短時間の腋下水準における水浸が心臓自律神経系活動に及ぼす影響

— 水温25℃, 30℃, 34℃での検討 —

木住野 孝 子* 松 田 光 生**

EFFECTS OF A SHORT TIME WATER IMMERSION AT SUBAXILLARY LEVEL ON CARDIAC AUTONOMIC NERVE ACTIVITY — A STUDY IN WATER AT 25℃, 30℃ AND 34℃ —

TAKAKO KISHINO and MITSUO MATSUDA

Abstract

The purpose of this study was to assess an alteration of cardiac autonomic nerve activity during water immersion. Ten healthy young males (age: 21-28 yr.) were immersed in water at the temperatures of 25℃, 30℃ and 34℃. Subjects sat calmly for 20 minutes in sitting position before water immersion, and then were immersed in water at subaxillary level in sitting position for 15 minutes, performing controlled breathing (15 cycle/min.). Electrocardiograms were recorded continuously. Autonomic nerve activity was estimated with the analysis of power spectral by using the Fast Fourier Transformation (FFT). High (HF; 0.15-0.50 Hz) and low (LF; 0.04-0.15 Hz) frequency areas and the ratio of LF to HF (LF/HF) were calculated as the indices of cardiac parasympathetic nerve activity, sympathetic nerve activity with parasympathetic modulation, and sympathetic nerve activity, respectively. During the water immersion at 25℃, 30℃ and 34℃, HF was significantly increased, while the heart rate and LF/HF were significantly decreased. There were no statistically significant differences among both of HF and LF/HF during the immersion at 25℃, 30℃ and 34℃, although the rate of change in HF at the temperature of 25℃ appeared to be prominent compared to those at 30℃ and 34℃ and some subjects showed an exaggerated change in HF immediately after immersion. These results suggest that cardiac parasympathetic nerve activity is enhanced and cardiac sympathetic nerve activity is suppressed during a short time water immersion at the thermo-neutral temperature (34℃) and the temperatures of 25℃ and 30℃, which are the usual temperatures found in indoor pools.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1997, 46: 101~112)

key words: heart rate variability, power spectrum analysis, cardiac parasympathetic nerve activity, cardiac sympathetic nerve activity, human

I. 緒 言

水中では浮力や水圧、水温、抵抗等の、陸上とは異なる影響があり、これらを利用した水中運動は健康運動のみならず肥満者や心疾患等を有する者の運動療法としても有効であると考えられる。しかし、特に心疾患等を持つ者の水中運動においては、安全性の検討が必要である。心疾患患者の心臓性突然死には心臓交感神経系活動の亢進ない

し心臓副交感神経系活動の抑制が関与する可能性が指摘されている^{1,2)}。このことは、心臓交感神経系活動の亢進ないし心臓副交感神経系活動の抑制が、直接的あるいは間接的に不整脈の発生や冠動脈の攣縮に関与することを示唆するが、一方で、副交感神経末端から分泌される伝達物質であるアセチルコリンが中高年者の冠動脈の攣縮に関与していることも報告されている³⁾。したがって、水中における心臓交感神経系及び副交感神経系の活

*筑波大学大学院博士課程体育科学研究科
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

**筑波大学体育科学系
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

Doctoral Program in Health and Sport Sciences University of
Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba City, Ibaraki 305
Institute of Health and Sport Sciences University of Tsukuba,
Tennodai 1-1-1, Tsukuba City, Ibaraki 305

動水準の変化を明らかにすることは、安全性を検討する上で重要であると思われる。

中立水温とされる35℃前後⁴⁾における頸部までの安静水浸中では、血中カテコラミン濃度が減少することが報告されている^{5,6)}。一方、一般の水中運動ではプールの水温は25℃から30℃であり、27℃における水浸中に血中カテコラミン濃度が増加⁷⁾、あるいは25℃における水浸後に尿中カテコラミン排泄量が増加すると報告されている⁸⁾。したがって、中立水温における水浸では交感神経系活動の低下が示唆されるが、一般のプールに用いられる、これより低い水温では交感神経系活動が亢進する可能性が示唆されている。しかし、血中カテコラミン濃度の変動による検討では、心臓のみならず腎臓、筋肉、皮膚等を支配する交感神経の総和的な活動しか評価できない。また、一般の水中運動の持続時間は15分から長くても30分程度である。上記の研究のうち、低温域における研究では、ほぼこれに相当する時間の水浸による変化を観察しているが、中立水温における研究では、いずれも通常の水中運動とは比較にならないような長時間の水浸中に血中ホルモン動態を観察したものである。ヒトの水浸中に、心臓に入力する交感神経の活動水準を定量的に、しかも比較的短時間の水浸中に経時的に検討した研究はこれまでになされていない。

水温が24℃から35℃における頸部までの安静水浸では心拍数の減少が示されている⁴⁾。安静中の心拍数を決定する要因としては、一般に副交感神経活動の関与が大きいので、このような水温域では心臓副交感神経系活動の亢進が示唆されるが、心臓交感神経系活動の低下が生じている可能性を除外することはできない。また、中立水温における頸部までの水浸では心拍数に変化が認められなかったという報告もある⁹⁾。水浸中のヒト心臓副交感神経系活動を定量的に検討した研究は少ないが、心拍変動係数(心電図 R-R 間隔の連続100心拍における変動率)を用いた検討によれば¹⁰⁾、水温が25℃及び30℃における15分間の腋下水位の水浸中には、副交感神経系活動の有意の変化は生じていないことが示唆された。しかし、心拍変動係

数は副交感神経活動の指標としての特異性が低いともいわれるので¹¹⁾、さらに検討する余地が残されている。

心拍変動パワースペクトル解析を用いると¹²⁻¹⁵⁾、心臓に入力する交感神経と副交感神経の活動の比較的短時間内の変化を、同時に、しかもある程度定量的に特異性をもって評価することができる。本研究では、中立水温及び一般のプールに用いられる水温での比較的短時間の安静水浸中における心臓自律神経系活動水準の変化を検討した。すなわち、中立水温より低い水温である25℃及び30℃においては、1) 心臓交感神経系活動は亢進するのか、あるいは低下するのか、及び2) 心臓副交感神経系活動は亢進するのか、あるいは不変なのかについて、中立水温(34℃)と比較しながら、心拍変動パワースペクトル解析を用いた検討により明らかにすることを目的とした。

