

原 著

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

小野寺昇 宮地元彦 矢野博巳 木村一彦
中村由美子 池田 章

川崎医療福祉大学 医療技術学部 健康体育学科

(平成5年4月15日)

Influence of Viscous Resistance and Water Temperature on Oxygen Uptake and Rectal Temperature during Treadmill Walking in Water

**Sho ONODERA, Motohiko MIYACHI, Hiromi YANO, Kazuhiko KIMURA
Yumiko NAKAMURA and Akira IKEDA**

*Department of Health and Sports Sciences
Faculty of medical professions
Kawasaki University of Medical Welfare
Kurashiki 701-01, Japan
(Accepted on Apr. 15, 1993)*

Key words : viscous resistance, water temperature, rectal temperature

Abstract

The purpose of the present study was to clarify the metabolic responses to exercise in viscous water at a lower temperature of water. Three males served as subjects. They walked on a treadmill in water and viscous water for 45 minutes at water temperatures of 22°C and 30°C. Speed of walking was 4 km · h⁻¹.

Viscous water was 1% solution of carboxymethyl cellulose.

Viscous resistance was affected by water temperature. To keep the viscous resistance, we adjusted the percentage of solution according to water temperature. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and rectal temperature were measured during walking. At 30°C of water temperature, rectal temperature rose in normal water and viscous water. A rate of increase of rectal temperature in viscous water was higher than that of normal water. At 22°C of water temperature, rectal temperature might be shown rising in viscous water and lowering in normal water. $\dot{V}O_2$ for viscous water was higher than that of normal water

at both 30°C and 22°C water temperatures. The rate of increase of $\dot{V}O_2$ at 22 was lower than that of viscous water. These results suggest that viscous water may decrease a heat dissipation. We consider that walking in viscous water become an effective prescription of exercise, for keeping a body temperature.

要 約

本研究の目的は、粘性抵抗の高い水中での歩行運動において低い水温環境が代謝に及ぼす影響を明らかにすることであった。被験者は3名の健康な男子とした。被験者は45分間、水温22°Cと30°Cの水道水の中及び粘性抵抗を高めた水の中を水中トレッドミルで歩行した。歩行速度は4 km・h⁻¹とした。粘性抵抗を高めた水は1%カルボキシメチルセルロースとした。粘性抵抗は水温の変化によって変化した。従って、水溶性カルボキシメチルセルロースの濃度を変えることにより粘性抵抗を一定に保った。

水中歩行運動中の酸素摂取量と直腸温を測定した。水温30°Cにおいて直腸温は、水道水及び粘性水で上昇した。直腸温の上昇率は粘性水が高い傾向にあった。水温22°Cにおいて直腸温は、粘性水で上昇し、水道水で下降する傾向を示した。粘性水における酸素摂取量は水温30°C及び22°Cのどちらでも水道水より高かった。水温22°Cにおける酸素摂取量の増加率は水温30°Cよりも低い傾向にあった。これらの結果は粘性水が熱放散を減少したことを示唆する。粘性水での水中歩行運動は体温を保持するので運動処方に効果的であると考えられる。

緒 言

生体は浸水により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。胸部までの浸水により陰圧呼吸となり、かつ浮力によって無重力状態に近い環境となる。同時に皮膚血管収縮も加わり胸腔内血流量も増加する¹⁾²⁾。浸水初期には血液希釈も生じる³⁾⁴⁾。水中運動ではこれらの影響を受け心拍数、酸素摂取量、体温等が陸上運動とは異なる変化を示す⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。水中走・歩行運動時の速度⁸⁾¹⁰⁾、水深⁸⁾、水温⁸⁾¹¹⁾¹²⁾の生体へ与える影響についても明らかになっている。我々は水中運動の運動処方への適応について検討してきた。特に水の粘性抵抗が与える負荷について検討し、粘性の高い水中での歩行運動時に心拍数と酸素摂取量の有意な増加を明らかにした¹³⁾。水中では自由に身体を動かすことが可能なので、あらゆる方向への負荷が設定できるものと考えられる。

