

剣状突起位および頸部位浸水時の最大換気量

木村真規*・鈴木政登**・田中さくら*
矢澤 誠*・永田 晟***

Maximal Voluntary Ventilation During Head-out Water Immersion to the Xiphoid and Neck

Masaki KIMURA*, Masato SUZUKI**, Sakura TANAKA*,
Makoto YAZAWA* and Akira NAGATA***

Abstract

Head-out water immersion might induce a decrease in maximal respiratory functions during exercise. The purpose of this study was to determine the relationship between the level of immersion and the maximal respiratory functions during hyperventilation which was assumed to be a ventilatory model during exercise. Pulmonary functions and maximal voluntary ventilation (MVV) were measured in five male volunteers during standing on land (STL), and during immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN).

Compared with STL, there were significant decreases in all pulmonary functions except for $FEV_{1.0\%}$ during WIX. Furthermore, during WIN, FVC, $FEV_{1.0}$, and $\dot{V}_{25}$ were significantly lower than STL. MVV and tidal volume (TV_{MVV}) were significantly decreased, whereas respiratory rate (RR_{MVV}) tended to increase during immersion.

It was suggested that the decrease in expiratory functions indicated by the decrease in FVC, $FEV_{1.0}$, and $\dot{V}_{25}$ might cause a decrease in MVV during immersion. On the other hand, the hyperventilation maneuver that was applied in the present study might have produced a decrease in the ventilatory efficiency during immersion, since an increase in RR_{MVV} during hyperventilation accompanied by a decrease in TV_{MVV} might elicit a lower alveolar ventilation possibly due to an increase in dead space ventilation.

Key words: head-out water immersion (WI), hyperventilation, maximal voluntary ventilation (MVV), forced expiratory volume in one second ($FEV_{1.0}$), maximal expiratory flow rate at 25% of FVC ($\dot{V}_{25}$)

* 早稲田大学大学院 人間科学研究科 健康科学専攻 (〒359 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15)

* Department of Health Science, Graduate School of Human Science, Waseda Univ. (2-579-15 Mikajima, Tokorozawa-shi, Saitama 359, Japan)

** 東京慈恵会医科大学 臨床検査医学教室 (〒105 東京都港区西新橋3-25-8)

** Department of Laboratory Medicine, School of Medicine, Jikei Univ. (3-25-8 Nishi-shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105, Japan)

*** 早稲田大学 人間科学部 (〒359 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15)

*** School of Human Science, Waseda Univ. (2-579-15 Mikajima, Tokorozawa-shi, Saitama 359, Japan)

I. 緒言

近年、高齢者や肥満者などの低体力者が健康増進のために行う運動プログラムの中に、水中での歩行・走運動が盛んに取り入れられている^{12,19)}。水泳運動とは異なり、水中歩行では高度の運動技術が必要とせず、誰でも気軽に始められることから、幅広い年齢層の運動実施者から人気を集めている。また、水中運動では浮力によって膝や腰などへ加わる体重負荷が軽減され、障害発生の可能性が低いことから、比較的安全な運動と考えられている^{15,16,22)}。

水中という特殊な環境下での運動時には、浮力の他に、水圧や粘性、水温など種々の物理的特性が生じ、陸上とは異なる影響を受ける^{5,9,18,23,24)}。とくに呼吸器系に対する影響として、静水圧が胸郭壁や腹腔を圧迫し、吸気時の呼吸筋負荷を増加させることが知られており^{1,13,14)}、この特性を利用した水中運動によって、呼吸筋などのトレーニングをすることは、高齢者などの肺機能低下者にとって望ましい方法と考えられている¹⁰⁾。しかし、浸水時には努力性肺活量 (FVC) や一秒量 (FEV_{1.0}) などの肺機能が低下することから^{2,3,26,28)}、水中運動による換気亢進時には、陸上運動時に比べて呼吸器系への負担が増加する可能性が指摘される。

