

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

横山 茂樹¹・千住 秀明¹・菅原 正志²・田井村明博³

要 旨 この研究の目的は、運動中において腹式呼吸による呼吸コントロールの有効性を明らかにすることである。対象は12名の健常男性とし、運動負荷は自転車エルゴメーターを用いて、Ramp 負荷法によって最大酸素摂取量 (maximum oxygen intake : $\dot{V}O_{2max}$) の80% (80% $\dot{V}O_{2max}$) まで施行した。実験条件は呼吸コントロールを行わない場合と、運動開始時から腹式呼吸を用いて呼吸コントロールを行った場合の2条件とした。呼吸代謝測定は呼気ガス分析器を用いて分時換気量 (minute ventilation : \dot{V}_E) や体重あたりの酸素摂取量 (oxygen intake/body weight : $\dot{V}O_2/BW$)、一回換気量 (tidal volume : TV)、呼吸数 (respiratory rate : RR)、心拍数 (heart rate : HR) などの換気パラメータを測定した。その結果、運動中における腹式呼吸の効果として \dot{V}_E 減少やTV増加、RR減少が確認できた。また80% $\dot{V}O_{2max}$ の運動負荷中において、運動初期に \dot{V}_E をはじめRR、HRの項目にCentral command説によると考えられる一時的な変化がみられた。運動時間70%以降の運動後半において、腹式呼吸によって $\dot{V}O_2/BW$ 増加と $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ 減少という影響が出現していた。また \dot{V} -slope法による無酸素性作業閾値 (anaerobic threshold : AT) ポイントも、腹式呼吸により有意に高値を示しており、有酸素系エネルギーの供給が高められると考えられた。

長崎大学医学部保健学科紀要 15(2): 63-68, 2002

Key Words : 運動中・呼吸コントロール・Ramp負荷法・呼気ガス分析

I. はじめに

運動中における呼吸循環動態では、一般的に運動負荷が強まると換気量は心拍数・1回換気量の増加に比例して亢進し、運動強度が無酸素性作業閾値 (anaerobic threshold : AT) レベルに達すると換気量は急激に上昇する¹⁾。このような運動中の呼吸運動には、換気量をはじめ呼吸数や1回換気量といった換気パラメータや乳酸産生などの代謝による影響が関与している。一方、呼吸コントロールによる呼吸循環動態への影響として、Muller²⁾ やSergysels³⁾ らは慢性呼吸不全患者に対して腹式呼吸訓練を実施し、安静時1回換気量増加、呼吸数減少、換気効率上昇、運動耐容能向上、動脈血酸素濃度や二酸化炭素濃度の改善等の効果を報告している。

このように運動中における呼吸循環動態や安静時における腹式呼吸を意識した呼吸コントロールが呼吸循環動態に与える影響について報告されているが、運動中に腹式呼吸を意識した呼吸コントロールによる呼吸循環動態への影響に関する報告は少ない。そこで本研究では、運動中における腹式呼吸を意識した呼吸コントロールの有効性を明らかにする目的として、呼吸循環動態に与える影響について検討したので報告する。

II. 方 法

1. 対 象

被験者は健常男子12名 (平均年齢22.3±3.3歳) で、いずれも本研究に関して目的や意義、期待される結果や危険性の有無について十分に説明した上で、書面による承諾を得た者とした。被験者の身長、体重、Body Mass Index (BMI) および最大酸素摂取量 (maximum oxygen intake : $\dot{V}O_{2max}$) は表1のとおりである。

表1. 対象

氏名	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	BMI	最大酸素摂取量 (ml/kg/min)	最大負荷量 (Watt)	
1	KI	20	178.3	69.6	21.89	33.7	
2	SM	20	163.4	50.3	18.84	33.6	
3	KM	20	172.5	62.8	20.10	36.6	
4	MO	23	170.7	61.2	21.00	34.1	
5	KO	20	160.3	64.6	25.14	37.8	
6	KS	22	167.8	58.0	20.80	40.2	
7	NF	28	176.5	69.3	22.25	33.4	
8	MN	22	167.2	54.2	19.39	35.4	
9	SO	30	168.5	51.5	18.14	29.0	
10	KM	21	175.0	61.0	19.92	34.1	
11	KM	20	171.3	67.5	23.00	32.1	
12	ST	21	178.0	60.61	18.05	31.1	
		22.3±3.3	170.8±5.7	60.6±6.6	20.8±2.1	34.9±2.9	157.9±15.0

