼吸群のHFは安静時に比べて運動中に低下したのに対し、呼吸延長群と同比率群のHFは運動中に有意な変化を示さず、この時のLF/HFは、自然呼吸群に比べて呼吸延長群と同比率群では運動中に有意に低値を示した。さらに、エントロピーは、3群ともに安静時と比べて運動中に有意に低下したが、安静時に対する運動中のエントロピーの低下の程度には3群間に有意差を認めなかった。これらのことから、AT強度の運動では、呼吸延長の呼吸様式は運動中の交感神経活動を抑制するにも拘らず、低強度の運動に比べて副交感神経活動の賦活化が弱まるためHRの上昇を抑制する効果が減弱したと考えられた。一方、運動強度が強くなりAT強度に達すると、交感神経活動はより亢進し副交感神経活動は著しく減弱するため、呼吸様式に関係なくエントロピーは低下したと思われた。

一般に、漸増負荷運動における自律神経活動の変化として、副交感神経活動は運動負荷の開始とともに速やかに抑制されるが、交感神経活動はAT強度に達するまでは変化を示さない。AT強度以上となると副交感神経活動は著しく減弱し、交感神経活動は相対的に増加すると云われている^{4,7,30~32)}。しかし、本研究で示したように中等度の強度までの運動では、適切な呼吸延長の呼吸様式を実施することによって、副交感神経活動が賦活化しHR上昇が抑制されて、換気効率が向上し自覚的に楽な運動になると思われた。以上から、AT強度以下の運動

でも過剰な心循環応答を示す高齢者や低心機能患者^{8,9)}を対象とした場合は, 呼気延長の呼吸様式を導入することによって自然呼吸の運動より安全な運動が行えると考えられた。

(受理日 平成20年2月25日)

