流水装置を用いた水中歩行の特徴 — スイミングプールでの水中歩行と陸上トレッドミル歩行との比較から —

加藤 尊¹⁾ 福沢昌平²⁾ 菅嶋康浩³⁾ 北川 薫²⁾

CHARACTERISTICS OF UNDERWATER WALKING USING WATER FLOW MACHINE — COMPARISON OF SWIMMING POOL WALKING WITH LAND TREADMILL WALKING —

TAKERU KOTO, SHOUHEI FUKUZAWA, YASUHIRO SUGAJIMA and KAORU KITAGAWA

Abstract

Six young males walked in a swimming pool, swimming flume and land treadmill at 0.4, 0.6 and 0.8 m·s⁻¹. At 0.6 and 0.8 m·s⁻¹, $\dot{V}O_2$ and HR values were significantly lower for the swimming flume walking than for the swimming pool walking. At rest and 0.4 m·s⁻¹, there were no significant $\dot{V}O_2$ differences between swimming flume walking and land treadmill walking; while significantly lower HR values were found for swimming flume walking. There was no significant difference in the $\dot{V}O_2$ -HR relationship between land treadmill walking and swimming pool walking. On the other hand, a significant downward shift in the regression line was observed in swimming flume walking compared to land treadmill walking. The differences between the two types of underwater walking exercise may produce a different effect concerning the muscle pump on leg muscles. Soleus, and especially lateral gastrocnemius muscles, showed lower electromyogram activity at push-off phase during swimming flume walking compared with swimming pool walking. This activity may contribute to the lower $\dot{V}O_2$ and HR values during swimming flume walking. It is apparent that the swimming flume walking has different physiological and kinematic characteristics such leg muscles EMG activity walking or swimming pool walking.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2002, 51 : 119~128)

key word : EMG activity, underwater walking, water flume

I. 緒 言

水中運動はリハビリテーションやトレーニングに広く応用されている。なかでも水中歩行は動きに慣れやすく、運動強度が設定しやすいことから最も広く普及している水中運動である。水中歩行については、水位や水温の変化が酸素摂取量や心拍数^{4, 10, 11, 22, 23, 27)}、また血圧¹⁷⁾などの生理学的指標に与える影響が分析され、陸上歩行と比較した研究が数多くなされてきた。

近年、水中トレッドミルや流水装置、またこれら2つの装置を組み合わせた水中歩行装置が開発

され、リハビリテーション施設やフィットネスクラブなどのトレーニング施設に普及しつつある。これら装置の特徴として、トレッドミルスピードや流速を正確に、そして多段階に設定できることがあげられる。加えてこれらの新しい装置は、大きな室内温水プールなどに比べランニングコストが低いこと、装置設置に必要な施設が比較的小規模で済むなどの利点もある。水中トレッドミルや流水装置については、既存のプールにそのまま利用できるといった特徴もあり、今後ますます普及するものと考えられる。

各装置を用いた水中歩行の酸素摂取量を比較す

¹⁾ 鈴鹿医療科学大学 保健衛生学部
〒510-0293 鈴鹿市岸岡町1001-1

Lab. for Sports Science, Suzuka University of Medical Science

²⁾ 中京大学体育学部 運動生理学研究室
〒470-0348 豊田市貝津町床立101

Lab. for Excises Physiology and Biomechanics Chukyo University

³⁾ 名古屋芸術大学 一般教育部
〒481-0038 西春日井郡西春町徳重西沼65

Lab. for Health Science, Nagaya University of Arts

ると, 水中トレッドミルを用いた歩行では同じスピード(約 $53.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)のプール歩行やプールジョギング³⁾に比べ, 酸素摂取量は約 $1/3$ ⁴⁾であったとの報告がある. また堀田ら¹¹⁾は, 水中トレッドミルと流水装置が一体化した装置を用いて, 歩行スピードと同じ流速を加えることでプール歩行と同様の酸素摂取量が得られたとの報告をしている. これらの研究報告は共に, 水中では身体と水との相対速度が酸素摂取量に大きな影響を及ぼすことを示している.