2. 測定条件

測定は、室温26℃、湿度40%に調節された人工気象室内で実施した。運動負荷は、被験者への負担を考慮し自

1 長崎大学医学部保健学科理学療法学専攻
2 長崎大学教育学部
3 長崎大学環境科学部

転車エルゴメーター（コンビ社製エアロバイク75XL）を用いて20W/minのRamp負荷法により、 $\dot{V}o_{2max}$ の80%（80% $\dot{V}o_{2max}$ ）とした。測定時間は、人工気象室内で50分以上の椅座位安静をとらせた後、測定に必要なセンサー等を装着後エルゴメーターに座り安静10分間、次いで運動負荷を実施し諸計測を行った。

実験条件は呼吸コントロールを行わない場合（non Control Breathing：non-CB）と運動開始時から腹式呼吸を意識した呼吸コントロールを行った場合（Control Breathing：CB）の2条件とした。尚、腹式呼吸とは、吸気時に鼻から息を吸い込みながら腹部を膨らませて、呼気時には口から息を吐き出しながら腹部をへこませる呼吸法であり、横隔膜呼吸を促すことによって呼吸仕事量を軽減して有効な肺胞換気量を保つ目的で用いられている。今回の研究においても吸気時に腹部を膨らませることと、吸気時間と呼気時間の比率が1：2になるように呼気時間を長くすることを意識させて呼吸コントロールを行わせた。

いずれの条件についても測定日を変えて1週以内に施行し、サーカディアンリズムによる影響を避けるために測定時刻は午後2時から5時の間とし、食後2時間以上経過後に実施した。

3. 測定方法および測定項目

呼吸代謝測定はbreath by breath方式による呼気ガス分析器（SensorMedics社製V max29C）を用いて、①分時換気量（minute ventilation： \dot{V}_E ）、②一回換気量（tidal volume：TV）、③呼吸数（respiratory rate：RR）、④心拍数（heart rate：HR）、⑤体重あたりの酸素摂取量（oxygen intake/body weight： $\dot{V}o_2/BW$ ）、および⑥体重あたりの二酸化炭素排泄量（carbon dioxide output/body weight： $\dot{V}co_2/BW$ ）、⑦酸素の換気当量（ $\dot{V}_E/\dot{V}o_2$ ）を測定した。得られたデータから、Wassermanの報告⁴⁾に従い、 $\dot{V}co_2$ の $\dot{V}o_2$ に対する上昇点を求め、⑧ \dot{V} -slope法によるATとした。またラクテートプロ（京都第一科学LT-1710）を用いて、⑨運動前後の乳酸値を測定し、⑩運動中の自覚症状を主観的運動強度（rating of perceived exertion：RPE）により問診した。

4. 統計学的処理

呼気ガス分析はbreath by breath方式で計測したことから、図1に示すように1呼吸ごとの測定値が計測された。また各被験者間で80% $\dot{V}o_{2max}$ に至る運動時間が異なるため被検者ごとの運動時間を100%とし、運動開始後から10%毎に平均値を求めた。この平均値を各条件の測定項目ごとに一元配置分散分析を用いて比較した。また各項目間の関連性は相関分析およびステップワイズ回帰分析を行った。

