

早稲田大学審査学位論文(博士)

博士(人間科学)学位論文

運動時の呼吸・循環応答に及ぼす

頸下浸水の影響

2001年1月

早稲田大学大学院人間科学研究科

木村 真規

①

博士(人間科学) 学位論文

運動時の呼吸・循環応答に及ぼす頸下浸水の影響

2001年 1月

早稲田大学大学院 人間科学研究科

木村 真規

指導教授 村岡 功

目次

第I部 序論	1
第1章 はじめに	2
第2章 頸下浸水(HOWI)について	2
1.2.1. HOWI実験の歴史的背景	2
1.2.2. HOWIと循環機能	3
1.2.3. HOWIと呼吸機能	5
1.2.4. HOWIと内分泌機能	6
1.2.5. HOWIと加齢	7
1.2.6. HOWIと動物実験	8
第3章 水中運動の種類と特性	9
1.3.1. Shallow Water Running	9
1.3.2. Deep Water Running	9
1.3.3. 流水プールを用いた歩行・走運動	11
1.3.4. 水中トレッドミルを用いた歩行・走運動	11
1.3.5. 水中での自転車運動	11
1.3.6. 特殊な水中運動	12
第4章 先行研究の問題点と本研究の目的	12
1.4.1. 先行研究における問題点	12
1.4.2. 本研究の目的と論文の構成	15
第II部 研究課題	17
第1章 研究課題1：水中歩行・走運動時の呼吸循環機能と血中乳酸およびカテ コールアミン濃度の変化—陸上歩行・走運動との比較—	18
2.1.1. 緒言	18
2.1.2. 方法	18
2.1.3. 結果	20
2.1.4. 考察	26
2.1.5. まとめ	30
第2章 研究課題2：剣状突起位および頸部位浸水時の最大換気量	31
2.2.1. 緒言	31
2.2.2. 方法	32
2.2.3. 結果	32
2.2.4. 考察	34
2.2.5. まとめ	41

第3章 研究課題3：腕クランキング運動時の心拍応答および心電図RR間隔変動に及ぼす頸下浸水の影響	42
2.3.1. 緒言	42
2.3.2. 方法	43
2.3.3. 結果	45
2.3.4. 考察	49
2.3.5. まとめ	52
第4章 研究課題4：中高年齢者における水中等尺性運動時の血圧応答	54
2.4.1. 緒言	54
2.4.2. 方法	54
2.4.3. 結果	56
2.4.4. 考察	59
2.4.5. まとめ	63
第5章 研究課題5：麻酔下ラットにおける急速入水・出水時の血圧応答	64
2.5.1. 緒言	64
2.5.2. 方法	65
2.5.3. 結果	66
2.5.4. 考察	68
2.5.5. まとめ	71
第III部 総括	73
第1章 研究課題の総括	74
3.1.1. 運動時の換気応答に及ぼすHOWIの影響について	74
3.1.2. 運動時のHR応答に及ぼすHOWIの影響について	75
3.1.3. 運動時の血圧応答に及ぼすHOWIの影響について	80
3.1.4. 急速入水・出水時の血圧応答について	81
第2章 今後の課題	82
3.2.1. 臨床的アプローチに関する今後の課題について	82
3.2.2. 基礎的アプローチに関する今後の課題について	83
第3章 結語	83
第IV部 参考文献	85

本論文の内容の一部は、以下の学術論文および学術大会において公表された(印刷中・発表予定を含む)。また、本研究の一部は下記団体の学術研究助成によって実施された。

【学術論文】

木村真規, 鈴木政登, 田中さくら, 矢澤 誠, 永田 晟 (1997) 剣状突起位および頸部位浸水時の最大換気量. *日本運動生理学雑誌* 4(2): 125-132.

木村真規, 田中さくら, 矢澤 誠, 久我晃広, 寺田佳代, 瀧間久俊, 永田 晟 (1998) 陸上および水中に於ける歩行・走運動時の心拍数と換気応答の変化. *ヒューマンサイエンスリサーチ* 7: 25-35.

木村真規, 田中さくら, 鈴木政登, 清水桃子, 永田 晟 (1999) 中高年齢者における水中等尺性運動時の血圧応答. *デサントスポーツ科学* 20: 56-65.

木村真規, 鈴木政登, 矢澤 誠, 村岡 功 (2001) 腕クランキング運動時の心拍応答に及ぼす浸水の影響. *日本運動生理学雑誌* 8(1): 印刷中.

【学会報告】

Suzuki, M., Kimura, M., Kawabe, N., Matsubara, S., and Nagata, A. (1995) Endocrine and renal responses to exercise in water and on treadmill. *Jpn. J. Physiol.* 45(1): S257.

木村真規, 鈴木政登, 永田 晟 (1995) 水中走運動時の呼吸循環応答. 第3回日本運動生理学学会大会, *日本運動生理学雑誌* 3(1): Pp. 39.

木村真規, 永田 晟, 鈴木政登, 清水桃子, 河辺典子, 高尾 匡, 町田勝彦 (1995) 電解質代謝からみた陸上と水中での運動の相違. 第50回日本体力医学会大会, *体力科学* 44(6): Pp. 760.

木村真規, 永田 晟, 鈴木政登 (1996) 最大換気能力におよぼす浸水の影響. 第4回日本運動生理学学会大会, *日本運動生理学雑誌* 4(1): Pp. 30.

木村真規, 永田 晟, 鈴木政登, 清水桃子, 河辺典子, 町田勝彦 (1996) 陸上および水中での運動負荷時換気効率の比較. 第51回日本体力医学会大会, *体力科学* 45(6): Pp. 689.

木村真規, 矢澤 誠, 田中さくら, 鈴木政登, 河辺典子, 永田 晟 (1997) 下半身浸水環境下

における腕クランキング運動時の $\dot{V}O_2$ -HR回帰. 第5回日本運動生理学会大会, 日本運動生理学雑誌 5(1): Pp. 45.

Kimura, M., and Nagata, A. (1997) Maximal voluntary ventilation during water immersion. *XVlth Congress of the International Society of Biomechanics, Books of Abstracts*: Pp. 123.

木村真規, 矢澤 誠, 田中さくら, 鈴木政登, 永田 晟 (1997) 水中における等尺性脚伸展運動時の血圧応答. 第52回日本体力医学会大会, 体力科学 46(6): Pp. 894.

木村真規, 矢澤 誠, 田中さくら, 鈴木政登, 清水桃子, 河辺典子, 永田 晟 (1998) 椅座位-腕クランキング運動時の $\dot{V}O_2$ -HR回帰に及ぼす下半身浸水の影響. 第53回日本体力医学会大会, 体力科学 47(6): Pp. 831.

木村真規, 矢澤 誠, 田中さくら, 鈴木政登, 清水桃子, 河辺典子, 永田 晟 (1999) 腕運動時の心拍変動に及ぼす剣状突起位浸水の影響. 第25回日本医学会総会記念日本体力医学シンポジウムプログラム・抄録集: Pp. 112.

Kimura, M., Suzuki, M., Kawabe, N., and Sudou, M. (1999) Effects of head-out water immersion on heart rate responses and heart rate variability during arm-cranking exercise. *Jpn. J. Physiol.* 49: S230.

木村真規, 鈴木政登, 穂積典子, 町田勝彦, 村岡 功 (1999) 麻酔下ラットに於ける浸水時の昇圧反応と圧受容器反射. 第54回日本体力医学会大会, 体力科学 48(6): Pp. 881.

木村真規, 鈴木政登, 穂積典子, 村岡 功 (2000) 麻酔下ラットに於ける急速入水・出水時の血圧応答. 第77回日本生理学会大会予稿集: Pp. 111.

木村真規, 鈴木政登, 村岡 功 (2001) 麻酔下ラットの急速入水/出水時の血圧応答に及ぼす心臓自律神経遮断の影響. 第78回日本生理学会大会: 発表予定(2001. 3).

【学術研究助成】

木村真規, 田中さくら, 鈴木政登, 清水桃子, 永田 晟 (1998) 中高年齢者における水中等尺性運動時の血圧応答. 平成10年度 財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団 学術研究助成.

第1章 はじめに

近年、我が国や世界の多くの国で、消費者の権利意識が高まり、消費者の権利保護の重要性が認識され、消費者保護の法制が整備されてきた。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。

第1部 序論

この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。

第2章 HOWEについて

1.1. HOWEの法的意義
HOWEは、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。

この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。この中で、消費者の権利保護の法制整備は、消費者の権利保護の法制整備の重要な要素として認識されている。

第1章 はじめに

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おり、腰部や下肢などの障害に対するリハビリテーションにおいて積極的に利用されている (HeynemanとPremo 1992, Miyamotoら 1995, 中川 1998, 奥田 1997)。水泳運動とは異なり、水中歩行・走運動では高度の運動技術を必要とせず、誰でも気軽に始められることから、幅広い年齢層から人気を集めている。さらに水中運動は、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 (堀田ら 1993, 1994, 武藤 1988)。

しかし、水の中という特殊な環境では、浮力の他にも、静水圧や粘性、水温など種々の物理的特性が生じ、生体は陸上環境と異なる影響を受ける (Choukrounら 1989, FarhiとLinnarsson 1977, 右田ら 1996, 小野寺ら 1993a, 1993b)。頭部を水面上に出した頸下浸水 (Head-Out Water Immersion: HOWI) 環境では、心拍出量 (\dot{Q}) の増加に伴う動脈血圧の上昇 (Gabrielsenら 1993, 2000, 美和ら 1996, Okadaら 1996, 岡田ら 1996) や、肺毛細血管内での血液貯留による肺機能の低下 (Buono 1983, FarhiとLinnarsson 1977, Guyattら 1965) などが報告されており、水中運動時の生体応答に対して多大な影響を及ぼす可能性が考えられる。高齢者や肥満者などの低体力者に対してより安全で効果の高い運動プログラムを提供するためには、HOWI 環境下における運動時の生体応答の機序を解明し、その影響について十分に理解する必要があると思われる。

第2章 HOWI について

1. 2. 1. HOWI 実験の歴史的背景

ヒトが水の中に入ったときの生体応答は、比較的古くから研究対象として取り上げられており、近年では潜水医学や宇宙医学分野での成果が数多く報告されている。とくにHOWIに関する研究は、宇宙環境を模擬した基礎的な地上研究の方法として盛んに用いられており、運動と関連した研究も多く報告されている (HargensとWatenpaugh 1996, Krasney 1996, 間野 1996)。

HOWI に関する基礎的研究では、静水圧によって惹起される血液シフトの影響につい

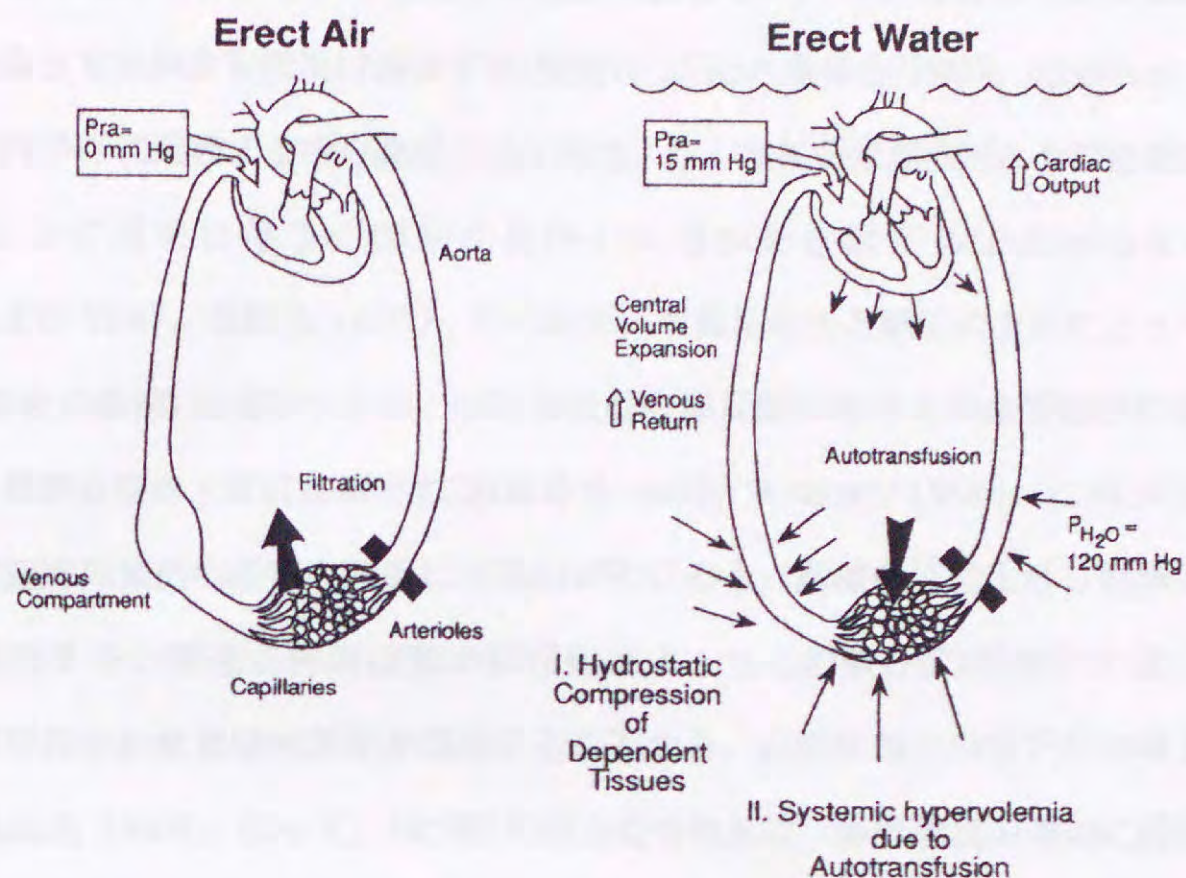


Fig. 1.2.1 Cardiovascular responses to hydrostatic compression of dependent tissues and capillary reabsorption or an autotransfusion in dependent limbs. From Krasney (1996).

て観察した報告が多く、その為、静水圧以外の物理的要因を可能な限り軽減するように実験方法が工夫されている。とくに水温については、エネルギー代謝の変化を生じない HOWI 環境として、安静時のヒトの場合 $34.5(30 \sim 35)^\circ\text{C}$ の中立温が報告されている (Choukrounら 1989, Choukrounと Varena 1990, Craigと Dvorak 1969, Krasney 1996)。本研究では、全ての HOWI 実験をこの中立水温で行い、参考文献も全て中立水温を用いた報告を利用した。

1.2.2. HOWI と循環機能

HOWI 環境では、静水圧によって静脈還流が増加し、剣状突起位以上の水位では顕著な中心静脈圧の上昇が観察される (Gabrielsenら 1993, Johansenら 1998, Koubenecら 1978, Rischら 1978a, 図1.2.1)。胸腔内での血液貯留 (Guyattら 1965, Arboreliusら 1972, Rischら 1978a) は心房や肺毛細血管床の内圧を上昇させ、容量受容器反射を惹起する (Krasney 1996, 図1.2.2)。心房や肺の伸展受容器からの求心性刺激は迷走神

経を介して中枢へと連絡され、延髄孤束核を介した循環中枢への抑制性入力によって、心臓および末梢血管を支配する交感神経活動を減弱化し、この場合とくに血管拡張応答が顕著となって末梢血管抵抗は減少する(麻野井 1996, 亀谷ら 1997, Krasney 1996).

一方, HOWI に起因する中心静脈圧の上昇は, 左心室拡張末期内圧とその径を増大し, スターリング効果に伴う一回拍出量(SV)の増加を惹起する(Fujisawaら 1996, Hajduczokら 1987, 真崎ら 1995). その結果, 収縮期血圧と脈圧の上昇によって後負荷(動脈血管系の負荷)は増加するが, 心肺容量受容器反射に伴う末梢血管抵抗の減弱化によって, 動脈血圧の上昇は抑制される(亀谷ら 1997, Krasney 1996). このSVの増加と末梢血管抵抗の減弱化応答の関係に不調和が生じると, 動脈血圧は上昇し動脈圧受容器反射に起因する心臓迷走神経活動の賦活化によって心拍数(HR)が減少する. また, HOWI 時には左心室収縮末期径が増加することから, 心筋収縮力の低下が示唆されている(Sheldahlら 1984). 従って, HOWI に伴うQの増加は, 静脈還流の増加に起因するスターリング効果によって惹起され, 心筋の仕事量は増加しないと考えられている(Hajduczokら 1987, Krasney 1996).

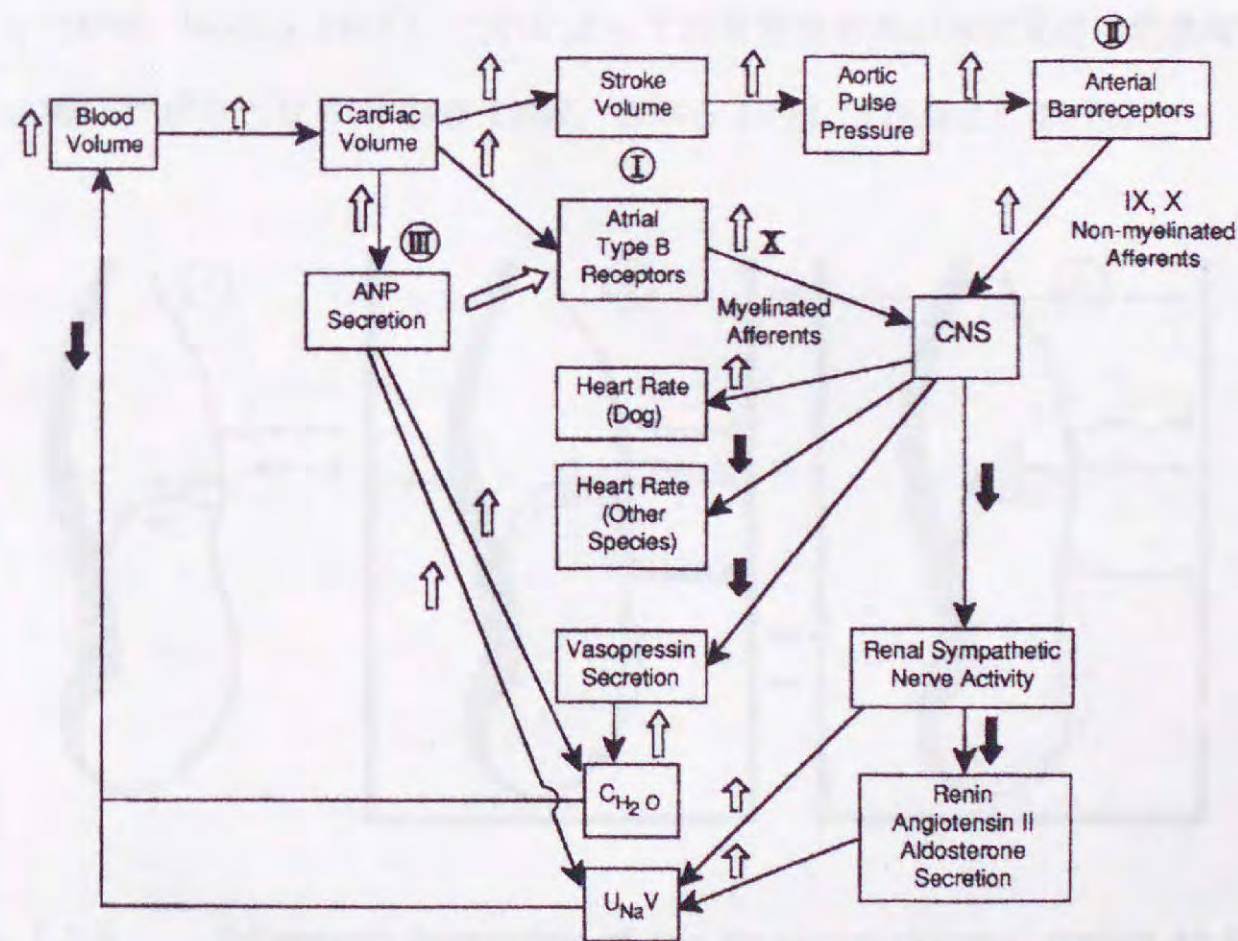


Fig. 1.2.2 Schematic illustration of the Gauer-Henry hypothesis. Open arrows indicate an increase or stimulation of the variable, darkened arrows indicate a decrease or inhibition of the variable. From Krasney (1996).

1.2.3. HOWI と呼吸機能

HOWI 環境では肺活量が減少し、努力性肺活量や一秒量などの動的肺機能も低下する。Agostoniら(1966)は、HOWI に伴う肺機能の低下が水位の上昇に伴って顕著となることから、静水圧による腹腔内圧および胸腔内圧の上昇によって、肺の拡張制限が惹起される可能性を報告した(図1.2.3)。しかし Dahlback (1975)は、腰部位から頸部位のみ浸水することのできる特殊な装置を用いて、下肢からの血液シフトの影響について検討したところ、腹部および胸部に加わる静水圧のみでは肺機能の低下は軽微なものであり、静脈還流の増加に伴う胸腔内での血液貯留が大きく影響することを明らかにした(図1.2.4)。また、Johansenら(1997)が行った大腿起始部における動静脈阻血実験では、HOWI による中心静脈圧の上昇が軽度に抑制されただけであったことから、下肢以外にも腹腔などの血管床から移動する血液が静脈還流の増大に大きく貢献すると考えられている。

HOWI に伴う静脈還流の増加は、中心静脈圧を上昇させ、胸腔内で約700mlの血液貯留を惹起する(Arboreliusら 1972, 図1.2.5)。肺での血液貯留は肺毛細血管を充血させ、肺重量の増加と肺コンプライアンスの低下を惹起する(FarhiとLinnarsson 1977, Hongら 1960, 1969, Rossら 1961)。これによって血管密度の高い末梢気道は閉塞傾向を示し、 \dot{V}_{25} の低下が顕著となる(木村ら 1997, 宮本ら 1994, Prefautら 1976)。

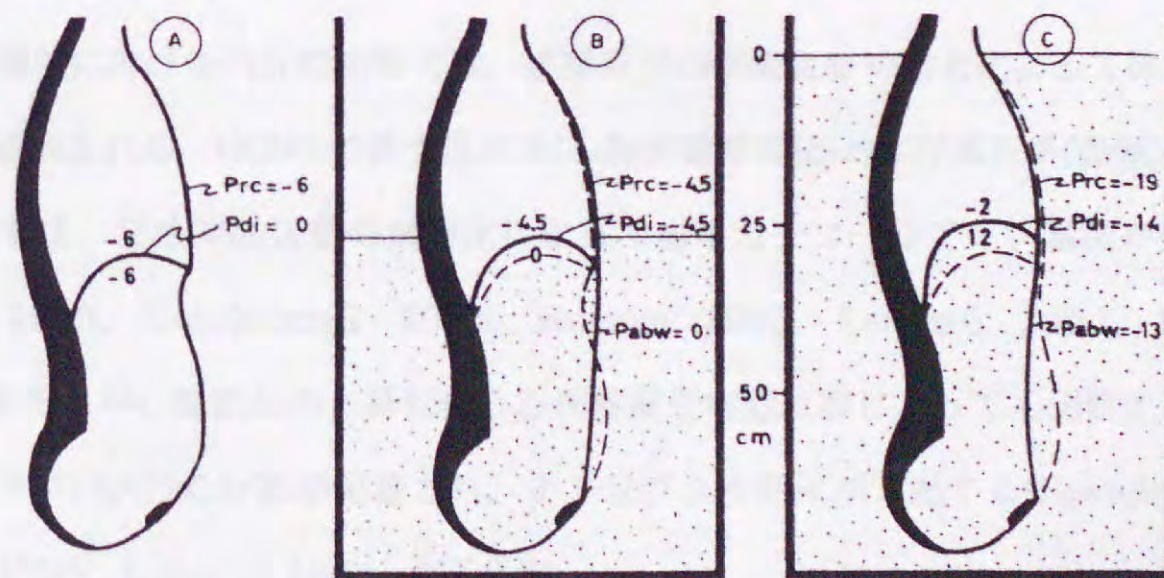


Fig. 1.2.3 Schematic illustration of the thoracoabdominal statics at the end of spontaneous expirations of a subject sitting in air (A), in water up to the xiphoid process (B), and to the neck (C). The values are pressure in $cm H_2O$. Prc, Pdi, and Pabw indicate, respectively, the average pressure across the rib cage, the diaphragm, and the abdominal wall. From Agostoni et al. (1966).

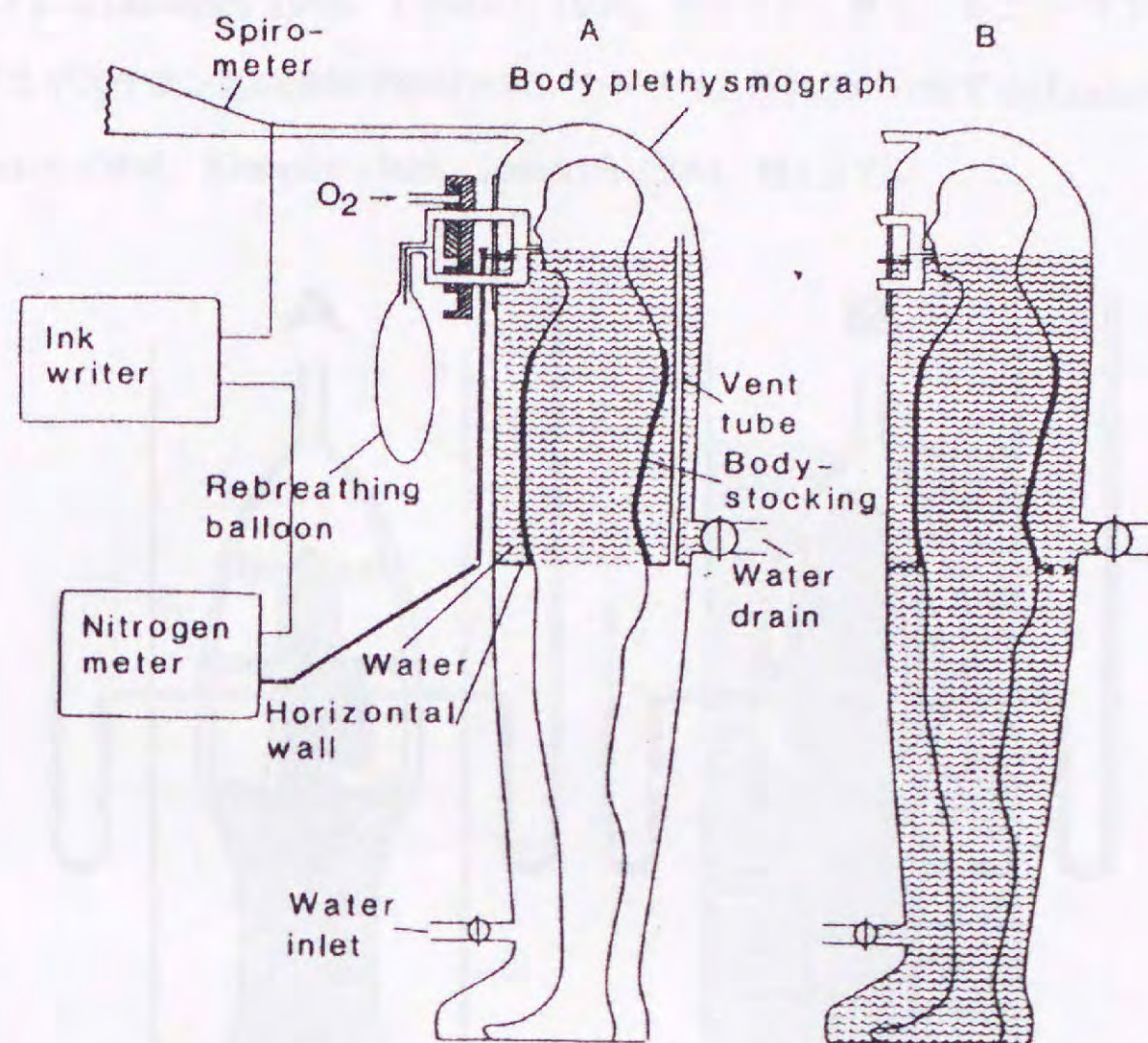


Fig. 1.2.4 Experimental system for comparison of lung capacity between thorax immersion (A) and head-out immersion (B). From Dahlback (1975).

1.2.4. HOWI と内分泌機能

HOWI 環境における内分泌応答では、循環系での容量負荷の増大によって体液排泄的な応答が観察される。HOWI に伴う低圧系(心肺容量受容器)および高圧系(動脈圧受容器)の圧反射では、交感神経活動の減弱化によって血中カテコールアミン濃度が低下する (Epstein 1996, Gabrielsenら 2000, Krasney 1996, Larsenら 1994, Norskら 1990)。また、中心静脈圧の上昇に伴う心房伸展受容器反射によって心房性ナトリウム利尿ペプチド(ANP)の分泌が促進され、ナトリウム性利尿が亢進する (Epstein 1996, Krasney 1996, Larsenら 1994, 図1.2.2)。

一方、HOWI 時には、静水圧によって毛細血管での限外濾過圧が減少し、膠質浸透圧による細胞内液の血管内流入によって、血漿量の増加および血液希釈を惹起する (Epstein 1996, Greenleafら 1983, Johansenら 1997, 1998, Krasney 1996, 図 1.2.6)。これによって血漿抗利尿ホルモン(ADH)の分泌は抑制され、腎臓での水再吸収

は抑制される(Krasney 1996, Larsenら 1994, 図1.2.2). また, レニン-アンギオテンシン-アルドステロン系の機能が抑制され, ナトリウム性利尿が亢進する(Epstein 1996, Johansenら 1998, Krasney 1996, Larsenら 1994, 図1.2.2).

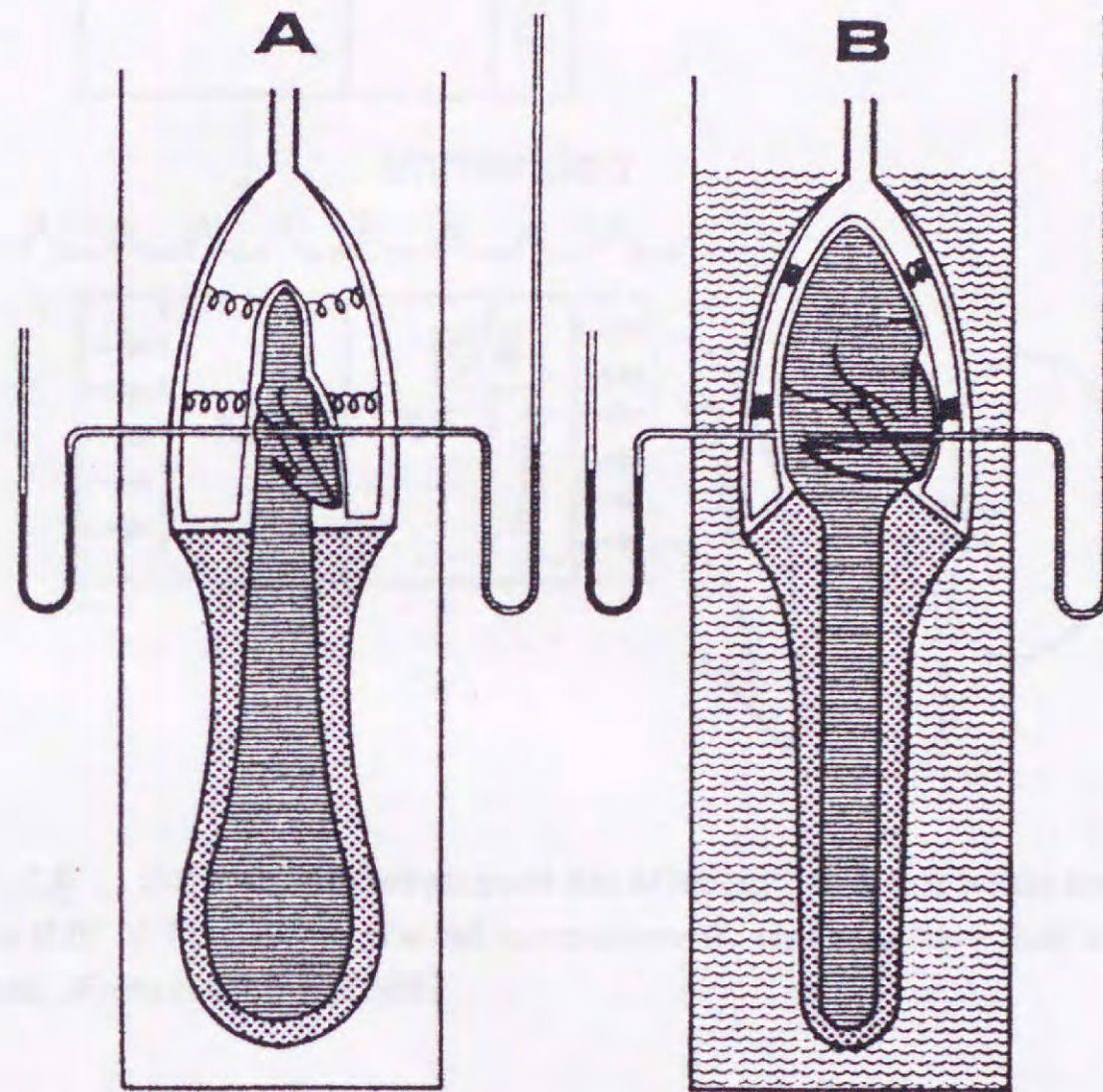


Fig. 1.2.5 Schematic illustration of the effect of head-out water immersion on distribution of blood between dependent regions of the body and thorax. The springs indicate the elasticity of the lung tissue. Dotted areas: incompressible but resilient tissues. Hatched areas: blood. From Arborelius et al. (1972).

1.2.5. HOWI と加齢

HOWI に対する生体応答の加齢変化について検討した報告では, 循環調節における自律神経機能の加齢に伴う変化が注目されている. 高齢者では, 安静時の副交感神経活動が減弱化し, 姿勢変化や下半身陰圧負荷に対する圧反射の感受性も低下する可能性が報告されている(Miwaら 1996a, 1996b, 美和ら 1996, Okadaら 1996, 岡田ら 1996, 杉山 1997). HOWI 時には水面下の血管床から胸腔内への血液シフトが惹起されるが, 高齢者では血管弾性の低下や組織量の減少などによって浸水に伴う静脈還流量の

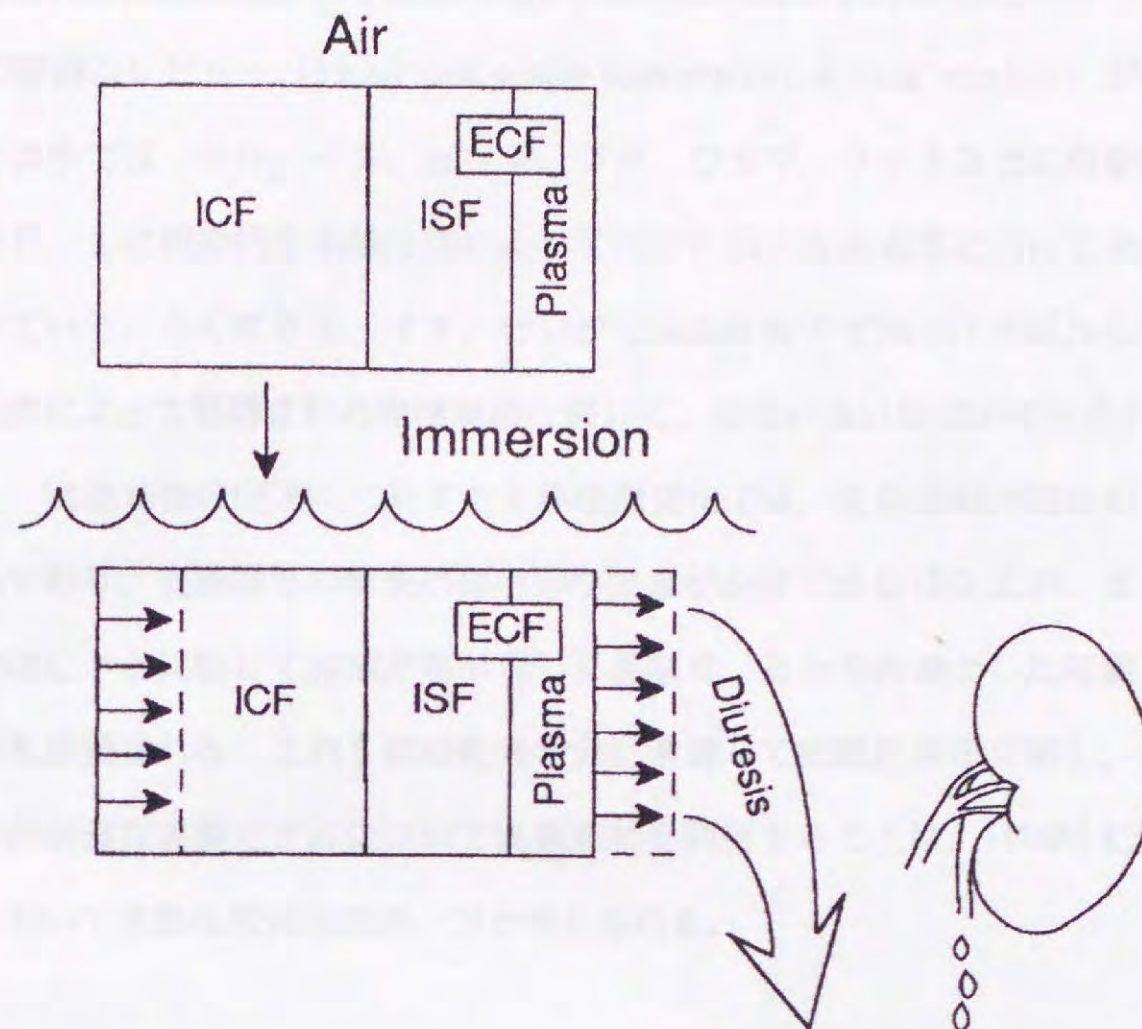


Fig. 1.2.6 Schematic illustration of the effect of head-out water immersion on the shift of fluid out of the cell compartment, transcapillary fluid shift and diuresis. From Krasney (1996).

