

# 運動後の疲労回復過程に及ぼす 中心循環血液量増加の生理学的効果

国立循環器病  
センター研究所 宮本 忠吉  
(共同研究者) 大阪大学 中西 康人  
同 木下 博

## Effects of Increased Central Blood Volume on Cardio-Respiratory and Metabolic Responses During Recovery After Exercise

by

Tadayoshi Miyamoto,  
*National Cardiovascular Center Research Institute*  
*Department of Cardiovascular Dynamics*  
Yasuto Nakanishi, Hiroshi Kinoshita  
*Faculty of Health and Sport Sciences*  
*Osaka University*

### ABSTRACT

The effects of temporally increased central blood volume (CBV) on cardio-respiratory and metabolic functions during recovery periods after a dynamic arm exercise were investigated using a water immersion (WI) method. Eight males cranked a cycle-ergometer for 12 min using unimmersed arms at each of the 3 submaximal work intensity levels (80 % and 100 % of the ventilatory threshold (VT) and 100 % VT level plus 40 % of the difference between the VT and peak  $\dot{V}O_2$ ). This was followed by 12 min of resting period.  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ , VE, HR and blood lactic acid concentration (LA) were measured during this recovery period. The  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  and VE differences between the WI and control conditions were dependent on work intensity and duration; the

heavier the work intensity and the earlier the recovery period, the higher the  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  and VE with WI compared with the control. After 4 min of recovery, VE was lower with WI regardless of work intensity. During recovery at all work intensities, HR with WI remained lower than that for the control. The effect of WI on HR during recovery was also work-rate and time dependent; the lighter the load and the earlier the recovery period, the greater the effect of WI. An interaction effect of WI and work-rate was revealed for LA during recovery periods. At the low work-rate level, LA was lower with WI, but data were reverse on the high work-rate. It was concluded that CBV increase due to WI would accelerate the entire recovery process of cardio-respiratory and metabolic functions when work-intensity was relatively light. On the other hand, On the recovery from exercise at a relatively high work intensity, it might facilitate the ventilatory response and increase the metabolic synthesis during early phase.

## 要 旨

健常男性 8 名を対象に下半身部の水浸 (WI) による水圧によって、一過性に中心血液量 (CBV) を増加させた条件下での上肢運動を施行し、その後の呼吸循環代謝系機能の回復過程に及ぼす CBV 増加の影響について運動強度との関係から調べた。その結果、WI 条件における高強度レベルでの運動終了後の初期の時間帯 (0-2 分) では、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$  および  $\dot{V}E$  はコントロール条件よりも高値を示した。しかし、後半の時間帯 (4-6 分, 10-12 分) においては、 $\dot{V}O_2$  および  $\dot{V}CO_2$  には両条件間の差は認められず、 $\dot{V}E$  は逆にすべての強度レベルにおいて WI 条件がコントロール条件よりも低値を示した。これら全てのパラメータにおいて 3 要因 (条件×強度×時間) の交互作用効果が認められた。運動後の HR は WI 条件でのすべての強度レベルおよび時間帯において常にコントロール条件よりも低値を示した。両条件間の HR の差は運動後初期の時間帯 (0-2 分) よりも後半の時間帯 (4-6 分, 10-12 分) で大きく認められ、WI 条件において HR の速やかな回復反応が認められた。運動後のすべての時間帯において、

LA は WI 条件での低強度レベルではコントロール条件よりも低値を示し、逆に高強度レベルでは高値を示した。主観的運動強度の WI による影響はすべての強度レベル、すべての時間帯において認められなかった。以上、WI による CBV の増加は、運動後の呼吸循環代謝系機能の回復プロセスを促進する可能性が示唆された。しかし、それはまた高強度レベルでの運動後の回復初期の換気反応の亢進および代謝の増大要因としても働くことが示された。

## 緒 言

循環血液量の変化は安静時や運動中の血行動態だけでなく、身体運動能力にも影響を及ぼすことが知られている<sup>8), 18)</sup>。また、近年、運動後の回復過程における種々の生理学的反応を引き起こす一つの要因として循環血液量の変化が考えられている<sup>15)</sup>。これまで中心血液量を変化させる方法として、血液ドーピングや採血<sup>8), 18)</sup>、水浸 (WI)<sup>3), 7), 10), 11), 19), 20), 22)</sup>、プレッシャーパンツ<sup>2)</sup>および姿勢変化<sup>5)</sup>などが用いられてきた。安静時において一過性に中心血液量を増加させた時、循環系機能への影響として心拍出量 (Q)、一回拍出量

(SV)<sup>2), 3), 5), 7)</sup>および中心静脈圧<sup>3), 5), 7)</sup>の増加, 心拍数 (HR) の減少<sup>2), 5), 10), 20)</sup>, 血圧の増加<sup>2), 3)</sup> または不変<sup>7)</sup>などが報告されている。また, 機能的残気量 (FRC), 努力性肺活量および一秒量の減少<sup>10), 19)</sup>などの肺機能への影響, また心房性利尿ホルモン分泌増加および抗利尿ホルモン分泌抑制<sup>22)</sup>などの内分泌系機能への影響も明らかにされている。

我々は, 過去の研究において運動負荷に対する生理学的反応が運動強度や時間だけでなく, 中心血液量の増加にも依存していることを明らかにした。また, 中心血液量の増加は運動中の呼吸器系<sup>11)</sup>および心臓循環系機能<sup>20)</sup>の生理学的効率を亢進させることを報告した。しかしながら, その循環の要因が運動後の生理機能の回復過程に及ぼす影響については調べてこなかった。過去の研究では運動後の疲労回復には運動を行わないよりも軽い強度のクールダウンを実施する方が有効であることが報告されている<sup>1), 13)</sup>。このメカニズムとしては筋活動に伴う乳酸の除去などの代謝の要因が重要であることが示されているが, 血液シフトや筋ポンプ作用による血行動態の変化に伴う中心循環の要因も重要であると考えられる。