V. 文 献

- 1) Coats A. J., Adamopoulos S., Radaelli A., McCance A., Meyer T. E., Bernardi L., Solda P. L., Davey P., Ormerod O., Forfar C. Controlled trial of physical training in chronic heart failure: exercise performance, hemodynamics, ventilation, and autonomic function. *Circulation*, (1992) **85**, 2119-2131.
- 2) 早野順一郎, 循環器疾患と自律神経機能, 第2版, 冠動脈疾患, 医学書院, 東京, (2001), 139-162.
- 3) 麻野井英次, 循環器疾患と自律神経機能, 第2版, 心不全における循環調節異常, 医学書院, 東京, (2001), 163-195.
- 4) 麻野井英次, 循環器疾患と自律神経機能, 第2版, 自律神経系による循環調節, 医学書院, 東京, (2001), 19-43.
- 5) Pierpont G. L., Voth E. J. Assessing autonomic function by analysis of rate recovery from exercise in healthy subjects. *Am. J. Cardiol.*, (2004) **94**, 64-68.
- 6) Floras J. S. Clinical aspects of sympathetic activation and parasympathetic withdrawal in heart failure. *J. Am. Coll. Cardiol.*, (1993) **22**, 72A-84A.
- 7) 安達 仁, 心肺運動負荷テストと運動療法, 初版, 運動療法と運動処方, 南江堂, 東京, (2004), 240-276.
- 8) 松永篤彦, 中村 彩, 急性期心筋梗塞患者の機械トレーニングに対する適応の検討. *北里医学*, (2000), **30**, 439-449.
- 9) Matsunaga A., Masuda T., Ogura N. M., Saitoh M., Kasahara Y., Iwamura T., Yamaoka T. M., Sato K., Izumi T. Adaptation to low-intensity exercise on a cycle ergometer by patients with acute myocardial infarction undergoing phase I cardiac rehabilitation. *Circulation J.*, (2004) **68**, 938-945.
- 10) Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, (1996) **93**, 1043-1065.
- 11) 早野順一郎, 循環器疾患と自律神経機能, 第2版, 心拍変動による自律神経機能解析, 医学書院, 東京, (2001), 71-109.
- 12) Yasuma F., Hayano J. Respiratory sinus arrhythmia: why does the heartbeat synchronize with respiratory rhythm? *Chest*, (2004) **125**, 683-690.
- 13) 片岡秋子, 渋谷菜穂子, 腹式呼吸における呼気吸気時間の変化が及ぼす自律神経への影響, *日本看護科学会誌*, (2002), **4**, 14-18.
- 14) 福本真理, 坪井かほる, 大海理香, 稲葉純子, 安達仁, 谷口興一, 腹式呼吸は心筋梗塞急性期の副交感神経を賦活させる, *心臓リハビリテーション* (1998), **3**, 97-100.
- 15) 横山茂樹, 千住秀明, 菅原正志, 田井村明博, 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.
- 16) 日本循環器学会・運動に関する診療基準委員会, 日本人の運動時呼吸循環指標の標準値, *Jpn. Circ. J.*, (1992) **56**, 1514-1523.
- 17) Oida E., Moritani T., Yamori Y. Tone-entropy analysis on cardiac recovery after dynamic exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1997) **82**, 1794-1801.
- 18) Oida E., Kannagi T., Moritani T., Yamori Y. Aging alteration of cardiac vagosympathetic balance assessed through the tone-entropy analysis. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.*, (1999) **54A**, M219-24.
- 19) 笈田映一, 池田克巳, 家森幸男, 心臓自律神経活性の心拍変動解析による絶対評価と, その臨床応用の試み, *セラピューティック・リサーチ*, (2001), **22**, 2691-2693.
- 20) Amano M., Oida E., Moritani T. A comparative scale of autonomic function with age through the tone-entropy analysis on heart period variation. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (2006) **98**, 276-283.
- 21) アメリカスポーツ医学会編 (日本体力医学会体力科学編集委員会監約), 体力測定およびその解釈, 運動処方の方針, 原著第6版, 南江堂, 東京, (2001), 54-88.
- 22) Bernardi L., Spadacini G., Bellwon J., Hajric R., Roskamm H., Frey A. W. Effect of breathing rate oxygen saturation and exercise performance in chronic heart failure. *Lancet*, (1998) **351**, 1308-1311.
- 23) Goso Y., Asanoi H., Ishise H., Kameyama T., Hirai T., Nozawa T., Takashima S., Umeno K., Inoue H. Respiratory modulation of muscle sympathetic nerve activity in patients with chronic heart failure. *Circulation*, (2001) **104**, 418-423.
- 24) Bernardi L., Porta C., Spicuzza L., Bellwon J., Spadacini G., Frey A. W., Yeung L. Y. C., Sanderson J. E., Pedretti R., Tramarin R. Slow breathing increases arterial baroreflex sensitivity in patients with chronic heart failure. *Circulation*, (2002) **105**, 143-145.
- 25) Joseph C. N., Porta C., Casucci G., Casiraghi N., Maffei M., Rossi M., Bernardi L. Slow breathing improves arterial baroreflex sensitivity and decreases blood pressure in essential hypertension. *Hypertension*, (2005) **46**, 714-718.
- 26) 中尾睦宏, 熊野宏昭, 久保木富房, 末松弘行, 安土光男, 高島香代子, 呼吸回数が心拍変動に与える影響について, *心身医*, (1995), **35**, 455-462.
- 27) 奥田忠行, 桜川信男, 梅野克身, 柴原直利, 心拍変動と呼吸回数および分時換気量の関係 最大エン트로ピー法によるRRインターバルのスペクトル解析, *医学検査*, (1997), **46**, 1356-1359.

- 28) Cottin F., Papelier Y., Escourrou P. Effects of exercise load and breathing frequency on heart rate and blood pressure variability during dynamic exercise. *Int. J. Sports Med.*, (1999), **20**, 232-238.
- 29) 松本卓也, 松永篤彦, 石川 朗, 吉田弘法, 大須泰治, 齊藤正和, 米澤隆介, 石井 玲, 忽那俊樹, 山本壱弥, 小倉 彩, 増田 卓, 呼吸パターンの違いが有酸素運動中の自律神経活動に及ぼす影響について, *体力科学*, (2005), **54**, 482.
- 30) 中村好男, 山本義春, 健康の維持・増進のための適正な運動強度の探索, *体力研究*, (1991), **77**, 82-91.
- 31) 髻谷 満, 林由紀子, 関川清一, 川口浩太郎, 大成 浄志, 小林和典, 運動中の心拍変動と換気性作業閾値との関連 MemCalc 法による検討 (第一報), *体力科学*, (2001), **50**, 185-192.
- 32) Kasahara Y., Izawa K., Omiya K., Osada N., Watanabe W., Saitoh M., Matsunaga A., Masuda T. Influence of autonomic nervous dysfunction characterizing effects of diabetes mellitus on heart rate response and exercise capacity in patients undergoing cardiac rehabilitation for acute myocardial infarction. *Circulation J.*, (2006), **70**, 1017-1025.