増加は減弱化すると考えられている(美和ら 1996)。従って、HOWI に伴った低圧系および高圧系の圧受容器への入力刺激は加齢によって減弱化する可能性が考えられ、圧反射の感受性低下との相互作用によって、HOWI に伴う交感神経活動の減弱化や副交感神経活動の賦活化は加齢によって抑制されると考えられている(美和ら 1996, 杉山 1997)。

しかし、今日までのHOWI と加齢に関する研究報告は、量・質ともに十分とはいえない状況にある。水中運動では、HOWI に伴った容量負荷の増大や運動に伴った心臓血管系での圧負荷の増大が惹起されると考えられることから、とくに高齢者を対象とした水中運動時の生体応答について、心臓血管系を中心としたより詳細な検討を進めていく必要性が感じられる。

1.2.6. HOWI と動物実験

実験動物モデルを用いたHOWI に関する研究については、1996年にアメリカ生理学会

から出版された *Handbook of Physiology Environmental Physiology* の中で、Krasney (1996) の詳細なレビュー「Head-out water immersion: animal studies」が報告されている。その中では、サル、イヌ、ヒツジ、ブタ、ウサギ、ラットなどの実験動物が用いられており、主に観血的な実験方法によってHOWI時の生体応答についての詳細な検討が行われている。とくにサル、イヌ、ヒツジでは無麻酔下でHOWIが試みられており、各種の麻酔によって影響される循環調節に関して、価値の高い知見が報告されている。

しかし、実験動物のHOWIに対する生理機能変化では、各動物種に固有の生体応答が報告されており、実験結果の解釈には十分な注意が必要である(図1.2.2)。また、四足歩行動物ではヒトと比較して体液分布が著しく異なり、ヒトを対象とした実験モデルとしての限界も指摘される。これらの特性を十分に考慮して実験計画を立案し、ヒトで検証することが困難な実験モデルにおいて実験動物を利用することは、HOWIに関する基礎的研究において重要な研究方法の一つと考えられる。

第3章 水中運動の種類と特性

1.3.1. Shallow Water Running

水中運動に関する研究報告では、様々なプールを用いた運動が行われており、それぞれの運動様式に特徴的な生体応答が観察されている。そのひとつに、比較的水深の浅い背の立つプールを利用したShallow Water Runningと呼ばれる運動が行われており、被験者はプールの底面を蹴ることによって推進力を得て歩行・走動作を行う(図1.3.1B)。このShallow Water Runningは、実際に運動処方現場で多く行われている運動であり、研究によって得られたデータは臨床現場へ直接還元することができる。しかし、運動中の移動範囲が広く、大型の計測器を用いて生体信号を測定することは困難な場合が多い。

1.3.2. Deep Water Running

一方、救命胴衣状の補助浮遊器具を装着して、ダイビングプールなどの比較的深度の深いプールで歩行動作を行うDeep Water Runningでは、歩行様のもがき動作によって生じる粘性抵抗が負荷となる(図1.3.1D)。この運動では狭い範囲で運動することが可能なため、先行研究において多く用いられたが、陸上での歩行動作とは著しく異なる運動であるため、HOWIの特性について検討するための基礎的実験には不向きと思われる。

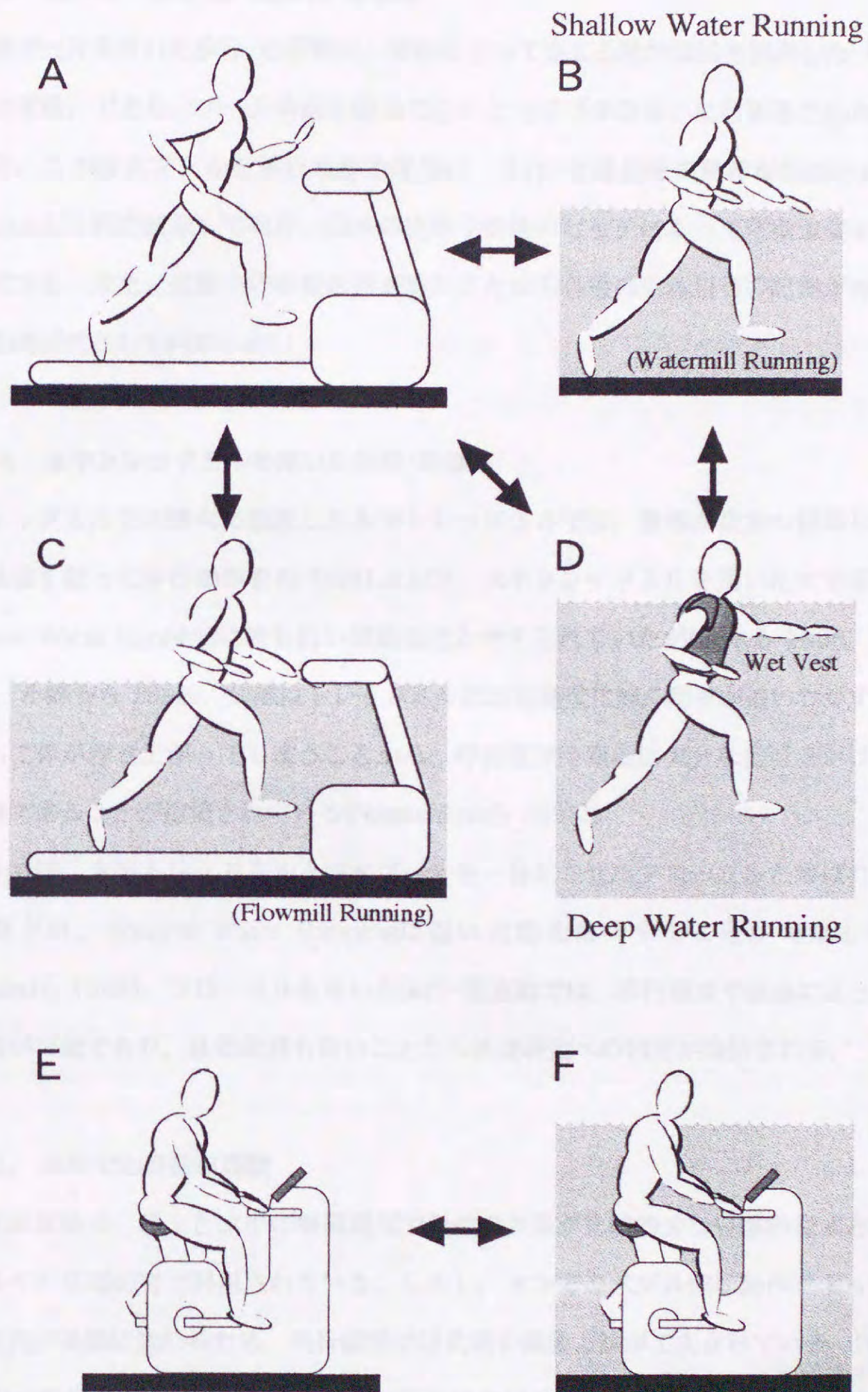


Fig. 1.3.1 Experimental systems for comparison of physiological responses between exercise on land and in water. Schematic illustrations represent treadmill running on land (A) and in water (C), shallow water running (B), deep water running (D), and bicycle exercise on land (E) and in water (F).

1.3.3. 流水プールを用いた歩行・走運動

流水プールを用いた歩行・走運動は、流水によって生じる粘性抵抗を利用した「その場駆け足運動」であり、プールの底を蹴ることによって「その場」に留まるための推進力を得る。この流水プールを用いた水中運動は、歩行・走運動時の動作がShallow Water Runningと比較的類似しており、流水の速度や動作のピッチによって運動強度の調節が可能である。また、運動中の移動範囲が狭いことから各種の生体信号の記録が容易であり、基礎研究として利用し易い。

1.3.4. 水中トレッドミルを用いた歩行・走運動

トレッドミルを水槽内に設置した水中トレッドミルでは、身体が後方へ移動しないように床面を蹴って歩行動作を行う(図1.3.1C)。水中トレッドミルを用いた水中運動は、Shallow Water Runningに最も近い運動様式と考えられていたが(藤本ら 1996, 宮本ら 1994, 小野寺ら 1993), 実際はトレッドミルの回転速度に脚の動きが追いつかず、浮力によって体が浮き上がってしまうことから、呼吸循環系機能に十分な負荷をかけることが困難であることが指摘されている(Nagashimaら 1995)。

近年では、水中トレッドミルと流水プールを一体化させたフローミルと呼ばれる装置が開発され、Shallow Water Runningに近い運動を負荷することが可能となった(Shimizuら 1998)。フローミルを用いた歩行・走運動では、歩行速度や流速によって負荷の調節が可能であり、移動範囲も狭いことから基礎研究への利用が期待される。

1.3.5. 水中での自転車運動

自転車運動は、陸上と水中の両環境間で動作の差異が比較的少ない運動様式と考えられ、多くの基礎研究で利用されている。しかし、水中でのペダル回転動作によって水の粘性抵抗が過剰に加わるため、先行研究では負荷の調節方法が工夫されている。Periniら(1998)の報告では、60回/分のペダル回転数における水の粘性抵抗が25Wに相当することを予備実験から求め、この過負荷分を差し引いた負荷でペダル運動を行っている。しかし、その他の先行研究では、ペダル回転数の増減によって負荷が調節されており、動作のリズム変化による生体への影響が指摘される。

1.3.6. 特殊な水中運動

先行研究で用いられた多くの運動負荷方法では、陸上と水中で運動時の動作やリズムの差が大きく、生体応答の変化にHOWI以外の要因が影響する可能性が考えられる。運動時の生体応答に対するHOWIの影響について、より厳密な比較を行うためには、陸上と水中で全く同一の運動を行う必要がある。この条件を満たす運動様式としては、動作を伴わない等尺性運動を行う方法(Fujisawaら 1996)や、水面上で腕運動を行う方法(HayashiとYoshida 1999)などが考えられる(図1.3.2)。これらの運動では、負荷や動作がHOWIによって影響を受けることがなく、運動中に観察される生体応答の差異はHOWIによって惹起されたと解釈することができる。

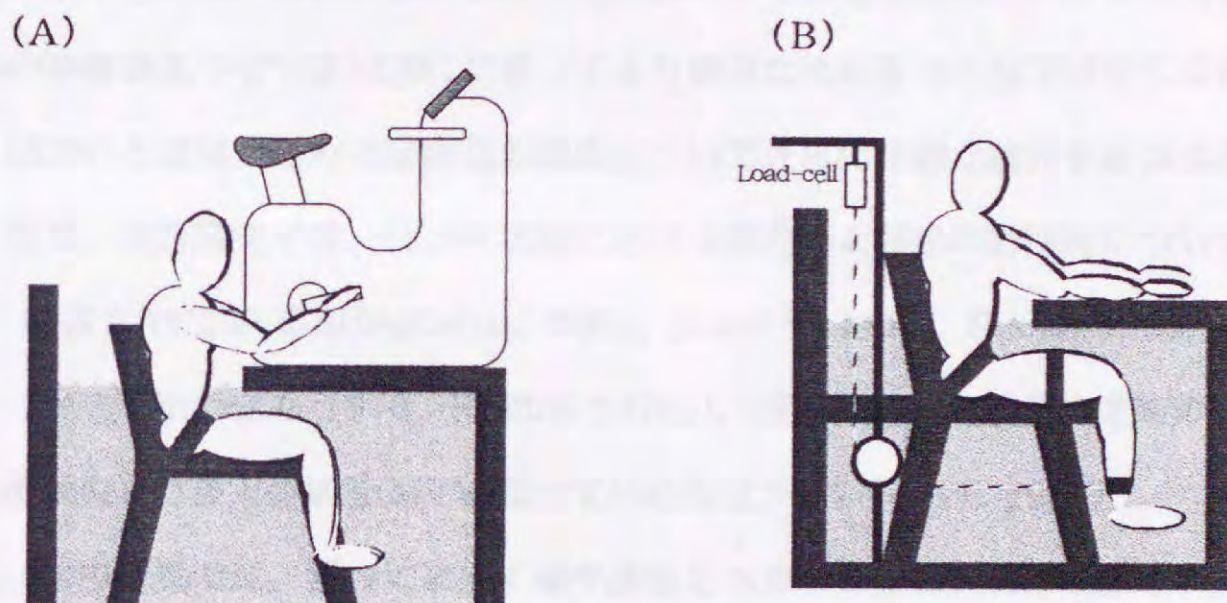


Fig. 1.3.2 Experimental systems for comparison of physiological responses between exercise on land and in water. Schematic illustrations represent arm-cranking exercise in water (A) and isometric knee extension exercise in water (B).

第4章 先行研究の問題点と本研究の目的

1.4.1. 先行研究における問題点

HOWI時には、静水圧によって毛細血管での限外濾過圧が減少し、膠質浸透圧による細胞内液の血管内流入の促進によって、浸水20~40分をピークに血漿量が増加する(Greenleafら 1983, Krasney 1996)。従って、各種の血液成分など血漿量の変化に影響される生理指標を比較する場合には、データ採取時までの浸水時間を規定する必要がある。また、HOWI時には、運動負荷に対する酸素摂取量($\dot{V}O_2$)増加応答の時定数が延長

する可能性が指摘されており(HayashiとYoshida 1999), $\dot{V}O_2$ を基準に各種の生体応答を比較する場合, 短時間のステップ負荷法は好ましくない. 運動強度と血液成分の関係を水中運動時に検討した先行研究の多くでは, 3~6分のステップ負荷法を用いており, その時の運動強度は $\dot{V}O_2$ によって規定されている(Christieら 1990, Connellyら 1990, Nagashimaら 1995, Sheldahlら 1992). 従って, これらの先行研究によって得られたデータは, 各運動強度において浸水時間を規定して再検討し直す必要がある.

HOWI 環境では, 胸腔内での血液貯留によって肺のコンプライアンスが低下するため(Agostoniら 1966, Collinsら 1973, Hongら 1960, 1969, Koubenecら 1978, 図1.2.5), 水中運動時にはHOWIに伴う肺機能の低下が運動制限因子となる可能性が考えられる. 水中運動は, 湿度が高い環境での運動として喘息患者などに好まれているが, これらの肺機能低下者ではHOWIに伴ってより顕著な換気能力の低下が生じる可能性があり, HOWIと換気亢進時の肺機能の関係についてさらに詳細な検討を進める必要性が感じられる. 先行研究では, HOWI環境における静的および動的肺機能についての知見が多く報告されているが(Agostoni 1966, Bondiら 1976, Buono 1983, Hongら 1969, 1960, Prefautら 1976, Rischら 1978a), 運動に伴った換気亢進時の呼吸様式と比較的類似した最大換気量(MVV)についての検討は少ない(木村ら 1997).

一方, 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して高齢者における人気が高まっている(堀田ら 1993, 1994, 武藤 1988). しかし, HOWI環境は中心循環系において容量負荷を増加させるため, 血管コンプライアンスの低下した高齢者では, 運動時における心臓血管系への負荷が増加する可能性が考えられる. とくに等尺性運動は, 活動筋内圧の上昇によって末梢血管抵抗の増加を生じ, 障害発生のリスクを高める危険性が考えられる. 一方, HOWI時には心臓交感神経活動の減弱化および迷走神経活動の賦活化(木住野と松田 1997, Miwaら 1996b)や, 各種の昇圧性ホルモンの分泌抑制(Connellyら 1990, Krasney 1996, Nagashimaら 1995, Sheldahlら 1992, 図1.2.2)が観察され, 運動に伴う血圧上昇が減弱化される可能性が示唆されている. 中高年齢者を対象とした水中運動の安全性を検証する上で, とくに等尺性運動時の血圧応答に及ぼすHOWIの影響について詳細な知見を得ることは, 早急に行われるべき重要課題と考えられる.

また, 一般のプールではトレッドミルや自転車エルゴメータなどの負荷装置を用いる

ことは困難であり、水中運動時に生体負担度やエネルギー消費量を把握することは容易ではない。近年では、水中でも測定可能なHR記録装置を利用する方法が期待されており、ACSMの「運動処方指針」(Pateら 1991)では、水泳運動時の生体負担度を把握する際に考慮すべき点として、平均20(5~50)拍/分の徐脈反射について記されている。仰臥位への姿勢変化や顔面浸水を伴わないHOWI時にも徐脈傾向が観察されることから、水中運動時にもHOWIによって惹起される徐脈反射について考慮する必要があると思われる。しかし、この頸下浸水によって生じる徐脈反射(Water Immersion-induced Bradycardia: WIB)の程度は報告によって必ずしも一致している訳ではなく、運動とWIBとの関係については不明な点が多い(Christieら 1990, Connellyら 1990, KameとPendergast 1995, Nagashimaら 1995, Periniら 1998, Sheldahlら 1984)。

この理由は定かでないが、要因の一つとして陸上と水中における運動様式の差異が考えられる。先行研究において用いられた運動負荷方法では、陸上と水中で運動時の動作やリズムの差が大きく、生体応答の変化にHOWI以外の要因が影響する可能性が考えられる。とくに循環系の調節においては姿勢変化や筋ポンプのリズム変化など、動作の微妙な変化によって影響を受ける可能性があることから、可能な限り陸上と同じ運動を負荷することによってHOWI環境の影響についての検討を行う必要がある。この条件を満たす運動負荷方法としては、HOWI時に水面上で運動を行う方法(HayashiとYoshida 1999, 図1.3.2A)や、動作を伴わない等尺性運動を行う方法(Fujisawaら 1996, 図1.3.2B)が知られているが、報告も少なく未だ十分な検討は行われていない。

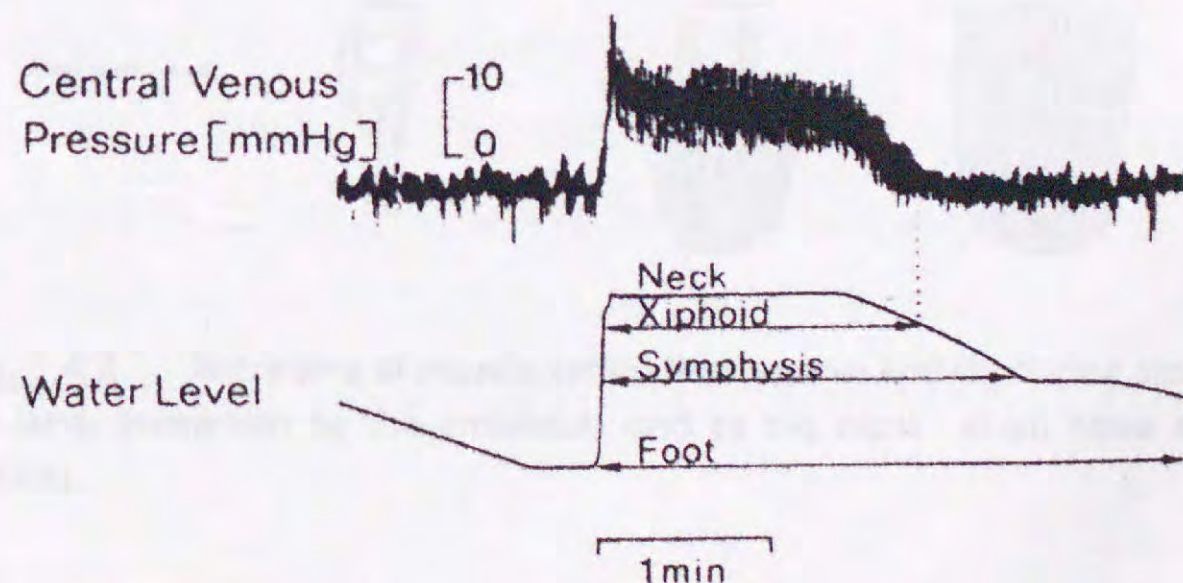


Fig. 1.4.1 Recording of overshoot phenomenon in central venous pressure with rapid head-out water immersion. From Risch et al. (1978).

一方、水中運動を行う場合には、入水・出水に伴って急速な静脈還流の増加とその消失が生じることから、心臓血管系に対して様々なストレスが加わる可能性が考えられる。急速入水時には、一過性に中心静脈圧が上昇し、Overshoot現象が観察されることから(Rischら 1978b, 図1.4.1), 動脈血管系においても一過性に過負荷が生じる可能性が考えられる。動脈血圧の急速な上昇は、血管コンプライアンスの低下や減圧反射の減弱化が指摘される高齢者では、脳血管系での負荷増大を惹起する可能性があることから、その機序について詳細な検討を行う必要がある。

また、HOWI 中は心肺容量受容器反射によって筋交感神経活動が減弱化され、末梢血管の緊張は低下することが知られている(Echtら 1974, Krasney 1996, 美和ら 1993, 図1.4.2)。従って、急速出水時には交感神経活動による血管収縮反応の遅れによって、一過性に下肢での過度な血液貯留が生じ、起立耐性が低下する可能性が考えられる。とくに高齢者では、圧受容器反射の感受性が減弱化する可能性が指摘されることから、出水後の循環動態についてより詳細な検討を行う必要性が感じられる。

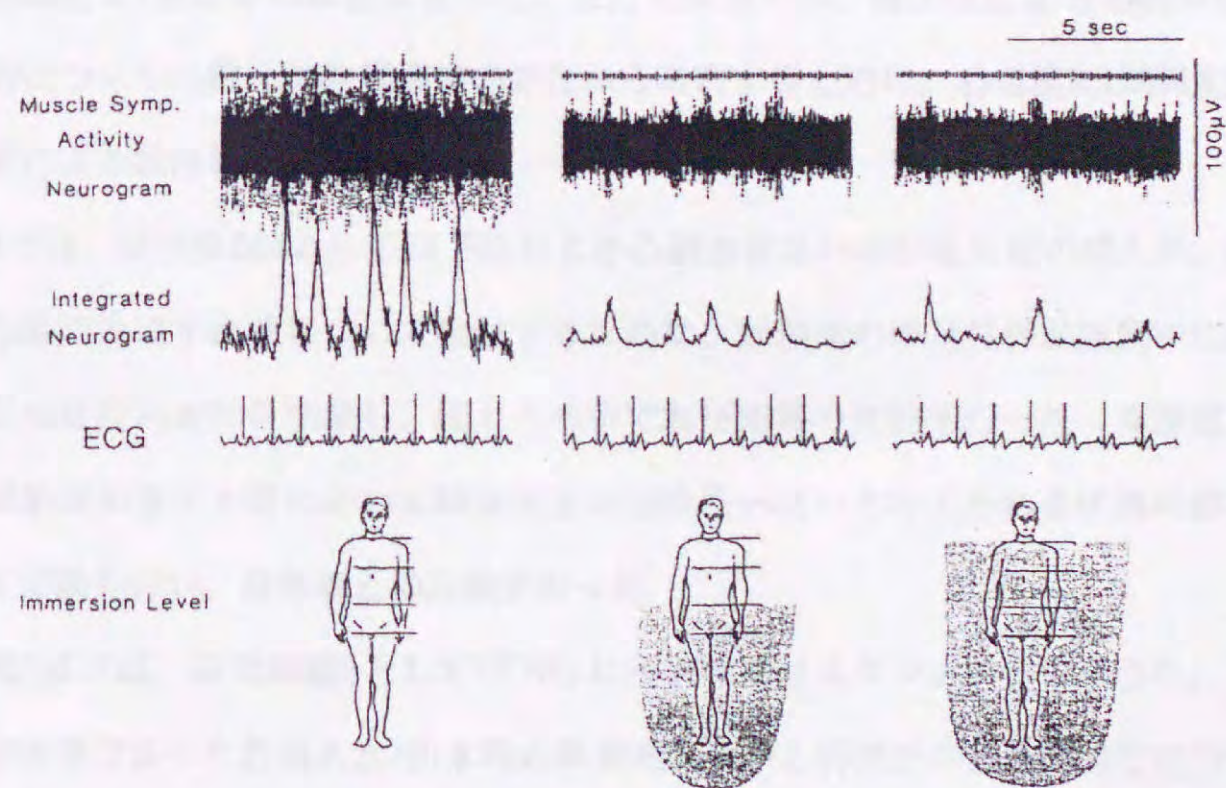


Fig. 1.4.2 Recording of muscle sympathetic nerve activity during standing on land, immersion to the umbilicus, and to the neck. From Miwa et al. (1993).

1.4.2. 本研究の目的と論文の構成

本研究では、上記の問題を解決することを目的として以下の5つの研究課題を遂行し、

第Ⅱ部の各章でそれぞれの研究課題の成果について報告する。

第1章では、研究課題1として一般のプールで行われている水中運動に近い運動様式を用いて実験を行い、呼吸循環系機能と血中乳酸およびカテコールアミン濃度の変化から水中運動の特性について検討を行った。本課題では陸上と水中において比較的長時間(30分間)の漸増負荷および定常負荷運動を行い、静水圧による細胞内代謝産物の血管内への移動が最も顕著となる条件で生体応答の比較を行った。

研究課題1の結果、水中運動時の換気応答において呼吸数の増加を伴った換気量の増大が惹起され、呼吸様式が浅く速い呼吸へと変化する傾向が観察された。そこで第2章では、研究課題2としてHOWI環境において動的肺機能および最大換気量(MVV)を測定し、換気亢進時の呼吸様式に与えるHOWIの影響について検討を行った。

一方、研究課題1において、HOWIは運動時のHR応答に影響を及ぼし、低強度運動時のHRがHOWIによって低値となる傾向が観察された。そこで第3章では、研究課題3としてHOWI中に水面上において腕運動を負荷し、陸上と水中で全く同一の運動条件において運動強度とHR応答の比較を行った。また本課題では、HOWIによる運動中のHR減少の要因について心臓自律神経機能の変化から考察するために、心電図RR間隔変動の周波数解析による検討を行った。

第4章では、研究課題4としてHOWIによる心臓血管系への容量負荷の増大が、運動時の血圧応答に及ぼす影響について検討するために、膝関節の等尺性伸展運動中に指先で動脈血圧の経時的変化を記録し、陸上と水中で血圧応答の比較を行った。本課題では、とくに運動時の血圧上昇において障害発生の危険性が高いと考えられる中高年齢者を対象として実験を行い、若年者との比較を行った。

また第5章では、研究課題5としてHOWIに起因するリスクファクターのうち、ヒトでの検討が困難であった急速入水・出水時の動脈血圧と中心静脈圧の経時的変化について、麻酔下ラットを用いた観血的モデル実験によって検討し、入水・出水に伴う急速な容量負荷の増大とその消失が全身血圧とその調節に及ぼす影響について考察を行った。

第1章

研究課題1：水中歩行・走運動時の呼吸循環機能と血中乳酸およびカテコールアミン濃度 の変化－陸上歩行・走運動との比較－

2.1.1. 緒言

水中での歩行・走運動は膝や腰などへの負担が少なく、高齢者や肥満者などの低体力者に適した運動として推奨されている。しかし、水中では浮力や静水圧、粘性、水温など種々の物理特性が作用し、生体は陸上と異なる影響を受けることから(Choukrounら 1989, FarhiとLinnarsson 1977, 小野寺ら 1993), 頸下浸水(HOWI)に伴う生理機能の変化について様々な研究が行われている。

HOWIでは、下肢の静脈血管系から静水圧によって血液が押し上げられ、胸腔内に流れ込む静脈還流が増加する(Prefautら 1976)。この静脈還流の増加によって心房や肺の容量受容器反射や動脈圧受容器反射が惹起され、心拍数(HR)は減少傾向を示す(Choukrounら 1989, FarhiとLinnarsson 1977, Gabrielsenら 1993, Krasney 1996, Yoshinoら 1988)。一方、運動時には負荷の増加に伴って心臓副交感神経活動の減弱化や心臓交感神経活動の賦活化が惹起され、HRは増加する(RowellとO'Leary 1990, 斉藤 1996)ことから、水中運動時のHRは、運動による増加作用とHOWIによる減少作用の相互作用によって、陸上運動時とは異なる応答を示すことが予想される。また、HOWI時には静水圧による胸郭壁の圧迫や、静脈還流の増加による肺毛細血管内での血液貯留(Prefautら 1976)によって肺活量や努力性肺活量などの肺機能が低下する(宮本ら 1994, Prefautら 1976)。

そこで本研究では、一般のプールを利用して広く行われている水中歩行・走運動時の生理機能変化について考察することを目的として、それと比較的類似した運動様式である流水プールを用いた「その場駆け足運動」を負荷し、その特徴をHR応答、呼気ガス分析値、血中乳酸(bLA)およびカテコールアミン濃度の変化から明らかにすることを試みた。

2.1.2. 方法

A. 対象

被験者は年齢 23.5 ± 1.2 (平均 \pm SD)歳、身長 171.9 ± 7.6 cm、体重 66.0 ± 8.2 kgの健康

成人男性8名であった。被験者は全員、運動部に所属した経験があり、現在、週2日以上
の運動習慣を持つ者であった。各被験者は予め実験の目的、内容などについて詳しく説
明を受けた後、任意に本実験へ参加した。

B. 実験方法

実験は前日の夕食後、10時間以上絶食した9:00~13:00の間に行った。実験時の室温
は $25.1 \pm 2.2^\circ\text{C}$ 、水温は $30.3 \pm 0.7^\circ\text{C}$ であった。被験者には30分間の座位安静を維持させ
た後、肘正中皮静脈より採血を行った。被験者の安静状態を確認した後、陸上および水
中において立位負荷または各種強度での運動負荷を30分間行った。負荷中には、呼気ガ
ス測定(Senser Medics 2900, 日本光電)および心電図記録(Life Scope 6, 日本光電)を
経時的に行った。また、各負荷終了直後および回復30分目に採血を行った。

陸上および水中での漸増負荷運動時のプロトコールは、予備実験により各被験者とも
概ね30分間でExhaustionに達するように設定した(表2.1.1)。陸上運動にはトレッドミ
ルを用い、走スピードと傾斜によって負荷強度を調節した。水中運動は流水プール
(AQUAGYM TPS-5020, 石川島播磨重工業)を用い、剣状突起位までのHOWI状態で
「その場駆け足運動」を負荷した。運動中は水面上での腕振り動作を許可したが、水掻
き動作は行わないように指示した。負荷強度は流水プールの流速と1分間の歩数(ピッチ)
によって調節した。

Table 2.1.1 Incremental exercise protocols during walking and running
exercise on land and in water

time	on land		in water	
	speed	grade	water flow	pitch
0~ 5 min	60 m/min	0 %	0.05 m/sec~ (+0.05 m/min)	60 steps/min
5~10	80	0	0.30~ (+0.05 m/min)	60
10~15	100	0	0.50	70~ (+10 steps/min)
15~20	120~ (+20 m/min)	0	0.50	120~ (+10 steps/min)
20~25	240	0~ (+2 %/min)	0.60~ (+0.10 m/min)	160
25~30	260	6~ (+2 %/min)	1.00	170~ (+10 steps/min)

一方、陸上および水中での定常負荷運動は、両環境下とも陸上漸増負荷運動時に得られた最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)を基準に負荷設定を行い、その約40%(低強度)および60%(中強度)の運動をそれぞれ30分間負荷した。運動負荷中は呼気ガス分析値を経時的にモニターし、予め設定された酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を示すように負荷を微調節した。さらに運動負荷実験の対照実験として、陸上および水中において30分間の立位姿勢を維持させ、運動時と同様の測定を行った。

実験は1日1種目とし、1週間以上の間隔を置いて合計8種類の負荷を行った。実験の順序は、初めに陸上での漸増負荷運動によって $\dot{V}O_{2max}$ を求め、その後、他の種目をランダムに行った。

C. 血液成分測定項目および測定方法

血液成分としてbLAおよび血漿カテコールアミン濃度を測定した。bLAは採血後、全血を除蛋白処理・遠心分離し、凍結保存(-20℃)した後、酵素法(ペーリンガー)を用いて測定した。また、血漿カテコールアミン濃度は採血後、血漿を凍結保存(-80℃)し、後日HPLC-トリヒドロキシインドール(THI)法によって血漿アドレナリン濃度(pAd)および血漿ノルアドレナリン濃度(pNorad)を測定した。

D. 実験結果の統計処理方法

各測定値の変化が、測定条件(陸上vs. 水中)および運動強度の変化に依存したものが否かの検定には、重複測定法による二元配置分散分析を用いた。各運動強度における測定条件間の比較にはFisherのPLSD法を用い、いずれも確率水準5%未満で有意性があると判断した。また、bLAおよび血漿カテコールアミン濃度の検定には、対応のある場合のStudentのt検定を用い、実測値を対数変換して統計資料に用いた。

2.1.3. 研究結果

A. $\dot{V}O_2$ および $\% \dot{V}O_{2max}$ の比較

立位負荷および低、中強度運動負荷時の $\dot{V}O_2$ および $\% \dot{V}O_{2max}$ は、陸上(それぞれ $298 \pm 76 \text{ ml/min}$: $7.7 \pm 1.6 \%$, 1425 ± 191 : 37.2 ± 2.8 , 2173 ± 290 : 56.7 ± 3.7)と水中(それぞれ $328 \pm 57 \text{ ml/min}$: $8.5 \pm 1.1 \%$, 1412 ± 184 : 36.8 ± 2.5 , 2220 ± 287 : 58.0)

±4.1)で差はみられなかったが、漸増負荷運動によって得られた $\dot{V}O_{2max}$ は水中(3350±396 ml/min)で有意な低値(p<0.001)となり、陸上時(3825±340 ml/min)の86.5±8.2%に相当した(表2.1.2).

Table 2.1.2 Cardiopulmonary data at maximal exercises in incremental protocols on land and in water

	on land	in water
$\dot{V}O_2$ (ml/min)	3825±340	3350±396 ***
$\dot{V}E$ (l/min)	135.3±19.9	122.5±17.9 ***
RER	1.15±0.04	1.14±0.08
$\dot{V}E/\dot{V}O_2$	35.3±3.2	36.6±2.8 *
TV (l/ breath)	2.42±0.28	2.04±0.48 **
RR (breaths/min)	56.3±7.5	63.0±18.0 *
HR (beats/min)	191.4±7.2	181.1±9.6 ***
O ₂ Pulse (ml/beat)	20.8±1.2	18.6±2.0 **

Mean±SD. Significant differences between on land and in water represent, "*: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001".

B. HRおよび酸素脈の比較

陸上および水中でのHRは、立位負荷および低強度運動負荷時に水中で有意(両者ともp<0.01)に減少したが、中強度運動時には両環境間に差はみられなかった(図2.1.1Ba)。一方、漸増負荷運動時に得られた最大心拍数(HRmax)は水中で減少し、陸上との間に有意差がみられた(p<0.001)。漸増負荷運動中のHRを各負荷強度ごとに比較するために、 $\% \dot{V}O_{2max}$ によって4つに区分(<30%, 30≤~<50%, 50≤~<70%, 70%≤)して比較したところ、30% $\dot{V}O_{2max}$ 以下で陸上より水中に有意な低値がみられた。しかし、負荷強度の増加に伴って両環境間の差が僅少化し、高強度負荷では差が無くなる傾向を示した(図2.1.1Aa)。

立位負荷, 低および中強度運動負荷時の酸素脈(O₂Pulse)は, 殆どの被験者(それぞれ立位6名, 低強度8名および中強度6名)が陸上より水中で増加したが, 両環境間に有意差はみられなかった(図2.1.1Bb). 漸増負荷運動時のO₂Pulseは, 陸上より水中で軽度増加する傾向がみられたが, 殆どの運動強度で両環境間に有意差は認められなかった(図2.1.1Ab). また, 最大運動時のO₂Pulseは陸上より水中で減少し, 両環境間に有意差がみられた(p<0.01)(表2.1.2, 図2.1.1Bb).