Ⅱ. 方 法

A. 対 象

対象は10名の健康な成人男性とした。年齢は21歳から28歳で、平均年齢は23.9(3.2; SD)歳、平均身長は171.5(3.6)cm、平均体重は72.3(7.9)kg、平均体脂肪率は20.0(5.3)%であった。いずれの対象者も非喫煙者であり、常用薬はなかった。また、全対象者に水泳の経験があった。各対象者には実験の趣旨と内容を説明し、参加の同意を得た。

B. 測定方法

各対象者において、水温の設定を25℃、30℃、及び34℃とした3回の水浸実験を行った。プールの水温は施設毎に異なり、通常の温水プール水温は30℃前後であるが、競泳用等の低めに設定してあるプールでは25℃程度である。これらの水温に生体への水温の影響が小さい中立水温として34℃を加え、水温の影響を比較検討した。

水浸実験の前に全対象者の身長、体重、体脂肪率を測定した。体脂肪率の測定には栄研式キャリパーを用い、肩甲骨下部及び上腕後部の皮脂厚を測定し、長嶺の体密度(1972)及びKeysの式を用いて体脂肪率を算出した。体重及び体脂肪率は3回の水浸実験における平均値である。

実験中は全対象者に水泳パンツのみを着用させ、水浸前に20分間の長座位安静を保たせた。その後長さ 120 cm, 幅 73cm, 深さ 58cm の浴槽に移らせ、長座位腋下水位までの安静水浸を15分間実施した。水浸時間は、一般の健康運動や運動療法としての水中運動で行われる 1 回の持続時間である15分から30分程度に合わせたものである。浴槽(リコー精器;シェイプウェイブ)にはモーター及び濾過循環装置が装備されており、浴槽内の水は循環し、水温はサーモスタット装置により一定に保たれる。

各対象者における各水温での実験は異なる日に実施した。測定は午後3時から7時までの時間帯とし、同一対象者では全ての実験を同一時間帯に実施した。室内環境は室温26.8(0.3)℃、湿度55.3(2.3)%であった。対象者には実験前日から飲酒を控えさせ、睡眠も十分に取るように指導した。さらに実験当日のカフェイン含有飲料等の摂取、高強度の運動、実験開始3時間前以降の食事摂取は禁止した。

水浸前及び水浸中は指式カフ血圧計(オムロン; HEM-804 F)を左第二指に装着し、水浸前及び水浸中に指の位置を肩の高さで一定に保ち、収縮期及び拡張期血圧を測定した。実験中の心電図をテレメーター送信機(フクダ電子;ST-19)にてモニター(フクダ電子; Dyna Scope DS-502)に送信し、モニターからの出力をサンプリング頻度1000 Hz で A/D 変換して、パーソナルコンピューター(NEC; PC9801 BX)に連続波型として収集した。

実験中は、呼吸数を一定に制御した。心拍変動パワースペクトル解析より得られる指標は、呼吸数により影響を受けることが報告されているためである¹⁴⁾。呼吸制御は、1分間15回のリズムに調整した信号音をオーディオテープに録音し、対象者にはそのテープのリズムに合わせて呼吸するように指導して行った。1分間15サイクルに設定した理由は、後述する心拍変動パワースペクトル解析の際に、副交感神経系活動を反映する高周波成分を交感神経による心拍調節の周波数伝達特性の上限である 0.15 Hz より高くし、パワースペク

トル成分の分離を明確にするためである¹⁶⁾。なお、全ての対象者に対して練習時間をもうけ、制御呼吸に対する練習を実施した後、実験を開始した。

自覚的温度感覚の問診を、各水温における水浸中に行った。温度感覚は、水浸直後、水浸5分、10分、及び15分に、4段階(1:かなり冷たい, 2:やや冷たい, 3:少し冷たい, 4:冷たくない・ちょうど良い)から選ばせ、点数化した。

C. 解析

収集された心電図のデータから、水浸前は安静時間の最後の5分間、及び水浸中は5分毎にR-R 間隔のトレンドグラムを作成した。なお、水浸直後の1分間は解析の対象から除いてある。得られたトレンドグラムから高速フーリエ変換(FFT; Fast Fourier Transformation)を用いた心拍変動パワースペクトル解析を行った。各5分間の最後にR波が検出された場合は、先行する期間に含めて解析を行った。周波数解析から得られた低周波成分(Low Frequency: 0.04~0.15 Hz)のパワー積分値(LF)と、高周波成分(High Frequency: 0.15~0.50 Hz)のパワー積分値(HF)を算出し、先行研究にならい^{13, 15, 18)}、HF を心臓副交感神経系活動、LF/HF を心臓交感神経系活動の指標として用いた。

統計学的解析には、全対象者の水浸前及び水浸中における心拍数と血圧、心拍変動解析より求めた各指標、及び点数化した自覚的温度感覚の平均値及び標準誤差を求め、水浸前と水浸中における値の間の有意差検定を Wilcoxon signed-ranks test を用いて行った。水浸前における水温間の比較、及び水浸中の各期間における水温間の比較には paired t test を用いた。水浸前から水浸中の各期間までの変化率 $\{(\text{水浸中の値} - \text{水浸前の値}) / \text{水浸前の値}\}$ を含む各指標間の相関分析は Pearson's correlation coefficient を用いて行った。有意水準は危険率 5 % 以下とした。

Ⅲ. 結 果

水浸前及び水浸中の平均心拍数の変動を Fig. 1 に示す。各水温実験間における水浸前の心拍数に

Fig. 1. Changes in the heart rate (mean $\pm$ SE) before and during water immersion. Significance of difference from BEFORE: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

