

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

大阪市立大学 渡辺 一志

(共同研究者) 同 宮側 敏明

同 藤本 繁夫

Influence of Water Immersion Levels on Both Cardiorespiratory Responses and Muscle Activity in Lower Extremity during Treadmill Walking

by

Hitoshi Watanabe, Toshiaki Miyagawa, Shigeo Fujimoto

Institute of Health Science and Physical

Education, Osaka City University

ABSTRACT

The purpose of the present study was to determine the influence of water immersion levels on both cardiorespiratory responses and muscle activities in lower extremity during treadmill walking. Four males and one female (mean age \pm SD, 25.0 ± 2.0 yr) were employed as subjects. They performed treadmill walking both in water and on land. Five levels of water immersion were set : diaphragm, navel, groin, midhigh and knee. Pulmonary ventilation (\dot{V}_E), oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}), heart rate (HR), dyspnea sensation (DS), and leg fatigue sensation (LFS) were measured during exercise.

The electromyogram (EMG) of six muscles, Tibialis anterior (TA), Medial gastrocnemius (MG), Soleus (SOL), Vastus medialis (VM), Rectus femoris (RF), and Biceps femoris (BF) were recorded by means of bipolar surface electrodes in the left lower extremity. At the diaphragm, navel, groin, and midhigh levels, \dot{V}_E , \dot{V}_{O_2} and HR were

enhanced by decreasing the water immersion level, but the influence on the knee was approximately the same as on the mid thigh. At the diaphragm level, the smallest integrated EMG (IEMG) of MG and SOL in one walking cycle at 90 m/min seemed to be caused by force of buoyancy. IEMG of VM and RF was enhanced by decreasing the water immersion level. In contrast, IEMG of RF was suppressed concomitantly with the decrease of the water immersion level.

A significant correlation ($r=0.974$ $P<0.01$) was observed between the IEMG total for all six muscles in the lower extremity at each water immersion level (for one minute duration) and \dot{V}_{O_2} . This result indicated that cardiorespiratory responses during treadmill walking both in water and on land were caused by muscle activity in the lower extremities.

要 旨

健康成人5名を対象に、水中トレッドミル歩行時における水位の差異が、呼吸循環機能および下肢の筋活動に及ぼす影響について陸上と比較検討した。横隔膜、膈、股、大腿中央、膝の5種類の水位においてトレッドミル歩行運動時の換気量、酸素摂取量、心拍数、呼吸困難感、下肢疲労感の生理的応答と前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋、内側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋の下肢筋活動を測定した。換気量、酸素摂取量、心拍数は、水位の低下に伴って増加する傾向を示し、大腿中央と膝の水位ではほぼ同様の値であった。

90 m/min 歩行時の横隔膜水位において、腓腹筋、ヒラメ筋の活動が最も低値を示し、浮力の影響が推察された。内側広筋、大腿直筋は水位の低下とともに増加、大腿二頭筋は、水位の低下に伴い減少する特徴が示された。また、各水位における1分間あたりの下肢筋電積分値の総和と酸素摂取量の応答は、有意な相関関係 ($r=0.974$ $P<0.01$) を示し、水中歩行時の各水位における下肢筋活動が呼吸循環応答に反映されていることが示

唆された。

緒 言

水中環境におけるヒトの生理的反応は、浮力や水の抵抗のみならず水圧や水温等の影響を受け、陸上とは異なる傾向を示す¹⁻⁵⁾。さらに水中運動時では、水中での歩行速度、水位、水温などの変化により酸素摂取量、無酸素性作業閾値、心拍数、血圧、自覚症状などが陸上とは異なった反応を示すことが報告されている⁶⁻¹¹⁾。