これまでの研究^{5,20,21)}では、浸水時の肺活量 (VC) や残気量などの静的肺機能や、FVC, FEV_{1.0}などの努力呼出機能が観察されているが、水中における換気亢進時の吸入および呼出に対する負荷や呼吸様式の変化などに関する知見^{5,8)}は乏しく、水位変化について考察した報告はみられない。そこで本研究では、高強度運動時の換気応答モデルとして随意的最大換気運動を行い、この時の最大換気量 (MVV) や呼吸様式が浸水によってどの様に影響されるか観察を行った。また、同時に最大努力呼出時の flow-volume 曲線を記録し、MVV との関連性について検討を行った。測定は陸上と水中の両環境下で行い、浸水時の水位は剣状突起位および頸部位の2条件で行った。

II. 研究方法

A. 対象

被験者は、健康成人男性 5 名 (年齢 24.4 ± 1.0 歳、身長 167.8 ± 3.2 cm、体重 62.1 ± 4.9 kg、平均値 $\pm$ SD) であり、肺、その他の臓器に既往歴はなかった。5 名中 2 名は週 1 回程度の軽運動を行っていたが、残

り 3 名には定期的運動習慣はなかった。また、5 名中 1 名には喫煙習慣があったが、肺機能測定値には他の被験者との間に差異は認められなかった。

B. 実験方法

肺機能の測定は陸上 ($25.2 \pm 1.2^\circ\text{C}$) および水中 ($34.3 \pm 0.2^\circ\text{C}$) での中立温環境下^{5,18)}において、いずれも立位姿勢で行った。浸水レベルは剣状突起位および頸部位とし、各肺機能の測定は被験者ごと無作為な順序で行った。肺機能の測定は ST-460 (Fukuda-Denshi 社製) を用い、FVC, FEV_{1.0}, 一秒率 (FEV_{1.0\%}), ピークフロー (PEF), $\dot{V}_{75}$, $\dot{V}_{50}$, $\dot{V}_{25}$ および MVV を測定した。さらに、MVV 測定時の呼吸曲線の記録から、一回換気量 (TV-MVV) および呼吸数 (RR-MVV) を算出した。MVV の測定では、各被験者ごとに「できるだけ深い呼吸を、できるだけ速く」行うように指示し、最大努力の連続呼吸を 12 秒間行わせた。MVV の測定結果は、測定値を 5 倍して 1 分間値として表した。肺機能の測定中は直立姿勢のまま、壁面から背部を離すことなく最大努力の連続呼吸を行なわせ、姿勢変化を起こさないように注意した。各肺機能測定は全て 2 回以上行い、より高値となった測定結果を採用した。

C. 統計処理

陸上と水中での各肺機能測定値の比較には、paired-t 検定を用いた。また、陸上立位時からの変化率を各測定項目間で比較する場合には unpaired-t 検定を行い、これらの関連性を検定する際には、Pearson の単相関係数検定法を用いた。なお、いずれも確率水準 5 % を有意限界とした。

III. 結果

陸上立位姿勢 (standing on land: STL), 剣状突起位 (water immersion to the xiphoid: WIX) および頸部位浸水時 (water immersion to the neck: WIN) の肺機能測定値を表 1 に示した。FVC および FEV_{1.0} は水位の上昇に伴って低下し、STL と比較して有意差がみられたが、FEV_{1.0\%} は浸水によってほとんど変化しなかった。また、WIX と WIN の比較では、FVC および FEV_{1.0} に水位上昇による有意な低下が認められた。

PEF, $\dot{V}_{75}$, $\dot{V}_{50}$ および $\dot{V}_{25}$ は、WIX によって低下し、STL との間に有意差が認められた (図 1)。一方、WIN 時の PEF, $\dot{V}_{75}$ および $\dot{V}_{50}$ は、WIX と比較して軽度増加する傾向がみられたが、有意な変化は

Table 1 Pulmonary functions during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN)

	n = 5		
	STL	WIX	WIN
FVC (ℓ)	4.82 ± 0.50	4.51 ± 0.50 (-6.4 ± 2.5%)	4.34 ± 0.49 (-10.0 ± 3.0%)
		**	**
FEV _{1.0} (ℓ)	3.93 ± 0.54	3.60 ± 0.48 (-8.3 ± 2.3%)	3.47 ± 0.49 (-11.9 ± 1.9%)
		**	*
FEV _{1.0%} (%)	81.5 ± 5.9	79.8 ± 3.7 (-1.9 ± 2.7%)	79.6 ± 3.4 (-2.1 ± 4.3%)

Values are means ± SD. Significance of differences represent, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$. "(mean ± SD%)" refers to % change from STL calculated as "[(in water - on land) / on land] × 100%".