\dot{V} -slope法によるATと運動前後の乳酸値、運動中のR

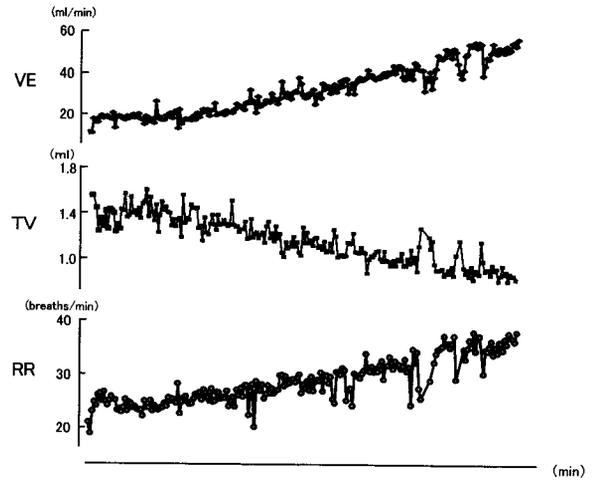


図1. 運動中の換気パラメータ測定値

PEについて各条件間の比較には対応のあるt-検定を行った。いずれも統計処理は統計ソフトStat Viewを用い、統計的有意水準を5%未満とした。

III. 結果

1. 各換気パラメータにおける経時変化

\dot{V}_E において、non-CBでは安静 $10.8 \pm 1.0L/min$ から漸増し、終了時には $57.3 \pm 8.7L/min$ となった。CBでは安静 $11.0 \pm 0.9L/min$ から運動時間10%時にやや上昇するものの、その後減少し、40%時から再び増加し始め終了時には $47.3 \pm 8.1L/min$ となった。non-CBと比較すると、30%時以降から有意に低値を示した。（図2-1）

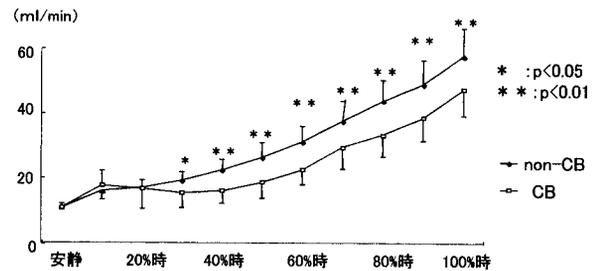


図2-1. 運動中における \dot{V}_E の変化

TVにおいて、non-CBでは安静 $613.2 \pm 82.9ml$ から漸増し、終了時には $1675.7 \pm 270.4ml$ となった。CBでは安静 $672.1 \pm 82.9 ml$ から運動時間20%時 $1875.0 \pm 698.7ml$ と急激に増加した。その後1800ml台を維持したが、60%時からさらに増加し始め、終了時には $2145.7 \pm 547.5 ml$ となった。non-CBと比較すると、10%以降から運動終了時まで有意に高値を示した。（図2-2）

RRにおいて、non-CBでは安静 $18.3 \pm 2.5breaths/min$ から運動時間10%時において急激に増加したもののその後漸増し、終了時には $35.2 \pm 6.8breaths/min$ となった。CBでは安静 $16.9 \pm 1.6breaths/min$ から30%時には $10.5 \pm 6.2breaths/min$ まで減少し、40%以降は増加に転じて終了時 $24.9 \pm 7.7breaths/min$ となった。non-CBと比

