

## 筋活動等からみた水中歩行の生体負担に関する研究

山本高司\*, 金柁直也\*\*, 渡部琢也\*\*, 成田 誠\*\*\*, 山崎 健\*\*\*\*

## Electromyographic Studies on the Work Load of Walking in Graded Water Immersion

Takashi YAMAMOTO, Naoya KANEMASU, Takuya WATANABE,  
Makoto NARITA and Ken YAMAZAKI

## Abstract

The purpose of the present study was to investigate the effects of both graded water immersion walking and walking speed on the electromyographic activity of lower leg muscles, as well as on walking cadence. Two healthy male university students participated in this study as subjects. They walked in water of six different water levels and six different speeds using an underwater treadmill systems. The electromyogram (EMG) was recorded by telemetry from six different muscles (m. rectus femoris, m. vastus lateralis, m. biceps femoris, m. tibialis anterior, m. gastrocnemius: caput mediale, m. soleus) of the right leg and the rectus abdominal muscle by means of surface electrodes. The raw EMG signal was sampled at 1 kHz, full-wave rectified and integrated (iEMG). The relationships among water level, walking speed and iEMG were graphically presented in three dimensions. Overall, the faster the walking speed, the larger the iEMG at each water immersion level. The highest iEMG was seen in the tibialis anterior muscle, which is related to strong dorsiflexion of the foot in water. The iEMG in the biceps femoris during water walking was more distinctive, especially at higher walking speeds, which might also be due to the intensive extension of the hip joint necessary to propel the body against the water resistance. The step frequency (SF) increased in proportion to the walking speed and in inverse proportion to the water depth. These changes in iEMG and SF imply a shift in walking style; that is, to walking with vigorous strides. There are two factors influencing the iEMG. One is buoyancy as a factor for decrease one and the other is the depth of the water level, which causes large water resistance, as a factor for increase. We should consider these two factors in evaluating the work load from the iEMG in water walking, and may be able to express these effects clearly by applying mathematical analysis in the future.

## I. 緒言

境における身体運動の特性を特徴づけている。すなわち、水中では、水温の程度によっては体から熱が奪われ、体重は浮力によって軽減され

水の粘性や比熱が比較的大きいことは、水環

\*教授, \*\*研究生, \*\*\*名古屋市総合リハビリテーションセンター P. T., \*\*\*\*学部生

る。また、水の粘性は運動時の筋に大きな負荷を与える。これらの特性を利用して水中運動はリハビリテーションに導入され (Fawcett, 1992), また近年では水中運動によって生理的および心理的なリラクゼーションがもたらされること (Oda et al., 1999), 最大下運動によって産生された乳酸が30℃の温湯に入ることによってその除去が促進されること (Nakamura et al., 1996) 等が報告されている。さらに、宇宙滞在時の低重量状態をシミュレートするためにも水浸法が利用され、この方面の科学研究に利用されている (間野・御手洗, 1977; 美和ほか, 1993)。

水環境における身体運動時の生体反応は、当然のことながら陸上におけるものと異なっている (Svedenhag and Seger, 1992; DeMaere and Ruby, 1997)。近年プール等を利用したアクアビクス Aquabics が盛んであるが、その科学的基礎が充分であるとは言い難い。本研究では、水中トレッドミルを用いて、その歩行速度を種々変え、その時の歩数および筋活動の変化から水中運動の生体負担について検討しようとしたものである。

## II. 方法

### (1) 被検者

被検者は、C大学体育学部もしくは大学院に所属する健康な男子学生であり、予備実験を含めると延べ8名であったが、水中筋電図記録の際の防水等の問題もあって、結局、2名のデータが採用された。その内、被検者N.K.は身長173.5cm、体重62.5kg、体脂肪率10.0%であり、被検者S.N.は身長170.0cm、体重64.7kg、体脂肪率18.9%であった。体脂肪率の測定には、オムロン体脂肪計 (型式: HBF-300, オムロン株) を使用した。被検者には実験前に実験の内容を充分説明し、これに同意して貰った後に実験に入った。