そこで本研究では, 下半身部の水浸による水圧によって, 一過性に中心血液量を増加させた条件下での上肢運動を施行させ, その後の呼吸循環代謝系機能の回復過程に及ぼす中心血液量増加の影響を強度との関係から明らかにすることを目的とした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 被験者

被験者は, 上肢をよく用いる運動 (柔剣道等) を日常的に行っている非肥満, 非喫煙の男子8名 (平均年齢 $24.8 \pm 5.4$ 才) で, 平均体重および身長はそれぞれ $69.4 \pm 7.4$  kgと $172.3 \pm 4.8$  cmであった。被験者にはあらかじめ実験内容を説明し,

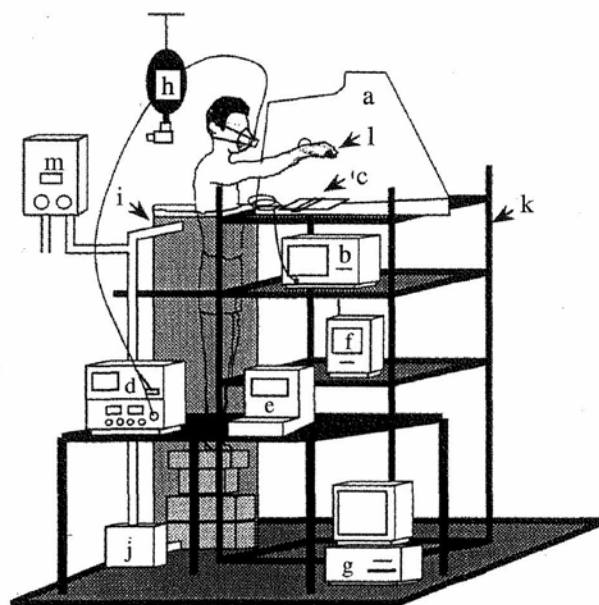


図1 Schematic drawing of experimental set-up.  
a, bicycle ergometer ; b, automatic indirect manometer  
c, pressure cuff ; d, gas analyzer system  
e, blood Lactate Analyzer ; f, telemetric electrocardiogram,  
g, personal computer ; h, CO<sub>2</sub> rebreathing bag  
i, water tank ; j, motor pump ; k, iron frame  
l, crank handle ; m, gas water heater

実験にともなう危険性も理解させたうえで参加の意志を確認し, 同意書に署名を求めた。

### 1. 2 実験装置

本研究での実験装置の概略を図1に示した。装置はコンピュータ制御式自転車エルゴメータ (232CXL, (株) ミナト医科学, 大阪), ステンレス製の水槽 (高さ1.6 m, 長径=0.7 m, 短径=0.4 m), breath-by-breathによる自動呼気ガス分析システム (AE-280S, (株) ミナト医科学, 大阪), テレメーター心電計 (DS-2150, (株) フクダ電子, 東京), 自動血圧計 (EBP-300, (株) ミナト医科学, 大阪), 乳酸分析装置 (HEK-30L, 東洋紡, 大阪) から構成されている。自転車エルゴメータは, 鉄製フレーム (高さ=1.6 m, 幅=1.0 m, 長さ=1.0 m) の上に固定された木の板の上に設置した。鉄製フレームは水槽に密着して取り付け, それらは厚さ3 cmの木板にボルトで固定した。自転車エルゴメータのペダル部分は, 被

験者が手で握ってクランキング運動ができるように鉄製のスティックハンドルと取り替えた。自転車エルゴメータの負荷量は10-400 W (誤差5%以内)の範囲内でパーソナルコンピュータにより制御した。水槽内の水はモータを用いて実験中常に循環させ、水温はガス温水器を用いて32.0-33.0℃の範囲内に維持されるよう随時調節した。水槽の底には30cmの厚さのコンクリートブロックを敷き、その上に、重りの取り付けられた木製ボード(2-12 cm)を沈めた。被験者ごとに肩の高さ(上腕骨関節窩中心部)がエルゴメータのクランク軸の中心部に位置するよう、木製ボードの高さを調節した。呼気ガス分析システム、心電計および血圧計からのシグナルはオンラインで同調させた。また、それらのデータは画面上に常に表示し、験者によって視覚的に随意点検ができるようにした。

### 1. 3 実験手順

被験者には、あらかじめ、テストの実施前24時間は激しい運動を避けること、日常の食事を続け、高塩分食はさけること、各テスト実施の4時間前は食事、カフェイン、アルコールなどの摂取を行わないことなどを指示した。実験の第1回目は練習日に当てられた。被験者は腕クランキング運動の練習と最大負荷運動の経験を兼ねて、水浸なし(コントロール条件)で、ランプ負荷によるクランキング運動を疲労困憊に至るまで実施した。本実験の1回目と2回目は各被験者に対して、WI条件およびコントロール条件でのランプ負荷運動を実施した。ランプ負荷運動はウォーミングアップとして6分間20wattの一定負荷と、10 watt/分の漸増負荷を用いて疲労困憊に至るまで行わせた。本実験の3回目から8回目までは一定負荷運動テストを実施した。このテストは、立位姿勢で20分間の安静後、同一姿勢での12分間の腕クランク運動とその後の12分間の回復安静からなり、