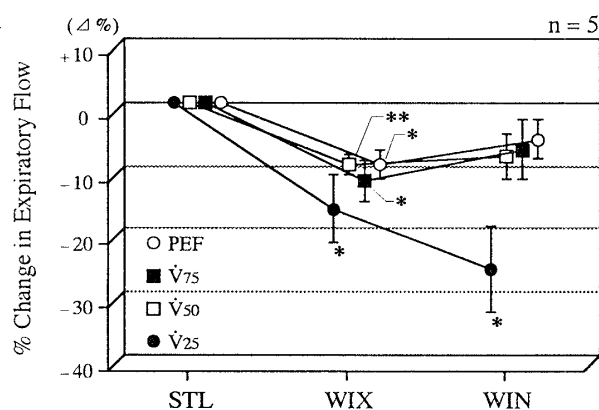


Fig. 1 % change in expiratory flow (PEF, $\dot{V}_{75}$, $\dot{V}_{50}$, $\dot{V}_{25}$) during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN). "Δ%" refers to % change calculated as "[(in water - on land) / on land] × 100%". Symbols and bars represent means ± SE. Significance of differences from STL is shown by, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$.

みられなかった。しかし、WIN時の $\dot{V}_{25}$ はWIXからさらに低下し、STLとの間に有意差が認められた。

次に、MVV、 TV_{-MVV} および RR_{-MVV} の変化を図2に示した。浸水時のMVVおよび TV_{-MVV} は水

位の上昇に伴って減少する傾向がみられ、STLとの間に有意差がみられた。浸水による RR_{-MVV} の変化では、個体差が大きく有意な変化は認められなかったが、WINによって軽度増加する傾向がみられた。

STL、WIXおよびWINによって得られたデータを用いて、各測定項目間で相関分析を行ったところ、FVCおよび $FEV_{1.0}$ はMVVとの間に高い相関関係がみられ、相関係数はそれぞれ $r = 0.75$ ($p < 0.01$), $r = 0.85$ ($p < 0.001$)であった。また、MVVと TV_{-MVV} の間にも高い正相関 ($r = 0.86$, $p < 0.001$)が認められた。 TV_{-MVV} とFVCとの間には $r = 0.47$, $FEV_{1.0}$ との間には $r = 0.58$ ($p < 0.05$)の正相関がみられ、他方、 TV_{-MVV} と RR_{-MVV} の間には高い負の相関 ($r = -0.87$, $p < 0.001$)が認められた。

IV. 考察

本研究における剣状突起位までの浸水時には、陸上時と比較して全般的な肺機能の低下が観察された。しかし、水位の上昇 (WIX ⇒ WIN) による各肺機能の変化では、低下傾向がより顕著となった指標 (FVC, $FEV_{1.0}$ および $\dot{V}_{25}$) と、あまり変化しなかったもの ($FEV_{1.0\%}$, PEF, $\dot{V}_{75}$ および $\dot{V}_{50}$) とが認められた。