統計学的な有意の差は認められなかった。水浸により中立水温の34℃で、水浸前に比べ水浸中を通して有意の低下(水浸前, 69.1 ± 3.4 (SE) bpm; 0~5 min, 63.6 ± 3.9 bpm ($p < 0.01$); 5~10 min, 63.1 ± 3.8 bpm ($p < 0.01$); 10~15 min, 63.5 ± 4.0 bpm ($p < 0.01$))が認められ、水温30℃でも同様に水浸中を通して有意の低下(水浸前, 67.7 ± 3.6 bpm; 0~5 min, 58.2 ± 3.4 bpm ($p < 0.01$); 5~

10 min, 58.2 ± 3.6 bpm ($p < 0.01$); 10~15 min, 59.4 ± 3.6 bpm ($p < 0.05$))が認められた。さらに低水温である25℃でも有意の低下(水浸前; 67.0 ± 3.1 bpm, 0~5 min; 60.3 ± 3.0 bpm ($p < 0.05$), 5~10 min; 60.7 ± 3.1 bpm ($p < 0.05$), 10~15 min; 60.2 ± 3.2 bpm ($p < 0.05$))が認められた。水浸前から水浸中への変化率をみると、水温34℃では水浸中0~5分で約10%低下し、30℃では15%, 25℃では10%程度低下している。また、浸漬中5~10分では34℃で約10%, 30℃で15%, 25℃で10%低下している。さらに10~15分では34℃で10%, 30℃で10%, 25℃で10%程度低下しており、水浸中の心拍数には水浸前に比べほぼ一定した低下が認められた。水浸中の各時点の心拍数を水温間で比較すると、水温34℃に比べ30℃で有意に低値(0~5 min, $p < 0.01$; 5~10 min, $p < 0.01$; 10~15 min, $p < 0.05$)を示したが、25℃では34℃に比べ有意の差は見られなかった。

水浸中の血圧の変動を Fig. 2 に示す。水浸前の各水温実験間における収縮期及び拡張期血圧に統計学的な有意の差は認められなかった。水温34℃での水浸中は、5分に水浸前の安静時に比べ収縮期血圧に有意の低下(水浸前, 113.2 ± 3.1 mmHg; 5 min, 102.4 ± 2.3 mmHg ($p < 0.05$)), 及び拡張期血圧に有意の低下(水浸前, 69.0 ± 2.6

Fig. 2. Changes in the blood pressure (mean $\pm$ SE) before and during water immersion. Significance of difference from BEFORE: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

mmHg; 5 min, 59.5 ± 2.0 mmHg ($p < 0.01$)) が見られたが、脈圧に有意の変化は見られなかった。水温30℃では水浸中に収縮期及び拡張期血圧、脈圧に有意の変化は見られなかった。さらに低水温である水温25℃では水浸5分及び15分に拡張期血圧の有意の上昇(水浸前, 70.0 ± 2.0 mmHg; 5 min, 82.2 ± 4.2 mmHg ($p < 0.01$); 15 min, 77.2 ± 4.2 mmHg ($p < 0.05$)) が認められたが、脈圧に有意の変化はなかった。各時点の収縮期及び拡張期血圧を水温間で比較すると、収縮期血圧は34℃に比べ25℃で水浸中を通して有意に高値(水浸 5 min, $p < 0.01$; 水浸 10 min, $p < 0.05$; 水浸 15 min, $p < 0.05$)を示し、30℃の水浸でも5分、15分に有意の高値(5 min, $p < 0.05$; 15 min, $p < 0.01$)を示した。一方、拡張期血圧も34℃に比べ25℃で水浸中を通して有意の高値($p < 0.01$)を示し、30℃でも水浸中を通して有意の高値($p < 0.01$)を示した。各時点の脈圧を水温間で比較すると、水温34℃に比べて25℃で水浸 5 分及び15分に有意の高値(水浸 5 分34℃, 42.9 ± 1.7 mmHg; 25℃, 33.9 ± 2.7 mmHg ($p < 0.01$), 水浸15分34℃, 41.0 ± 2.5 mmHg; 25℃, 35.6 ± 2.9 mmHg ($p < 0.01$))を示した。また、30℃では水浸10分に有意の高値(水浸 10分34℃, 43.0 ± 2.2 mmHg; 30℃, 38.8 ± 2.3 mmHg ($p < 0.01$))を示し、水浸 5 分及び15分には有意の差は見られなかった。

HF の変動を Fig. 3 に示す。各水温実験間における水浸前の値に統計学的な有意差は認められなかった。水浸中は水温34℃で有意の上昇(水浸前, 0.18 ± 0.19 (bpm)²; 0~5 min, 0.77 ± 0.22 (bpm)² ($p < 0.01$); 5~10 min, 0.63 ± 0.22 (bpm)² ($p < 0.01$); 10~15 min, 0.52 ± 0.20 (bpm)² ($p < 0.01$)) が認められ、30℃でも有意の上昇(水浸前, 0.15 ± 0.05 (bpm)²; 0~5 min, 1.03 ± 0.27 (bpm)² ($p < 0.01$); 5~10 min, 0.73 ± 0.20 (bpm)² ($p < 0.01$); 10~15 min, 0.80 ± 0.27 (bpm)² ($p < 0.05$)) が認められた。さらに低水温である25℃でも有意の上昇(水浸前, 0.11 ± 0.04 (bpm)²; 0~5 min, 1.71 ± 0.64 (bpm)² ($p < 0.01$); 5~10 min, 0.77 ± 0.19 (bpm)² ($p < 0.01$); 10~15 min, 0.61 ± 0.17 (bpm)² ($p < 0.01$)) が認められた。水浸前からの HF の

Fig. 3. Changes in the high frequency component (HF, mean $\pm$ SE) before and during water immersion. Significance of difference from BEFORE: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

