

2006 年度 財団法人 ミズノスポーツ振興会助成研究

研究報告書

研究課題

水中運動プログラムの開発を目指した水中歩行時の下肢筋酸素動態の検討

江崎 和希

筑波大学大学院人間総合科学研究科

(現在：東京医科大学健康増進スポーツ医学講座)

野村 武男

筑波大学大学院人間総合科学研究科

武政 徹

筑波大学大学院人間総合科学研究科

浜岡 隆文

鹿屋体育大学総合健康運動科学系・スポーツパフォーマンス系

## 1. 緒言

水中運動は、水圧、浮力、水温などの物理学性質を利用し、健康増進やリハビリテーションの運動プログラムのひとつとして行われている（1-4）。特に「水中歩行」は、その利便性から多くのプールで行われている。また、水泳のように「技能」を必要としないだけでなく、浮力によって体重が軽減されることからランニングやジョギング愛好家に多い関節痛や足関節の障害を発生させる危険性が低い。さらに、水泳と同様、熱エネルギーの放出増加が期待できることなどから、生活習慣病の原因である肥満を改善させる手段としても、水中運動プログラムの開発は意義があるものと思われる。しかし、これまでの水中歩行に関する研究は、高体力者や運動選手を対象とし「より効果的なトレーニング」あるいは「リハビリテーション」という立場から、水中ジョギングや水中ランニングを扱った報告（5-8）のみであり、運動処方や運動プログラム作成には必ずしもよい方法ではなかった。

近年、水中トレッドミルや流水装置、またこれらを2つの装置を組み合わせた水中歩行装置が開発され、プール歩行と同様な条件での測定が可能となり、水中歩行時の酸素摂取量や心拍数または筋電図法を用いて下肢の筋活動を計測した研究が報告されている（9-12）。さらに、近赤外線分光装置が開発され、活動中のヒト骨格筋酸素動態（代謝状態）を評価することが可能となり、健康・スポーツの現場にも貢献が期待されている（13-17）。水中運動中の下肢筋内の酸素動態を評価することは、水中運動プログラム作成において、非常に重要な基礎的資料となりうると考えられる。

そこで本研究の目的は、水中歩行時の全身の酸素摂取量と下肢筋内酸素動態について測定を行い、陸上歩行時と比較検討を行うことである。また、水中歩行時の下肢筋群の神経筋活動状態についても加えて検討する。

## 2. 研究方法

### 2. 1. 被験者

被験者は健常男性8名（平均年齢 $25\pm3$ 歳）とした。被験者の身長、体重、BMIおよび最大酸素摂取量( $\dot{V}O_{2\text{max}}$ )は、それぞれ $175\pm4$ cm,  $69.6\pm5.7$ kg,  $23\pm2$ ,  $56.7\pm5.9$ ml/kg/minであった。また、インピーダンス法（オムロン社製体重体組成計 HBF-354IT）によって測定した体脂肪率は、 $19.5\pm2.8\%$ であった。被験者には事前に研究の主旨、内容が説明され、理解と同意（インフォームドコンセント）を得て行われた。また、本研究の実験企画は筑波大学大学院人間総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行われた。

### 2. 2. 実験装置とプロトコール

陸上トレッドミル歩行には、埋め込み型トレッドミル(NT-12, Attype, 西川鉄鋼)を用いた。また、流水を負荷とした水中歩行には、筑波大学内プールに設置されている流水プールに水中トレッドミル装置を付設して行った。被験者は、スイミングパンツに着替え、アクアシューズを履いた。安静時、歩行時の測定には、まず、全身のエネルギー代謝を測定するため、呼気ガス分析装置（ミナト医科学社製エアロモニターAE-280）を用い、酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )を測定した。心拍数(HR)はテレメータ（ポラール社製ハートレートモニターAccurexPlus）を用いて測定した。また、筋の酸素動態の測定には、近赤外線酸素モニター（オムロン社製 HE0-200）を用い、外側広筋(VL)と腓腹筋内側頭(MG)に近赤外線酸素モニターのプローブを皮膚との間に水が浸入しないように圧着し、立位安静時および歩行運動時の酸素化ヘモグロビン(HbO<sub>2</sub>)、脱酸素化ヘモグロビン(Hb)、総ヘモグロビン(T-Hb)の変化を測定した。

