

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

	川崎医療 福祉大学	小野寺	昇
(共同研究者)	同	宮地	元彦
	同	木村	一彦
	同	米谷	正造
	同	中村	由美子

The Effects of Viscosity and Depth of Water on Energy Expenditure during Water Treadmill Walking.

by

Sho Onodera, Motohiko Miyachi, Kazuhiko Kimura,
Shozo Yonetani, Yumiko Nakamura
Department of Health and Sports sciences
Kawasaki University of Medical Welfare

ABSTRACT

We have previously clarified that energy expenditure during water walking was increased by high viscous resistance of water. It was known that the metabolic responses during water walking were affected by the depth of water, temperature and velocity.

The purpose of the present study was to examine the effects of viscosity and the depth of water on the energy expenditure during walking in water. Five males were employed as subjects.

They walked on treadmill in air, in water and in viscous water. The depth of water was set at the height of waist and knee joint of the subjects. The set duration and velocity of walking were 15

minutes and $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively. The viscous water contained 1% solution of carboxymethyl cellulose (viscous coefficient: 470 cps). Oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}) was measured during walking. \dot{V}_{O_2} at steady state for all conditions were significantly different. Therefore the difference of depth and viscosity of water affects energy expenditure during exercise in water.

We suggest that walking in viscous water is an effective training method, especially during the recovery from injuries.

要 旨

水中粘性歩行運動における水位の違いが運動強度設定の負荷となり、同時に運動処方への活用が可能かどうかを検討した。水中歩行運動は水中トレッドミルを用いて行った。粘性抵抗は水溶性カセロースエーテル (470 cps) を 1% 濃度で水道水に溶かすことにより高めた。歩行速度は $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (15 分間)、水温は 30°C 、水位は腰部と膝関節部とした。対照条件として陸上でのトレッドミル歩行および水道水での同水位での水中歩行を行った。

運動開始後 5 分における酸素摂取量は、粘性水における膝関節の高さ、水道水における膝関節の高さ、粘性水における腰部の高さ、水道水における腰部の高さの順に多かった。これらの酸素摂取量を粘性と水位を因子とした二元配置分散分析法で比較した。粘性、水位の両因子で比較した場合、酸素摂取量に有意なばらつきの違いが見られた。このことは粘性抵抗や水位が水中歩行運動中のエネルギー代謝量の変化に影響を与えることを示唆している。同時に水の粘性や水位が運動強度設定の要因となり得ることが示された。

緒 言

水中において生体は、水の持つ物理的特性の影響を受け、陸上とは異なる生理的反応を示す。水

中歩行をはじめとする水中運動において、生体にかかる重要な負荷として水の粘性抵抗があげられる。われわれは、水の粘性抵抗の違いが水中歩行運動中のエネルギー代謝に有意な影響を及ぼす要因であることを示した¹⁰⁾。

これまで水中の走、歩行運動中の酸素摂取量、心拍数、呼吸商、体温等が測定され^{1, 3, 4, 12, 14, 15)}、さらに速度、水深、水温との関係も明らかになっている^{4, 8, 15)}。

自由度の高い水中での負荷を一定条件に保つことは難しい。Graig ら²⁾は、改良した自転車エルゴメータを水中で用い、負荷を一定にした。Ritchie ら¹²⁾、Bishop ら¹⁾はプールを走歩行させている。これらに対し、Gleim ら⁴⁾は水中トレッドミルを用いて負荷を設定した。本実験においても、水中トレッドミルを用い、水中歩行の速度、水深、水温等の条件を整えた。

水中での歩行運動においては、浮力がかかり、下肢関節への負荷が減少するため下肢に障害のある者、肥満化傾向にある者、そして、傷害からの復帰のためのトレーニング中の者に、適切な運動となり得る。そこで本研究においては、これらの運動処方の基本的な資料を得ることを目的として、浮力をあげることなく、水の粘性を高めた水中における水深の違いが水中歩行時のエネルギー代謝に及ぼす影響について検討した。