変化率を見ると、いずれの水温環境下においても水浸 0~5 分に反応が大きく、それ以降は回復する動き(25℃水浸前~0~5 分, 約1500%; 水浸前~5~10分, 約600%; 水浸前~10~15分, 約400%, 30℃水浸前~0~5 分, 約600%; 水浸前~5~10分, 約400%; 水浸前~10~15分, 約400%, 34℃水浸前~0~5 分, 約300%; 水浸前~5~10分, 約250%; 水浸前~10~15分, 約200%)が認められた。中立水温よりも低い水温ほど各期間における変化率は大きかったが、水浸中の各期間における値を比較すると、水温間に有意の差は見られなかった。しかし、変化の大きかった水浸 0~5 分における各対象者の変化率を水温毎に図示(Fig. 4)すると、対象者のなかには25℃でとくに大きく反応する者が認められた。各対象者について、水温25℃での水浸前から水浸中までの HF の変化率と血圧の変化率の関連を検討した結果、水浸前から水浸 0~5 分の HF の変化率と血圧に有意の相関関係は見られなかった。しかし、水浸 5~10分及び10~15分の HF の変化率と拡張期血圧の変化率との間に有意ではないが、正の相関傾向($r = 0.595$, $p < 0.069$, $r = 0.612$, $p < 0.059$)が見られた。すなわち、拡張期血圧が上昇する者ほど HF の変化率が大きい傾向が示唆された。ま

Fig. 4. Rates of changes in HF during first 5 minutes water immersion.

た, 水温25℃での水浸前から水浸中までの HF の変化率と体脂肪率の関連を検討した結果, 有意の相関関係は見られなかった。

LF (Fig. 5) は, 各水温実験間における水浸前の値に統計学的な有意の差は認められなかった。水浸中は, 水温34℃で5～10分に水浸前に比べ有意の上昇(水浸前, $0.42 \pm 0.16 (\text{bpm})^2$; 5～10 min, $0.59 \pm 0.24 (\text{bpm})^2$ ($p < 0.05$))が認められ, 水温30℃では水浸0～5分及び10～15分に有意の上昇

Fig. 5. Changes in the low frequency component (LF, mean $\pm$ SE) before and during water immersion. Significance of difference from BEFORE: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

(水浸前, $0.43 \pm 0.13 (\text{bpm})^2$; 0～5 min, $0.98 \pm 0.24 (\text{bpm})^2$ ($p < 0.05$); 10～15 min, $0.62 \pm 0.20 (\text{bpm})^2$ ($p < 0.05$))が認められた。さらに低い水温である25℃では0～5分, 5～10分に有意の上昇(水浸前, $0.31 \pm 0.09 (\text{bpm})^2$; 0～5 min, $1.36 \pm 0.67 (\text{bpm})^2$ ($p < 0.05$); 5～10 min, $0.52 \pm 0.17 (\text{bpm})^2$ ($p < 0.05$))が認められた。水浸中0～5分における各水温の値を比較すると, 水温34℃に比べ, 30℃で有意に高値($p < 0.05$)を示したが, 25℃では有意の差は見られなかった。水浸前からの変化率からみると, 水温34℃では水浸0～5分及び5～10分に約40%, 10～15分には約70%と水浸10～15分までの変化率が最も大きくなっているが, 30℃では水浸0～5分で約130%, 5～10分で60%, 10～15分で40%と水浸直後に変化が大きく, その後は水浸前の値に近づく動きをしている。より低水温である25℃でも, 水浸0～5分で約350%, 5～10分で70%, 10～15分で50%と, 水温30℃とほぼ同様の変化を示した。しかし, 各時点における変化率に水温間による有意の差は見られなかった。水温25℃での水浸前から水浸中までの LF の変化率と血圧の変化率の関連を検討した結果, 有意の相関関係は見られなかった。

LF/HF (Fig. 6) は, 各水温実験間における水浸前の値に有意の差が認められなかった。水温34℃の水浸中は0～5分及び5～10分に有意の低下

Fig. 6. Changes in the ratio of LF to HF (LF/HF, mean $\pm$ SE) before and during water immersion. Significance of difference from BEFORE: * p <0.05, ** p <0.01.

(水浸前, 8.56 ± 4.7 ; 0~5分, 0.87 ± 0.24 (p <0.05); 5~10分, 1.25 ± 0.33 (p <0.05))が見られ, 水温30℃では水浸0~5分及び5~10分に有意の低下(水浸前, 7.82 ± 2.53 ; 0~5分, 1.09 ± 0.20 (p <0.05); 5~10分, 1.44 ± 0.44 (p <0.05))が認められた。より低い水温25℃では水浸中を通して有意の低下(水浸前, 5.30 ± 2.0 ; 0~5分, 0.65 ± 0.09 (p <0.01); 5~10分, 0.74 ± 0.14 (p <0.01); 10~15分, 0.71 ± 0.14 (p <0.01))が認められた。水浸前からの変化率を見ると, LF/HFは各水温とも水浸前から水浸0~5分に急激に低下し(25℃, 約-90%; 30℃, 約-90%; 34℃, 約-90%), その後は30℃と34℃でわずかに水浸前の値に近づくが, 10~15分ではほぼ同程度の変化(25℃, 約-90%; 30℃, 約-70%; 34℃, 約-80%)を保った。水浸中の各時点における値を比べると, 各水温には有意の差は見られなかった。水温25℃での水浸前から水浸中までのLF/HFの変化率と血圧の変化率の関連を検討した結果, 水浸前から水浸0~5分, 5~10分のLF/HFの変化率と血圧には有意の相関関係は認められなかったが, 水浸10~15分のLF/HFの変化率と収縮期血圧の変化率との間に有意の負の相関($r = -0.634$, p <0.05)が認められた。また, 水温25℃での水浸前から水浸中まで

Fig. 7. Changes in the individual sensation of temperature during water immersion. Significance of difference from 0 min: *** p <0.0001.

