

[論文]

入浴中の心拍変動と快適度

吉村 拓巳*, 田村 俊世, 長 篤志*,
中島 一樹*, 三池 秀敏*, 戸川 達男

Heart Rate Variability during Bathing and Comfort of Bathing

Takumi YOSHIMURA, Toshiyo TAMURA*, Atsushi OSA,
Kazuki NAKAJIMA, Hidetoshi MIIKE, Tatsuo TOGAWA*

Abstract

Heart rate was monitored during bathing using electrocardiographic electrodes attached to the bathtub wall, allowing the electrocardiogram (ECG) to be obtained noninvasively. The surface ECG was measured before and after bathing. Heart rate variability in ten normal subjects was analyzed before, during and after bathing. Power spectral analysis was performed, and the results showed 1/f fluctuations. The spectral peaks were analyzed and the ratio of the low (LF) and high (HF) frequency components was evaluated before, during and after bathing. Although the subjects felt comfortable, the ratio of LF and HF was increased, indicating an increase of sympathetic nervous activity. During bathing, the rise in heart rate resulted from both the hydrostatic counter-pressure and the effect of body heating.

Key words: Heart rate variability / Sympathetic / Parasympathetic / Power spectrum analysis / Bathing

1. はじめに

入浴は、日本人の特有の習慣で、適度の入浴は末梢循環を改善し、血圧を下降させる働きを有する。しかしながら、生理的には、全身の温熱負荷であり、湯につかることによる静水圧の影響と体温上昇により心拍出量の増加と心拍数の上昇を伴う。この心拍数の上昇と入浴の快適さにはどのような関係がみられるか心拍数の変動を解析することにより検討した。

心拍数は、安静状態であっても、ある一定のゆらぎを示す。このゆらぎを工学的手法を用いて解析

し、臨床的な応用に結びつけようとする研究がさかんになってきている。心拍ゆらぎの解析法としては、非スペクトル解析法とスペクトル解析法の2つに大別される。

非スペクトル解析法としては、5分間あるいは全体のRR間隔の平均と標準偏差、先行RR間隔に対して、50msec以上異なるRR間隔の出現個数を、単位時間当たりの出現個数に換算した値がよく用いられている²⁾。後者はRR50と言われ、副交感神経機能をよく表現すると報告されている³⁾。

一方、スペクトル解析法では、一般的に高速フーリエ変換(FFT)が用いられる。得られた心拍数やRR間隔のパワースペクトルには、いくつかの周波数帯域にピークが認められる。0.15Hz以上の周波数帯を高周波成分、0.08~0.15Hzを中間周波成分、0.08Hz以下を低周波成分として評価が行われている⁴⁾。高周波成分はおもに呼吸性成分を表すとされており、中間周波数成分は血圧

東京医科歯科大学医用器材研究所計測機器部門
Division of Instrumentation Engineering, Institute
for Medical and Dental Engineering, Tokyo Medi-
cal and Dental University

*山口大学工学部電気電子工学科

Department of Electric and Electrical Engineering,
Faculty of Engineering, Yamaguchi University

変動の Mayer リズム成分を表し、低周波成分は、血流成分などからの影響を受けていると考えられている⁴⁾。また、低周波成分は主に交感神経活動を、高周波成分は呼吸性ピークを反映し、主に副交感神経活動を反映しているといわれている⁵⁾。これまでの研究では、これらのスペクトル・パターンを解析することより、心臓病などの疾患の評価⁶⁾や、重篤患者の病態を定量的に把握する試みなどが数多くなされている²⁾。また、ホルター心電計を用い、健康人を対象とした日常の心拍数測定データを解析したものなどがある⁷⁾。

一方、小林と武者⁸⁾は、心拍数も細胞レベルの活動電位と同等に1/fゆらぎを示すことを明らかにした。これは1/fリズムと呼ばれ、生体が様々な周波数帯域を持つ生体リズムに支配されているためであると考えられている。これらの解析として24時間の経時変化を測定したものや、加齢に伴う影響を調べたものなどがある²⁾。また臨床面では、心拍数の連続監視データより脳死患者においても心拍ゆらぎが1/fパターンを有していることが示されている^{9,10)}。

これまで、日常行動下における心拍数ゆらぎの評価としては、ホルター心電計による24時間計測などが行われている。しかし、入浴中の心拍ゆらぎに関する研究はほとんど行われていない¹¹⁾。入浴中は身体が温熱的な負荷を受けるため、体温上昇、心拍数上昇、心拍出量の増加、皮膚血流の増加、血圧低下などの生理的変化を引き起こす。これらの生理的変化は、心拍ゆらぎにも変化を与えることが予想される。本研究では入浴前、入浴中、入浴後の心拍数を測定し、どのように入浴の効果が心拍ゆらぎに影響を与えるかを調べた。また、被験者の主観と心拍ゆらぎの関連も検討した。