なお、プローブの送受光間距離は3cmとした。この場合、測定深度は皮膚表面から1.5cmの筋組織の情報を評価していると推定される(18)。さらに、筋電図(EMG)は、直径5mmのAg-AgCl皿状表面電極(日本光電)を前脛骨筋、ヒラメ筋、腓腹筋内側頭、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋長頭の筋腹へ電極間の距離が2.5cmとなるように装着した。装着後、電極の上から、防水テープを装着した。EMGは多チャンネル生体用テレメータシステム(日本光電社製マルチテレメータシステムWEB-9500)にて記録した。また、筋の働きを相互に比較するため、実験前に最大随意収縮(maximum voluntary contraction; MVC)を陸上で計測した。

測定プロトコールは水深1.1mに立位安静1分後、筋酸素化レベルを求めるために駆血帯によって約7分間、大腿動脈血流遮断をおこなった。その後HbO<sub>2</sub>が最低値に達したのを確認したのち解放、約10分後、歩行速度1.0km/hより始め、2分毎に0.5km/h上昇させ、3.5km/hまで歩行を実施した。水中歩行時の歩幅はメトロノームの合図に合わせてピッチを調節し、すべて0.6mとした。同時に肺胞でのVO<sub>2</sub>、HR、自覚的運動強度(RPE)を測定した。歩行中、上肢は水面上に挙上し、安全のため補助バーを軽く握った状態で歩行するように指示した。陸上トレッドミルでも同様に測定を行った。陸上での歩行速度は先行研究に従い水中時の2倍とした(9)(図1)。また、陸上歩行における歩幅は2.0~4.0km/hまでを0.6m、5.0~7.0km/hまでを0.7mとした。なお水温は、実験を通して30°Cとし、気温は23~25°Cとした。

