

水中環境下での脚筋力トレーニングは 筋血流制限下のトレーニングと言えるのか

国士舘大学 須藤 明治
(共同研究者) 同 角田 直也
鹿屋体育大学 田口 信教
東京大学大学院 藤原 寛康
和光大学 矢田 秀昭

Is Thigh Muscle Training in Water Immersion Done under Muscle Blood Flow Control?

by

Akiharu Sudo, Naoya Tsunoda

Faculty of Physical Education, Kokushikan University

Nobutaka Taguchi

National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

Hiroyasu Fujiwara

Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

Hideaki Yata

Department of Humanrelations, Wako University

ABSTRACT

The purpose of this study is to clarify the changes in oxygen saturation inside the muscle tissue compartment at rest during and during dynamic knee-extension exercise under several circumstances in six male subjects. The study was carried out under the following circumstances: standing position on the ground, sitting position on the ground,

recumbent position on the ground, standing position A (depth = 77 cm) in water, and standing position B (depth = 117 cm) in water. We observed that the oxygenated hemoglobin (HbO_2) during rest was unchanged, a decrease in the amount of deoxygenated hemoglobin (HbD) commensurate with an increase in the venous return. We observed similar results when comparing the recumbent position on the ground with the standing position (B) in water, and when comparing the sitting position on the ground with the standing position (A) in water. The surface electromyograms (EMG) of latissimus dorsi muscle, vastus medialis muscle, gluteus maximus muscle and biceps femoris caput longum muscle. During the resting time, the standing position (B) in water showed a greater amount of latissimus dorsi muscle activity compared with the recumbent position on the ground by the integrated EMGs (iEMG). Changes in positions and circumstances did not produce observable changes in the tissue oxygen saturation (StO_2) and arterial blood oxygen saturation (SpO_2) during exercise. With compared the resting state any significant rise in heart rate (HR) was not observed during exercise when. Also, the iEMG of latissimus dorsi did not change when the latissimus dorsi were out of the water compared with the iEMG of latissimus dorsi of the exercise on the ground, but lower activity was observed when the latissimus dorsi were in the water. From the above results it is believed that exercise in water, as done in this study, was not done under control of muscle blood flow. it was observed in this exercise that muscle activity became less when the water level was made higher. In water 117 cm deep (xiphoid process level) approximates the physiology of the bloodstream observed in the state of lying down. This indicates that there is no overload on the heart, and moreover, that there is not much load on the muscle. Therefore, it is concluded that the nature of the exercise environment can contribute to improving joint mobility.

要 旨

陸上立位, 陸上座位, 陸上臥位, 浅水立位 (A: 77cm), 深水立位 (B:117cm) の各姿勢・環境において, 安静時及び膝関節伸展運動時の内側広筋部の組織酸素飽和度の測定とその時の筋電図測定を行った. その結果, 陸上立位と比較して他の姿勢や環境は, 安静時の組織ヘモグロビン量 (HbT) において低値を示した. その原因は, 組織脱酸素化ヘモグロビン量 (HbD) の減少であっ

た. HbD は静脈の還流量を表していることから, 椅座位や仰向け姿勢及び水没によって静脈の還流が多くなり, 内側広筋部の静脈血流入量が減少したものと考えられた.

そして, 組織酸素飽和度 (StO_2) と心拍数 (HR) の値から陸上臥位と深水立位, 陸上座位と浅水立位との間に血流動態が類似していることが確認された. 次に, 運動時の HbT は, 陸上時と比べ深水立位時に有意に低値を示し, 安静時と同様に HbD の有意な低下が観察された. しかし,

StO₂には有意な差が認められなかった。これは、運動時のHbTの減少が安静時と比べると少なかったため、StO₂には影響を及ぼさない程度の静脈還流の増加量であったことが窺えた。また、運動により、動脈血流入量の増加による組織酸素化ヘモグロビン量(HbO₂)の増加傾向および静脈還流量の増加によるHbDの減少傾向が認められた。そして、運動時の各環境における動脈血の酸素飽和度(SpO₂)、HbO₂の有意な差はなかった。

以上の結果から、本研究における水中環境下での運動は、筋血量制限下の運動ではなく、浅水位A:77 cm(大転子レベル)では陸上座位、深水位B:117 cm(剣状突起レベル)では陸上臥位の血流動態に類似した環境での運動であることがわかった。