2. 測定方法

対象は実験内容を十分に説明し測定の同意を得た健康成人男性（平均年齢24歳；21-34歳）10名とした。入浴は1994年4～5月と9月に行った。実験は同一被験者に40℃で浴槽内に気泡を発生させる入浴（以下「気泡浴」）と気泡を発生させない入浴（以下「40℃入浴」）、また42℃で気泡を発生させない入浴（以下「42℃入浴」）を施行した。また、被験者の入浴間隔は1週間以内とし、実験は

同一の時間帯に行った。各入浴の測定順序は特に定めず任意とした。初めての「気泡浴」では、被験者が緊張する恐れがあるため、測定前日までに「気泡浴」を経験させた。

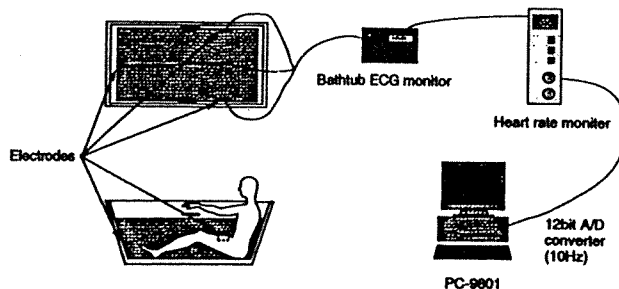


Fig. 1 A schematic diagram of experimental set-up.

Fig.1に装置の配置図を示す。まず被験者を室温25-28℃、湿度50-60%で10分以上安静座位に保った。心拍数の測定を入浴前、入浴中、そして入浴後に座位でそれぞれ12分間行った。入浴中の瞬時心拍数は、浴槽内心電図法¹²⁾により得られたアナログ出力を瞬時心拍計（AT-601G, 日本光電）に入力して得た。また、入浴前後の瞬時心拍数はCM5誘導によるテレメータ心電計（DS-502, フクダ電子）と瞬時心拍計（AT-601G, 日本光電）より得た。ここで浴槽内心電図法、CM5誘導は一般的に心電図測定で用いられる誘導法とは異なるが心拍数測定の場合はQRSピーク間隔のみが対象となるので心拍数値には問題ない。瞬時心拍数は心拍毎に更新される心拍数に比例したアナログ出力をサンプル周波数10HzでA/D変換し、パーソナルコンピュータで12分間記録した。入浴は浴槽内に気泡を発生させる和洋折衷型ブローバス（ブローバス FBB1440, 東陶機器, サイズ1400L×800D×612H, 容量320リットル）を用いた。噴出口数は背側2カ所と足裏側2カ所で、その噴出水量は4カ所合計で130ℓ/minであった。湯温を自動追焚付給湯機（コマンド16 RGE16CV1-D, 東陶機器）により設定値±1℃に保った。

被験者には入浴前、入浴中（入浴開始2分、5分、8分、11分後）と入浴後に快適感を7段階の評価（非常に不快、不快、やや不快、普通、やや快適、快適、非常に快適）で答えてもらった。