しかしながら我々が知る限り, 他の装置と併用することなく流水を負荷として用いた水中歩行²⁷⁾については, 他の水中歩行と比較可能なデータは限られており, 種々の水中歩行の中でその位置付けが未だ明かではない. そこで本研究では, 流水を負荷として用いた水中歩行の特性について, スイミングプールでの水中歩行および陸上トレッドミル歩行の生理学的応答ならびに運動学的特徴を比較検討することにより, 明らかにすることを目的とした. まず生理学的応答については酸素摂取量と心拍数を, 運動学的指標はストライド頻度や立脚期・遊脚期に要した時間などを計測し, 同時に下腿3筋の筋活動を筋電図法を用いて計測し分析した.

II. 方 法

A. 被検者

被検者は健康な男性6人で, その身体的特性は年齢 25.3 ± 3.0 歳, 身長 171.7 ± 4.9 cm, 体重 68.5 ± 4.5 kg であった. 水中歩行を行ったスイミングプールの水深は 113 cm, また流水装置として用いた回流水槽の水深は 110 cm であった. なお, この水深は被検者のほぼ腸骨稜高に相当した. 各被検者がスイミングプールで実験を行った際の水中での体重は 37.6 ± 2.7 kg であり, 陸上での体重のおおよそ半分であった. 被検者には事前に研究の主旨, 内容が説明されており, 研究への参加は自発的な同意を得て行なわれた. また本研究計画書は中京大学大学院体育学研究科倫理委員会に提出され, 同委員会の承認を得て実験が行われた. 本実験に参加した被検者には本測定の前に陸上ト

レッドミル, スイミングプールおよび流水装置を用いての十分な歩行練習を行わせており, 歩行には習熟していたものと判断された.

B. 実験機器とプロトコール

陸上トレッドミル歩行(以下, 陸上歩行)には, 埋め込み型トレッドミル(NT-12, Atype, 西川鉄鋼)を用いた. また流水を負荷として用いた歩行(以下, 流水歩行)では, 中京大学水泳科学研究施設内にある垂直循環型回流水槽アクア-ジム(Aqua-gym, 石川島播磨重工業)を用いた. アクア-ジムは流速を最大秒速 2.0 m まで, 多段階に正確に設定することができる循環型の回流水槽である. アクア-ジム水槽側面は, 水中動作を確認するためガラス張りになっている. 次にスイミングプールでの歩行(以下, プール歩行)は, 室内の 25 m 温水プール(縦 25 m × 横 17 m の全 8 コース)にて行った. 被検者はペースメーカが設定したスピードに合わせ, スタート飛込み台側の壁面に沿い, プールの横幅 17 m の距離を往復した. プールの底面は, 両スタート飛込み台からプールの中心部分である 12.5 m 付近に向かってなだらかに深くなっており(その差約 15 cm), 水位の違いによる影響を除くため, 勾配の無いプールの横方向を往復した. なおスイミングプールの壁面には, 水中動作観察用にガラス張りの窓が3箇所にある. まずプール縦方向 25 m 側の壁面中央部分に $1.30 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$ の窓が1つ, プール横方向 17 m 側の壁面には $1.00 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$ の窓がそれぞれの壁面の1コース側と8コース側に対角をなすように取り付けられている.

被検者はスイミングパンツに着替え, 水中歩行用シューズ(アクアスター, ユニスター)を履いた. 筋電図(EMG)の測定は, 直径が 5 mm の Ag-AgCl 皿状表面電極(日本光電)を前脛骨筋, 腓腹筋外側頭の筋腹へ電極間の距離が 2.5 cm となるよう装着した. ヒラメ筋への装着は, 腓腹筋とヒラメ筋の境界から約 3 cm アキレス腱側へ, 他の2筋と同様に電極間距離が 2.5 cm となるよう装着した. 電極を装着した部位は装着前に剃毛後, サンドペーパー(住友 3 M)により角質層を除去