とくに水中では、浮力を利用することにより体重負荷を軽減できることから、水中運動は、下肢や腰に障害を持った者や肥満の者でも運動を遂行することができ、各障害者に対するリハビリテーションや治療として活用されている。また健康者に対しても、水の抵抗により、下肢筋への負荷を陸上より増加させることができ、筋力トレーニングの実施が可能と考えられている。しかし、水中歩行時の下肢筋は、浮力と水の抵抗の相互作用を受け、特有な筋活動の様相を呈することが推察されるが、種々の水位と水中歩行時の筋活動に言及した報告はきわめて少ない^{6, 12, 13)}。

水中歩行時にみられる陸上と異なった酸素摂取量や、心拍数などの呼吸循環応答に、水位と下肢の筋活動の関係がどのように関与しているのかを明らかにすることは、トレーニングやリハビリテーションとして水中歩行運動の処方を行ううえできわめて重要な要素である。

本研究では、水中トレッドミル歩行時における水位の差異が、呼吸循環機能にどのような影響を及ぼすのかを明らかにし、各生理的応答に下肢の筋活動がいかに関与しているのかを陸上でのトレッドミル歩行と比較検討した。

1. 対象および方法

対象は、健常人5名（男子4名、女子1名）で年齢、身長および体重は、それぞれ 25.0 ± 2.0 歳、 166.4 ± 7.3 cm、 62.0 ± 8.9 kg（平均±標準偏差）であった。水温は、中和温である 34°C に設定した。水位は、横隔膜、臍、股（恥骨結合）、大腿中央、膝（膝蓋骨中央）の各レベルを選択した。

水中トレッドミル（AQUA-EX-MILL；サンプラテック社製 OCU-1）を用い、水中で約10分間の立位安静後に、初速 60 m/min から3分ごとに 30 m/min ずつ速度を増す漸増法にて 90 m/min、 120 m/min の3段階の歩行を施行した。各水位でのトレッドミル歩行と陸上でのトレッドミル歩行は、順序をランダムにして、約60分の安静をはさんで同一のプロトコールで実施した。

運動時の呼気ガス分析は、ミナト医科学社製呼気ガス代謝装置（Aeromonitor AE-280）を用い、breath-by-breath法により連続記録し、各ステージ2分から3分目の1分間の値を採用した。安静時および運動時の心拍数は、テレメータ心電計（フクダ電子社製）により連続記録した。運動中の自覚症状の評価は、Borg Score¹⁴⁾による呼吸困難感（15段階）および下肢疲労感（11段階）を用いて、各ステージの2分から3分目のScoreを記録した。

トレッドミル歩行時の下肢筋電図は、前脛骨筋、内側腓腹筋、ヒラメ筋、内側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋の6部位で双極表面電極法によって導出した。電極間距離は約3 cmとし、電極間抵抗はいずれも 10 k Ω 以下、日本電気三栄社製の増幅器（EEG 1 A 94）の時定数は、 0.03 秒にて記録した。筋電図は記録紙への描写と同時にいったん、TEAC社製データレコーダ（RD 200 T）に収録し、CANOPUS社製A/D CONVERTER（ADX-98 X）にてA/D変換し、サンプリング周波数 1 kHzで、NEC社製パーソナルコンピュータ（PC 9801 ES）に取り込み、歩行1サイクルの筋電積分値を算出した。なお、積分値は 90 m/min のステージについて求め、2分から3分目の安定した5サイクルの平均をとった。また筋電図の記録から歩数を計測し、1分間あたりの筋電積分値の総和を求めた。陸上との比較におけるトレッドミル差の検定には、Student t-testを用い、有意水準を 5% に設定した。

2. 結 果

各水位における呼吸循環応答ならびに自覚症状について、陸上歩行時と比較して示した（表1）。いずれの水位の運動時でも換気量、酸素摂取量、心拍数、呼吸困難感、下肢疲労感は歩行速度の上昇に伴い増加した。換気量、酸素摂取量は 60 m/min の負荷量では、横隔膜水位で陸上歩行時よりも少なく、臍、股、大腿中央、膝と水位の低下とともに増加傾向を示した。 90 m/min、 120 m/min の負荷量では、陸上歩行時の値が最も低値を示し、横隔膜、臍、股、大腿中央、膝の順となる水位の低下とともに増加する傾向を示した（図1）。