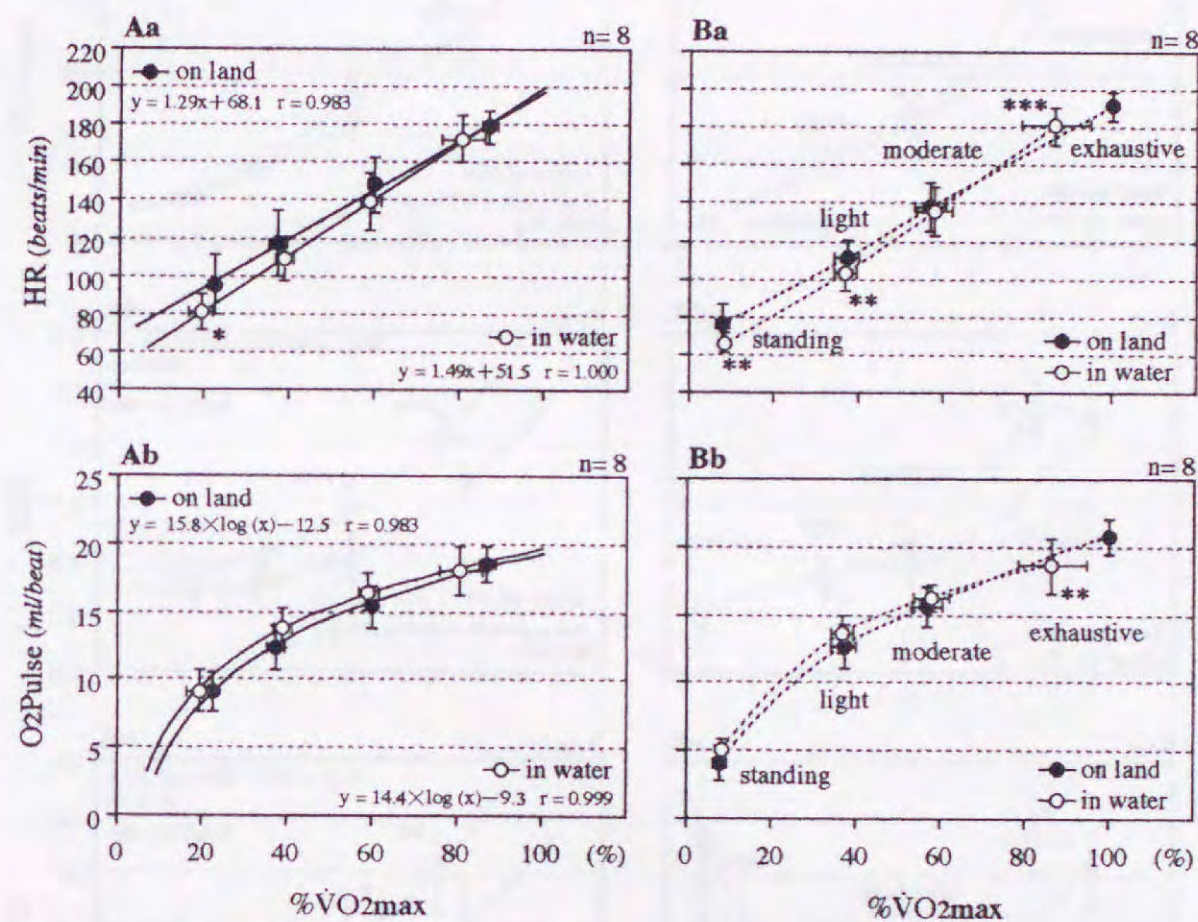


Fig. 2.1.1 HR(a) and O₂Pulse(b) responses during incremental exercise "A" and standing, steady states and at the end of exhaustive exercise "B". Symbols and bars represent means \pm SD. Significant differences between on land and in water represent, *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001".

C. 換気量, 呼吸交換比および酸素に対する換気当量の比較

立位負荷および低強度運動負荷時の換気量($\dot{V}E$)には, 陸上と水中で有意差はみられなかったが, 中強度運動負荷時に水中で増加し, 陸上との間に有意差がみられた(p<0.05)(図2.1.2Ba). 漸増負荷運動時の $\dot{V}E$ は, 負荷の増加に伴って陸上より水中で高値となる傾向を示したが有意差は認められなかった(図2.1.2Aa). しかし, 最大運動時の $\dot{V}E$ は陸上より水中で有意に低値となった(p<0.001)(表2.1.2, 図2.1.2Ba).

また, 立位負荷, 低および中強度運動負荷時の呼吸交換比(RER)は $\dot{V}E$ と同様の傾向を

示し、中強度運動負荷時に陸上より水中で有意な高値となった($p < 0.05$) (図2.1.2Bb). 漸増負荷運動時のRERは、30% $\dot{V}O_{2max}$ 以上において水中で高値となり、その差は高強度運動時により顕著となった(図2.1.2Ab). 最大運動時のRERには陸上と水中で差はみられなかった(表2.1.2, 図2.1.2Bb).

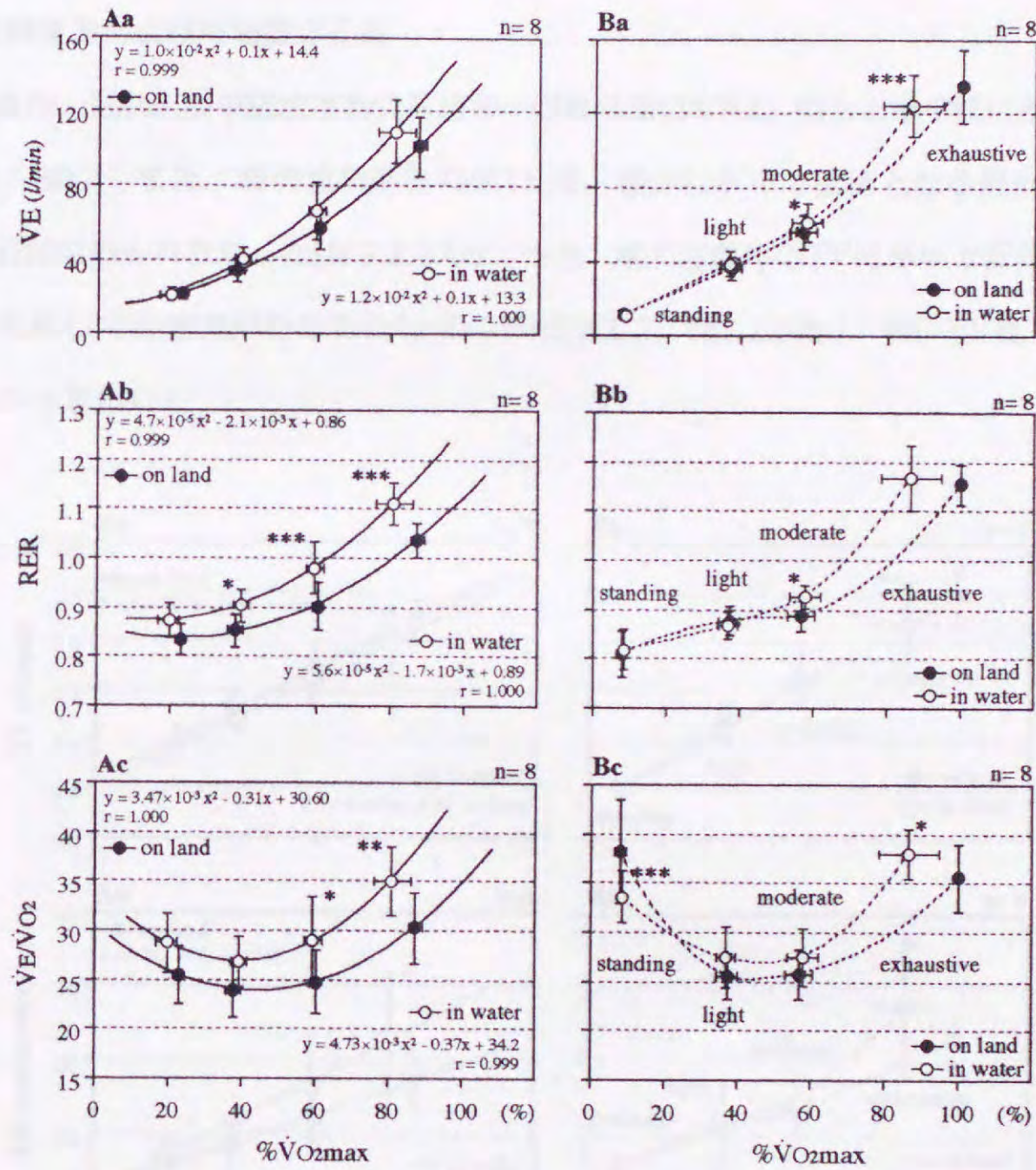


Fig. 2.1.2 $\dot{V}E$ (a), RER(b), and $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ (c) responses during incremental exercise "A" and standing, steady states and at the end of exhaustive exercise "B". Symbols and bars represent means \pm SD. Significant differences between on land and in water represent, "*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$ ".

次に、立位負荷時の酸素に対する換気当量($\dot{V}E/\dot{V}O_2$)は陸上より水中で低値となり、両環境間に有意差がみられた($p < 0.001$) (図2.1.2Bc). 低および中強度運動負荷時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ では、両者とも7名の被験者に陸上より水中で高値がみられたが、両環境間に有

意差は認められなかった。漸増負荷運動時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ は下に凸型の二次関数的変化を示し、50% $\dot{V}O_{2max}$ 以上の強度において陸上より水中で有意な高値となった($p<0.05$)(図2.1.2Ac)。また、最大運動時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ は水中で高値となり、陸上との間に有意差がみられた($p<0.05$)(表2.1.2, 図2.1.2Bc)。

D. 一回換気量および呼吸数の比較

立位負荷、低および中強度運動負荷時の一回換気量(TV)は、陸上と水中間に差はなかった(図2.1.3Ba)。また、漸増負荷運動時のTVは、僅かに水中で低値となる傾向を示したが有意差は認められなかった(図2.1.3Aa)。一方、最大運動時のTVは水中で低値となり、陸上と比較して有意差がみられた($p<0.01$)(表2.1.2, 図2.1.3Ba)。尚、TVは $\dot{V}E$ と呼吸数(RR)から算出した。

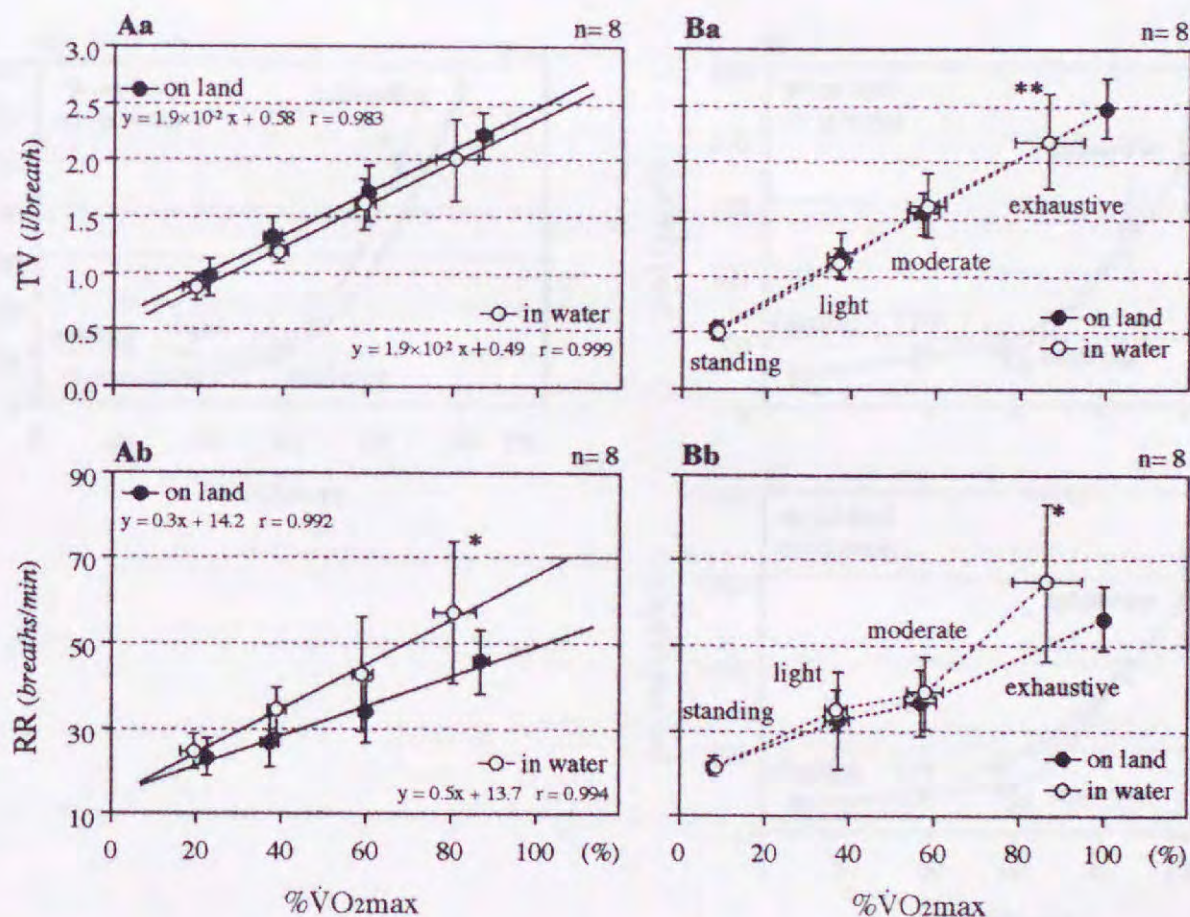


Fig. 2.1.3 TV(a) and RR(b) responses during incremental exercise "A" and standing, steady states and at the end of exhaustive exercise "B". Symbols and bars represent means \pm SD. Significant differences between on land and in water represent, "*: $p<0.05$, **: $p<0.01$, ***: $p<0.001$ ".

一方、立位負荷、低および中強度運動負荷時のRRには、陸上と水中で差は認められなかった(図2.1.3Bb)。漸増負荷運動時のRRは水中で高値となる傾向を示し、負荷強度の

増加に伴って陸上との差が顕著となった(図2.1.3Ab). また, 最大運動時のRRは水中で高値となり, 陸上と比較して有意差がみられた($p < 0.05$)(表2.1.2, 図2.1.3Bb).

E. bLAおよび血漿カテコールアミン濃度の比較

次に, 運動もしくは立位負荷直後のbLAおよび血漿カテコールアミン濃度(pAd, pNorad)の変化を図2.1.4に示す. bLAは陸上および水中の両環境下とも負荷の増加に伴って増加し, 陸上では中強度以上, 水中では低強度以上の負荷強度において, それぞれの安静値から有意に増加した(図2.1.4A). 立位負荷後のbLAには陸上と水中で差はみられなかったが, 低および中強度運動負荷後のbLAは水中で高値となり, 陸上と比較して有意差がみられた($p < 0.05$). しかし, 漸増負荷による最大運動後のbLAは陸上より水中で低値となり, 両環境間に有意差($p < 0.01$)がみられた.

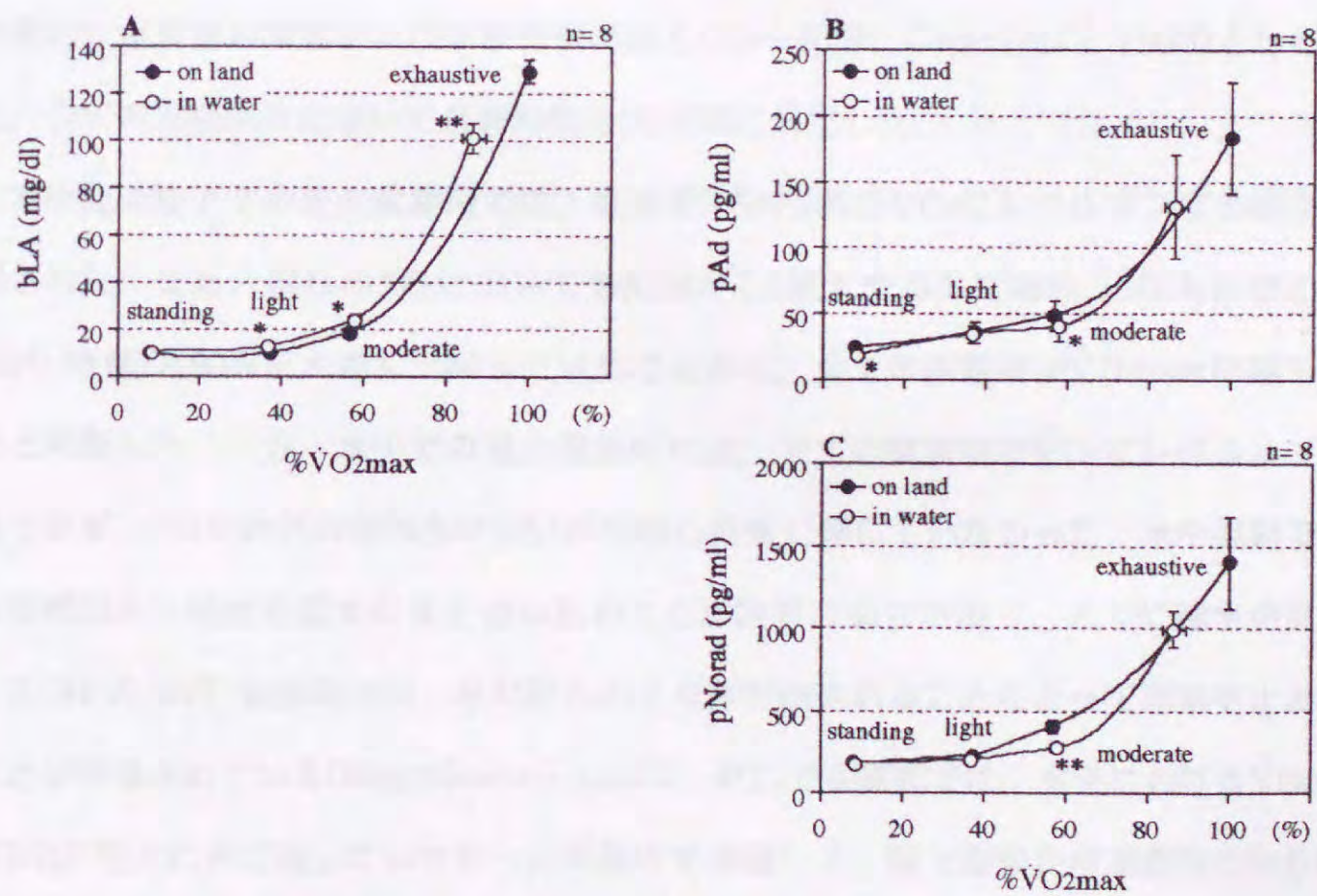


Fig. 2.1.4 bLA(a), pAd(b), and pNorad(c) responses during exercise on land and in water. Symbols and bars represent means \pm SE. Significant differences between on land and in water represent, "*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$ ".

一方, 最大運動直後のpAdおよびpNoradは陸上と比較して水中で低値となり(図2.1.4B, C), この傾向は運動後30分目においても観察された. 運動負荷後の血漿カテコ

ールアミン濃度は、水中においてより低値となる傾向がみられ、中等度運動後のpAdおよびpNoradに両環境間で有意差($p < 0.05$)が認められた。立位姿勢負荷後のpAdおよびpNoradは水中において低下する傾向が観察され、陸上と比較してpAdに有意差($p < 0.05$)が認められた。

2.1.4. 考察

本研究の目的は、一般のプールを利用して広く行われている水中歩行・走運動時の生理機能変化について、その特徴をHR応答、呼気ガス分析値、bLAおよび血漿カテコールアミン濃度から明らかにすることであった。そこで本研究では、陸上および水中において漸増負荷法による最大運動、定常負荷法による2種類の強度での最大下運動および立位姿勢維持の合計8種類の負荷を、それぞれの環境において体温へ及ぼす影響が少ない中立温で行った(Christieら 1990, Connellyら 1990, Nagashimaら 1995)。また、HOWI時に特徴的な血漿量の増加および血液希釈が最大(20~40分, Greenleafら 1983)となるように、全ての実験条件において負荷時間を30分間に規定した。

本研究の陸上での最大運動時では、被験者8名中5名の $\dot{V}O_2$ にレベルオフする傾向が観察された。また、残りの3名においてもRERが1.1以上を示しており、HRも目標心拍数($220 - \text{年齢}$) $\times 90\%$ を大きく上回っていたことから、全ての被験者が $\dot{V}O_{2\max}$ に達していたと判断した。一方、水中での最大運動時には、全ての被験者で $\dot{V}O_2$ にレベルオフは観察されず、HRも殆どの者(8名中7名)が目標心拍数に達していなかった。水中運動では呼吸循環器系の機能を最大にまで追い込むことが困難な場合が多く、とくに流水を負荷として用いた歩行・走運動では、足が取られて身体が流されることによって運動中止となることが指摘されている(Nagashimaら 1995)。そこで本研究では、水中における $\dot{V}O_2$ およびHRが最大にまで達していなかった可能性を考慮して、陸上漸増負荷運動時に得られた $\dot{V}O_{2\max}$ を基準に最大下運動の負荷設定を行い、両環境ともその40%(低強度)および60%(中強度)の運動を負荷した。

本研究の結果、漸増負荷運動時のHRは低強度運動時に水中で低値となり、陸上と比較して有意差($p < 0.05$)がみられた。しかし、その差は負荷強度の増加に伴って僅少化し、中強度以上の負荷強度では両環境間に差はみられなかった(図2.1.1Aa)。 $\% \dot{V}O_{2\max}$ とHRの回帰式は、陸上： $y = 1.3x + 68.1$ ($r = 0.98$)、水中： $y = 1.5x + 51.5$ ($r = 1.00$)であった。

先行研究では、陸上と比較して水中運動時のHRが、運動強度に依存せず常に低値を示す(Sheldahlら 1992, SvedenhagとSeeger 1992), 高強度または低強度運動時に水中で低値となる(Christieら 1990, Connellyら 1990, Sheldahlら 1992), 陸上と全く差がない(CraigとDvorak 1969, Hanna 1993, Nagashimaら 1995), など両者の関係に一致した結果は得られていない。そこで各被験者ごとに回帰式を比較したところ、全体の回帰式と同様の傾向(低強度運動時に水中で低下し、負荷強度の増加に伴ってその差が僅少化する傾向)を示した者は3名のみであり、HR応答に個体差がみられた。

一方、立位負荷時、低および中強度の定常負荷運動時および漸増負荷による最大運動時の回帰式(図1Ba)では、陸上 $y=1.3x+64.0$ ($r=0.91$), 水中 $y=1.4x+54.2$ ($r=0.95$)を示し、漸増負荷時とほぼ同様の関係が得られた。また、各個人ごとの比較でも全被験者で一致した傾向が観察された。これは30分間という負荷時間によって呼吸循環器系の機能が定常に達し、負荷に対する生体応答の遅れや運動に対する慣れなどの個体差が僅少化したことによると考えられた。

本研究と同様に、低強度の水中運動時にHRが減少し、負荷強度の増加に伴って陸上との差が僅少化したPeriniら(1998)の報告では、その機序として高強度運動時の循環動態は、HOWIによってあまり大きく影響されない可能性について言及されている。HOWIに伴うHRの減少は、静水圧によって下肢での血液貯留が減少し、静脈還流が増加することによって惹起されると考えられている(Choukrounら 1989, FarhiとLinnarsson 1977, Gabrielsenら 1993, Krasney 1996, Yoshinoら 1988)。一方、下肢の筋活動は筋ポンプ作用によって静脈還流を増加させ、下肢での血液貯留は減少する(Rowell 1983)。従って、低強度運動時には筋ポンプ作用が弱く、陸上運動時の静脈還流は少なかったと考えられ、HOWIに伴う血液シフト作用によって水中運動時のHRはより低値となったと考えられる。また、高強度運動時には、筋ポンプ作用による静脈還流の増加作用が顕著となり、HOWIによる血液シフト作用との差が僅少化することによって、陸上と水中における脚運動時のHRの差が僅少化した可能性が考えられた。

一方、Christieら(1990)は、高強度運動時のHRがHOWIによって有意に減少したことを報告しており、その機序としてHOWIによる交感神経活動の減弱化が、高強度運動時のHR調節においてより強く作用した可能性について言及している。運動時には、副交感神経活動の減弱化および交感神経活動の賦活化によってHRは増加するが、概ね100拍/

分以下の低強度では前者の貢献度が高く、それ以上の強度では後者の働きによってHRは増加する(麻野井 1996, RowellとO'Leary 1990)。また, Connellyら(1990)の報告は, 高強度運動時のpNoradがHOWIによって低値となったことから, Christieら(1990)の仮説を支持している。しかし本研究では, Connellyら(1990)の報告と同様に高強度運動時にHOWIによる血漿カテコールアミン濃度の低下が観察されたにもかかわらず(図2.1.4B, C), Christieら(1990)と異なるHR応答を観察したことから, この仮説を支持することは出来なかった。

この様に, 陸上と水中におけるHR応答に先行研究と異なる結果が得られた原因は定かでないが, 理由の一つとして運動負荷方法の相違が考えられる。Christieら(1990)およびConnellyら(1990)の研究では, 陸上と水中において自転車エルゴメータ運動を行っており, 水中試行時の負荷増加法にペダル回転数の増加を用いているが, 本研究では30分間かけて疲労困憊に追い込むために, 流水プールにおいて特殊な運動プロトコールを用いた(表2.1.1)。運動様式やそのリズムはその時のHR応答に影響を及ぼすことが知られており(Hagbergら 1981, ChavarrenとCalbet 1999), 本研究とChristieら(1990)およびConnellyら(1990)の結果におけるHR応答の差異は, 運動様式やそのプロトコールの差異が影響した可能性が考えられた。

次に, 漸増負荷および定常負荷運動時の O_2Pulse は, 水中で僅かに増加する傾向が観察されたが, 殆どの運動強度において有意差はみられなかった(図2.1.1Ab, Bb)。 O_2Pulse は心拍出量(\dot{Q})との相関が強く, 運動中の \dot{Q} の指標として利用されており(Bhambhaniら 1994), 先行研究では熱希釈法(Christieら 1990)や再呼吸法(Hannaら 1993)によって測定された \dot{Q} が, 陸上よりも水中での運動時に増加した。本研究では, 等しい $\dot{V}O_2$ 時に水中運動時のHRが陸上と比較して低値となり, O_2Pulse は不変もしくは増加傾向を示したことから, 水中運動時に一回拍出量が増加していた可能性が考えられた。

次に, 漸増負荷運動時の $\dot{V}E$ は, 運動強度の増加に伴って陸上より水中で高値となる傾向を示し, 定常負荷時の $\dot{V}E$ は, 中強度運動時に水中で有意な高値となった($p < 0.05$)(図2.1.2Aa, Ba)。運動時の $\dot{V}E$ が水中で増加した理由のひとつとして, 水中運動時に観察されたRERの上昇およびbLAの増加が考えられる。低および中強度の定常負荷運動では, 運動中の $\dot{V}O_2$ に差が認められなかったにも拘わらず, 陸上より水中でbLAが増加した(図2.1.4)。また, 水中運動時のRERが陸上より増加する傾向を示したことから, 水中運動

では無酸素性のエネルギー代謝が強く働いた可能性が考えらる(図2.1.2Ab, Bb). 先行研究でも同様の結果が報告されており(Nagashimaら 1993, SvedenhagとSeeger 1992), その機序としてHOWI 時の水圧が下肢での血流量を減少させ, 筋への酸素供給能が低下した可能性が示唆されている(宮本ら 1994b).

また, 別のbLAの増加機序として, 細胞内代謝産物の血管内への移動が浸水によって促進された可能性が考えられる. 浸水によって身体外部から加わる静水圧は, 毛細血管での限外濾過圧を減少させ, 膠質浸透圧による細胞内液の血管内流入を促進する(Krasney 1996). その結果, 血液中での緩衝作用によってRERの上昇および $\dot{V}E$ の増加を惹起した可能性が考えられる.

以上のことから, 水中運動時には下肢筋群での無酸素性エネルギー代謝の亢進や静水圧による細胞内代謝産物の血管内流入の促進が生じ, その結果, 代謝性アシドーシスの亢進およびその緩衝作用による血中二酸化炭素濃度の上昇によって換気が亢進し, 水中運動時の $\dot{V}E$ が増加した可能性が示された.

次に, $\% \dot{V}O_{2max}$ と $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の関係では, 漸増負荷運動時の回帰式が下に凸型の二次曲線となり, 1名を除く7名の被験者で水中運動時の回帰式が全体的に上方へシフトする傾向が観察された(図2.1.2Ac). この傾向は, 低, 中強度および最大運動時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ にも観察されたが(図2.1.2Bc), 立位負荷時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ は陸上より水中で有意に低値($p < 0.001$)となり, 酸素摂取に対する換気効率の改善が示唆された. $\dot{V}O_2$ が一定の時に $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ が増加するという現象は, この時の $\dot{V}E$ が増加していることを示しており, 水中運動時の $\dot{V}E$ の増加については既に考察した. また, 最大運動時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ は陸上より水中で有意な高値となり, この時のTVは有意に減少し, 反対にRRは有意に増加した(図2.1.3Ba, Bb). HOWI 時には肺内での血液貯留(Guyattら 1965, Arboreliusら 1972, Rischら 1978a)によって, 末梢気道の閉塞および肺呼出機能の低下が惹起され(宮本ら 1994a, Prefautら 1976), その結果, MVVが減少すると報告されている(木村ら 1997). このHOWI によるMVVの減少は, TVの減少およびRRの増加という呼吸様式の変化を伴っており, 本研究の水中最大運動時における呼吸様式の変化と類似している. また, 吸気抵抗を負荷した状態での運動時において, 本研究と同様の呼吸様式が観察されている(D'urzoら 1985). この様にTVの減少およびRRの増加という呼吸様式の変化では, 全換気量に占める解剖学的死腔の割合が増加し, 肺胞換気量が減少することから, 実質的な

ガス交換効率が低下する可能性が示唆される。従って、水中運動時にみられた $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の低下要因として、HOWIによって換気亢進時の呼吸様式が変化し、小さく速い連続呼吸によって肺胞換気量の低下が惹起されたことに起因した可能性が考えられる。

一方、立位負荷時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ は陸上より水中で有意に減少し、運動時とは異なる傾向が観察された(図2.1.2Bc)。この時の呼吸様式を各個人ごとに検討したところ、TVやRRにおいて陸上と水中で差は殆どみられなかったことから、立位浸水時の換気効率の向上は、呼吸様式の変化に起因するとは考えられなかった。先行研究では、HOWI時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ に一致した知見は得られておらず、その時の $\dot{V}E$ および $\dot{V}O_2$ の変化も様々である。ChoukrounとVarene (1990)は、34℃でのHOWI時に $\dot{V}E$ および $\dot{V}O_2$ が軽度に低下し、 \dot{Q} およびSVの増加によって動脈血酸素分圧(PaO₂)が軽度に増加したと報告している。またDerionら(1990)は、35℃で剣状突起位浸水を20分間行ったところ、若年者(20~29歳)ではPaO₂が有意に増加し、肺胞動脈血酸素分圧較差に減少傾向が認められたことから、肺胞でのガス拡散能が改善している可能性を示している。Beginら(1976)、Guyattら(1965)、Choukrounら(1989)も同様の結果を報告しており、本研究で観察されたHOWI時の $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の減少は、肺胞ガス拡散能の亢進によって起こっている可能性が示唆された。

2.1.5. まとめ

陸上および水中において、漸増負荷運動、約40%、60% $\dot{V}O_{2max}$ の定常負荷運動および立位姿勢をそれぞれ30分間負荷したところ、水中では運動負荷によるHRの増加が抑制され、とくに低強度運動時のHRが浸水によって有意に減少した。しかし、その差は負荷強度の増加に伴って僅少化し、高強度運動時には陸上と差がみられなくなった。また、高強度の水中運動ではRERおよびbLAの増加や呼吸様式の変化によって、 $\dot{V}E$ の増加や酸素摂取に対する換気の効率が低下することが示された。

また、換気効率やbLAなどの点からみると、高強度の水中運動は陸上運動と比較して生体負担が増加する可能性があり、水中運動は比較的低い強度で行うのが好ましいと考えられた。しかし、低強度での水中運動では、陸上と比較してより低いHRが観察されたことから、運動中のHRを用いて生体負担度やエネルギー消費量の推定を行う場合には、HOWIによるHRの減少作用について考慮する必要があると考えられた。

第2章

研究課題2： 剣状突起位および頸部位浸水時の最大換気量

2.2.1. 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、水中運動が盛んに取り入れられている(HeynemanとPremo 1992, Miyamotoら 1995). 水泳運動とは異なり、頭部を水面上に維持した水中運動では特別な運動技術を必要とせず、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(堀田ら 1993, 1994, 武藤 1988).

頸下浸水(HOWI)環境では、浮力の他に、静水圧や粘性、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(Choukrounら 1989, FarhiとLinnarsson 1977, 右田ら 1996, 小野寺ら 1993a, 1993b). とくに呼吸器系に対する影響として、静水圧によって胸郭壁や腹腔が圧迫され、吸気時の呼吸筋負荷を増加させることが知られており(Agostoni 1966, Hongら 1960, 1969), より低い強度の運動でも効率よく呼吸筋のトレーニングができることから、高齢者などの肺機能低下者にとって望ましい運動条件と考えられている(藤本ら 1996). しかし、HOWI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(Bondiら 1976, Buono 1983, Prefautら 1976, Rischら 1978a), 比較的高強度の水中運動では、陸上運動時に比べて呼吸器系への負担が増加することによって、運動制限因子となる可能性が考えられる。

これまでの研究(Choukrounら 1989, 宮本ら 1994, MorrisonとTaylor 1990)では、HOWI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肺機能や呼吸様式の変化などに関する知見(Choukrounら 1989)は少なく、水位変化について考察した報告は見当たらない。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わせ、この時の最大換気量(MVV)や呼吸様式がHOWI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、HOWI時の水位は剣状突起位

および頸部位の2条件で行った。

2.2.2. 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見当たらなかった。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

肺機能は, 陸上(25.2 ± 1.2 °C)および水中(34.3 ± 0.2 °C)の中立温環境(Choukrounら1989, 右田ら1996)において, いずれも立位姿勢で測定した。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。肺機能の測定には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), 75%, 50%, 25%FVC時のフロー(それぞれ \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。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回以上実施し, 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, Bonferroni 検定を用いた。また, 陸上立位時からの変化率について各測定項目間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%未満を有意限界とした。

2.2.3. 結果

陸上立位姿勢 (standing on land: STL), 剣状突起位 (water immersion to the xiphoid: WIX) および頸部浸水時 (water immersion to the neck: WIN) の肺機能測定値を表2.2.1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HOWI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2.2.1)。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, 有意差は認められなかった。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。

Table 2.2.1 Pulmonary functions during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN)

	n = 5		
	STL	WIX	WIN
FVC (<i>l</i>)	4.82 ± 0.50	4.51 ± 0.50 (-6.4 ± 2.5%)	4.34 ± 0.49 (-10.0 ± 3.0%)
FEV _{1.0} (<i>l</i>)	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%".

次に, MVV, TV-MVVおよびRR-MVVの変化を図2.2.2に示した。HOWI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との間に有意差が認められた。HOWI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によって軽度に増加する傾向が観察された。

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。

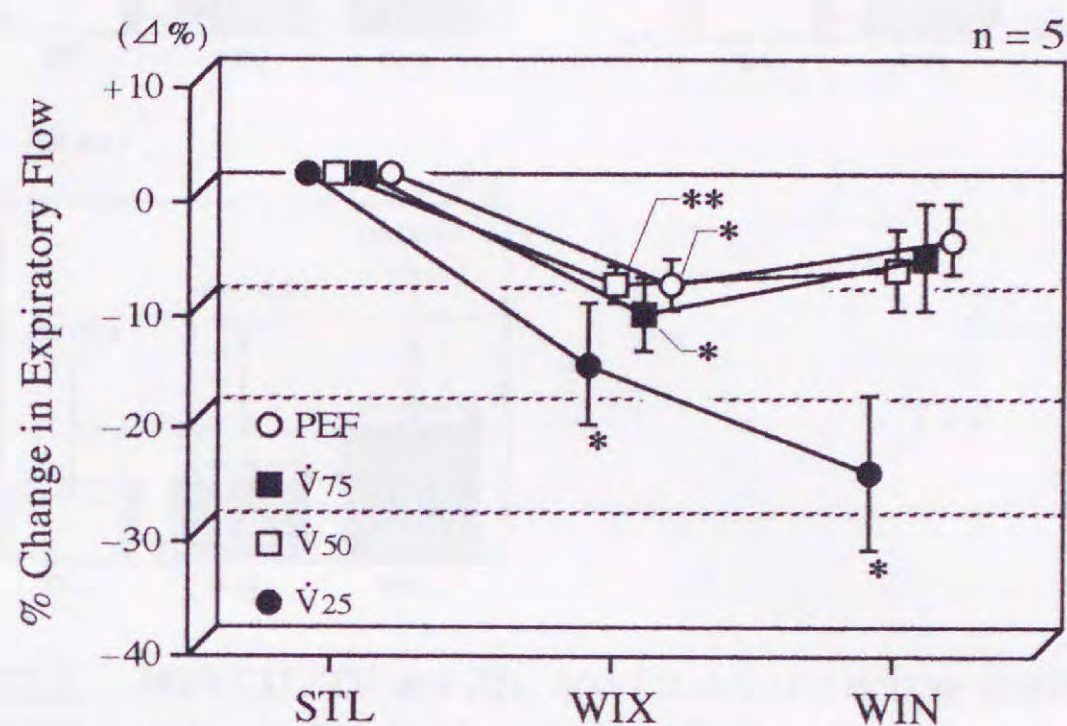


Fig. 2.2.1 % change in expiratory flow (PEF, \dot{V}_{75} , \dot{V}_{50} , \dot{V}_{25}) during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN). " $\Delta\%$ " resers to % change from STL calculated as " $[(\text{in water} - \text{on land})/\text{on land}] \times 100\%$ ". Symbols and bars represent means \pm SE. Significance of differences from STL is shown by, "*: $p<0.05$, **: $p<0.01$, ***: $p<0.001$ ".