し、アルコールで拭き脱脂し、電極間抵抗が $5\text{ k}\Omega$ 以下となるようにした。またアースとして腸骨隆へ電極を装着した。そして電極の上から防水のため、術後用トランスベアレントシートを装着した。EMGは多チャンネル生体用テレメータシステム(WEB-5000, multi-channel biotelemetry system, 日本光電)を用い時定数 0.03 sec で導出し、データレコーダ(A-109データレコーダー, ソニー)にて記録した。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。なお呼気中の酸素濃度と換気量そして心拍数は、携帯用生体計測メモリーシステム(Macquart, VINE)を用いて計測した。なお1名の検者が、多チャンネル生体用メモリーシステム(EMG用)と携帯用生体計測メモリーシステム(ガス用)を保持し、被検者の歩行の妨げにならないよう随伴した。

陸上歩行では、1台のビデオカメラ(Sony Handycam CCD SC9, ソニー)を用い、トレッドミル歩行路の側方約 5 m より歩行の撮影をした。流水歩行についても同様のビデオカメラをガラス張りになっている回流水槽の側方約 4.8 m から撮影を行った。プール歩行では同じビデオカメラを用い、水中歩行を行っている反対側の壁面にある水中動作観察用ガラス窓より撮影を行った。これらのビデオ映像とEMGシグナルとを同期させるため、ビデオ映像にはストロボフラッシュを、データレコーダにはイベントマークを同時記録した。

実験のプロトコルは共通で、最初の5分間は立位にて安静状態をとらせ、安静時の心拍数(HR)と酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を測定した。回流水槽の流水スピード、およびプールと陸上トレッドミルの歩行スピードは全被検者共通で $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を初速とした。その後は $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ および $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ に上げた。なお各スピードでの運動時間は4分間であった。それぞれのスピードでストライド頻度と歩幅は規定せずに、被検者各自に任せた。予備実験では、多くの被検者が $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を超えるスピードでのプール歩行が困難であったため、本実験の歩行速度に $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を最大スピードと

し、普通の歩行スピード($0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)と、比較的遅い歩行スピード($0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)の3スピードとした。したがって本実験の歩行スピードはプール歩行を基準としたので、特に $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ は陸上歩行としては非常に遅いスピードであった。なお水温は、実験を通して 29°C であった。

C. データ分析

各歩行の運動強度の生理学的指標として測定した $\dot{V}O_2$ とHRは、それぞれのスピードで定常状態にある最後の30秒間を分析し求めた。次に、流水歩行とプール歩行および陸上トレッドミル歩行においてそれぞれの $\dot{V}O_2$ とHRの関係を分析した。

次に、ビデオカメラで撮影した映像からストライド頻度、立脚期と遊脚期に要した時間を求めた。立脚期と遊脚期については、右足の接地から同じ右足の靴先が離れるまでを立脚期とし、右足の靴先が離れてから次に右足が接地するまでの時間を遊脚期とした。そして連続した立脚期と遊脚期を合わせて1ストライドとし、ストライド頻度は1分間当たりのストライド数として計算した。

EMGに関しては、アナログシグナルを 1 kHz で12ビットアナログ-デジタル変換ボードを介してAD変換した。EMGの量的な解析のためシグナルは全整流化した後、積分筋電図(iEMG)を求めた。被検者ごとに、データに欠損の無い平均的な8ストライドを選び、その平均値をiEMGの値として用いた。そしてiEMGの値を被検者間、筋群間で規格化するためにMVCを100%とした相対的強度(%MVC)を算出した。なおEMGについては、最高歩行スピードである $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ についての解析を行った。iEMGについての群間における有意差の有無については、一元配置の分散分析を行った。その際、主効果に有意差があった場合には多重比較を行い、有意水準は5%未満とした。

$\dot{V}O_2$ 、HR またストライド頻度、立脚期と遊脚期に要した時間については、種々の群間における有意差の有無を、それぞれ繰り返しのある二元配置の分散分析を行い、主効果に有意差があったも

のについて多重比較を行った。なお有意水準は5%未満とした。

Ⅲ. 結 果

A. $\dot{V}O_2$ と HR

Fig. 1 に、歩行スピードと $\dot{V}O_2$ との関係を示した。流水歩行はプール歩行より $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に低かった。しかしながら流水歩行と陸上歩行との間には有意な差は無かった。またプール歩行は陸上歩行より $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と