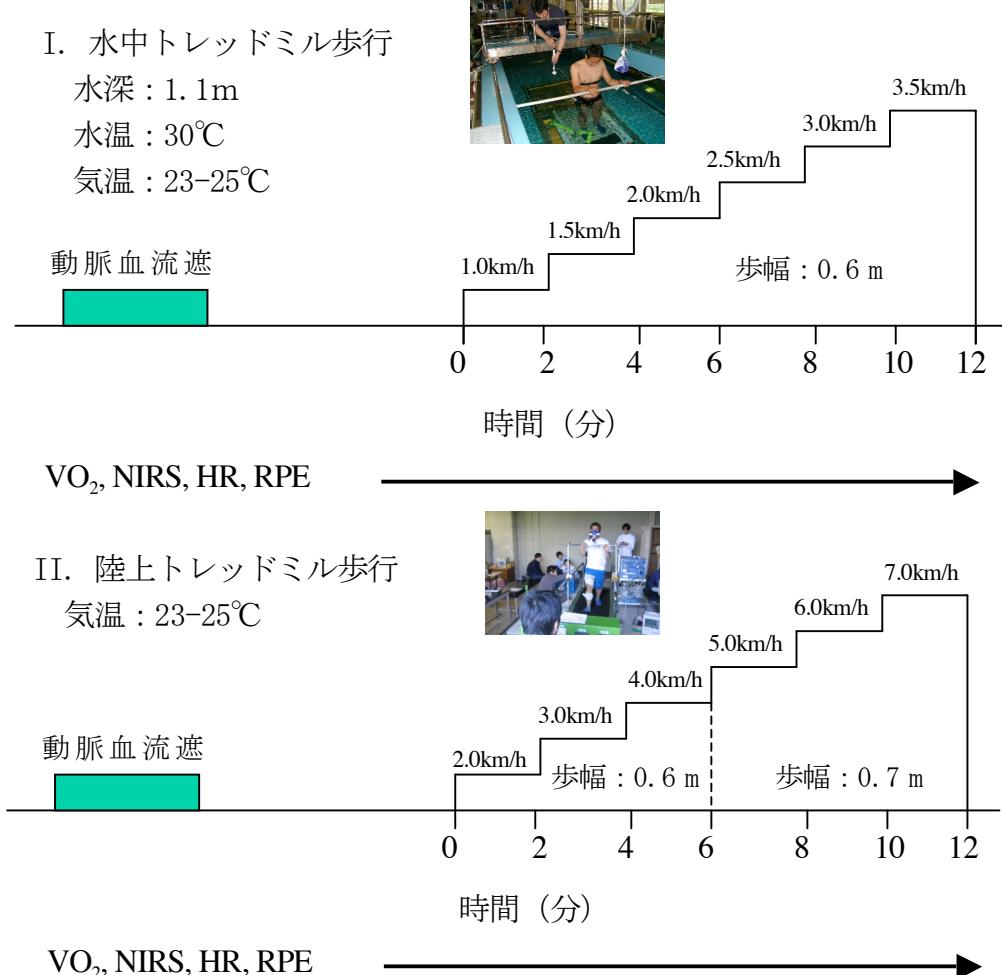


図1. 水中トレッドミル歩行と陸上トレッドミル歩行の測定プロトコール

### 3. 結果

図2に水中トレッドミル歩行中の MG の HbO<sub>2</sub>, Hb, T-Hb の変化の一例と筋酸素化レベルの求め方を示す(図2)。近赤外線分光法は絶対値の算出が困難なため、駆血帯を用いて一時的動脈血流遮断を行い、HbO<sub>2</sub>の最低値を 0%, カフ解放後最高値に達した地点を 100%とする筋酸素化レベルにて評価を行った(15)。運動中において、速度の増加に伴い HbO<sub>2</sub>は減少を示し、Hb は増加を示した。さらに、T-Hb は運動開始とともにわずかに増加を示したが、そのまま維持を示した。

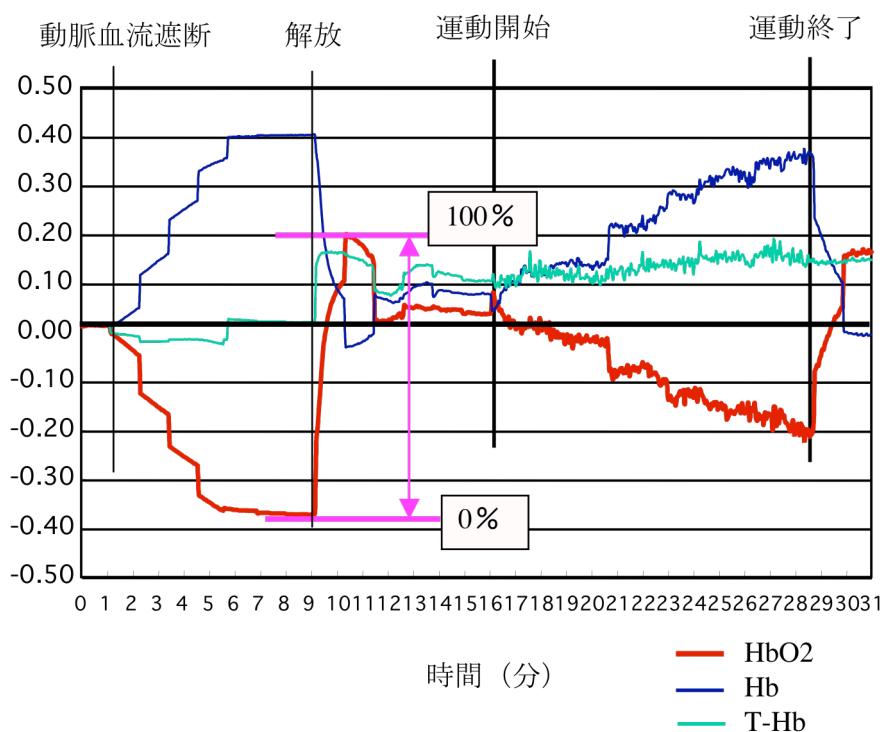


図2. 水中トレッドミル歩行中の MG の HbO<sub>2</sub>, Hb, T-Hb の変化の一例と筋酸素化レベルの求め方

図3に水中および陸上トレッドミル運動中の HR, 相対的最大酸素摂取量 (% $\dot{V}O_{2\max}$ ), 筋酸素化レベルの変化を示した。水中安静時の HR は、陸上に比べ低値を示した。また、速度 2.5km/h 以上になると水中歩行時の HR, % $\dot{V}O_{2\max}$  は陸上に比べ、有意な増加を示した。また、筋酸素化レベルにおいては時速 2.0km/h より VL において陸上トレッドミルよりも有意な低下を示した( $P<0.05$ )。また、VL と MG 間では、速度の増加に伴い、両条件において MG の筋酸素化レベルは VL より低下を示した( $P<0.05$ )。図4に水中および陸上トレッドミル運動中の% $\dot{V}O_{2\max}$ における VL, MG の筋酸素化レベルおよびRPE の変化を示す。両条件において最大歩行速度時の筋酸素化レベルは VL, MG とも水中歩行時が低値を示し、さらに水中歩行時の MG の筋酸素化レベルは 30%付近まで低下を示した。また水中歩行時の筋酸素化レベルは 40% $\dot{V}O_{2\max}$  以上になると VL, MG とも急激に減少傾向を示し、この時の RPE は 12 (11:楽であると 12:ややきついの中間) を示した。図5に各速度における下肢筋群の筋活動を示す。水中歩行時において各速度ともヒラメ筋, 腹筋内側頭の放電量が外側広筋より大きい傾向が認められた。

