

水泳選手の血液循環調節能力低下の科学的検証とトレーニング手法の開発
～自律神経活動特性及び血圧受容体反応性からの検討～

研究代表者:木村 哲也

目 次

1. 要約	1
2. 緒言	2
3. 方法	2
4. 結果	8
5. 考察	11
6. まとめ	12
7. 謝辞	13
8. 参考文献	13

水泳選手の血液循環調節能力低下の科学的検証とトレーニング手法の開発 ～自律神経活動特性及び血圧受容体反応性からの検討～

研究代表者 木村 哲也(立命館大学)

共同研究者 藤林 真美(京都大学)

共同研究者 馬場 貞行(京都大学)

1. 要約

本研究は、水中環境で水圧の影響を大きく受けると予測される血液循環調節に着目し、水泳選手の水中環境に対する適応について基礎的な検討を行うことを目的とした。複数の大学より、水泳部(競泳)に所属する健常男性 12 名(水泳選手群)、陸上部(トラック)に所属する健常男性 12 名(陸上選手群)に被験者として測定に協力を得た。また、コントロール群としてトレーニング習慣のない同年代の健常男性 12 名においても測定を実施した。被験者は、安静座位及び静止立位姿勢にて各 8 分間、心電図と毎拍血圧を記録した。そして各条件において、RR 間隔、収縮期血圧、拡張期血圧、脈圧、平均血圧の平均値、標準偏差(SD)及び変動係数(CV)を算出した。ゆらぎの動的な性質を検討するために、RR 間隔、収縮期血圧、拡張期血圧の時系列データに対して、両対数スペクトルを算出し、スペクトルの傾きである β 値を求めた。収縮期血圧と RR 間隔の両変数間の相互相関関数(CCF; cross correlation function)から、血圧制御システムの機能評価を試みた。その結果、特に圧調節機構の制御対象である動脈血圧に関して、安静座位及び静止立位時の収縮期血圧、脈圧の各 SD 値は、水泳選手において最も大きな値を示し、コントロール群及び陸上選手群との間に有意な差が認められた($p < 0.05$)。この結果は水泳選手がコントロール群及び陸上選手に比べて、圧調節機構の機能が低下している可能性を指摘している。さらに、心拍変動に関しても、水泳選手において最も大きな値を示した。これは、動脈血圧の大きな動揺に対して、さらに圧反射フィードバック機構の出力が高まっていることを反映したものであると考えられる。一方で、 β 値及び CCF に関しては一定の傾向は認められたものの有意な差は検出されなかった。圧調節機構の機能特性を決定する因子はその他多く存在するために断定することはできないが、本研究の血圧変動に関する結果は、競泳選手が特殊な水中環境(水圧による外部からの血液循環の促進効果が常に得られる環境)で長年トレーニングを続けてきたことにより、環境への適応として圧調節機構の感受性が低下している可能性を支持するものである。

代表者所属: 立命館大学スポーツ健康科学部
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

2. 緒言

循環調節は、生体各組織への血液供給を一定に保つために必要不可欠な調節機構である。圧反射 (Baroreflex) は血圧を常に一定に保ち、脳への血液供給の維持という重要な働きを持つ。一つの圧反射神経機構である動脈圧受容器反射では、頸動脈洞、大動脈弓の圧受容器で感知された制御対象である動脈血圧の変調が、舌咽神経、迷走神経をそれぞれ介してフィードバック信号として中枢に伝わり、心臓への迷走神経出力・交感神経出力の修飾、血管への交感神経出力の修飾が行われる [2, 10, 12]。そしてその際に、心拍数の変動、末梢血管抵抗の変動がもたらされる。このような血圧調節機構が十分に機能しない場合は、立位時等への急な体位変換時に血圧が激変し、めまいや立ち眩みを起こす。

近年、スポーツクラブの普及や公共プールの整備などにより、水中運動は幅広い年代の人々が生涯に渡り楽しむことのできる運動の一つとなった。また、ハード面以外にも、多くの人々が安全かつ効果的に運動効果を得られることが広く周知されていることも、水中運動が普及している理由と言える。水中環境では、浮力、水圧、抵抗が身体にかかることから、水中運動の利点として、①浮力により膝等の関節にかかる体重が軽減されること、②抵抗により全身に適切な負荷がかかること、③水圧により血液循環が促進されること、等が挙げられる [14]。特に、血液循環の促進に関しては、水圧により末梢の血管が圧迫されることから、静脈還流が高まることが期待される。このように、水中運動においては陸上とは異なる環境を上手く利用することにより、安全かつ効果的に運動効果を得ることができる。

一方で、視点を変えると、1日数時間の練習をほぼ毎日こなしている水泳選手の場合、水中トレーニングに励んでいる時間は絶えず水中環境に「暴露」されていると捉えることも可能である。特に水泳の場合、競技開始年齢が早い。すなわち、水泳経験の長い選手ともなると、水中環境への「暴露」に費やした時間は莫大なものになり、その結果として水中環境への何らかの身体システムの適応が起こっている可能性も否定できない。そこで、本研究では、水中環境で水圧の影響を大きく受けると予測される血液循環調節に着目し、水泳選手の水中環境に対する適応について基礎的な検討を行うことを目的とした。すなわち本研究は、特殊な水中環境(水圧による外部からの血液循環の促進効果が常に得られる環境)で長年トレーニングを続けてきたことにより、水泳選手の血液循環調節機能が何らかの変化を起こしているのではないかという仮説のもと、圧反射機構に関する評価を行い、同じく継続したトレーニングを行っている陸上選手、及び非トレーニング群との比較検討を行った。