運動中の腹式呼吸による呼吸循環動態の変化

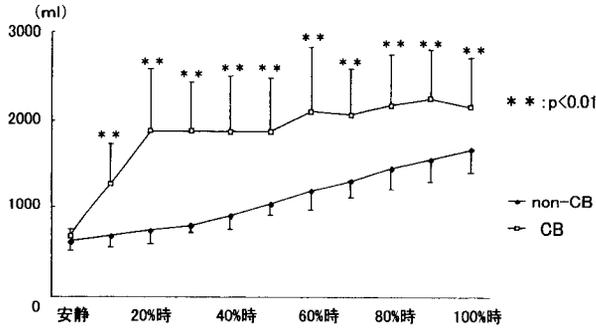


図 2-2. 運動中におけるTVの変化

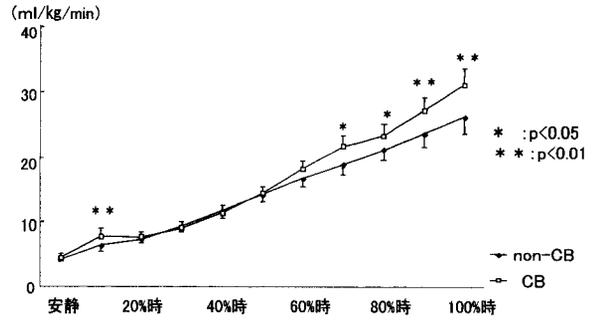


図 2-5. 運動中における $\dot{V}O_2/BW$ の変化

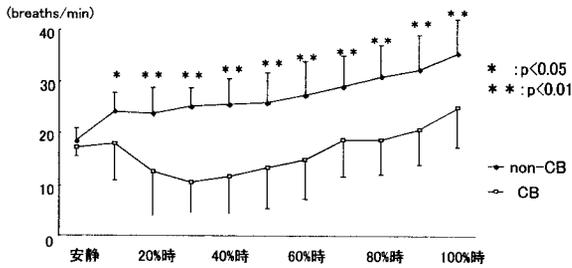


図 2-3. 運動中におけるRRの変化

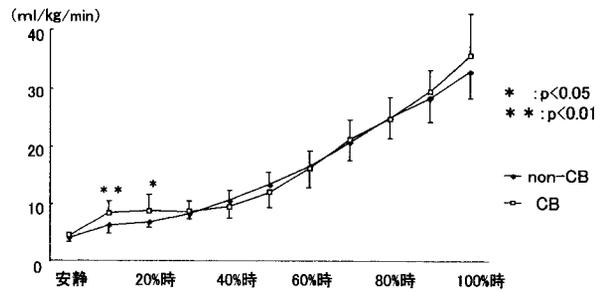


図 2-6. 運動中における $\dot{V}CO_2/BW$ の変化

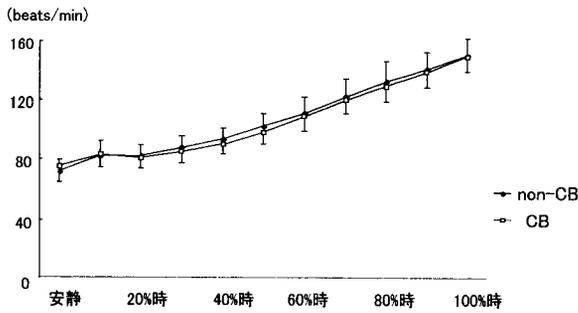


図 2-4. 運動中におけるHRの変化

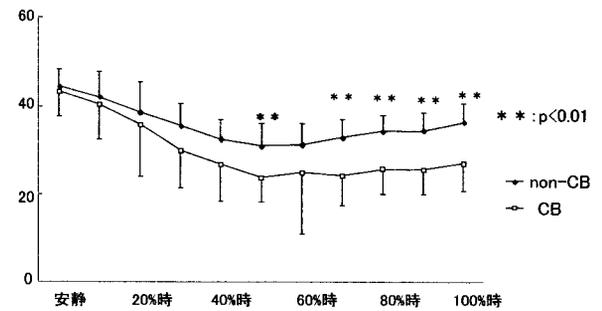


図 2-7. 運動中における $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ の変化

較すると、10%以降から有意に低値を示した。(図 2-3)

HRにおいて、non-CBとCBに有意差は認められず、運動時間10%時に急激に増加した後、漸増し終了時にはいずれも150beats/minに達した。(図 2-4)

$\dot{V}O_2/BW$ において、non-CBでは安静で 4.3 ± 0.5 ml/kg/minから漸増し、終了時には 26.2 ± 2.6 ml/kg/minとなった。CBでは、non-CBと比較して運動時間10%時で有意に増加したが、20%から60%時にかけて有意差は認められなかった。しかし70%以降は有意に増加しており、終了時には 31.1 ± 5.1 ml/kg/minと高値を示した。(図 2-5)

$\dot{V}CO_2/BW$ において、non-CBでは安静で 4.0 ± 0.7 ml/kg/minから漸増し、運動時間40%以降においてやや増加傾向が強くなった。CBでは10%時に一旦増加した後、50%以降に再び急激な増加がみられた。non-CBと比較しても10%から20%時にCBの方が有意に高値を示したが、それ以降に有意差は認められなかった。(図 2-6)

$\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ において、non-CBでは安静時 44.2 ± 4.1 から運動時間50%時 30.7 ± 4.9 と減少し、その後漸増しながら

終了時 36.0 ± 4.3 となった。CBでは50%時まで漸減し、その後やや増加し、終了時には 27.8 ± 3.7 となった。non-CBと比較して70%以降から有意に低値を示した。(図 2-7)

2. 運動中における換気パラメータの関連性

呼吸運動を構成する \dot{V}_E とTVおよびRRの3つのパラメータについて相関を(表 2)に示す。その結果、non-

表 2. 換気パラメータにおける相関係数

	non-CB		CB	
	相関係数	p値	相関係数	p値
\dot{V}_E -TV	.991	p<0.0001	.651	p<0.05
\dot{V}_E -RR	.967	p<0.0001	.834	p<0.001
TV-RR	.951	p<0.0001	.144	N.S.