2.2.4. 考察

本研究における剣状突起位までの浸水(WIX)時には, STLと比較して各種の肺機能検査値において低下傾向が観察された。しかし, 水位の上昇(WIX \Rightarrow WIN)に伴う変化では, 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, HOWI 時における随意的最大換気運動は, 陸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となり, 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, STL \Rightarrow WIXにおいて観察された変化は水位の上昇(WIX \Rightarrow WIN)によってより顕著となった。

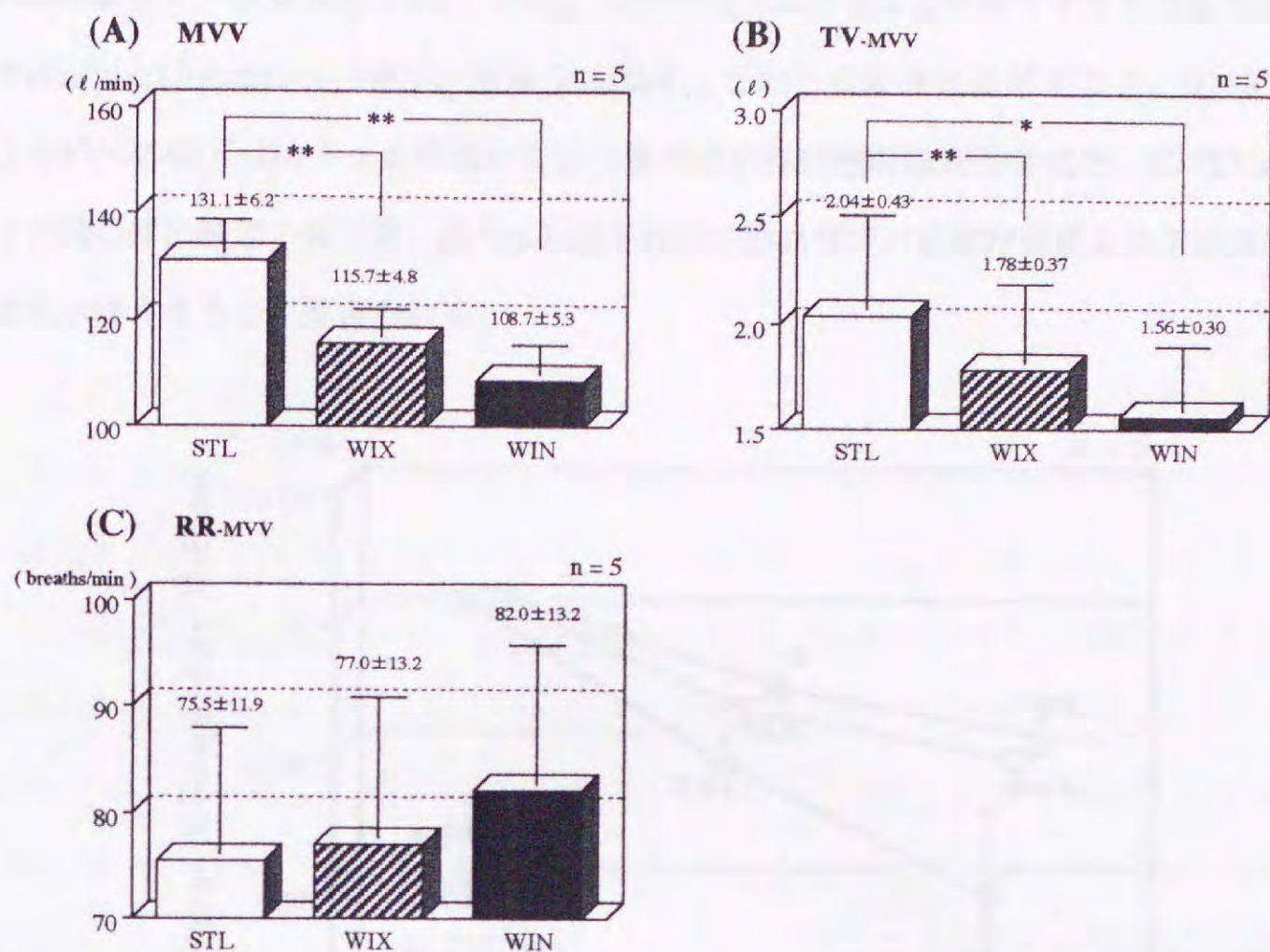


Fig. 2.2.2 MVV(A), TV-mvv (B), and RR-mvv (C) during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN). Columns and bars represent means \pm SE. Values are means \pm SE. Significant differences from STL is shown by, "*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$ ".

A. HOWI 時の肺機能について

HOWI による VC の低下は古くから知られており (Hamilton と Mayo 1944), 主に 2 つの機序が考えられている。その 1 つの説では, HOWI 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て, VC が減少すると考えられている (Agostoni ら 1966, Hong ら 1960, 1969, Reid ら 1986)。もう 1 つの説では, 静水圧によって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 が減少すると考えられている (Bondi ら 1976, Buono 1983, Prefaut ら 1976, Risch ら 1978a)。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 (Guyatt ら 1965, Arborelius ら 1972, Risch ら 1978a)。これによって肺コンプライアンスの低下 (Agostoni ら 1966, Collins ら 1973, Hong ら 1960, 1969, Koubenec ら 1978) や肺毛細血管径の拡大による末梢気道の閉塞 (Buono 1983, Collins ら 1973, Prefaut ら

1976)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(FarhiとLinnarsson 1977, 宮本ら 1994)。これらの知見を総括すると、①HOWI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。

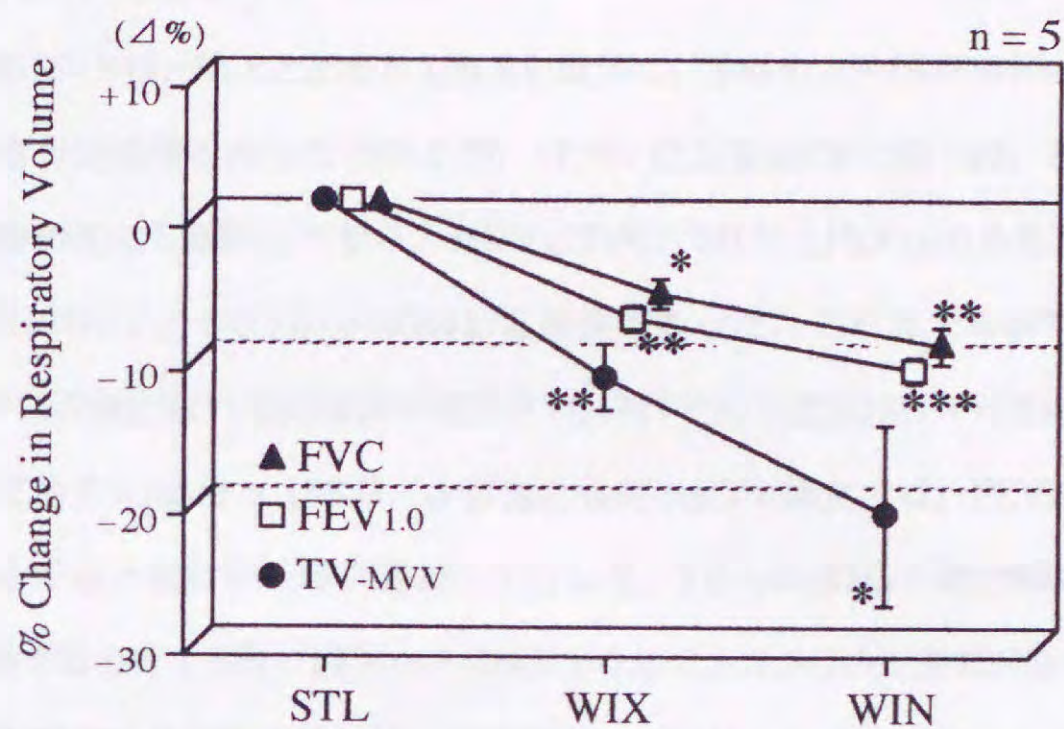


Fig. 2.2.3 % change in expiratory volume (FVC, FEV_{1.0}, TV-mvv) during standing on land(STL) and immersion to the xiphoid(WIX) and to the neck(WIN). Symbols and bars represent means \pm SE. Significant differences from STL is shown by, "*: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001".

B. HOWI 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2.2.1, 図2.2.1, 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(1994)の報告とほぼ一致している。水位の上昇に伴うFVC、FEV_{1.0}および \dot{V}_{25} の著しい低下から、肺内の血液貯留の増加によって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可能性が示唆された(Koubenecら 1978, Prefautら 1976)。また、PEF、 \dot{V}_{75} および \dot{V}_{50} においてWIXからWINへの水位上昇による変化がみられなかった理由として、静水圧による胸郭壁圧迫と横隔膜挙上は肺の呼出機能を向上させる可能性が考えられる(Prefautら 1976)。静水圧による胸郭壁圧迫と横隔膜挙上の作用が弱いWIXでは、肺コンプライ

アンスの低下による呼出機能低下が顕著となり、PEF、 \dot{V}_{75} および \dot{V}_{50} に有意な低下が観察されたが、WINでは胸郭壁圧迫と横隔膜挙上が肺呼出時の呼吸筋の働きを補助することによって、肺コンプライアンスの低下による呼出機能の低下と相殺し合うことによって、WIXからWINへの水位上昇による変化を生じなかった可能性が考えられた。

C. HOWI 時のMVVについて

HOWI 時のMVVは、陸上と比較して有意に低下し、水位の上昇(WIX⇒WIN)によって、その低下はさらに顕著となった(図2.2.2)。HOWI 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ており、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($MVV=FEV_{1.0} \times 40$ など)が算出されている(Carterら 1987)。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。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。従って、FEV_{1.0}が低下するHOWI 時には、呼出機能の制限が一つの要因となってTV-MVVが減少し、結果としてMVVが低下した可能性が考えられる。

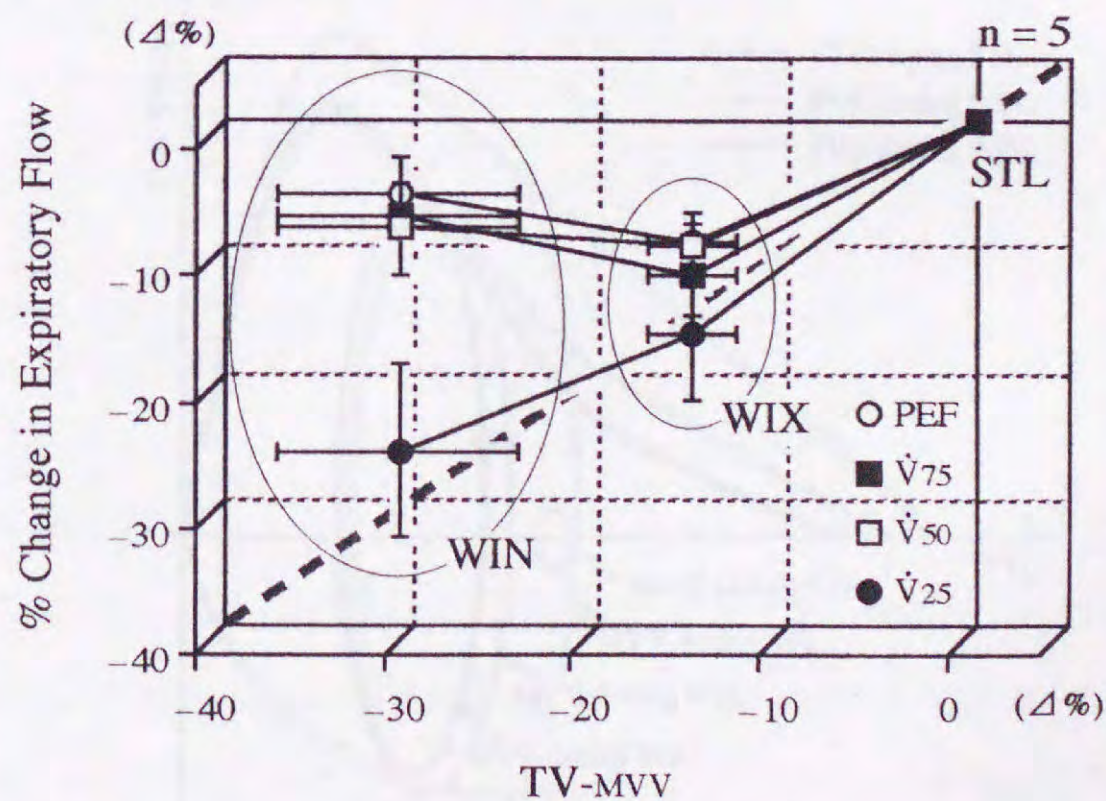


Fig. 2.2.4 Relationships between TV-MVV and expiratory flow (PEF, \dot{V}_{75} , \dot{V}_{50} , \dot{V}_{25}) during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN). Symbols and bars represent means \pm SE. A broken line refers to a regression line of $y = x$.

一方、前述したように、HOWI 時におけるFVCの低下から、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(Koubenecら 1978)。このFVCの低下によって示される肺の弾性抵抗の増加も、HOWI 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の間にのみ強い相関($y=0.76x$, $r=0.61$, $p<0.05$, 図2.2.4)がみられ、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、終末呼気位から終末吸気位までの呼吸位が肺活量の約60から85%の間であることが報告されている(RodarteとRehder 1986)。加えて、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、HOWI 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制限との関連性が強くなることが推察され、図2.2.4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HOWI による低下傾向が強く(図2.2.3)、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(図2.2.5)。

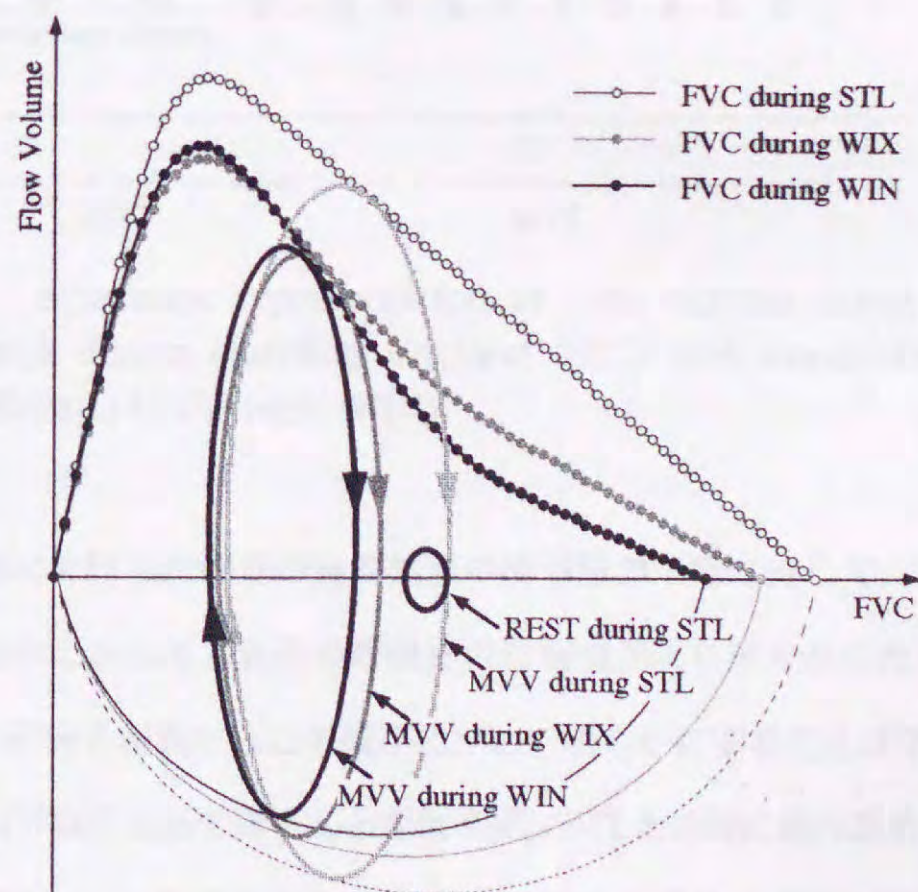


Fig. 2.2.5 Schematic representation of Flow-Volume curve during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN).

この要因の一つとして、速い連続呼吸によって肺胞内での空気の捉え込み (Air-Trapping)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Air-Trappingが増加することが知られており(Dahlback 1975, Otisら 1956), 本研究においてもHOWIによる末梢気道の閉塞によって呼気位が上方へシフトし、随意的最大換気運動時にAir-Trappingが増加した可能性が考えられる(図 2.2.5)。これらのことから、本研究においてHOWI時にMVVが低下した機序として、HOWI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Air-Trappingを惹起させたことによって、TV-mvvが顕著に減少し、MVVが低下した可能性が推察された。

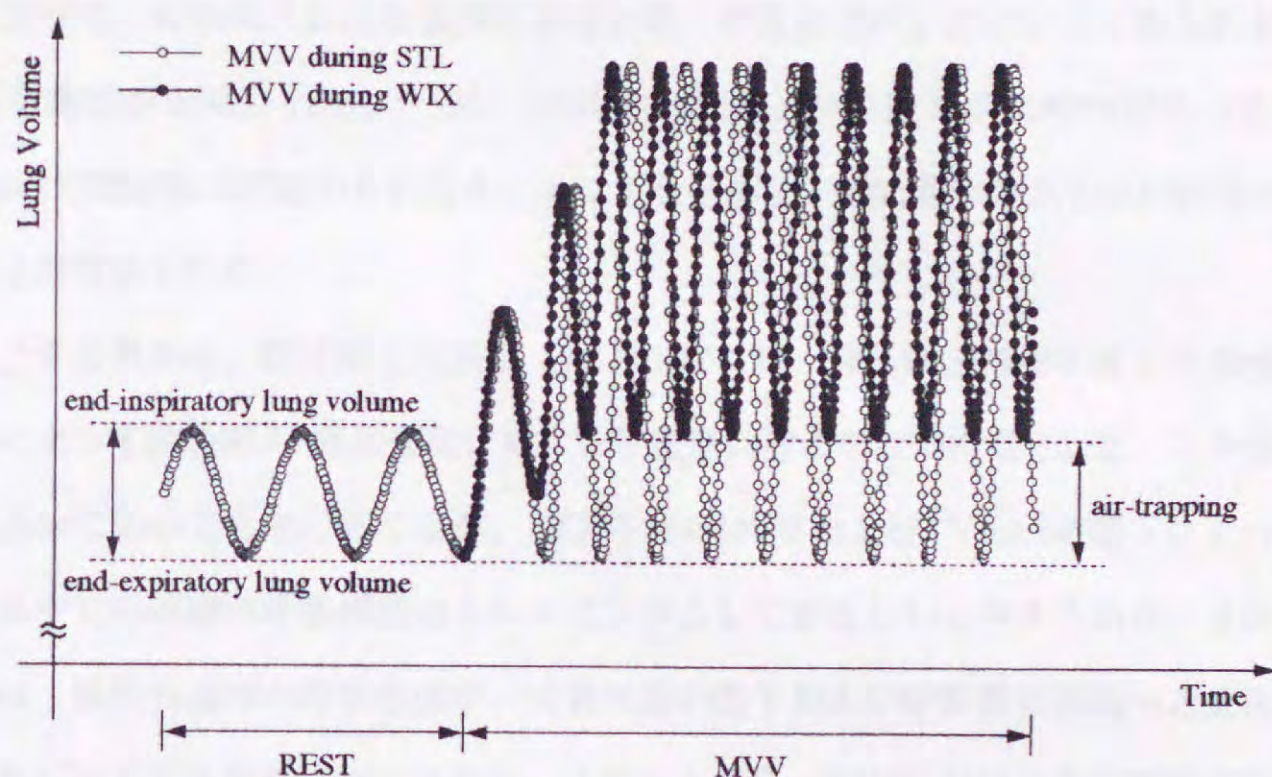


Fig. 2.2.6 Schematic representation of tidal volume curve of MVV measurements during standing on land (STL) and immersion to the xiphoid (WIX) and to the neck (WIN).

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、HOWI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(KaufmanとForster 1996)、HOWI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起因したと推察される。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、HOWI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時にみられたような、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HOWI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、HOWI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、自律的な呼吸調節の関与は少なかったと考えられる。水中運動(藤本ら 1996, Miyamotoら 1994)や吸気抵抗負荷を伴った運動(D'urzoら 1985)を行った先行研究では、自律的呼吸調節下におけ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HOWIによって低下することが示され、先行研究における静的肺機能や努力性肺機能の結果と比較して、より高強度運動時の呼吸様式に類似した知見が得られたと思われる。

2.2.5. まとめ

高強度運動時の換気応答のモデルとして剣状突起位および頸部位までの浸水時にMVVの測定を行い、陸上との比較を行ったところ、以下の知見が得られた。

1. HOWIによってMVVは有意に低下し、水位の上昇との間に強い関連性が認められた。
2. HOWI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、連続呼吸に伴う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、換気亢進によって一回換気量が低下し、呼吸数は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場合には、この水位での実施が好ましいと考えられた。

第3章

研究課題3：腕クランキング運動時の心拍応答および心電図RR間隔変動に及ぼす頸下浸水の影響

2.3.1. 緒言

水中での運動時には、トレッドミルや自転車エルゴメータなどの負荷装置を用いることは困難であり、運動処方を行う際の負荷強度の調節は心拍数(HR)などの生体応答を指標に行われている。ACSMの「運動処方の指針」(Pateら 1991)では、HRを利用して水泳運動時の生体負担度を推定する方法が示されており、その中で考慮すべき点として平均20(5~50)拍/分の徐脈反射が指摘されている。

中立水温における腰部位以上の頸下浸水(HOWI)時には、浸水部の身体に加わる静水圧によって静脈還流が増加し、HRは減少傾向を示す(Krasney 1996)。このHOWIによって惹起される徐脈反射(Water Immersion-induced Bradycardia; WIB)は、水中運動時にも観察される(Christieら 1990, Connellyら 1990, Periniら 1998, Sheldahlら 1984)ことから、水中運動を対象として運動処方を行う際には、このWIBについて考慮する必要がある。しかし、ACSMの指針で示された徐脈反射には、顔面浸水反射(Diving reflex)や姿勢変化に伴う徐脈反射なども混在していると考えられ、HOWI環境において観察されるWIBとは異なる可能性が考えられる。近年、高齢者や低体力者を対象とした運動処方において、このHOWI環境を利用した水中運動が盛んに行われており、運動実施者の生体負担度を把握するための新たな指針が求められている。しかし先行研究では、HOWI環境で行われた水中運動時のWIBに一致した傾向は観察されておらず、WIBの指針は未だ定まっていない。先行研究では、高強度運動時(Christieら 1990, Connellyら 1990, Sheldahlら 1984)もしくは低強度運動時(Periniら 1998)にのみWIBを観察した研究や、頸下浸水による影響は認められなかった研究(KameとPendergast 1995, Nagashimaら 1995)が報告されており、WIBの出現傾向に差がみられる。

これらの先行研究では、陸上と水中において歩行・走運動(Nagashimaら 1995)や自転車運動(Christieら 1990, Connellyら 1990, Periniら 1998, Sheldahlら 1984)が行われており、両環境間の比較においてエネルギー消費量($\dot{V}O_2$)が等しくなるように、負荷方法やプロトコールが工夫されている。しかし、WIBは運動時の姿勢や動作リズムなど、

運動条件の微妙な変化によって影響される可能性が考えられ、運動時のWIBについてより厳密な検討を行うためには、HOWIによって負荷や動作などが変化しない運動様式を用いる必要がある。

そこで本研究では、運動時のHR応答に対するHOWI環境の影響についてより厳密な検討を行うことを目的として、剣状突起位までの浸水時に水面上での腕運動を負荷し、HOWIを行わない条件との間でHR応答の比較を行った。

2.3.2. 方法

A. 対象

被験者は年齢 25.8 ± 1.3 (平均 \pm SEM)歳、身長 171.8 ± 3.2 cm、体重 65.2 ± 3.7 kgの健康成人男性6名であった。各被験者は予め実験の目的、内容などについて詳しく説明を受けた後、任意に本実験へ参加した。

B. 実験方法

実験時の室温は 29.8 ± 0.3 ℃、水温は 33.6 ± 0.1 ℃であり、実験時の服装は上半身裸で水着のみ着用した。運動負荷は、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ(Isopower Ergometer, 竹井機器)を用い、椅座位姿勢での腕クランキング運動を行った。自転車は被験者の肩峰とペダル回転軸の高さが一致するように設置し、ペダル回転数を50回/分に規定した。また、腕運動による身体のブレや浮力による身体の浮き上がりを防ぐため、腰部にベルトを装着して体幹部の固定を行った(図2.3.1)。HOWI時には剣状突起位までの浸水を行い、水位は各被験者ごとに調節した。実験中は、呼気ガス濃度(Sensor Medics 2900, 日本光電)および心電図(Life Scope 6, 日本光電)を経時的に記録した。

浸水試行(WI試行)とHOWIを伴わない対照試行(C試行)では、いずれも10分間の陸上椅座位安静(Rest-1)を行った後、水槽内(C試行は水を抜いた状態)に設置された椅子に移動して、再び10分間の椅座位安静(Rest-2)を維持させた。安静時測定終了後、漸増負荷法および3種類の強度での一定負荷法で腕クランキング運動を行った。漸増負荷法による運動は、初めに3分間のW-upを10ワット(W)で行い、続いてRamp負荷法(+12W/分)による漸増負荷運動をExhaustionまで行わせた。また、一定負荷運動は、漸増負荷運動で得た最大仕事量(W_{max})の10、30および50%強度の運動をそれぞれ10分間負荷した。負

荷強度の設定は、予備実験によって10分間の一定負荷運動で2分以上の定常応答が観察される最大負荷が50%Wmaxであったことから、それ以下の負荷強度を等間隔で設定した。WI試行とC試行の合わせて8種類の運動プロトコルは、初めに漸増負荷運動を、次いで一定負荷運動をそれぞれ順序無作為に行った。

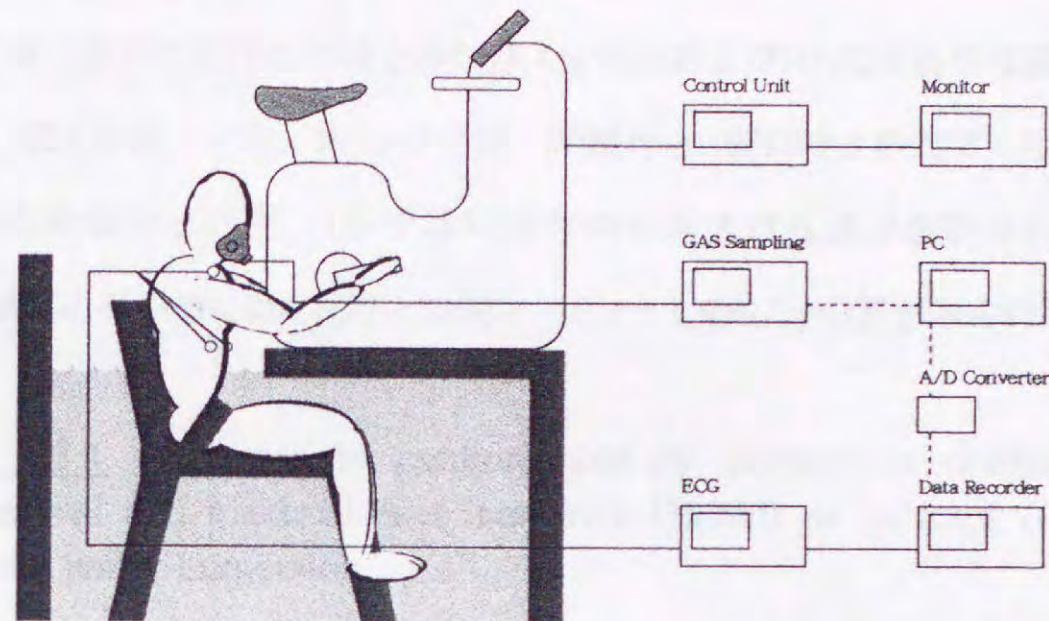


Fig. 2.3.1 Experimental systems of arm-cranking exercise during head-out water immersion. Dashed lines mean offline analysis after the experiment.

漸増負荷運動時の呼気ガス分析値は、ミキシングチャンバー法によって20秒毎に得られた測定値を1分毎に平均し、その最大値を用いた。また、最大心拍数(HRmax)は、心電図波形のRR間隔から1分毎に平均HRを求め、その最大値を用いた。一方、安静時および一定負荷運動時の測定値については、全ての被験者において定常応答が確認できた各測定期間の終了前2分間の平均値を用いた。また、心電図RR間隔の周波数解析は、データレコーダに記録された心電図波形からRR間隔を計測し、最大エントロピー法(MemCalc, 諏訪トラスト)を用いて行った(加茂と村山 1996, 長山ら 1996)。解析に用いた安静時および一定負荷運動時の心電図波形は、各測定期間の終了直前2分間のデータから連続した100拍を抽出した。

C. 実験結果の統計処理方法

各測定値の変化が、測定条件(C vs. WI)および運動強度の変化に依存したもののか否かの検定には、重複測定法による二元配置分散分析を用いた。各運動強度における測定条件

間の比較には、対応のある場合のStudentのt検定を用い(Periniら 1998), 確率水準5%未満で有意性があると判断した。

2.3.3. 結果

A. 椅座位安静時における諸測定値の比較

Rest-1では、全ての試行における呼気ガス分析値およびHRに有意差は認められなかった(表2.3.1, 図2.3.2)。一方, Rest-2では, WI試行とC試行時との間で, 呼気ガス分析値に差は認められなかったが, HRではWI試行時に有意な低値が観察され($p < 0.01$, 表2.3.1), 全試行の平均値にはC試行との間に -10.4 ± 1.9 拍/分の差がみられた。

Table 2.3.1 Changes in cardiorespiratory parameters during rests, submaximal and maximal exercises with (HOWI) or without (Control) head-out water immersion

	n = 6					
	Rest-1	Rest-2	10%Wmax	30%Wmax	50%Wmax	100%Wmax
$\dot{V}O_2$ (ml/min)						
Control	243 ± 21	281 ± 17	526 ± 69	935 ± 45	1493 ± 90	2163 ± 149
HOWI	247 ± 17	275 ± 20	572 ± 38	876 ± 61	1468 ± 74	2172 ± 131
HR (beats/min)						
Control	68.5 ± 4.8	68.4 ± 4.9	90.3 ± 6.1	107.1 ± 6.5	147.9 ± 7.8	169.9 ± 4.7
HOWI	67.7 ± 4.6	58.1 ± 3.7 **	78.0 ± 4.5 *	97.6 ± 6.4 *	134.7 ± 5.9 *	162.2 ± 4.9 *
$\dot{V}E$ (l/min)						
Control	8.3 ± 0.7	9.2 ± 0.5	15.0 ± 2.0	26.2 ± 0.9	45.6 ± 2.3	79.9 ± 4.3
HOWI	8.5 ± 0.5	9.0 ± 0.4	15.9 ± 0.9	25.2 ± 1.5	44.1 ± 2.3	76.3 ± 4.0
TV (l/breath)						
Control	0.50 ± 0.04	0.55 ± 0.03	0.72 ± 0.10	1.06 ± 0.03	1.49 ± 0.07	1.75 ± 0.12
HOWI	0.52 ± 0.03	0.55 ± 0.04	0.81 ± 0.06	1.03 ± 0.06	1.50 ± 0.05	1.63 ± 0.12
RR (breaths/min)						
Control	17.1 ± 0.7	17.3 ± 0.8	21.2 ± 1.1	24.9 ± 0.7	30.8 ± 1.0	46.4 ± 2.5
HOWI	16.9 ± 0.7	16.7 ± 0.7	20.1 ± 1.4	24.8 ± 1.3	29.7 ± 1.7	47.3 ± 1.8

Values are means ± SEM. Significance of differences between HOWI and Control represent, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

B. 運動負荷時における諸測定値の比較

漸増負荷時の運動持続時間(C: 12.2 ± 1.6 , WI: 12.3 ± 1.7 分)およびWmax (C: 120.0 ± 18.9 , WI: 121.0 ± 20.2 W)には, C試行とWI試行間に有意差はみられなかった。また, 最大運動時の酸素摂取量($\dot{V}O_2$), 換気量($\dot{V}E$), 一回換気量(TV)および呼吸数(RR)にも両試行間に差は認められなかった。一方, WI試行時のHRmaxはC試行と比較して有意な低値となり($p < 0.05$), -7.7 ± 3.4 拍/分の差が観察された。

次に, 10, 30および50%Wmaxの強度で行われた一定負荷運動時の $\dot{V}O_2$ には, C試行とWI試行の間に有意差はみられず, $\dot{V}E$, RRおよびTVにも同様に差は認められなかった

(表2.3.1, 図2.3.2). しかし, WI試行時のHRは全ての負荷強度で低値となり, C試行との間に有意差が認められた($p < 0.05$).

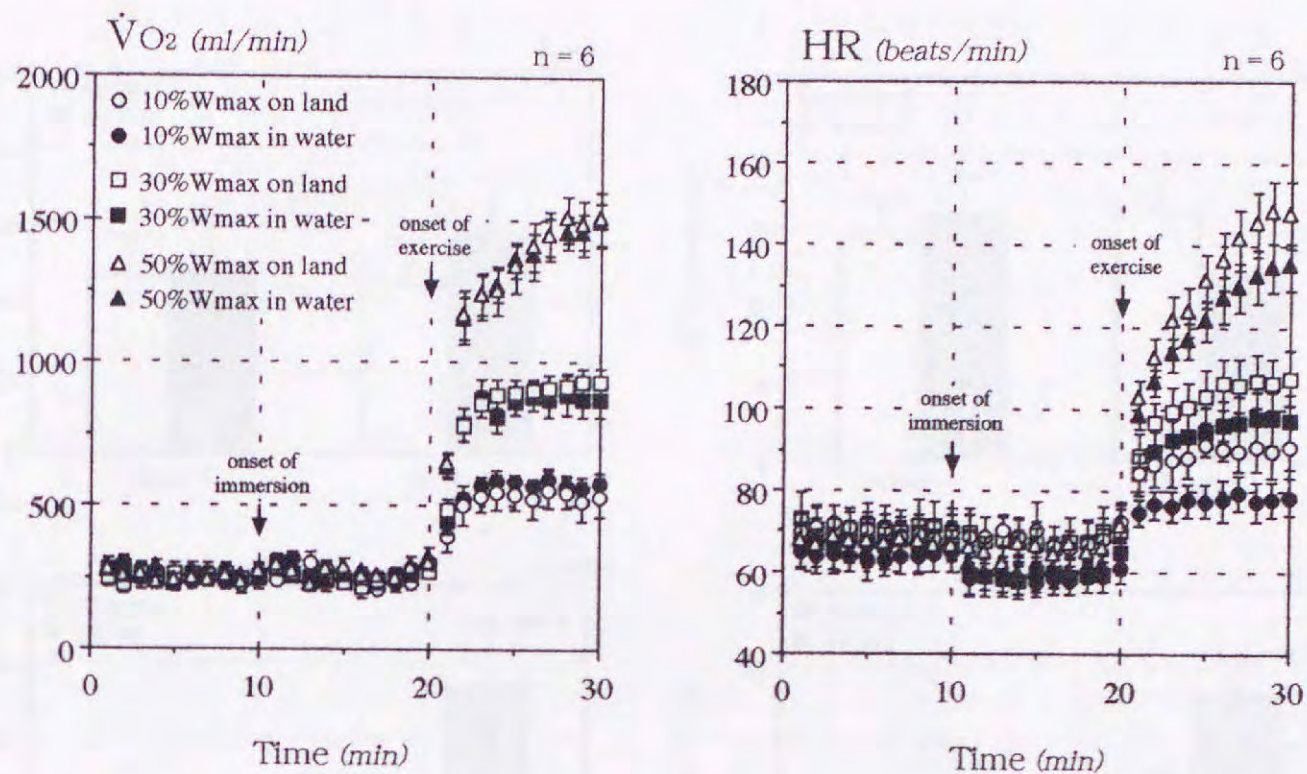


Fig. 2.3.2 Changes in $\dot{V}O_2$ (left) and HR(right) during rests, submaximal constant rate exercises with (HOWI) or without (Control) head-out water immersion. Symbols and bars represent means \pm SE.