一方、浸水時における随意的最大換気運動は、陸

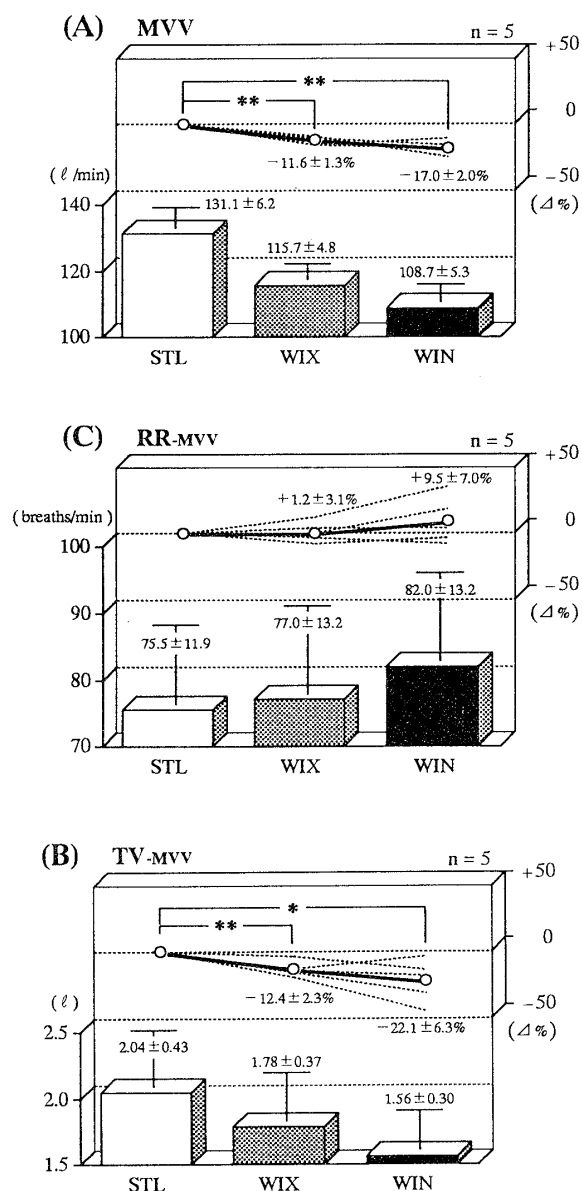


Fig. 2 MVV (A), TV-MVV (B) and RR-MVV (C) during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN). Columns and bars represent means $\pm$ SE. Lines represent % change calculated as "[(in water - on land) / on land] $\times$ 100%". Broken lines indicate individual data and solid lines indicate means. Values are means $\pm$ SE. Significance of differences from STL is shown by, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$.

上と比較してより小さな一回換気量とより多くの呼吸数で行われる傾向を示し、両者の積で表される

MVVは、陸上よりも水中で約8～15%ほど低値となった。また、全ての測定項目においてWIX時にみられた陸上時からの低下傾向は、水位の上昇によってより顕著となった。

1. 浸水時の肺機能について

浸水によるVCの低下は古くから知られており¹²⁾、主に2つの機序が考えられている。その1つの機序では、浸水によって腹部や胸郭壁に静水圧が加わり、その結果、吸気時における横隔膜の降下や肋間筋による胸郭の拡張が制限され、VCが減少するといわれている^{1,13,14,27)}。もう1つは、水圧により静脈血管系から心臓や肺臓器内の血管系に血液が移動、貯留することによってVCが減少する、という機序である^{2,3,26,28)}。肺臓器内での血液貯留によって、肺はうっ血症状を呈し、全肺容積中に占める血管容積が増加する²⁸⁾。これによって肺コンプライアンスの低下^{1,6,13,14,17)}や肺毛細血管径の拡大による末梢気道の閉塞^{3,6,26)}が生じ、全肺気量、VC、FVC、FEV_{1.0}および $\dot{V}_{25}$ などが低下すると考えられている^{9,20)}。これらの知見を考慮すると、①浸水によるFVCの低下は肺うっ血状態による一種の拘束性肺機能障害的变化を、②FEV_{1.0}の低下は肺の呼出機能の低下を、③ $\dot{V}_{25}$ の低下は肺毛細血管での血液貯留による末梢気道の閉塞を示唆するものと考えられる。

2. 浸水時の水位変化の影響について

水中でのFVC、FEV_{1.0}および $\dot{V}_{25}$ の低下は、WIXからWINへと水位が上昇するにつれてより一層顕著となった(表1、図1、3)。一方、PEF、 $\dot{V}_{75}$ および $\dot{V}_{50}$ については、水位変化による影響はあまりみられなかった。これらの結果は宮本らの報告²⁰⁾とはほぼ一致している。水位の上昇によるFVC、FEV_{1.0}および $\dot{V}_{25}$ の著しい低下は、肺内での血液貯留の増加による末梢気道の閉塞および肺コンプライアンスの低下が進行したことによると推測される^{17,26)}。

3. 浸水時のMVVについて

浸水時のMVVは、陸上と比較して有意に低下し、水位の上昇(WIX $\Rightarrow$ WIN)によって、その低下はさらに顕著となった(図2)。浸水によるMVVの低下は、FVCやFEV_{1.0}などの肺機能の変化と類似し、MVVとFVC、MVVとFEV_{1.0}の各相関係数はそれぞれ $r=0.75$ ($p < 0.01$)、 $r=0.85$ ($p < 0.001$)と高値であった。これまでの研究において、MVVと