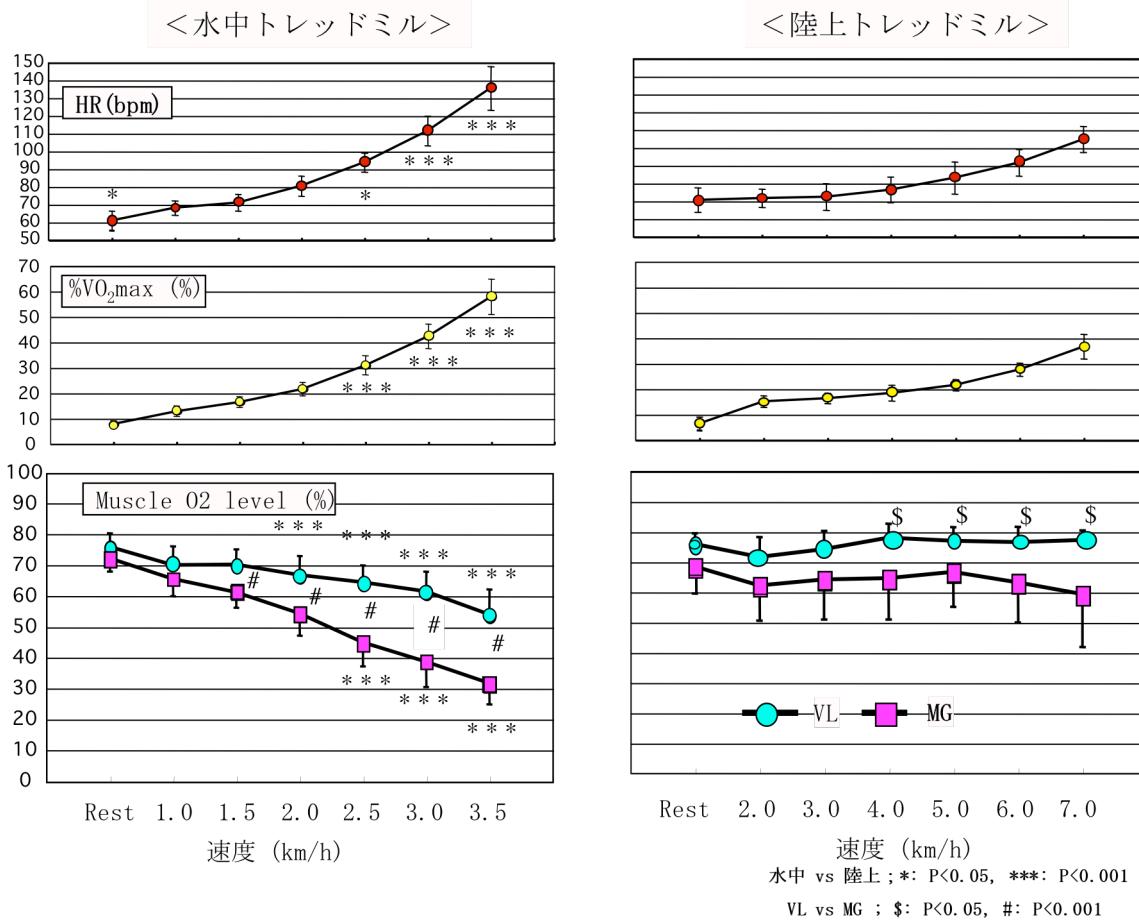


図3. 水中および陸上トレッドミル運動中のHR, %VO<sub>2</sub>max, 筋酸素化レベルの変化

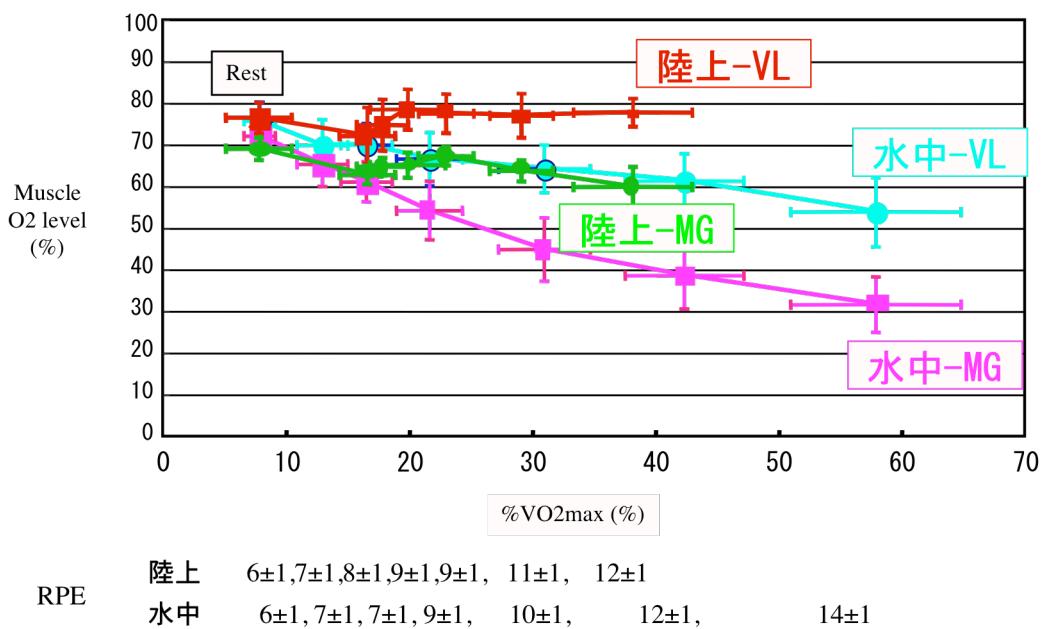


図4. 水中および陸上トレッドミル運動中の%VO<sub>2</sub>maxにおけるVL, MGの筋酸素化レベルおよびRPEの変化

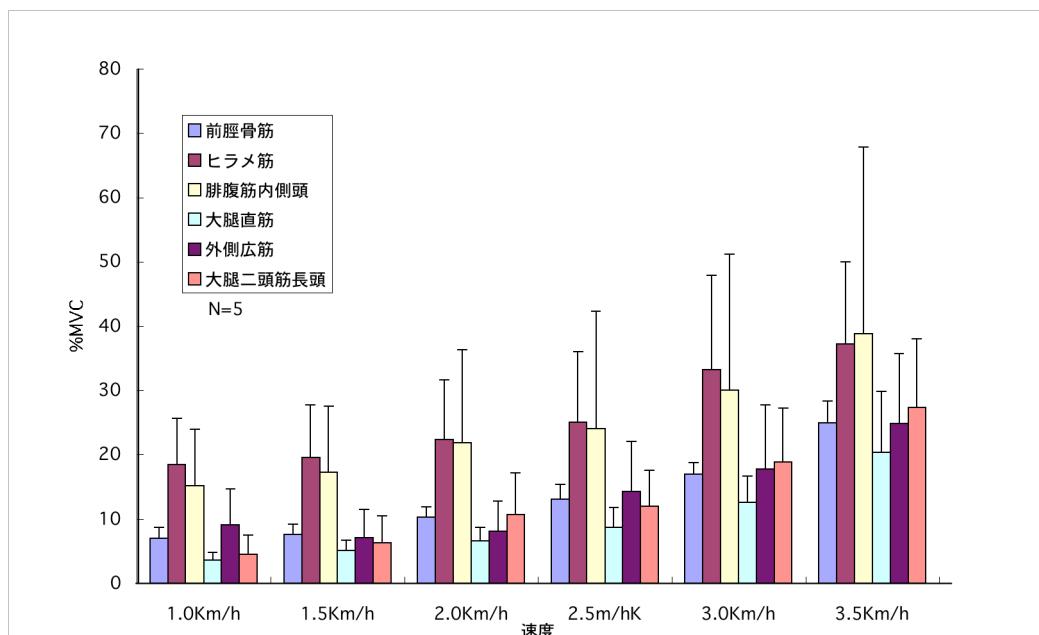


図 5. 各速度における下肢筋群の筋活動

#### 4. 考察

本研究において水中安静時、陸上安静時に比べて 10 拍ほど低かった。その原因として、静水圧がもたらす末梢血管収縮、さらにその結果として引き起こされる深部血液量増加による、一回拍出量増加が考えられる。運動時においては Evans らの研究結果をもとに負荷設定をおこなった。Evans ら(9)は腰までの水深において秒速 0.7~1.0m の速度で歩行とジョギングを実施させ、水中歩行時および水中ジョギング時と同じ酸素摂取量を得るために、陸上ではその 2 倍の歩行速度、あるいはその 3 倍のジョギング速度が必要であることを報告している。本研究において水中トレッドミル速度 2.0km/h (陸上では 4.0km/h) までは、HR と %VO<sub>2max</sub> には差はなかったが、水中トレッドミル速度 2.5km/h (陸上では 5.0km/h) になると 2 条件に有意な差がみられた ( $P<0.05$ )。この違いは、Evans ら(9)が用いた水中トレッドミル歩行はその場での歩行運動であり、我々が用いた流水装置を併用した場合と異なったためと推測される。