これまで水温による影響を検討した報告は真水の中のものであり、粘性抵抗を高めた水中での生体に及ぼす影響について明らかにした報告

はない。本研究では粘性を高めた水中歩行運動の温度環境の変化による生体への影響について検討し、粘性の運動処方への適応のための基礎的な資料を得ることを目的とした。

方 法

健康な成人男子3名を被験者とした。表1に被験者の年齢、身長及び体重を示した。3名の被験者は22°Cの水道水と、粘性を高めた水の中、及び水温30°Cの水道水と、粘性を高めた水の中を45分間、水中歩行は水中トレッドミル(ヤマハ発動機、フローミル、MR1200M)を用いて時速4 kmで行なった。水位は大腿骨大転子の高さとした。粘性抵抗は1%繊維素カルボキシメチルセルロース(CMC)を用いた。水温30°Cでの

表1 被験者の年齢、身長及び体重

被験者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)
S, O	37	177	78
K, K	49	175	78
H, Y	28	175	75

粘性は470cps (20°Cの水は1 cps)であった。粘性は水温が低くなると増加することが知られている。22°Cの場合は、30°Cと同様の粘性を得るためにCMCの濃度を0.7%とした。この水溶液の比重は水道水と同様の1.0であり、pHも水道水と同様の7.2~7.4であった。従って人体に悪影響を及ぼすことはなかった。

Pugh¹⁴⁾は、水温の違いによる体温の低下傾向を示した。24.2°Cから21.8°Cの間で直腸温の低下程度に著しい差がみられることを示した。Craigら¹¹⁾とMcArdleら¹²⁾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して酸素摂取量が増加することを示し、Gleimら⁸⁾は35°C以上になると酸素摂取量は減少することを示した。これらのことから本実験では水温を30°Cと22°Cに設定した。

水位は被験者が受ける浮力に影響を与え、重力方向にかかる力は水位が高くなるほど小さくなる。しかしながら水中歩行運動では進行方向への動作に水の粘性抵抗がかかるために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。Gleimら⁸⁾は、大腿部の水位、膝関節の水位、腰部の水位の順に酸素摂取量が小さくなることを示し、腰部の水位が陸上歩行に最も近いことを示した。また、胸部の水位では陰圧呼吸の影響が係わるので水位は大腿骨大転子の高さとした。

歩行速度は歩速の増加に対して酸素摂取量が指数関数的に増加し $4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ を境界として酸素摂取量の増加率が高くなることから $4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ とした。また、低水温における運動では熱放散の影響が皮膚温では短時間にその影響が観察されるが、直腸温では、ある程度長い時間で変化するため運動時間を45分に設定した。

30°Cの水温では運動開始2分前から安静時の呼気ガスを、同様に45分間の運動中の呼気ガスも連続的にブレスバイブレス(各呼吸毎)で測定した。22°Cの水温での安静状態で体温の急激な放出がみられるため、水に入ると同時に歩行運動を開始した。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、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)を求めた(Sensor

Mecics, MMC440tc. USA)。得られたブレスバイブレスの呼気ガス分析値から1分毎の平均値を算出した。安静時ならびに運動中の心拍数は胸部双極誘導にて連続的に測定した(日本光電, WEP7404)。

水温環境の変化にともなう直腸温の変動を直腸温計(日本光電, MGA3-219)によって運動開始前から運動終了(1分毎に記録)まで観察した。

浸水による血液希釈及び運動による血液濃縮の影響をみるために運動前と運動終了後5分目で被験者の血液を肘静脈から採血し、血中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 濃度を測定した。血液中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 濃度は電極法で分析した。同時に低温環境下での運動では生体のストレスが生じると考えられることからその指標となる白血球(WBC)を運動前後で全自動血球計数器(日本光電, MEK6108)で測定した。また、大腿骨大転子の水位における $4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ での水中歩行の運動強度は約30~40% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ に相当する軽度の運動負荷であるが運動時間が45分間と長いので血液中の乳酸濃度を酸素法を用いてラクテートアナライザー(YS123A)で測定した。