緒言

水中環境下では、10 cm 潜るごとに+7.6 mmHgの水圧が加算されることになり、水深1.3m程度では陸上より最大+98.8 mmHgの水圧がかかっていることになる¹⁾。水圧の影響により水位に応じて静脈の還流が増加し、頸部水位では約700 mlも増加することが報告され²⁾、それに伴い腰部水位では一回心拍出量が増加し(膝位では増加しない)³⁾、その影響によって心拍数は減少することが解っている⁴⁾。特に、水圧の影響により胸腔内圧の指標である中心静脈圧(CVP)が水位が増すほど上昇している⁵⁾ことも、静脈の還流が増大していることを裏付けている。また、静脈の還流増大による圧・伸展受容器などの刺激により、心房からは心房性Na利尿ペプチドが促進され、腎の輸入細動脈からはレニン分泌の抑制が起こり、中枢神経系からはバゾプレッシン分泌が抑制され、腎臓では循環血漿量の低下を促すために尿量の増加、尿中Na排泄の増加をもたらすと言われている^{4), 6), 7)}。このような静脈の還流の増大をもたらす水圧は胸郭壁・腹壁に圧力となり、肺胞サイズ

を小さくし予備呼気量が減少すると言われている^{10), 17), 18), 19), 20), 21)}。この閉ざされた肺気量をclosing volumeと呼び、多くの研究者らにより水没によるclosing volumeの増大が確認されている^{14), 22), 23)}。つまり、水圧によりclosing volumeが増大することで細い気管支を圧迫して肺活量を減少させ、さらに静脈還流の増大により胸腔内に大量の血液が集まることから、換気/血流は小さくなり十分なガス交換が行われず動脈血の低酸素を招くと言われている^{13), 14), 15), 16)}。

しかし、これらは実際に水没し水圧のかかっている筋組織の血液酸素動態を観察したわけではない。以前我々は、水中環境下で約20% 1RMの負荷による脚筋力トレーニング(膝関節伸展運動及び股関節振り子運動; 30回/分)を行い、3ヶ月後に有意な脚筋力増加を認めたことを報告している²⁴⁾が、このような低負荷での運動で筋力が向上したということは考えにくく、筋機能の向上ではないかと考えていた。しかし、近年筋血流制限下での低負荷の運動が筋力向上をもたらすという報告があった²⁵⁾。そこで、本研究は水中環境が筋血流にどのような影響をもたらすのかを水没している筋より直接観察し、水中環境下の血流動態について検討した。

1. 実験方法

実験は、水温30°C、室温30°C、浅水位A; 77 cmと深水位B; 177 cmのプールを使用した。被験者は18~20歳の健康な男子6名であり、その身体的特徴は身長168.0 ± 9.6 cm(平均±標準誤差)、体重65.2 ± 11.9 kg、体脂肪率13.2 ± 6.4%、レーザー組織血液酸素モニターのセンサー取り付け部位は水位Aで22.3 ± 4.3 cm(水圧: +16.9 ± 3.3 mmHg)、Bで59.4 ± 6.7 cm(水圧: +45.2 ± 5.1 mmHg)であった(表1, 2)。なお、浅水位A(77 cm)は被験者の大転子から臍レベルにあたり、深水位B(177 cm)は被験者の剣状

表1 被験者の身体的特性

	年齢 (年)	身長 (cm)	体重 (kg)	% Fat (%)
K.Y.	22	168.0	65.0	19.9
R.T.	23	164.0	58.0	12.7
N.I.	22	183.0	83.0	20.6
K.K.	23	159.0	54.4	6.2
Y.K.	23	180.0	76.0	14.0
S.T.	23	164.0	55.2	5.9
Mean	22.7	169.7	65.2	13.2
± S.D.	0.5	9.6	11.9	6.4

表2 各水位における組織酸素血液モニターの
センサー取付部位の水位と水圧

	浅水位(A:77cm) 水圧		深水位(B:117cm) 水圧	
	(cm)	(+mmHg)	(cm)	(+mmHg)
K.Y.	24.0	+18.2	58.0	+44.1
R.T.	21.0	+16.0	58.5	+44.5
N.I.	15.0	+11.4	48.5	+36.9
K.K.	21.0	+16.0	58.5	+44.5
Y.K.	27.5	+20.9	65.0	+49.4
S.T.	25.0	+19.0	68.0	+51.7
Mean	22.3	+16.9	59.4	+45.2
± S.D.	4.3	3.3	6.7	5.1

突起から頸部レベルに相当した。被験者にはあらかじめ研究の目的、方法、実験に伴う危険性等を説明し、書面によって被験者になることの同意を得た。

実験1 安静時の組織内酸素飽和度の測定

被験者には、①陸上立位、②陸上座位（椅座位姿勢）、③陸上臥位（仰向け姿勢）④浅水立位（水位: A）、⑤深水立位（水位: B）における安静時の測定を行った。内側広筋部の組織内の酸素飽和度測定は、レーザー組織血液酸素モニター（BOM-L1TR, オメガウェーブ）を用いて StO₂, HbT, HbO₂, HbD を測定した。また、パルスオキシメーターハンディー 100（木村医科器械株式会社）を用いて、SPO₂ と HR を測定した。なお、レーザー組織血液酸素モニターは、送受光間距離 30 mm 一定のセンサーを使用し、右内側広筋の筋組織の最も厚い部位の皮膚上に貼付けし 1 秒ごとに測定した。外側顆から大転子までの距離を 100 % とした場合の測定部位の平均値 ± 標準偏差は近