その際の負荷強度レベルは3段階のいずれかとした。各負荷強度レベルはコントロール条件でのランプ負荷運動時に求めた各被験者のVTおよび $\dot{V}O_2$ に基づき設定した。各負荷強度レベルは被験者のVTの80%強度(0.80VT)、100%強度(VT)およびVTと $\dot{V}O_2$ 間の差の40%に相当する強度(VT+0.40 $\Delta$ )であった。測定された一定負荷運動テストにおける0.80VT、VTおよびVT+0.40 $\Delta$ での各強度レベルの平均負荷量は、それぞれ27.6W (SD=4.8W; 範囲=23-38 W)、34.6W (SD=5.8W; 範囲=29-47W) および77.3W (SD=9.4W; 範囲=66-89W)であった。実験条件や負荷強度レベルの順番は各被験者ですべて無作為順にした。一定負荷運動テストにおいて、もし0.80VTもしくはVT強度レベルが最初に選択された場合は、次のテストを約1時間後に実施した。また、VT+0.40 $\Delta$ 強度レベルが最初にテストされた場合は、少なくとも、次のテストは3日間あけてから実施した。腕クランキングの回転数はメトロノーム音にあわせて60回転/分を維持するよう指示した。すべてのテストにおいて $\dot{V}O_2$ 、二酸化炭素排泄量( $\dot{V}CO_2$ )、分時換気量( $\dot{V}E$ )、呼吸数、一回換気量、ガス交換比、呼気終末 $O_2$ 分圧(PETO<sub>2</sub>)および呼気終末 $CO_2$ 分圧(PETCO<sub>2</sub>)をbreath-by-breathで測定した。VTの決定は、V-slope法<sup>4)</sup>もしくは、ガス交換パラメータの変化( $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ の増加を伴わない $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の上昇)に基づき定められた閾値とした。

### 1. 4 測定項目

循環系機能のパラメータとして、Q、HR、SV、収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧および全末梢血管抵抗を測定した。Qは間接的Fick法(Q=(静脈血 $CO_2$ 含量-動脈 $CO_2$ 含量)/ $\dot{V}CO_2$ )に基づき、静脈 $CO_2$ 含量はPETCO<sub>2</sub>値から求めた。静脈血 $CO_2$ 含量は $CO_2$ 再呼吸法<sup>17)</sup>を用いて算出した。 $\dot{V}CO_2$ およびPETCO<sub>2</sub>の値は再呼吸を行っ

た期間の前後1分間の平均値を用いた。CO<sub>2</sub>の再呼吸は両条件、各強度レベルで安静時11-14分、運動時7-10分、運動終了後13-16分の各時間帯でそれぞれ3回づつ行った。Qは3回の値を平均し、その際2つの測定値のいずれかの間で10%以上の差が認められた場合には、3つの測定値の中で近い2つの値を平均した。HRは心電計を用いて1拍毎に連続モニターし、それらを15秒ごとの平均を記録として残した。SVはCO<sub>2</sub>再呼吸を行った時間帯の前後1分のHRの平均値とQ値との商で算出した。血中乳酸濃度(LA)は耳たぶから20 $\mu$ lの血液を採取し乳酸分析器を用いて測定した。一定負荷運動時において、血液の採取は、安静15分、運動中3分、6分、12分、運動終了後6分、12分の各ポイントで行った。LA値はそれぞれのサンプルポイントで3回のサンプルの平均値として決定した。中枢(RPE central)および末梢(RPE local)の主観的な運動強度は、一定負荷運動中3分、6分、12分、運動終了後3分、6分、12分の各ポイントでBorgスケール<sup>6)</sup>に基づき記録した。収縮期血圧と拡張期血圧は自動血圧計を

用い、安静時および運動終了後30秒ごとに記録した。運動直後1分間の血圧はマンシェットを腕に装着するための時間を要したため、測定できなかった。平均血圧は収縮期血圧と拡張期血圧の値を用いて計算した。安静時の血圧は、16-18分の2分間の平均値を、運動終了後の血圧は1-2分、4-6分および10-12分の3つの時間帯の平均値をそれぞれ用いた。

### 1. 5 統計処理

各パラメータの個人の平均値に基づき、目的に応じて2要因または3要因の繰り返しのある分散分析(ANOVA)を実施した。有意差は危険率5%以下とした。

## 2. 研究結果

### 2. 1 安静時の呼吸循環反応

安静時におけるWI条件およびコントロール条件での肺機能および呼吸循環代謝系機能の各パラメータの全被検者の平均値およびWIによる平均変化率を表1に示した。ANOVAの結果、VC、

表1 Mean values for the pulmonary, cardio-respiratory and metabolic function at pre-exercise resting period

	WI	Control	Mean % change due to WI	F-value
<b>Pulmonary function</b>				
VC	l	5.1 $\pm$ 0.1	(-2.1)	7.38*
FEV	l	4.9 $\pm$ 0.1	(-3.2)	13.62**
FEV <sub>1.0</sub>	l/min	4.1 $\pm$ 0.2	(-3.5)	14.12**
PF	l/sec	10.2 $\pm$ 0.3	(0.2)	0.12
FEF <sub>75</sub>	l/sec	7.7 $\pm$ 0.5	(1.0)	0.16
FEF <sub>50</sub>	l/sec	4.9 $\pm$ 0.5	(-0.5)	0.23
FEF <sub>25</sub>	l/sec	2.1 $\pm$ 0.2	(-11.9)	14.85**
<b>Cardiorespiratory and metabolic function</b>				
$\dot{V}O_2$	l/min	0.27 $\pm$ 0.01	(1.6)	0.10
$\dot{V}CO_2$	l/min	0.24 $\pm$ 0.01	(1.7)	0.00
VE	l/min	9.8 $\pm$ 0.3	(-7.7)	7.38*
VE/ $\dot{V}O_2$		37.5 $\pm$ 1.3	(-8.2)	10.21*
VE/ $\dot{V}CO_2$		41.9 $\pm$ 1.0	(-8.6)	8.89*
HR	beats/min	58.1 $\pm$ 3.1	(-22.6)	74.82***
LA	mmol	0.77 $\pm$ 0.04	(-1.0)	0.75

Values are means  $\pm$  SE. \*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

表2 Summary of cardio-respiratory and metabolic responses over 1 minute period between 5 and 6 minutes during exercise