換気量における 90 m/min の負荷量では臍、股、大腿中央、膝の各水位、 120 m/min の負荷量ではすべての水位において陸上より有意に高値を示した。酸素摂取量における 90 m/min の負荷量

表1 各種水位レベルにおける呼吸循環応答ならびに自覚症状

項目	歩行速度	横隔膜	臍	股	大腿中央	膝	陸上
換気量 (l/min)	60m/min	16.8±2.5	18.4±1.6	19.4±2.2	20.7±3.0	21.0±3.0	18.2±2.9
	90m/min	26.8±2.9	29.3±3.7*	33.4±5.2*	37.7±5.2*	38.5±6.2*	22.6±3.1
	120m/min	48.5±8.8*	53.6±10.1*	62.0±9.4*	69.9±3.9*	70.9±11.5*	32.2±6.1
酸素摂取量 (l/min)	60m/min	0.53±0.07	0.63±0.11	0.65±0.09	0.69±0.09	0.70±0.10	0.61±0.08
	90m/min	0.97±0.15	1.10±0.20	1.19±0.23*	1.34±0.15*	1.35±0.23*	0.83±0.10
	120m/min	1.67±0.33*	1.84±0.37*	2.03±0.38*	2.23±0.33*	2.19±0.40*	1.19±0.14
心拍数 (beats/min)	60m/min	71.6±11.7	78.6±10.7	82.7±8.5	87.2±8.5	89.9±9.6	79.9±5.8
	90m/min	92.5±9.2	96.4±12.0	102.5±12.5	111.8±15.4*	113.4±14.4*	88.2±6.2
	120m/min	117.6±13.7	128.0±17.1*	137.9±18.5*	145.4±11.6*	148.8±16.6*	103.4±8.5
呼吸困難感	60m/min	7.3±0.5	7.5±0.6	7.5±1.0	7.5±1.0	7.3±0.5	7.5±0.6
	90m/min	9.0±0.0	9.5±1.7	9.8±1.7	9.5±1.7	9.8±2.2	8.5±0.6
	120m/min	12.8±1.3	12.5±1.3	13.5±1.0	13.8±1.3	14.5±1.9	10.5±2.7
下肢疲労感	60m/min	0.8±0.5	1.3±0.5	1.8±1.0	1.3±0.5	1.0±0.0	0.8±0.5
	90m/min	2.5±0.6	2.8±1.0*	2.8±1.0*	2.8±1.0*	2.8±1.5	1.3±0.5
	120m/min	5.5±1.3*	5.0±1.4	5.5±1.7*	5.3±1.3	5.8±1.5*	2.5±1.7

平均±標準偏差 *P<0.05; 陸上歩行との比較

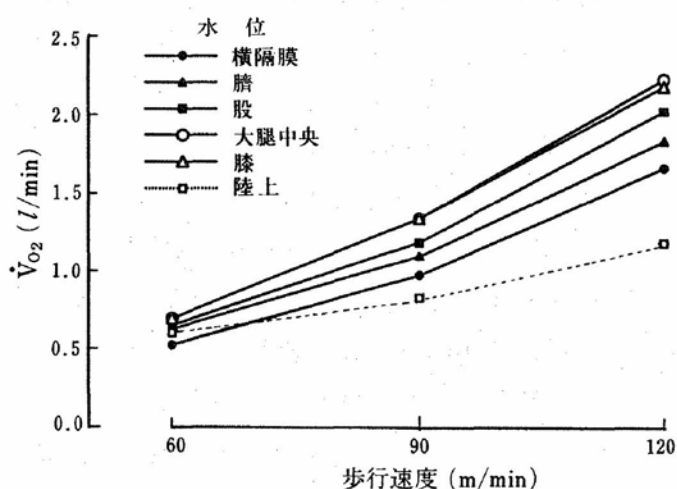


図1 各水位および陸上歩行時の酸素摂取量の変化
 平均値 (n=5)