本研究の被験者は3名であったため、3名の各々のデータをそのまま示した。

実験結果

図1に被験者S. Oの水温30°C(A)と22°C(B)における直腸温の変化を示した。水温30°Cにおける水道水の歩行では安静から14分まで37.4°Cを示し、15分、25分、36分に0.1°Cずつ上昇した。運動終了まで0.3°Cの上昇がみられた。一方、粘性水においては安静時37.0°Cであり、1分、3分、8分、11分、19分、25分、32分、41分にそれぞれ0.1°Cずつ上昇した。運動終了まで0.8°Cの上昇がみられた。

図には示さないが、被験者K. K及びH. Yにおいても同様の傾向がみられた。水温30°Cにおける水道水での歩行では被験者K. Kで運動終了までに0.1°C、被験者H. Yで0.4°Cの上昇が観察された。粘性水において被験者K. Kで0.2°C、被験者H. Yで0.5°Cの上昇がみられた。

水温22°Cにおける水道水での歩行では図1Bに

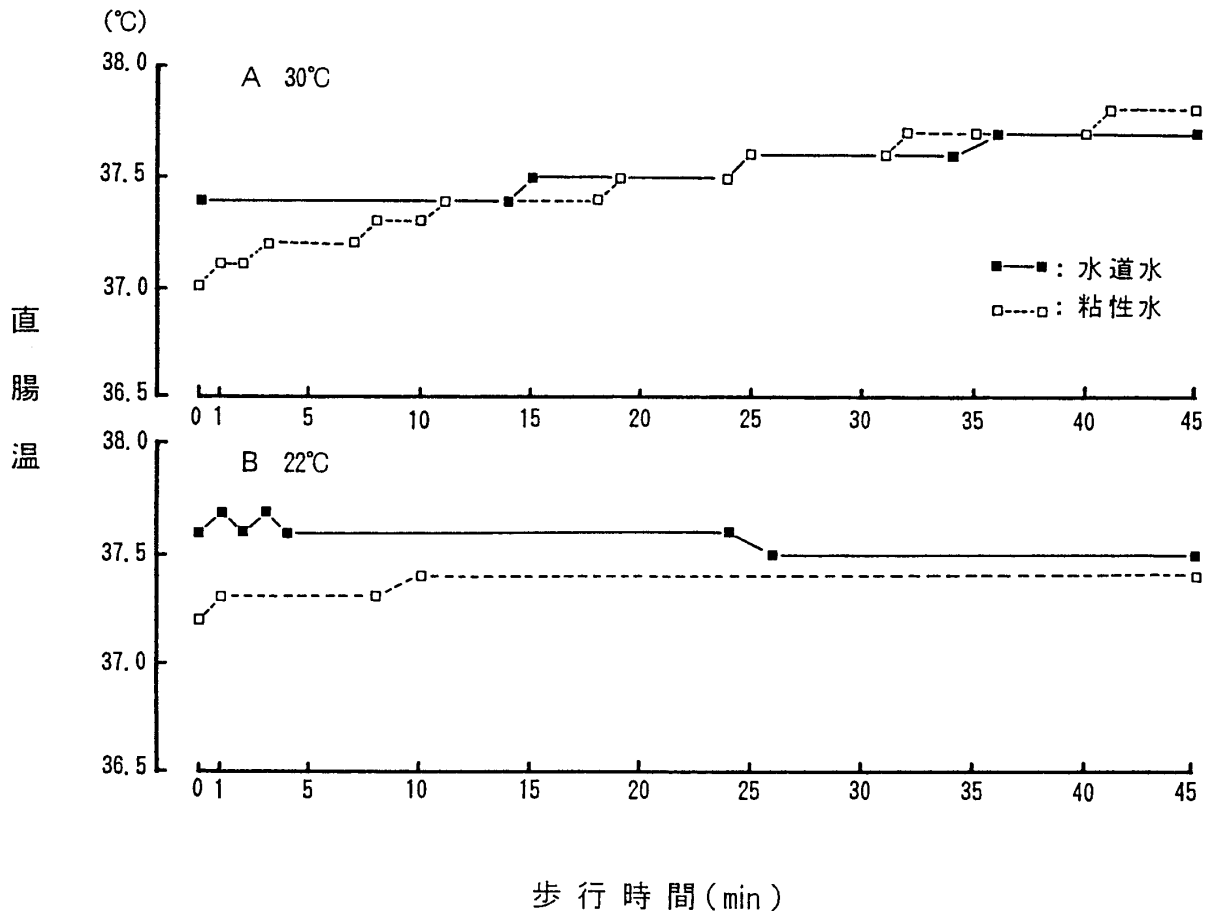


図1 水温22°Cと30°Cにおける水道水と粘性水の水中歩行運動中の直腸温変化(被験者 S.O)
A:水温30°C, B:水温22°C

示した様に被験者 S. O では、安静時で37.6°Cであったが、運動開始4分まで0.1°Cの上昇・下降の変動がみられたが、26分で0.1°C下降し、運動終了まで連続した。粘性水においては安静時で37.2°Cであり、運動開始1分、10分で0.2°Cの上昇が観察され運動終了まで継続した。