3. 解析方法

得られた心拍数データには、ノイズなどによる

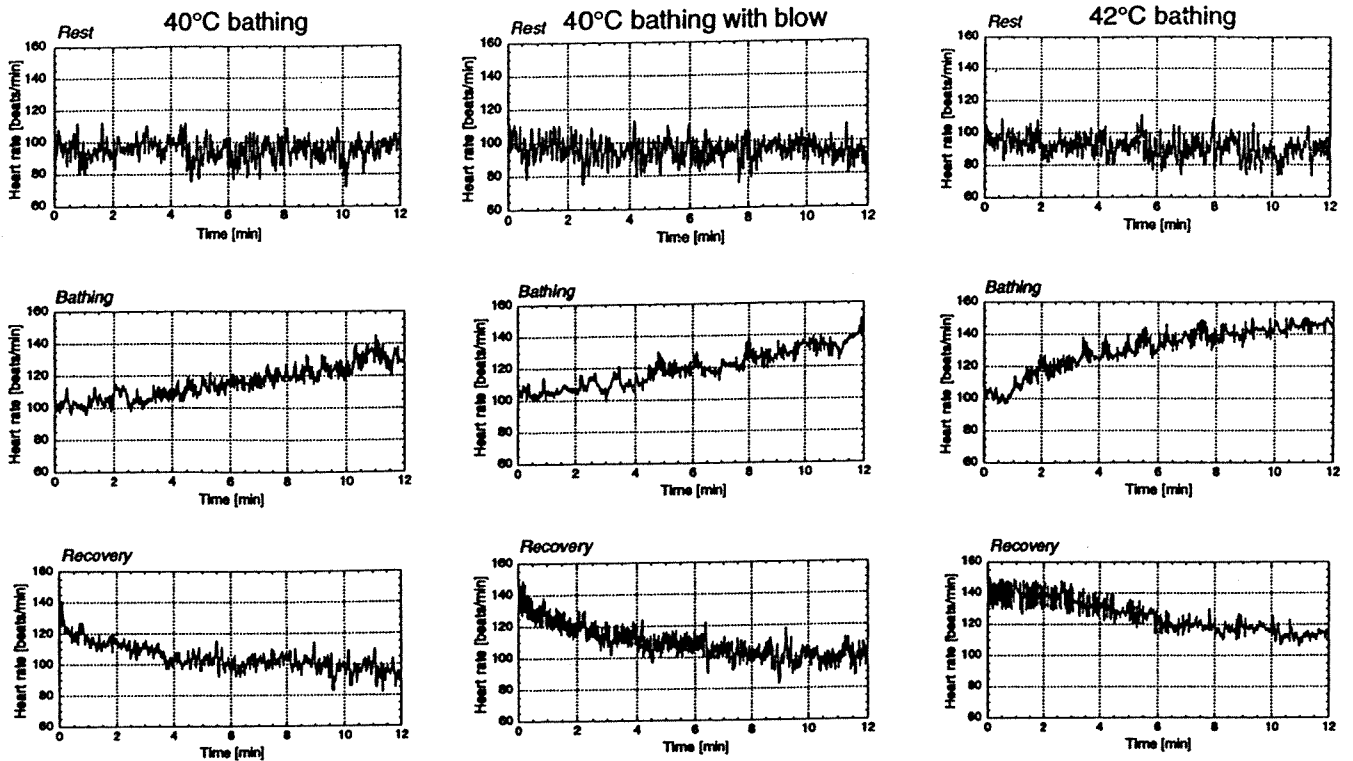


Fig. 2 Time courses of heart rate in a normal subject during 40°C bathing, 40°C bathing with blow and 42°C bathing.

アーチファクトが含まれている。本研究ではプログラムによりこれらのアーチファクトを前後のデータから直線補間で自動的に除去した。その手順を以下に示す。

n 点目のデータ ($x[n]$) から $n+10$ 点目のデータ ($x[n+10]$) まで 11 点のデータにアーチファクトが混入した場合

$$x(n+m) = x(n+1) + \frac{x(n+11) - x(n-1)}{(n+11) - (n-1)}(m+1)$$

ただし $\{m: 0, 1, 2, \dots, 10\}$

と直線補間した。この方法により得られた瞬時心拍数をトレンドグラフとした。

1 回の高速フーリエ変換のみでは特徴的な安定したピークを得ることは困難である。そこで特徴的なスペクトルピークを検出するため、12 分間の測定データ (7200 点) を前半 (2~7 分) と後半 (7~12 分) に分けた。そして 1024 点の FFT を 30 点ずつずらして 68 回の計算を行い、平均のパワースペクトルを算出した。また自律神経系の活動を定量化する目的で、得られた平均のパワースペクトルから低周波成分 (0.04~0.15 Hz, 以下 LF) と高周波成分 (0.15~0.60 Hz, 以下 HF)^{5,13,14)} の面

積とその比 (以下 LF/HF) を算出した。面積は LF または HF のパワーを積分して求めた。入浴中における心拍数の呼吸性変動を調べるため、被験者 1 名 (25 歳男性) に対し入浴前、入浴中、入浴後の呼吸波形をサーミスタプローブにより測定した。この呼吸波形のパワースペクトルと、同時に測定した瞬時心拍数のパワースペクトルを比較した。

4. 測定結果

Fig.2 に 22 歳健常男性の心拍数のトレンドを示す。どの入浴法においても、入浴前では 20 拍/分程度のゆらぎが見られた。入浴中の心拍数は「40°C 入浴」と「気泡浴」では入浴直後から直線的に増加した。また「42°C 入浴」では 1 分程度から急激に上昇し始め 6 分後からはほぼ一定値になった。またゆらぎは、どの入浴でも減少した。入浴後の心拍数は「40°C 入浴」と「気泡浴」ではただちに減少し始め、6~7 分程度で入浴前の心拍数に戻ったが、「42°C 入浴」では 2 分程度で減少し始め、測定終了時になっても入浴前の値には戻らなかった。入浴後の心拍ゆらぎは、入浴中に比べ増加し、「40°C 入浴」、「気泡浴」、「42°C 入浴」の順に