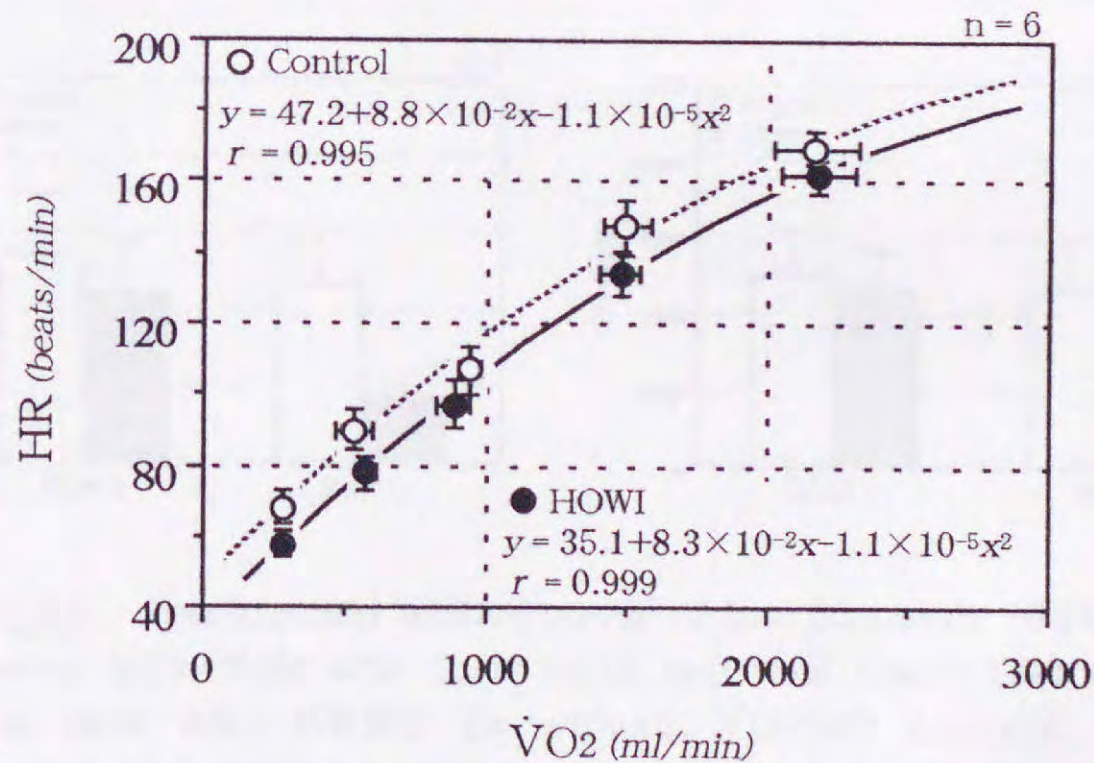


Fig. 2.3.3 Relationships between $\dot{V}O_2$ and HR during rests, submaximal and maximal exercises with (HOWI) or without (Control) head-out water immersion. Symbols and bars represent means \pm SE.

また, 安静時(Rest-2)および運動時の $\dot{V}O_2$ とHRの相関では, C試行およびWI試行とも高い相関関係が認められた(C: $r = 0.997$, WI: $r = 0.999$, 両者とも $p < 0.001$). それぞ

れの回帰式を求めたところ、WI試行時のHRはC試行時よりも約8~13拍/分ほど低値側へシフトする傾向が観察された(図2.3.3).

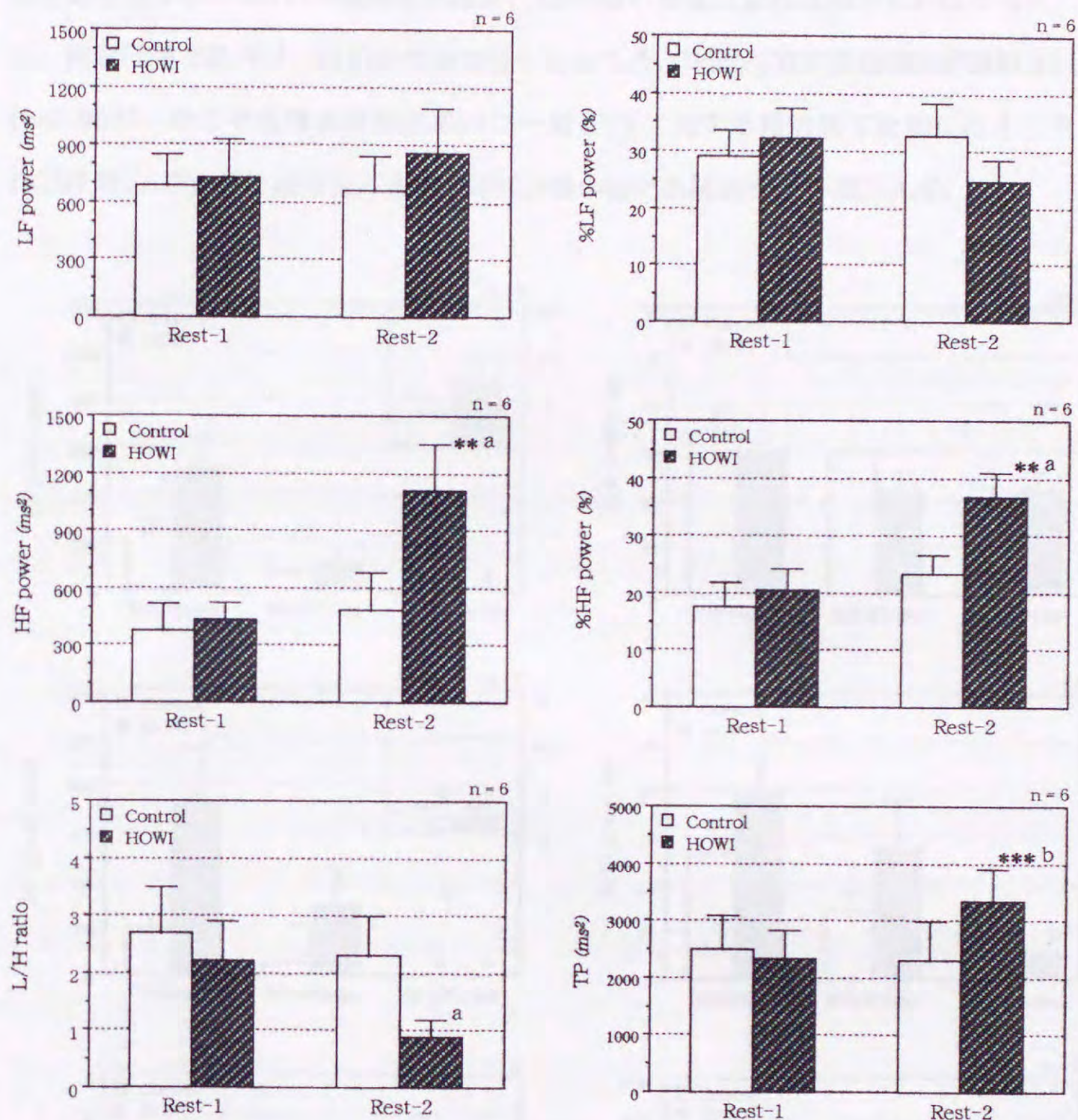


Fig. 2.3.4 Absolute and relative power of low frequency (LF), high frequency (HF), their ratio (L/H ratio), and total power (TP) during sitting rests with (HOWI) or without (Control) head-out water immersion. Columns and bars represent means \pm SE. Significance of differences from Rest-1 represent, "a: $p < 0.05$, b: $p < 0.01$ ". Significant differences between the conditions represent, "**: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$ ".

C. 心電図RR間隔変動の周波数解析による比較

周波数解析によって算出された心電図RR間隔変動の低周波数成分(LF: $0.04 < \sim \leq 0.15 \text{ Hz}$)および高周波数成分(HF: $0.15 < \sim \leq 0.40 \text{ Hz}$)のパワー値とその比(L/H比)を比較

した結果, Rest-1では全ての指標においてC試行とWI試行に差は認められなかった(図2.3.4)。一方, Rest-2では, WI試行によってHF成分が有意に増加($p < 0.01$)し, L/H比には有意な低下($p < 0.001$)が観察されたが, LF成分に有意な変化は認められなかった。また, 両試行間で総パワー(TP)の比較を行ったところ, WI試行で有意な増加が観察された($p < 0.001$)。そこで各周波数成分のパワー値をTPに対する相対値で比較したところ, HOWI時のHF成分に絶対値の比較とほぼ同様の変化が観察された(図2.3.4)。

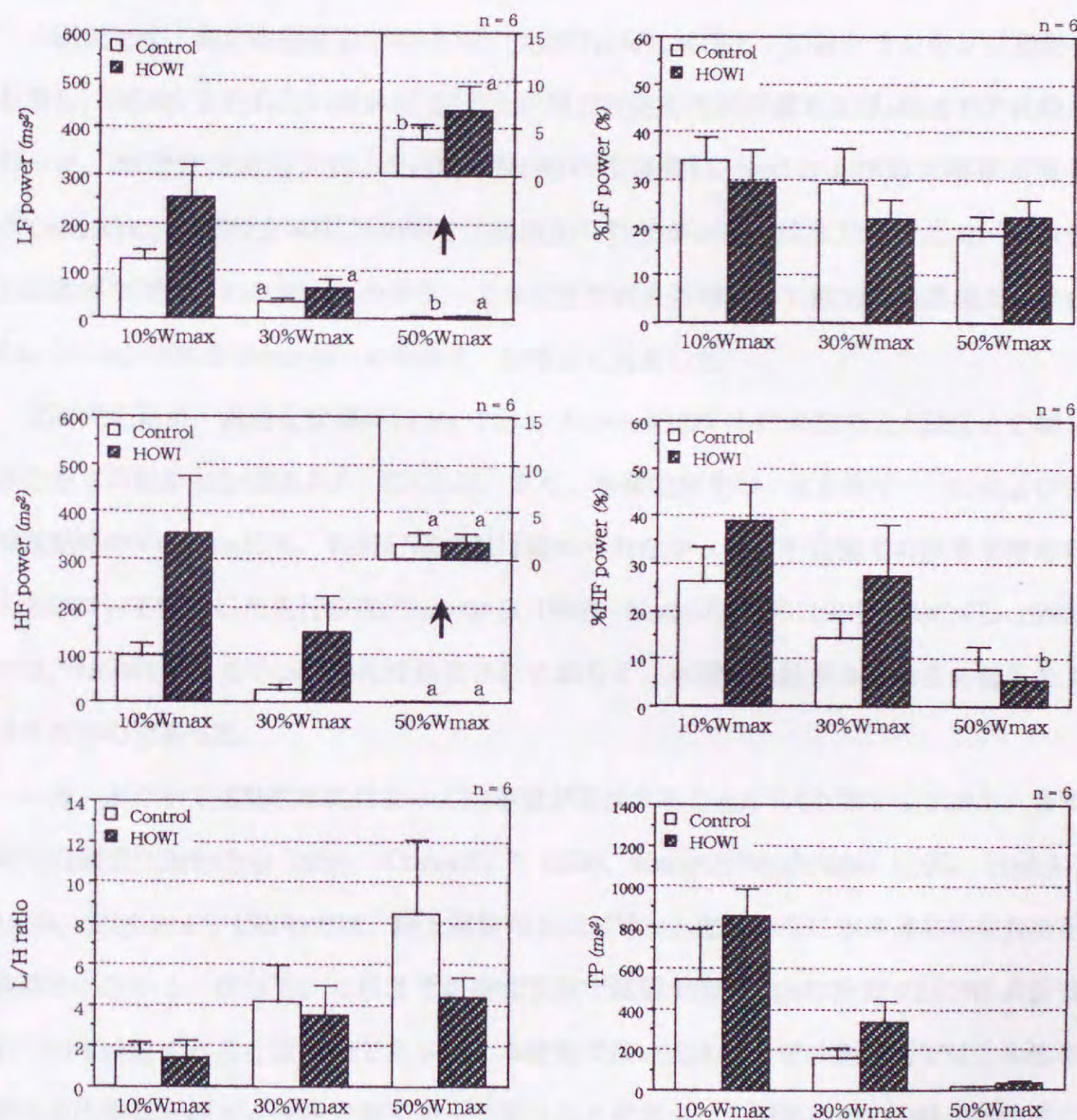


Fig. 2.3.5 Absolute (left) and relative (right) power of LF, HF, L/H ratio, and TP during constant rate exercise with (HOWI) or without (Control) head-out water immersion. Columns and bars represent means \pm SE. Significant differences from 10%Wmax represent, "a": $p < 0.05$, "b": $p < 0.01$ ".

一方、運動中の心電図RR間隔変動では、両試行において運動強度の増加に伴ったTPの減少が観察され、LF成分およびHF成分のパワー値にも同様の減少傾向がみられた(図2.3.5)。しかし、いずれの周波数成分にもC試行とWI試行の間に有意差は認められず、またTPに対する相対値の比較においても、LF成分およびHF成分に両試行間で差は認められなかった。

2.3.4. 考察

本研究では、剣状突起位までのHOWI (WI試行)時に水面上での腕クランキング運動を負荷し、HOWIを行わない条件(C試行)との間で呼気ガス分析値およびHR応答の比較を行った。漸増負荷運動では、Exhaustion時の仕事量(W_{max})および最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)に、C試行とWI試行の間に差は認められなかった(表2.3.1)。そこで、それぞれの環境下で得られた W_{max} のうち、より大きな値を基準として定め、両環境ともその10、30および50% W_{max} 相当の運動を一定強度で負荷した。

本研究の結果、椅座位安静時(Rest-1およびRest-2)の $\dot{V}O_2$ にWI試行とC試行との間で差はみられなかった(表2.3.1, 図2.3.1)。また、各種強度での一定負荷時の $\dot{V}O_2$ および漸増運動時の $\dot{V}O_{2max}$ にも、両試行間で差は認められなかった。中立温での浸水安静時の $\dot{V}O_2$ について報告した先行研究(Christieら 1990, Nagashimaら 1995, Periniら 1998)では、HOWIによる $\dot{V}O_2$ の変化は観察されておらず、本研究の結果もこれらの報告を支持するものであった。

一方、水の中では粘性抵抗によって仕事量が増加することから(小野寺ら 1993)、多くの先行研究(Christieら 1990, Connellyら 1990, KameとPendergast 1995, Periniら 1998, Sheldahlら 1984)では、陸上運動時と同じ $\dot{V}O_2$ となるように水中運動時の負荷が調節されている。従って、これまでの研究方法では運動時の $\dot{V}O_2$ に及ぼすHOWIの影響について検討することは困難であった。本研究で用いた水面上での腕運動では、生体に加わる仕事量が陸上と水中で全く同一であったと考えられ、運動中の $\dot{V}O_2$ は運動強度によらず両環境間で差は認められなかった。従って、中立温でのHOWI環境は運動時の $\dot{V}O_2$ に影響せず、また最大運動時の $\dot{V}O_{2max}$ や W_{max} にも影響しないと考えられた。

次に、Rest-2のHRはWI試行で有意な低値を示し($p < 0.01$)、C試行との間に -10.4 ± 1.9 拍/分の差がみられた(表2.3.1)。浸水安静時におけるWIBは多くの先行研究において

報告されており(Krasney 1996), 本研究の結果もこれらと一致するものであった。また, 心電図RR間隔変動の周波数解析ではHF成分がWI試行によって有意に増加し($p < 0.05$), L/H比には有意な減少が観察された($p < 0.05$, 図2.3.4)。WI試行ではTPにも有意な増加が観察されたことから($p < 0.01$), TPを基準とした相対値で各周波数成分を比較したところ, 絶対値とほぼ同様の变化が観察された(図2.3.4)。HF成分は副交感神経活動の指標として, またL/H比は交感神経活動の指標として利用されており, これらの周波数成分の変化と心臓自律神経活動との関係は, 薬理的な研究によっても証明されている(Goldbergerら 1994, 早野 1996, Murphyら 1991)。浸水安静時におけるHF成分の増加およびL/H比の減少は, 多くの先行研究において報告されており(木住野と松田 1997, Miwaら 1996b), 本研究の結果と一致するものであった。HOWIによる副交感神経活動の賦活化および交感神経活動の減弱化は, 主に中心静脈圧の上昇による心房伸展受容器反射や一回拍出量の増加による動脈圧受容器反射によって惹起され, 結果としてHRを減少させると考えられている(木住野と松田 1997, Miwaら 1996b)。従って, Rest-2において観察されたWI試行時のHRの減少は, HOWIによって低圧系および高圧系の圧受容器反射が惹起され, 副交感神経活動の賦活化および交感神経活動の減弱化によって生じたと考えられた。

一方, 浸水安静時にみられたWIBは一定負荷時および最大運動時にも観察され, 全ての負荷強度においてC試行との間に有意差が認められた(表2.3.1)。C試行とWI試行におけるHRの差は, 10, 30, 50および100%Wmax強度において, それぞれ -12.3 ± 4.0 , -9.5 ± 3.7 , -13.2 ± 4.8 および -7.7 ± 3.4 拍/分であり, Rest-2を含めた $\dot{V}O_2$ とHRの回帰式では, HOWIによってHRがより低値側へとシフトする傾向が観察された(図2.3.3)。

HOWIによって運動時のHR増加が抑制されるという報告はいくつかみられるが, 必ずしも本研究と同様の傾向は観察されていない。Periniら(1998)は, 低強度運動時のHRがHOWIによって有意に減少したことを報告しており, その機序として心電図RR間隔変動の周波数解析から, HOWIに伴う一回拍出量の増加によって動脈圧受容器反射が惹起された可能性を示している。本研究でも浸水安静から低強度運動時のLFおよびHFにPeriniら(1998)と同様の傾向(図2.3.5)が観察され, この時のHRは有意に減少した($p < 0.05$)ことから, 動脈血管系における圧負荷の増大によってWIBが惹起された可能性が考えられた。Hayanoら(1994)は, 運動時の心電図RR間隔変動のHF成分は, 主に呼吸数の増加

に依存した変化を示すことを報告しているが、本研究では全ての運動強度において $\dot{V}E$ 、TVおよびRRにC試行とWI試行の間で差はみられなかったことから、このHF成分の増加はHOWIによる副交感神経活動の賦活化によって惹起された可能性が示唆された。

また、Periniら(1998)の報告では、高強度運動時においてWIBは観察されておらず、心電図RR間隔変動に陸上と水中で差がみられなかったことから、HOWIに伴う血液量の再分配および静脈還流の増加の影響は、運動によって心機能が亢進した状態では減弱化する可能性について述べている。運動時には、筋ポンプ作用によって静脈還流が増加し、血液分布は変化することが知られており(Rowell 1983)、HOWIによる血液シフト作用は脚での筋収縮に伴う筋ポンプ作用を減弱化すると考えられる。従って、筋ポンプ作用の弱い低強度運動時には陸上と水中でHRに大きな差が生じたが、高強度運動時には陸上運動時にも筋ポンプ作用による静脈還流の増加が惹起され、両環境間のHRの差が僅少化する可能性が考えられた。

しかし、本研究では高強度運動時にも低強度とほぼ同様のWIBが観察された(図2.3.3)。この機序として、本研究で用いた腕運動では全ての運動強度において筋ポンプ作用は機能せず、C試行では静脈還流の増加は殆ど惹起されなかった可能性が考えられる。従って、本研究におけるC試行では高強度運動時においても筋ポンプ作用に伴うHRの減少作用は惹起されず、そのためWI試行との間でHRに差が生じたと考えられる。しかし、HOWIによって高強度運動時にも静脈還流の増加が惹起されたとすると、心電図RR間隔変動に陸上と水中で差がみられなかった点と矛盾する。Periniら(1998)は、 \sim 約2000ml/minまでの $\dot{V}O_2$ において心電図RR間隔変動の総パワー値は激減し、心臓自律神経活動の相互作用について評価することは困難である可能性について言及しており、本研究における高強度運動時の周波数解析の結果も、彼らの報告(Periniら 1998)と同様に筋ポンプおよびHOWIによる静脈還流の影響を反映していない可能性が考えられた。

一方、Christieら(1990)は、高強度運動時のHRがHOWIによって有意に減少したことを報告しており、その機序としてHOWIによる交感神経活動の減弱化が、高強度運動時のHR調節においてより強く作用した可能性について述べている。Connellyら(1990)は、高強度運動時の血漿ノルアドレナリン濃度がHOWIによって低値となったことから、Christieら(1990)の仮説を間接的に支持している。この様に、Periniら(1998)の研究とChristieら(1990)およびConnellyら(1990)の研究では、同様の運動様式(自転車エルゴメ

ータ)を用いているにも拘わらず異なる結果が得られており、WIBの機序についてお互いに矛盾する結果を説明している。これらの先行研究におけるHR応答の不一致の誘因は定かでないが、理由の一つとして各研究間における負荷の調節方法の相違が考えられる。

Christieら(1990)およびConnellyら(1990)の研究では、WI試行時の負荷増加法にペダル回転数の増加を用いているが、Periniら(1998)は60回/分のペダル回転数における水の粘性抵抗が25Wであるとして、この値を差し引いた負荷を水中運動時に用いている。運動のリズムはその時のHR応答に影響を及ぼすことが知られており(ChavarrenとCalbet 1999, Hagbergら 1981), Christieら(1990)およびConnellyら(1990)の結果には、陸上と水中におけるペダル回転数の差異が影響した可能性が考えられる。

また、これらの研究(Christieら 1990, Connellyら 1990, Periniら 1998)では、いずれも3~6分のステップ負荷法を用いており、本研究における各負荷とも独立した10分間の一定負荷法とは異なっていた。HOWI時には、運動に対する $\dot{V}O_2$ の応答時間が延長する可能性が指摘されており(HayashiとYoshida 1999), 短時間のステップ負荷法は運動負荷に対する定常応答を比較する条件として望ましくない。

以上のことから、運動時のHR応答に及ぼすHOWIの影響について検討した先行研究では、WIBにおいて一致した見解が得られておらず、また、陸上と水中で全く同一の運動を負荷した本研究の結果とも異なるものであった。従って、先行研究において検討されたWIBの出現機序には、HOWI以外の要因が関与している可能性が示唆された。いずれにしても、運動時のHR応答に及ぼすHOWIの影響について、その機序を明らかにするためには、陸上と水中で全く同一の運動を負荷することが重要であり、WIBの機序については、本研究と同様な方法を用いて再検討し直す必要があると思われる。

以上、本研究の結果と先行研究の知見とを併せて考えると、運動時のHRはHOWIによって概ね8~13拍/分ほど低下し、運動強度に依らず常に一定に出現すると考えられるが、このWIBの程度は運動の種類やプロトコールによって影響され、先行研究において運動強度とWIBとの関係に不一致を生じさせた可能性が考えられた。

2.3.5. まとめ

運動時のHR応答に対するHOWIの影響について検討するために、中立温における剣状突起位までのHOWI時に水面上での腕クランキング運動を負荷し、HOWIを行わない条

件との間で呼気ガス分析値およびHR応答を比較したところ、以下の知見が得られた。

1. HOWI 環境は安静時および運動中のエネルギー消費量($\dot{V}O_2$)に影響せず、また最大運動時の $\dot{V}O_{2max}$ や W_{max} にも影響を及ぼさなかった。
2. HOWI 環境は安静時および運動中の換気応答($\dot{V}E$)、並びにRRやTVなどの呼吸様式にも影響を及ぼさなかった。
3. HOWI 環境は安静時のHRを減少させ、運動中にも同じ程度のHRの減少作用が惹起された。このHOWIによるHRの減少作用(WIB)には運動強度に依存した変化は観察されず、 $\dot{V}O_2$ -HRの回帰式は約8~13拍/分ほどより低いHR側へとシフトした。
4. 心電図RR間隔変動の周波数解析から、安静時および低・中強度運動時のWIBに、浸水に伴う副交感神経活動の賦活化が影響する可能性が示唆された。しかし、高強度運動時におけるWIBの機序について明らかにすることはできなかった。

以上の結果から、本研究で用いた運動様式ではWIBに対する運動強度の影響は認められず、この運動強度とWIBの程度との関係は運動負荷様式やそのプロトコールによって変化する可能性が示唆された。

第4章

研究課題4：中高年齢者における水中等尺性運動時の血圧応答

2.4.1. 緒言

水の中では、浮力によって膝や腰部への体重負荷が軽減されることから、高齢者や肥満者などの低体力者が運動を行うのに好ましい環境と考えられている。しかしその反面、水圧によって下肢などの静脈血管系に貯留した血液が上行し、静脈還流の増加に伴う中心静脈圧および動脈血圧の上昇が報告されている(Gabrielsenら 1990, Rischら 1978a)。一方、運動時には、負荷の増加に依存して血圧が上昇するが、この傾向は等尺性運動時により顕著となることが知られており(Fujisawaら 1996, Smolanderら 1998)、水中で等尺性運動を行う場合には、より顕著な血圧上昇を引き起こす可能性が考えられる。

しかし、頸下浸水(HOWD)時にはこれらの生体応答と同時に、心臓交感神経活動の減弱化および迷走神経活動の賦活化(木住野と松田 1997, Miwaら 1996b)や各種の昇圧性ホルモンの分泌抑制(Connellyら 1990, Krasney 1996, Nagashimaら 1995, Sheldahlら 1992)が報告されていることから、水中運動では運動負荷による血圧上昇が抑制される可能性が示唆されている。水中運動は、高齢者や肥満者などを対象とした運動処方に多く用いられており、これらの人々では高血圧症を呈する人も少なくない。また、水中で行われるレクリエーション運動の内容は近年多様化しており、綱引きや腕相撲などの運動が行われることも珍しくはない。これらの運動には等尺性の筋収縮も多く関与すると考えられ、とくに中高年齢者を対象とした水中運動の安全性を検証する上で、水中での等尺性運動時の血圧応答に関する詳細な知見を得ることは、早急に行うべき重要な課題と考えられる。

そこで本研究では、若年者群(Y群)と中高年齢者群(O群)を対象として、とくに昇圧反応性が強いと考えられる等尺性運動時の血圧応答について観察し、HOWIを行う条件(水中試行)と行わない条件(陸上試行)との比較を行った。

2.4.2. 方法

A. 対象

被験者はY群(8名、年齢 25.0 ± 2.1 歳：22歳～27歳、身長 171.0 ± 7.5 cm、体重 $68.9 \pm$

11.2kg)およびO群(8名, 53.6 ± 4.3 歳: 48歳~62歳, 170.4 ± 4.7 cm, 67.6 ± 4.7 kg)の成人男性であった。各被験者は予め実験の目的, 内容などについて詳しく説明を受けた後, 任意に本実験へ参加した。

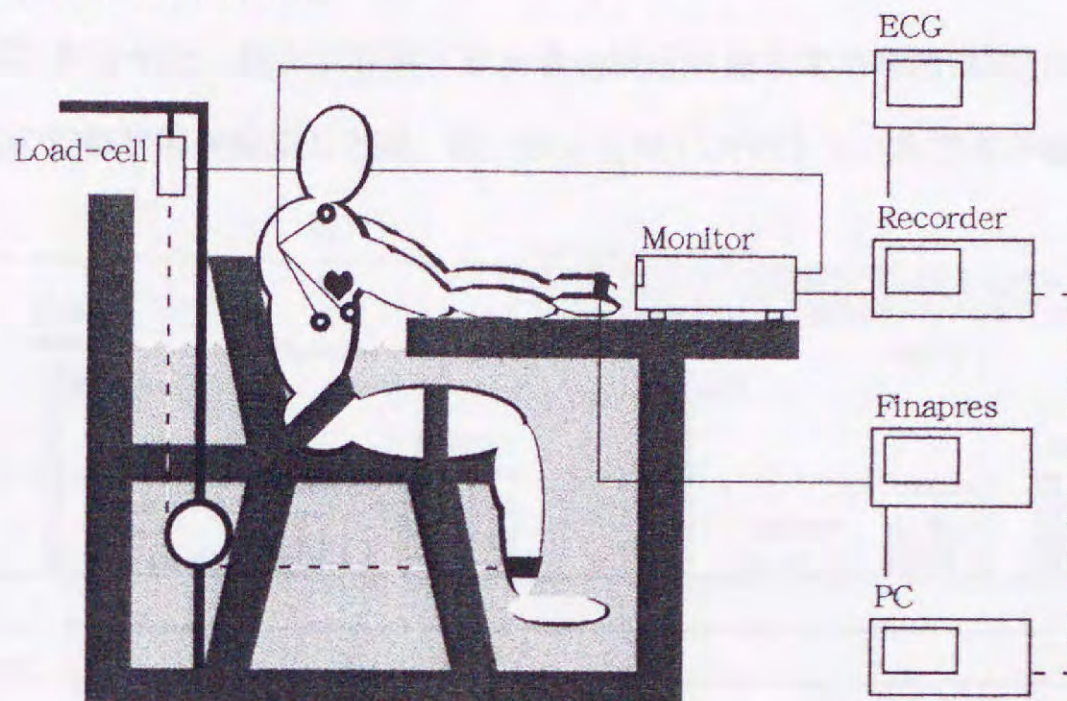


Fig. 2.4.1 Experimental design of isometric knee extension exercise with or without head-out water immersion.

B. 実験方法

実験時の室温は 25.2 ± 1.8 ℃, 水温は 34.6 ± 1.5 ℃であった。被験者は水の入っていない水槽内に設置された椅子に座り, 大腿部と体幹部をベルトによって固定された(図2.4.1)。運動は膝角(大腿と下腿のなす角)を膝関節最大伸展位から90度屈曲した位置で, 足首に取り付けられたワイヤーを牽引することによって大腿四頭筋を中心とした等尺性の脚伸展運動を行った。足首に取り付けられたワイヤーは滑車を介してロードセル(張力アタッチメント, 竹井機器)に取り付けられ, 脚伸展運動時の張力を測定した。記録された張力はオシロスコープを用いて被験者にフィードバックし, 負荷の調節を行わせた。安静時, 運動中および回復時には胸部双極誘導法(CMs)による心電図(Life Scope 6, 日本光電)の記録および左手指先において動脈血圧(Finapres 2300, Ohmeda)を経時的に beat-by-beatで測定した。

運動負荷のプロトコールは, 初めに5~10秒間の最大随意収縮力(MVC)を測定し, 続いて低強度から順番に10%, 30%および50%MVCの最大下強度で30秒間の等尺性脚伸展運動を, 各強度ごとに2~3回負荷した(図2.4.2)。各試行間には十分な休息時間

(10%MVC測定の後には1分30秒以上, 30%MVC後には2分以上, 50%MVCおよびMVC測定後には2分30秒以上)を設け, 被験者の安静回復を確認した後, 次の試行を行った.

試行の順序は, 陸上試行の終了後, 中立水温の水を約3~5分間で水槽内に注入し, 続いて水中試行を行った. 陸上試行終了から水中試行開始までの時間は約15~20分間であり, 被験者の安静状態を確認した後, 陸上試行と同じプロトコールで水中試行を行った.

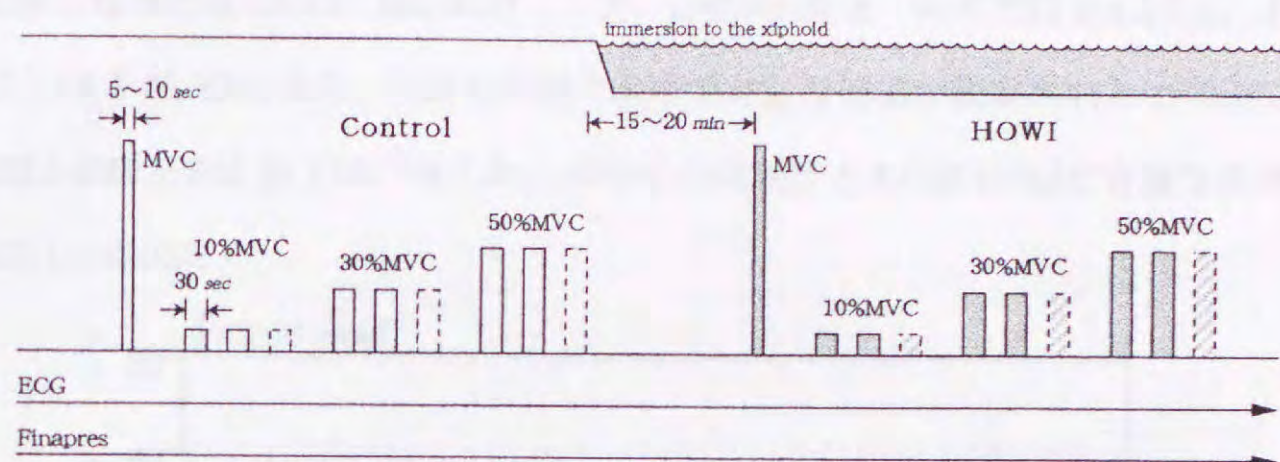


Fig. 2.4.2 Experimental protocol in isometric knee extension exercise with (HOWI) or without (Control) head-out water immersion.

安静時の心拍数(HR)および血圧値は, 20秒間の平均値を算出し, 最大運動時のHRおよび血圧値は測定期間中の最大の血圧値とその時のHRを求めて解析を行った. また, 最大下強度での運動中に測定された血圧データは, 30秒間のピーク値(BP_{peak})と10~30秒までの平均値(BP₁₀₋₃₀)を算出し, 記録された心電図から10~30秒までの平均心拍数を算出して解析を行った(図2.4.3).

C. 実験結果の統計処理方法

各測定値の変化が, 測定条件(陸上vs. 水中)および運動強度の変化に依存したものが否かの検定には, 重複測定法による二元配置分散分析を用いた. 各運動強度における陸上と水中の比較には, 対応のある場合のStudentのt検定を, Y群とO群の比較には対応のない場合のStudentのt検定を分散が等しい場合と等しくない場合とに分けて行い, それぞれ確率水準5%未満で有意性があると判断した.