\dot{V}_E : 分時換気量

TV: 1回換気量

RR: 呼吸数

non-CB : 非呼吸コントロール時

CB : 呼吸コントロール時

CBでは \dot{V}_E , TV, RRの3つのパラメータ間にいずれも高い相関が認められたが, CBでは \dot{V}_E とRRの間に高い相関がみられ, \dot{V}_E とTV, RRとTVの間では相関係数が小さくなった。

次に \dot{V}_E に影響を及ぼす換気パラメータを把握する目的で, \dot{V}_E を従属変数としてステップワイズ回帰分析を行った結果を(表3)に示す。non-CBにおいてHR, \dot{V}_{CO_2}/BW の順に, CBでは \dot{V}_{CO_2}/BW , \dot{V}_{O_2}/BW の順に採用されており, いずれの条件にも \dot{V}_{CO_2}/BW が関与していた。

表3. \dot{V}_E に関するステップワイズ回帰分析

従属変数 \dot{V}_E		non-CB		CB	
		標準回帰係数	偏相関係数	標準回帰係数	偏相関係数
独立変数	HR	.548	.924	-	.047
	\dot{V}_{CO_2}/BW	.414	.305	1.389	.936
	\dot{V}_{O_2}/BW	-	.050	-.664	-.331
	R	.946		.943	
	R ²	.894		.889	

\dot{V}_E : 分時換気量
 HR : 心拍数
 \dot{V}_{CO_2}/BW : 体重当たりの二酸化炭素排出量
 \dot{V}_{O_2}/BW : 体重当たりの酸素摂取量

non-CB: 非コントロール群
 CB : コントロール群

3. \dot{V} -slope法によるATポイントについて

\dot{V} -slope法によるATポイントを被験者別に求めた結果を, non-CBでは \dot{V}_{O_2max} の $48.3 \pm 6.4\%$ に対して, CBでは $59.7 \pm 7.5\%$ と有意に高値を示していた。

4. 運動前後におけるLT値

運動前はnon-CBにて 1.29 ± 0.41 mmol/L, CBにて 1.26 ± 0.35 mmol/Lと有意差は認められなかった。運動終了後ではnon-CBにて 9.29 ± 3.52 mmol/L, CBにて 8.03 ± 1.59 mmol/Lとなっており, CBの方がやや低値を示していたが有意差は認められなかった。

5. 運動後のRPE

non-CBでは 14.3 ± 1.4 , CBでは 14.4 ± 1.2 となっており, 有意な変化は認められなかった。

IV. 考 察

1. 腹式呼吸の影響に関して

一般的に安静時の腹式呼吸による効果として, \dot{V}_E の減少やTV増加, RR減少, \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} 低下等が報告されている^{2) 5)}。本研究でも, 運動中に腹式呼吸を用いた呼吸コントロールを行ったことにより, \dot{V}_E 減少やTV増加, RR減少が有意に認められた。このことから, 運動中においても腹式呼吸による呼吸コントロールによる影響が換気パラメータに反映されていた。

2. 運動中における呼吸コントロールによる影響

1) \dot{V}_E に関して

\dot{V}_E はRRとTVの積で求められるが, この関係から \dot{V}_E 減少を引き起こす要因として, RRもしくはTV, あるいはその両変数の減少が挙げられる。本研究の結果では, RRは減少しているがTVは増加していた。また相関関係において, non-CBでは各パラメータに高い相関を認めたものの, CBでは \dot{V}_E とRRの間に比較的高い負の相関を示していた。これらのことから \dot{V}_E は腹式呼吸によってRRの影響を受けると考えられた。