$0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に高かった。3歩行ともスピードの増加に伴い $\dot{V}O_2$ は有意に増加していた。

Fig. 2 には Fig. 1 と同様に、歩行スピードと HR との関係を示した。 $\dot{V}O_2$ と同様に、HR についても流水歩行はプール歩行より $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に低かった。またプール歩行は陸上歩行より $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ にて有意に高かった。しかし、流水歩行の HR は陸上歩行より安静時と $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に低かった。3歩行ともにスピードの増加に伴い HR は有意に増

Fig. 1. The relation between walking speeds and oxygen uptake. Values are mean $\pm$ SD. $p < 0.05$

Fig. 2. The relation between walking speeds and heart rate. Values are mean $\pm$ SD. $p < 0.05$

Fig. 3. The relation between oxygen uptake and heart rate.

Fig. 4. The relation between walking speeds and stride frequency. Values are mean $\pm$ SD. $p < 0.05$

加していた。

B. $\dot{V}O_2$ と HR の関係

流水歩行とプール歩行，陸上歩行のそれぞれの $\dot{V}O_2$ と HR の関係について回帰直線の傾きと Y 切片についての有意差検定を行った。それぞれの $\dot{V}O_2$ と HR の関係を Fig. 3 に示したが，流水歩行の回帰直線の傾きと Y 切片はプール歩行と有意差が無かった。同様にプール歩行と陸上歩行についても傾きと Y 切片に有意差はなかった。流水歩行と陸上歩行については回帰直線の傾きに有意差は無かったが，Y 切片は流水歩行が陸上歩行と比べ有意に低い値であった。

C. ストライド頻度，1 ストライドに要した時間と 1 ストライドに対する立脚期・遊脚期の割合

Fig. 4 には，歩行スピードとストライド頻度との関係を示した。流水歩行のストライド頻度は歩行スピードの増加に伴い有意に減少していた。プール歩行では歩行スピードの増加に伴ったストライド頻度の変化は無く，陸上歩行については，スピードの増加と共に有意に増加していた。次に各歩行間での有意差については，流水歩行のストライド頻度は陸上歩行より $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に低かった。しかし流水歩行のストライド頻度はプール歩行と有意差は無かった。次にプール歩行のストライド頻度であるが，流水歩行と同様に陸上歩行より $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に低かった。

Table 1 に 1 ストライドに要した時間，立脚期と遊脚期のそれぞれに要した時間の割合を示した。流水歩行ではスピードの増加と共に 1 ストライドに要した時間が有意に増加していた。プール歩行では 1 ストライドに要した時間に有意

Table 1. Time duration during one stride (sec) and the ratio of stance and swing phases (%).

	0.4 m·s ⁻¹	0.6 m·s ⁻¹	0.8 m·s ⁻¹
Water flow walking	1.94±0.19 (66:34)	2.06±0.20 (64:36)	2.17±0.25 (64:36)
Swimming pool walking	2.00±0.26 (59:41)	2.01±0.15 (59:41)	1.80±0.21 (57:43)
Land walking	1.79±0.48 (65:35)	1.51±0.36 (63:37)	1.25±0.12 (62:38)

(stance phase swing phase) Values are mean±SD.

*shows significant difference ($p<0.05$).

な変化は無く、陸上歩行では歩行スピードの増加に伴い1ストライドに要した時間は減少していた。次に各歩行間での比較をしてみると、流水歩行が1ストライドに要した時間はプール歩行と有意差は無く、陸上歩行の $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に長かった。同様にプール歩行が1ストライドに要した時間は、陸上歩行の $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で有意に長かった。

立脚期と遊脚期に要した時間の割合を見ると、流水歩行とプール歩行では歩行スピードが高くなっても変化は無かった。しかし陸上歩行では、立

脚期に要する割合が、歩行スピードの増加に伴い有意に低くなっていた。各歩行間での比較については、流水歩行の立脚期に要する割合はプール歩行と比べ、全てのスピードで有意に高かった。しかし陸上歩行に対しては有意差が無かった。またプール歩行の立脚期に要する割合は、陸上歩行に対して有意に低かった。