1. 研究方法

被験者は健康成人男子5名とした。被験者の年齢は 36.8 ± 7.4 歳 (平均値 \pm 標準偏差), 身長は 173.4 ± 3.1 cm, 体重は, 73.6 ± 4.8 kg であった。5名のすべての被験者は, 粘性を高めた水の中 (水位: 膝の高さ《Viscous Knee》, 水位: 腰の高さ《Viscous Waist》), 水道水の中 (水位: 膝の高さ《Water Knee》, 水位: 腰の高さ《Water Waist》), そして, 陸上 (Treadmill) の5条件で, 15分間のトレッドミル歩行を行った。実験は条件別に5日に分けて行った。実験室温, 水温ともに 30°C とした。

水の粘性は, 水溶性セルロースエーテル 1% 水溶液により粘度 470 cps (20°C の水は 1 cps) まで高めた。この水溶液の比重は 1.0, pH 7.2 から 7.4 で本実験で用いた水道水と同質であった。水中歩行は, 水中トレッドミル (フローミル, MR 1200 M, YAMAHA) を用いて行った。この装置は床面にトレッドミルが設置してあり, 歩行速度は $5.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ の速度まで無段階に設定可能である。すべての実験条件において歩行速度は $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ とし, 水流のない静止水で行った。陸上歩行は通常のトレッドミル (ELG 2, Woodway) を用いた。どの条件においても傾斜 0° の水平面で歩行運動を行った。

運動開始2分前から運動開始までの2分間に立位での安静呼気ガスを, 同時に15分間の運動中の呼気ガスを連続的にブレスバイブレス (各呼吸ごと) で測定した。呼気ガス量は, タービンセンサー方式で, 呼気酸素濃度は, ジルコニア法で, そして, 呼気二酸化炭素濃度は, 非分散赤外線吸収法で分析した。酸素濃度と二酸化炭素濃度の値から演算し酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}) を求めた (MMC 4400 tc, Sensor Medics)。

2. 結果

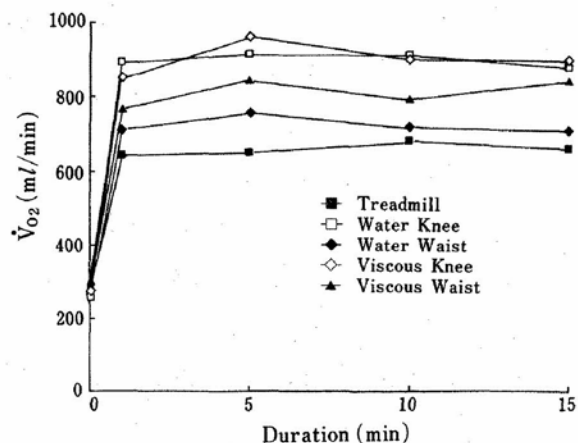


図1 The changes of \dot{V}_{O_2} during walking in each condition. There were significant differences of variance among each condition.

図1に5条件下での酸素摂取量の変化を示した。水中運動では水の浮力の影響で下肢にかかる体重による負荷が減少するため, あえて酸素摂取量の絶対値で示した。粘性トレッドミル・腰条件, 水中トレッドミル・腰条件, 水中トレッドミル・膝条件, そしてトレッドミル条件では, 運動開始後約1分で定常状態に達したが, 粘性トレッドミル・膝条件においては, 他の4条件より30秒から1分の遅れがあった。粘性トレッドミル・膝条件以外は, その後いずれの条件においてもほとんど定常状態で運動終了まで継続した。

すべての条件について粘性と水位を因子とした二元配置分散分析法を用いて統計処理を行った。粘性トレッドミル・膝条件における酸素摂取量は, 水中トレッドミル・膝条件より $0.045 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 多く, 粘性トレッドミル・腰条件における酸素摂取量は, 水中トレッドミル・腰条件より $0.085 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ 多かった。水位の因子から見ると, 膝条件と腰条件との間に, 有意な酸素摂取量の分布違いが観察され, 膝条件の方が大きなエネルギー消費が見られた。このことは, 水中歩行運動において粘性抵抗がエネルギー消費量に負荷となったことに加え, 水位の違いが同様の影響を