位 89.1 ± 3.7 % であった。また、パルスオキシメーターハンディー 100 は右手人差し指に装着し測定した。レーザー組織血液酸素モニターは、同一姿勢において 3 分間の安静状態において連続的に測定し、各姿勢・環境における安静値を 2 分 30 秒から 3 分までの 30 秒間の平均値とした。パルスオキシメーターハンディー 100 は、各姿勢・環境における 3 分直後の値とした。

実験2 安静時の筋電図測定

表面筋電図は Mega Electronics 社製ホルター筋電計システム ME3000P を使用し、被検査筋は、右脚の内側広筋、大腿二頭筋・長頭、大殿筋、背広筋とし、測定点は筋線維の走行方向と一致するようにした。筋電位導出電極には blue sensor（MEDICOTEST 社製電極: 電極間距離; 33 mm）を用い、アースは測定電極から約 10cm 離れた。水混入防止特殊パッドを電極上に貼付し使用した。サンプリングレートは 1000Hz とし、データをコンピューター（Sampling period; 0.01sec, A/D conversion; 12-bit, 8 channels, CMRR; typical 110dB, Filtering; 8-500Hz）に転送後解析した。筋電図分析は、安静時で 5 秒間の積分筋活動量（iEMG）を求めた。

実験3 運動時の組織内酸素飽和度の測定

運動は、陸上立位での右膝関節伸展運動とし、膝関節の完全伸展位を 180° とした場合の 90° から 150° までの 60° の範囲で運動を繰り返すものとした。運動のピッチは 30 回/分とし、メトロノームの音によって指示した。本実験前に十分な練習を行わせ、実際の測定の時には水中用ビデオによって撮影を行い、このような運動が実施されているか確認した。また、水中環境下での測定開始は、入水後心拍数が安定した 1 分後に運動を開始した。なお、測定項目は、安静時と同様に内側広筋の StO₂, HbT, HbO, HbD を測定し、さらに

右手人差し指からSPO₂とHRを測定した。

実験4 運動時の筋電図測定

運動中の筋電図は、安静時と同様に右脚の内側広筋、大腿二頭筋・長頭、大殿筋、背広筋とし、運動時3秒間のiEMGを求めた。

2. 結果の処理

得られた各変数の値は特に記載のない場合を除き、平均値±標準偏差で示した。各変数の2群間の平均値の差の検定には対応のあるt検定を用いた。統計処理の結果は危険率5%未満 (p<0.05) をもって有意とした。

3. 結果

実験1

図1に被験者(N. I.)におけるレーザー組織血液酸素モニターの生データを示した。測定開始から3分後までが陸上立位、6分後までが陸上座位、9分後までが陸上臥位、12分後までが浅水立位、15分後までが深水立位である。これらの各姿勢・環境における2分30秒から3分間までの約30秒間における平均値をその被験者の値とした。表3に安静時のHbTの平均値と有意差の検定結果を示した。陸上立位と有意な差が認められたのは陸上臥位と深水立位であった(p<0.05) (p<0.01)。また、浅水立位と深水立位の間にも有意な差があ

①陸上立位 ②陸上座位 ③陸上臥位 ④浅水立位 ⑤深水立位

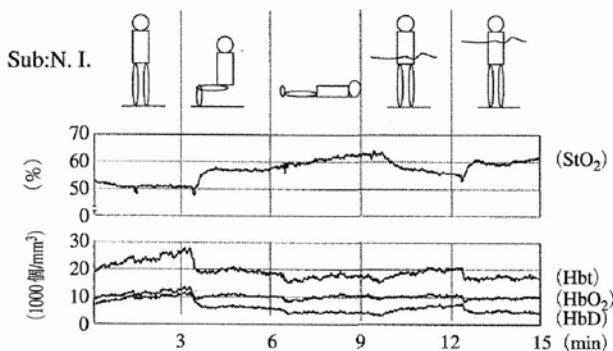


図1 安静時における内側広筋部の組織内酸素飽和度の変化

表3 各環境下の安静時におけるHbTの平均値と有意差の検定

	HbT (1000個/mm ³)	①	②	③	④
①陸上立位	13.37±8.07				
②陸上座位	17.81±1.94	ns			
③陸上臥位	18.58±4.60	*	ns		
④浅水立位	21.18±6.91	ns	ns	ns	
⑤深水立位	18.58±4.76	**	ns	ns	※