D. 下腿3筋の筋活動

Fig. 5 には $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ での各歩行における前脛骨筋、ヒラメ筋、腓腹筋外側頭の %MVC を示

Fig. 5. Relative iEMG of lower leg muscles at $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Values are mean±SD. $p<0.05$

Fig. 6. The typical example of the lower leg muscles activities during different types of walking at $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

した。流水歩行では前脛骨筋の活動が陸上歩行よりも有意に高く、ヒラメ筋の活動はプール歩行と比べ有意に低かった。またプール歩行と比べ腓腹筋外側頭の活動は有意に低かった。プール歩行では前脛骨筋の活動は陸上歩行に比べ有意に高く、ヒラメ筋に有意差は無かった。また腓腹筋外側頭の活動は陸上歩行と比べ有意に高かった。Fig.6には1例として $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ での各歩行における前脛骨筋、ヒラメ筋、腓腹筋外側頭の筋活動の様相を示した。縦の破線は、靴先が地面から離れた離地時を示している。

IV. 考 察

A. 歩行スピードと酸素摂取量

水中では身体に加わる抵抗値を正確に算出することは困難であるため、異なるスピードの $\dot{V}\text{O}_2$ や HR を測定することで水中歩行の運動強度を他の運動と比較評価してきた。そのため広く普及しているプール歩行だけでなく、近年開発された水中トレッドミルまた流水装置、そしてこれら2つの装置を組み合わせた水中歩行装置などを用いた種々の水中歩行の運動強度に対する関心は高い。

そこでそれぞれの装置を用いた水中歩行の $\dot{V}\text{O}_2$ をプール歩行と比較すると、水中トレッド

ミル歩行はプール歩行³⁾の約1/3の $\dot{V}\text{O}_2$ ⁴⁾であったとの報告がある。この時の歩行スピードは約 $0.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ であり、本研究で用いたプール歩行最高スピード ($0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) とほぼ同等である。一方で水中トレッドミルでの最高歩行スピードは $2.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ²⁶⁾ との報告があることから、約 $0.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ は水中トレッドミル歩行にとってかなり遅い歩行スピードであったと考えられる。水中トレッドミル歩行はその場での歩行運動であり、プール歩行とは異なり場所を移動することによって起こる水の圧力抵抗、特に体幹部や下腹部に対しては、一定の場所で運動している限り加わらない。これは水中トレッドミル歩行の一つの特徴であり、 $\dot{V}\text{O}_2$ と歩行スピードの関係は他の水中歩行と大きく異なると考えられる。次に水中トレッドミルと流水装置を併用した場合であるが、トレッドミルと同じ流速を加えることでプール歩行と同様の $\dot{V}\text{O}_2$ が得られることから¹¹⁾、身体と水との相対的な速度も同等であると考えられる^{11, 21)}。

流水歩行の $\dot{V}\text{O}_2$ を同じ歩行スピード ($0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) でのプール歩行と比較した場合、流水歩行はプール歩行のおおよそ半分であった。しかし流水歩行の最高スピードが $0.8 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で²⁷⁾ あ

ったのに対し, プール歩行でも $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とほぼ同等であったことから, この2種類の水歩行中の身体と水との相対的な速度は, 身体との速度が同じであれば変わらないとの推測ができる. 従ってこれら2種類の水歩行での $\dot{V}\text{O}_2$ の差異は, 移動を伴うプール歩行では推進力を得るための仕事が必要であったため生じたと考えられる.

