水中及び陸上運動時の下肢筋群における筋活動とその違い

金田 晃一¹⁾ 木村 文律¹⁾ 秋本 崇之²⁾ 河野 一郎¹⁾

DIFFERENCES IN UNDERWATER AND LAND-BASED LEG MUSCLE ACTIVITY

KOICHI KANEDA, FUMINORI KIMURA, TAKAYUKI AKIMOTO and ICHIRO KONO

Abstract

The purpose of this study was to investigate differences between underwater and land-based exercise in leg muscle activity. Nine healthy males (mean age : 21.7 ± 0.5 years, mean height : 173.4 ± 2.2 cm) had electrodes placed on their left leg muscles (Tibialis Anterior ; TA, Medial Gastrocnemius ; MG, Soleus ; SOL, Rectus Femoris ; RF, and Biceps Femoris ; BF), and their muscle activity was measured during various exercises. The subjects performed six types of exercise such as the forward walk, backward walk, squat, calf raise, leg range, and one leg wave, both in the water (waist level) and on land. These exercises were categorized as 3 types of leg movement according to direction ; horizontal, vertical, and mixed movement.

In the forward walk and backward walk, categorized as horizontal movements, the integrated electromyogram (IEMG) significantly increased during underwater exercise compared with on land. In the squat, as a vertical movement, the IEMG showed a similar change under both conditions. In the calf raise, as a vertical movement, and leg range and one leg wave, as mixed movements, the IEMG significantly decreased during underwater exercise compared with on land. These results suggest that leg muscle activity during underwater exercise is different based on the movement direction of the legs. In a word, it was apparent that movement in a horizontal direction underwater provides greater activity for leg muscles than on land; but movement in a vertical and/or mixed direction underwater provides less activity for leg muscles than on land. In prescribing an exercise program, it may be helpful to understand the differences between underwater and land-based exercise in leg muscle activity.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2004, 53 : 141~148)

key word : Leg muscles, IEMG, Water exercise, Movement direction

I. 緒 言

水中運動は、中高年者や低体力者等に対する健康増進の一手段として、また、スポーツ障害等に対するアクアティックリハビリテーションとして、近年、盛んに用いられるようになってきた^{6,13,19)}。水中で運動を行う事で、浮力による足腰・関節・靱帯への負担の軽減、水圧による心肺機能と静脈還流の向上、抵抗が与える筋肉への刺激、水温による血液循環の促進等の効果が期待

され、健康・体力の維持・増進手段、運動療法、リハビリテーション・トレーニング等に利用されている^{12,15)}。

水中運動プログラムの中でも、水中歩行に関しては、浮力、抵抗、水圧、水温、歩行速度の変化が、酸素摂取量、血圧、心拍数、内分泌代謝等に影響を与え、それぞれ陸上歩行時とは異なった生理的反応を示す事が報告されている^{4,5,7,10,20)}。最近では、水中歩行中の下肢における筋活動や歩様変化等のバイオメカニクスの研究も行われて

¹⁾筑波大学体育科学系

〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

²⁾東京大学大学院総合文化研究科・生命環境科学系

〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1

*Institute of Health & Sport Sciences, University of Tsukuba,
Tennodai 1-1-1, Tsukuba, 305-8574 Ibaraki, Japan*

*Department of Life Sciences, Graduate School of Arts and
Sciences, The University of Tokyo, Komaba 3-8-1, Meguro,
153-8902 Tokyo, Japan*

きており、一般に陸上と比べ水中での歩行は大腿部の筋群と前脛骨筋での筋活動が大きく増加する事が知られている^{17,18)}。また、浮力による体重軽減によって床反力は減少し、重力方向のストレスから開放されるために、水中歩行時と陸上歩行時の歩容は異なる事が示唆されている¹³⁾。

水中運動プログラムには、水中歩行以外にも様々な運動形態が存在する。アクアビクスや水中サーキット、アクアヌードルを使った水中運動など、数々の運動が実際に運動療法やリハビリテーション等の現場で用いられている。しかし、これらの運動を行った際の筋活動に関する研究は殆どなされていない。水中運動中の種目による違いが、下肢筋群の筋活動にどのような影響を与えるのかを明らかにする事によって、筋力増強や筋機能回復などのトレーニングを行なう際の、筋活動の様子を把握する事が可能となり、目的に応じた水中運動の運動処方を行う上で、非常に有益な基礎的情報を提供できると考えられる。