### (2) 運動負荷装置と運動負荷条件

#### 1) 水中トレッドミル

運動負荷装置としては水中トレッドミル



図1 実験風景

Underwater treadmill system (AQUATREX, Edmond Medical System Co. Ltd.) を用いた。図1は実験風景を示したものである。この水中トレッドミルは電動式のもので、水 (湯) をあらかじめ付属のタンクに溜めておいて、必要に応じて被検者の居る水槽に急速に水を移動させることが可能なものである。

#### 2) 水位と実験順序

水位は、①0 (陸上)、②踝の直上、③膝蓋骨の直下、④大腿の中間、⑤恥骨結合、⑥臍、⑦剣状突起の7条件とした。水位に関しての実験順序は乱数表を用いてランダムとした。

#### 3) 環境条件

水温は約30.5℃ (Shimizu et al. 1998), 実験室の気温は25.5~26.0℃, 相対湿度は61.0%であった。

#### 4) 歩行速度と歩行時間

最初、歩行速度は毎時0km (すなわち立位)、1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 km/h の9種での実験計画を立てたが、1 km/h の低速度では被検者がトレッドミルに乗るとベルトが回転しなかったりすることがあったこと、また7~8 km/h の速度になると非常にきつくなるので、被検者の疲労等を考慮して、最終的には歩行速度を0 (立位)、2, 3, 4, 5, 6 km/h の6種とした。

歩行時間は各速度30秒間とし、低い速度から高い速度への順序で漸増的に負荷を上げていった。

### (3) 筋活動等の記録

#### 1) 被検筋

筋電図はいずれも被検者の右側の筋から導出した。被検筋は、体の上から下方向へ順に、腹直筋 M.rectus abdominis (RA), 大腿直筋 M.rectus femoris (RF), 外側広筋 M.vastus lateralis (VL), 大腿二頭筋 M.biceps femoris (BF), 前脛骨筋 M.tibialis anterior (TA), 腓腹筋内側頭 M.gastrocnemius: Caput mediale (G), ヒラメ筋 M.soleus (S) の7筋であった。

#### 2) 筋電図の導出法

筋電図の導出は双極誘導とした。すなわち、各筋の筋腹上に電極中心間距離を3 cm として2個の小型生体用電極(型式:NT-511G, 日本光電工業(株))を粘着カラー(型式:粘着カラー8, 日本光電工業(株))で装着し、さらにその上をブレンダムテープで覆った。電極の接着を確実にするために、必要に応じて被検筋上の皮膚の毛をカミソリで剃った。筋電図導出のための時定数は0.03秒、ハイカットフィルターはOFFとした。

#### 3) 歩数のカウント方法

右足踵部分に直径18mm のフットスイッチ(FS) foot switch(型式:S120, 電気計測販売(株))を装着し、その出力を荷重スイッチアンプ(型式:PH-450, 電気計測販売(株))で増幅し、さらに分岐ボックス(型式:PH-441A, 電気計測販売(株))に導いてから筋電図と同時記録し、その記録から歩数を算出した。15秒間の右足のステップを2倍した値を15秒間の歩数とした。

#### 4) 筋電図等の記録装置

筋電図の記録装置としては、マルチテレメータシステム(型式:WEB-5000, 日本光電工業(株))を用いた。受信された筋電図は増幅され、その他の信号と共に、ユニバーサルデータレコーダ(型式:A-69, ソニーマグネスケール(株))に収録された。同時に、ユニバーサルデータレコーダからの出力をオムニコーダ(型式:8M14, 日本電気三栄(株))に導き、ペーパー上に描記して記録状態を監視した。

### (4) 筋電図等の分析方法

磁気テープに記録した筋電図等の信号を再生

し、A/D変換器(MacLab/16s:ADInstruments), 記録・解析ソフトウェア(Chart ver. 3. 6. 3/s:ADInstruments)およびコンピュータ(Power Macintosh G4:Apple Computer)を用いてデータを保存した。筋電図等のサンプリング周波数は1 kHzとした。筋活動の度合いを知るために、筋電位を積分して筋電図積分値 Integrated electromyogram (iEMG)を求めた。単位は任意単位 Arbitrary unit (A. U.)としたが、各筋の筋電図の感度を同一にして大小関係の区別を視察から容易になるようにした。筋電図積分値を求めるための分析時間は、各速度での歩行時間30秒の内、歩行開始後10~25秒間の15秒間であった。