では股、大腿中央、膝の各水位、120 m/min の負荷量ではすべての水位において陸上の値より有意に高値であった。心拍数は、60 m/min の負荷量では横隔膜、臍の水位で陸上よりも低値を示したが、股、大腿中央、膝と水位の低下とともに上昇した。90 m/min、120 m/min ではいずれも陸上

が最も低値を示し、横隔膜、臍、股、大腿中央、膝と水位の低下とともに増加し、90 m/min の大腿中央、膝、120 m/min の臍、股、大腿中央、膝の各水位では陸上より有意に高値を示した。

一方、呼吸困難感は、90 m/min、120 m/min において陸上最も低値を示したものの各水位との間に有意な差は認められなかった。しかし、下肢疲労感は、60 m/min の負荷量では、各水位と陸上との間に差異は認められなかったが、90 m/min、120 m/min の負荷量では、各水位ではほぼ同様の値を示し、90 m/min の臍、股、大腿中央、120 m/min の横隔膜、股、膝の水位において陸上歩行時の値より有意に高かった。

90 m/min の歩行速度での各水位、および陸上における下肢筋の典型的な筋電図原波形を示した(図2)。陸上歩行時では、前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋に大きな放電が認められた。水中歩行では、前脛骨筋がすべての水位において大きな放電

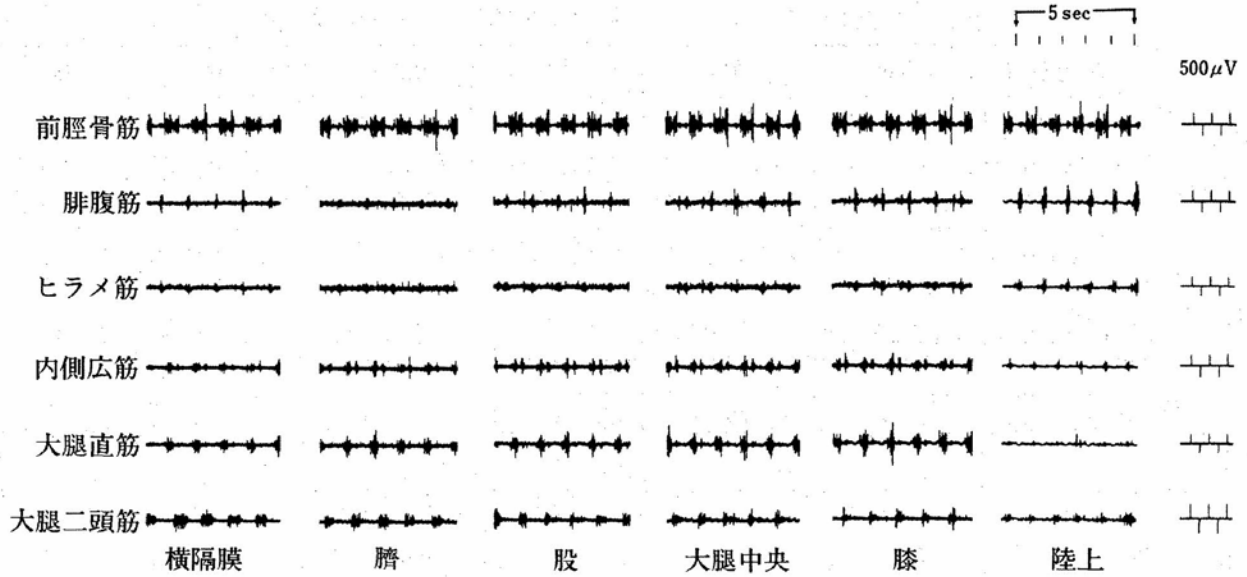


図2 各水位および陸上歩行時の下肢筋の筋電図 (90 m/min)