** ; p<0.01, * ; p<0.05 : ①と②~⑤の有意差の検定,
 ※ ; p<0.05 : ④と⑤の有意差の検定,
 ns : not significant

表4 各環境下の安静時におけるHbO₂, HbDの平均値と有意差の検定

	HbO ₂ (1000個/mm ³)	HbD (1000個/mm ³)	①	②	③	④
①陸上立位	11.89±2.93	11.48±5.20				
②陸上座位	10.17±0.72	7.63±1.80	ns			
③陸上臥位	11.85±2.28	6.74±2.38	*	ns		
④浅水立位	11.71±2.30	9.47±4.70	*	ns	ns	
⑤深水立位	11.75±2.15	6.83±2.69	*	ns	ns	※

HbO₂ ; すべての関係において有意差はなかった。
 HbD ; * ; p<0.05 : ①と②~⑤の有意差の検定,
 ※ ; p<0.05 : ④と⑤の有意差の検定,
 ns : not significant

った (p<0.05)。

表4に安静時のHbO₂とHbDの平均値と有意差の検定結果を示した。HbO₂は、すべての環境において有意な差は存在しなかった。HbDは、陸上立位と有意な差が認められたのは陸上座位以外のすべてであった (p<0.05)。また、浅水立位と深水立位の間にも有意な差があった (p<0.05)。

表5に安静時のStO₂の平均値と有意差の検定結果を示した。陸上座位と浅水立位、陸上臥位と深水立位の間にのみ有意な差が認められなかつ

表5 各環境下の安静時におけるStO₂の平均値と差の検定

	StO ₂ (%)	①	②	③	④
①陸上立位	52.21±5.93				
②陸上座位	57.57±6.27	**			
③陸上臥位	64.38±4.26	**	##		
④浅水立位	56.85±7.42	**	ns	§	
⑤深水立位	64.05±5.15	**	##	ns	※

** ; p<0.01 : ①と②~⑤の有意差の検定,
 ## ; p<0.01 : ②と③~⑤の有意差の検定,
 § ; p<0.05 : ③と④, ⑤の有意差の検定,
 ※ ; p<0.05 : ④と⑤の有意差の検定,
 ns : not significant

表6 各環境下の安静時における SpO₂, HR の
 平均値と有意差の検定

	SpO ₂ (%)	HR (beats/min)	①	②	③	④
①陸上立位	97.17 ± 0.75	96.17 ± 16.33				
②陸上座位	97.00 ± 1.10	82.33 ± 9.42 **				
③陸上臥位	97.00 ± 0.63	71.67 ± 12.42 ** #				
④浅水立位	97.00 ± 0.89	81.50 ± 7.71 ** ns §				
⑤深水立位	97.33 ± 1.03	71.33 ± 10.44 ** # ns ※				

SpO₂ ; すべての関係において有意差なし。
 HR ; ** ; p<0.01 : ①と②~⑤の有意差の検定,
 # ; p<0.05 : ②と③~⑤の有意差の検定,
 § ; p<0.05 : ③と④, ⑤の有意差の検定,
 ※ ; p<0.05 : ④と⑤の有意差の検定,
 ns : not significant

た。

表6に安静時の SpO₂ と HR の平均値と有意差の検定結果を示した。SpO₂ は、すべての環境において有意な差は存在しなかった。HR は、陸上座位と浅水立位、陸上臥位と深水立位の間にのみ有意な差が認められなかった。

実験2

図2に被験者 (K. K.) における陸上及び水中における安静時 (5秒間) の筋電図を、表9にその積分筋活動量を示した。内側広筋の iEMG は、各環境において変化がないものの、大腿二頭筋・長頭、大殿筋においては、陸上立位と比べ他の環境では少なかった。また、広背筋は、陸上立位が最も活動量が大きく、陸上座位と浅水立位、陸上臥位と深水立位が同値であった。

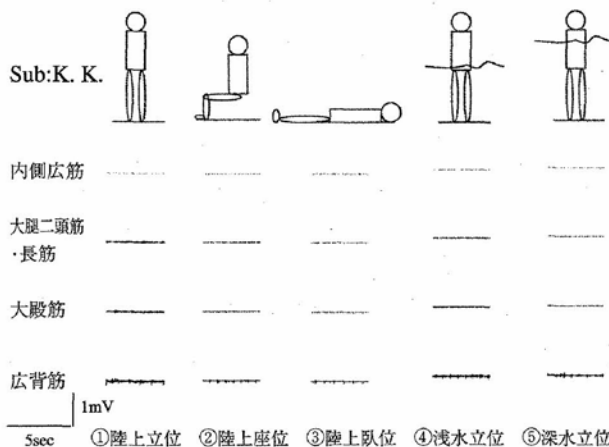


図2 陸上と水中における安静時の筋活動

表7 各環境下の膝関節伸展運動時における HbO₂,
 HbD の平均値と有意差の検定

	HbO ₂ (1000個/mm ³)	HbD (1000個/mm ³)	①	②
①陸上	13.25 ± 2.24	8.87 ± 3.16		
②浅水位(A)	13.71 ± 2.22	8.09 ± 2.18 ns		
③深水位(B)	13.28 ± 1.82	7.06 ± 1.94 * #		