与えたことを示唆している。

3. 考 察

水中トレッドミル歩行では歩速の増加に対して、酸素摂取量は指数関数的に増加するので、歩速が $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ を越えると酸素摂取量の増加率が大きくなる⁴⁾。水位は、被験者が受ける浮力に影響を与え、重力方向へかかる力は水位が高くなるにつれ小さくなる。しかしながら、水中歩行では進行方向への動作に水の粘性抵抗がかかるため、同じ速度で歩行してもエネルギー消費量は必ずしも水位と相関しない。

同じ速度の場合、大腿部中央の水位で酸素摂取量が最も大きく、つぎに膝関節の水位、そして腰部の水位の順に大きくなる。そして、腰部の水位における代謝量は陸上歩行に最も近い代謝量であることも報告している⁴⁾。

今回得られた結果はこの報告と同じ傾向にあり、粘性を高めた水においても同じ傾向を示した。このことは、粘性抵抗により運動強度を変化させることが可能であることを示唆すると同時に、粘性を高めた水中歩行の運動処方への活用が期待できる。

水中歩行運動中の生体生理的応答には、速度、水深が影響する。水の粘性抵抗を変化させた時のエネルギー代謝量の変化はほとんど知られていない。1%セルロースエーテル水溶液中でのトレッドミル歩行では、水道水でのトレッドミル歩行と比較して、心拍数と酸素摂取量のどちらかにおいても有意に高い値を示す¹⁰⁾。1%水溶性カセロースエーテル水溶液の比重は、水道水と同じなので歩行中、重力方向に下肢にかかる力は粘性トレッドミル条件と水中トレッドミル条件では等しいと考えられる。1%水溶性カセロースエーテル水溶液の粘性は470 cps (水の470倍)であり、この粘性抵抗が水中での脚動作に負荷として加わり、循環系や代謝系に影響を及ぼしたものと考えられ

る。粘性トレッドミル・膝条件と水中トレッドミル・膝条件の酸素摂取量は運動開始10分から15分までほとんど同じ値をとった。これは、水位が低いために歩行運動の動作が水の抵抗を減少する方向に変化したためであると考えられた。

これらの結果は、水中運動中のエネルギー消費量に影響を及ぼす因子として従来報告されてきた歩行速度、水深、水温のほかに水の粘性も重要な因子であることを示唆する。

腰部の水位における $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ での水中歩行の運動強度はおよそ $30 \sim 40\% \dot{V}O_{2\max}$ に相当する軽度の負荷強度であり、血中乳酸濃度は変動する可能性が少ないことからあえて血中乳酸濃度は測定しなかった⁷⁾。

水温に関する報告によれば、水中運動における心拍数および酸素摂取量は、 25°C より低温の場合、陸上運動や水温 30°C 以上の水中運動と比較すると、心拍数は約15%減少し、逆に酸素摂取量は増加する^{2,8)}。また、水温が 35°C 以上になると心拍数は増加するが、酸素摂取量は減少するとも報告されている⁴⁾。これらのことから本実験では水温を 30°C とした。

生体は胸部までの浸水により胸腔外圧が増加し、胸腔内圧が相対的に低くなる。同時に浮力による無重力状態に近い環境の出現あるいは皮膚血管収縮も加わり、胸腔内血流量が増加する^{6,11)}。これらの影響を少なくするために水位は腰部より下に設定した。

また、浸水初期には血液希釈も観察される^{5,9)}。われわれは粘性を高めた水の中での歩行運動における運動前後での血中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 濃度を比較検討し、運動後に K^+ 濃度の有意な差を示し¹⁰⁾、このことは浸水初期に生じる血液希釈によるものであると推測した。