を示した。また、ヒラメ筋の放電が少なく、内側広筋と大腿直筋の放電は水位の低下に伴い増加する傾向を示した。一方、大腿二頭筋の放電は、水位の低下とともに減少する傾向を示した。

歩行1サイクルの筋電積分値で比較すると、前脛骨筋は、すべての水位において陸上より高値を示し、横隔膜水位を除くすべてにおいて有意差が認められた。腓腹筋とヒラメ筋では、横隔膜水位において最も低値を示したが、各水位と陸上との間に有意な差は認められなかった。

高石ら¹²⁾は、水位 90 cm での水中歩行において、腓腹筋の放電量に顕著な増加が認められたことを報告している。この腓腹筋での差異は、高石らの一般プールでの水中歩行における分析に対し、われわれは、水中トレッドミル歩行であることに起因していると考えられる。水中歩行時の内側広筋、大腿直筋は、水位の低下とともに増加する傾向を示し、内側広筋の大腿中央と膝の水位、大腿直筋の全水位において陸上に比べ有意に大きな値を示した。

大腿二頭筋は、水位の低下に伴い減少する傾向を示し、横隔膜、臍、大腿中央の水位において陸

上より有意に高値を示した。また、歩行1サイクルあたりの下肢筋の筋電積分値の総和(平均±標準偏差)は、陸上歩行時が $196.2 \pm 46.1 \mu\text{V} \cdot \text{s}$ であった。水中歩行時では、すべての水位の値が陸上より有意に大きかった。各水位の値(平均±標準偏差)は、横隔膜; $287.4 \pm 34.4 \mu\text{V} \cdot \text{s}$ 、臍; $309.4 \pm 32.9 \mu\text{V} \cdot \text{s}$ 、股; $318.2 \pm 43.2 \mu\text{V} \cdot \text{s}$ と水位の低下に伴い増加傾向を示し、大腿中央; $311.7 \pm 30.9 \mu\text{V} \cdot \text{s}$ 、膝; $318.4 \pm 37.1 \mu\text{V} \cdot \text{s}$ と膝の水位が最も高値を示した(図3)。

1分間あたりの下肢筋の筋電積分値の総和は、各水位および陸上においてそれぞれ、横隔膜; $13.4 \pm 1.6 \text{ mV} \cdot \text{s}$ 、臍; $14.4 \pm 1.5 \text{ mV} \cdot \text{s}$ 、股; $15.3 \pm 2.2 \text{ mV} \cdot \text{s}$ 、大腿中央; $15.5 \pm 1.4 \text{ mV} \cdot \text{s}$ 、膝; $16.3 \pm 2.1 \text{ mV} \cdot \text{s}$ 、陸上; $11.9 \pm 2.6 \text{ mV} \cdot \text{s}$ であった。各水位における1分間あたりの筋電積分値の総和と酸素摂取量との間に有意 ($r = 0.974$, $P < 0.01$) な相関関係が認められた(図4)。