3. 方法

3.1. 被験者

複数の大学より、水泳部(競泳)に所属する健常男性 12 名(水泳選手群)、陸上部(トラック)に所属する健常男性 12 名(陸上選手群)に被験者として協力を得た。各群の被験者のプロフィールは表 1 に示す通りである。また、コントロール群としてトレーニング習慣のない同年代の健常男性 12 名においても測定を実施した(年齢:19.5±1.0 yr、体重: 59.7±5.2 kg、身長:171.4±4.4 cm、平均値±標準偏差)。

Table 1. The characteristics of competitive swimmers (S1-S12) and runners (R1-R12).

ID	Age (yr)	Weight (kg)	Height (cm)	Practice	
				(day/wk)	(hr/day)
S1	19	77	182	6	5.0
S2	20	65	175	5	3.0
S3	20	75	179	6	4.0
S4	20	66	177	6	4.0
S5	20	62	168	6	2.0
S6	20	75	176	6	2.5
S7	19	62	172	6	2.3
S8	18	72	180	6	6.0
S9	18	85	181	6	2.0
S10	19	75	177	6	4.0
S11	21	75	182	6	4.0
S12	21	74	168	6	4.0
Mean	19.6	71.9	176.3	5.9	3.6
SD	1.0	6.9	4.9	0.3	1.2

ID	Age (yr)	Weight (kg)	Height (cm)	Practice	
				(day/wk)	(hr/day)
R1	21	60	172	7	3.5
R2	19	67	173	5	2
R3	20	58	174	7	2.5
R4	21	53	162	6	2
R5	20	58	174	5	3
R6	21	64	179	5	3
R7	21	65	179	5	4
R8	20	67	176	6	3
R9	21	60	169	6	3
R10	20	58	168	5	2
R11	19	50	165	6	2
R12	21	62	169	6	5
Mean	20.3	60.1	171.6	5.8	2.9
SD	0.8	5.2	5.3	0.8	0.9

喫煙習慣のある被験者は全ての群においていなかった。本研究の実施にあたっては、事前に京都大学大学院人間・環境学研究科人間情報・動物実験倫理委員会の承認を得た。また、本研究はヘルシンキ宣言に基づき実施した。全ての被験者は本研究の内容と目的に関して口頭及び文書で十分な説明を受けた後、インフォームドコンセントに署名をした。

3.2. 実験手法

日内変動を考慮し、全ての測定は午前中に実施した [6-8]。実験室に到着し、20 分間の安静後、被験者は、まず座位にて 8 分間、安静時の心電図と毎拍血圧の同時測定を実施した[3, 4, 16]。心電図生波形 (CM5) は差動増幅器 (BBA-8321, Biotex, Japan) にて増幅し、0.5-100Hz のバンドパスフィルタに通した。また、毎拍血圧はトノメトリ法 (JENTOW-7700, Colin, Japan) により左手橈骨動脈より計測した。心電図及び血圧の各アナログ出力は 12bit の A/D 変換器 (AD132, Elan, UK) により、1,000Hz のサンプリング周波数でコンピュータに保存した (図 1)。座位での測定終了後、被験者にはその場で静止立位姿勢を保ってもらい、さらに 8 分間の測定を実施した。座位と立位の測定の間隔は 1 分間とした。血圧の測定に際しては、左手の手首の高さが心臓の高さと一致するように測定装置を設定した。

3.3. 解析

3.3.1. 心拍・血圧変動の時間領域・周波数領域における定量化

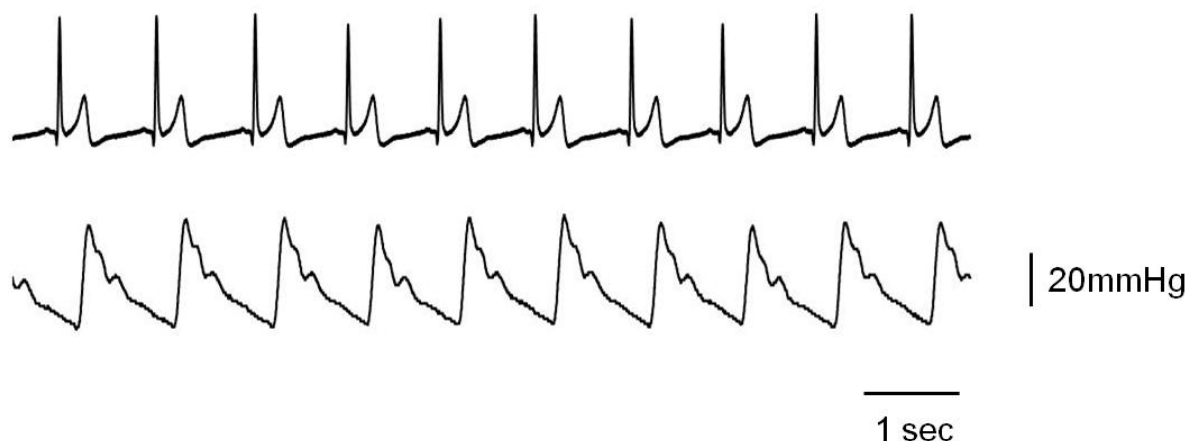
コンピュータプログラムにより、座位時及び立位時の各 8 分間の心電図波形から各 R 波を同定し、各 8 分間の RR 間隔時系列データを算出した (図 1)。また、各 R 波をトリガーとして抽出した各心拍における血圧生波形より、各心拍における収縮期血圧 (Systolic blood pressure, SBP)、拡張期血圧 (Diastolic blood pressure, DBP)、脈圧 (Pulse pressure, PP)、平均血圧 (Mean blood pressure, MBP) を算出した。尚、PP 及び MBP は以下の式より計算される。