	Intensity	WI	Control	Mean % change due to WI	F-value		
					Condition (df=1,7)	Intensity (df=2,14)	Condition × Intensity (df=2,14)
$\dot{V}O_2$ ℓ/min	80 % VT	0.68 ± 0.02	0.69 ± 0.03	(-0.5)	7.17*	572.26***	3.16
	100 % VT	0.81 ± 0.03	0.78 ± 0.03	(3.6)			
	VT+0.40	1.68 ± 0.06	1.58 ± 0.05	(6.0)			
$\dot{V}CO_2$ ℓ/min	80 % VT	0.62 ± 0.02	0.64 ± 0.03	(-2.2)	1.45	279.95***	1.67
	100 % VT	0.76 ± 0.04	0.74 ± 0.02	(3.2)			
	VT+0.40	1.72 ± 0.08	1.66 ± 0.07	(4.1)			
$\dot{V}E$ ℓ/min	80 % VT	20.8 ± 0.6	22.4 ± 1.0	(-6.7)	0.33	224.91***	2.55
	100 % VT	24.1 ± 1.4	25.6 ± 1.0	(-5.4)			
	VT+0.40	55.6 ± 3.2	53.9 ± 2.3	(3.0)			
LA mmol	80 % VT	1.2 ± 0.1	1.3 ± 0.1	(-10.1)	4.12	105.51***	8.91**
	100 % VT	1.4 ± 0.2	1.4 ± 0.1	(-8.1)			
	VT+0.40	3.8 ± 0.3	3.3 ± 0.2	(15.9)			
HR beats/min	80 % VT	80.6 ± 2.2	94.5 ± 2.0	(-14.6)	19.16**	135.65***	6.78**
	100 % VT	89.3 ± 2.1	98.9 ± 2.8	(-9.5)			
	VT+0.40	127.9 ± 2.2	132.4 ± 3.0	(-3.1)			

Vaules are means ± SE. \*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

FEV, FEV<sub>1.0</sub>およびFEF<sub>25</sub>の各肺機能諸量,  $\dot{V}E$ ,  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ およびHRはWIによって有意に減少した (F値は表1に示したとおりである).

### 2. 2 運動中の呼吸循環代謝反応

WI条件およびコントロール条件下における各強度レベルでの運動中の $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$ , LAおよびHRの平均値, WIによる平均変化率および2要因 (条件と強度) のANOVAの結果 (F値) をそれぞれ表2に示した. ANOVAの結果,  $\dot{V}O_2$ , HR, LAの各パラメータにおいて条件・強度間の有意な交互作用効果が認められ, また $\dot{V}O_2$ , HRには主効果が認められた.

### 2. 3 運動後の呼吸循環代謝反応

#### 2. 3. 1 $\dot{V}O_2$ , $\dot{V}CO_2$ , $\dot{V}E$

WI条件とコントロール条件での各強度レベルの平均 $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ および $\dot{V}E$ のタイムコースをそれぞれ図2-A, B, Cに示した. また, 両条件間の $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$ の差を時間軸に対してプロットし図4-D, E, Fに示した. 運動終了直後から約2分間の回復初期の時間帯では, WI条件でのすべてのパラメータは高強度レベルにおいてコン

トロール条件よりも高値を示した. 回復期後半の時間帯では $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ はすべての強度レベルで条件間に差は認められず,  $\dot{V}E$ は逆にWIがコントロール条件よりも低値を示した. 運動終了直後から12分間の $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ および $\dot{V}E$ の時間経過に伴う変化を3つの時間帯に (0-2分, 4-6分および10-12分) に分け, それぞれの平均値を用いて統計処理を行った (図2-A, B, Cの斜線で囲まれた部分; 図3-A, B, C). 3要因 (条件と強度と時間) のANOVAの結果,  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ および $\dot{V}E$ のすべてのパラメータにおいて有意な条件・強度・時間の交互作用効果と, 条件と強度間, 条件と時間間の交互作用効果がそれぞれ認められた (F値は表3に示したとおりである).

#### 2. 3. 2 LA

両条件, 各強度レベルにおける運動終了直前, 運動後6分および12分目のLAの平均値を示した. 運動後の各時間帯でのLAは0.80VT強度レベルではWI条件がコントロール条件よりも低値を示したが, VT+0.40 Δ強度レベルでは逆にWI条件がコントロール条件よりも高値を示した (図3-D).