そこで本研究では、水中運動プログラムで用いられている様々な運動が、下肢筋群の筋活動に与える影響について、筋電図学的に調査する事を目的とした。

II. 対象及び方法

A. 対 象

対象は、日常的に運動を行っている健康な男性9名で、年齢、身長、体重、体脂肪率はそれぞれ、 21.7 ± 0.5 歳、 173.4 ± 2.2 cm、 70.9 ± 4.3 kg、 $14.8 \pm 2.5\%$ (平均 $\pm$ SD)であった。全被験者に対して事前に本研究の主旨を説明し、十分な理解を得た上で本研究への参加の同意を得た。また、本研究は筑波大学体育科学系研究審査委員会の承諾を得て行った。

B. 実験環境

水中での運動は、立位において浮力による体重軽減が十分に活用でき^{14,19)}、しかも水圧による肺機能への影響が少ないとされる^{4,10,11)}腰部に水位を設定したプールの中で行った。実験時の水温、室温、湿度はそれぞれ、29℃、26.5℃、70%

であった。陸上での運動はプールサイドで行った。

C. 運動プロトコル

水中と陸上において、前進歩行、後進歩行、スクワット、カーフレイズ、レッグランジ、片足前後振り子の6種目をそれぞれ8秒間ずつ行った。前進歩行と後進歩行は水平方向の運動、スクワットとカーフレイズは鉛直方向の運動、レッグランジと片足前後振り子は水平方向と鉛直方向の両方向を含む運動として設定した。全被験者は測定前に十分な練習を行ない、運動に慣れた上で測定を行なった。

C-1. 前進歩行

スタートの合図と同時に、右足から、1秒に1歩の速さで前進の歩行を行った。被験者毎に床面にテープで目印を設置し、水中と陸上で歩幅が同程度になるように実施させた。

C-2. 後進歩行

前進歩行と同様の方法で後進させた。

C-3. スクワット

立位の状態からスタートし、膝関節を2秒で屈曲、2秒で伸展させた。足は肩幅に開き、手を後頭部で組ませた状態で、大腿部が床と平行になるまで屈曲を行った。

C-4. カーフレイズ

立位の状態からスタートし、足関節を2秒で底屈、2秒で背屈させた。脚は肩幅に開き、手は身体のバランスを崩さない程度に軽く壁を持たせた。

C-5. レッグランジ

立位の状態からスタートし、左足のみの前方踏み込みで、膝関節を2秒で屈曲、2秒で伸展させた。動作中、手は後頭部で組み、体幹前傾のない状態で行った。

C-6. 片足前後振り子

立位の状態で、左足股関節を2秒で屈曲(屈曲角45°)、2秒で最大伸展させた。膝関節は進展させたままで、手は身体のバランスを崩さない程度に軽く壁を持たせた。

D. 筋電図の導出と解析

それぞれの運動において、左側下肢の前脛骨筋 (Tibialis anterior ; TA), ヒラメ筋 (Soleus ; SOL), 腓腹筋内側頭 (Medial gastrocnemius ; MG), 大腿直筋 (Rectus femoris ; RF), 大腿二頭筋長頭 (Biceps femoris ; BF) の筋電図を、双極表面筋電法によって記録した。前脛骨筋は脛骨粗面より 4 横指遠位部で脛骨稜より 1 横指外側に、ヒラメ筋は腓腹筋の筋腹の遠位部でアキレス腱の内側前面に、腓腹筋内側頭は膝窩皮線より 5 横指遠位部の内側に、大腿直筋は大腿前面膝蓋骨上縁と前上腸

骨棘を結んだ中間点に、大腿二頭筋長頭は腓骨頭と坐骨結節を結んだ線分の中点に、それぞれ電極を貼付した。測定部位を消毒用エタノールで脱脂し、ブラッドランセット (株式会社旭ポリスライダー) で皮膚の表面の角質層を除去した後、双極皿型表面電極を電極間距離 2 cm で貼付し、その上から防水テープで防水加工を施した。電極コードはテレメーター (日本光電工業株式会社) に接続され、電波によって受信機 (日本光電工業株式会社) に信号を送信し、AD 変換機生体現象増幅機 (マルチメーターシステム, 日本光電工業株式会

Fig. 1. EMG responses of five muscles, Tibialis anterior (TA), Soleus (SOL), Medial gastrocnemius (MG), Rectus femoris (RF), and Biceps femoris (BF) during six exercise both in water and on land. A : Forward walk, B : Backward walk, C : Squat, D : Calf, raise, E : Leg range, and F : One leg wave.