また \dot{V}_E に関するステップワイズ回帰分析の結果から, いずれの条件下においても \dot{V}_{CO_2}/BW との関連性が示唆されており, この点はWassermanの報告⁴⁾と一致していた。この要因として, 血液中に溶け込むO₂およびCO₂の溶解度は, CO₂の方がO₂よりも24倍程度高いことから \dot{V}_E の変化に伴いCO₂が変化しやすいことや, 運動時の体液性調節機構における化学受容器の反応が血中のO₂減少よりもCO₂増加の影響を受けやすいことから \dot{V}_E との関連も大きかったと考えられる。しかしCO₂換気応答性の増大による換気亢進については異論⁶⁾もあり, 一定の見解は得られていない現状にある。

2) 運動開始直後の換気パラメータの変化について

最大下運動時の換気調節では, 運動開始の1呼吸目から \dot{V}_E が一時的に増加した後にプラトーに達し, その後, 指数関数的に増加して定常状態に至るといわれている。Whippら⁷⁾はこの現象をPhase IからPhase IIIの3期に分類しており, 特に運動初期において \dot{V}_E が増加する時期をPhase Iと呼んでいる。この時期に \dot{V}_E が一時的に増加するメカニズムとしてCentral command説, Peripheral reflex説, Cardiodynamic説という3つの仮説が提唱されている。

今回の結果から運動時間10%時において, いずれの条件下でも \dot{V}_E をはじめRR, HRに一時的な上昇が認められており, Phase Iに相当する現象がみられた。これは特にCB時に著明であり, non-CBとCBを比較した結果, \dot{V}_{O_2}/BW , \dot{V}_{CO_2}/BW の項目においてCBがnon-CBよりも有意に増加していた。以上のように腹式呼吸によって運動開始直後に著変した要因として, 意識的な呼吸コントロールを行うことにより運動野からの遠心性刺激が呼吸中枢への刺激となるCentral command説を支持する結果であった。

3) 運動時間70%以降の運動後半における換気パラメータの変化について

運動時間70%以降という比較的運動負荷が強い時期において, \dot{V}_{O_2}/BW の増加および \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} , \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} の減少がみられており, 腹式呼吸の影響が確認された。またCBにおける70%運動時間の \dot{V}_{O_2max} は $63.6 \pm 10.9\%$ であり, CB時のATポイントである $59.7 \pm 7.5\%$ とほぼ一致していたことから, 腹式呼吸の影響はATポイントを境界として出現すると推察された。

運動時間70%以降に腹式呼吸によって $\dot{V}O_2/BW$ が有意に高くなった要因として、換気亢進に伴い呼吸運動の要する O_2 消費増加や、腹式呼吸による呼吸コントロールがエネルギー供給系に何らかの影響を与えることが考えられる。呼吸運動の要する O_2 消費増加に関して、運動負荷が $300\text{kg}\cdot\text{m}/\text{min}$ から $900\text{kg}\cdot\text{m}/\text{min}$ へと増加した場合でもその割合は非鍛練者では22.8%から23.0%へ変化したと報告されている⁷⁾。このように運動に伴う呼吸運動に要する O_2 消費の増加量が小さいことから呼吸運動に必要な O_2 消費量増加が要因であるとは言い難い。一方、腹式呼吸による影響に関して、一般的にエネルギー供給源は本研究に用いた運動の場合、有酸素系から無酸素系に移行する⁸⁾。無酸素系にはATP-PCr系と解糖系の2つであるが、ATP-PCr系のエネルギー供給時間は7~8秒と短く、本研究における運動ではほとんど関与しないと考えられる。また解糖系では筋に貯蔵されたグリコーゲンやグルコースを分解してエネルギーを供給するが、この過程の中で乳酸が生じる。しかし運動強度が低負荷で O_2 需要量と呼吸による O_2 摂取量が平衡状態にある場合、解糖系エネルギー供給でもピルビン酸がTCA回路に入り、 O_2 によって酸化され乳酸を生じない。つまり、低負荷の運動におけるエネルギー供給には、有酸素系と解糖系のいずれもが関与しており、腹式呼吸による呼吸コントロールを行うことによって、その寄与する割合が変化していると推察された。