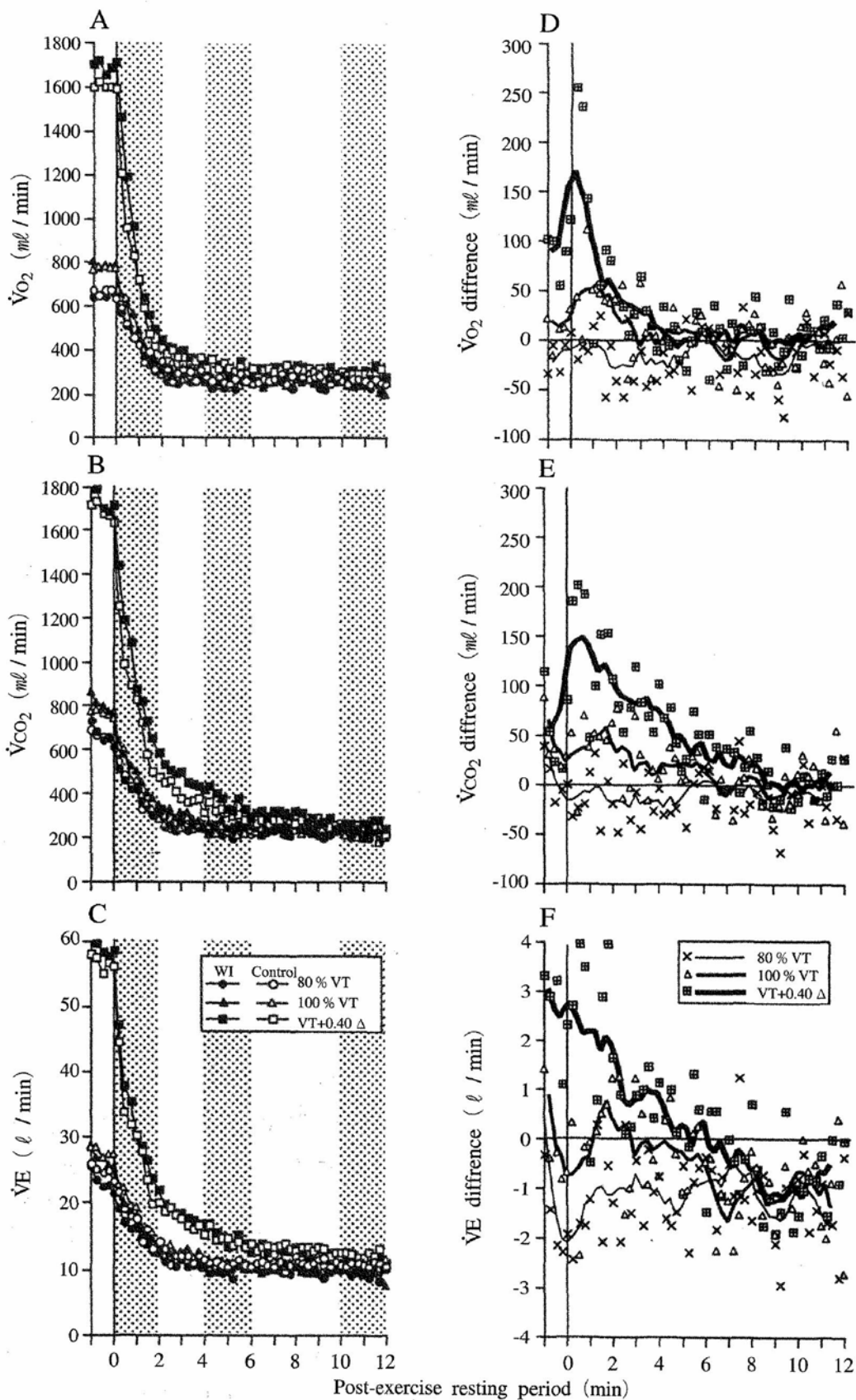


図2  $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$  and  $\dot{V}E$  responses to the WI and control condition at each exercise intensity levels during post-exercise resting periods. time course of mean  $\dot{V}O_2$  (A),  $\dot{V}CO_2$  (B) and  $\dot{V}E$  (C). Deviation of the mean  $\dot{V}O_2$  (D),  $\dot{V}CO_2$  (E) and  $\dot{V}E$  (F) values of the WI from those of the control. Smoothed lines in B, D, F were drawn over the points nearly generated by a 5-point moving average method. Shaded periods were used for the computation of mean value at different exercise times for each condition.

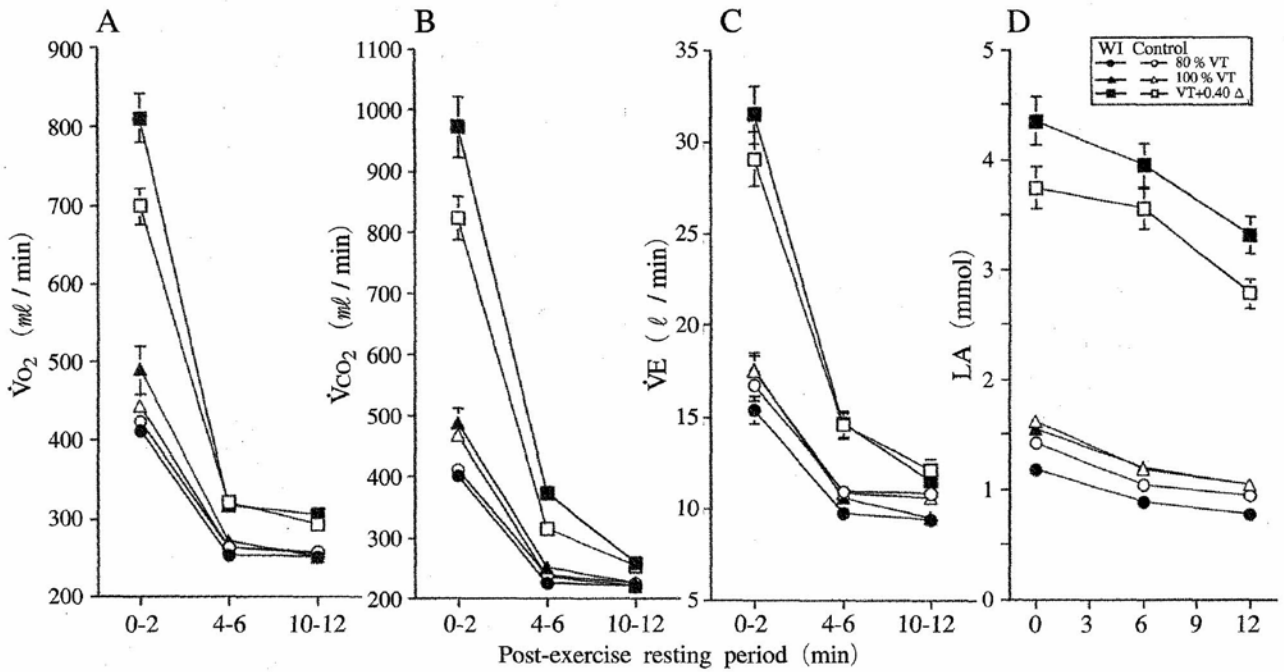


図3 Changes in  $\dot{V}O_2$  (A),  $\dot{V}CO_2$  (B),  $\dot{V}E$  (C) and LA (D) during post-exercise resting period for the WI and control conditions.