2.4.3. 結果

A. 陸上および水中における安静時血圧および心拍数の比較

Y群およびO群の安静時血圧には、陸上と水中の両試行間で差はみられなかった(図2.4.4)。また、Y群とO群との比較では、陸上安静時の収縮期血圧(SBP)、拡張期血圧(DBP)および平均血圧(MBP)にO群で有意な高値が観察された($p<0.05$)が、水中安静時の血圧値には両群間に有意差は認められなかった。

安静時のY群のHRは、陸上で 66.7 ± 7.1 、水中では 61.2 ± 4.4 拍/分であり、水中で有意な低値となった($p<0.05$, 図2.4.5)。一方、O群のHRは、陸上で 81.0 ± 15.2 、水中では 77.7 ± 14.5 拍/分であり、Y群と同様に水中で有意な低値が観察された($p<0.05$)。また、Y群とO群との比較では、陸上および水中の両試行ともO群のHRに有意な高値が観察された($p<0.05$)。

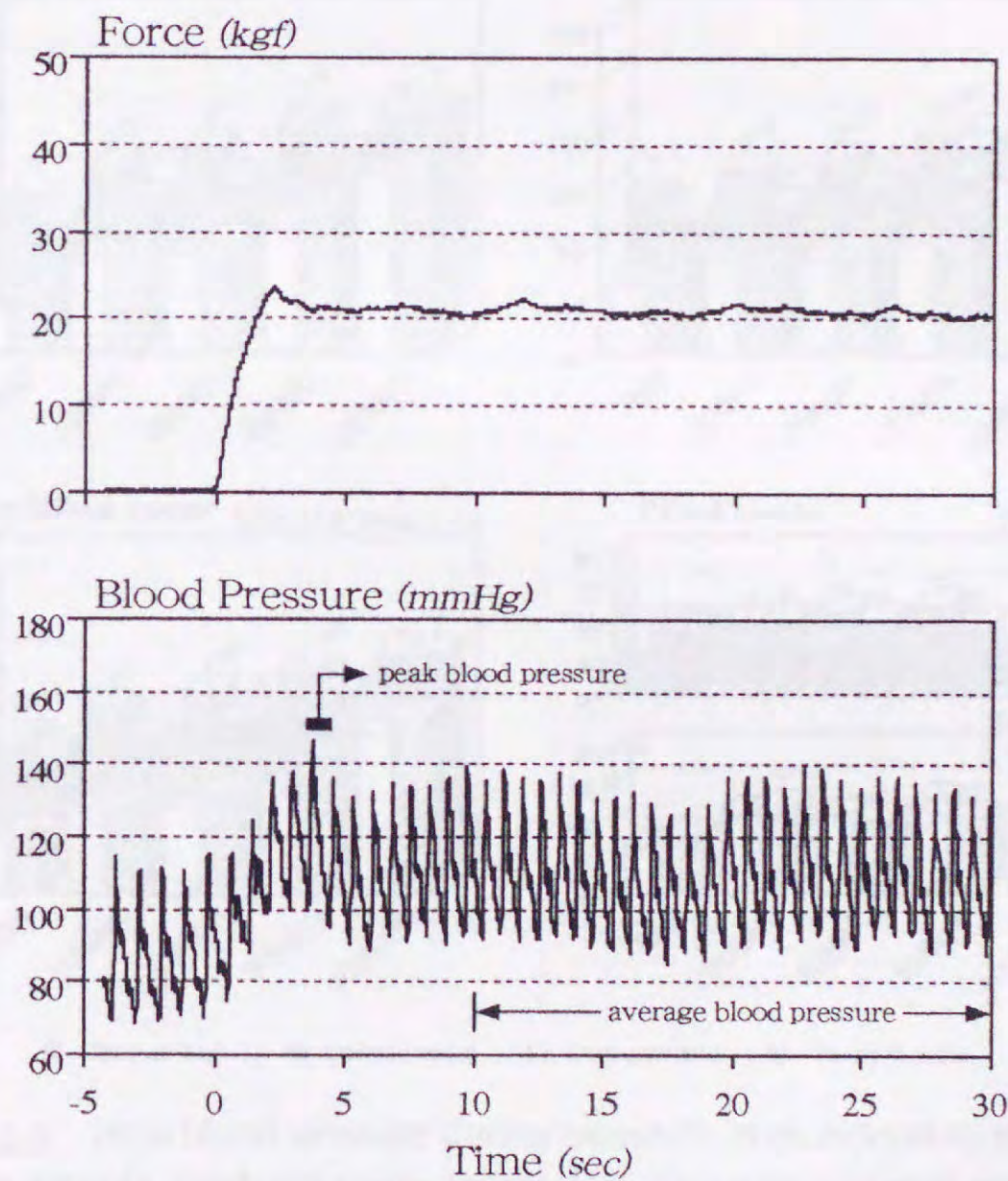


Fig. 2.4.3 Tension of a knee extension and arterial blood pressure during isometric exercise in a representative subject..

B. 陸上および水中におけるMVC時の脚伸展力、心拍数および血圧値の比較

Y群におけるMVC時の脚伸展力は、陸上で 41.0 ± 8.8 、水中では 41.8 ± 9.8 kgであり、両試行間に差はみられなかった。O群では、陸上で 31.0 ± 6.2 、水中では 30.9 ± 10.1 kg

であり、同様に両試行間で差はみられなかった。また、Y群とO群との比較では、両試行ともY群に有意な高値が観察された(両試行とも $p < 0.05$)。

MVC時の血圧値には、Y群およびO群の両群とも陸上と水中の両試行間で差はみられなかった。また、Y群とO群との比較でも、陸上および水中の両試行において有意差は認められなかった(図2.4.4)。

MVC時のHRはY群およびO群とも、陸上と水中の両試行間に有意差はみられなかった(図2.4.5)。また、Y群とO群との比較でも、陸上および水中の両試行において有意差は認められなかった。

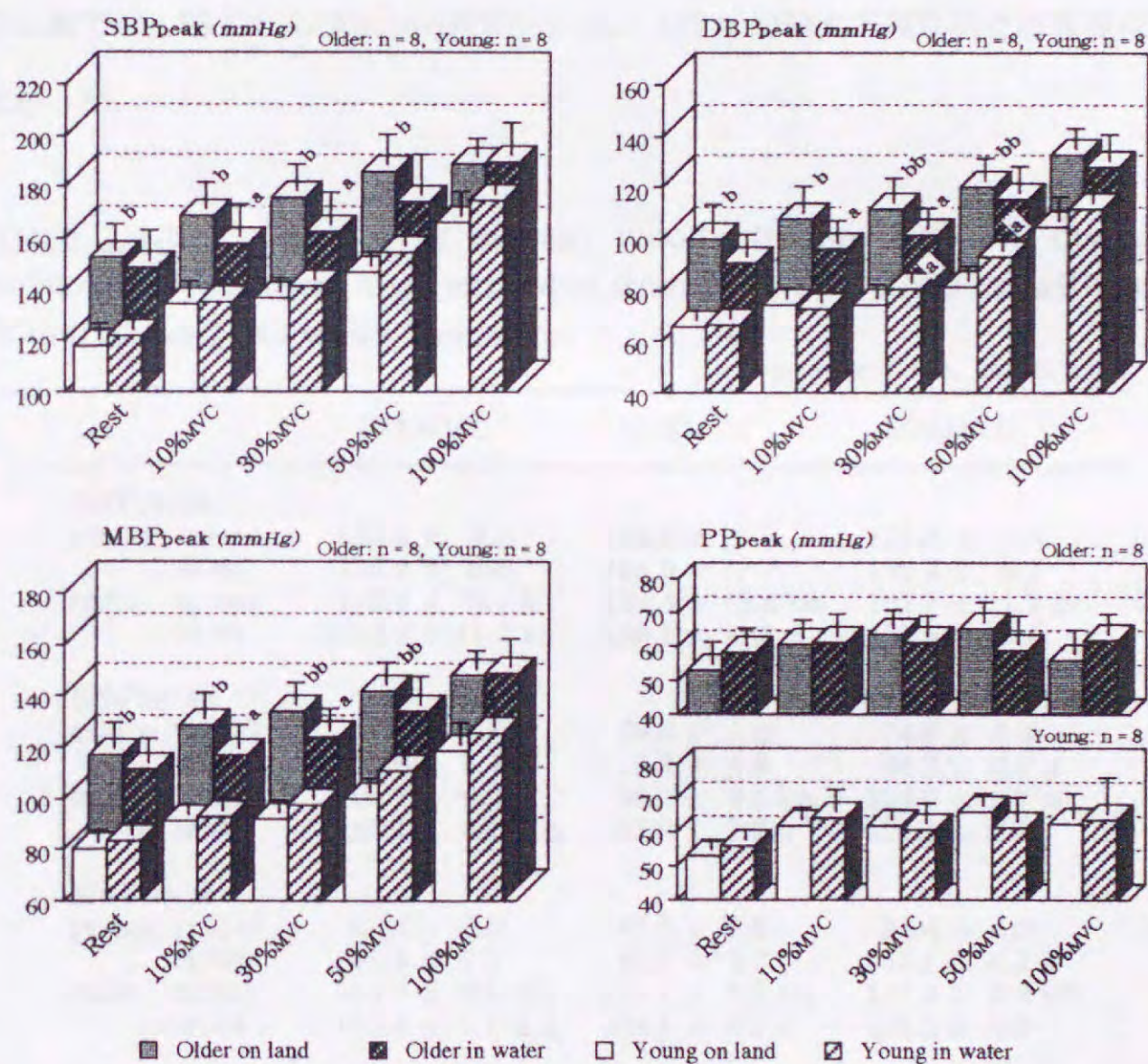


Fig. 2.4.4 Peak blood pressure during isometric knee extension exercise with or without head-out water immersion. Columns and bars represent means \pm SE. Significant differences between on land and in water represent, "a: $p < 0.05$ ". Significance of differences between young and older represent, "b: $p < 0.05$, bb: $p < 0.01$ ".

C. 陸上および水中における10%、30%および50%MVC時の血圧および心拍数の比較

最大下運動時のBP_{peak}では、Y群の30%および50%MVC時のDBP_{peak}に陸上と水中の間

で有意差がみられ、水中で高値となった(全て $p < 0.05$, 図2.4.4). 一方, O群では10%および30%MVC時のSBP_{peak}, DBP_{peak}およびMBP_{peak}に陸上と水中の間に有意差がみられ, 水中で低値となった(全て $p < 0.05$). また, Y群とO群との比較では, 陸上における全ての最大下運動時のSBP_{peak}, DBP_{peak}およびMBP_{peak}に, O群で有意な高値が観察されたが, 水中における最大下運動時の血圧値にY群とO群の間に有意差は認められなかった. 一方, BP₁₀₋₃₀は若干低値となるもののBP_{peak}とほぼ同様の傾向が観察された(表2.4.1).

最大下運動時のHRはY群およびO群の両群において, 10%MVC時に陸上より水中で低値となり, 両試行間に有意差が認められた(両者とも $p < 0.05$, 図2.4.5). また, Y群とO群との比較では, 陸上および水中の両試行において全ての最大下運動時に有意差は認められなかった.

Table 2.4.1 Changes in average blood pressure (BP₁₀₋₃₀) during submaximal isometric knee extension exercise with (HOWI) or without (Control) head-out water immersion

		young: n = 8, older: n = 8		
		10%MVC	30%MVC	50%MVC
SBP₁₀₋₃₀				
young	Control	123.4 ± 7.5	126.5 ± 5.9	133.2 ± 7.0
	HOWI	125.9 ± 6.9	133.5 ± 7.7	139.4 ± 9.2
older	Control	149.1 ± 9.7 b	154.4 ± 9.4 bb	162.7 ± 11.7 b
	HOWI	140.4 ± 11.7 a	140.1 ± 11.8 a	161.5 ± 10.7
DBP₁₀₋₃₀				
young	Control	67.8 ± 5.3	70.0 ± 5.2	74.8 ± 6.3
	HOWI	67.9 ± 5.4	71.8 ± 6.3	84.2 ± 6.0 a
older	Control	95.7 ± 9.9 b	98.2 ± 9.0 bb	104.6 ± 8.7 b
	HOWI	85.1 ± 8.1 a,b	87.0 ± 7.7 a	102.1 ± 7.5
MBP₁₀₋₃₀				
young	Control	83.6 ± 5.3	86.0 ± 4.8	91.4 ± 6.0
	HOWI	85.4 ± 5.1	88.6 ± 6.2	101.1 ± 6.2 a
older	Control	114.2 ± 9.5 bb	117.5 ± 8.6 bb	124.4 ± 9.2 bb
	HOWI	105.4 ± 9.1 a,b	106.5 ± 8.9 a	123.3 ± 8.0
PP₁₀₋₃₀				
young	Control	55.5 ± 3.4	56.6 ± 2.8	58.4 ± 2.7
	HOWI	58.0 ± 4.3	61.4 ± 8.4	55.3 ± 6.4
older	Control	53.4 ± 4.9	56.2 ± 5.3	58.2 ± 6.2
	HOWI	55.4 ± 5.5	53.2 ± 6.0	59.4 ± 6.8

Values are means ± SEM. Significant differences between HOWI and Control represent, "a: $p < 0.05$ ". Significance of differences between young and older represent, "b: $p < 0.05$, bb: $p < 0.01$ ".

2.4.4. 考察

水の中では, 静脈還流の増加に伴う中心静脈圧および動脈血圧の上昇が報告されてお

り (Gabrielsenら 1990, Rischら 1978a), とくに昇圧反応性の強い等尺性運動 (Fujiwaraら 1996, Smolanderら 1998) を水中で行う場合には, より顕著な血圧上昇が惹起される可能性が考えられる。

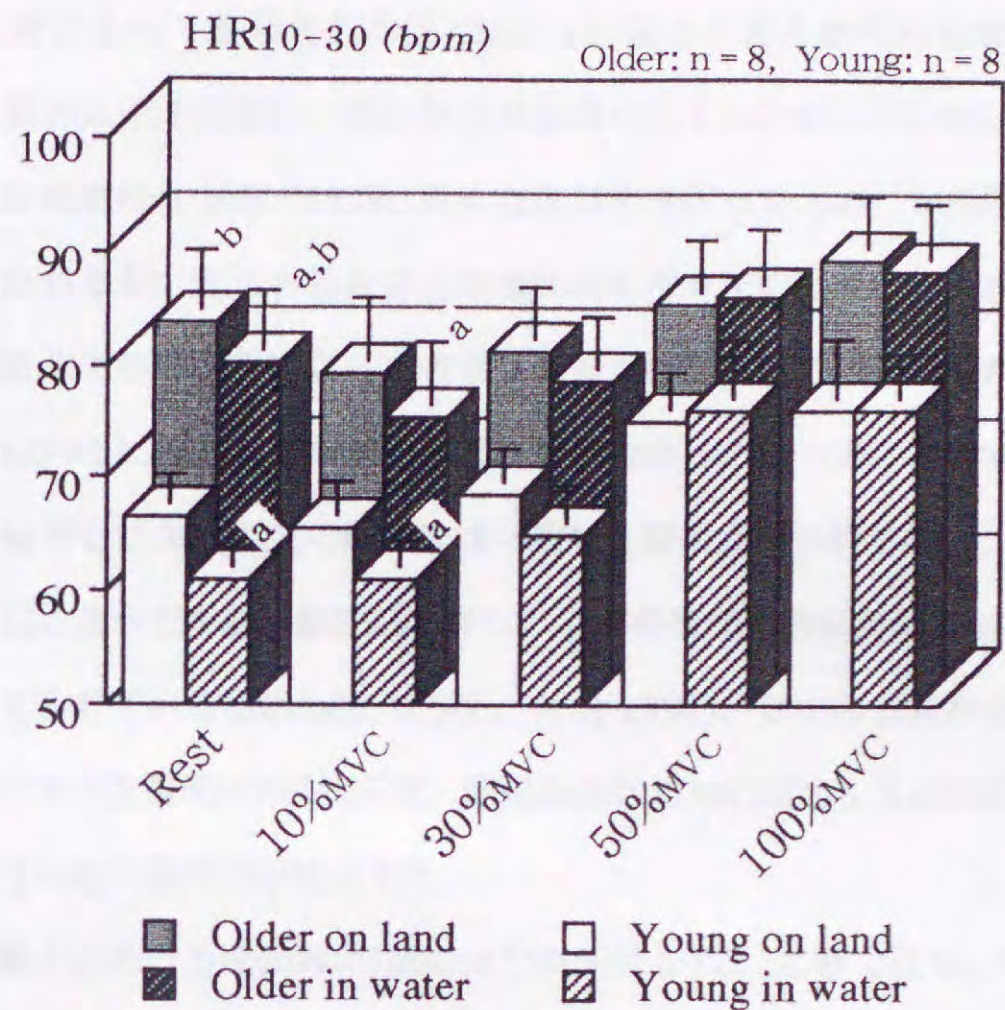


Fig. 2.4.5 Heart rate responses during isometric knee extension exercise with or without head-out water immersion. Columns and bars represent means \pm SE. Significant differences between on land and in water represent, "a: $p < 0.05$ ". Significance of differences between young and older represent, "b: $p < 0.05$ ".

陸上安静時のHRおよび血圧値をY群とO群で比較したところ, いずれの指標もO群で有意な高値が観察された(図2.4.4)。加齢に伴って安静時の血圧が上昇することは一般に良く知られているが, その機序を特定することは困難な場合が多く, 本研究の被験者も本態性高血圧もしくはその境界域に当たる者と考えられた。また, 加齢に伴う安静時HRの変化については, 一般に内因性心拍数の減少に伴うHR低下が知られている(Lakatta 1995)。しかし, 安静時のHR調節では加齢に伴う心臓副交感神経活動の減弱化が惹起され(美和ら 1996, Okadaら 1996, 岡田ら 1996), 安静時HRは加齢に伴って増加するもしくは変化しない可能性が指摘されており(中西ら 1989, Shephard 1993), 本研究の結果について加齢変化の機序を特定することは困難であった。

一方、陸上と水中において安静時のHRおよび血圧値を比較したところ、Y群とO群の両群とも水中安静時のHRに陸上安静時と比較して有意な低値が観察されたが、血圧値に有意な変化は認められなかった(図2.4.4)。浸水安静時のHR低下は低圧系および高圧系の圧受容器反射によって惹起される(Krasny 1996)と考えられているが、先行研究ではHOWI時の動脈血圧の応答に一致した結果は得られていない。Gabrielsenら(1990)は、ヒトを対象に侵襲的な方法でHOWI時の血圧測定を行っており、比較的信頼性の高い測定条件と思われるが、彼らの報告では剣状突起位浸水時の動脈収縮期血圧に上昇傾向がみられ、肩位までのHOWIによって有意な上昇が観察されている。しかし本研究では、動脈血圧にHOWIによる有意な変化は観察されなかった。一方、水中安静時の中心静脈圧について報告した先行研究では、ほぼ一致した結果が得られており、HOWI時には静脈還流の増加によって中心静脈圧は上昇し、心房伸展受容器反射によってHR低下が惹起されると考えられている(Miwaら 1996b, 杉山 1997)。以上のことから、本研究において観察された水中安静時のHR低下は、静脈還流の増加に起因した心房伸展受容器反射によって惹起された可能性が示唆された。

続いて、陸上における運動時のHRおよび血圧値をY群とO群で比較したところ、HRはO群で高値となる傾向を示したが、両群間で有意差は認められなかった(図2.4.5)。また、脈圧(PP)以外の血圧値は全ての運動強度でO群に有意な高値が観察された(図2.4.4)。運動時のHRおよび血圧値がO群で高値となった理由としては、O群ではこれらの指標が安静時から高値であったことが考えられ、運動負荷に対するHRおよび血圧の反応性にはY群とO群で殆ど差はみられなかった。

次に、陸上と水中において運動時のHRを比較したところ、Y群とO群の両群とも低強度運動時(10%MVC)のHRがHOWIによって有意に減少したが、運動強度の増加に伴ってその差は僅少化し、高強度運動時(50%MVC)には、陸上と水中のHRに差は認められなかった(図2.4.5)。本研究における運動持続時間は30秒間であったことから、運動中のHR応答に関与する調節系は主に中枢からの指令(CC)と、筋の機械受容器反射が考えられる(RowellとO'Leary 1990)。低強度運動時におけるHRの増加は、主にCCによる心臓副交感神経活動の減弱化によって惹起されることから、HOWIによる心臓副交感神経活動の賦活化との相互作用によって、陸上より水中でより低いHRが観察された可能性が示唆された。一方、高強度運動時のHR調節では、CCおよび筋の機械受容器からの入力によっ

て主に交感神経活動の賦活化が惹起される(RowellとO'Leary 1990)が、HOWIによる低圧受容器反射は心臓交感神経活動への影響が弱いことから(麻野井 1996, 亀谷ら 1997), 結果として陸上と水中のHRに差がみられなくなったと推察された。

また、陸上と水中において運動時の血圧値を比較したところ、Y群では運動強度の増加に伴って水中での血圧上昇が顕著となる傾向を示し、中・高強度運動時(30%および50%MVC)のDBP_{peak}に陸上と比較して有意な高値が観察された(図2.4.4)。先行研究では安静時の血圧がHOWIによって上昇したという報告はあるが、運動時の血圧がHOWIによって上昇したという報告は稀である。Fujisawaら(1996)は、健康若年男性(24±3歳)を対象に、本研究とほぼ同様の運動負荷装置を用いて水中運動時の血圧応答を測定し、有意ではないものの陸上より水中でより低い血圧値が観察されている。彼らの報告(Fujisawaら 1996)では、60%MVC強度で約60秒間の等尺性運動を行っており、本研究と比較すると非常に高強度の運動であった。30秒間以上にわたる等尺性運動では筋内に蓄積する代謝産物によって筋内化学受容器が刺激され、反射的に血圧上昇を惹起することが知られている(RowellとO'Leary 1990)。Fujisawaら(1996)の報告では、陸上および水中とも運動中の血圧が時間経過に伴って60 mmHg以上も漸増し、陸上と水中におけるExhaustion時(両者とも約60秒後)の血圧値に殆ど差はみられないことから、高強度負荷に対する心機能亢進や血管収縮応答は浸水によって遅延する可能性が示唆された。

HOWI時には、高強度の等尺性運動中においても左心室拡張末期径は増加傾向を示すことから(Fujisawaら 1996)、静脈血管系での容量負荷は増加すると考えられる。また水中運動時には、左心室収縮末期径も増加することから(Christieら 1990, Fujisawaら 1996, Sheldahlら 1984)、動脈血圧の上昇もしくは心筋収縮力の低下が惹起されたと考えられ、本研究のY群において観察された水中運動時のDBP_{peak}の上昇は、主に末梢血管抵抗の増大によって惹起された可能性が考えられる。等尺性運動時には活動筋内圧の上昇によって血流が阻止されることから、本研究のY群では中・高強度運動時において活動筋内圧の上昇が心肺容量受容器反射による末梢血管拡張作用を凌駕し、結果としてHOWI時にDBP_{peak}の上昇を惹起した可能性が考えられた。

一方、O群ではHOWIによって低・中強度運動時の血圧上昇が抑制された。先行研究では、若年者群と比較して弱いものの中高年齢者群においてもHOWIによって中心循環における容量負荷が増加する可能性が報告されており(美和ら 1993, Tajimaら 1988),

HOWI 時には心房伸展受容器反射による筋交感神経活動の減弱化によって末梢血管が拡張していたと考えられる(美和ら 1993, Tajimaら 1988, Tanakaら 1999). しかし, この低圧受容器反射はY群においても生じていたと考えられ, またMiwaら(1996a)は, 水中安静時の筋交感神経活動は高齢者群より若年者群で低値であり, HOWI による筋交感神経活動の抑制作用は加齢によって減弱化することを報告している. 本研究では, より強い末梢血管拡張が生じていたと考えられるY群において, 運動時の血圧値がHOWI によって増加傾向を示したことから, 容量受容器反射による機序のみから考察する場合, Y群とO群にみられた血圧応答に矛盾が生じる.

本研究で得られた指標からこの矛盾を解決することは困難と思われるが, 考慮すべき問題としてY群とO群に負荷された等尺性運動における絶対負荷強度の差が考えられる. Y群のMVCはO群より約30%程高く, 筋量もY群で大きいことが推察される. 従って, 各最大下強度での筋収縮運動では, 各被験者とも生体負担度はほぼ同一であったと考えられるが, 筋内の循環を阻害する筋内圧はY群でより高値であった可能性が考えられる. さらに, 活動筋の機械受容器からの求心性情報はY群においてより高値であったと考えられ, 反射性に心機能の亢進および非活動肢での血管収縮を惹起した可能性も考えられる. しかし, これらの考察は推測の域に止まっており, 等尺性筋収縮時の血圧応答においてY群とO群に差を生じた生体応答の機序については, 今後更なる検討が必要と思われる.

2.4.5. まとめ

以上の結果から, 若年者における高強度での等尺性運動時には, HOWI による血圧値の上昇が惹起されたが, 中・高年齢者においては低・中強度運動時の血圧値がHOWI によって有意な低値となった. 従って, 陸上における軽度の運動時にも血圧の上昇が禁忌となる者に対して, 低強度での水中運動の有用性が期待された. しかし, このHOWI による運動時の血圧上昇の抑制効果については, その機序が完全に解明されていないことから, 今後さらに慎重な検討を行っていく必要があると思われる.

第5章

研究課題5： 麻酔下ラットにおける急速入水・出水時の血圧応答

2.5.1. 緒言

入水・出水に伴う静脈還流の増加とその消失は、心臓血管系における恒常性を急速に乱す。浸水時には、下肢および腹腔内に貯留した血液が静水圧によって押し上げられ、静脈還流の増加に伴って中心静脈血圧が上昇する(Gabrielsenら 1990, Prefautら 1976, Rischら 1978a)。中心血管系における血液貯留の増大は心肺容量受容器の圧反射を惹起し、心機能の抑制および末梢血管の拡張によって負荷の減弱化を図る(麻野井 1996)。しかしながら、浸水部位における血管拡張は静水圧の影響によって貯留血の増加に殆ど貢献せず、左心室拡張末期径の増加によるスターリング効果によって一回拍出量の増加を生じる(Krasney 1996)ことから、このとき増加した心拍出量に見合うだけの末梢血管抵抗の減弱化が生じなければ、動脈血管系の圧反射によって心拍数(HR)の減少が惹起される(麻野井 1996)。

入水動作を急速に行った場合、静脈還流の急速な増加によって中心血管系での一時的な過度の血液貯留が生じ、中心静脈血圧にOvershoot状の一過性血圧上昇が観察される(Rischら 1978b)。これらの中心静脈系における急速な負荷の増加は、動脈血管系においても一過性の昇圧現象を惹起させる可能性が考えられるが、急速入水に伴う動脈血圧の変化について検討した報告は見当たらない。急速入水時における動脈血管系での負荷増大の可能性は、血管コンプライアンスの低下した高齢者において、心臓血管系や脳血管系での事故の発生要因となる可能性を強く示唆するものである。

また、浸水中は容量受容器反射によって筋交感神経活動が減弱化され、末梢血管は拡張する(麻野井 1996)。この交感神経活動による血管調節は、反射応答にある程度の時間を要することから、出水によって圧受容器からの求心性刺激が消失した後も、暫く血管拡張は持続する可能性が考えられる。急速出水時には静水圧の低下による下肢への血液移動に加え、浸水中に惹起された血管拡張作用によって、より顕著な下肢での血液貯留が惹起され、起立耐性が低下する可能性が考えられる。

そこで本研究では、急速入水・出水時の血液シフトに対する心臓血管系の適応能力について基礎的検討を行うことを目的として、麻酔下ラットに対して中立温での剣状突起位

浸水を負荷し、急速入水および出水時の血圧・心拍応答を観察した。

2.5.2. 方法

A. 処置

12週齢のWistar系雄ラット(体重 344 ± 4 g, $n=7$)に対して気管切開を処置し、自発呼吸下において半開放性にイソフルラン吸入麻酔(導入時: 3.0%, 処置中: 2.0%, 測定中: 1.5%/1リットル O_2 /min)を行った(図2.5.1)。平均動脈血圧(MAP)は左総頸動脈から下行大動脈心臓位へ、中心静脈圧(CVP)は右外頸静脈から右心房位へ、それぞれポリエチレン製カテーテル(内径0.58mm, 外径0.96mm, 夏目製作所)を挿入して記録した。各カテーテルは、圧トランスデューサ(ライフキットDX-200, 日本光電)に接続し、血圧信号をアンブユニットで増幅してポリグラフ(ポリグラフ363, 変換器用増幅ユニット1829, 日本電気三栄)でモニターした。また、心電図(ECG)を胸部双極誘導法によって導出し、ポリグラフユニットにて瞬時心拍数を算出した(それぞれ生体電気用増幅ユニット4124, 瞬時計ユニット1321, 日本電気三栄)。血圧波形, ECGおよびHRは、デジタルオシロレコーダ(オムニエースRT3304, 日本電気三栄)で経時的に記録した。

B. 実験方法

ラットはTiltテーブル上に仰臥位で固定し、圧トランスデューサを心臓位に設置した。浸水条件では、Tiltテーブルを水槽(320×225×130mm)内に30° Head-up Tilt (HUT)状態で設置し、厚さ10 μ mのポリエチレン袋でラットの全身を覆うDry-immersion法で、剣状突起位までの中立温浸水(34℃)を行った。ラットの急速入水・出水は水槽内と恒温槽内に小型ポンプを設置し、約7秒間で注水・排水を行った。浸水中は水槽内の水を循環させ、恒温槽を用いて水温を一定に維持した。また、ラット背面にサーモスタット付きヒートパットを設置し、直腸温をモニターして37℃を維持させた。

実験I: 初めに、姿勢変化および入水・出水に伴う血圧およびHRのBaseline値の変化を観察した。姿勢変化および入水・出水は、仰臥位→30° HUT-(注水)→Immersion-(排水)→Emersionの順に行い、各条件とも30分間の定常応答を観察した。

実験II: 実験I終了後、血圧およびHRの定常性を確認し、30° HUT姿勢での急速入水を行った。急速入水は実験Iと同様の方法で行い、入水後5分間の経過観察を経てラットの

血圧およびHRが安定したのを確認した後、続いて急速出水を行った。急速入水・出水は5分間の経過観察をはさんで2~3回繰り返して行い、呼吸性変動による影響を考慮して、MAP変化の最も大きかった試行を解析データとして用いた。

対象：Wistar系雄ラット(12週齢，体重 344 ± 4.4 g) 7匹

麻酔：半開放性吸入麻酔(気管切開カテーテル)
 手術中 " 2.0% + 100%酸素1リットル/min
 測定中 " 1.5% + "

カニューレション：カテーテル内径0.58 mm，外径0.96 mm
 動脈圧測定：左総頸動脈，静脈圧測定：右外頸静脈

心電図：胸部双極誘導(針電極)

浸水：Dry-immersion法(厚さ0.01 mmポリエチレン袋)
 ポンプにて注水・排水

水温：34℃ (恒温槽にて管理)
 室温：25.3±0.6℃
 湿度：53.4±2.4%

ポリグラフ363 (日本電気三栄)
 心電図：生体電気用増幅ユニット4124
 心拍数：瞬時計ユニット1321
 血圧：変換器用増幅ユニット1829

圧トランスデューサー (日本光電)
 ライフキットDX-200

デジタルオシロレコーダ (日本電気三栄)
 オムニエースRT3304

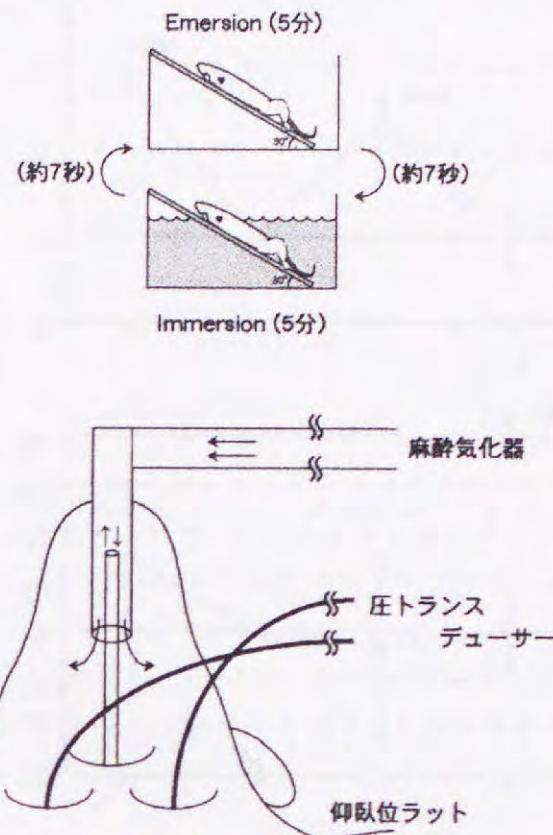


Fig. 2.5.1 Surgical preparation and experimental system of rapid immersion and emersion in the anesthetized rat.

C. 実験結果の統計処理方法

実験Iにおける姿勢変化および入水・出水に伴う血圧およびHR応答の有意性は、Bonferroni検定を用いて評価した。また、実験IIにおける入水・出水後の血圧およびHR応答の経時的変化の有意性も、同様にBonferroni検定を用いて評価し、両者とも確率水準5%未満で有意性があると判断した。

2.5.3. 結果

実験時の室温は 25.3 ± 0.6 ℃，湿度は 53.4 ± 2.4 %であり，浸水時の水温は恒温槽と循環装置によって34℃に維持された。また，ラットの直腸温をモニターし，サーモスタット付きヒートパットによって37℃を維持させた。

実験Iでは，仰臥位→30° HUT→Immersion→Emersionの各条件(各30分間)とも，終了直前の20秒間の平均値を求めて比較を行った。姿勢変化および入水・出水に伴う条件変化によってCVPに有意な変化が観察された(図2.5.2)。一方，MAPおよびHRは姿勢変化

(仰臥位→30° HUT)によってbaseline値に低下傾向が観察されたが、両者とも各条件の定常応答に有意差は認められず、入水・出水後の定常応答にも有意な変化はみられなかった。

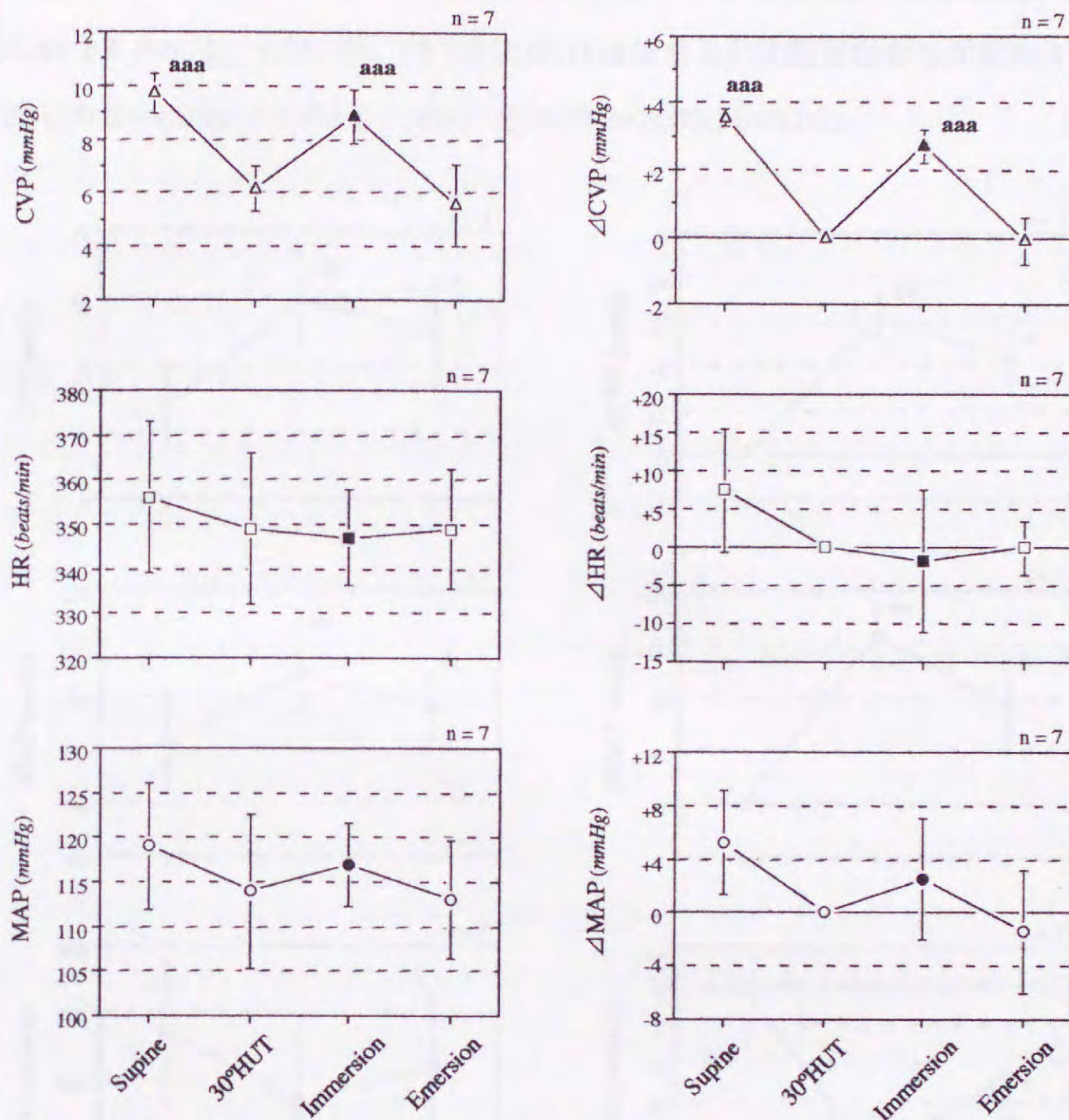


Fig. 2.5.2 Changes in baseline of MAP, HR, and CVP under 4 condition. Symbols and bars represent means \pm SE. Significant differences from 30° HUT represent, "aaa: $p < 0.001$ ".

実験IIでは、急速入水直後にMAPおよびCVPが一過性に顕著に上昇し(それぞれ $+12.6 \pm 2.5$ mmHg, $+3.1 \pm 0.5$ mmHg, Δ mean \pm SE, 両者とも $p < 0.01$), HRは一過性に減少した(-9.1 ± 1.3 bpm, $p < 0.001$, 図2.5.3). 入水40~60秒後では、CVPに依然として有意な高値が観察されたが($+2.2 \pm 0.6$ mmHg, $p < 0.05$), MAPおよびHRは入水前の値へ回復する傾向が認められ($+7.2 \pm 3.6$ mmHg, -4.6 ± 2.6 bpm, 両者ともNS), MAPは入水直後の値から有意に低下した($p < 0.05$). 一方、急速出水時にはMAPおよびCVPに顕

著な低下が観察され($-12.5 \pm 1.6 \text{ mmHg}$, $-3.8 \pm 0.4 \text{ mmHg}$, 両者とも $p < 0.001$), HR は有意に増加した($+9.4 \pm 2.1 \text{ bpm}$, $p < 0.01$, 図2.5.4). 出水40~60秒後では, 出水直後と比較してMAPに回復傾向($p < 0.05$)が観察されたが, 出水前の値より有意な低値であり($-5.3 \pm 1.8 \text{ mmHg}$, $p < 0.05$), CVPおよびHRは依然として顕著な変化が維持された($-3.4 \pm 0.5 \text{ mmHg}$, $+8.7 \pm 2.2 \text{ bpm}$, それぞれ $p < 0.01$, $p < 0.05$).