HbO₂ ; すべての関係において有意差なし。
 HbT ; * ; p<0.05 : ①と②, ③の有意差の検定,
 # ; p<0.05 : ②と③の有意差の検定,
 ns : not significant

実験3

表7には、膝関節の伸展運動時の HbO₂, HbD の平均値と有意差の検定結果を示した。HbO₂ は、すべての環境において有意な差は存在しなかった。HbD は、陸上時の運動と有意な差が認められたのは深水位時であった (p<0.05)。また、浅水位時と深水位時の間にも有意な差があった (p<0.05)。

表8には、膝関節の伸展運動時の StO₂, HbT の平均値と有意差の検定結果を示した。StO₂ は、すべての環境において有意な差は存在しなかった。HbT は、陸上時の運動と有意な差が認められたのは深水位時であった (p<0.05)。また、浅水位時と深水位時の間にも有意な差があった (p<0.01)。

表9には、膝関節の伸展運動時の SpO₂, HR の平均値と有意差の検定結果を示した。SpO₂ はすべての環境において有意な差は存在しなかった。HR は、陸上時と浅水位の間では浅水位時が有意に低く、陸上時と深水位の間では深水位時が有意に低く、浅水位時と深水位の間では深水位時が有意に低い関係があった (p<0.05)。また、

表8 各環境下の膝伸展運動時における StO₂, HbT の
 平均値と有意差の検定

	StO ₂ (%)	HbT (1000個/mm ³)	①	②
①陸上	60.78 ± 6.39	22.12 ± 5.09		
②浅水位(A)	63.36 ± 3.38	21.8 ± 4.36 ns		
③深水位(B)	65.72 ± 3.72	20.34 ± 3.61 * ##		

StO₂ ; すべての関係において有意差なし。
 HbT ; * ; p<0.05 : ①と②, ③の有意差の検定,
 ## ; p<0.01 : ②と③の有意差の検定,
 ns : not significant

表9 各環境下の膝伸展運動時における SpO₂, HR の平均値と有意差の検定

	SpO ₂ (%)	HR (beats/min)	①	②
①陸上	97.40±0.89	95.8±13.12		
②浅水位(A)	97.40±0.55	84.80±5.26	*	
③深水位(B)	97.60±0.55	77.80±9.73	*	#

SpO₂ ; すべての関係において有意差なし.

HR ; * ; p<0.05 : ①と②, ③の有意差の検定,

; p<0.05 : ②と③の有意差の検定,

ns : not significant

安静時の平均値との比較では, 陸上で0.37拍/分, 浅水位で3.3拍/分, 深水位で6.47拍/分の上昇であった.

実験4

図3に被験者(K. K.)における陸上及び水中における膝関節の伸展運動時(3秒間)の筋電図を, 表10にその積分筋活動量を示した. 水中での内側広筋と大腿二頭筋・長頭の筋活動の測定は水の混入により測定不能であった. 大殿筋は, 陸上立位と比べると水中では少ないが, 浅水位と深水位は同値であった. 広背筋は, 陸上立位と浅水位ではほぼ同値であるが, 深水位では減少していた.

4. 考察

実験1

レーザー組織血液酸素モニターから得られた StO₂, HbT, HbO₂, HbD の値は, センサーを取

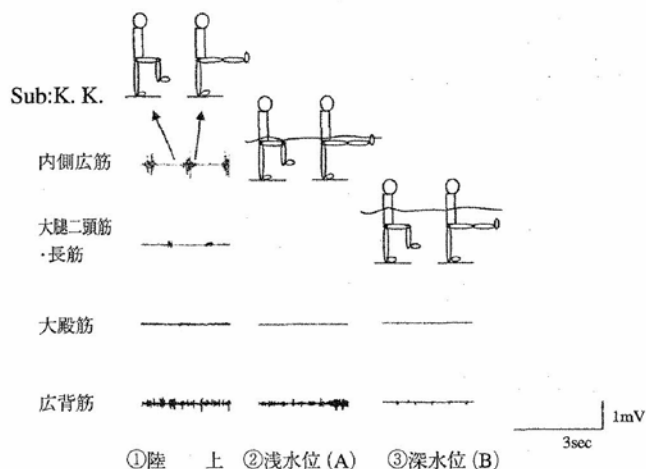


図3 陸上と水中における膝伸展・屈曲運動時の筋活動

表10 (A) 陸上と水中における安静時の積分筋活動量 (Sub : K. K.)