のLF/HFの変化率と体脂肪率の関連を検討した結果, 有意の相関関係は見られなかった。

水浸による自覚的温度感覚(Fig. 7)は, 中立水温での水浸中を通して10名中9名が感覚4(冷たくない・ちょうど良い)と答え, 1名は水浸中を通して感覚3(少し冷たい)と答えた。水浸直後から水浸15分までの自覚的温度感覚の平均値は 3.9 ± 0.1 と変化は見られなかった。30℃での水浸直後は8名が感覚3(少し冷たい)または4(冷たくない・ちょうど良い)と答えたが, 2名は感覚1(かなり冷たい)及び感覚2(やや冷たい)と答えた。そのうち1名は34℃の水浸中に感覚3(少し冷たい)と回答した者である。水浸直後には自覚的温度感覚が最も低く 2.8 ± 0.29 であったのに対し, 水浸15分には 3.2 ± 0.25 と上昇しているものの, 統計学的に有意の差は認められなかった。さらに低水温である25℃では, 水浸直後に7名が感覚1(かなり冷たい)と答え, 残り3名は感覚2(やや冷たい)と答えた。水浸15分には7名が感覚3(少し冷たい)と答えたが, 3名は感覚2(やや冷たい)と答えた。水温34℃の水浸直後に(少し冷たい)と答えた対象者は, 水温25℃でも(かなり冷たい)と回答している時間が水浸10分まで続き, 他の対象者よりも冷たいと感じている時間が長かった。25℃での温度感覚を平均すると, 水浸直後に最も

低値を示し(水浸直後, 1.3 ± 0.15), 水浸 5 分にはやや上昇して(水浸 5 min, 1.8 ± 0.2), 水浸 10 分及び 15 分で水浸直後に比べ有意に高値(10 min, 2.6 ± 0.22 ($p < 0.0001$); 15 min, 2.8 ± 0.20 ($p < 0.0001$))を示した。水浸各時点における自覚的温度感覚を水温毎に比較すると, 水浸直後は 34°C に比べ 25°C 及び 30°C でそれぞれ有意に低値 ($p < 0.001$, $p < 0.01$) を示した。水浸 5 分においても 34°C に比べ 25°C , 30°C でそれぞれ有意の低値 ($p < 0.0001$, $p < 0.05$) を示し, 15 分経過してもなお 34°C に比べると 25°C , 30°C でそれぞれ有意な低値 ($p < 0.001$, $p < 0.01$) を示した。各対象者の体脂肪率と水温 25°C における水浸中の自覚的温度感覚の関連について検討したが, 有意の相関は認められなかった。また, 水温 25°C での水浸直後において, 自覚的温度感覚と HF 及び LF/HF の水浸による変化率の関連を検討したが, 有意の相関は認められなかった。

Ⅳ. 考 案

本研究では, 健康運動や運動療法として実施される水中運動の安全性を, 心臓自律神経系活動の面から検討するために, その第一段階として, 安静水浸中の心臓自律神経系活動水準を心拍変動パワースペクトル解析を用いて検討した。中立水温及び通常のプールに用いられる水温(以下単に通常水温という)における腋下までの 15 分間の安静長座位水浸中は, 水浸前に比べて, 心拍数の減少, 心拍変動パワースペクトル高周波成分(HF)の上昇, 及び低周波成分と高周波成分との比(LF/HF)の低下が認められた。中立水温における水浸と比べると, 通常水温の範囲では水浸中の HF 及び LF/HF に有意の差異は認められなかった。しかし, 低めの水温である 25°C では, とくに水浸直後の HF に大きな反応を示す者が認められた。

フーリエ解析を利用した心拍変動スペクトル解析により¹²⁾, 心拍の呼吸性変動に基づく HF は心臓副交感神経系活動を反映する指標, 心拍の血圧調節系リズムによる変動に基づく LF は心臓交感神経活動と心臓副交感神経活動の両者を反映する指標とされている。先行研究では^{13,15,18)}, LF

が心臓交感神経と副交感神経の両方から影響を受けることから, LF/HF を心臓交感神経系活動水準の指標として用いている。したがって, 本研究で得られた成績から, 通常水温における 15 分程度の安静水浸中には, 心臓副交感神経活動の亢進と心臓交感神経系活動の抑制が生じることが示唆された。水浸中の自律神経活動水準には水温による大きな差異はないが, 比較的低い水温では水浸直後に大きな反応を示すものがいた。

心拍の呼吸性変動は, 心臓副交感神経活動以外に, 呼吸数にも影響を受けることが知られている。Hirsch ら¹⁹⁾は呼吸数が 1 分間に約 7 回以上の範囲では, 呼吸数が減少するほど呼吸性洞不整脈が増大することを示している。Hayano ら¹⁷⁾はプロプラノロール投与により交感神経を遮断した上で呼吸制御を行ったところ, 呼吸間隔を増加させると, 心拍数と LF は変化しないのにもかかわらず HF の上昇が生じることから, 呼吸数の変化は副交感神経の活動水準を変化させずに, 副交感神経活動水準と心拍の呼吸性変動の大きさとの関係を変化させると結論している。したがって, 本研究では, 水浸が引き起こしうる呼吸数変化の影響を除外するため, 呼吸数を 1 分間 15 回に制御して実験を行った。

Brown ら²⁰⁾は換気量が心拍の呼吸性変動に影響を及ぼすことを報告し, 呼吸数 7.5~15 回/分の範囲で 1 回換気量を 500 ml 増加させると, 心拍変動スペクトルの呼吸性変動成分が平均 17% 増加したと述べている。一方, 10 分間の水浸を行った藤澤らの報告²¹⁾によると, 分時換気量は水浸前に比べ水温 30°C 及び 36°C で殆ど変化しなかったが, 25°C では約 2.8 l/min 程度の増加が見られた(本研究にあてはめると, 約 200 ml の増加である)。本研究で示された 100% をこえる HF の変化を, 全て換気量の増加に伴う上昇として説明することは困難であろう。

本研究のように水浸中に生じる心臓自律神経系活動の変化を, ヒトで定量的に検討した報告は殆どない。中立水温とされる水温 35°C 前後⁴⁾における頸部あるいは胸部(乳頭部)までの安静水浸中に, 血中ノルアドレナリン濃度が減少することが