$$PP_i = SBP_i - DBP_i$$
$$MBP_i = DBP_i + \frac{(SBP_i - DBP_i)}{3}$$

ここで、変数 x に対して、 x_i は i 番目の心拍における各変数の値を示している。このように、RR 間隔と同様に SBP、DBP、PP、MBP の 8 分間の時系列データを得た (図 1)。これら時系列データを基に、RR 間隔、SBP、DBP、PP、MBP の座位、立位時、各 8 分間の変動に対して平均値、標準偏差 (SD) 及び変動係数

(CV)を算出した[1, 4, 9]。さらに、ゆらぎの動的な性質を検討するために、RR 間隔、SBP、DBP の時系列データに対して、両対数スペクトルを算出し、スペクトルの傾きである β 値を求めた [11]。スペクトルの算出には離散フーリエ変換を用いたため、各時系列データは 2Hz の等間隔時系列データに変換した。

(a)



(b)

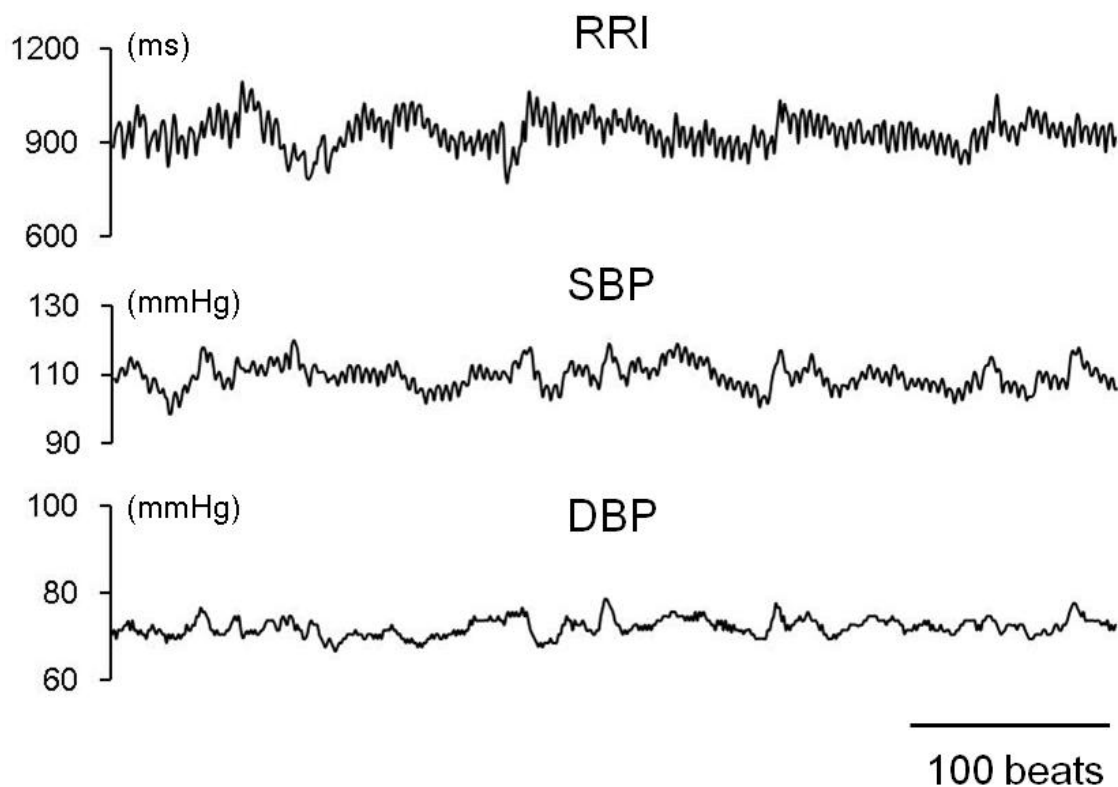


Fig. 1. Example of the ECG and beat-by-beat blood pressure simultaneously recorded during sitting on the chair (a), and the time-series data of RR interval (RRI), SBP, and DBP for 480 sec, plotted as a function of heart beat (b). In figure (a), only 10 sec data is indicated for visual purpose.