	①陸上立位	②陸上座位	③陸上臥位	④浅水位	⑤深水位
内側広筋	11	12	10	11	10
大腿二頭筋・長頭	39	6	6	8	6
大殿筋	32	8	3	8	3
広背筋	51	35	19	35	28

(uVs)

表10 (B) 陸上と水中における運動時の積分筋活動量 (Sub : K. K.)

	①陸上	②浅水位(A)	③深水位(B)
内側広筋	128	—	—
大腿二頭筋・長頭	25	—	—
大殿筋	34	8	8
広背筋	57	58	20

(uVs)

り付けた筋組織の血流量の変動を示している. 特に, 筋の酸素消費量を表す指標としては HbO₂ の減少と HbD の増大が考えられる. そして, HbO₂ と HbD を合わせた値である HbT は, 組織の血流量を表す指標である. HbT が減少すれば, それは HbO₂, HbD のどちらかに起因するものと考えられる. さらに, StO₂ は, HbO/HbT で算出されることから, 仮に HbO₂ の値に変化がなく HbT が減少すれば StO₂ 値は増加することになる. また, 筋の酸素利用量は, 血液からの酸素の抜き取りと血流量の積で決定されると言われている²⁶⁾.

本研究の安静時の HbT は, 陸上立位と有意な差があったのは陸上臥位と深水位であったが, 有意な差がなかったのは, 陸上座位と浅水位であった. この結果は, 陸上立位と陸上座位及び浅水位が同程度の血流量の状態にあることを示していると思われた. また, 平均値が同値である陸上臥位と深水位も同程度の血流量の状態にあることを示していると思われた. そして, 平均値の比較でも陸上立位時が最も高値を示した.

次に, 安静時の HbO₂ は, 各姿勢・環境において有意な差は存在しなかったことから, これらの環境の違いによる組織の酸素消費には違いはないことが解った. 安静時の HbD は, 陸上立位と比べると陸上座位以外のすべてと有意な差が認めら

れた。これは、陸上臥位、浅水立位、深水立位の姿勢環境により、重力からの解放と水圧の影響により静脈の還流が増大したためではないかと考えることができる。また、浅水立位より深水立位が低値を示したことは、更なる水圧の増加は、更なる静脈の還流の増大を引き起こすことを示唆している。

次に、安静時の StO_2 は、陸上臥位と深水立位、陸上座位と浅水立位の間においてのみ有意な差が認められなかったことは、 HbO_2 と HbD の変化から静脈の還流の程度が類似している状態であると考えられた。

また、安静時の SpO_2 は、各姿勢・環境において有意な差は存在しなかったことは、水から出ている上肢においては、動脈の酸素飽和度への影響はないことを示している。

そして、安静時の HR は、陸上立位と比べるとすべてと有意な差が認められ、 StO_2 の有意差検定と同様の結果となった。つまり、陸上座位と浅水立位、陸上臥位と深水立位の環境が類似している状態であることが心拍数の変化からも確認された。心拍数の値は、静脈の還流に伴う心拍出量の増大がもたらす徐脈現象¹⁾により、陸上立位より低値を示していたと考えることができる。

つまり、3分程度の安静時の水没は、静脈の還流を増大させるが、水没している内側広筋部の筋組織の酸化ヘモグロビン量には影響を与えないことがわかった。

実験 2

安静時における陸上立位時の筋活動は、陸上座位、浅水立位、深水立位と比べ、大腿二頭筋・長頭、大殿筋、広背筋が大きかった。このことは、陸上立位は、他の姿勢・環境に比べ筋の酸素需要・消費量が大きいことを示唆していると考えられることができる。

実験 3

膝関節の伸展運動時の HbT は、陸上時より有意に深水時が低値であったことは、組織の血流量の減少を示唆している。そして、 HbO_2 には有意差はなかったため HbT の減少は HbD に起因していると考えられる。しかし、安静時では有意な差があった浅水位時の HbD は、運動時では有意な差がなかった。これは、浅水位レベルの水圧では本研究における運動を行った場合、静脈の還流に影響を及ぼさない程度の水圧であると示唆された。これは安静時の HbT において有意な差がなかったことが起因していると思われる。

本間らは、比較的低い強度においては運動強度の増加による筋の酸素需要量の増加に対して、筋活動での酸素の抜き取りによる HbO_2 の減少傾向および HbD の増加傾向と、動脈血流入量の増加による HbO_2 の増加傾向および静脈還流量の増加による HbD の減少傾向が釣り合った状態にあることを示唆している²⁶⁾。このことは、本研究においても安静時と比較すると HbO_2 の増加傾向および HbD の減少傾向が確認されている。