報告されているが^{4,6,22,23)}、いずれも比較的長時間(Larsen らの研究²³⁾では30分後、他は1時間以上)の変化を見たものであり、しかも血中濃度から交感神経の総合的な活動を評価したものである。永浜らは心エコー図で心機能を検討し²⁴⁾、中立水温における腋下までの5分間の安静座位水浸中に、心拍数と心筋の基礎収縮力が有意な低下を示すことから、間接的ではあるが水浸中における心臓交感神経系活動の抑制、ないし副交感神経系活動の亢進を示唆している。心拍数及び心筋基礎収縮力の低下は副交感神経系活動の亢進のみでも起こりうるが、本研究により、中立水温における安静水浸中、水浸5分後から心臓交感神経系活動の抑制と副交感神経系活動の亢進が同時に生じることが示唆された。

中立水温での水浸中には、生体への水温による影響は少ないが、水圧が影響を及ぼすと思われる。水浸中は、水位に応じて中心静脈圧が上昇すること²³⁾、その上昇は壁内外圧差の増大であること²⁵⁾が確かめられている。頸部までの10分間の水浸による中心血液量の増大は約700 mlとされ²⁶⁾、臀部以上の水位では1回心拍出量が増大すること²⁷⁾、腋下までの5分間の水浸により左心容積と1回心拍出量の増大が生じること²⁴⁾も示されている。水位を変えて行った実験において^{23,27)}、水浸による心拍数の減少は頸部までの水位に比べて、剣状突起²⁷⁾あるいは胸部(乳頭部)²³⁾までの水位の方がむしろ著しい。Farhi and Linnarsson は²⁷⁾、この説明として、剣状突起までの水浸では心拍出量の増大に伴う血圧の上昇により、圧受容体が刺激されて心拍数が減少するが、それ以上の水位では心房のストレッチ受容体が刺激されて心拍数が増加する(Bainbridge reflex)と説明している。ただし、Rowell²⁸⁾はヒトには Bainbridge reflex は存在しないとしている。中立水温における水浸中の血圧に関しては、収縮期圧も拡張期圧も上昇する²⁶⁾、平均血圧は不変だが脈圧が増大する²⁵⁾、収縮期圧も拡張期圧も低下する⁴⁾等のように成績が一定しない。Arborelius らの研究²⁶⁾では水浸は10分間であり、Gabrielsen らの研究²⁵⁾では5～10分毎に水位を上昇させているが、

Craig ら⁴⁾は数時間後の血圧を示している。したがって、血圧の変化は水浸条件に応じて変わる可能性もある。一方、本研究では5分後に心拍数と同時に収縮期及び拡張期血圧が低下した。これらの不一致の原因、及び中立水温における水浸が動脈圧受容体へ及ぼす影響については不明である。動物では、心房の限局した部分を伸展すると心拍数は増加し、心臓交感神経遠心性経路の活動が増大するが、心房圧を上昇させるような他の心肺受容体の刺激操作では心拍数は減少するとされている²⁹⁾。したがって、ヒトに Bainbridge reflex が存在しないとすればなおのこと、たとえ動脈圧受容体が刺激されなくても、中心静脈圧の上昇による心肺受容体の伸展によって、交感神経系活動の低下ないし副交感神経系活動の亢進が生じる可能性がある。

本研究では水温25℃及び30℃における水浸でも、中立水温における水浸と同様に心臓交感神経系活動の抑制と副交感神経系活動の亢進が生じることを示唆した。水の熱伝導率は高いので、安静時の水浸中に皮膚温を一定に保つことができる水温域は28℃～35℃であるとされ³⁰⁾、それ以下の水温では熱伝導により皮膚温及び深部温が低下する³¹⁾。低水温の水浸中における体温調節機構としては、ふるえによる熱産生や皮下脂肪の役割が大きい³¹⁾、皮膚の冷覚刺激により交感神経系活動が亢進すれば、体表の血管収縮により熱放出を減少させ、あるいはふるえ以外の熱産生を高めるように働く可能性が考えられる⁷⁾。実際に、水温21℃、27℃、及び33℃における10分間の安静水平位水浸中に血中ノルアドレナリン濃度が上昇するという Weiss らの報告⁷⁾、あるいは水温25℃における10分間の頸部までの安静長座位水浸後に尿中ノルアドレナリン排泄量の増加が認められるという阿岸の報告⁸⁾があり、中立水温以下における短時間の水浸で交感神経系活動が亢進することが示されている。Weiss らの水浸は水平位で行われているので、水圧の影響が少なく、冷覚刺激の効果が優位となる可能性も考えられるが、阿岸の水浸は本研究と同じく両下肢を前方に伸展した長座位である。ただし、これらの研究は本研究とは

異なり, 血中カテコラミン濃度あるいは尿中カテコラミン排泄量により交感神経系活動の変化を総和として観察したものである。すなわち, 中立水温以下の短時間の水浸中に, 本研究からは心臓交感神経系活動が抑制した可能性が示唆されるが, 一方では, 皮膚等の血流を調節する交感神経系活動が亢進したために, 総和としては血中カテコラミンが上昇したと考えられる。ただし, 水浸中に生じる交感神経系活動水準の変化の方向が各臓器や皮膚等で異なるということが起こり得るかという疑問は残る。また, LF はこれ自体が全身の血圧調節リズムに基づく心拍の変動を表わす指数であり, 心臓自律神経機能の活動水準のみを反映するとしてよいのかという疑問も残る。しかし, 阿岸らの研究では⁸⁾, 同時に測定された血漿レニン活性は水浸後に低下する傾向を示した。腎からのレニン分泌の一部は交感神経系により調節されるはずである。また, 心エコー図により水温25℃及び30℃における水浸中の心機能を評価した永浜らの研究でも¹⁰⁾, 中立水温における水浸と同様に心拍数と心筋の基礎収縮力の有意の低下を認め, 間接的に心臓交感神経活動の低下を示唆している。したがって, 体表の血管等への交感神経系活動水準は亢進するが, 心臓あるいは腎臓への交感神経系活動は低下している可能性が否定できない。