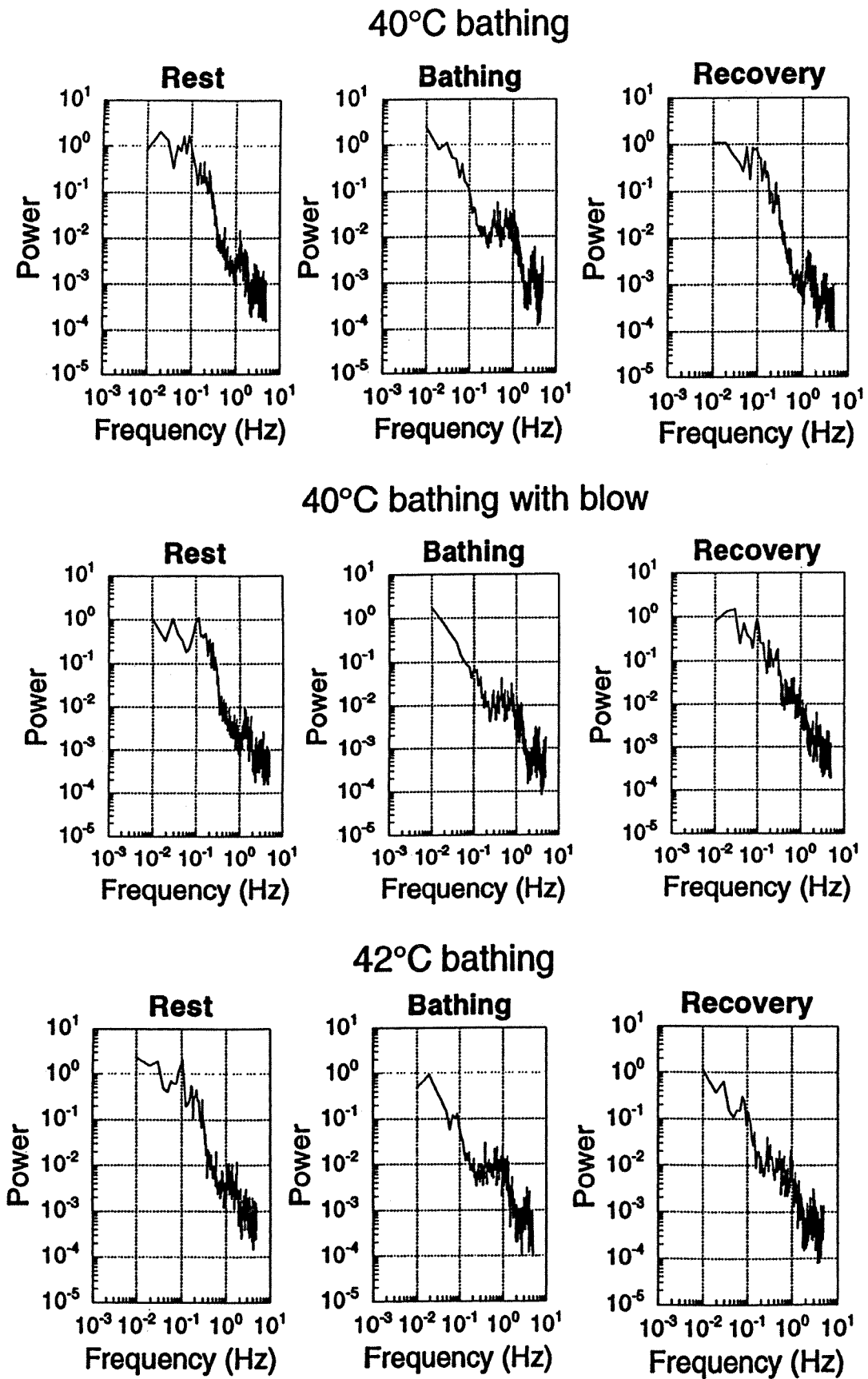


Fig. 3 Double logarithmic plots of power spectra of heart rate in a normal subject (the same subject of Fig. 2) during 40°C bathing, 40°C bathing with blow and 42°C bathing.