被験者 K. K 及び H. Y においても同様の傾向が観察された。被験者 K. K では安静時で37.3°Cであり、9分まで±0.1°Cの変動がみられたが19分、37分、44分に0.1°Cずつ下降し、運動終了時には37.0°Cであった。被験者 H. Y では安静時37.4°Cであり、1分、6分で0.1°Cずつ上昇したが38分、42分で0.1°Cずつ下降した。粘性水においては被験者 K. K は安静時で37.2°Cであり、運動開始後1分、27分で0.1°Cの下降がみられた。被験者 H. Y では安静時において37.0°Cであり、運動開始後2分、6分、17分、24分まで0.1°Cずつの上昇が観察された。

図2に水温30°C (A) と22°C (B) における被験者 S. O の水道水と粘性水での酸素摂取量の変化を示した。30°C (図2A) では水道水、粘性水いずれにおいても運動開始後1~2分でほぼ定常に達し、5分から運動終了時までほぼ一定の酸素摂取量で推移した。酸素摂取量は水道水よりも粘性水の方が約85ml/min高かった。同様の傾向が他の2名の被験者においても観察された。

水温22°Cにおいては水道水の場合、15分まで変動がみられたが15分以降はほぼ一定の酸素摂取量で推移した。粘性水では2分からほぼ一定の酸素摂取量で推移した。酸素摂取量は粘性水が5分から10分で約80ml/min、15分から30分で約20ml/min、35分から45分で約50ml/min、水道水よりも高い傾向にあった。同様の傾向は他の2名の被験者でもみられた。