3.3.2. 圧反射の機能評価

動脈圧受容器反射は、圧受容器からフィードバックされた動脈血圧の上昇が中枢に伝わり、RR 間隔や末梢血管抵抗が動脈血圧を調節するために変化する。すなわちこの一連の神経制御機構は、動脈血圧を入力、RR 間隔、末梢血管抵抗を出力としたシステムと見なすことができる。そこで、SBP と RR 間隔の両変数間の相互相関関数 (CCF; cross correlation function) から、このフィードバックシステムの機能評価を試みた。両変数間の CCF 解析を行うために、座位時、立位時各 8 分間の SBP と RR 間隔の各時系列データを、2Hz の等間隔時系列データに変換した。得られた 2Hz の SBP と RR の時系列データ間で相互相関係数を算出した。2 変数 $x(t)$ 、 $y(t)$ に関する CCF ($C_{xy}(\tau)$)、及び相互相関係数 $R_{xy}(\tau)$ は以下の式で定義される [15]。

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t) y(t + \tau)}$$
$$R_{xy}(\tau) = C_{xy}(\tau) / \left(\sqrt{x^2} \sqrt{y^2} \right)$$

ここで τ は両変数間の時間ずれである。SBP を入力とし、RR 間隔を出力としたシステムを前提としているため、本研究では、 τ を SBP に対する RR 間隔の時間遅れとし、0 秒 $\leq \tau \leq$ 30 秒の範囲での R_{xy} の最大値から、両変数間の時空間的関連性を定量化し、フィードバック制御システムの評価指標とした (図 2)。さらに、 R_{xy} が最大値になる時間ずれを各 CCF に対して算出した。

3.3.3. 統計

水泳選手群、陸上選手群、コントロール群間の各指標の比較は、1 元配置分散分析及び Tukey 法による多重比較を用いて行った。有意水準は 5% とした。尚、本文、図表におけるデータは平均値及び標準偏差で示した。

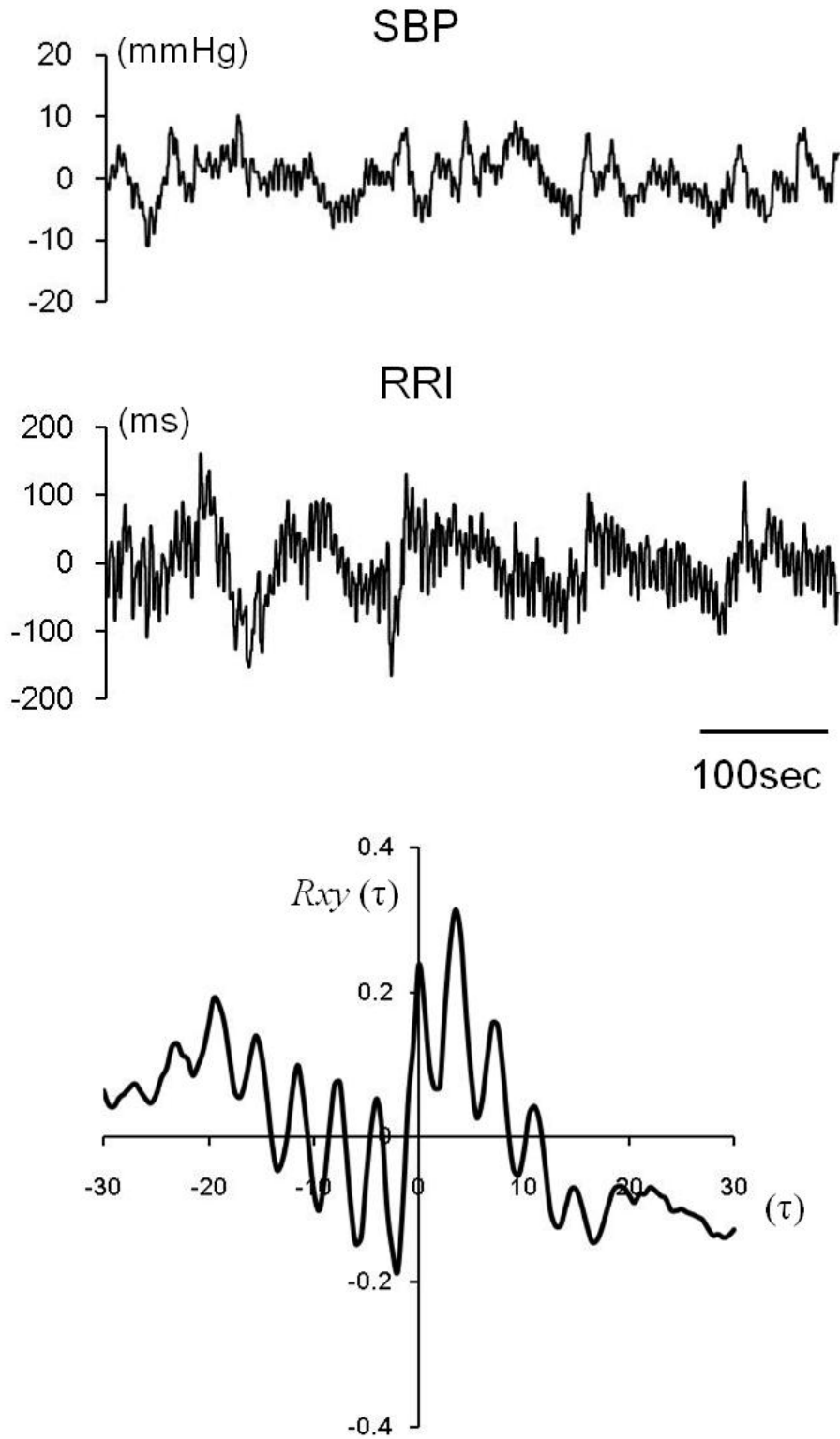


Fig. 2. Example of the CCF analysis between SBP and RRI during sitting on the chair. The sequences of SBP and RRI were converted to the 2-Hz time-series data, and were passed through the DC component removal, prior to the CCF analysis.