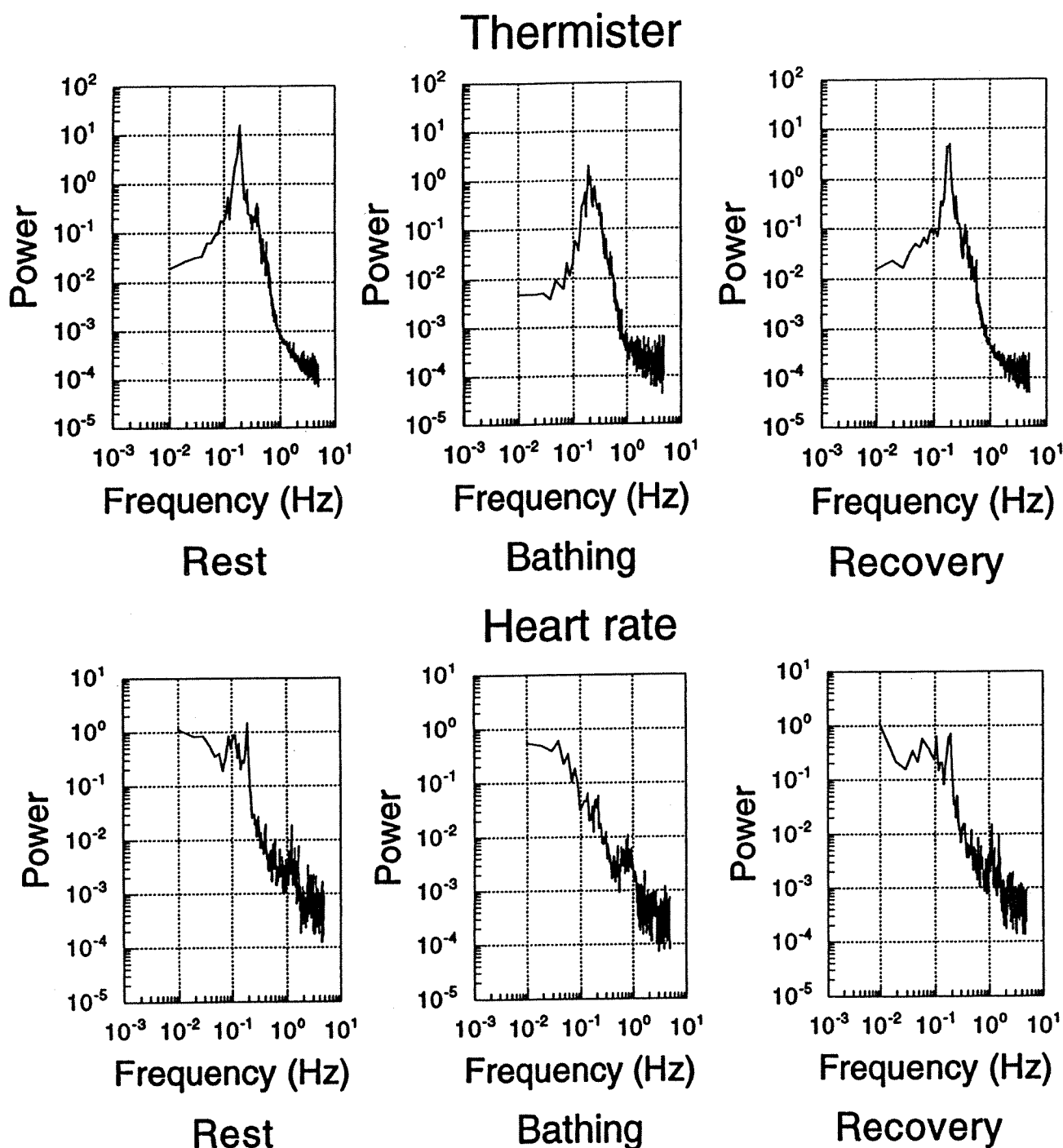


Fig. 4 Double logarithmic plots of power spectra of respirogram obtained by thermister and heart rate.

大きな振幅を示した。しかし「42℃入浴」の場合、6分後からは再びゆらぎが減少した。被験者全員から得られたパワースペクトルは、すべて $1/f$ 様であった。

Fig.3に Fig.2と同一被験者のパワースペクトルを示す。入浴前はLFにピークがみられたが、入浴中と入浴後は入浴方法に関わらず顕著でなかった。また、入浴前に比べ入浴中はHFに含まれる呼吸性のピークが減少した。

Fig.4に鼻サーミスタによる呼吸波形のパワースペクトルと同時計測した心拍数のそれを示す。鼻サーミスタ波形からは入浴前、入浴中、入浴後とも明確な呼吸ピークが得られた。一方、心拍数のパワースペクトルでは、入浴前と入浴後はサーミスタ測定により得られたピークに対応する周波数に呼吸によるピークが認められ、パワーもほぼ同値となった。しかしながら、入浴中には呼吸によるピークのパワーが減少していた。