表2に運動前と運動終了後の血中電解質濃

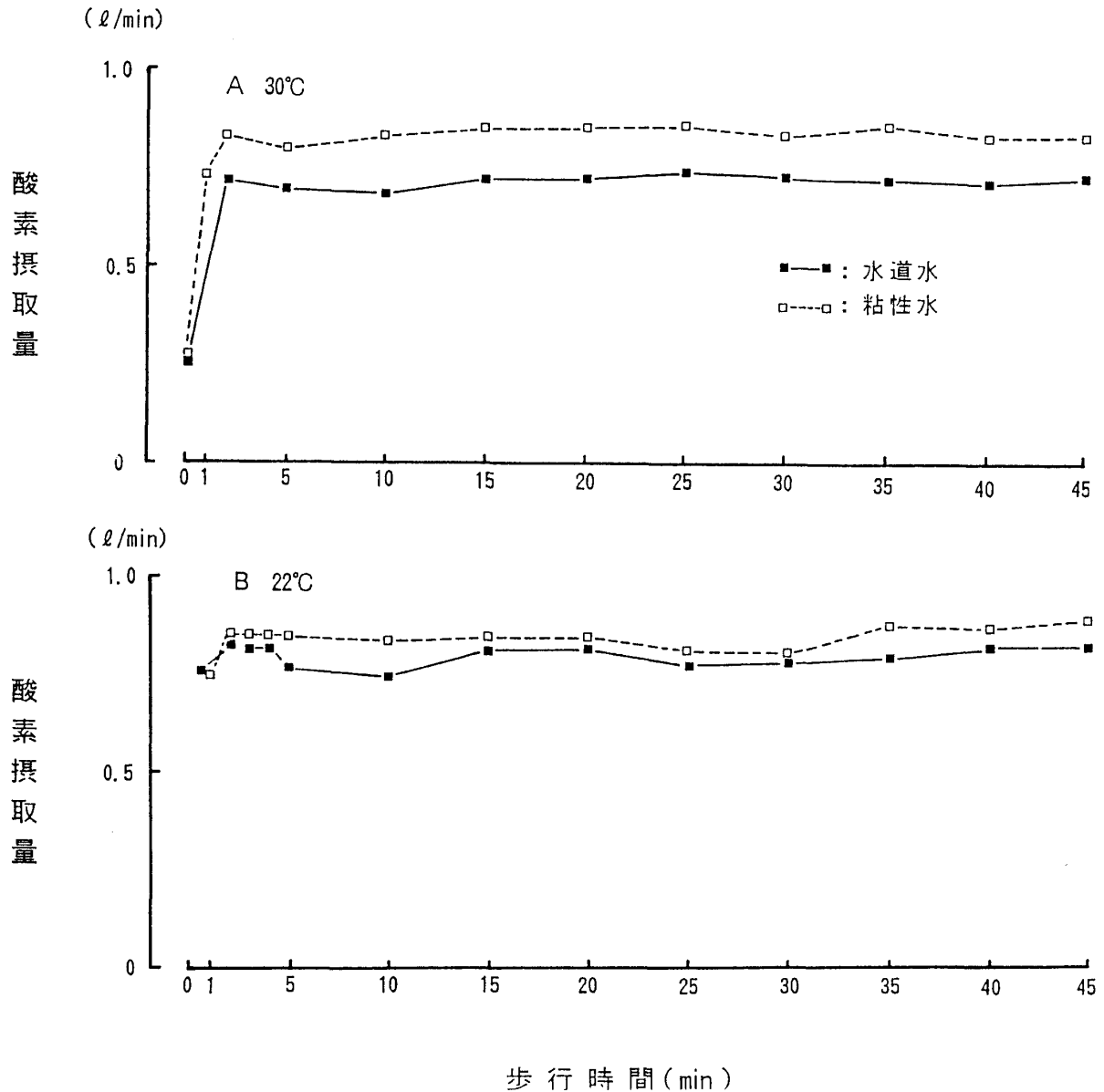


図2 水温22°Cと30°Cにおける水道水と粘性水の水中歩行運動中の酸素摂取量変化(被験者 S.O)
A: 水温30°C, B: 水温22°C

度, 乳酸値及び白血球数の比較を示した, 血中電解質は運動前・後で大きな変化は認められなかった. また, 運動強度の指標とされる乳酸値は同様に運動前・後で大きな変化を示さなかった. ストレスの指標とされる白血球数は水温22°Cにおいてわずかに上昇傾向を示したが大きな変化はではなかった.

考 察

水中歩行運動中の生理反応には, 歩行速度, 水深, 水温が影響を与えることがすでに知られ

ている⁸⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾. これらの因子の他に我々は水の粘性抵抗が水中運動中の循環器応答やエネルギー代謝に影響を与えることを示した¹³⁾. 1%CMC水溶液中でのトレッドミル歩行では普通の水の中でのトレッドミル歩行と比較して心拍数と酸素摂取量が有意に高いことを示した. このことは水の粘性抵抗が水中での脚移動動作に対し, より大きな負荷として加わったことを示唆する. しかしながら, 粘性抵抗を高めた水中での運動において水温が循環系や代謝系にどのような影響を与えるかは明らかになっていない.