社)を通してパーソナルコンピューターで波形を収録した。収録された波形から、各運動1秒当たりの筋電積分値を算出した。時定数を0.03 sec, サンプリング周波数を1 kHz に設定した。

E. 統計処理

水中と陸上における筋電積分値の差の検定には、対応のある t-test を用い、有意水準は5%とした。

Ⅲ. 結 果

全ての運動種目における、水中と陸上での筋電

図の、4秒間の原波形を Fig. 1 に示した。

前進歩行では、陸上と比較し、水中での筋電積分値は、前脛骨筋・大腿直筋・大腿二頭筋長頭において有意な増加を示した($p < 0.05$, Fig. 2 A)。

後進歩行では、大腿直筋・大腿二頭筋長頭における筋電積分値が、水中で有意な増加を示した($p < 0.05$, Fig. 2 B)。

スクワットにおいては、陸上と水中それぞれにおける筋電積分値間に、有意な増減は認められなかった(Fig. 2 C)。

カーフレイズでは、陸上と比較し、水中での筋電積分値は、腓腹筋内側においてのみ、有意な減

Fig. 2. Comparison of integrated EMG of five muscles, Tibialis anterior (TA), Soleus (SOL), Medial gastrocnemius (MG), Rectus femoris (RF), and Biceps femoris (BF) between each exercise. A : Forward walk, B : Backward walk, C : Squat, D : Calf raise, E : Leg range, F : One leg wave, in water and on land. *Significant difference, water vs land, $p < 0.05$.

Values are means $\pm$ SD ; $n = 9$. N. S. : non significant difference.

少を示した ($p < 0.05$, Fig. 2D).

レッグランジでは、ヒラメ筋・大腿直筋における筋電積分値が、水中で有意な減少を示した ($p < 0.05$, Fig. 2E).

片足前後振り子では、大腿直筋においてのみ、水中での筋電積分値が、有意な減少を示した ($p < 0.05$, Fig. 2F).

Ⅳ. 考 察

本研究は、水中及び陸上運動時における、下肢筋群の筋活動の違いについて調査する事を目的として行なった。このため、運動の方向や特性を考慮に入れ、水平方向の運動、鉛直方向の運動、水平方向と鉛直方向の両方向を含む運動を、それぞれ2種目ずつ設定し、その筋電図波形を測定した。

水中での下肢筋活動は、前進歩行、後進歩行では有意に増加し、スクワットでは有意な変化はなく、カーフレイズ、レッグランジ、片足前後振り子では有意に減少する傾向を認めた(Figure 2)。このことから、水の粘性抵抗や浮力が下肢筋に与える影響は、運動種目によって異なるものと考えられる。

装置下を水が循環するループ式の垂直循環型回流水槽における、前方からの流水を負荷として用いたその場での流水歩行では、下腿における筋活動がプールでの水中歩行と比較して有意に減少すると加藤たちは報告している⁹⁾。また、山本たちはプール歩行において歩行速度の増大に伴ってヒラメ筋を除く下肢筋群の筋活動が増大した、と報告している¹⁸⁾。一方で高石たちは、腰以上の水位では浮力の影響が大きすぎるために、十分な運動強度が得られないとしている¹⁶⁾。よってプールでの前進歩行では、腰までの水位においては下肢筋群に対して陸上や流水歩行よりも高い強度を与える事が可能であり、さらに個人別に歩行速度を設定する事によって、個々の筋力に合わせて運動強度を変化させる事ができるものと考えられる。

本研究における前進歩行では、前脛骨筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭の、水中での筋電積分値が有意に増加した(Figure 2A)。これは、水の粘性抵抗によって陸上よりも大きな推進力が必要とな