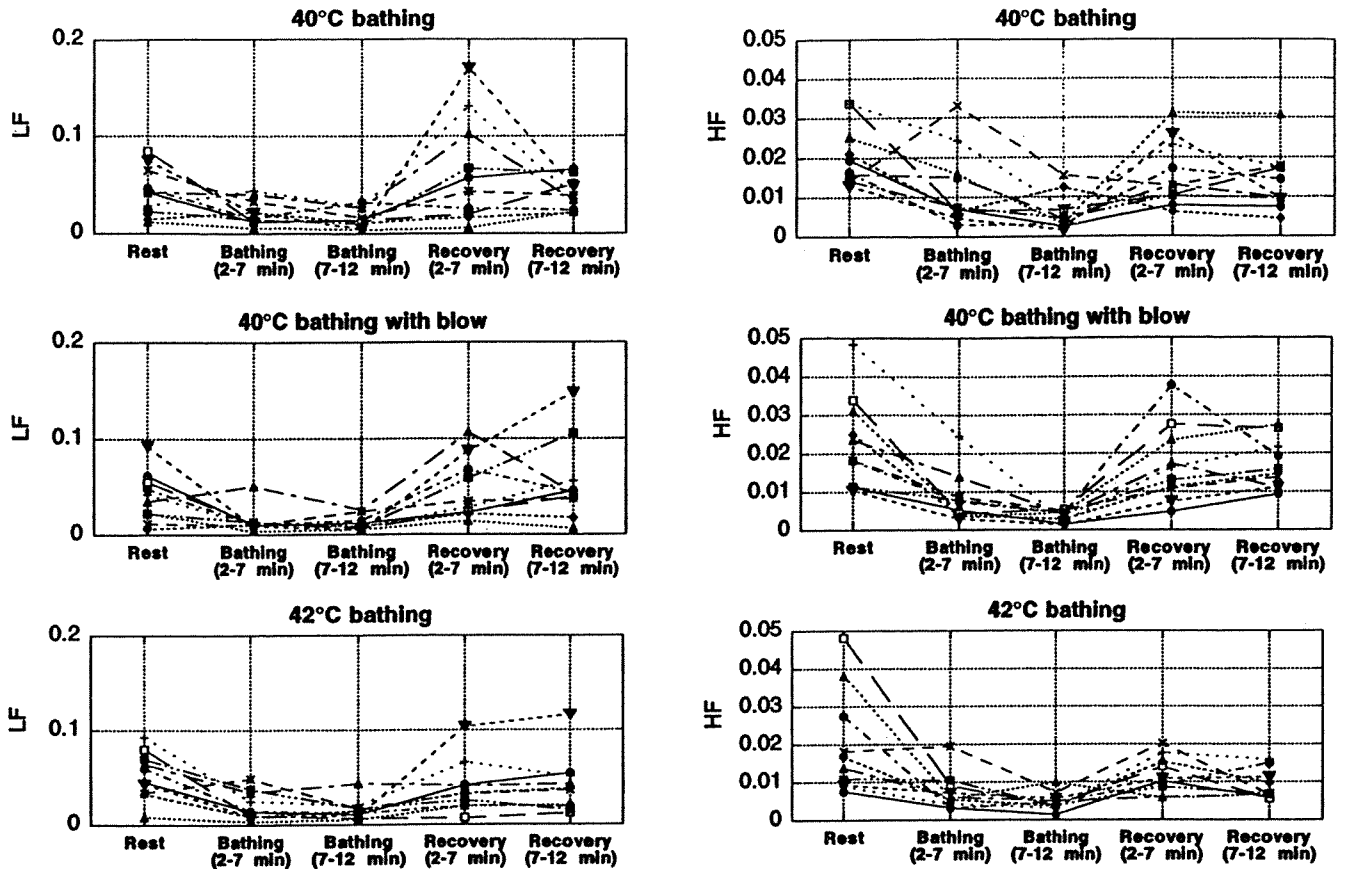


Fig. 5 The power spectra areas of LF and HF during 40°C bathing, 40°C bathing with blow and 42°C bathing.

Fig.5に被験者全員のLFとHFの変化を示す。LFは全ての入浴において入浴前に比べ、入浴中はパワーが減少した。特に「気泡浴」は入浴中の前半、後半ともにLFがほぼ一定の値になった。入浴後の前半は被験者により入浴中とほぼ一定な群と、入浴中より増加した群に分けることができた。一方、HFは「40°C入浴」の場合、入浴中の値は減少したものの、ばらつきが大きかった。「気泡浴」は入浴後半においてパワーが減少し、どの被験者もほぼ一定の値になった。「42°C入浴」では入浴後の前半部のパワーが他の入浴に比べて低い値となった。Fig.6にLH/HF変化の全被験者の平均を示す。結果は安静時の値で正規化した。入浴中は前半、後半の順にLF/HFが増加した。また入浴後は入浴中より低下したが、入浴前の値には戻らなかった。入浴方法による違いについては「40°C入浴」、「42°C入浴」では入浴中、入浴後とも値はほぼ同じであった。しかしながら「気泡浴」では他の入浴に比べて値が約2倍程度になった。

Fig.7に入浴中に被験者が答えた快適感の変化

を示す。快適感、入浴前を基準に1段階快適であれば+1ポイント、逆に1段階不快であれば-1ポイントとして、被験者全員の平均とその分散を求めた。全ての入浴において入浴中前半は、入浴前より1~2ポイント大きかった。入浴後半は入浴前半より1ポイント程度減少した。「40°C入浴」と「気泡浴」では、快適感の変化にt検定による有意な差はなかった。また「40°C入浴」と「42°C入浴」の快適感のt検定による有意差は、入浴前半では $P < 0.1$ であった。また入浴後半では $P < 0.01$ となり「40°C入浴」が有意に快適であることが示された。

5. 検討

テレメータ心電計、浴槽内心電図法により無拘束に測定した瞬時心拍数のゆらぎをFFTにより解析した。

心拍数のFFT解析については、様々な解析方法が考案されている。心拍数のFFT解析は、RR間隔から求めた瞬時心拍数の時系列データを一定間隔でサンプリングし、FFT解析を行う。この過