また、水位・歩行速度・iEMGの関係を3次元のグラフとして図示し、三者の相互関係が容易に読み取れるようにした。

## Ⅲ. 結果

### (1) 筋活動について

図2は被検者S. N.における記録の典型例であり、図の左半分は、水位が0(陸上)、歩行速度が5 km/hでの筋電図および右足に装着したフットスイッチの出力を示したものである。同様に、図2の右半分は、水位が臍、歩行速度が6 km/hでのデータを示したものである。全般的にみて、図の右半分に示された筋放電の方が左半分のものよりも大きいのが、歩行速度が1 km/h異なるので単純には比較できない。

図3は、腹直筋を例にとり、水位および歩行速度の変化に伴うiEMGの変化を3次元表示のグラフに示したものである。底面を構成する2つの軸には水位および歩行速度をとり、縦軸に任意単位(A. U.)のiEMGをとって立体的に図示した。腹直筋では水位および歩行速度が変化してもiEMGに著しく目立った変化はなかったが、被検者N. K.において、歩行速度が6 km/hになるとiEMGが僅かに増加した。

図4は被検者N. K.の下肢筋におけるiEMGの変化を示したものである。各筋のiEMGの配列は、体の上から下方向へと並べてある。即ち、図の左側の欄には大腿部の筋(大腿直筋, 外側