4. 結果

4.1. 心拍・血圧変動の時間領域・周波数領域における評価(座位時)

図3に、座位における各被験者群のRR間隔・SBPの時系列データの典型例を示した。両群ともにRR間隔及びSBPにゆらぎが認められるものの、ゆらぎの大きさはRR間隔、SBPともに水泳選手で大きいことがわかる。

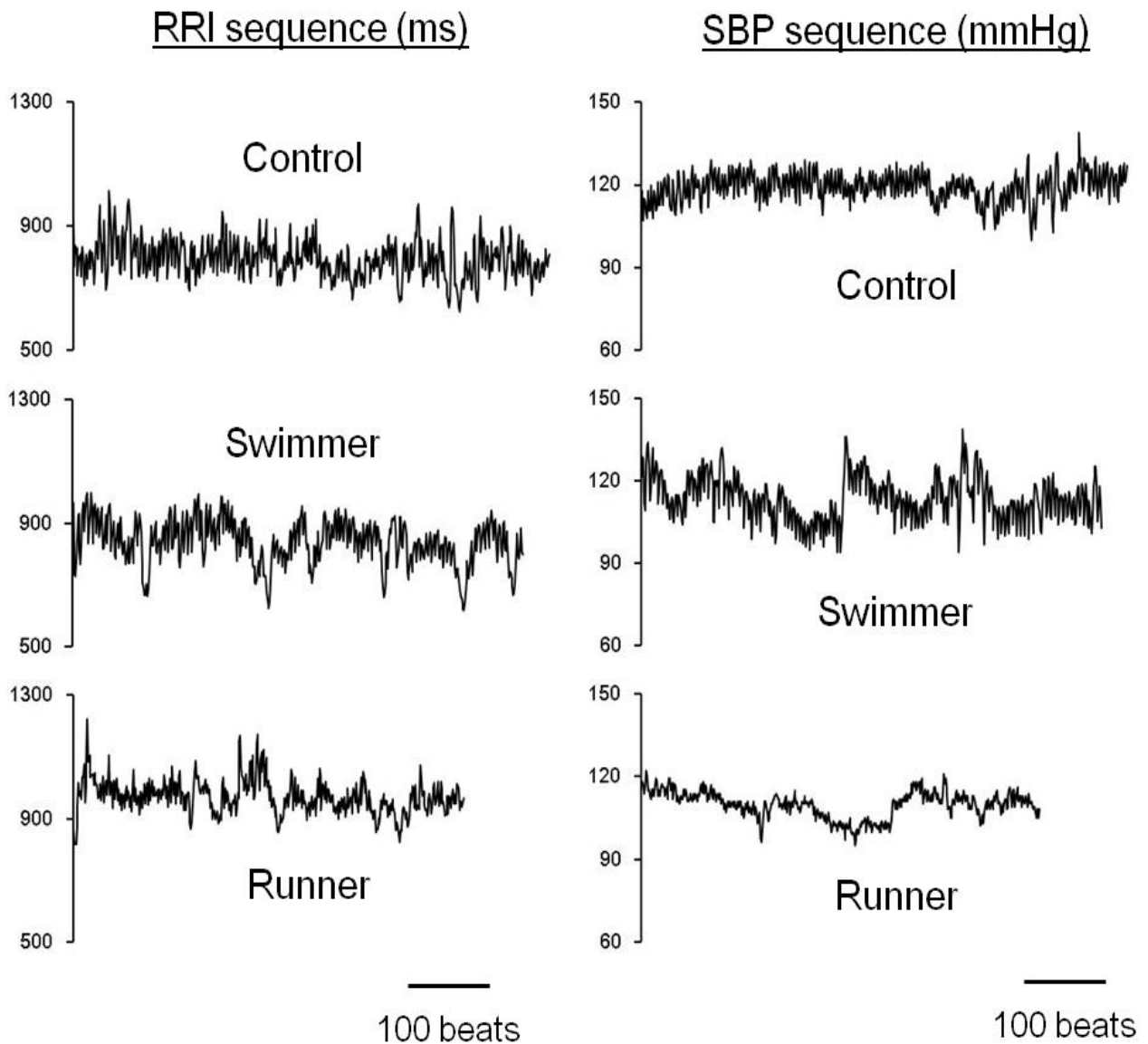


Fig. 3. Typical examples of the sequences of RRI and SBP of control subject, swimmer, and runner. Data are plotted as a function of heartbeat.