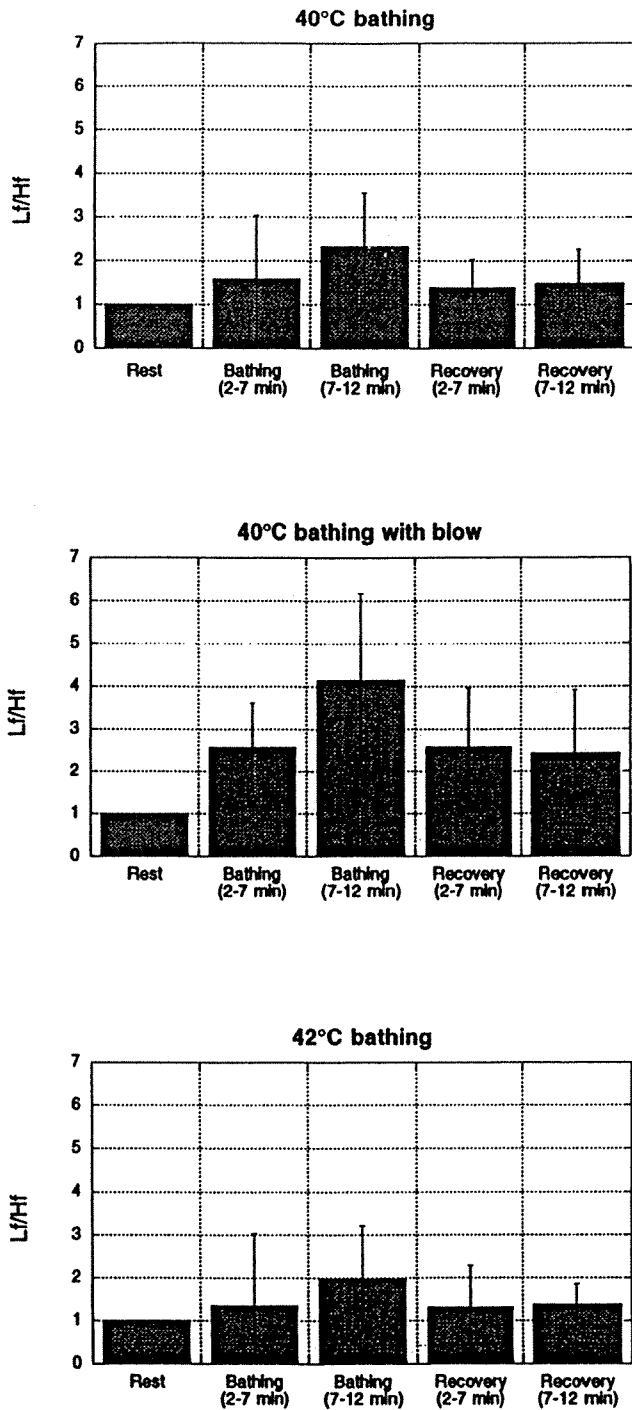


Fig. 6 The ratio between LF and HF (LF/HF) obtained by the mean power spectra from 10 subjects during 40°C bathing, 40°C bathing with blow and 42°C bathing.