るために、下肢にかかる関節トルクが増大したためであると考えられる。同時に、前頸骨筋では足背部への抵抗を軽減させるための背屈動作が顕著に行われたものと考えられる。この結果は、渡辺たちの報告¹⁷⁾と一致するものである。

後進歩行では、大腿直筋、大腿二頭筋長頭において、水中での筋電積分値が有意に増加した(Figure 2B)。これも前進歩行と同様に、大きな推進力を必要とするための下肢にかかる関節トルクが増大したためであると考えられる。後進歩行では、前進歩行の結果と異なり、前脛骨筋における筋活動に有意な変化は認められなかったが、これは足関節以下の部分が受ける抵抗が小さかったためと推察される。

スクワットにおいては、いずれの筋においても筋電積分値間に有意な増減は認められなかった(Figure 2C)。しかし、膝伸展に関わる大腿直筋では、有意ではないが水中における筋活動は減少する傾向を示した。これは、上下運動の際に浮力の影響を受けたためであると考えられる。逆に、水中での膝関節の屈曲は、浮力の働く向きと逆方向の運動であり抵抗となったことと、上下運動に伴う浮力の大きさの変化に応じて身体バランスを維持しようとしたために、大腿直筋を除く筋では筋活動に減少する傾向が認められなかったのではないかと推察される。

カーフレイズでは、腓腹筋内側頭において、水中での筋電積分値が有意に減少した(Figure 2D)。これは、足関節の底屈に関わる腓腹筋内側頭が浮力の影響を受けたためであると考えられる。また、他の筋で筋活動の減少が認められなかったのは、スクワットと同様に上下運動に伴う浮力の変化に応じた身体バランスの維持によるものと推察される。

スクワットとカーフレイズはいずれも鉛直方向の運動であり、浮力の影響を受けるため一般に水中での筋活動は減少するものと考えられたが、スクワットにおいてはそのような傾向が認められなかった。その理由として、スクワットは膝関節および股関節の屈曲・伸展運動である事、カーフレイズは足関節の底屈・背屈運動である事が挙げら

れる。つまり、身体を上下させる際に浮力の変化が大きいスクワットでは、変化する身体バランスを維持させるための筋力発揮が行なわれたために、水中での筋活動が有意な変化を見せず、浮力の変化がわずかなカーフレイズでは、変化する身体バランス維持のための筋力発揮が僅かであったために、水中での筋活動が有意な減少を見せたものと考えられる。

レッグランジでは、ヒラメ筋と大腿直筋において、水中での筋電積分値が有意に減少した (Figure 2E)。これは、スクワットと同様に、膝関節伸展の際に浮力の影響を受けたためであり、また、浮力による体重軽減のために下腿にかかる負担が軽減されたためであると考えられる。陸上でのレッグランジは、特に身体を立位に戻す局面での下肢筋活動が激しくなると報告されている³⁾。水中では同局面における筋活動の減少が認められたことから、水の粘性抵抗よりも浮力の影響のほうが大きかったと考えられる。

片足前後振り子では、大腿直筋における水中での筋電積分値が有意に減少した (Figure 2F)。これは、大腿部は下肢の支点である大転子からの距離が短いために十分な抵抗を受けず、浮力の影響のほうが大きかったものと考えられる。

以上のことから、水中における水平方向の運動は、水の浮力よりも粘性抵抗の影響が大きいと、筋力増強運動として陸上より高い運動強度を持つものと考えられる。この事は、加齢や運動不足に伴う筋力低下^{1,2,8)}を抑制する運動としての有用性を示唆するものである。一方、水中における鉛直方向の運動と、水平と鉛直の両方向を含む運動では、水の粘性抵抗よりも浮力の影響のほうが大きく影響した。しかし、中には水中での筋活動が僅かながら増加する傾向を見せる筋も見られたことから、筋力増強を目的とした運動ではなく、関節安定性向上のための筋力運動や筋力回復運動などの、リハビリテーション・トレーニングや運動療法として有効と考えられる。