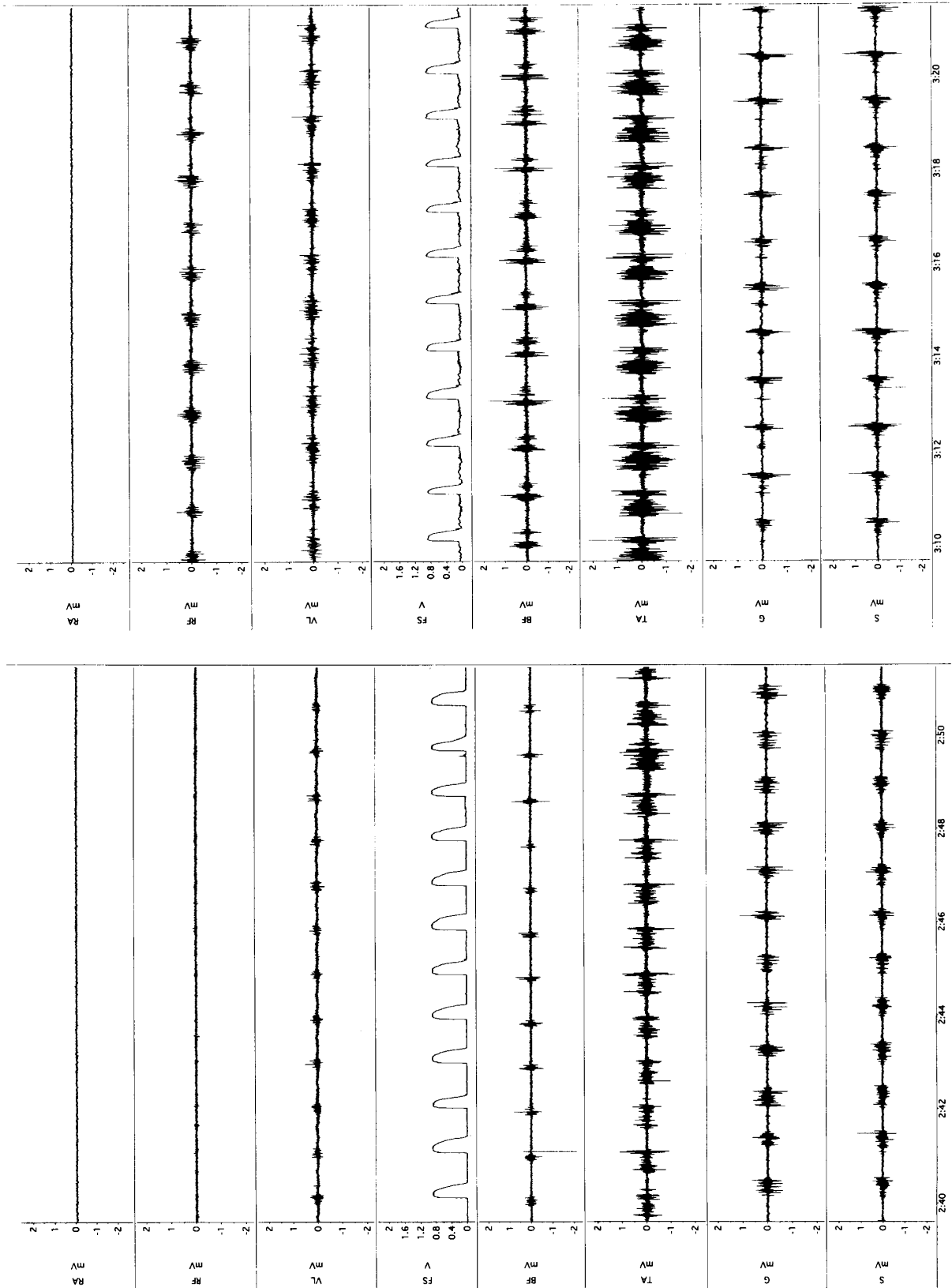


図2 歩行中の筋活動およびフットスイッチ出力の様相

図中の左側は水位0 (陸上), 歩行速度 5 km/h の時のものであり, 右側は水位が臍位, 歩行速度 6 km/h の時のものである。Subj. S. N. 横軸は min : sec. (本文参照)

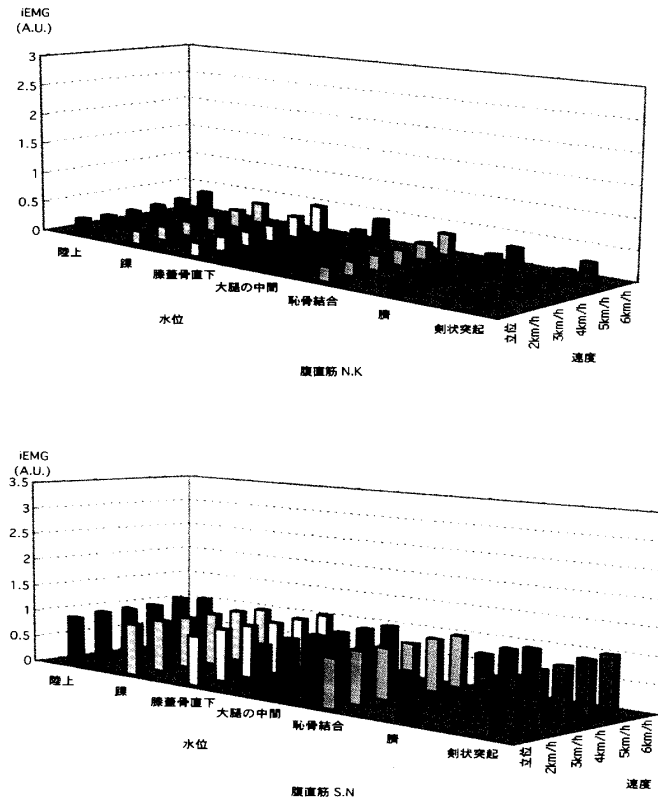


図3 筋電図積分値の3次元表示

底面の一方の軸に水位を、他方に歩行速度をとり、縦軸に筋電図積分値をとった。被検筋は腹直筋である。図中の上方のグラフは Subj. N. K. におけるものであり、下方のグラフは subj. S. N. におけるものである。