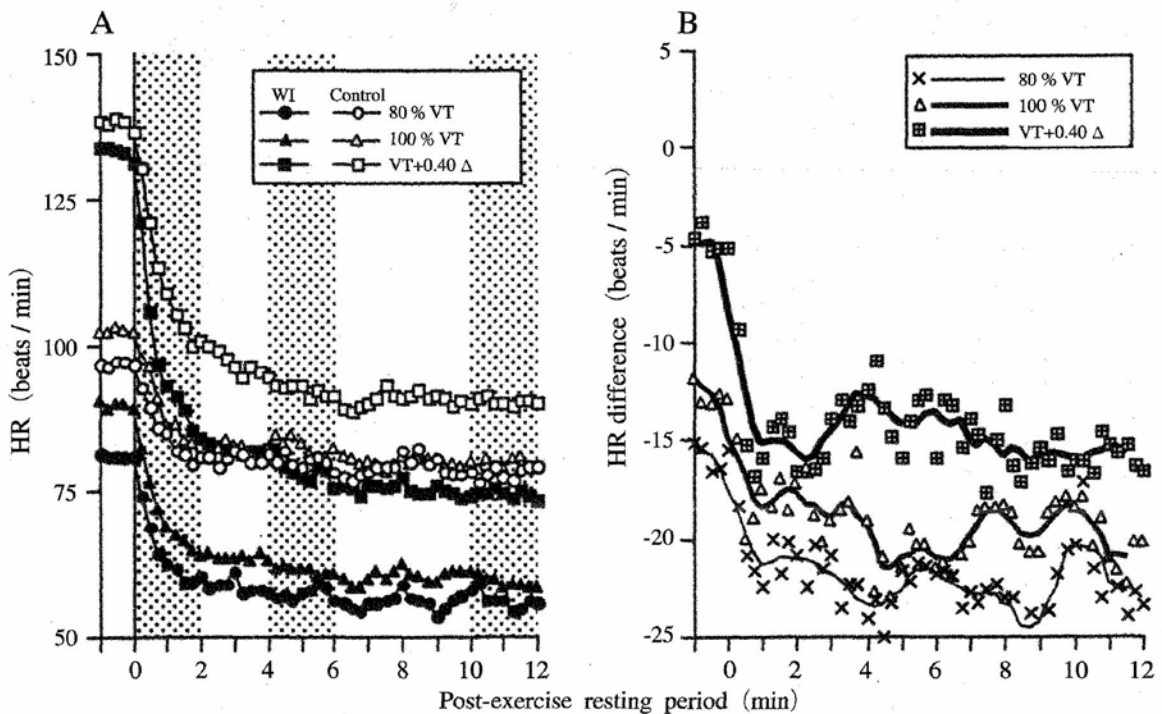


図4 HR responses to the WI and control condition at each exercise intensity levels during post-exercise resting periods. Time course of mean HR (A), deviation of the mean HR values of the WI from those of the control. Smoothed lines in B were drawn over the points nearly generated by a 5-point moving average method. Shaded periods were used for the computation of mean value at different exercise times for each condition.



表3 F-values of the ANOVAs performed on the measured value data for the selected variables for the post-exercise period

Measured values	Main effect			Interaction effect			
	Condition (df=1, 7)	Intensity (df=2, 14)	Time (df=2, 14)	Condition × Intensity (df=2, 14)	Condition × Time (df=2, 14)	Intensity × Time (df=4, 28)	Condition × Intensity × Time (df=4, 28)
$\dot{V}O_2$	8.23*	160.83***	444.43***	5.43*	20.75***	133.16***	10.90***
$\dot{V}CO_2$	23.83**	158.76***	366.24***	9.85**	15.43***	175.51***	9.19***
$\dot{V}E$	6.44*	297.83***	284.96***	5.63*	7.56**	167.02***	3.38*
LA	4.80	84.75***	221.02***	10.29**	0.24	34.01***	2.54
HR	60.06***	46.27***	97.27***	4.04*	0.81	47.66***	0.90

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

3要因（条件，強度と時間）のANOVAの結果，条件と強度間および強度と時間間の2要因の交互作用効果がそれぞれ認められた。また，強度，時間の主効果もまた認められた（F値は表3に示したとおりである）

### 2. 3. 3 HR

運動終了後の両条件，各強度レベルにおける全被験者のHRの平均タイムコースを図4-Aに示した。また，両条件間のHRの差（HR difference）を時間軸でプロットし，図4-Bに示した。WI条件での運動終了後のHRはすべての強度レベル，すべての時間帯においてコントロール条件よりも常に低値を示した（図4-A）。運動終了後のHR differenceは強度レベルに依存して大きくなった（図4-B）。また，時間経過に伴うHR differenceの変化は強度レベルには依存せず，短時間に安静レベル付近まで回復し定常状態に至った。運動終了直後から12分までのHRの時間経過に伴う変化を3つの時間帯（0-2分，4-6分および10-12分）に区分しそれぞれの平均値を求めた（図2-Aの運動中の斜線で囲まれた部分）。3要因（条件，強度と時間）のANOVAの結果，条件と強度間，強度と時間間の有意な交互作用効果が認められた。また，条件，強度，時間の主効果もすべて有意であった（F値は表3に示したとおりである）。

### 2. 3. 4 RPE central, RPE local

両条件，各強度レベルにおける運動終了直前，運動後3分，6分および12分目のRPE centralおよびRPE localの各スコアは運動終了後6分ではほぼ安静レベル近くにまで戻り，12分後では全員が0を示した。いずれの指標も運動終了直前ではWI条件が，コントロール条件よりもやや高いスコア値を示す傾向にあったが，運動後3分では逆に低いスコアを示し，速やかな回復が認められた。2要因（条件と強度）のANOVAの結果，RPE central ( $F_{2, 14} = 76.95$ ,  $p < 0.001$ ) およびRPE local ( $F_{2, 14} = 60.03$ ,  $p < 0.001$ ) とともに強度の主効果が認められたが，条件に関係する主効果および交互作用効果は認められなかった。

### 3. 考察

本研究の主な目的は，異なる強度レベルでの運動後の呼吸循環代謝系機能が一過性の中心血液量の増加によって変化するかどうかを調べることであった。その結果WI条件では運動終了後のほとんどの呼吸循環代謝系機能のパラメータに有意な変化が認められた。以下に $\dot{V}O_2$ ， $\dot{V}CO_2$ および $\dot{V}E$ における3要因（条件，強度と時間）の交互作用効果およびLAやHRにおける2要因（条件と時間）の交互作用効果についてそれぞれ考察を試みた。