表 2 に各群(水泳選手群、陸上選手群、コントロール群)の座位における RR 間隔、SBP、DBP、脈圧、MBP の平均値(Mean)、SD 値、CV 値の平均値及び RR 間隔、SBP、DBP の両対数スペクトルの傾き β の結果を示した。平均値(Mean)に関して、SBP、脈圧は水泳選手群において陸上選手群よりも有意に高い値を示した($p < 0.05$)。SD 値に関しては、すべての変数において水泳選手群で高い値を示し、DBP を除いた RR 間隔、SBP、脈圧、MBP において有意な差が認められた($p < 0.05$)。さらに、CV においても水泳選手群において高い値が見られ、脈圧において水泳選手群と陸上選手群との間に有意な差が認められた($p < 0.05$)。一方で両対数スペクトルの傾き β に、有意差は認められなかった。

Table 2. Group data of Mean, SD, and CV for each of RRI, SBP, DBP, PP, and MBP, and of β for RRI, SBP, and DBP during sitting condition.

		Control	Swimmer		Runner
Mean	RRI (ms)	874.6 $\pm$ 124.9	969.2 $\pm$ 106.7		984.8 $\pm$ 131.3
	SBP (mmHg)	111.2 $\pm$ 9.7	117.8 $\pm$ 15.4	☆	104.3 $\pm$ 7.9
	DBP (mmHg)	57.5 $\pm$ 7.4	58.1 $\pm$ 11.0		54.8 $\pm$ 7.9
	PP (mmHg)	53.7 $\pm$ 9.8	59.7 $\pm$ 8.8	☆	49.5 $\pm$ 6.5
	MBP (mmHg)	75.4 $\pm$ 6.9	78.0 $\pm$ 12.0		71.3 $\pm$ 7.3
SD	RRI (ms)	49.7 $\pm$ 10.8	79.8 $\pm$ 19.9	★	67.0 $\pm$ 26.7
	SBP (mmHg)	6.7 $\pm$ 2.4	7.5 $\pm$ 1.9	☆	5.0 $\pm$ 1.6
	DBP (mmHg)	3.9 $\pm$ 1.3	5.2 $\pm$ 1.7		3.8 $\pm$ 1.1
	PP (mmHg)	4.5 $\pm$ 1.1	6.1 $\pm$ 1.7	★★☆	3.8 $\pm$ 1.0
	MBP (mmHg)	4.5 $\pm$ 1.7	5.4 $\pm$ 1.4	☆	3.9 $\pm$ 1.2
CV	RRI (%)	5.7 $\pm$ 1.0	8.3 $\pm$ 1.9	★	6.7 $\pm$ 2.1
	SBP (%)	6.1 $\pm$ 2.5	6.4 $\pm$ 1.6		4.8 $\pm$ 1.5
	DBP (%)	7.1 $\pm$ 2.8	8.9 $\pm$ 1.9		7.2 $\pm$ 2.9
	PP (%)	8.6 $\pm$ 2.2	10.2 $\pm$ 2.5	☆	7.5 $\pm$ 1.4
	MBP (%)	6.2 $\pm$ 2.6	6.9 $\pm$ 1.4		5.5 $\pm$ 2.0
β	RRI	1.34 $\pm$ 0.28	1.23 $\pm$ 0.35		1.42 $\pm$ 0.39
	SBP	1.65 $\pm$ 0.41	1.67 $\pm$ 0.33		1.53 $\pm$ 0.35
	DBP	1.84 $\pm$ 0.25	1.69 $\pm$ 0.30		1.64 $\pm$ 0.24

★ $p < 0.05$ vs. control, ☆ $p < 0.05$ vs. runner, values are mean $\pm$ SD.

Table 3. Group data of mean, SD, and CV for each of RRI, SBP, DBP, PP, and MBP, and of β for RRI, SBP, and DBP during standing condition.

		Control	Swimmer		Runner
Mean	RRI (ms)	717.1 $\pm$ 104.8	796.2 $\pm$ 108.2		826.0 $\pm$ 103.6
	SBP (mmHg)	106.3 $\pm$ 16.6	119.5 $\pm$ 19.9	☆	99.0 $\pm$ 15.8
	DBP (mmHg)	60.9 $\pm$ 10.5	64.6 $\pm$ 12.4		54.5 $\pm$ 14.7
	PP (mmHg)	45.4 $\pm$ 10.5	54.8 $\pm$ 10.7	☆	44.5 $\pm$ 5.3
	MBP (mmHg)	76.0 $\pm$ 11.8	82.9 $\pm$ 14.5		69.3 $\pm$ 14.9
SD	RRI (ms)	44.6 $\pm$ 14.6	67.4 $\pm$ 20.1	★	56.6 $\pm$ 21.3
	SBP (mmHg)	6.6 $\pm$ 2.0	9.0 $\pm$ 2.2	★★☆	6.1 $\pm$ 2.7
	DBP (mmHg)	4.2 $\pm$ 1.6	5.7 $\pm$ 1.9		4.4 $\pm$ 1.8
	PP (mmHg)	4.2 $\pm$ 1.0	6.2 $\pm$ 1.7	★★☆	4.3 $\pm$ 1.9
	MBP (mmHg)	4.7 $\pm$ 1.7	6.3 $\pm$ 2.0		4.5 $\pm$ 2.0
CV	RRI (%)	6.2 $\pm$ 1.7	8.8 $\pm$ 3.8		6.7 $\pm$ 1.8
	SBP (%)	6.5 $\pm$ 3.0	7.7 $\pm$ 2.2		6.4 $\pm$ 3.1
	DBP (%)	7.2 $\pm$ 3.4	9.3 $\pm$ 4.5		9.2 $\pm$ 6.3
	PP (%)	9.6 $\pm$ 3.0	11.8 $\pm$ 4.9		9.8 $\pm$ 3.9
	MBP (%)	6.5 $\pm$ 3.2	7.8 $\pm$ 3.2		7.0 $\pm$ 3.7
β	RRI	1.77 $\pm$ 0.19	1.90 $\pm$ 0.45		1.81 $\pm$ 0.45
	SBP	1.64 $\pm$ 0.24	1.59 $\pm$ 0.26		1.53 $\pm$ 0.35
	DBP	1.79 $\pm$ 0.20	1.66 $\pm$ 0.30		1.73 $\pm$ 0.21