広筋、大腿二頭筋)を、図の右側の欄には下腿部の筋(前脛骨筋、腓腹筋内側頭、ヒラメ筋)を配列してある。

図4において、一目瞭然なのは前脛骨筋のiEMGが最も大きいことである。また、立位では被検筋全体にわたってiEMGは水位の影響を比較的受け難い。歩行速度が増すと、iEMGは直線的にあるいは指数関数的に増加し、歩行速度が6 km/hに達すると最大値を示すが、その増加の割合は水位によって異なっている。大きい増加は特に大腿二頭筋において多くの水位において見られるが、水位が踵の直上や0(陸上)になると増加の割合は小さくなる。同様の傾向はその他の大腿筋(大腿直筋、外側広筋)においても見られるが、大腿二頭筋程ではない。

図5は、図4と同様の手法で、被検者S.N.の結果を示したものである。各筋のiEMGの配列

順序は図4と同じである。図5の結果は基本的に図4の結果と類似しているが、欠損値もあって一部明確さを欠いている。

## (2) 歩数について

表1は被検者N.K.における水位・歩行速度別の15秒間当りの歩数を示したものである。この表に示されているように、歩数は歩行速度のみならず、水位によっても変化する。すなわち、歩数は歩行速度が増すと増加し、水位が増すと減少した。