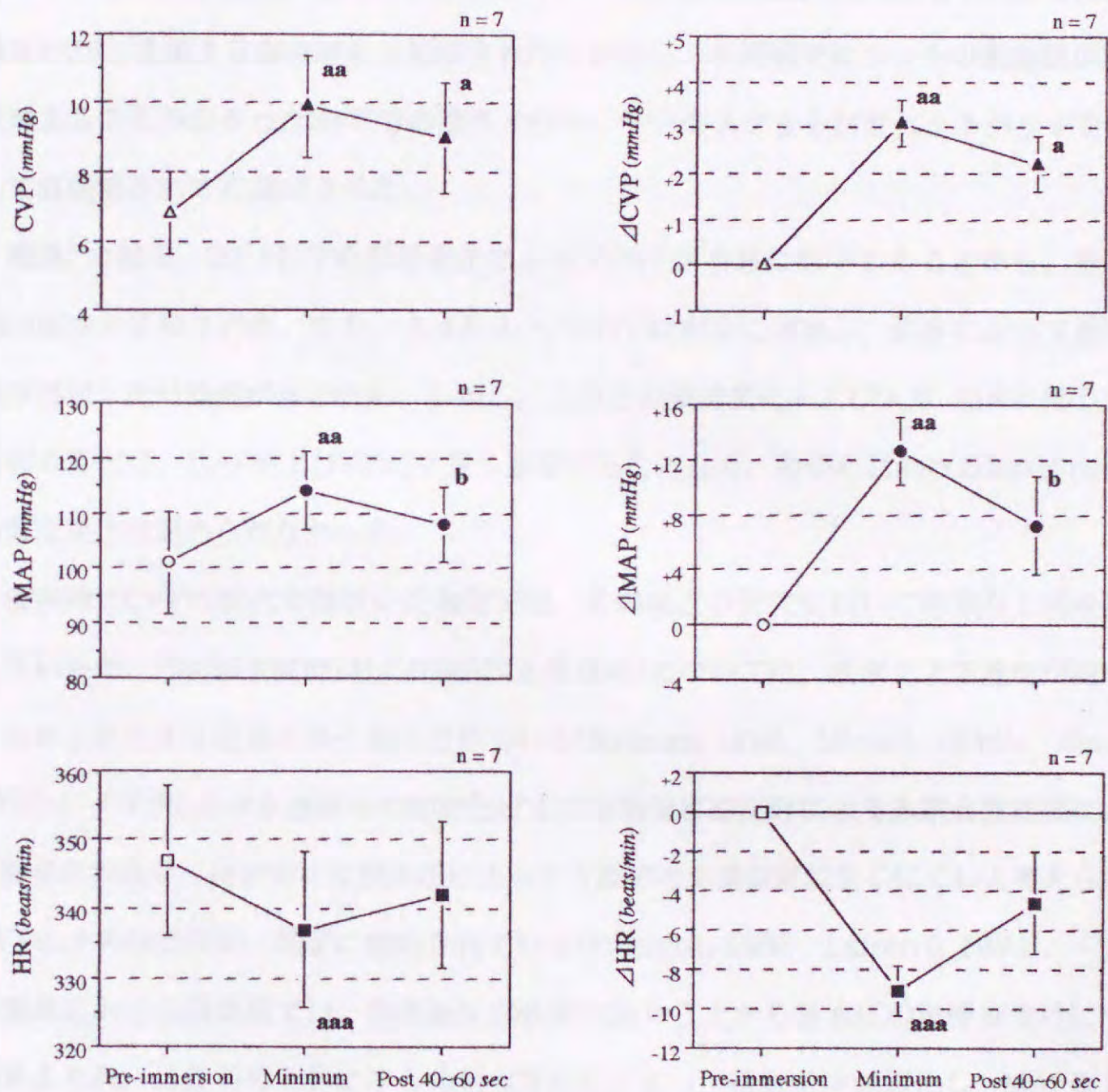


Fig. 2.5.3 Changes in CVP, MAP, and HR with rapid immersion. Symbols and bars represent means \pm SE. Significant differences from pre-immersion value represent, "a": $p < 0.05$, "aa": $p < 0.001$, "aaa": $p < 0.01$ ". Significance of differences from peak value represent, "b": $p < 0.05$ ".

2.5.4. 考察

本研究では, 急速入水・出水に伴う血液分布の変化と, 心臓血管系の過負荷に対する適応能力について基礎的検討を行うことを目的として, 麻酔下ラットに対して中立温での

剣状突起位浸水を負荷し、急速入水および出水時の血圧・心拍応答を観察した。

本研究で用いたDry-immersion法は、ヒトを対象とした長期浸水実験などで用いられており、身体を濡らすことなく静水圧を負荷することが可能となる。本研究では、入水・出水の繰り返しに伴うラット体表の濡れが、ラットの循環応答に影響する問題を解決する為に、このDry-immersion法を用いた。また、Dry-immersion法を用いた予備実験の結果、従来各種動物の中立温として知られていた37℃での浸水(Krasney 1996)では、直腸温が38℃を越える場合が多く観察されたことから、本研究ではラットの直腸温が38℃を越えることのなかった34℃での浸水を行い、サーモスタット付きヒートパットを併用して直腸温を37℃に維持させた。

実験Iの結果、30° HUTの姿勢変化によってCVPが有意に低下したことから、静脈還流の減少が示唆された。また、入水によってCVPは有意に増加し、浸水によって静脈還流が増加した可能性が示された。しかし、これらの姿勢変化および入水・出水に伴う血液分布の変化は、MAPおよびHRに大きく影響することなく、各条件におけるBaseline値に有意な変化は認められなかった。

浸水時にCVPの変化を観察した報告では、その殆どの研究において有意な上昇を観察しているが、HR(減少傾向)およびMAP(上昇傾向)については、浸水による変化が認められなかったとする研究も多く報告されている(Krasney 1996, Miwaら 1996b, Rischら 1978a)。CVPにおける過負荷の減弱化は主に容量受容器反射による末梢血管拡張によって獲得されるが、浸水時には静水圧によって下肢での血液貯留は生じにくいと考えられ、CVPの上昇は長時間、顕著に観察されている(Johansen 1998, Larsenら 1994)。一方、動脈系における過負荷では、動脈血圧が比較的高いことから静水圧の影響を受けにくいと考えられ、前負荷の上昇に伴う末梢血管拡張によって後負荷は減弱化し、MAPの上昇や圧反射によるHRの減少は観察されにくくなると考えられた。

入水・出水時には、心臓血管系に対して一過性に過負荷を生じる可能性が考えられ、とくに入水動作を急速に行った場合、静脈還流の急激な増加によってCVPにOvershoot状の一過性昇圧現象が惹起される(Rischら 1978b)。本研究においても急速入水直後のCVPに一過性の昇圧現象が観察され、容量血管系の圧負荷が急速に上昇したことが示された(図2.5.3)。一方、中立水温での急速入水時におけるMAP応答について報告した先行研究は見当たらない。本研究の結果では、MAPは急速入水直後に一過性の顕著な上昇が

観察され、HRは有意に減少した。このHRの減少は動脈圧受容器反射によって惹起されたと考えられ、高圧系の負荷が一過性に増加した可能性が考えられる。この一過性の昇圧現象は入水直後から観察されたことから、急速な容量負荷の増加に対する心臓でのスターリング効果(亀谷ら 1997, Hajduczukら 1987, Krasney 1996)によって一回拍出量および心拍出量の増加が惹起され、その後遅れて高圧系および低圧系の圧反射に伴ったHRの減少および末梢血管の拡張によって圧負荷が減弱化した(麻野井 1996, 亀谷ら 1997, Krasney 1996)と推察された。高圧系における急速な血圧上昇は、血管コンプライアンスの低下した高齢者などでは脳血管障害の危険因子となる可能性が考えられる。従って、生体に対する影響が比較的少ないと考えられる中立温での浸水時にも、急速入

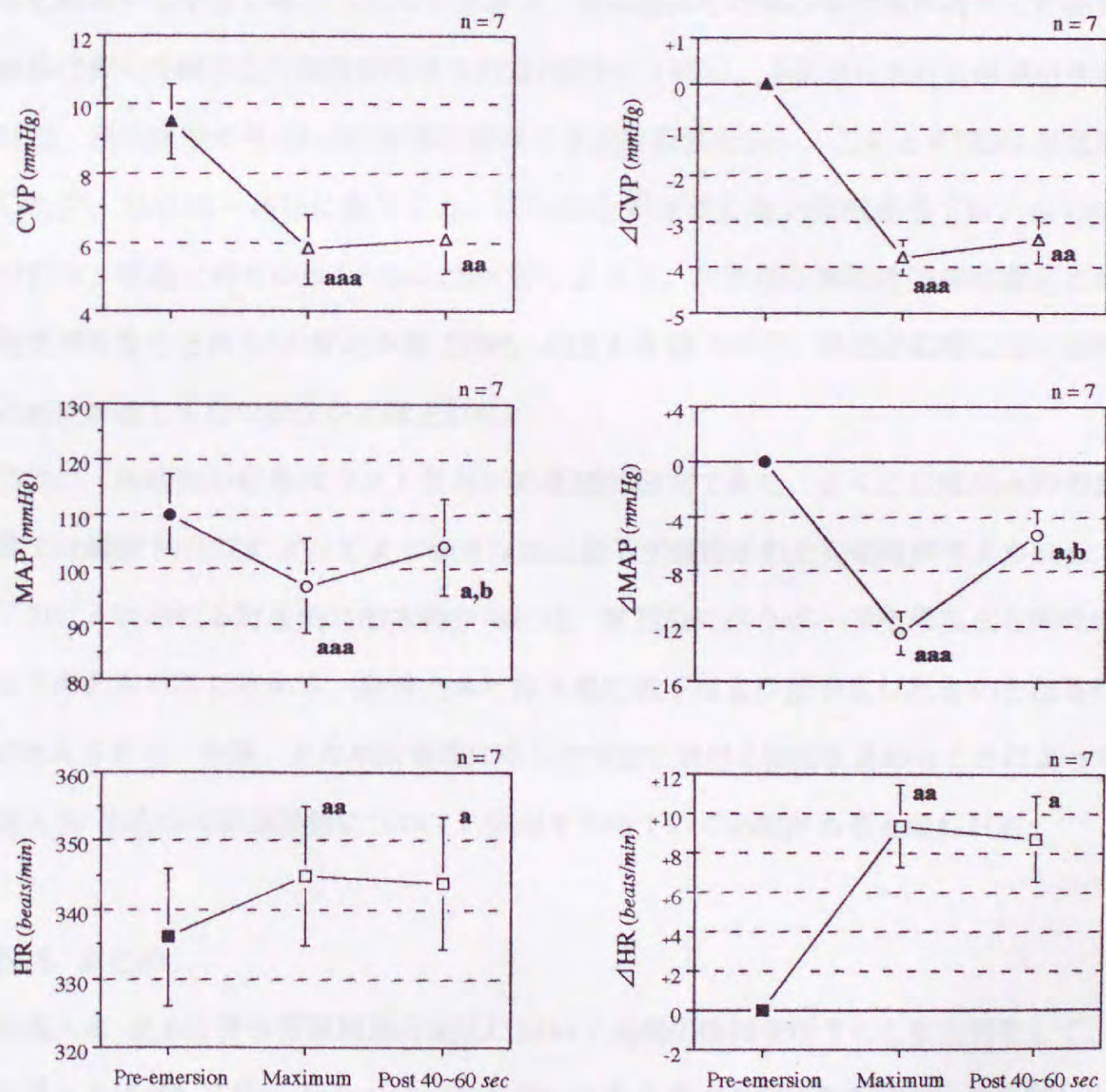


Fig. 2.5.4 Changes in CVP, MAP, and HR with rapid emersion. Symbols and bars represent means \pm SE. Significant differences from pre-emersion value represent, "a: $p < 0.05$, aa: $p < 0.001$, aaa: $p < 0.01$ ". Significance of differences from peak value represent, "b: $p < 0.05$ ".

水に伴う一過性の血圧上昇について十分考慮する必要があると考えられた。

一方、中立水温での急速出水時におけるCVP、MAPおよびHR応答について検討した報告は見当たらない。本研究の結果、急速出水によってCVPは有意に低下し、出水40～60秒後においても有意な低値となった(図2.5.4)。このときMAPは一過性に有意に低下し、出水40～60秒後には出水直後から有意に上昇したが、依然として出水前値と比較して有意な低値であった。また、HRも出水直後から40～60秒後において高値であったことから、急速な静脈還流の減少に起因して頸脈反射が惹起されたと考えられた。浸水中は容量受容器反射によって筋交感神経活動が減弱化され、末梢血管の緊張性は低下する(Echtら 1974, Krasney 1996, 美和ら 1993)。この交感神経活動による血管調節は、反射性応答に時間を要すると考えられることから、受容器からの求心性刺激が消失した後も血管拡張は暫く持続する可能性が考えられる(麻野井 1996)。本研究における急速出水時のCVPは、出水直後から40～60秒後において有意な低値を示し、このときHRは有意に増加したが、MAPは一過性に低下した。CVPの上昇を伴わない頸脈応答では、左心室の「空打ち」状態に伴うBezold-Jarisch反射によって、血管迷走神経性失神が惹起される可能性があることから(小林と小原 1998, 山本と佐藤 2000)、急速出水時には一過性に起立耐性が低下する可能性が示唆された。

最後に、本研究の結果はラットを用いた基礎的研究であり、とくに急速出水時の血圧応答では麻酔やHUTによってより顕著な血圧低下が惹起された可能性が考えられる。意識下のヒトにおける随意的な出水動作時には、筋活動に伴うポンプ作用なども同時に生じると考えられることから、急速出水に伴う血圧低下はより僅少化したものとなる可能性が考えられる。今後、より臨床場面に即した環境における検討を進めることによって、急速入水・出水時の循環動態についての知識を深めていく必要があると思われる。

2.5.5. まとめ

急速入水・出水に伴う循環動態の変化について基礎的検討を行うことを目的として、麻酔下ラットに対してDry-immersion法を用いた中立温での剣状突起位浸水を負荷し、急速入水および出水時の血圧・心拍応答を観察したところ、以下の知見が得られた。

急速入水時には、入水直後のCVPおよびMAPに一過性の昇圧現象が観察され、それに伴ってHRは減少したことから、一過性に動脈血管系での過負荷が生じた可能性が示唆さ

れた。この一過性の昇圧現象は入水直後に観察されたことから、急速な容量負荷の増加に伴う心臓でのスターリング効果によって後負荷の上昇が惹起され、その後遅れて、高圧系および低圧系の圧反射によって圧負荷が減弱化されたと推察された。

また、急速出水時にはMAPが一過性に低下し、CVPの上昇を伴わない頻脈応答が惹起されたことから、急速出水時には一過性に起立耐性が低下する可能性が示唆された。従って、循環調節系への影響が比較的少ないと考えられている中立水温でも、急速入水・出水によって心臓血管系および脳血管系に対する過負荷が惹起される可能性が示唆された。

「本報告は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。本調査は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。本調査は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。

第III部 総括

第III部 総括

本報告は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。本調査は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。本調査は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。

本報告は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。本調査は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。本調査は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。

本報告は、神戸大学経済学研究センターが2011年度から2013年度にかけて実施した『経済学系・経済学系職員による調査』という調査の結果をもとに作成されたものである。

第1章 研究課題の総括

本研究では、頸下浸水(HOWI)に伴う血液シフトが運動時もしくは急速入水・出水時の生理機能変化に与える影響について検討を行った。その結果、HOWI環境は必ずしも生体にとって優しい環境とはいえず、条件によっては呼吸循環系機能に対して過負荷を生じる可能性が指摘された。本章では、各研究課題によって得られた成果を相互に検討し、運動時の換気応答、心拍(HR)応答、血圧応答、および急速入水・出水時の血圧応答に及ぼすHOWIの影響について、それぞれ総括した。

3.1.1. 運動時の換気応答に及ぼすHOWIの影響について

HOWI時には、肺毛細血管血流量の増加や換気血流比の改善によって換気効率が向上することが知られており(Beginら 1976, Derionら 1990, Guyattら 1965), 研究課題1における浸水安静時の酸素摂取に対する換気当量($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)にも同様の傾向が観察された(図2.1.2)。しかし、中～高強度での運動時には等しい酸素摂取量($\dot{V}O_2$)時の換気量(\dot{V}_E)がHOWI時により高値となり、呼吸数(RR)の増加に依存した \dot{V}_E の増加によって、換気効率は有意に低下した(図2.1.2)。HOWI時には、肺毛細血管内での血液貯留によって末梢気道の閉塞や肺コンプライアンスの低下が生じ、動的肺機能が低下するため(宮本ら 1994, Prefautら 1976, 木村ら 1997), HOWIによる肺の換気運動制限によって換気亢進時の呼吸様式が特異的に変化する可能性が考えられる。

そこで研究課題2では、換気亢進時における肺の換気運動能力に及ぼすHOWIの影響について検討することを目的として、剣状突起位および頸部位までの浸水時に努力呼出時のFlow-Volume曲線と最大換気量(MVV)を測定し、陸上環境との比較を行った。その結果、MVVは水位の上昇に伴って有意に減少し、その時の呼吸様式には一回換気量(TV)の減少を伴ったRRの増加が観察された(図2.2.2)。このHOWIに伴うMVV時の呼吸様式の変化は、研究課題1における中～高強度での水中運動時の換気応答と類似しており、HOWIによって換気亢進時の呼吸様式は浅く速い呼吸へと変換することが示された。また、Flow-Volume曲線においてHOWIによる末梢気道の閉塞傾向が観察され、HOWI時の呼吸様式の変化は肺毛細血管における血液貯留によって肺コンプライアンスが低下したことに起因する可能性が示唆された(FarhiとLinnarsson 1977, 宮本ら 1994)。

肺コンプライアンスの低下は換気亢進時における呼吸筋の仕事量を増大させ、このと

きエネルギー消費量を最少にする反射性調節によって、TVの減少とRRの増加が惹起される(KaufmanとForster 1996)。従って、研究課題1の中～高強度運動時および研究課題2のMVV中に観察されたHOWIに伴う呼吸様式の変化は、肺コンプライアンスの低下に伴う呼吸筋の仕事量の増加によって、TVとRRのOptimal Pointがリセットされたことに起因すると考えられた。また、RRの増加に依存した換気亢進では死腔換気量の増加によって換気効率が低下することから、研究課題1で観察された換気効率の低下(\dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} の上昇)は、HOWIに伴う呼吸様式の変化によって惹起される可能性が示唆された。

しかし、研究課題3において行われた水面上での腕運動では、Control条件と比較して呼吸様式に変化はみられず、研究課題1および2において観察された様なHOWIの影響は認められなかった(表2.3.1)。この要因の一つとして、腕運動と脚運動における絶対負荷強度の差が考えられる。研究課題3では、活動筋量の少ない腕運動を用いた結果、最大酸素摂取量($\dot{V}_{O_{2max}}$)や最大換気量は比較的低値となり、全身運動を行った研究課題1の結果と比較して約60%程度の運動強度であった(表2.1.2, 表2.3.1)。研究課題1において観察された呼吸様式および換気効率の変化は、主に中強度(約60% $\dot{V}_{O_{2max}}$)以上の運動時であり、低強度の運動時には陸上と水中で差はみられなかったことから(図2.1.3)、研究課題3の腕運動時には、呼吸様式や換気効率に及ぼすHOWIの影響が顕在化するまで生体を追い込むことはできなかった可能性が考えられた。

3.1.2. 運動時のHR応答に及ぼすHOWIの影響について

HOWI時には、静脈還流の増加に起因した圧受容器反射によってHRは減少傾向を示し(Krasney 1996)、この傾向は水中運動時のHR応答にも観察されている(Christieら 1990, Connellyら 1990, Periniら 1998, Sheldahlら 1984)。しかし、運動時のHR応答に与えるHOWIの影響については、先行研究において一致した結果は得られていない。研究課題1では、一般に行われている水中歩行・走運動を模した流水プールでの「その場駆け足運動」を行い、等しい \dot{V}_{O_2} 時のHRを陸上トレッドミル歩行・走運動と比較したところ、低～中強度運動時に水中で低値となる傾向が観察された(図2.1.1)。同様の傾向は、陸上と水中で自転車運動を行ったPeriniら(1998)の報告にもみられるが、同じ自転車運動を用いたChristieら(1990)およびConnellyら(1990)の報告では、中～高強度運動時にのみ有意に低いHRが観察され、低～中強度においてHOWIの影響は認められていない。

これらの報告(Christieら 1990, Connellyら 1990, Periniら 1998)においてHR応答に差が生じた要因の一つに、動作リズムの違いが考えられる。Christieら(1990)およびConnellyら(1990)の研究では、ペダル回転数を増加させることによって水中運動時の負荷を調節しており、負荷強度ごとに筋収縮のリズムが異なっていた。運動のリズムはその時のHR応答に影響を及ぼすことが知られており(Hagbergら 1981, ChavarrenとCalbet 1999), Christieら(1990)およびConnellyら(1990)の報告におけるHR応答には、陸上と水中におけるペダル回転数の差が影響した可能性が考えられる。一方, Periniら(1998)は60回/分のペダル回転数における水の粘性抵抗が25Wに相当することを予備実験から求め、この値を差し引いた負荷を水中運動時に用いている。従って、陸上運動と比較して運動時の動作やリズムなどの差異が少なく、HR応答に及ぼすこれらの影響を排除できていたと考えられる。研究課題1において観察されたHR応答は、Periniら(1998)の結果を支持するものであったが、運動時の動作やリズムが異なることから、彼らの報告と同一の機序によって惹起された可能性について言及することは出来なかった。

この様に、先行研究で用いられた運動負荷方法では、陸上と水中で運動時の動作やリズムが大きく異なっており、水中運動時に観察される生体応答の変化にHOWI以外の要因が影響している可能性が考えられる。HOWI時に陸上と全く同一の運動を負荷する方法としては、水面上で運動する方法(HayashiとYoshida 1999)や水面下で等尺性運動を行う方法(Fujisawaら 1996)などが考えられるが、これらの方法を用いた先行研究では、それぞれ1種類の強度でしか運動を行っておらず、HOWIの影響についてより広範の運動強度における検討は報告されていない。そこで本研究では、研究課題3として水面上での腕クランキング運動時のHR応答について検討し、また研究課題4では水中における等尺性運動時の血圧応答についての検討を行った。尚、研究課題4については次の項目の「運動時の血圧応答に及ぼすHOWIの影響について」で総括する。

研究課題3では、剣状突起位までのHOWI中に水面上で腕運動を負荷したことから、HOWIを伴わないControl条件と全く同一の運動を負荷できていたと考えられる。研究課題3の結果、運動時のHRはHOWIによって約8~13拍/分ほど低値となり、このHRの減少傾向は運動強度によらず安静から最大運動までほぼ一定に観察された(図2.3.3)。Ngら(1987)は、下肢への加圧装置(Military Antishock Trouser: MAST)によって静脈還流を増加させた状態で腕クランキング運動を負荷した結果、研究課題3とほぼ同様のHR応答

を観察している。従って、陸上と水中で同一の運動を負荷した場合、HOWIによるHRの減少作用は運動強度によらずほぼ一定に機能する可能性が示唆された。また、Ngら(1987)の報告では、腕運動中の心拍出量(\dot{Q})および動脈血圧が下半身陽圧負荷によって有意に増加しており、研究課題3における腕運動時のHRがHOWIによって減少した機序として、HOWIによる \dot{Q} の増加および動脈血圧の上昇の可能性が示唆された。

また、研究課題3において心電図RR間隔変動の周波数解析を行った結果、安静時に観察されたHOWIに伴う高周波数成分(HF: $0.15 < \sim \leq 0.40 \text{ Hz}$)の増加は、運動強度の増加に伴って減弱化する傾向が観察された(図2.3.5)。同様の傾向は、Periniら(1998)の報告における約2000 ml/min以下の $\dot{V}O_2$ における運動時にも観察されている。彼らの報告(Periniら 1998)では、約2000 ml/min以上の $\dot{V}O_2$ 時における心電図RR間隔変動は、主に換気亢進に伴う呼吸性変動によって特異的な応答を示しているが、研究課題3で用いた腕運動は約2000 ml/minの $\dot{V}O_2$ を上限とする運動であり、心電図RR間隔変動にその様な特異的応答は観察されなかった(図2.3.5)。本研究では、低強度の腕運動時にHOWIに伴うHF成分の増加傾向が観察されたことから、HOWIによる心臓副交感神経活動の賦活化によってHRの減少作用が惹起された可能性が考えられたが、高強度腕運動時のHF成分にはHOWIによる変化は認められず、低周波数成分(LF: $0.04 < \sim \leq 0.15 \text{ Hz}$)とHFの比(L/H比)の減少傾向も有意ではなかったことから、高強度時に観察されたHRの減少作用の機序について、心電図RR間隔変動の周波数解析から検討することはできなかった。

一方、研究課題3におけるHR応答の結果(即ち運動時のHRはHOWIによって減少し、その減少作用は運動強度によらず一定に作用する、図2.3.3)は、研究課題1の結果および自転車運動を用いたPeriniら(1998)の報告(即ち低～中強度運動時にのみHR低下を惹起する、図2.1.1)と異なるものであった。この要因の一つとして腕運動と脚運動における筋ポンプ作用の差異が考えられる。

脚運動時には、活動筋の筋ポンプ作用によって静脈還流が増加し、下肢での血液貯留は減少する(Rowell 1983, 図3.1.1)。一方、HOWIに起因する静脈還流の増加作用は、筋ポンプ作用の有無に拘わらず下肢から胸腔内への血液シフトを増加させるため、水中での脚運動時には筋活動に伴う静脈還流の増加作用はマスクされる可能性が考えられる(図3.1.2)。研究課題1における脚運動では、低強度運動時の筋ポンプ作用は弱く、陸上運動時の静脈還流は少なかったと考えられることから、HOWIによる静脈還流の増加に

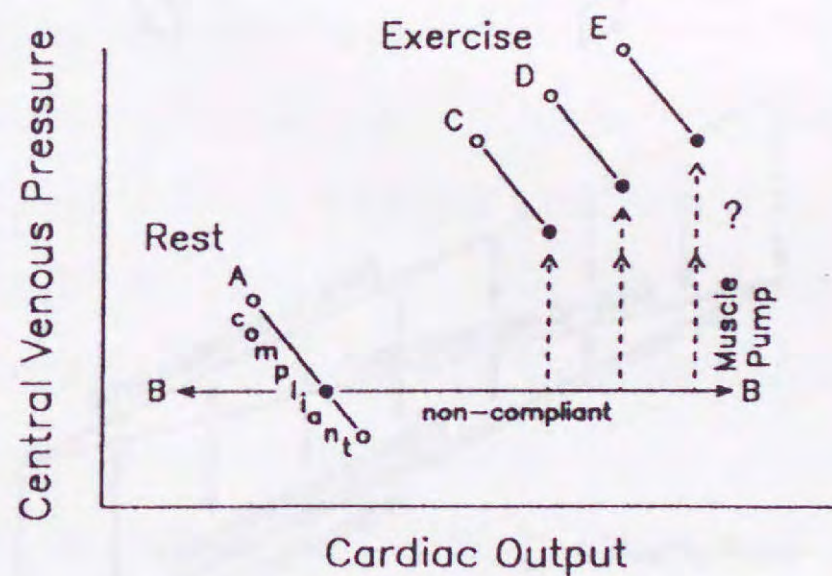
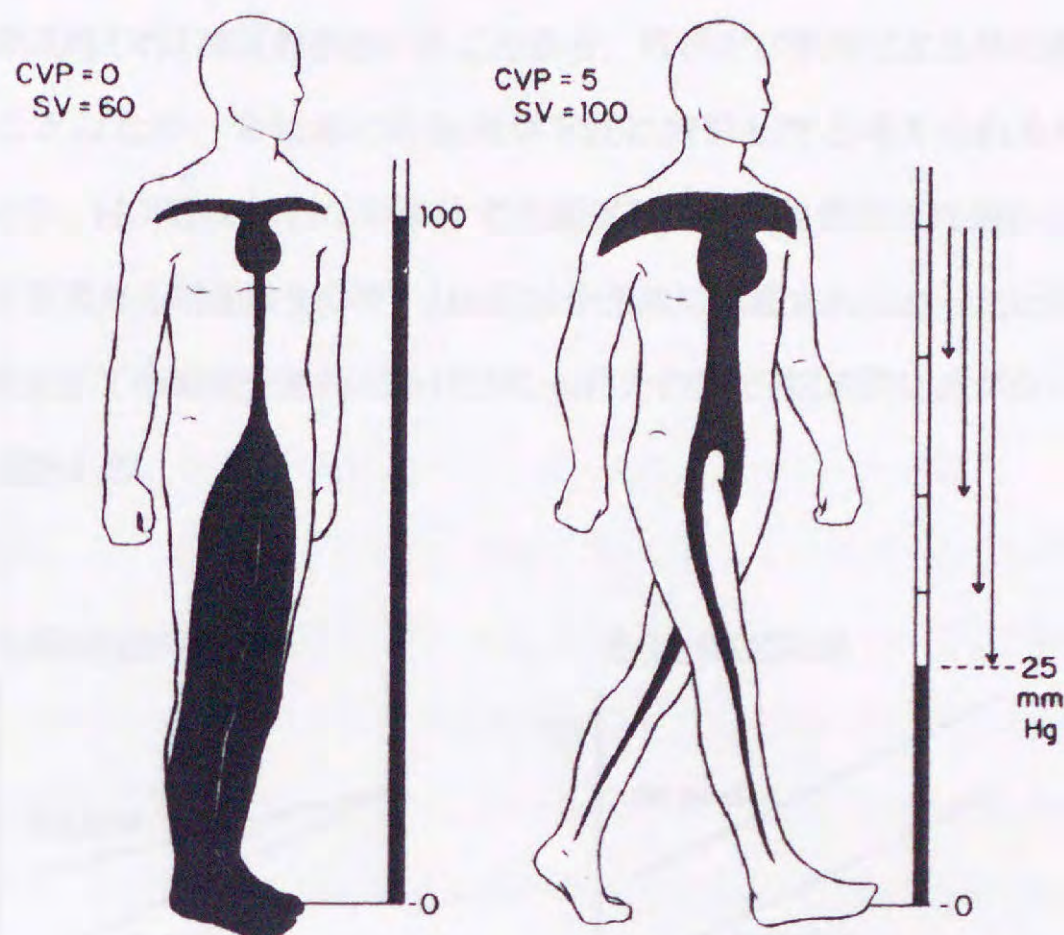


Fig. 3.1.1 Effects of upright posture and of upright exercise on pressure and volume in dependent veins (Upper). From Rowell (1983). Schematic representation of muscle pump effects on central venous pressure (Lower). Line C→E mean effects on CVP when CO is changed during graded exercise. From Sheriff et al. (1993).

よって水中運動時のHRがより低値となった可能性が考えられる。また、高強度運動時には、筋ポンプ作用による静脈還流の増加作用が顕著となり(Janickiら1996, Sheriffら1993, 図3.1.1), HOWIによる血液シフト作用との差が僅少化することによって、陸上

と水中における脚運動時のHRの差が僅少化した可能性が考えられた。

一方、研究課題3では腕運動を用いたことから、筋ポンプ作用による静脈還流の増加は殆ど生じることはなく、常に多くの血液が下肢に貯留したと考えられる(Bevegardら1966)。従って、HOWIを行わない条件での腕運動では、運動強度に拘わらず筋ポンプ作用による静脈還流の増加は生じず、HRの減少作用は惹起されなかったと考えられることから、結果として高強度運動時にもHOWI条件との間でHR応答に差が生じた可能性が示唆された(図3.1.2)。

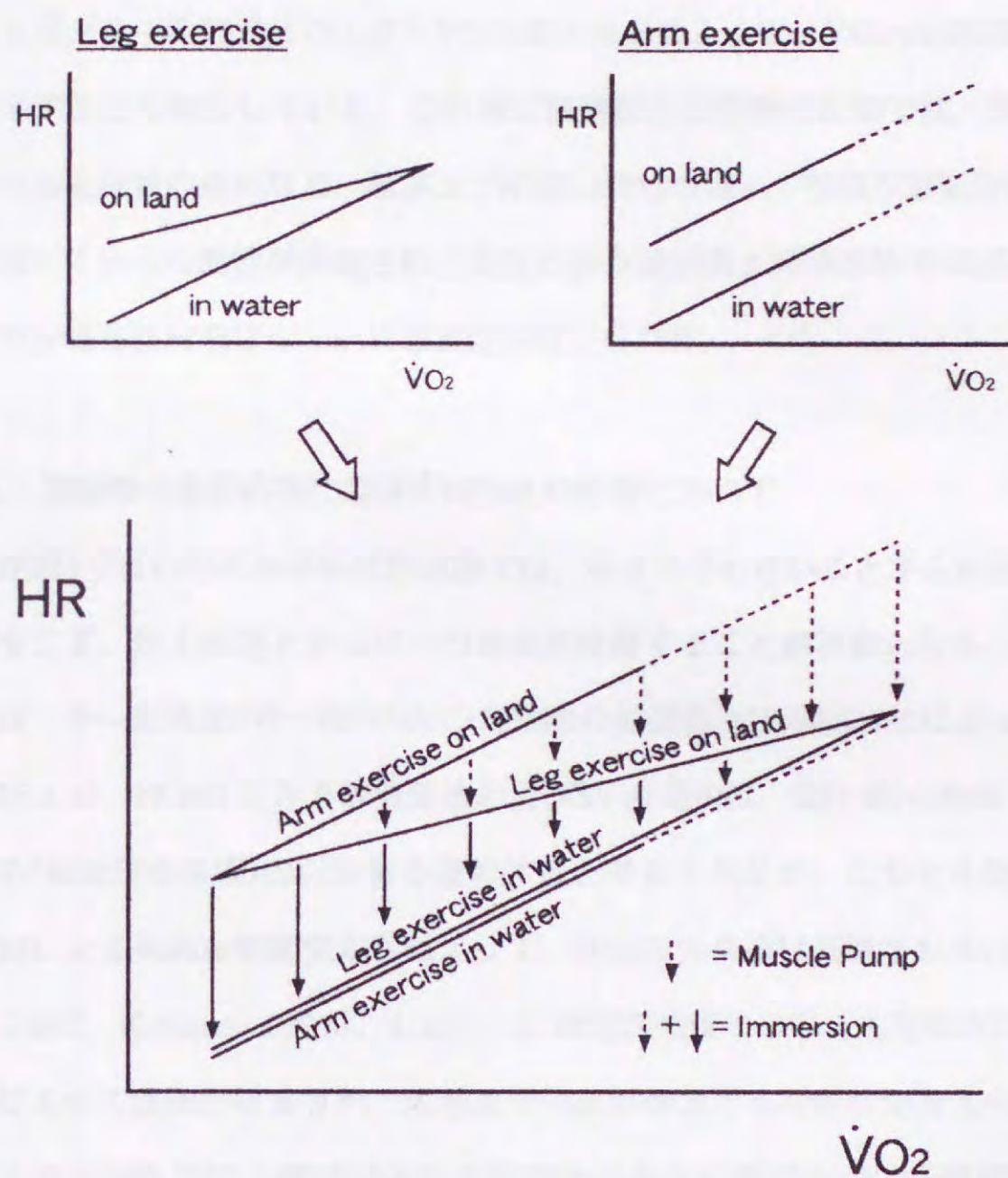


Fig. 3.1.2 Schematic illustration of differences in altered $\dot{V}O_2$ -HR relationship between leg and arm exercise with or without immersion.