運動時の StO_2 は、各環境で有意な差はなかった。このことは、安静時と比べ運動時では HbT の変化が少ないことを示し、運動時の静脈還流の増大は下肢の運動を行うことにより安静時ほどの影響がないことを伺わせた。この結果から、脚を動かしながら入水する方法は、急激な静脈の還流増加を防ぐことができる入水方法ではないかと考えることができた。つまり、水圧に対する適応能力が低い者などの入水方法に応用できるのではないと思われる。しかし、この結果については、運動速度や水温・水位などの条件を更に検討する必要があると思われる。

また、 SpO_2 の値も HbO_2 と同様に各環境において有意な差はなかった。このことは、本研究の運動においては、各環境による動脈の血流量への影響はないと考えられた。

HRの値は、陸上と浅水位の間、陸上と深水位の間、浅水位と深水位の間に有意な差が存在し、安静時の傾向と同様であった。また、運動時の心拍数は、安静時と比べ水深が深くなるほど心拍数の上昇率が高くなる傾向を示したが、水温やclosing volumeの増大などの影響も考慮にいれる必要があることから今後のさらなる検討が必要であると思われる。

実験4

体を支えるための大殿筋や広背筋は、特に水深が増すと減少していることがわかった。本研究の膝関節伸展運動は、30回/分の運動速度であったため水抵抗は少なく、浮力の影響により筋活動は水深が深くなるほど低くなったと考えられる。

4. まとめ

陸上立位、陸上椅座位、陸上仰臥位、浅水立位、深水立位において、安静時及び膝関節伸展運動時の内側広筋部の組織内酸素飽和度の測定とその時の筋電図測定を行った。その結果、安静時のHbO₂は変わらず、静脈還流の変化の影響によるHbDの減少が観察され、陸上臥位と深水立位、陸上座位と浅水立位との間において血流動態が類似している状態であることが示唆された。安静時の筋活動量は陸上臥位と深水立位の広背筋の活動において深水立位が大きかった。

次に、運動時のHbTは、陸上時と比べ水位b時に有意に低値を示し、安静時と同様にHbDの有意な低下が観察された。しかし、StO₂には有意な差がなかったことから、運動時の静脈還流の増大は下肢の運動を行うことにより安静時ほどの影響がないことを窺わせた。このことから、水圧の影響を少なくしながら入水する方法として下肢を動かしながら入水する方法が考えられた。そして、運動により、動脈血流入量の増加によるHbO₂の増加傾向および静脈還流量の増加によるHbDの

減少傾向が認められた。しかし、運動時の各環境におけるSpO₂、HbO₂の有意な差はなかった。また、筋活動は広背筋が浸らない水位では変化がなく、浸る水位ではその活動は低かった。

以上の結果から、本研究における3分程度の水没による水中環境下での運動は、筋血流制限下の運動ではなく、浅水位A(77 cm:大転子レベル)では陸上座位、深水位B(117 cm:剣状突起レベル)では陸上臥位の血流動態に類似した環境での運動であり、水位が深くなるほど筋活動が少なくなる運動であった。

これらのことから、深水位B(117 cm:剣状突起レベル)では仰向けに寝ているような血流環境にあり、静脈の還流が多くなっていると推定されることから心臓に大きな負担をかけない環境であることがわかった。さらに、組織の酸素ヘモグロビン量も陸上時と変わらないことから、組織に無理な負担を強いることがないことがわかった。そして、陸上と同じ動作を行った場合、本研究の速度(負荷)では筋活動量が少ないことから、関節可動域の改善を目指すリハビリなどの運動には適した環境ではないかと推察された。