B. 水中での $\dot{V}\text{O}_2$ -HR 関係について

水中では静水圧が身体末梢部の静脈還流を促進させ, 中心血流量を増大させる役割を果たすことが知られている^{1,2)}. 結果として水中での歩行や走行運動中の心拍数減少^{13,23,24)}を引き起こし, $\dot{V}\text{O}_2$ と HR の関係は陸上と水中では歩行や走行運動中に異なる^{13,23,24)}との報告がなされている. しかしながら本研究では, プール歩行の $\dot{V}\text{O}_2$ -HR 回帰は陸上歩行の $\dot{V}\text{O}_2$ -HR 回帰との間に有意差が無かった. その理由の一つとして, 水位の違いが考えられる. $\dot{V}\text{O}_2$ と HR の関係が, 陸上と水中で運動中に異なるとした先行研究では, 水中歩行や水中走行中の水位は首のレベル^{23,24)}もしくは肩のレベル¹³⁾である. しかし腰レベルの水位で行う水中歩行においては我々と同様に, $\dot{V}\text{O}_2$ と HR の関係に水中と陸上で違いが見られないという結果が示されている^{3,27)}. また酸素脈には, 陸上トレッドミル走と1.3mの水位での水中ランニングの間に有意差が無い²⁵⁾との報告もなされている.

それでは何故, $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 試行だけとはいえ, プール歩行とほとんど同じ水位で行われた流水歩行の心拍数が, 陸上歩行と比べ有意に低かったのであろうか. その原因の一つに, 運動様式の違いがあるのではないかと考えられる. 例えば自転車漕ぎ運動^{1,2)}や, 腕クランキング運動¹⁶⁾では HR は陸上での運動より水中で有意に減少している. 主動筋となる筋の形態的, 機能的な特性が筋の血流分布の相違に影響していると考えられることから^{7,12)}, プール歩行と流水歩行に動員された筋の種類, 筋量の違いなどが, 筋ポンプ作用に大きな影響を与えていたのではないかと考えられる.

また同じ水中で行われたプール歩行と流水歩行

ではあるが, 二種類の歩行運動のテンポは異なっていた. Kagaya ら¹⁴⁾によれば, 血流量が最も増加する運動のテンポが存在する. 動的足底屈運動時の下腿血流量は遅いテンポからテンポが早くなるにしたがって増加し, $60 \text{ 回} \cdot \text{分}^{-1}$ あたりでピークになるという. 本実験では, 全ての歩行スピードで流水歩行のストライド頻度はプール歩行のストライド頻度を有意に下回っており, 運動のテンポの違いが下肢の筋群によるリズムカルな筋収縮に伴った筋ポンプ作用に影響を及ぼしていた可能性も考えられる.

C. ストライド頻度

陸上歩行では歩行スピードの増加と共に歩幅とストライド頻度が増加し, 特に比較的速度では遅い時には歩幅の増加率が大きく, 高い速度ではストライド頻度の増加率が大きくなる^{8,9,15)}と報告されている. しかし低重力下でのランニングでは, 地上(1 G)と比べストライド頻度も低くなる⁶⁾. また先行研究で明らかになった水中トレッドミルを用いた水中歩行のストライド頻度も陸上歩行より有意に低い^{20,26)}. この結果は本研究においても同様であった. 水中でのストライド頻度減少について, 数式モデルを用いたシミュレーションから原因を明らかにしようとする試みがなされている. 身体質量を1点としてあらわし, 脚をバネに擬似した質量-バネモデル¹⁸⁾を用いて, He ら⁶⁾は低重力下ランニングの運動学的及び運動力学的シミュレーション値と, ケーブルサスペンション法を用いた低重力下実測値を報告している. 質量-バネモデルの低重力下でのシミュレーション値, 実測値共に, ストライド頻度は地上と比べ低重力下で有意に減少している. Newman ら²⁰⁾は低重力下では運動中の協調リズムに乱れがあり, 乱れない陸上と比べてストライド頻度が低くなることを指摘している. 水中では浮力や水による抵抗など陸上とは異なる力が働き, この力が歩行リズムを乱す原因となりストライド頻度減少につながったのではないかと考えられる.