### 3. 1 運動後の $\dot{V}O_2$ 反応に及ぼす中心血液量増加の影響

本研究では、運動終了後の初期の時間帯（0-2分）において、WI条件での $\dot{V}O_2$ は高強度レベルでコントロール条件よりも高値を示した。しかし、後半の時間帯（4-6分、10-12分）ではすべての強度レベルで条件間の差は認められなくなった。すなわちWIによる中心血液量の増加は高強度レベルでの運動後の時間経過に伴う $\dot{V}O_2$ の回復初期の動態に影響を及ぼすことが明らかとなった。運動後の $\dot{V}O_2$ の回復動態には、運動開始時における $O_2$ 不足や運動中に生じた $O_2$ コストの増大を返済するための $O_2$ 負債量に加え、運動後の $O_2$ 消費を増大させる種々の要因が関与することが知られている。本研究のWI条件での高強度運動開始時においてはコントロール条件と比較して、時間経過に伴う $\dot{V}O_2$ 反応の遅れが生じ、またその後運動終了まで $\dot{V}O_2$ はコントロール条件よりもつねに高値を示した。これらは運動後の $O_2$ 負債量を増大させる主な要因として考えられる。WI条件下での高強度運動中に $O_2$ コストが増大する要因としては、呼吸筋の仕事量増大の影響が考えられる。すなわち、WI条件下ではFEV、FEV<sub>1.0</sub>およびFEV<sub>25</sub>の減少などの肺機能の低下やFRCの減少<sup>19)</sup>が認められること、また高強度運動中においてはWIによる肺循環の増加によって肺間質の水分量が増し肺胞のコンプライアンスが低下することなどが影響したと考えられる。上述の肺メカニクスを介して $O_2$ コストが増大する要因は、運動後の換気反応の亢進および $O_2$ 負債量のさらなる増大因子としても働いていた可能性が考えられる。一方、WI条件における高強度レベルでは運動後のLA値がつねにコントロール条件よりも大きな値を示していたことから、運動後に乳酸代謝が増大し、それが $O_2$ 消費に反映した可能性もある。しかしながら、 $\dot{V}O_2$ の変化は運動終了後の初期の時間帯でのみ認められたこと、LAの回復の速さ

には条件差が認められないこと、また、WI条件下では運動後の時間経過に伴う呼吸循環器系の回復はコントロール条件よりもむしろ早く認められたこと、などの結果から推察するとその可能性は少ないと考えられる。先行研究では、運動後の過剰酸素消費量（EPOC）には $O_2$ 負債量を含め、乳酸代謝の亢進や体温やホルモンレベルの上昇および脂質代謝の増加などの要因が関与することが示唆されているが<sup>12)</sup>、本研究の結果に基づくならば、中心血液量の増加もまたEPOCに影響を及ぼす一つの要因として重要であることが示唆された。

### 3. 2 運動後の $\dot{V}CO_2$ および $\dot{V}E$ 反応に及ぼす中心血液量増加の影響

WI条件での $\dot{V}E$ は、運動終了後の初期の時間帯（0-2分）での高強度レベルでは $\dot{V}O_2$ や $\dot{V}CO_2$ と同様の反応を示したが、後半の時間帯（10-12分）では逆にすべての強度レベルでWI条件がコントロール条件よりも少ない値を示し、速やかな回復反応が認められた。また、低強度レベルではすべての時間帯でWI条件がコントロール条件よりも低い値を示し換気効率の改善が認められた。 $\dot{V}E = 863 \times \dot{V}CO_2 / (PaCO_2 \times (1 - VD/VT))$ の関係式で示されるように、分時換気量は炭酸ガス排泄量、 $PaCO_2$ のレベル、および死腔換気率によって決定される。この関係式に基づき、WI条件下で換気量が減少する理由を考えると、まず、水浸による水圧で中心血液量が増加し、FRCレベルが低下する要因が上げられる。すなわち安静時におけるFRCレベルの低下は有効肺胞換気の増加（ $VD/VT$ の減少）につながり、その結果 $\dot{V}E$ が減少するものと思われる。また $\dot{V}E$ の減少は呼吸筋自体の $O_2$ 消費量や $CO_2$ の産生量の低下を伴うため、WI条件下では換気効率がさらに改善する方向へと働いていたものと推察される。第2の理由として、低強度レベルでの運動中や運動後のLa値が

つねに低い値を示したことや運動後の回復期における $\dot{V}CO_2$ と $\dot{V}E$ のタイムコースがよく一致していたことなどから、CBVの増加による血流増加の影響で運動中や運動後の活動筋における有酸素代謝が高まり、LAや $CO_2$ の産生量が抑えられていた可能性がある。この血流増加の要因は同時に、活動筋内における代謝産物の除去率を高め、代謝受容器反射による換気ドライブを減少させた可能性も考えられる。WI条件下での運動後の時間経過に伴う換気反応が強度レベルや時間帯によって異なる理由には、上述に考察した種々の要因が相互に作用するためと考えられた。

### 3. 3 運動後のHR反応に及ぼす中心血液量増加の影響

本研究におけるHRの条件と時間間の交互作用効果は、両条件間のHRの差が運動後初期の時間帯(0-2分)よりも後半の時間帯(4-6分, 10-12分)で大きくなったことによるものであった。すなわちCBVの増加は運動後のHRの回復反応を早めることが示唆された。一般に、持久性トレーニングによって運動後のHRが早く回復する反応が生じることが知られている<sup>9), 14), 16)</sup>。また、高い有酸素性能力を有するアスリートでは安静時の徐脈が見られ、運動後のHRは一般人よりも早く安静レベルまで回復することが知られている<sup>16)</sup>。先行研究では運動後のHRの回復反応は迷走神経の再充進効果と交感神経活動の減衰効果の相互作用によって決定されることが明らかにされている<sup>21)</sup>。Imaiら<sup>16)</sup>は運動後初期のHRの回復曲線の時定数がアトロピン投与(迷走神経活動のブロック)によって遅延すること、またその後の時定数はベータ遮断薬によっても影響されることなどから、回復初期のHRの回復の早さには主に迷走神経の再充進の影響が、また、その後の反応には交感神経活動の減衰の影響がさらに関与することを報告している。我々は先行研究<sup>20)</sup>において、CBVの