表2 水道水と粘性水及び水温22°Cと30°Cにおける歩行運動前、運動終了後(5分)の血中Na, K, Cl, 乳酸値及び白血球の変化

被験者	水温 (°C)		Na (mEq.l ⁻¹)	K (mEq.l ⁻¹)	Cl (mEq.l ⁻¹)	乳酸 (mM)	白血球 (×10 ² /μl)	
S. O	30	水道水	前	141	3.9	101	0.7	59
			後	140	4.1	100	0.9	62
	粘性水	前	141	4.0	101	1.1	65	
		後	141	4.3	102	0.8	62	
	22	水道水	前	142	3.7	102	0.9	68
			後	142	3.9	102	0.7	71
粘性水	前	139	4.0	100	0.6	60		
	後	138	3.9	100	0.9	80		
K. K	30	水道水	前	141	3.9	101	1.1	76
			後	141	4.0	101	0.9	69
	粘性水	前	142	3.7	102	0.9	54	
		後	141	3.8	100	0.7	54	
	22	水道水	前	144	4.1	102	0.8	59
			後	141	4.2	103	0.7	56
粘性水	前	141	4.1	99	0.8	54		
	後	138	3.9	100	0.9	65		
H. Y	30	水道水	前	141	3.5	98	0.4	41
			後	141	4.5	100	0.5	37
	粘性水	前	140	3.9	98	0.4	56	
		後	139	4.2	98	0.5	54	
	22	水道水	前	140	3.9	99	0.7	58
			後	140	3.8	101	0.6	51
粘性水	前	139	3.9	99	0.7	49		
	後	141	4.1	101	0.4	54		

直腸温は各々がサーカディアンリズムを持っている¹⁵⁾ため安静時直腸温は各被験者間でわずかな差があり、同一被験者でも実験日毎に異なっていた。そのため、安静時からの上昇・下降で考察した。水温30°Cにおける直腸温はすべての被験者で水道水及び粘性水のどちらでも上昇し、増加量は粘性水がわずかに多かった。このことは粘性水において被験者の熱放散量が少なかったことを示唆する。水温22°Cにおける直腸温はすべての被験者で水道水のときがわずかではあるが下降傾向にあった。この傾向は、これまでの低水温での報告⁸⁾¹¹⁾¹²⁾と一致する。一方、粘性水のとき2名の被験者において0.2°C~0.3°Cの

上昇傾向を示し、1名の被験者では安静時の直腸温を維持していた。このことは粘性水が被験者の熱放散量を抑制したものと考えられる。丹羽¹⁵⁾は水温21°Cでの浸水安静時の直腸温の変化を観察し、0.56°C下降することを示した。本実験の22°Cの水道水では大腿骨大転子の水位であったことで熱放散面積が小さかったこと、歩行運動による熱産生により、下降の程度が少なかったものと考えられる。

粘性水の条件で熱放散が抑制されたことは、粘性水そのものの物理的な特性が大きく関与しているものと考えられる。それは、粘性水の比熱が水道水よりも低いことであり、そのために熱放

散が少なかったものと考えられる。さらに粘性水は水道水に比較し、粘性が高いだけ流体の流れが少なくなり対流による熱伝導率が低下し、体表からの熱放散が抑制されたものと考えられる。これらのことは水中歩行運動の運動処方を実施の際、粘性水が体温の保持のために有効であることを示唆する。

酸素摂取量は、22°C及び30°Cのどちらにおいても水道水より粘性水が高かった。その増加量は22°Cの方が少なかった。Craigら¹¹⁾とMcArdleら¹²⁾は水温25°Cでは水温30°C以上の水中運動と比較し、酸素摂取量が増加することを示した。本実験の結果においても同様の傾向がみられた。同時に上述した様な物理的な特性のために熱放散が粘性水で抑制されたため30°Cにおける水道水と粘性水の酸素摂取量の差より小さくなったものと考えられる。

小野寺ら¹³⁾は、水温30°Cにおける水道水と粘性水の水中歩行運動で血中電解質のNa⁺とCl⁻に対して相対的なK⁺濃度の上昇を観察した。このことは運動時間が15分であったため浸水による血液希釈が誘発されたものと考えられた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。本実験においては運動時間が45分だったため著明な変化は生じなかった。また、運動によるストレスの指標となる白血球数は水温22°Cにおいてわずかな上昇がみられた。水道水よりも粘性水にその傾向が大きかったことは低温環境においても粘性水が生体にとって負荷として加わったことを示すものと考えられる。

本実験では、運動前と運動終了後5分で比較したすべての条件下で乳酸値はほとんど差がなかった。これは、運動強度が30~40% $\dot{V}O_{2max}$ 程度と見積られるためと考えられ、このことは血中での動態に大きな変化はなかったことを示す

ものである。井川ら¹⁶⁾と鈴木ら¹⁷⁾は40% $\dot{V}O_{2max}$ 以下の運動強度では乳酸値だけでなく他の血中物質の生化学的な動態は少ないことを示している。