本研究では、酸素摂取量と HR との関係だけではなく、下肢筋の酸素動態について検討を行った。その結果、水中トレッドミル歩行時の HR, %VO<sub>2max</sub> が陸上トレッドミル歩行と差が生じた時点 (水中トレッドミル速度 2.5km/h) より VL, MG の筋酸素化レベルは陸上より低下を示し、さらに両条件において MG は VL より低下を示した。これは、Hiroyuki ら(18)の陸上トレッドミルで行った先行研究と一致するものであった。また、図 5 に示すように %VO<sub>2max</sub> と筋酸素化レベルの関係から、水中トレッドミル歩行に MG の筋酸素化レベルは大きく減少を示した。ただ、この筋酸素化レベルの減少については、近赤外線分光法の特性として、酸素の需要と供給の変化を示しているため、水中歩行時の下肢筋での酸素利用の増加によるものか、血流の減少によるものなのか不明である。この件に関しては今後の研究課題となる。今回、水中トレッドミル歩行において筋電法を用いて下肢筋群の EMG について検討したところ、ヒラメ筋、腓腹筋内側頭に低速度 (1.0km/h) より比較的大きな放電が認められた。さらに 3.5km/h には、前脛骨筋、外側広筋、大腿二頭筋長頭の大幅な放電増加が認められた。これは Kato ら

(12)の水中歩行時の下肢筋の EMG を評価した先行研究と一致を示す。また、我々は陸上トレッドミル歩行での EMG 測定は行っていないが、先行研究によると水中速度 2.5km/hあたりから腓腹筋、前頸骨筋、大腿直筋、大腿二頭筋に陸上歩行と差が認められたと報告している。