永浜らは¹⁰⁾, 心エコー図と同時に心電図 R-R 間隔の変動係数を用い, 水浸中に有意な心臓副交感神経系活動の変化は生じなかったと結論づけている。連続100心拍における心電図 R-R 間隔の変動率として求める心拍変動係数は, 副交感神経活動の評価法として特異性が低いとされ¹¹⁾, 本研究で得られた結果から推測すると, スペクトル解析法に比べて感度も低い可能性が考えられる。低水温における体表の血流減少により中心血液量が増大すれば, 心臓交感神経系活動のみならず, 心臓副交感神経系活動への影響が増大することはあっても減少することはないであろう。実際, 永浜らの研究は¹⁰⁾, 水浸による左心容積及び1回拍出量の増大は, 中立水温よりも水温25℃及び30℃における水浸中の方が大きいことを示してい

る。また, 前述の Weiss らの研究で⁷⁾, 血圧は27℃の水浸中に有意に上昇し, 本研究においても水温25℃における水浸中に血圧が有意に上昇した。しかも, 本研究では HF 及び LF/HF の変化率と血圧の変化率の間には相関関係があることが示された。このことは, 水温25℃における水浸中には, 中心血液量の増大による圧受容体を介する反射が心臓自律神経活動に影響を及ぼし, その結果として心臓交感神経系の活動水準の低下と心臓副交感神経系活動の亢進が生じたことを推測させる。

水浸中の心臓自律神経系活動の経緯をみると, 交感神経系活動の水準には大きな変動はないが, 副交感神経系活動をあらわす HF は, いずれの水温においても水浸0~5分に最も上昇し, その後は水浸前の値に回復する傾向が見られた。また, 水浸中の値には水温間で統計学的に有意の差は認められなかったが, 水温が低いほど変化が著しい傾向がある。自覚的温度感覚及びその経緯も似たような傾向を示すことから (Fig. 7), 水浸直後の冷覚刺激による反応である可能性も考えられる。水温25℃において, 水浸直後の5分間での変化がとくに大きかった者が見られたので HF の変化率と自覚的温度感覚及び体脂肪率との関連を検討したが, 有意の相関関係は認められなかった。

水温25℃で HF に非常に大きな変化を示した者がいたが, 比較的低い水温においては水浸直後にこのように急激な反応を生じる者もいることに留意すべきであろう。一般に, 心臓交感神経系活動の抑制と副交感神経系活動の亢進は, 心臓の被刺激性を低下させ, 不整脈の発生等の危険性を減少させると考えられる。しかし, 副交感神経末端から分泌される伝達物質であるアセチルコリンは正常な冠動脈を拡張させるが, 粥状硬化のある動脈では拡張作用が障害されること³²⁾, さらに, 中高年者の大多数で, 狭窄の認められない冠動脈でもアセチルコリンの注入により攣縮が誘発されること等が報告されている³⁾。本研究から示唆される副交感神経系活動の亢進が冠動脈の攣縮を誘発する程度のものであるか否かは, 今後の検討を待たなければならない。しかし, Yasue らは³³⁾, カテコラミンによる β 受容体刺激は冠動脈の攣縮

による異型狭心症発作を誘発しないが、 α 受容体刺激が発作を誘発することを示し、さらにその発作の程度は安静時の副交感神経系活動水準が高いほど激しい可能性を示唆している。したがって、水浸直後に副交感神経系活動水準が非常に高くなる者では、運動の開始により交感神経系活動が亢進する際に、冠動脈の攣縮が生じやすくなる可能性を考慮しなければならない。競泳のように、主に若年者が激しい運動を行う場合は、運動中の体温上昇等を考慮してプールの水温は低めに設定することが適切かもしれない³¹⁾。しかし、中高年者や冠動脈疾患等を有する者が、健康運動や運動療法として水中運動を安全に行う場合の水温については、今後さらに検討する必要があるだろう。とくに、本研究の対象者は若年男性のみであるが、今後は中高年者や有病者における水浸中の心臓自律神経系活動についての検討を行う必要があると思われる。

V. 結 論

本研究では安静水浸中の心臓自律神経系活動水準を心拍変動パワースペクトル解析を用いて検討した。

中立水温(34℃)及び通常のプールに用いられる水温(25℃, 30℃)における腋下までの15分間の安静長座位水浸中は、水浸前に比べて、心拍数の減少、心拍変動パワースペクトル高周波成分(HF)の上昇、及び低周波成分と高周波成分との比(LF/HF)の低下が認められた。したがって、通常のプールに用いられる水温における15分程度の安静水浸中には、心臓副交感神経活動の亢進と心臓交感神経系活動の抑制が生じることが示唆された。また、水浸中の自律神経活動水準には、水温による大きな差異はないが、低水温では水浸直後に大きな反応を示す者が認められた。

本研究により得られた成績から、健康運動や運動療法としての水中運動の安全性に関し、自律神経活動の面からさらに検討を続ける必要があると思われる。

(受理日 平成8年10月24日)