表2は、同様に被検者S.N.における歩数の変化を示したものであり、一部欠損値はあるが、表1と同じ傾向を示していると言える。

## IV. 論議

水中歩行の歩容が陸上歩行のものと著しく異

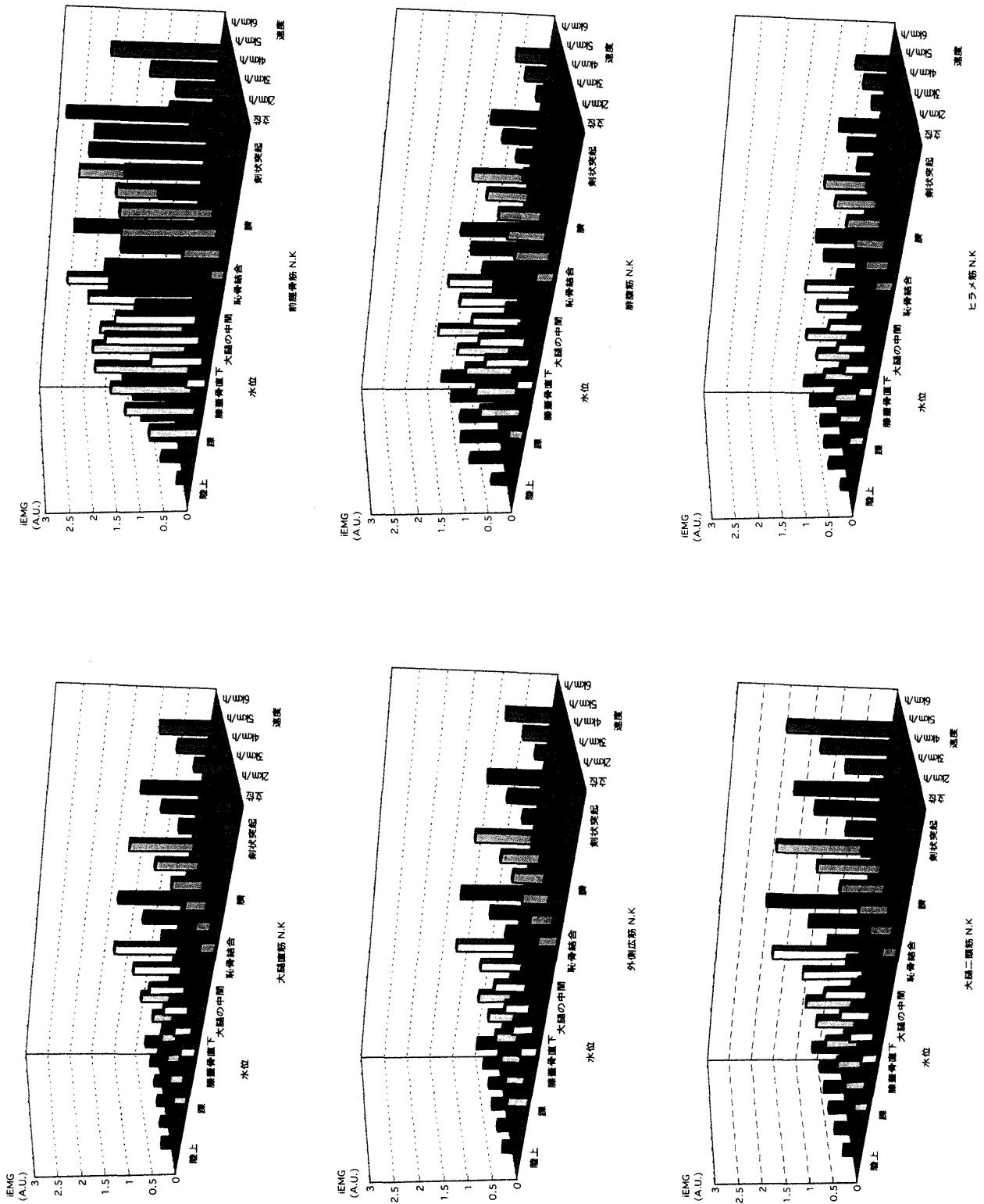


図4 下肢筋における筋電図積分値の変化 (Subj. N. K. の場合)  
 底面の一方向に水位を、他方に歩行速度をとり、縦軸に筋電図積分値をとった。

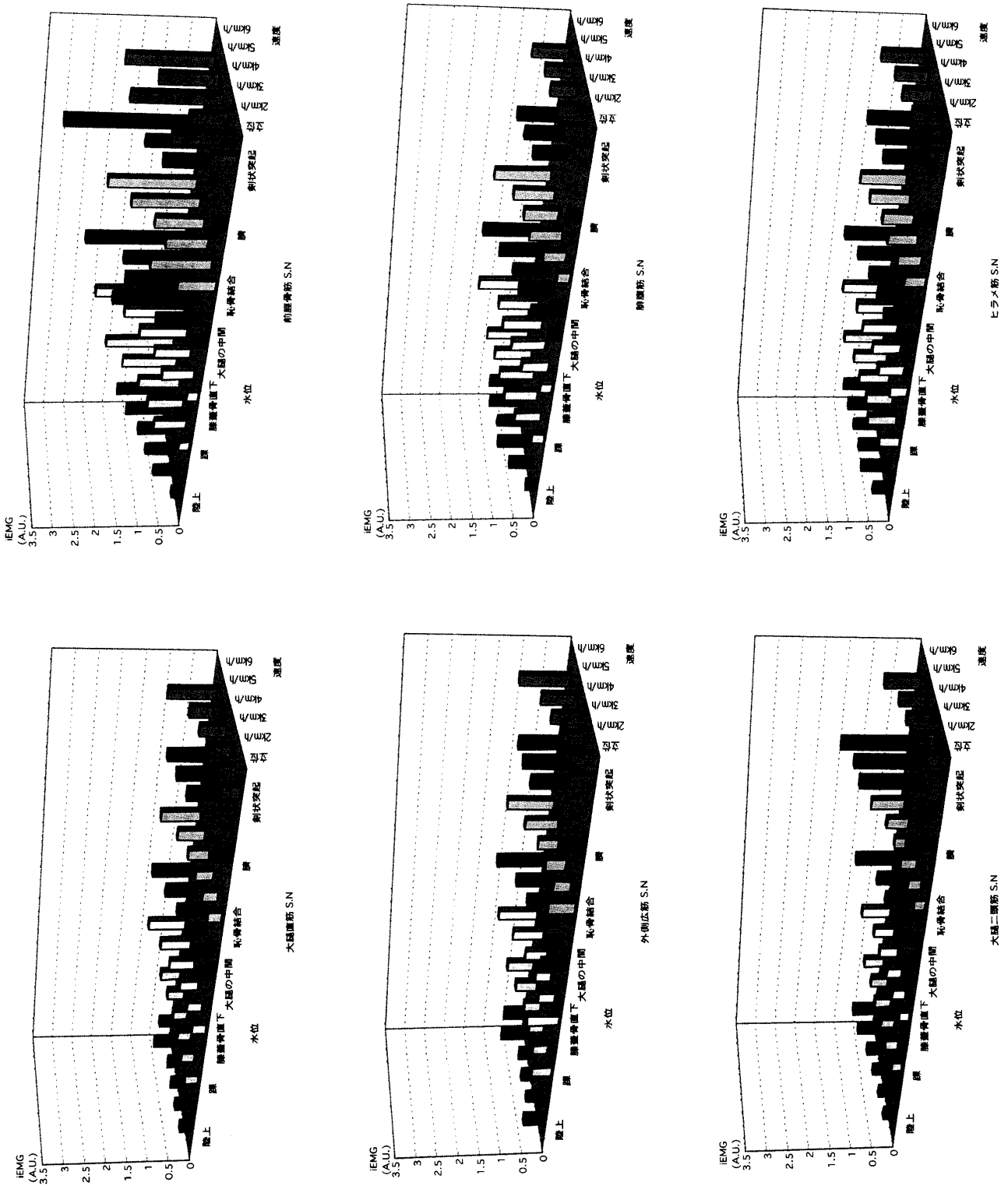


図5 下肢筋における筋電図積分値の変化 (Subj. S. N. の場合)  
 底面の一方の軸に水位を、他方に歩行速度をとり、縦軸に筋電図積分値をとった。

表1 水位および歩行速度が歩数におよぼす影響  
歩数は15秒間の値。Subj. N. K.

水位	歩行速度 (km/h)				
	2	3	4	5	6
剣状突起	12	16	18	22	26
臍	12	16	18	24	26
恥骨結合	14	16	22	24	28
大腿骨中間	14	20	22	24	30
膝蓋骨直下	16	22	24	26	30
踝	14	20	24	28	32
0 (陸上)	16	22	26	28	30

(歩数/15秒間)

表2 水位および歩行速度が歩数におよぼす影響  
歩数は15秒間の値。Subj. S. N.

水位	歩行速度 (km/h)				
	2	3	4	5	6
剣状突起	12	18	24	26	28
臍			24	28	30
恥骨結合	12	20	22	28	30
大腿骨中間	12	20	24	28	30
膝蓋骨直下	16	22	26	30	32
踝	18	22	26	30	34
0 (陸上)	18	22	26	30	34

(歩数/15秒間)