4) ATポイントからみた腹式呼吸による影響

\dot{V} -slope法によるATポイントでは、CBにおいて $\dot{V}O_2$ maxの59.7%、non-CBでは48.3%と腹式呼吸によって有意に高値を示した。つまり $\dot{V}CO_2$ の $\dot{V}O_2$ に対する上昇点がnon-CBに比べてCBではより $\dot{V}O_2$ maxに近い値まで増加していた。言い換えると、 O_2 摂取量と運動によるエネルギー供給に必要な酸素消費量が平衡する時期が遅延し、より高い強度の運動まで有酸素的過程からのエネルギーを供給することができるようになったと推察される。つまり腹式呼吸の効果として有酸素系エネルギー供給の割合を高める作用が存在する可能性が示唆された。

V. 文 献

- 1) Astrand PO, Rodahl K: 安静時および作業時における肺換気「オストランド運動生理学」朝比奈一男, 浅野勝巳 (訳), 大修館, 1982, pp152-159
- 2) Muller RE, Petter TL, Filly GF: Ventilation and arterial blood gas changes induced by pursed lips breathing. *J Appl Physiol* 28: 784-789, 1970
- 3) Sergysels R: Low frequency breathing at rest and during exercise in severe chronic obstructive bronchitis. *Thorax* 34: 536-539, 1979
- 4) Wasserman K: Breathing during exercise. *N Engl J Med* 298: 780-785, 1978
- 5) Muller WF: A physiologic evaluation of the

effects of diaphragmatic breathing training in patients with chronic pulmonary emphysema. *Am J Med* 17: 471-477, 1954

- 6) MuGury SP, Blanksby BA, Anderson MJ: The relationship of hypercapnea ventilatory response to age, gender and athleticism. *Sports Med* 19: 173-183, 1995
- 7) 玉木伸和: 鍛練者及び非鍛練者の運動中の呼吸筋の酸素消費量. *体力科学* 25: 78-84, 1976
- 8) Karpovich PV, Sinning WE: 第9章呼吸「運動の生理学」石川利寛 (訳), ベースボールマガジン社, 1976, pp181-203

Effects of respiratory control (abdominal breathing) on respiration and circulation during exercise.

Shigeki Yokoyama¹, Hideaki Senju¹, Masashi Sugawara², Akihiro Taimura³

1 Department of Physical Therapy, Nagasaki University School of Health Sciences

2 Faculty of Education, Nagasaki University

3 Faculty of Environment Studies, Nagasaki University

Abstract The objective of the present study was to investigate the effects of abdominal breathing on respiration and circulation during exercise, in order to clarify the effectiveness of respiratory control (in the form of abdominal breathing) during exercise.

Subjects were 12 healthy men with a mean age of 22.3 ± 3.3 years. Using a bicycle ergometer (Combi Aerobike 75XL) a ramp test was administered at 20 W/min to achieve 80% $\dot{V}_{O_{2max}}$. One group of subjects (Group A, n=12) used abdominal breathing as soon as the exercise started, while the other group (Controls, n=12) did not utilize respiratory control. Respiratory metabolism was assessed according to the breath-by-breath method using an expiration gas analyzer (SenserMedics Vmax29C). In the present study, ventilation parameters such as minute ventilation (\dot{V}_E), tidal volume (TV), respiratory rate (RR), heart rate (HR), oxygen uptake per body weight (\dot{V}_{O_2}/BW), carbon dioxide uptake per body weight (\dot{V}_{CO_2}/BW) and minute ventilation per oxygen uptake (\dot{V}_E/\dot{V}_{O_2}) were measured. In addition, anaerobic threshold (AT) was calculated using the V-slope method and levels of lactic acid were measured before and after exercise to objectively determine exercise intensity.

TV was higher in Group A than in Controls during exercise, while \dot{V}_E and RR were lower. In addition, at 80% $\dot{V}_{O_{2max}}$, as explained by the central command theory, transient changes in \dot{V}_E , RR and HR were observed in the early stage. Levels of \dot{V}_{O_2}/BW and \dot{V}_{CO_2}/BW for Group A were also higher.

In the late stage of exercise (final 30% of exercise time), \dot{V}_{O_2}/BW for Group A was higher than for Controls, while \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} was lower. AT level, as measured using the V-slope method, was significantly higher in Group A than in Controls, suggesting that respiratory control increases the supply of aerobic energy.

Bull. Nagasaki Univ. Sch. Health Sci. 15(2): 63-68, 2002

Key Words : Exercise · Breathing Control · Ramp loading · analysis of expired gas vessel