FEV_{1.0}の間に強い相関関係が報告され、MVVの予測式(MVV=FEV_{1.0}×40など)が算出されている⁴⁾。本研究におけるMVV測定では、FEV_{1.0}と同様の最大努力による呼出と吸気を12秒間連続して行った。従って、FEV_{1.0}が低下する浸水時には、呼出機能の制限が1つの要因となってMVVが低下した可能性が考えられる。また、TV-MVVはMVV測定時の呼出機能のある程度反映すると考えられ、FEV_{1.0}との間に $r=0.58$ ($p<0.05$)の正相関がみられた。この結果からも、浸水時のMVVの低下が、呼出機能の低下によって生じた可能性が示唆される。

一方、浸水時におけるFVCの低下から、上述①の様に、肺うっ血状態による一種の拘束性肺機能低下が生じている可能性が考えられる¹⁷⁾。このFVCの低下によって示される肺の弾性抵抗の増加も、浸水時のMVVやTV-MVVを低下させる一要因と考えられ、FVCとMVVの間には $r=0.75$ ($p<0.01$)の高い相関関係がみられた。

また、TV-MVVの変化率とPEF、 $\dot{V}_{75}$ 、 $\dot{V}_{50}$ および $\dot{V}_{25}$ の変化率との関係では、 $\dot{V}_{25}$ とTV-MVVの間のみ強い相関($y=0.76x$, $r=0.61$, $p<0.05$)がみられ、両者の浸水による低下傾向は、ほぼ1:1の関係であった(図4)。従って、TV-MVVの低下には、肺うっ血状態による末梢気道の閉塞が強く関与している可能性が示唆された。しかし、MVV測定時の随意的最大換気運動では、呼吸位(終末呼気位から終末吸気位まで)が肺活量の約60から85%の間であることが報告されている²⁹⁾。また、RR-MVVは約70~80回/分に達しており、MVV測定時の呼出時間は約0.4秒程度であったと考えられる。これらの点を考慮すると、浸水によるTV-MVVの変化は $\dot{V}_{25}$ よりもむしろPEFや $\dot{V}_{75}$ などの上気道での呼出機能との関連性が強くなることが推察され、図4に示した本研究結果と矛盾する。またTV-MVVは、FVCやFEV_{1.0}よりも浸水による低下傾向が強く(図3)、TV-MVVの低下には、努力呼出機能の低下以外の要因が含まれていると考えられる。

この要因の1つとして、速い連続呼吸によって肺胞内での空気のとらえ込み(air-trapping, AT)が増加した可能性が考えられる。末梢気道に閉塞傾向がみられる場合には、速い連続呼吸によってATが増加することが知られており^{7,25)}、本研究においても浸水による末梢気道の閉塞によって、随意的最大換気運動時にATが増加した可能性が考えられる。

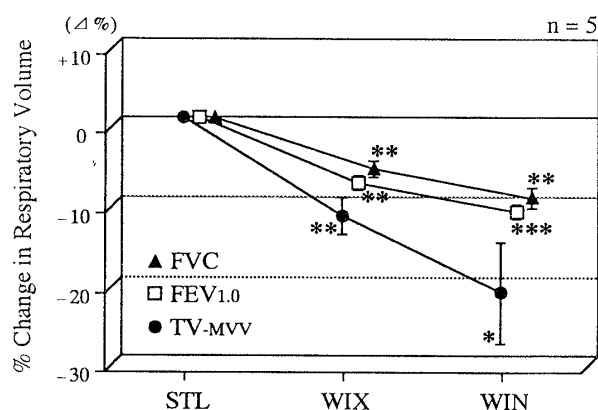


Fig. 3 % change in respiratory volume (FVC, FEV_{1.0}, TV-MVV) during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN). "Δ%" refers to % change calculated as "[(in water - on land) / on land] × 100%". Symbols and bars represent means ± SE. Significance of differences from STL is shown by, * : $p<0.05$, ** : $p<0.01$, *** : $p<0.001$.