3. 考 察

われわれは、本研究における水温を呼吸循環系、酸素輸送系および代謝系に最も影響が少ない

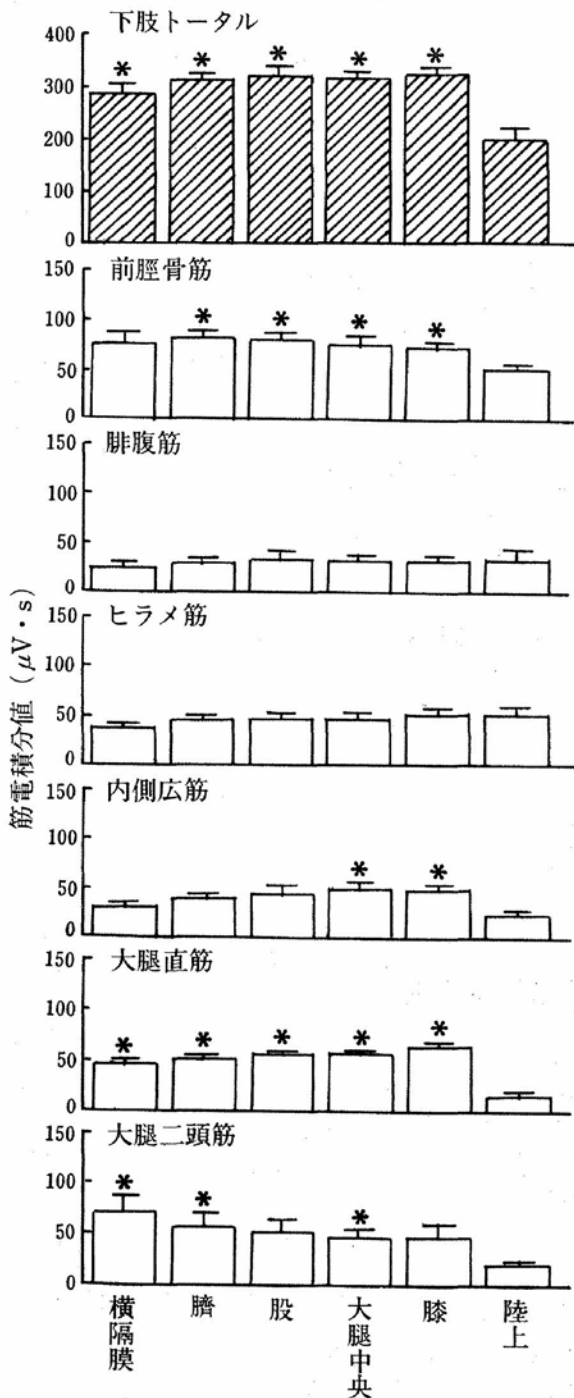


図3 各水位および陸上歩行時の下肢筋の筋電積分値
平均±標準誤差

34°C^{3,5,14})に設定した。この条件で、各種水位が水中のトレッドミル歩行時における酸素摂取量、心拍数、自覚症状などの生体応答に及ぼす影響を明らかにし、それらの応答に下肢の筋活動がどのように関与しているのか検討した。

呼吸循環系に及ぼす水位の影響は、60 m/minの歩行速度では小さく、90 m/min、120 m/minと歩行速度の上昇に伴って顕著となった。同一の歩行速度において陸上歩行の負荷が最も小さく、横隔膜、臍、股、大腿中央と水位の低下に伴い増加し、膝は大腿中央とほぼ同様の負荷であることが判明した。

Gleimら⁶⁾の、腰、大腿中央、膝、足首の水位と陸上歩行時の心拍数および酸素摂取量の報告では、彼らの値が相対的にやや高値ではあるが、腰から膝まで水位の低下に伴い増加を示し同様の傾向であった。

自覚症状については、吸呼困難感、下肢疲労感ともに、60 m/minではいずれの水位においても有意な差異は認められなかったが、歩行速度の上昇に伴って、陸上歩行と水中歩行との差異が認められ、その差異は下肢疲労感において顕著であった。しかし、同一歩行速度での水中歩行における水位の影響は認められなかった。

今回われわれは、生体応答に水位の差異が反映されること。また、120 m/minの横隔膜水位における水中歩行では、一般健常人においてもVTレベル以上¹⁰⁾であること。さらに、肥満者における水中歩行におけるVTがおよそ90 m/minであること¹⁵⁾から、肥満者や障害を持った者でもトレーニングやリハビリテーションに実際に活用できる90 m/minの歩行時について筋活動の分析を行った。