参 考 文 献

- 1) Martin, G. J., Magid, N. M., Myers, G., Barnett, P. S., Schaad, J. W., Weiss, J. S., Lesch, M. and Singer, D. H.: Heart rate variability and sudden death secondary to coronary artery disease during ambulatory electrocardiographic monitoring. *Am. J. Cardiol.* (1987), **60**: 86-89
- 2) Kleiger, R. E., Miller, J. P., Bigger, J. T. Jr., Moss, A. J. and the Multicenter post-infarction research group: Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction. *Am. J. Cardiol.* (1987), **59**: 256-262
- 3) Yasue, H., Matsuyama, K., Matsuyama, K., Okumura, K., Morikami, Y. and Ogawa, H.: Responses of angiographically normal human coronary arteries to intracoronary injection of acetylcholine by age and segment. Possible role of early coronary atherosclerosis. *Circulation* (1990), **81**: 482-490
- 4) Craig, A. B. Jr. and Dvorak, M.: Thermal regulation during water immersion. *J. Appl. Physiol.* (1966), **21**: 1577-1585
- 5) 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.* (1983), **56**: 998-1002
- 6) O'Hare, J. P., Roland, J. M., Gooding, J., Payne, B., Walters, G. and Corral, R. J. M.: Plasma catecholamine levels during water immersion in man. *Horm. Metabol. Res.* (1986), **18**: 713-716
- 7) Weiss, M., Hack, F., Stehle, R., Pollert, R. and Weicker, H.: Effects of temperature and water immersion on plasma catecholamines and circulation. *Int. J. Sports Med.* (1988), **9**: 113-117 supplement
- 8) 阿岸祐幸: 温度刺激によるホルモン動態. *最新医学* (1977), **32**: 1818-1821
- 9) Begin, R., Epstein, M., Sackner, M. A., Levinson, R., Dougherty, R. and Duncan, D.: Effects of water immersion to the neck on pulmonary circulation and tissue volume in man. *J. Appl. Physiol.* (1976), **40**: 293-299
- 10) 永浜明子, 王文耀, 松田光生: 25度・30度水中浸漬が左心機能・左心容積および自律神経系に及ぼす影響. *いばらき健康・スポーツ科学* (1994), **11**: 11-17
- 11) 早野順一郎: 心拍変動の自己回帰スペクトル分析による自律神経機能の評価 - RR 間隔変動係数(CV-RR)との比較. *自律神経* (1988), **25**: 334-343
- 12) Akselrod, S., Gordon, D., Ubel, F. A., Shannon, D. C., Barger, A. C., and Cohen, R. J.: Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science* (1981), **213**: 220-222
- 13) Arai, Y., Saul, P., Albrecht, P., Hartley, L. H., Lilly, L. S., Cohen, R. J. and Colucci, W. S.: Modulation of

- cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *Am. J. Physiol.* (1989), **256**: H 132-141
- 14) Saul, J. P., Berger, R. D., Chen, M. H. and Cohen, R. J.: Transfer function analysis of autonomic regulation II. Respiratory sinus arrhythmia. *Am. J. Physiol.* (1989), **256**: H 153-161
 - 15) Pomeranz, B., Macaulay, R. J. B., Caudill, M. A., Kutz, I., Adam, D., Gordon, D., Kilborn, K.M., Barger, A. C., Shannon, D. C., Cohen, R. J. and Benson, H.: Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am. J. Physiol.* (1985), **248**: H 151-153
 - 16) 茂吉雅典, 横山清子, 渡辺興作, 高田和之, 向井誠時, 岡田暁宜, 早野順一郎: 新しい心拍変動パラメータによる tilt 試験に対する自律神経反応の分析. *医用電子と生体工学* (1996), **34**: 161-170
 - 17) Hayano, J., Mukai, S., Sakakibara, M., Okada, A., Takata, K. and Fujinami, T.: Effects of respiratory interval on vagal modulation of heart rate. *Am. J. Physiol.* (1994), **267**: H 33-40
 - 18) 木住野孝子, 永浜明子, 笹川克美, 松田光生: 静水浴及び動水浴が心拍変動に及ぼす影響. *日温気物医誌* (1996), **59**: 175-183
 - 19) Hirsch, J. A. and Bishop, B.: Respiratory sinus arrhythmia in humans: how breathing pattern modulates heart rate. *Am. J. Physiol.* (1981), **241**: H 620-629
 - 20) Brown, T. E., Beightol, L. A., Koh, J. and Eckberg, D. L.: Important influence of respiration on human R-R interval power spectra is largely ignored. *J. Appl. Physiol.* (1993), **75**: 2310-2317
 - 21) 藤澤宏幸, 大塚吉則, 藪中宗之, 阿岸祐幸: 水浸時呼吸調節における水温の影響. *日温気物医誌* (1995), **58**: 109-114
 - 22) Norsk, P., Bonde-Petersen, F. and Christensen, N. J.: Catecholamines, circulation, and the kidney during water immersion in humans. *J. Appl. Physiol.* (1990), **69**: 479-484
 - 23) 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.* (1994), **77**: 2832-2839
 - 24) 永浜明子, 松田光生: 水中浸漬が左心機能・左心容積に及ぼす影響. *いばらき体育・スポーツ科学* (1992), **7**: 22-27
 - 25) Gabrielsen, A., Johansen, L. B. and Norsk, P.: Central cardiovascular pressures during graded water immersion in humans. *J. Appl. Physiol.* (1993), **75**: 581-585
 - 26) Arborelius, M. Jr., Baldin U. I., Lilja, B. and Lundgren, C. E. G.: Hemodynamic changes in man during immersion with the head above water. *Aerosp. Med.* (1972), **43**: 592-598
 - 27) Farhi, L. E. and Linnarsson, D.: Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35°C. *Resp. Physiol.* (1977), **30**: 35-50
 - 28) Rowell, L. B.: *Human Cardiovascular Control*. New York: Oxford Univ. Press (1993)
 - 29) Hainsworth, R.: Reflexes from the heart. *Physiol. Rev.* (1991), **71**: 617-658
 - 30) Harrison, M. H., Edwards, R. J., Cochrane, L. A. and Graveney, M. J.: Blood volume and protein responses to skin heating and cooling in resting subjects. *J. Appl. Physiol.* (1983), **54**: 515-523
 - 31) Nadel, E. R., Holmer, I., Bergh, U., Åstrand, P. -O. and Stolwijk, J. A. J.: Energy exchanges of swimming man. *J. Appl. Physiol.* (1974), **36**: 465-471
 - 32) Bossaller, C., Habib, G. B., Yamamoto, H., Williams, C., Wells, S. and Henry, P. D.: Impaired Muscarinic endothelium-dependent relaxation and cyclic guanosine 5'-monophosphate formation in atherosclerotic human coronary artery and rabbit aorta. *J. Clin. Invest.* (1987), **79**: 170-174
 - 33) Yasue, H., Touyama, M., Shimamoto, M., Kato, H., Tanaka, S. and Akiyama, F.: Role of autonomic nervous system in the pathogenesis of Prinzmetal's variant form of angina. *Circulation* (1974), **50**: 534-539