★ $p < 0.05$ vs. control, ☆ $p < 0.05$ vs. runner, values are mean $\pm$ SD.

4.2. 心拍・血圧変動の時間領域・周波数領域における評価(立位時)

表 3 に各群(水泳選手群、陸上選手群、コントロール群)の立位時における RR 間隔、SBP、DBP、脈圧、MBP の平均値(Mean)、SD 値、CV 値の結果を示した。平均値(Mean)に関して、座位での結果と同様に SBP、脈圧において水泳選手群において陸上選手群よりも有意に高い値を示した($p < 0.05$)。SD 値に関しては、すべての変数において水泳選手群で高い値を示し、RR 間隔、SBP、脈圧において有意な差が認め

られた($p < 0.05$)。一方で、CV においても水泳選手群において高い値を示す傾向が見られたが、有意差は認められなかった。また、表 3 には両対数スペクトルの傾き β の結果も示した。水泳選手群では、座位時と比較した立位時の RR 間隔の β 値がより増加する傾向、すなわち心拍の制御が不安定化している傾向 [11]が認められたが、有意差には至らなかった。

4.3. 圧受容器反射感受性の評価

表 4 に各群(水泳選手群、陸上選手群、コントロール群)の CCF 解析の結果を示した。相互相関係数の最大値は、コントロール群に比べ、水泳選手群、陸上選手群で低い値を示し、時間遅れも水泳選手群と陸上選手群で大きい傾向を示したが有意差には至らなかった。

Table 4. Results of the CCF analyses between SBP and RRI in sitting and standing conditions.

		Control	Swimmer	Runner
Sitting	Rxy peak	0.31 $\pm$ 0.18	0.19 $\pm$ 0.21	0.22 $\pm$ 0.20
	Phase (sec)	4.3 $\pm$ 9.2	9.2 $\pm$ 12.6	8.8 $\pm$ 12.1
Standing	Rxy peak	0.34 $\pm$ 0.20	0.25 $\pm$ 0.24	0.23 $\pm$ 0.21
	Phase (sec)	5.9 $\pm$ 9.2	10.5 $\pm$ 13.4	8.3 $\pm$ 12.5

Values are mean $\pm$ SD.

5. 考察

競技経験の長い競泳選手は、これまでに水中環境でのトレーニングに費やした時間は莫大なものである。水中環境は主に水圧、抵抗、浮力が働く特殊な環境である[14]。従って、競泳選手は長期間における水中環境での活動によって、水中環境への何らかの身体システム適応が起こっている可能性が予測される。そこで本研究では、水中環境で水圧の影響を大きく受けると予測される血液循環調節に着目し、水泳選手の血液循環調節機能が何らかの変化を起こしているのではないかという仮説のもと、水泳選手における心臓自律神経活動と圧反射感受性の測定を行い、同年代の陸上選手及び非トレーニング群との比較検討を行った。その結果、特に圧調節機構の制御対象である収縮期血圧に関して、水泳選手は有意に大きな変動

を示した(表 2, 3)。圧調節機構の目的は、動脈血圧を一定に保つことである。従って、この結果はコントロール群及び陸上選手群に比べて、水泳選手群の圧調節機構の機能が低下している可能性を指摘している。また、水泳選手群において見られた有意に大きな心拍変動は、動脈血圧の大きな動揺に対して、さらに圧反射フィードバック機構の出力が高まっていることを反映したものであると考えられる。圧調節機構の機能特性を決定する因子はその他多く存在するために断定することはできないが、本研究の結果は、競泳選手が特殊な水中環境(水圧による外部からの血液循環の促進効果が常に得られる環境)で長年トレーニングを続けてきたことにより、環境への適応として圧調節機構の感受性が低下しているという仮説を支持するものである。また、この結果は、競泳選手が起立性低血圧を発症することが多いと経験的に考えられていることとも合致している。これに関係する知見として、Ogawa ら[5]は、長期間の水泳経験による脊髄反射の興奮性の適応について検討を行っている。彼らは、10 年以上のキャリアを持つ水泳選手と日常的にトレーニングを行っていない被験者との間で、ヒラメ筋における伸張反射及び H 反射を比較検討した。その結果、水泳選手では、伸張反射及び H 反射の振幅が有意に大きいことが明らかとなった。この結果に対して、水中環境での長年の運動に対する脊髄の適応ではないかと推察されている [13]。