しかし、この仮説には幾つかの問題点が含まれており、検討の余地が残されている。まず、陸上における脚運動時の静脈還流の増加は筋ポンプ以外の要因、例えば交感神経

活動の亢進や血漿カテコールアミンの上昇による容量血管系の収縮によって影響を受けると考えられる。Sheriffら(1993)は、房-室ブロックによって運動中の左心室機能を低下させた場合、前負荷の増加は運動強度に依らず一定であることを求め、筋ポンプ作用に伴う静脈還流の増加は運動強度によって影響されない可能性を示している。また、Chenら(1995)は、運動中の心肺受容器反射は機械的刺激よりも化学的刺激に依存して、徐脈反射および交感神経活動の抑制反射を惹起する可能性を報告している。一方、Bevegardら(1966)は、仰臥位と椅座位での腕・脚運動時の循環応答について検討し、仰臥位での腕運動では、脚運動と比較して非常に類似した一回拍出量(SV)の応答を示すにも拘わらず、血中乳酸濃度の上昇や $\dot{V}E$ の増大などによって、 $\dot{V}O_2$ -HR回帰はより急峻な傾きを示すことを報告している。この様に腕運動と脚運動の比較では、活動筋量の差や供給される血液量の違いなど、筋ポンプ作用以外にも様々の相違が運動時のHR応答に対して影響している可能性が指摘され、浸水に伴う腕運動と脚運動時のHR応答の機序についてより詳細な検討を行っていく必要性が感じられる。

3.1.3. 運動時の血圧応答に及ぼすHOWIの影響について

研究課題4で行われた水中等尺性運動では、動きを伴わないことから粘性抵抗による過負荷が生じず、陸上環境と全く同一の運動を負荷することが可能となる。本研究の若年者群では、中～高強度(30～50%MVC)運動時の拡張期血圧がHOWIによって有意に上昇した(図2.4.4)。HOWIに伴う静脈還流およびSVの増加は、低圧系(心肺容量受容器)および高圧系(動脈圧受容器)の圧反射を惹起すると考えられるが、このとき低圧系の容量受容器反射による末梢血管拡張応答によって、高圧系の負荷は軽減される(麻野井 1996, 亀谷ら 1997, Krasney 1996)。しかし、比較的高強度での等尺性運動時には活動筋内圧の上昇によって血流が阻止され、末梢血管抵抗が増加する可能性が考えられる。剣状突起位以上のHOWIでは、脚部以外にも腹部などからの還流血が中心静脈に集まるため(Gabrielsenら 1993, Johansenら 1998, Koubenecら 1978, Rischら 1978a)、活動筋において血流が阻止される高強度の脚運動時においても静脈還流は減少せず(Fujisawaら 1996)、 \dot{Q} の増加によって過度の血圧上昇が惹起される可能性が考えられる。

一方、中高年齢者群では、HOWIによって運動中の血圧が低くなる傾向が観察され、低～中強度(10～30%MVC)運動時に有意な低値が観察された(図2.4.4)。この理由は明ら

かでないが、その要因の一つとしてHOWIに伴う末梢血管拡張が顕著に生じた可能性が考えられる。浸水安静時にはHRが有意に減少したことから、静脈還流の増加によって中心静脈圧が上昇していた可能性が考えられる。それにも拘わらず、運動中の後負荷(動脈血圧)に減少傾向が観察されたことから、HOWIによって顕著な末梢血管拡張が惹起された可能性が考えられた(早野 1996)。

しかし、HOWIによる筋交感神経活動の抑制作用は加齢によって減弱化することが知られており(Miwaら 1996a)、低圧受容器反射による機序のみから考察する場合、若年者群と中高年齢者群にみられた血圧応答に矛盾が生じる。この点に関して考慮すべき問題として、運動負荷の絶対強度の差が挙げられる。研究課題4では、MVCを基準とした相対強度で運動を行ったことから、若年者群と中高年齢者群における筋運動時の生体負担度はほぼ同一であったと考えられるが、若年者群のMVCは中高年齢者群より約30%ほど高値であり、筋収縮時の筋内圧は若年者群でより高かったと考えられる。従って、若年者群では筋内圧の上昇によって末梢血管が押し潰され、末梢血管抵抗がより顕著に増加した可能性が考えられる。また、収縮張力の増加に伴う活動筋の機械受容器からの求心性刺激は、若年者群においてより高値であったと考えられ、反射性に心機能の亢進および非活動肢での血管収縮を惹起することによって、より顕著な血圧上昇を生じた可能性が示唆された。しかし、これらの考察は推測の域を出ず、若年者群と中高年齢者群の血圧応答に差を生じた機序については、今後更なる検討を行う必要があると思われた。

3.1.4. 急速入水・出水時の血圧応答について

入水・出水時には、心臓血管系に対して一過性に過負荷を生じる可能性が考えられ、とくに入水動作を急速に行った場合、静脈還流の急激な増加によって中心静脈血圧(CVP)にOvershoot状の一過性昇圧現象が観察される(Rischら 1978b, 図1.4.1)。この容量血管系における急速な負荷の増大は、動脈血管系においても一過性の昇圧現象を惹起させる可能性が考えられる。また、浸水中は心肺容量受容器反射によって末梢血管の緊張性が低下することが知られており(Echtら 1974, Krasney 1996, 美和ら 1993)、出水に伴う急速な静水圧の消失は下肢での顕著な血液貯留を惹起し、一過性に起立耐性を低下させる可能性が考えられる。

そこで研究課題5では、麻酔下ラットを用いた観血的実験モデルにおいて、急速入水・

出水に伴う循環動態の変化についての検討を行った。急速入水時には、入水直後の動脈血圧(MAP)に一過性の昇圧現象が観察され、それに伴ってHRは減少したことから、高圧系において一過性に過負荷が生じた可能性が示唆された(図2.5.2)。この一過性の昇圧現象は入水直後に出現し、その後ゆっくりと回復傾向を示したことから、急速な容量負荷の増加に起因した左心室でのスターリング効果によってSVが増加し(Hajduczukら 1987, Krasney 1996)、その後遅れて高圧系および低圧系の圧反射によって過負荷が減弱化されたと推察された(麻野井 1996, 亀谷ら 1997, Krasney 1996)。動脈血管系における急速な血圧上昇は、血管コンプライアンスの低下した高齢者などにおいて脳血管障害の危険因子となる可能性が考えられ、循環系機能に対する影響が比較的少ないと考えられている中立温での浸水時にも、急速入水に伴う一過性の血圧上昇について十分考慮する必要があると思われた。

また、急速出水時にはMAPが一過性に有意に低下し、このときHRは顕著に増加したが、CVPは出水直後から40~60秒後において有意な低値となった(図2.5.3)。急速な下肢への血液シフトに伴った頻脈応答では、交感神経活動の賦活化に伴う十分な静脈血管系の収縮が惹起されない場合、静脈還流の不足による左心室の「空打ち」状態によって、Bezold-Jarisch反射に起因した血管迷走神経性失神が惹起される(小林と小原 1998, 山本と佐藤 2000)。Shiら(2000)は、急速な軽度の下半身陰圧負荷(-40 mmHg)時に、高齢者において一過性の顕著な血圧低下が惹起されることを報告している。圧受容器反射の感受性は加齢に伴って減弱化することが知られており(美和ら 1996, 杉山 1997)、高齢者では急速出水後に起立耐性が低下する可能性が高いと考えられることから、安全対策として今後この様な点からの検討を進めていく必要性が感じられた。

第2章 今後の課題

3.2.1. 臨床的アプローチに関する今後の課題について

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るため、障害発生の可能性が低く、比較的安全な運動と考えられている。近年では、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や、腰部や下肢などの障害に対するリハビリテーションとして、水中での歩行・走運動が積極的に取り入れられている。しかし、HOWI時には心臓血管系において容量負荷が増加するため、運動環境として必ず

しも安全な条件ということとはできない。

運動プログラムの増加に伴って、水中運動においてもレクリエーション的な内容が多く取り入れられるようになっており、様々な運動様式における水中運動時の生理機能変化について検討していく必要が生じている。また、HOWIに伴う循環動態の変化は心臓血管系に対する容量・圧負荷や、腎臓における利尿の亢進などを惹起することから、とくに高血圧症を呈する患者を対象とした運動療法と薬物療法の併用において十分な注意が必要と思われる。水中運動プログラムへの参加者の増加に伴って、様々な身体的特性を持つ利用者に対してより安全で効果的な水中運動を提供する必要性あり、高齢者や有疾患患者を対象とした研究課題についても、今後さらに検討していく必要性が感じられる。

3.2.2. 基礎的アプローチに関する今後の課題について

一方、水中運動時の生体応答は様々な環境因子によって影響されることから、個々の因子の特性を理解し、水中運動との関わりについて基礎的検討を重ねる必要性が感じられる。この様な基礎的アプローチからの検討は、生理学分野における新たな知見の獲得に貢献するだけでなく、臨床現場における様々な浸水環境での事故の予防とその対策において有用な指針の提供に貢献すると思われる。

水中運動時に発生する事故は、必ずしも高強度の運動によって生じているわけではなく、入水・出水に伴う環境変化によって誘発される可能性が指摘されている(鈴木 1989, 上野 1989, 眞野 1989)。また、日常生活の中でも、入浴に伴う入水・出水時などの急激な環境変化において事故の危険性が指摘されている(副島ら 1997, 井上ら 1999, 奈良ら 1994)。この様に、日常生活の中で遭遇する浸水(入水・出水)環境には、様々な事故誘発因子が存在すると考えられることから、個々の危険因子に対して基礎的検討を重ねることによって、浸水環境に対する安全対策を進めていく必要性が感じられる。

第3章 結語

以上、本研究の結果から①頸下浸水に伴う胸腔内への血液シフトは、高強度運動時の呼吸様式を変化させ、換気効率を低下させる、②高強度での等尺性運動時の血圧応答では、頸下浸水によって動脈血管系に対して過負荷が生じる、③中高年齢者では、低強度の等尺性運動時における血圧上昇が、頸下浸水によって減弱化される、などの結果から、

水中運動においてその安全性を確保するためには、低～中強度での実施が望ましいと考えられた。また、水中運動時のHR応答は運動様式によって異なる可能性が示され、その要因の一つとして頸下浸水に伴う血液シフトが運動時の筋ポンプ作用に及ぼす影響の相違が考えられた。一方、入水・出水に伴う急速な静脈還流の増加とその消失は、一過性に心臓血管系における過負荷や起立耐性の低下を惹起する可能性が示唆された。

水中運動時の生理機能に関する知見は、先人達の偉大な業績によってその機序が明らかにされてきた。しかし、運動時の生体応答に及ぼすHOWIの影響に関する理解は未だ十分とはいえず、未知の部分が多く残されている。運動参加者の増加と運動様式の多様化によって、水中運動時の事故発生因子はより複雑化することが予想され、多角的方面からの研究アプローチによって、今後より詳細な検討を行っていく必要性が感じられる。

新しい世紀を迎えるにあたり、健康増進とQOLの向上を目的とした積極的な運動参加の機会が増えており、今後より安全で効果的な水中運動の指針を提供していく必要性が感じられる。本研究がその一助となることを切に願う。

第IV部 参考文献

- Agostoni, E., Gurtner, G., Torri, G., and Rahn, H. (1966) Respiratory mechanics during submersion and negative-pressure breathing. *J. Appl. Physiol.* 21: 251-258.
- Arborelius, M., Jr., Balldin, U. I., Lilja, B., and Lundgren, C. E. G. (1972) Hemodynamic changes in man during immersion with the head above water. *Aerospace Med.* 43: 592-598.
- 麻野井英次 (1996) 自律神経系による循環調節. 井上 博(編), 循環器疾患と自律神経機能, 15-34, 医学書院, 東京.
- Begin, R., Epstein, M., Sackner, M. A., Levinson, R., Dougherty, R., and Duncan, D. (1976) Effects of water immersion to the neck on pulmonary circulation and tissue volume in man. *J. Appl. Physiol.* 40: 293-299.
- Bevegard, S., Freyschuss, U., and Strandell, T. (1966) Circulatory adaptation to arm and leg exercise in supine and sitting position. *J. Appl. Physiol.* 21: 37-46.
- Bhambhani, Y., Norris, S., and Bell, G. (1994) Prediction of stroke volume from oxygen pulse measurements in untrained and trained men. *Can. J. Appl. Physiol.* 19: 49-59.
- Bondi, K. R., Young, J. M., Bennett, R. M., and Bradley, M. E. (1976) Closing volumes in man immersed to the neck in water. *J. Appl. Physiol.* 40: 736-740.
- Buono, M. J. (1983) Effect of central vascular engorgement and immersion on various lung volumes. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 54: 1094-1096.
- Carter, R., Peavler, M., Zinkgraf, S., Williams, J., and Fields, S. (1987) Predicting maximal exercise ventilation in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Chest.* 92: 253-259.
- Chavarren, J., and Calbet, J. A. L. (1999) Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.* 80: 555-563.
- Chen, C.-Y., Dicarlo, S. E., and Collins, H. L. (1995) Enhanced cardiopulmonary

- reflex inhibition of heart rate during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27: 1399-1405.
- 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. (1990) Cardiovascular regulation during head-out water immersion exercise. *J. Appl. Physiol.* 69: 657-664.
- Choukroun, M.-L., Kays, C., and Varene, P. (1989) Effects of water temperature on pulmonary volumes in immersed human subjects. *Respir. Physiol.* 75: 255-266.
- Choukroun, M.-L., and Varene, P. (1990) Adjustments in oxygen transport during head-out immersion in water at different temperatures. *J. Appl. Physiol.* 68: 1475-1480.
- Collins, J. V., Cochrane, G. M., Davis, J., Benatar, S. R., and Clark, T. J. H. (1973) Some aspects of pulmonary function after rapid saline infusion in healthy subjects. *Clinical Science and Molecular Medicine.* 45: 407-410.
- Connelly, T. P., Sheldahl, L. M., Tristani, F. E., Levandoski, S. G., Kalkhoff, R. K., Hoffman, M. D., and Kalbfleisch, J. H. (1990) Effect of increased central blood volume with water immersion on plasma catecholamines during exercise. *J. Appl. Physiol.* 69: 651-656.
- Craig, A. B., Jr., and Dvorak, M. (1969) Comparison of exercise in air and in water of different temperatures. *Medicine and Science in Sports.* 1: 124-130.
- Dahlback, G. O. (1975) Influence of intrathoracic blood pooling on pulmonary air-trapping during immersion. *Undersea Biomed. Res.* 2: 133-140.
- Derion, T., Guy, H. J. B., Tsukimoto, K., Schaffartzik, W., Prediletto, R., Poole, D. C., Knight, D. R., and Wagner, P. D. (1992) Ventilation-perfusion relationships in the lung during head-out water immersion. *J. Appl. Physiol.* 72: 64-72.
- D'urzo, A. D., Chapman, K. R., and Rebuck, A. S. (1985) Effect of elastic loading on ventilatory pattern during progressive exercise. *J. Appl. Physiol.* 59: 34-38.

- Echt, M., Lange, L., and Gauer, O. H. (1974) Changes of peripheral venous tone and central transmural venous pressure during immersion in a thermo-neutral bath. *Pflugers. Arch.* 352: 211-217.
- Epstein, M. (1996) Renal, endocrine, and hemodynamic effects of water immersion in humans. In *Handbook of Physiology, Section 4: Environmental Physiology*, Vol. II, edited by Fregly, M. J. and Blatteis, C. M., Chapt. 37, 845-853, Oxford University Press, New York.
- Farhi, L. E., and Linnarsson, D. (1977) Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35°C. *Respir. Physiol.* 30: 35-50.
- 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: 547-552.
- Fujisawa, H., Kamimura, H., Ohtsuka, Y., Nanbu, T., Yabunaka, N., and Agishi, Y. (1996) Continuous measurement of blood pressure, heart rate and left ventricular performance during and after isometric exercise in head-out water immersion. *Eur. J. Appl. Physiol.* 72: 548-552
- 副島京子, 堀 進悟, 藤島清太郎, 木村裕之, 武田英孝, 佐々木淳一, 篠沢洋太郎, 相川直樹 (1997) 入浴中急死の原因として神経調節性失神の関与が考えられた2症例. *日本救命医療研究会雑誌*. 11: 57-60.
- Gabrielsen, A., Johansen, L. B., and Norsk, P. (1993) Central cardiovascular pressures during graded water immersion in humans. *J. Appl. Physiol.* 75: 581-585.
- Gabrielsen, A., Warberg, J., Christensen, N. J., Bie, P., Stadeager, C., Pump, B., and Norsk, P. (2000) Arterial pulse pressure and vasopressin release during graded water immersion in humans. *Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol.* 278: R1583-R1588.
- Goldberger, J. J., Ahmed, M. W., Parker, M. A., and Kadish, A. H. (1994) Dissociation of heart rate variability from parasympathetic tone. *Am. J. Physiol.* 266 (*Heart Circ. Physiol.* 35): H2152-H2157.

- Greenleaf, J. E., Morse, J. T., Barnes, P. R., Silver, J., and Keil, L. C. (1983) Hypervolemia and plasma vasopressin response during water immersion in men. *J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 55: 1688-1693.
- Guyatt, A. R., Newman, F., Cinkotai, F. F., Palmer, J. I., and Thomson, M. L. (1965) Pulmonary diffusing capacity in man during immersion in water. *J. Appl. Physiol.* 20: 878-881.
- Hagberg, J. M., Mullin, J. P., Giese, M. D., and Spitznagel, E. (1981) Effect of pedaling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists. *J. Appl. Physiol.* 51: 447-451.
- Hajduczuk, G., Miki, K., Hong, S. K., Claybaugh, J. R., and Krasney, J. A. (1987) Role of cardiac nerves in response to head-out water immersion in conscious dogs. *Am. J. Physiol.* 253 (Regulatory Integrative Comp. Physiol. 22): R242-R253.
- Hamilton, W. F., and Mayo, J. P. (1944) Changes in the vital capacity when the body is immersed in water. *Am. J. Physiol.* 141: 51-53.
- Hanna, R. D., Sheldahl, L. M., and Tristani, F. E. (1993) Effect of enhanced preload with head-out water immersion on exercise response in men with healed myocardial infarction. *Am. J. Cardiol.* 71: 1041-1044.
- Hargens, A. R., and Watenpaugh, D. E. (1996) Cardiovascular adaptation to spaceflight. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: 977-982.
- 早野順一郎 (1996) 心拍変動による自律神経機能解析. 井上 博(編), 循環器疾患と自律神経機能, 58-88, 医学書院, 東京.
- Hayano, J., Mukai, S., Sakakibara, M., Okada, A., Takata, K., and Fujinami, T. (1994) Effects of respiratory interval on vagal modulation of heart rate. *Am. J. Physiol.* 267 (Heart Circ. Physiol. 36): H33-H40.
- Hayashi, N., and Yoshida, T. (1999) Water immersion delays the oxygen uptake response to sitting arm-cranking in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 80: 132-138
- Heyneman, C. A., and Premo, D. E. (1992) A 'Water Walkers' exercise program for

- the elderly. *Public Health Reports*. 107: 213-217.
- Hong, S. K., Cerretelli, P., Cruz, J. C., and Rahn, H. (1969) Mechanics of respiration during submersion in water. *J. Appl. Physiol.* 27: 535-538.
- Hong, S. K., Ting, E. Y., and Rahn, H. (1960) Lung volumes at different depths of submersion. *J. Appl. Physiol.* 15: 550-553.
- 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.
- 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.
- 井上大介, 八田一郎, 池田正隆, 磯辺貴代子, 市田太郎, 市田哲郎, 井上重男, 上原春男, 岡村定夫, 垣内 孟, 吉良康男, 北川 靖, 郷原憲一, 坂口佳司, 鈴木憲治, 高久芳衛, 谷口正美, 東道伸二郎, 西岡 諄, 橋本英世, 原 和男, 藤田 宗, 眞下英夫, 益本 昭, 山本善和, 和田泰三 (1999) 入浴中の突然死に関する研究. *京都医学会雑誌*. 46: 55-60.
- Janicki, J. S., Sheriff, D. D., Robotham, J. L., and Wise, R. A. (1996) Cardiac output during exercise: contributions of the cardiac, circulatory, and respiratory systems. In *Handbook of Physiology, Section 12: Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*, edited by Rowell, L. B. and Shepherd, J. T., Chapt. 15, 649-704, Oxford University Press, New York.
- Johansen, L. B., Foldager, N., Stadeager, C., Kristensen, M. S., Bie, P., Warberg, J., Kamegai, M., and Norsk, P. (1992) Plasma volume, fluid shifts, and renal responses in humans during 12 h of head-out water immersion. *J. Appl. Physiol.* 73: 539-544.
- Johansen, L. B., Jensen, T. U. S., Pump, B., and Norsk, P. (1997) Contribution of abdomen and legs to central blood volume expansion in humans during immersion. *J. Appl. Physiol.* 83: 695-699.
- Johansen, L. B., Pump, B., Warberg, J., Christensen, N. J., and Norsk, P. (1998) Preventing hemodilution abolishes natriuresis of water immersion in humans. *Am. J. Physiol.* 275 (*Regulatory Integrative Comp. Physiol.* 44):

R879-R888.

Kame, V. D., Jr., and Pendergast, D. R. (1995) Effects of short term and prolonged immersion on the cardiovascular responses to exercise. *Aviat. Space Environ. Med.* 66: 20-25.

亀谷 学, 加茂 力, 山内正博, 橋本信行 (1997) 無重力下における自律神経系の順応と破綻. *呼吸と循環.* 45: 971-981.

加茂 力, 村山正博 (1996) 生体時系列データと最大エントロピー法. *医学のあゆみ.* 177: 574-580.

Kaufman, M. P., and Forster, H. V. (1996) Reflex controlling circulatory, ventilatory and airway responses to exercise. In *Handbook of Physiology, Section 12: Exercise: Regulation and integration of multiple systems*, edited by Rowell, L. B. and Shepherd, J. T., Chap. 10, 381-447, Oxford University Press, New York.

木村真規, 鈴木政登, 田中さくら, 矢澤 誠, 永田 晟 (1997) 剣状突起位および頸部位浸水時の最大換気量. *日本運動生理学雑誌.* 4: 125-132.

木村真規, 田中さくら, 鈴木政登, 清水桃子, 永田 晟 (1999) 中高年齢者における水中等尺性運動時の血圧応答. *デサントスポーツ科学.* 20: 56-65.

木村真規, 田中さくら, 矢澤 誠, 久我晃広, 寺田佳代, 瀧間久俊, 永田 晟 (1998) 陸上および水中に於ける歩行・走運動時の心拍数と換気応答の変化. *ヒューマンサイエンス リサーチ.* 7: 25-35.

木住野孝子, 松田光生 (1997) 短時間の安静水浸が心臓自律神経系活動に及ぼす影響 - 水温25℃, 30℃および34℃における自然呼吸下での検討 -. *臨床スポーツ医学.* 14: 1317-1322.

Koubenec, H.-J., Risch, W. D., and Gauer, O. H. (1978) Effective compliance of the circulation in the upright sitting posture. *Pflugers Arch.* 374: 121-124.

小林洋一, 小原千明 (1998) Head-up tilt 試験による圧受容体機能評価 - Neurally mediated syncopeの病態と治療 -. *呼吸と循環.* 46: 131-140.

Krasney, J. A. (1996) Head-out water immersion: animal studies. In *Handbook of Physiology, Section 4: Environmental Physiology, Vol. II*, edited by Fregly,

- M. J. and Blatteis, C. M., Chapt. 38, 855-887, Oxford University Press, New York.
- Lakatta, E. G. (1995) Cardiovascular system. In *Handbook of Physiology*, Section 11: *Aging*, edited by Masoro, E. J., Chapt. 17, 413-474, Oxford University Press, New York.
- Larsen, A. S., Johansen, L. B., Stadeager, C., Warberg, J., Christensen, N. J., and Norsk, P. (1994) Volume-homeostatic mechanisms in humans during graded water immersion. *J. Appl. Physiol.* 77: 2832-2839.
- Lewis, S. F., Taylor, W. F., Graham, R. M., Pettinger, W. A., Schutte, J. E., and Blomqvist, C. G. (1983) Cardiovascular responses to exercise as functions of absolute and relative work load. *J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 54: 1314-1323.
- Londeree, B. R., Thomas, T. R., Ziogas, G., Smith, T. D., and Zhang Q. (1995) $\dot{V}O_{2\max}$ versus %HRmax regressions for six modes of exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27: 458-461.
- Longhurst, J. C., and Stebbins, C. L. (1997) The power athlete. *Cardiology Clinics.* 15: 413-429.
- Magel, J. R. (1971) Comparison of the physiologic response to varying intensities of submaximal work in tethered swimming and treadmill running. *J. Sports Med. Phys. Fit.* 11: 203-212.
- 間野忠明 (1996) 微小重力下における筋交感神経活動. *宇宙航空環境医学.* 33: 85-89.
- 眞野喜洋 (1989) パニックと溺水. 武藤芳照(編), 特集/溺水のメカニズムと予防. *臨床スポーツ医学.* 6: 747-752.
- 真崎玲子, 金谷庄藏, 守田俊一, 右田孝志, 堀田 昇, 大柿哲朗, 藤島和孝, 丸山 徹, 加治良一, 藤野武彦 (1995) 健康成人における温水プール入水時の血行動態に及ぼす影響—心エコー図法による検討—. *健康科学.* 17: 109-114.
- McMurray, R. G., and Smith, L. G. (1985) Ventilatory responses when altering stride frequency at a constant oxygen uptake. *Respir. Physiol.* 62: 117-124.
- 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.
- 宮本忠吉, 藤本繁夫, 栗原直嗣, 金尾顕郎, 辻 英次, 前田如矢 (1994a) 健常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.
- 宮本忠吉, 藤本繁夫, 櫛淵由香里, 渡辺一志, 宮側敏明, 栗原直嗣, 前田如矢 (1994b) 健常人における水中歩行時のVentilatory Thresholdの検討-陸上運動との比較-. *日本臨床生理学会雑誌*. 24: 221-227.
- Miyamoto, T., Fujimoto, S., Kushibuchi, Y., Kurihara, N., and Maeda, K. (1995) Effects of treadmill walking in water on ventilatory response in obese subjects. *Jpn. J. Appl. Physiol.* 25: 1-7.
- Miwa, C., Mano, T., Saito, M., Iwase, S., Matsukawa, T., Sugiyama, Y., and Koga, K. (1996a) Ageing reduces sympatho-suppressive response to head-out water immersion in humans. *Acta Physiol. Scand.* 158: 15-20.
- Miwa, C., Sugiyama, Y., Mano, T., Iwase, S., and Matsukawa, T. (1996b) Spectral characteristics of heart rate and blood pressure variabilities during head-out water immersion. *Environ. Med.* 40: 91-94.
- 美和千尋, 岩瀬 敏, 間野忠明, 齊藤 満, 杉山由樹, 鈴木初恵 (1993) 水浸時におけるヒトの筋交感神経活動の抑制反応に対する加齢の影響. *自律神経*. 30: 16-23.
- 美和千尋, 杉山由樹, 岩瀬 敏, 松川俊義, 間野忠明, 渡邊丈眞, 小林章雄 (1996) 水浸時における血圧および心拍変動に及ぼす加齢の影響. *自律神経*. 33: 503-508.
- Morrison, J. B., and Taylor, N. A. S. (1990) Measurement of static and dynamic pulmonary work during pressure breathing. *Undersea Biomedical Research*. 17: 453-467.
- Murphy, C. A., Sloan, R. P., and Myers, M. M. (1991) Pharmacologic responses and spectral analyses of spontaneous fluctuations in heart rate and blood pressure in SHR rats. *J. Autonomic Nervous System*. 36: 237-250.
- 武藤芳照 (1988) 骨・関節疾患への運動処方. *最新医学*. 43: 2258-2263.
- Nagashima, K., Nose, H., Yoshida, T., Kawabata, T., Oda, Y., Yorimoto, A., Uemura, O., and Morimoto, T. (1995) Relationship between atrial

natriuretic peptide and plasma volume during graded exercise with water immersion. *J. Appl. Physiol.* 78: 217-224.

長山雅俊, 武山純一郎, 岡林宏明, 山田智広, 金井隆之, 斉藤 朗, 藤田良範, 片桐 敬
(1996) 最大エントロピー法(MEM)による運動負荷時心拍変動スペクトル解析.
心臓. 28: 33-36.

中川雅裕 (1998) 腰痛患者に対する水中運動療法. *リハビリテーション医学*. 35: 230-235

中西光雄, 岩崎義正, 山本清洋, 磯川正教, 金本益男, 佐久間春夫, 舩本直文, 酒井 誠, 山
崎秀夫, 三宅紀子, 北 一郎 (1989) 脈拍数. 東京都立大学体育学研究室(編), 日本
人の体力標準値, 第4版, 105章, 347- 349, 不昧堂出版, 東京.

中澤公孝 (1995) アクアビック・エクササイズの特徴. *J. J. Sports Sci.* 14: 31-38

奈良昌治, 谷 源一, 小松本悟 (1994) 高齢者の入浴事故死の医学的および社会的検討. *日
本老年医学会雑誌*. 31: 532-537.

Ng, A. V., Hanson, P., Aaron, E. A., Demment, R. B., Conviser, J. M., and Nagle, F.
J. (1987) Cardiovascular responses to military antishock trouser inflation
during standing arm exercise. *J. Appl. Physiol.* 63: 1224-1229.

西園秀嗣, 茂岡泰弘, 下大迫晃, 田巻弘之, 荻田 太, 赤嶺卓哉, 田口信教, 芝山秀太郎
(1994) 水中ウォーキングが筋・神経系に及ぼす運動生理学的研究 歩行速度の上
昇における下腿筋の選択的活動. *鹿屋体育大学学術研究紀要*. 12: 19-26

Norsk, P., Bonde-Petersen, F., and Christensen, N. J. (1990) Catecholamines,
circulation, and the kidney during water immersion in humans. *J. Appl.
Physiol.* 69: 479-484.

奥田邦晴 (1997) スポーツ傷害と水中運動療法. *理学療法*. 14: 749-755.

Okada, A., Hayano, J., Mukai, S., Akita, S., Sakata, S., Takeshima, N., Matsubara,
M., and Fujinami, T. (1996) Age-related differences in cardiac vagal
response to graded-water immersion. *Therapeutic Research*. 17: 871-874.

岡田暁宜, 早野順一郎, 向井誠時, 秋田祐枝, 坂田成一郎, 松原充隆, 竹島伸生, 高田和之,
藤浪隆夫 (1996) Water immersionに対する循環調節系の反応の加齢による変化.
自律神経. 33: 371-376.

小野寺昇, 宮地元彦, 木村一彦, 米谷正造, 中村由美子 (1993a) 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.
- 小野寺昇, 宮地元彦, 矢野博巳, 木村一彦, 中村由美子, 池田 章 (1993b) 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: 167-174.
- Otis, A. B., McKerrow, C. B., Bartlett, R. A., Mead, J., McIlroy, M. B., Selverstone, N. J., and Radford, E. P. (1956) Mechanical factors in distribution of pulmonary ventilation. *J. Appl. Physiol.* 8: 427-443.
- Pate, R. R., Blair, S. N., Durstine, J. L., Eddy, D. O., Hanson, P., Painter, P., Smith, L. K., and Wolfe, L. A. (1991) Metabolic calculations. In *Guidelines for Exercise Testing and Prescription*, 4th Ed., edited by American College of Sports Medicine, Appendix D, 285-300, Lea & Febiger, Philadelphia·London
- Perini, R., Milesi, S., Biancardi, L., Pendergast, D. R., and Veicsteinas, A. (1998) Heart rate variability in exercising humans: effect of water immersion. *Eur. J. Appl. Physiol.* 77: 326-332
- Prefaut, C., Lupi-H., E., and Anthonisen, N. R. (1976) Human lung mechanics during water immersion. *J. Appl. Physiol.* 40: 320-323.
- Reid, M. B., Loring, S. H., Banzett, R. B., and Mead, J. (1986) Passive mechanics of upright human chest wall during immersion from hips to neck. *J. Appl. Physiol.* 60: 1561-1570.
- Risch, W. D., Koubenec, H.-J., Beckmann, U., Lange, S., and Gauer, O. H. (1978a) The effect of graded immersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution, and heart rate in man. *Pflugers Arch.* 374: 115-118.
- Risch, W. D., Koubenec, H.-J., Gauer, O. H., and Lange, S. (1978b) Time course of cardiac distension with rapid immersion in a thermo-neutral bath. *Pflugers Arch.* 374: 119-120.
- Rodarte, J. R., and Rehder, K. (1986) Dynamics of respiration. In *Handbook of Physiology*, Section 3: *The Respiratory System*, Vol. III: *Mechanics of*

- breathing*, Part 1, edited by Geiger, S. R., Chapt. 10, 131-144, Oxford University Press, Washington, DC.
- Ross, J. C., Maddock, G. E., and Ley, G. D. (1961) Effect of pressure suit inflation on pulmonary capillary blood volume. *J. Appl. Physiol.* 16: 674-678.
- Rowell, L. B. (1983) Cardiovascular adjustments to thermal stress. In *Handbook of Physiology*, Section 2: *The Cardiovascular System*, Vol. III: *Peripheral Circulation and Organ Blood Flow*, Part 2, edited by Shepherd, J. T., and Abboud F. M., Chapt. 27, 967-1023, Waverly Press, Maryland.
- Rowell, L. B., and O'Leary, D. S. (1990) Reflex control of the circulation during exercise: chemoreflexes and mechanoreflexes. *J. Appl. Physiol.* 69: 407-418.
- 齊藤 満 (1996) 運動時循環の神経調節. *J. Exerc. Sci.* 6: 47-52.
- Sheldahl, L. M., Tristani, F. E., Connelly, T. P., Levandoski, S. G., Skelton, M. M., and Cowley, A. W., Jr. (1992) Fluid-regulating hormones during exercise when central blood volume is increased by water immersion. *Am. J. Physiol.* 262 (*Regulatory Integrative Comp. Physiol.* 31): R779-R785.
- Sheldahl, L. M., Wann, L. S., Clifford, P. S., Tristani, F. E., Wolf, L. G., and Kalbfleisch, J. H. (1984) Effect of central hypervolemia on cardiac performance during exercise. *J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 57: 1662-1667.
- Shephard, R. J. (1993) Physiologic changes over the years. In *ACSM's Resource Manual for Guidelines for Exercise Testing and Prescription*, 2nd Ed., edited by American College of Sports Medicine, Chapt. 32, 397-408, Lea & Febiger, Philadelphia.
- Sheriff, D. D., Zhou, X. P., Scher, A. M., and Rowell, L. B. (1993) Dependence of cardiac filling pressure on cardiac output during rest and dynamic exercise in dogs. *Am. J. Physiol.* 265 (*Heart Circ. Physiol.* 34): H316-H322.
- Shi, X., Wray, D. W., Formes, K. J., Wang, H-W., Hayes, P. M., O-Yurvati, A. H., Weiss, M. S., and Reese, I. P. (2000) Orthostatic hypotension in aging humans. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 279: H1548-H1554.

- Shimizu, T., Kosaka, M., and Fujishima, K. (1998) Human thermoregulatory responses during prolonged walking in water at 25, 30 and 35°C. *Eur. J. Appl. Physiol.* 78: 473-478.
- Smolander, J., Aminoff, T., Korhonen, I., Tervo, M., Shen, N., Korhonen, O., and Louhevaara, V. (1998) Heart rate and blood pressure responses to isometric exercise in young and older men. *Eur. J. Appl. Physiol.* 77: 439-444.
- 杉山由樹 (1997) 血圧調節と筋交感神経活動. *自律神経*. 34: 184-189.
- 鈴木庸夫 (1989) 気管内吸水. 武藤芳照(編), 特集/溺水のメカニズムと予防. *臨床スポーツ医学*. 6: 721-728.
- Svedenhag, J., and Seger, J. (1992) Running on land and in water: comparative exercise physiology. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24: 1155-1160.
- 高橋哲也, 田辺一彦, 中山 大, 長田尚彦, 山田純生, 石黒友康, 伊藤春樹, 村山正博 (1995) 臥位運動と座位運動における呼吸循環反応の違いについて. *体力科学*. 44: 105-112.
- Tajima, F., Sagawa, S., Iwamoto, J., Miki, K., Claybaugh, J. R., and Shiraki, K. (1988) Renal and endocrine responses in the elderly during head-out water immersion. *Am. J. Physiol.* 254 (*Regulatory Integrative Comp. Physiol.* 23): R977-R983.
- Tanaka, H., Davy, K. P., and Seals, D. R. (1999) Cardiopulmonary baroreflex inhibition of sympathetic nerve activity is preserved with age in healthy humans. *J. Physiol.* 515: 249-254.
- 上野正彦 (1989) 錐体内出血 - 法医学の立場から -. 武藤芳照(編), 特集/溺水のメカニズムと予防. *臨床スポーツ医学*. 6: 731-735.
- 渡辺一志, 宮側敏明, 藤本繁夫 (1995) 水中トレッドミル歩行時の呼吸循環機能ならびに下肢筋活動に及ぼす水位の影響. *デサントスポーツ科学*. 16: 252-259.
- Yoshino, H., Curran-Everett, D. C., Hong, S. K., and Krasney, J. A. (1988) Altered heart rate-arterial pressure relation during head-out water immersion in conscious dog. *Am. J. Physiol.* 254 (*Regulatory Integrative Comp. Physiol.* 23): R595-R601.

謝 辞

稿を終えるにあたり，本研究に多大なるご助言・ご指導を賜りました早稲田大学大学院
人間科学研究科 運動生理学研究室，体力科学研究室および東京慈恵会医科大学 臨床検査
医学教室の諸先生方および研究室の方々に，心から感謝いたします。