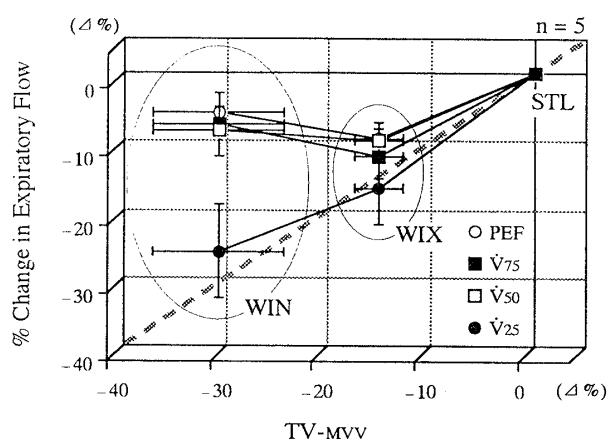


Fig. 4 Relationships between TV-MVV and expiratory flow (PEF, $\dot{V}_{75}$, $\dot{V}_{50}$, $\dot{V}_{25}$) during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN). "Δ%" refers to % change calculated as "[(in water - on land) / on land] × 100%". Symbols and bars represent means ± SE. A broken line refers to a regression line of $y=x$.

これらのことから、本研究において浸水時にMVVが低下した機序として、浸水による末梢気道の閉塞および肺コンプライアンスの低下によって呼出機能が低下し、これに加えて連続性の速い呼吸がATを

惹起させたことによって、 $TV-MVV$ が顕著に減少し、 MVV が低下したことが推察された。

この他、吸気時における肋間筋の胸郭拡張や横隔膜の下降に対して、水圧および粘性抵抗が加わり、水中においてこれらの呼吸筋の筋疲労がより早く生じた可能性が考えられる。しかし、本研究の結果からこの機序について明らかにすることはできなかった。

一方、 $RR-MVV$ はWIXによってほとんど変化せず、STLとの間に差は認められなかった。 $MVV = TV-MVV \times RR-MVV$ と表されることから、WIX時の MVV の低下は $TV-MVV$ の減少に起因した、と考えられる。他方、WIN時には、 $RR-MVV$ は軽度の増加傾向を示し、 $TV-MVV$ はSTLから顕著に減少した。これらの呼吸様式の変化は、浸水による呼出機能の低下や肺の弾性抵抗の増加によって、肺の吸入・呼出運動に対する呼吸筋負荷が増加したことに由来すると考えられる。呼吸運動の調節では呼吸筋の仕事量を最小とする生理応答が知られており³⁰⁾、浸水時にみられた $TV-MVV$ の低下および $RR-MVV$ の増加傾向も、この呼吸筋仕事量の最小化法則によったと推察される。しかし、本研究における MVV 測定では、 $TV-MVV$ および $RR-MVV$ は両者とも随意的に調節可能であり、浸水による呼吸様式の変化が生理的な呼吸調節に起因したのか否かを明らかにすることはできなかった。

WIN時にみられた様な、一回換気量の減少と呼吸数の増加を伴った換気亢進時には、総換気量に対する死腔換気量が増加するために肺胞換気量が減少し、換気の効率が低下する。従って、WIN時における換気亢進時には、呼吸様式の変化によって換気効率が低下する可能性が示唆される。一方、WIX時には $TV-MVV$ の低下が比較的弱かったこと、 $RR-MVV$ に増加傾向が認められなかったことなどから、換気効率の低下は比較的少なかったことが推察された。

以上の結果から、陸上時と比較して浸水時には、肺の呼出機能の低下や弾性抵抗の増加によって肺の吸入・呼出運動に対する呼吸筋負荷の増加が推察された。この負荷は換気亢進時においても生じることが、浸水時の MVV および $TV-MVV$ の低下によって示され、水中での運動は呼吸機能のトレーニングとして好ましいと考えられた。また、WIN時には、換気亢進時の呼吸様式が一回換気量の低下および呼

吸数の増加へと変化し、換気効率が低下する可能性が示された。このことから、WINにおいて水中運動を行う際には、強い換気亢進を起こさない、低強度での運動が好ましいと考えられた。一方、WIX時には、 $TV-MVV$ の低下は比較的弱く、 $RR-MVV$ の増加もみられなかったことから、換気効率の低下は比較的弱いことが推察され、高強度の水中運動を行う際には、この水位での運動が好ましいと考えられた。