なることは言を俟たない。歩行速度が増すにつれて筋活動が増加するのもやはり同様である。その中で前脛骨筋の活動が著しく増加する要因を考察してみると、速い歩行では足の背屈が短時間に強く行なわれる必要がある。特に水中歩行では水の粘性 viscosity によって抵抗が増し、それに打ち勝って脚を前方に運ぶと同時に足を背屈させる必要がある。この時、足背部に非常に大きな力がかかるので、筋の強い収縮が必要となり、筋電図の振幅の増加もたらされる。

大腿二頭筋の iEMG にも注目すべき変化が見られた。水中歩行の場合、体を水の抵抗に打ち勝って前方へ押しやる必要がある。このために大腿を強く伸展させて前方への推進力を増していると考えられる。また、この時、膝関節を屈曲して下腿部を引き上げる必要があるためと考えられるが、股関節・膝関節・足関節における各関節角度を記録していないので確定的なことは言えない。

本研究の結果から15秒間の歩数は歩行速度の

増加につれて増し、また、水位の増加につれて逆に減少した。Frangolias & Rhodes (1995) は、水中ランニング中の毎分当りの歩数 stride frequency (st. min<sup>-1</sup>) が陸上ランニングにおけるものより、著しく減少することを報告しており、その原因の一つとして水の粘性を挙げている。本研究では水位を種々変えてその影響を明らかにすることができた。そして、同一歩行速度であっても、深い水位では歩数が減少することは、歩幅が増加していることを示唆している。すなわち、深い水位になればなる程、より大股の歩行に変化すると考えられる。RPE (主観的作業強度) を記録していなかったため、正確なことは明らかでないが、6 km/h の水中歩行になると負荷としてはかなりきついという被検者の感想であった。