また、抵抗は速度の2乗に比例して増加し、浮力の向きと反対方向の運動は抵抗となることから、運動の速度や水位が筋活動に大きく影響を及

ぼす可能性が考えられる。従って、水中での運動を実施する際には、これらを調節して各個人の目的や能力に合わせて運動処方を行う事ができるものと考えられる。

V. ま と め

水中歩行を含む様々な水中運動を男子9名を対象に行い、それぞれ下肢の筋電図を測定し、筋電積分値を用いて陸上との同運動と比較した結果、以下の様にまとめられた。

- 1) 水中での水平方向の運動は、水の抵抗の影響を大きく受けるため、筋力増強運動として陸上よりも高い運動強度を与える事ができる。
- 2) 水中での鉛直方向と、両方向を含む運動は、水の浮力の影響を大きく受けるため、リハビリテーション・トレーニングや運動療法等として有効と考えられる。

(受理日 平成15年11月6日)

VI. 文 献

- 1) Akima, H., Kano, Y., Enomoto, Y., Ishizu M., Okada, M., Oishi, Y., Katsuta, S., Kuno, S., Muscle function in 164 men and women aged 20-84 yr. Med. Sci. Sports Exercise., (2001), 220-226.
- 2) Catherine, A., Donelle, E. A 'Water Walkers' exercise program for the elderly. Public Health Reports., (1992), 107, 213-217.
- 3) Danny, M., Craig, A., Tom, D., Cheri, P., Terry, S. Quadriceps-hamstring EMG activity functional, closed kinetic chain exercise to fatigue. Eur. J. Appl. Physiol., (2000), 81, 504-509.
- 4) Gilbert, W., Gleim, T., James, A., Nicolas, MD. Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. Am. J. Sports Med., (1989), 17, 248-252.
- 5) Glenn, P., Scott, S. Maximal metabolic responses of deep and shallow water running in trained runners. Med. Sci. Sports Exercise., (1991), 23, 238-241.
- 6) 堀田 昇, 大柿哲朗, 金谷床蔵, 藤島和孝, 萩原博嗣, 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, (1994), 15, 78-83.
- 7) Hall, J., Macdonald, I. A., Maddison, P. J., Cardiorespiratory responses to underwater treadmill walking in healthy females. Eur. J. Appl. Physiol., (1998), 77, 278-284.
- 8) 勝田 茂, 久野譜也, 土肥徳秀, Aging にもなう骨格筋線維の変化に関する組織化学的研究, 筑波大学体育科学系紀要, (1987), 10, 243-249.
- 9) Kato, T., Sugiyama, 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.
- 10) 前野里恵, 藤谷尚子, 安藤徳彦, 水位が異なる水中トレッドミル歩行の呼吸循環応答, *理学療法ジャーナル*, (2002), **36**, 115-118.
  - 11) 宮本忠吉, 藤本繁夫, 栗原直嗣, 金尾顕郎, 辻英次, 前田如矢, 健康者における頸椎水位と横隔膜水位の動的小および静的肺機能に及ぼす影響, *体力科学*, (1994), **43**, 155-161.
  - 12) 中澤公孝, アクアビックエクササイズの特小, *J. J. Sports. Sci.*, (1995), **14**, 31-38.
  - 13) Newman, DJ., Alexander HL., Webbon BW., Energetics and mechanics for partial gravity locomotion. *Aviat. Space Environ. Med.*, (1994), **65**, 815-823.
  - 14) 野村武男, 水中リコンディショニングの効用と実践, *Training. J.*, (1998), **1**, 14-16.
  - 15) 野村武男, 水泳とポジティブヘルス, *Health. Sci.*, (1986), **2**, 36-43.
  - 16) 高石鉄雄, 石田浩司, 小野 隆, 水中歩行は運動処方にも効か?, *デサントスポーツ科学*, (1994), **15**, 252-260.
  - 17) 渡辺一志, 宮側敏明, 藤本繁夫, 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*, (1995), **16**, 252-259.
  - 18) 山本紳一郎, 中澤公孝, 矢野英雄, 水中歩行のバイオメカニクス特性, 第14回バイオメカニズムシンポジウム, **8**, (1995), 69-75.
  - 19) 山本利春, スポーツ傷害に対するアクアティックリハビリテーション, *体育の科学*, (2000), **50**, 517-521.
  - 20) Zanparo, P., Pagliaro, P. The energy cost of level walking before and after hydro-kinesi therapy in patients with spastic paresis. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, (1998), **8**, 222-228.