D. 下腿3筋のEMGからみた流水歩行の特徴

同じ水中運動である流水歩行とプール歩行を比較すると、水に対するそれぞれの動きは一見同様に見える。しかし、本研究が明らかにしたように、両者間には多くの相違点がある。プール歩行ではヒラメ筋、腓腹筋外側頭の筋活動が流水歩行に比べ有意に高い(Fig. 5)。また、各歩行における下腿3筋の筋活動の様相(Fig. 6)を見ると、足がプールの底から離れる直前にプール歩行と陸上歩行でヒラメ筋、腓腹筋外側頭の活動が活発になっている。一方で流水歩行では、プール歩行に比べ特に腓腹筋外側頭の活動が非常に低かった。したがってプール歩行では、プールの底に力を作用させ推進力を得る、いわゆる“足のケリ”が大きく、そのことが流水歩行との $\dot{V}O_2$ やHRの差異の原因であると考えられる。流水歩行は流水を負荷として行うその場での歩行運動であり、プール歩行や陸上歩行と比べ“足のケリ”の働きが重要ではなかったと考えられる。

V. ま と め

流水装置を用いた水中歩行の特性を、プール歩行および陸上歩行の生理学的応答ならびに運動学的特徴を比較検討することにより明らかにすることを目的として、種々の歩行における $\dot{V}O_2$ とHR、またストライド頻度などの運動学的指標と下腿3筋の筋活動を計測し、以下のような結果と結論を得た。

1) 流水歩行の $\dot{V}O_2$ はプール歩行と比べ有意に低い値を示したが($0.6, 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、陸上歩行と同程度であった。流水歩行は流水を負荷として行うその場での歩行運動であり、プール歩行と比べ推進力を得るための仕事が必要なかったからと考えられる。

2) プール歩行の $\dot{V}O_2$ とHRとの関係は陸上歩行と同様であった。しかし流水歩行と陸上歩行を比較すると、同じ $\dot{V}O_2$ の時に流水歩行のHRが陸上歩行よりも低い値を示した。これはプール歩行と流水歩行の運動様式の違いが、筋ポンプ作用などに影響を及ぼしたことが原因であると考えら

れる。

3) 流水歩行のストライド頻度は歩行スピードの増加に伴い有意に減少していた。プール歩行では、歩行スピードの増加にもかかわらずストライド頻度の変化はなかった。陸上歩行は、スピードの増加に伴い有意に増加していた。両水中歩行が陸上歩行よりもストライド頻度が有意に低かったのは、水中では浮力や水による抵抗など陸上とは異なる力が働くことによる、歩行リズムの乱れが原因となったものと考えられる。

4) 流水歩行では、プール歩行に比べ特に腓腹筋外側頭の活動が非常に低かった。つまり流水歩行は流水を負荷として行うその場での歩行運動であるため、プール歩行や陸上歩行と比べ“足のケリ”の働きが重要ではなかったと考えられる。

以上より、流水装置を用いた水中歩行は陸上歩行はもとより、プール歩行とは異なる生理学的、および運動学的特徴を持つ水中歩行運動であることが明らかとなった。

(受理日 平成13年10月17日)

VI 文 献

- 1) Christie JL, Sheldahl LM, Tristani FE, Wann LS, Sagar KB, Levandoski SG, Ptacin MJ, Sobocinski KA, Morris RD: Cardiovascular regulation during head-out water immersion exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1990), **69**: 657-664.
- 2) Connelly TP, Sheldahl LM, Tristain FE, Levandoski SG, Kalkhoff RK, Hoffman MD, Kalbfleisch JH: Effect of increased central blood volume with water immersion on plasma catecholamines during exercise. *J. Appl. Physiol.* (1990), **69**: 651-656.
- 3) Evans BW, Cureton KJ, Purvis JW: Metabolic and circulatory responses to walking and jogging in water. *Res. Q. Exerc. Sport.*, (1978), **49**: 442-449.
- 4) Gleim GW, Nicholas JA: Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. *Amer. J. Sports Med.*, (1989), **17**: 248-252.
- 5) Green JH, Cable NT, Elms N: Heart rate and oxygen consumption during walking on land and in deep water. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, (1990), **30**: 49-52.
- 6) He, G, Kram, R., McMahon, TA: The mechanics of running under low gravity. *J. Appl. Physiol.*, (1991), **71**: 863-870.
- 7) 本間俊行, 本間幸子, 加賀谷淳子: 膝伸展運動時にみられる共同筋間での酸素供給・消費バランス