前脛骨筋は、水中歩行において大きな値を示し、陸上歩行との間に有意な差が認められた。この要因としては、できるだけ水の抵抗を軽減すべく足関節を背屈させ、固定した状態で足部を前方へ移動させることが推察される。ヒラメ筋は、横隔膜水位での値が最も小さく、膝の水位と陸上ではほぼ同値であった。これは、水位が低下するとともに浮力の影響が少なくなり、体重負荷が増加することによってヒラメ筋が抗重力筋として働い

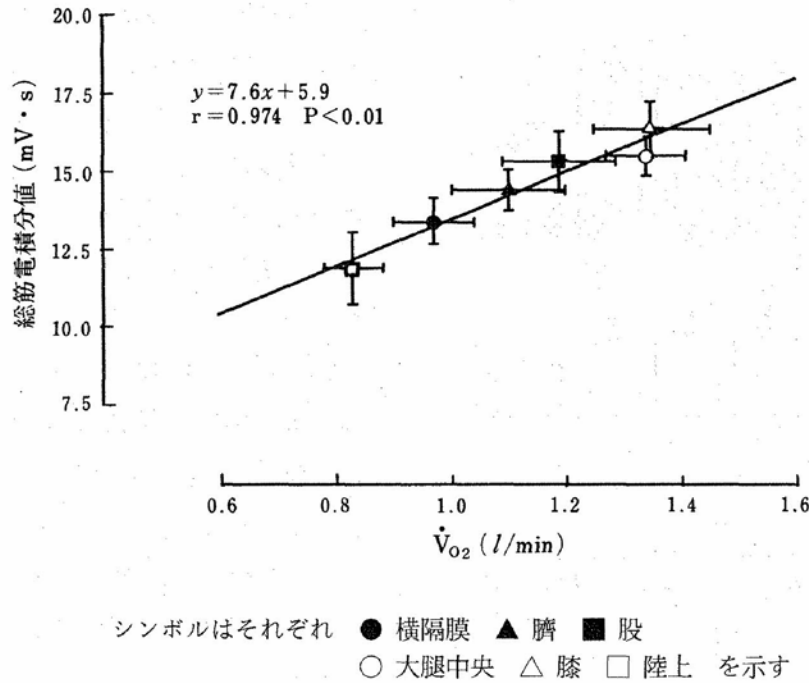


図4 各水位および陸上歩行時の酸素摂取量と総筋電積分値の関係

ていると考えられる。

大腿部の筋活動では、主として膝関節の伸展や屈曲時に大腿直筋や大腿二頭筋が働く。横隔膜や臍のように、浮力の影響が大きい水位での歩行時では、これらの筋群はともに水の抵抗を反映して、陸上歩行に比べ有意に大きな値を示した。水位の影響としては、内側広筋と大腿直筋は、水位の低下とともに増加、大腿二頭筋は、水位の低下に伴い減少するという特徴が示された。この要因としては、水位の低下に伴い歩数が増加して歩行1サイクルあたりの筋収縮時間が短縮するため、単位時間あたりの筋活動量が増加することが考えられる。すなわち、大腿直筋では、膝を伸展させる速度が上昇することによって水の抵抗が増加したことが推察される。

また、各水位における1分間あたりの下肢筋電積分値の総和と酸素摂取量の応答はよく一致 ($r = 0.974$ $P < 0.01$) し、水中歩行の各水位における下肢の筋活動が、呼吸循環応答に反映されていることが示唆された。

4. 総括

水中トレッドミル歩行時における水位の差が、呼吸循環応答および下肢の筋活動に及ぼす影響について検討した。換気量、酸素摂取量、心拍数は、横隔膜、臍、股、大腿中央と水位の低下に伴い増加する傾向を示し、膝と大腿中央ではほぼ同様の値であった。自覚症状については、90 m/min、120 m/minの同一歩行速度において、陸上と水中の差異が認められたが、水位の差異が及ぼす影響は認められなかった。

90 m/minにおける歩行1サイクルの下肢筋活動では、横隔膜水位において、腓腹筋とヒラメ筋の積分値が最も小さく浮力の影響が推察された。内側広筋、大腿直筋において水位の低下に伴う増加の傾向が、大腿二頭筋において水位の低下に伴う減少の傾向が認められた。