増加が安静時や運動中のHRを減少させることを報告した。その理由にCBVの増加による静脈還流量の増大で、低圧および高圧受容器を介した交感神経活動の抑制および迷走神経活動の充進の影響によることを推察した。WI条件下での運動後の回復時においてもそれと同様のメカニズムが関与し、コントロール条件よりも速いHR回復反応が生じたと考えられる。本研究の結果は、また一般に血液量が多いアスリートにおける早いHRの回復反応を説明する一つの機序を示しているのかもしれない。

以上、WIによるCBVの増加は、運動後の呼吸循環代謝系機能の回復プロセスを促進する可能性が示唆された。しかし、それはまた高強度レベルでの運動後の回復初期の換気反応の充進および代謝の増大要因としても働くことが示された。

### 文 献

- 1) Ahmaidi S., Granier Z., Taoutaou J. Mercier H., Dubouchaud H. and Prefaut C. ; Effects of active recovery on plasma lactate and anaerobic power following repeated intensive exercise, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28, 450-456 (1996)
- 2) Alexander V.N.G., Hanson P., Aaron E. A., Demment R. B., Conviser J. M. and Nagle F. ; Cardiovascular responses to military antishock trouser inflation during standing arm exercise, *J. Appl. Physiol.*, 63, 1224-1229 (1987)
- 3) Arborelius M., Jr. Balldin U. I. Lilja B. and Lundgren C. E. G. ; Hemodynamic changes in man during immersion with the head above water, *Aerospace Med.*, 43, 592-598 (1972)
- 4) Beaver W. L., Wasserman K. and Whipp B. J. ; A new method for detecting the anaerobic threshold by gas exchange, *J. Appl. Physiol.*, 60, 2020-2027 (1986)
- 5) Bevegard S., Freyschuss U. and Strandell T. ; Circulatory adaptation to arm and leg exercise in supine and sitting position, *J. Appl.*

- Physiol.*, 21, 37-46 (1966)
- 6) Borg G. ; Psychophysical bases of perceived exertion, *Med. Sci. Sports Exercise.*, 14, 377-381 (1982)
  - 7) Christie J. L., Sheldahl L. M., Tristani F. E., Wann L. S., Sagar K. B., Levandoski S. G., Ptacin M. J., Sobocinski K. A. and Morris R. D. ; Cardiovascular regulation during head-out water immersion exercise, *J. Appl. Physiol.*, 69, 657-664 (1990)
  - 8) Coyle E. F., Hemmert M. K. and Coggan A. R. ; Effects of detraining on cardiovascular responses to exercise : role of blood volume, *J. Appl. Physiol.*, 60, 95-99 (1986)
  - 9) Darr K. C., Bassett D. R., Morgan B. J. and Thomas D. P. ; Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise, *Am. J. Physiol.* (Heart Circ. Physiol. 23), H340 - H343 (1988)
  - 10) Farhi L. E., and Linnarsson D.; Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35 °C, *Respir. Physiol.*, 30, 35-50 (1977)
  - 11) 藤本繁夫, 宮本忠吉, 田中繁宏, 大島秀武, 栗原直嗣, 前田如矢 ; 水中歩行運動時の換気効率に及ぼす影響, *臨床スポーツ医学*, 13, 547-552 (1996)
  - 12) Gaesser G. A. and Brooks G. A.; Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption ; review, *Med. Scie. Sports Exerc.*, 16, 29-43 (1984)
  - 13) Grisolfi C., Robinson S. and Turrell SS. ; Effects of aerobic work performed during recovery from exhausting work, *J. Appl. Physiol.*, 21: 1767-1772 (1966)
  - 14) Hagberg J. M., Hickson R. C., Ehsani A. A. and Holloszy J. O. ; Faster adjustment to and recovery from submaximal exercise in the trained state, *J. Appl. Physiol.*, 48: 218-224 (1980)
  - 15) Hanel B., Teunissen I., Rabol A., Warberg J. and Secher N. H. ; Restricted postexercise pulmonary diffusion capacity and central blood volume depletion, *J. Appl. Physiol.*, 83: 11-17 (1997)
  - 16) Imai K., Sato H., Hori M., Kusuoka H., Ozaki H., Yokoyama H., Takeda H. Inoue M. and Kamada, T. ; Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure, *J. Am. Coll. Cardiol.*, 24, 1529-1535 (1994)
  - 17) Jones N. L. and Campbell E. J. M. ; Clinical exercise testing. W. B. Saunders Co., 130-151 (1982)
  - 18) Kanstrup I-L and Ekblom B. ; Acute hypervolemia, cardiac performance, and aerobic power during exercise, *J. Appl. Physiol.*, 52, 1186-1191 (1982)
  - 19) 宮本忠吉, 藤本繁夫, 栗原直嗣, 金尾顕郎, 辻英次, 前田如矢 ; 健康者における頸椎水位と横隔膜水位の動的小よび静的肺機能に及ぼす影響, *体力科学*, 43, 155-161 (1994)
  - 20) 宮本忠吉, 木下博, 生田香明 ; 中心血液量と運動強度との相互作用が運動中および運動後の心循環系機能に及ぼす影響, 第15回「健康医科学」研究助成論文集, 128-141 (2000)
  - 21) Savin W. M., Davidson D. M. and Hskell W. L. ; Autonomic contribution to heart rate recovery from exercise in human, *J. App. Physiol.*, 53, 1572-1575 (1982)
  - 22) Sheldahl L. M., Tristani F. E., Connelly T. P., Levandoski S. G., Skelton M. M. and Cowley Jr. A. W. ; Fluid-regulating hormones during exercise when central blood volume is increased by water immersion, *Am. J. Physiol.*, 262 (Heart Circ. Physiol. 31) , R779-R785 (1992)