最後に、本研究で行った12秒間の随意的最大呼吸は、代謝亢進による生理的換気応答ではなく、自動的な呼吸調節の関与は少なかったと考えられる。先行研究^{8,10,19)}において、自動的呼吸調節が行われている最大運動時の呼吸数は約40~50回/分程度であり、本研究で行った随意的最大呼吸運動時の呼吸数は比較的高値であったことから、運動による換気亢進時のモデルとして完全に理想的とはいえなかった。しかし、随意的最大呼吸運動時の換気量(MVV)や呼吸様式を陸上と水中で比較することによって、換気能力の限界値が浸水によって低下することが示され、先行研究で行われた静的肺機能や努力性肺機能の観察と比較して、より高強度運動時の呼吸運動に類似した知見が得られたと思われる。

V. まとめ

高強度運動による換気応答の呼吸運動モデルとして MVV の測定を行い、陸上と水中での比較を行ったところ、以下の知見が得られた。

1. MVV は浸水によって有意に低下し、水位の上昇との間に強い関連性が認められた。
2. 浸水による MVV の低下は、FVCや $FEV_{1.0}$ などの肺機能の低下と相関が高く、また、連続呼吸によるair-trappingの関与も示唆された。
3. 陸上時と比較して頸部位浸水時には、換気の亢進によって一回換気量が低下し、呼吸数が増加傾向を示したことから、換気効率が低下する可能性が示された。一方、剣状突起位までの浸水時には、一回換気量の低下は比較的弱く、呼吸数の増加もみられなかったことから、高強度の水中運動を行う際には、この水位での運動が比較的好ましいと考えられた。

[文献]

- 1) Agostoni, E., G. Gurtner, G. Torri, and H. Rahn (1966) Respiratory mechanics during submersion