4. ま と め

成人男子5名を対象に、粘性トレッドミル・膝

条件, 粘性トレッドミル・腰条件, 水中トレッドミル・膝条件, 水中トレッドミル・腰条件, そしてトレッドミル条件下での水中および粘性水中歩行運動を15分間実施し, その間の酸素摂取量を比較した。

トレッドミル条件とほかの4条件における酸素摂取量を, 粘性と水位を因子とする二元配置分散分析法により統計処理した結果, 水位の変化とともに水の粘性の違いが, 水中歩行運動中のエネルギー消費量に影響を与えることが明らかとなった。粘性の高い水の中での水中歩行は, 運動処方への活用が期待できる。

謝 辞

稿を終えるにあたり, 御指導をいただいた川崎医療福祉大学 小野三嗣教授に深謝します。

また, 水中トレッドミルおよび粘性材料に関する提言をいただいた, ヤマハ発動機株式会社と四国化成株式会社に感謝します。

文 献

- 1) Bishop, P. A., Frazier, S., Smith, J., Jacobs, D.; Physiologic responses to treadmill and water running, *Phys. Sports Med.*, 17, 2, 87-94 (1989)
- 2) Craig, A. B., Dvorak, M.; Comparison of exercise in air and in water of different temperatures, *Med. Sci. Sports.*, 1, 3, 124-130 (1969)
- 3) Evans, B. W., Cureton, K. J., Purvis, J. W.; Metabolic and circulatory responses to walking and jogging in water, *Res. Q.*, 49, 4, 442-449 (1978)
- 4) Gleim, G. W., Nicholas, J. A.; Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures, *Am. J. Sports Med.*, 17, 2, 248-252 (1989)

- 5) Greenleaf, J. E., Morse, J. T., Barnes, P. R., Silver, J., Keil, L. C.; Hypervolemia and plasma vasopressin response during water immersion in men, *J. Appl. Physiol.*, 55, 1688-1693 (1983)
- 6) Hong, S. K., Cerretelli, P. C., Cruz, J. C., Rarn, H.; Mechanics of respiration during subimmersion in water, *J. Appl. Physiol.*, 27, 535-538 (1969)
- 7) 井川幸雄, 鈴木政登, 塩田正俊; カテコールアミン, レニン, アンギオテンシンおよびCAMP反応に及ぼす運動負荷強度の影響, *体育科学*, 12, 201-212 (1984)
- 8) McArdle, W. D., Magel, J. R., Lesmes, G. R., Pechar, G. S.; Metabolic and cardiovascular adjustment to work in air and water at 18, 25, and 33°C, *J. Appl. Physiol.* 40, 85-90 (1976)
- 9) McMurray, R. G.; Plasma volume changes during submaximal swimming, *Eur. J. Appl. Physiol.* 27, 535-538 (1969)
- 10) 小野寺昇 他; 水の粘性抵抗が水中トレッドミル歩行中の心拍数と酸素摂取量に及ぼす影響, *宇宙環境航空医学*, 29, 67-72 (1992)
- 11) Risch, W. D., Koubenec, H. J., Beckmann, U., Lange, S., Gauer, O.; The effect of graded immersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution and heart rate in man, *Pflugers Arch.*, 374, 115-118 (1978)
- 12) Ritchie, S. E., Hopkins, W. G.; The intensity of exercise in deep-water running, *Int. J. Sports Med.*, 12, 1, 27-29 (1991)
- 13) 鈴木正登, 桜井智野風, 井川幸雄; 水泳最大運動および走最大運動時血液生化学成分応答, *宇宙航空環境医学*, 27, 43-52 (1989)
- 14) Town, G. P., Bradley, S. S.; Maximal metabolic responses of deep and shallow water running in trained runners, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23, 2, 238-241 (1991)
- 15) Whitley, J. D., Schoene, L. L.; Comparison of heart rate responses water walking versus treadmill walking, *Phy. Ther.*, 1501-1504 (1987)