また、各水位における1分間あたりの下肢筋電積分値の総和と酸素摂取量の応答に高い相関関係 ($r = 0.974$ $P < 0.01$) が認められた。このことから、水中歩行時の各水位における下肢筋活動が呼

吸循環応答に反映されていることが示唆された。

最後に本研究において、大阪市立大学生活科学研究科院生 宮本忠吉、西村直記に研究協力を得たので、共同研究者として追記する。

謝 辞

本研究に対して研究助成をいただいた、財団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝致します。

文 献

- 1) Alborelius, M. Jr., Balldin, U. I., Lilja, B., Lundgren, C. E. G.; Hemodynamic changes in man during immersion with the head above water, *Aerospace Med.*, **43**, 592-598 (1972)
- 2) Choukroun, M. L., Varene, P.; Adjustments in oxygen transport during head-out immersion in water at different temperatures, *J. Appl. Physiol.*, **68**, 1475-1480 (1990)
- 3) Farhi, L. E., Linnarsson, D.; Cardiopulmonary reajustments during graded immersion in water at 35°C, *Respir. Physiol.*, **30**, 35-50 (1977)
- 4) 間野忠明; 無重力シュミレーション下におけるヒトの交感神経活動, 名古屋大学環境医学研究所年報, **39**, 336-355 (1988)
- 5) Weiß, M., Hack, F., Stehle, R., Pollert, R., Weicker, H.; Effects of temperature and water immersion on plasma catecholamines and circulation, *Int. J. Sports Med.*, **9**, S113-0117 (1988)
- 6) 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**, 248-252 (1989)
- 7) Evans, B. W., Cureton, K. J., Purvis, J. W.; Metabolic and circulatory responses to walking and jogging in water, *Res. Quart.*, **49**, 442-449 (1978)
- 8) 小野寺昇, 木村一彦, 宮地元彦, 米谷正造, 原英喜; 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 (1992)
- 9) 堀田 昇, 村岡康博, 大柿哲朗, 金谷庄蔵, 藤島和孝, 洪 進杓, 増田卓二; 水中トレッドミル(flowmill)歩行時の呼吸循環応答, 久留米大学保健体育センター研究紀要, **1**, 19-23 (1993)
- 10) 宮本忠吉, 藤本繁夫, 櫛淵由香里, 渡辺一志, 宮側敏明, 栗原直嗣, 前田如矢; 健康人における水中歩行時の Ventilatory Threshold の検討—陸上運動との比較, 日本臨床生理学会雑誌, **24**, 221-227 (1994)
- 11) 宮本忠吉, 藤本繁夫, 渡辺一志, 宮側敏明, 前田如矢, 栗原直嗣; 水中トレッドミルによる歩行運動時の換気反応の検討, 関西臨床スポーツ医・科学研究会報告書, 113-116 (1993)
- 12) 高石鉄雄, 石田浩司, 小野 隆; 水中歩行は運動処方にも有効か?, デサントスポーツ科学, **15**, 252-260 (1994)
- 13) 渡辺一志, 宮側敏明, 河端隆志, 藤本繁夫, 前田如矢, 宮本忠吉, 西村直記; 水中トレッドミル歩行運動における下肢筋活動, 体力科学, **42**, 591 (1993)
- 14) Weston, C. F., O' Hara, J. P., Evens, J. M., Corral, R. J. M.; Hemodynamic changes in man during immersion in water at different temperatures, *Clin. Sci.*, **73**, 613-616 (1987)
- 15) 宮本忠吉, 藤本繁夫, 櫛淵由香里, 渡辺一志, 宮側敏明, 栗原直嗣, 前田如矢; 肥満症例の水中歩行の生理学的反応の検討, 大阪市立大学保健体育学研究紀要, **29**, 7-13 (1993)