- and negative-pressure breathing. *J. Appl. Physiol.* 21(1) : 251-258.
- 2) Bondi, K. R., J.M. Young, R. M. Bennett, and M. E. Bradley (1976) Closing volumes in man immersed to the neck in water. *J. Appl. Physiol.* 40 (5) : 736-740.
 - 3) Buono, M. J. (1983) Effect of central vascular engorgement and immersion on various lung volumes. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 54(4) : 1094-1096.
 - 4) Carter, R., M. Peavler, S. Zinkgraf, J. Williams, and S. Fields (1987) Predicting maximal exercise ventilation in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Chest.* 92(2) : 253-259.
 - 5) Choukroun, M. L., C. Kays, and P. Varène (1989) Effects of water temperature on pulmonary volumes in immersed human subjects. *Respiration Physiology.* 75 : 255-266.
 - 6) Collins, J. V., G. M. Cochrane, J. Davis, S. R. Benatar, and T. J. H. Clark (1973) Some aspects of pulmonary function after rapid saline infusion in healthy subjects. *Clinical Science and Molecular Medicine.* 45 : 407-410.
 - 7) Dahlbäck, G. O. (1975) Influence of intrathoracic blood pooling on pulmonary air-trapping during immersion. *Undersea Biomed. Res.* 2(2) : 133-140.
 - 8) D'urzo, A. D., K. R. Chapman, and A. S. Rebuck (1985) Effect of elastic loading on ventilatory pattern during progressive exercise. *J. Appl. Physiol.* 59(1) : 34-38.
 - 9) Farhi, L. E., and D. Linnarsson (1977) Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35°C. *Respiration Physiology.* 30 : 35-50.
 - 10) 藤本繁夫, 宮本忠吉, 田中繁宏, 大島秀武, 栗原直嗣, 前田如矢 (1996) 水中歩行運動時の換気効率に及ぼす影響—陸上歩行時との比較—. *臨床スポーツ医学.* 13(5) : 547-552.
 - 11) Hamilton, W. F., and J. P. Mayo (1944) Changes in the vital capacity when the body is immersed in water. *Am. J. Physiol.* 141 : 51-53.
 - 12) Heyneman, C. A., and D. E. Premo (1992) A 'Warrior Walker' exercise program for the elderly. *Public Health Reports.* 107(2) : 213-217.
 - 13) Hong, S. K., P. Cerretelli, J. C. Cruz, and H. Rahn (1969) Mechanics of respiration during submersion in water. *J. Appl. Physiol.* 27(4) : 535-538.
 - 14) Hong, S. K., E. Y. Ting, and H. Rahn (1960) Lung volumes at different depths of submersion. *J. Appl. Physiol.* 15(4) : 550-553.
 - 15) 堀田 昇, 大柿哲朗, 金谷庄藏, 藤島和孝, 萩原博嗣 (1994) 高齢低体力者に対する水中での運動療法. *デサントスポーツ科学.* 15 : 78-83.
 - 16) 堀田 昇, 大柿哲朗, 金谷庄藏, 萩原博嗣 (1993) 術後低体力者に対する水中での運動療法. *健康科学.* 15 : 57-61.
 - 17) Koubenec, H. J., W. D. Risch, and O. H. Gauer (1978) Effective compliance of the circulation in the upright sitting posture. *Pflügers Arch.* 374 : 121-124.
 - 18) 右田孝志, 堀田 昇, 大柿哲朗, 金谷庄藏, 藤島和孝, 増田卓二 (1996) 長時間の水中および陸上歩行時の生体反応の比較. *体育学研究.* 40 : 316-323.
 - 19) Miyamoto, T., S. Fujimoto, Y. Kushibuchi, N. Kurihara, and K. Maeda (1995) Effects of treadmill walking in water on ventilatory response in obese subjects. *Jpn. J. Appl. Physiol.* 25(1) : 1-7.
 - 20) 宮本忠吉, 藤本繁夫, 栗原直嗣, 金尾顕郎, 辻英次, 前田如矢 (1994) 健常者における頸椎水位と横隔膜水位の動的小および静的肺機能に及ぼす影響. *体力科学.* 43 : 155-161.
 - 21) Morrison, J. B., and N. A. S. Taylor (1990) Measurement of static and dynamic pulmonary work during pressure breathing. *Undersea Biomedical Research.* 17(5) : 453-467.
 - 22) 武藤芳照 (1988) 骨・関節疾患への運動処方. *最新医学.* 43(10) : 2258-2263.
 - 23) 小野寺昇, 宮地元彦, 木村一彦, 米谷正造, 中村由美子 (1993) 水中トレッドミルを用いた水中歩行運動時の粘性抵抗と水位の変化がエネルギー代謝量へ与える影響. *デサントスポーツ科学.* 14 : 100-104.
 - 24) 小野寺昇, 宮地元彦, 矢野博巳, 木村一彦, 中村由美子, 池田 章 (1993) 水の粘性抵抗と水温が水中トレッドミル歩行中の酸素摂取量及び直腸温に及ぼす影響. *川崎医療福祉学会誌.* 3(1) : 167-174.
 - 25) Otis, A. B., C. B. McKerrow, R. A. Bartlett, J. Mead, M. B. McIlroy, N. J. Selverstone, and E. P. Radford (1956) Mechanical factors in distribution of pulmonary ventilation. *J. Appl. Physiol.* 8 : 427-443.
 - 26) Prefaut, C., E. Lupi-H, and N. R. Anthonisen (1976) Human lung mechanics during water immersion. *J. Appl. Physiol.* 40(3) : 320-323.
 - 27) Reid, M. B., S. H. Loring, R. B. Banzett, and J. Mead (1986) Passive mechanics of upright human chest wall during immersion from hips to neck. *J. Appl. Physiol.* 60(5) : 1561-1570.

- 28) Risch, W. D., H. J. Koubenec, U. Beckmann, S. Lange, and O. H. Gauer (1978) The effect of graded immersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution, and heart rate in man. *Pflügers Arch.* 374 : 115-118.
- 29) Rodarte, J. R., K. Rehder (1986) Dynamics of respiration. In: *Handbook of Physiology. The Respiratory System*, edited by S. R. Geiger. Washington, DC: Am. Physiol. Soc., sect. 3, vol. III, part 1, chapt. 10 : 131-144.
- 30) Roussos, C., E. J. M. Campbell (1986) Respiratory muscle energetics. In: *Handbook of Physiology. The Respiratory System*, edited by S. R. Geiger. Washington, DC: Am. Physiol. Soc., sect 3, vol. III, part 2, chapt. 28 : 481-509.

(平成9年3月17日受付)
(平成9年7月11日受理)