結論として、水中トレッドミル歩行時の全身の酸素摂取量と下肢筋内酸素動態について測定を行い、陸上トレッドミル歩行時と比較検討を行ったところ、筋酸素化レベルは陸上トレッドミル歩行時に比べ水中トレッドミル歩行時に腓腹筋内側頭の値が大きく低下することが確認された。また、筋放電量もヒラメ筋や腓腹筋内側頭が外側広筋よりも高い傾向が確認された。以上のことから水中トレッドミル歩行時は低強度 ( $\sim 40\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ ) から腓腹筋内側頭の酸素利用が高いか、または酸素供給が制限されることが示唆された。

## 5. まとめ

1) 水中安静時の HR は陸上安静時に比べ、低い値を示した。また、低強度運動時においては両条件下に差は無いが、 $40\% \dot{V}O_{2\text{max}}$  以上になる水中歩行は陸上歩行を上回ることが確認された。また、 $40\% \dot{V}O_{2\text{max}}$  時の RPE は、水中歩行、陸上歩行とも 12 (11: 楽であると 12: ややきついの中間) と同様な傾向が示された。

2) 筋酸素化レベルは陸上トレッドミル歩行時に比べ水中トレッドミル歩行時に腓腹筋内側頭の値が大きく低下することが確認された。また、筋放電量も腓腹筋内側頭が外側広筋よりも高い傾向が確認された。

このことから、腰から臍位程度で室内プールで行う水中ウォーキングでは、低強度であれば、陸上と同様の心拍数-酸素摂取量関係を用いて運動プログラム作成に適用できるものと思われる。しかしながら、高齢者や身長が低く相対的に水位が高くなる者の場合は、運動強度を少し落とすなどの配慮が必要と思われる。