本研究では圧反射の入出力特性に着目し、主に時間領域において検討を行った。しかしながら、圧反射システムに含まれる圧受容器や神経系の生理学的特性の検証、さらには内分泌系への検証等から、水泳選手における循環調節機構の水中環境に対する生理学的適応がより体系的に明らかになることが期待される。その結果、仮にその生理学的適応がレース時における最大パフォーマンスの制限因子、あるいはコンディショニングを決定する重要な変数の一つとなっていれば、水中環境への生理学的適応に対処するための、新たなトレーニング計画(立位姿勢での陸上トレーニング等)の導入といった現場へのアプローチが可能になると期待される。

6. まとめ

本研究は、水泳選手における心臓自律神経活動と圧反射感受性に関して、同年代の陸上選手及び非トレーニング群との比較検討を行った。その結果、水泳選手群はコントロール群及び陸上選手群に比べて、圧調節機構の機能が低下している可能性が示唆された。すなわち、競泳選手が、水圧による外部からの血液循環の促進効果が常に得られる水中環境で長年トレーニングを続けてきたことにより、環境適応として圧調節機構の感受性が低下しているという仮説を、この結果は支持するものである。

7. 謝辞

本研究の実施に対して助成を賜りました、財団法人上月スポーツ・教育財団に深く感謝申し上げます。
また、測定にご協力いただいた被験者の皆さまにこの場をお借りして感謝申し上げます。さらに、研究の実施にご協力・ご助言をいただいた、中京大学の高橋繁浩氏、川越大樹氏、立命館大学の津乗明子氏、京都大学の森谷敏夫氏、木下量平氏、川上淳氏に心より感謝申し上げます。

8. 参考文献

- [1] Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, *Circulation*. 93 (1996) 1043-1065.
- [2] I. Hidaka, D. Nozaki, Y. Yamamoto, Functional stochastic resonance in the human brain: noise induced sensitization of baroreflex system, *Phys Rev Lett*. 85 (2000) 3740-3743.
- [3] T. Kimura, N. Kameda, T. Moritani, Impact of phase difference between cardiac systole and skeletal muscle contraction on hemodynamic response during electrically-induced muscle contractions, *J Electromyogr Kinesiol*. 20 (2010) 572-579.
- [4] T. Kimura, T. Matsumoto, M. Akiyoshi, Y. Owa, N. Miyasaka, T. Aso, T. Moritani, Body fat and blood lipids in postmenopausal women are related to resting autonomic nervous system activity, *Eur J Appl Physiol*. 97 (2006) 542-547.
- [5] T. Ogawa, G.H. Kim, H. Sekiguchi, M. Akai, S. Suzuki, K. Nakazawa, Enhanced stretch reflex excitability of the soleus muscle in experienced swimmers, *Eur J Appl Physiol*. 105 (2009) 199-205.
- [6] G. Parati, M. Di Rienzo, G. Bertinieri, G. Pomidossi, R. Casadei, A. Groppelli, A. Pedotti, A. Zanchetti, G. Mancia, Evaluation of the baroreceptor-heart rate reflex by 24-hour intra-arterial blood pressure monitoring in humans, *Hypertension*. 12 (1988) 214-222.
- [7] G. Parati, M. Di Rienzo, G. Mancia, How to measure baroreflex sensitivity: from the cardiovascular laboratory to daily life, *J Hypertens*. 18 (2000) 7-19.
- [8] G. Parati, A. Frattola, M. Di Rienzo, P. Castiglioni, A. Pedotti, G. Mancia, Effects of aging on 24-h dynamic baroreceptor control of heart rate in ambulant subjects, *Am J Physiol*. 268 (1995) H1606-1612.

- [9] L.M. Ueno, T. Moritani, Effects of long-term exercise training on cardiac autonomic nervous activities and baroreflex sensitivity, *Eur J Appl Physiol.* 89 (2003) 109-114.
- [10] 照井直人, 循環系の調節. In: 小澤澪司, 福田康一郎, 本間研一, 大森治紀, 大橋俊夫 (Eds.), 標準生理学, 医学書院, 2009, pp. 617-626.
- [11] 政二慶, 運動とゆらぎ. In: 金子公有, 福永哲夫 (Eds.), バイオメカニクス: 身体運動の科学的基礎, 杏林書院, 2004, pp. 97-103.
- [12] 相馬りか, 山本義春, 生体におけるゆらぎの効用. In: 山本光璋, 鷹野致和 (Eds.), ゆらぎの科学と技術, 東北大学出版会, 2004, pp. 199-212.
- [13] 中澤公孝, 歩行のニューロリハビリテーション, 杏林書院, 2010.
- [14] 日本水泳連盟, 水泳指導教本, 大修館書店, 2009.
- [15] 日野幹雄, スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.
- [16] 馬場貞行, 木村哲也, 神崎素樹, 森谷敏夫, 脊髄反射と血圧変動の相互相関に関する検証. 第 11 回日本電気生理運動学会大会抄録集, 2009.