謝辞

稿を終えるにあたり、実験を補助していただいた(株)ニューロサイエンスの赤崎房生氏、緒方浩氏、(株)日本メディックスの堀川寛氏に深謝の意を表します。また、実験のためのプールを快く貸していただいた株式会社アーチスポーツの小田島将支配人に厚く御礼申し上げます。そして、本研究に対し助成していただいた(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 須藤明治;水中運動処方 I, 文化書房博文社, 25-51 (1999)
- 2) Arborelius, M. JR., Ballding, U.I., Lilja, B. and Lundgren, C.E.G. ; Hemodynamic changes in man during immersion with the head above water, *Aerospace Med.*, 43 (6) 592-598 (1972)
- 3) 田中信行; 入浴の環境生理学, 炭酸泉に関するシンポジウム報告集, 36-42 (1984)
- 4) Larsen, A. S., Johansen, L.B., Stadeager, C., Warberg, J., Christensen, N. J. and Norsk, P. ; Volume-homeostatic mechanisms in humans during graded water immersion, *J. Appl. Physiol.*, 77, 2832-2839 (1994)
- 5) Gabrielsen, A., Johansen, L.B. and Norsk, P. ; Central cardiovascular pressures during graded water immersion in humans, *J. Appl. Physiol.*, 75, 581-585 (1993)
- 6) Krishna. G. G., Danovitch, G. M. and Sowers, J. R. ; Catecholamine responses to central volume expansion produced by head-out water immersion and saline infusion., *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 56, 998-1002 (1983)
- 7) Anderson, J. V., Millar, N. V., O'hare, J. P., Mackenzie, J. C., Corral, R. J. M. and Bloom, S. R. ; Atrial natriuretic peptide : Physiological release associate with natruirensis during water immersion in man, *Clin. Sci.*, 71, 319-322 (1986)
- 8) Buono, M. J. ; Effect of central vascular engorgement and immersion on various lung volumes, *J. Appl. Physiol.*, 54 (4) 1094-1096 (1983)
- 9) Hamilton, W. F. and Mayo, J.P. ; Changes in the vital capacity when the body is immersed in water, *Am. J. Physiol.*, 141, 51-53 (1944)
- 10) Hong, S. K., Ting, E.Y. and Rahn, H. ; Lung volumes at different depths of submersion, *J. Appl. Physiol.*, 15 (4) 550-553 (1960)
- 11) Reid, M. B., Loring, S.H., Banzett, R.B. and Mead, J. ; Passive mechanics of upright human chest wall during immersion from hips to neck, *J. Appl. Physiol.*, 60 (5) 1561-1570 (1986)
- 12) 藤沢宏幸, 上村浩信, 阿岸祐幸; 水浸が等尺性運動時の血圧, 心拍応答及び左室機能におよぼす影響, 第48回日本体力医学会号, 体力科学, 42, 6, 795 (1993)
- 13) Cohen, R., Bell, W.H., Saltzman, H.A. and Kylstra, J.A. ; Alveolar arterial oxygen pressure difference in man immersed up to the neck in water, *J. Appl. Physiol.*, 30, 720-723 (1971)
- 14) Craig, B. D., Wahba, W. M., Don, H. F., Couture, J. G. and Becklake, M. R. ; "Closing volume" and its relationship to gas exchange in seated and supine positions, *J. Appl. Physiol.*, 31, 717-721 (1971)
- 15) Flynn, E.T., Saltzman, H.A. and Summitt, J.K. : Effects of head-out immersion at 19.18 Ata on pulmonary gas exchange in man, *J. Appl. Physiol.*, 33, 113-119 (1972)
- 16) 本郷利憲・編;標準生理学, 医学書院, 564-614 (1994)
- 17) Agostoni, E., Gurtner, G., Torri, G. and Rahn, H. ; Respiratory mechanics during submersion and negative pressure breathing, *J. Appl. Physiol.*, 21 (1) 251-258 (1966)
- 18) Choukroun, M. L., Kays, C. and Varene, P. ; Effects of water temperature on pulmonary volumes in immersed human subjects, *Respiration Physiology*, 75, 255-266 (1989)
- 19) Hong, S. K., Ceretelli, P., Cruz, J.C. and Rahn, H. ; Mechanics of respiration during submersion in water, *J. Appl. Physiol.*, 27 (4) 535-538 (1969)
- 20) 黒川隆志, 池上晴夫; 肺換気力学特性に及ぼす体位, Water immersion 及び水泳トレーニングの影響, 体力科学, 29, 98-109 (1980)
- 21) 宮本忠吉, 藤本繁夫, 栗原直嗣, 金尾顕郎, 辻英次, 前田如矢; 健常者における頸椎水位と横隔膜水位の動的小よび静的肺機能におよぼす影響, 体力科学, 43, 155-161 (1994)
- 22) Farhi, L. E. and Linnarsson, D. ; Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35° C, *Res. Physiol.*, 30, 35-50 (1977)

- 23) 黒川隆志,池上晴夫;水泳及び陸上運動時肺気量とクロージングボリューム,体力科学,30,220-227(1981)
- 24) 須藤明治,角田直也,八木良訓;高齢の腰痛患者に対する水中運動の効果,柔道整復・接骨医学,9,1(2000)
- 25) 宝田雄大,鶴田友美,石井直方;きわめて低強度(20%1RM)のトレーニングが筋肥大と筋力の増強を引き起こした,第7回日本運動生理学会抄録集,33(1999)
- 26) 本間俊行,本間幸子,加賀谷淳子;膝伸展運動時にみられる協働筋間での酸素供給・消費バランスの相違,体力科学,47,525-534(1998)