水中では浮力のため、足底にかかる体重が減少する。そして体の浮力は水位が上がるほど大きくなり、下肢にかかる負荷は減少することになる。しかし、前方への歩行の場合には逆に水位が上がったことによる負荷が増える。このように、水位が上がることは二つの相反する影響を引き起こすことになる。立位および同一歩行速度における水位別 iEMG に著しい差異がみられないのも、このことが関係しているかもしれない。しかし、今回のデータに詳細な数学的分析が加えられれば、水位の影響が明確になるかもしれない。これについては今後の検討課題としたい。

## V. 要約

本研究の目的は水中歩行の生体負担を筋電図等から検討することである。被検者は健康な男子大学生であり、電極防水の予備実験を含めて延べ8名であったが、本実験では2名であった。運動負荷装置としては水中トレッドミルを用いた。水中歩行時の水位は0水位も含めて7種(水位0(陸上)、踝の直上、膝蓋骨の直下、大腿の中間、恥骨結合、臍、剣状突起)とした。歩行速度は0 km/h (立位) を含めて6種(0, 2, 3, 4, 5, 6 km/h)とした。歩行時間は各速度



につき30秒間とし、漸増的に連続して負荷した。7箇所(腹直筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側頭、ヒラメ筋)から表面電極を用いて筋電図を導出し、また右足踵部にフットスイッチを装着してその出力信号を記録した。表面筋電図をA/D変換して全波整流の後、積分して筋電図積分値(iEMG)を求め、各パラメータを3次元表示(水位、歩行速度、iEMG)した。その結果、歩数は水位が増すにつれて減少して大股歩行になることが示された。また歩行速度の増加につれてiEMGも増大した。特に、前脛骨筋と大腿二頭筋のiEMGにおいて増大が著しかった。水位がiEMGにおよぼす影響に関しては、上方への浮力というiEMGの軽減要因と前進に伴う水の抵抗という増大要因とが複雑に関係していて、グラフの視察だけでは明確ではなかった。しかし、数学的手法によって、より詳細に分析すれば、その影響が明確な形で表示できる可能性は否定できないと考えられ、今後の検討課題として残った。

## 謝 辞

本研究は平成9年度中京大学特定研究助成費を受けて行なわれたものであり、記して謝意を表する次第である。

## 文 献

- DeMaere, J. M. and Ruby, B. C. (1997) Effects of deep water and treadmill running on oxygen uptake and energy expenditure in seasonally trained cross country runners. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 37 : 175-181.
- Fawcett, C. W. (1992) Principles of aquatic rehab : a new look at hydrotherapy. *Sportsmed. Update* 7 (2) : 6-9.
- Frangolias, D. D. and Rhodes, E. C. (1995) Maximal and ventilatory threshold responses to treadmill and water immersion running. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27 : 1007-1013.
- 間野忠明・御手洗玄洋 (1977) 低重量状態におけるヒトの直立姿勢の制御. 姿勢—第2回姿勢シンポジウム論文集. (財)姿勢研究所:東京, pp. 243-247.
- 美和千尋・岩瀬 敏・間野忠明・斉藤 満・杉山由樹・鈴木初恵 (1993) 水浸時におけるヒトの筋交感神経活動の抑制反応に対する加齢の影響. *自律神経*30 : 16-23.
- Nakamura, K., Takahashi, H., Shimai, S. and Tanaka, M. (1996) Effects of immersion in tepid bath water on recovery from fatigue after submaximal exercise in man. *Ergonomics* 39 : 257-266.
- Oda, S., Matsumoto, T., Nakagawa, K. and Moriya, K. (1999) Relaxation effects in humans of underwater exercise of moderate intensity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 80 : 253-259.
- Shimizu, T., Kosaka, M. and Fujishima, K. (1998) Human thermoregulatory responses during prolonged walking in water at 25, 30 and 35°C. *Eur. J. Appl. Physiol.* 78 : 473-478.
- Svedenhag, J. and Seger, J. (1992) Running on land and in water : comparative exercise physiology. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24 : 1155-1160.
- Town, G. P. and Bradley, S. S. (1991) Maximal metabolic responses of deep and shallow-running in trained runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23 : 238-241.