本研究の知見は、健常者の水中運動プログラム作成に有用な情報を提供するものと考えられる。

## 5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました財団法人 ミズノスポーツ振興会に厚くお礼を申し上げます。また、本研究遂行に際し、ご協力を頂きました被験者の皆様をはじめ、筑波大学大学院水泳研究室の大学院生の方々に感謝いたします。

## 6. 引用文献

- 1) 菅野篤子、野村武男 中高年における腰痛者を対象とした短期的な水中運動の身体的および心理的効果、いばらき健康・スポーツ科学、1998, 16, 19-26.
- 2) 菅野篤子、野村武男 一過性の水中運動と陸上運動の実施が疼痛、状態不安および唾液中コルチゾール濃度に及ぼす影響 -慢性腰痛者を対象に-, 体力科学、2000, 49, 581-588.
- 3) Sugano A, Nomura T Influence of water exercise and land stretching on salivary cortisol concentrations and anxiety in chronic low back pain patients. J Physiol Anthrop, 2000, 19, 175-180.
- 4) 野村武男、菅野篤子 水中運動の実践-設備、施設、運動プログラム-, 臨床スポーツ医学、2003, 20, 271-290.

- 5) Avellini BA, Shapiro Y, Pandolf KB. Cardio-respiratory physical training in water and on land. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1983, 50, 255-263.
- 6) Eyestone ED, Fellingham G, George J, Fisher AG. Effect of water running and cycling on maximum oxygen consumption and 2-mile run performance. *Am J Sports Med*, 1993, 21, 41-44.
- 7) Ritchie SE, Hopkins WG. The intensity of exercise in deep-water running. *Int J Sports Med*, 1991, 12, 27-29.
- 8) Wilder RP, Brennan D, Schotte DE. A standard measure for exercise prescription for aqua running. *Am J Sports Med*, 1993, 21, 45-48.
- 9) Evans BW, Cureton KJ, Purvis JW Metabolic and circulatory responses to walking and jogging in water. *Res Q*. 1978, 49, 442-449.
- 10) Gleim GW, Nicholas JA. Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. *Am J Sports Med*, 1989, 17, 248-252.
- 11) 堀田昇, 大柿哲朗, 金谷庄蔵, 藤島和孝 新しい水中運動装置(Flowmill)を用いた運動療法, 体力研究, 1995, 88, 11-17.
- 12) Kato T, Sugagima Y, Koeda M, Fukuzawa S, Kitagawa K Electromyogram activity of leg muscles during different types of underwater walking. *Adv Exerc Sports Physiol*, 2002, 8, 39-44.
- 13) Hamaoka, T, Iwane H, Shimomitsu T, Katsumura T, Murase N, Nishio S, Osada T, Kurosawa Y and Chance B Noninvasive measures of oxidative metabolism on working human muscles by near-infrared spectroscopy, *J Appl Physiol*, 1996, 81, 1410-1417.
- 14) Hiroyuki H, Hamaoka T, Sako T, Nishio S, Kime R, Murakami M and Katsumura T Oxygenation in vastus lateralis and lateral head of gastrocnemius during treadmill walking and running in humans *Eur J Appl Physiol*, 2002, 87, 343-349.
- 15) Takemasa T, Miyakawa S, Nagata S, Esaki K, Hirokawa M, Machida M, Kosaka Y, Hitomi Y, Kizaki T, Ohno H, Haga S Effect of hyperventilation during resistance exercise on hormonal response in humans. *Adv Exerc Sports Physiol*, 2004, 10, 55-61.
- 16) Esaki E, Hamaoka T, Radegran G, Boushel R, Hansen J, Katsumura T, Haga S and Mizuno M Association between regional quadriceps oxygenation and blood oxygen saturation during normoxic one-legged dynamic knee extension, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 2005, 95, 361-370.
- 17) Ichimura S, Murase N, Osada T, Kime R, Homma T, Ueda C, Nagasawa T, Motobe M, Hamaoka T, Katsumura T Age and activity status affect muscle reoxygenation time after maximal cycling exercise, *Med Sci Sports Exerc*, 2006, 38, 1277-1281.
- 18) McCully KK and Hamaoka T Near-infrared spectroscopy: what can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle? *Exerc Sport Sci Rev*, 2000, 28, 123-127.