- の相違. 体力科学, (1998), **47**: 525-534.
- Honma, T, Honma, S, Kagaya A: Difference in oxygen supply-consumption balance in thigh muscles working together during knee-extension exercise.
- 8) 星川 保, 松井秀治, 宮下充正, 亀井貞次: 体育的立場からの歩及び走の総合的研究, 体育学研究, (1969), **13**: 171-178.
 - 9) 星川 保, 宮下充正, 松井秀治: 歩及び走における歩幅と歩数に関する研究, 体育学研究, (1970), **16**: 157-162.
 - 10) 堀田昇, 大柿哲朗, 金谷庄蔵, 荻原博嗣: 術後低体力者に対する水中での運動療法, 健康科学, (1993), **15**: 57-61.
 - 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) 市ノ瀬慈歩, 東香寿美, 清水静代, 加賀谷淳子: 静的活動中の筋形状の変化が筋血流量に及ぼす影響. 第14回日本バイオメカニクス学会大会概論, (1999), 156-160.
 - 13) Johnson, BL, Stromme, SB, Adamczyk, JW, Tennoe, KO: Comparison of oxygen uptake and heart rate during exercises on land and in water. Phys. Therapy, (1977), **57**: 273-278.
 - 14) Kagaya A: Reduced exercise hyperaemia in calf muscles working at high contraction frequencies. Eur J Appl Physiol, (1992), **64**: 298-303.
 - 15) 加賀谷 熙彦: Walking, Running の Critical Speed と Stride, 身体運動の科学V, 日本バイオメカニクス学会編, 杏林書院, (1983), 92-108.
 - 16) 木村真規, 鈴木政登, 矢澤 誠, 村岡 功: 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, (2001), **8**: 41-48.
 - 17) Matsui, T, Miyauchi, M, Saito, T, Nakahara, H, Koeda, M, Hayashi, N, Onodera, S: Cardiovascular responses during moderate water exercise and following recovery. Biomechanics and Medicine in swimming VIII, Eds. by Keskinen KL, Komi, PV, Hollander, AP, Jyväskylä, Gummerus Printing, (1999), 345-350.
 - 18) McMahon, TA, Cheng, GC: The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? J. Biomech., (1990), **23**: 65-78.
 - 19) Nakazawa, K., Yano, H, Miyashita, M: Ground reaction forces during walking in water. Medicine and Science in Aquatic Sports, Miyashita M, Mutoh Y, Richardson AB (Eds) Basal, Karger, (1994), **39**: 28-34.
 - 20) Newman, DJ, Alexander, HL, Webbon, BW. Energetics and mechanics for partial gravity locomotion. Aviat. Space Environ. Med., (1994), **65**: 815-823.
 - 21) 西園秀嗣, 下大迫 晃, 芝山秀太郎: 水中では筋電図からみた歩行パターンはどのように変化するか? 第12回バイオメカニクス学会大会論文集94, 第12回バイオメカニクス学会, (1994), 225-229.
 - 22) 小野寺 昇, 宮地元彦, 木村一彦, 米谷正造, 中村由美子: 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, (1993), **14**: 100-104.
 - 23) Ritchie SE, Hopkins WG: The intensity of exercise in deep-water running. Int. J. Sports Med., (1991), **12**: 27-29.
 - 24) Svedenhag J, Seger J: Running on land and in water: comparative exercise physiology. Med. Sci. Sports Exerc., (1992), **24**: 1155-1160.
 - 25) Town GP, Bradley SS: Maximal metabolic responses of deep and shallow water running in trained runners. Med. Sci. Sports Exerc., (1991), **23**: 238-241.
 - 26) 渡辺一志, 宮側敏明, 宮本忠吉, 西村直記, 藤本繁夫: 水中および陸上トレッドミル歩行における下肢筋活動, 大阪市立大学保健体育学紀要, (1996), 1-7.
 - 27) Yu E: Cardiorespiratory responses to walking in water. Medicine and Science in Aquatic Sports M. Miyashita et al. (Eds.) S. Karger, Basel, (1994), 35-41.