このことは粘性水での歩行が水中運動における体温の保持に役立つことを示唆するものであり、水中での運動処方を作成するための資料の一つとして重要な知見を示すものと考えられた。

ま と め

健康成人男子3名を対象に水温22°Cと30°Cにおける水道水及び粘性水での水中歩行(45分間)を実施し、直腸温、酸素摂取量の変化を観察した。

1. 水温30°Cでは水道水、粘性水いずれにおいても直腸温の上昇をみた。粘性水の上昇がわずかに高かった。

2. 水温22°Cでは、直腸温は水道水で下降傾向にあったが粘性水では上昇もしくは保持された。

3. 酸素摂取量は水温30°C及び22°Cのどちらでも粘性水のほうが高かった。増加率は水温30°Cの方が22°Cより高かった。

4. これらの傾向は粘性水のもつ物理的な特性による生体への影響のためと考えられた。

これらのことから水中運動における運動処方実施の際、粘性水は熱放散を抑制する効果が期待できると考えられた。

(本研究は、平成3年度川崎医療福祉大学プロジェクト研究による。)

稿を終えるにあたり、水中トレッドミル及び粘性材料に関する提言をいただいたヤマハ発動機(株)と四国化成(株)に感謝します。

文 献

- 1) Hong SK, Cerretelli PC, and Rarn H (1969) Mechanics of respiration during subimmersion in water. *J. Applied Physiology.*, **27**, 535-538.
- 2) Risch WD, Koubenec HJ, Beckmann U, Lange S and Gauer O (1978) The effect of gradedimmersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution and heart rate in man. *Pflugers Archiues.*, **374**, 115-118.

- 3) Greenleaf JE, Morse JT, Barnes PR, Silver J and Keil LC (1983) Hypervolemia and plasma vasopressin response during water immersion in men. *J. Applied. Physiology.*, **55**, 1688—1693.
- 4) McMurray RG (1969) Plasma volume changes during submaximal swimming. *European J. Applied. Physiology.*, **27**, 535—538.
- 5) Biscop PA, Frazier S, Smith J and Jacobs D (1989) Physiologic responses to treadmill and water running. *Physician and Sports Medicine.*, **17**, 87—94.
- 6) Evanns BW, Cureton KJ and Purvis JW (1978) Metabolic and circulatory responses to walking and jogging in water. *Research Quarterly.*, **49**, 442—449.
- 7) Gleim GW, and Nicholas JA (1989) Metabolic costs and heart rate responses to treadmill walking in water at different depths and temperatures. *American J. Sports Medicine.* **17**, 248—252.
- 8) Ritchie SE and Hopkins WG ((1991) The intensity of exercise in deep-water running. *Int. J. Sports Medicine.* **12**, 27—29.
- 9) Town GP and Bradley SS (1991) Maximal metabolic responses of deep and shallow water running in trained runners. *Medicine, Sciences and Sports Exercise.*, **23**, 238—241.
- 10) Whitley JD and Schoene LL (1987) Comparison of heart rate responses water walking versus treadmill walking. *Phy. Ther.*, **1**, 1501—1504.
- 11) Craig AB and Dvorak M (1969) Comparison of exercise in air and water of different temperatures. *Med. Sci. Sports.* **1**, 124—130.
- 12) McArdle WD, Magel JR, Lesmes GR and Pechar GS (1976) Metabolic and cardiovascular adjustment to work in air and water at 18, 25, and 33°C. *J. Applied Physiology.*, **40**, 85—90.
- 13) 小野寺昇, 木村一彦, 宮地元彦, 米谷正造, 原 英喜(1992)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. *宇宙航空環境医学*, **29**, 67—72.
- 14) Pugh LGC and Edholm OG (1955) The physiology of channel swimmers. *Lancet* **2**, 761—768.
- 15) 丹羽健市 (1992) 浸水安静時における体温調節反応の日周変動. *体力科学*, **41**, 255—260.
- 16) 井川幸雄, 鈴木政登, 塩田正俊 (1984) 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.
- 17) 鈴木政登, 桜井智野風, 井川幸雄 (1990) 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.