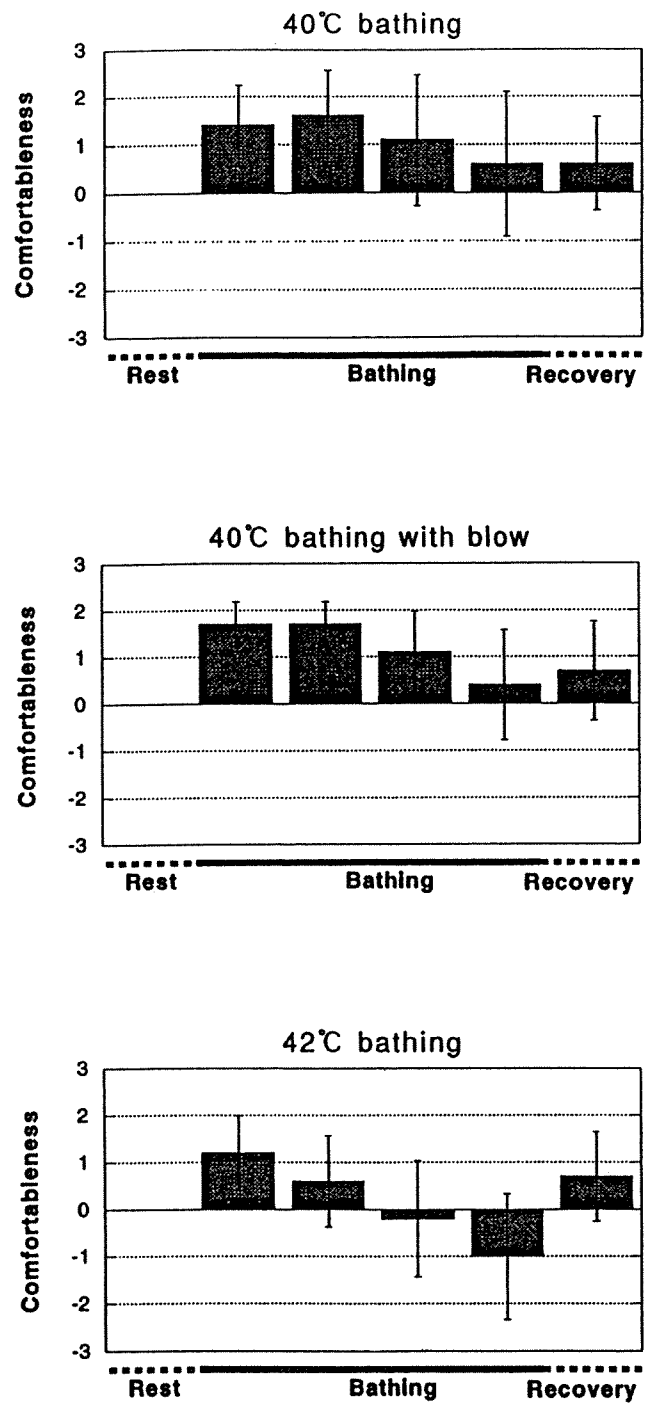


Fig. 7 Results of questionnaire for subjects' feeling during rest, bathing and recovery period.

程で, RR 間隔から瞬時心拍数を算出する方法に様々な方法がある。しかし, そのどの方法を用いても, 今回の解析に用いた周波数帯域において, 同様の結果が得られることが示されている¹⁵⁾。

入浴前後に比較した入浴中のスペクトルの特徴として次の2つがあげられる。1)入浴前後にみられたHFに呼吸による明確なピークが, 入浴中は

顕著でなかった。2)入浴中の心拍数波形のゆらぎが入浴前に比べ減少した。

心拍数の呼吸による変動は呼吸性変動と呼ばれ, RR 間隔と呼吸数の変動については多くの研究がある¹⁶⁾。呼吸性心拍変動は, 主に延髄にある心臓迷走神経の中樞が呼吸中枢の影響を受けることや呼吸に伴う肺の動きにより求心性のインパルスを受けることなどにより起こると考えられて

いる¹⁷⁾。心拍のゆらぎは、呼吸数が増大すると減少することが知られているが、Fig.4に示すように入浴中に呼吸数は顕著に増大することはなかった。温熱的に身体に影響を与えないとする水温34℃で行った水浸実験では、機能的残気量が減少し¹⁸⁾、心拍出量が増大する。静水圧により、血液の分布が異なり、静脈灌流量が増大する。また、機能的残気量の減少は肺の伸展性（圧縮率）の実質的な低下となる。よって、入浴中に呼吸性のピークが減少するのは、入浴中は静水圧により肺の動きが抑制されたためであると考えられる。このことが、呼吸性変動を少なくし、心拍のゆらぎも減少した。

快適度の指標としてわれわれは自律神経系の支配を表すLF、HFを用いた。本研究では入浴前に比べ入浴中のLF/HFは増加する傾向にあり交感神経が優位であるという結果になった。すなわち、入浴により軽度の運動を行ったと同じ効果が得られたことになった。また「40℃入浴」、「42℃入浴」に比べ「気泡浴」が大きな値を持った。また「40℃入浴」、「42℃入浴」の比較では「40℃入浴」の方がわずかに高値になった。入浴中の被験者は温熱負荷を受けるため、心拍数は上昇する。このことより入浴は副交感神経より交感神経を亢進し、入浴中は入浴前に比べて交感神経を優位にしたと考えられた。しかしながら、入浴中の比較では、¹⁹⁾温熱負荷の最も大きい「42℃入浴」が最もLF/HFの低い値になっている。このことは、LF/HFの値には温熱負荷による心拍数上昇以外の要素が、影響を及ぼしている可能性があると考えられる。

これらより、LF/HFの変化と快適感の変化との間には明確な関係がないことがわかった。このことから、入浴中のLF/HFの値から快適感を評価することはむずかしいと考えられる。これは、快適感が被験者の主観による評価であることや、日本人に高温浴を好む人が多いこと、「気泡浴」に十分なれていなかったことなどのために、実際の生体に加わる影響とは異なっていたと考えられる。

今回の測定において被験者の負担を軽くし、緊張などを極力取り除くため、測定項目を心拍数のみに限定し、無拘束測定を行った。そのためFFT

により得られるピークがどの生理量から変調を受けているのか推測することは困難であった。そこで今回は、ピーク値の詳細な意味付けに関しては評価を行わずに、LF、HF、LF/HFのみから評価を行った。パワースペクトルピークの詳細な評価に関しては今後、呼吸や、皮膚血流、血圧などの同時測定を行い、これらの値と比較して評価する必要があると考えられる。

本研究の一部は、厚生省科学研究費長寿科学総合研究「在宅高齢者の健康モニタリングの機器の開発研究」文部省科学研究費試験研究B(2)「高齢者のためのホームヘルスモニタリング：入浴時の健康管理機器の開発」、テルモ財団特定研究「健康モニタリングのための自動生体計測」ならびに医科学応用研究財団「在宅健康管理のための完全自動計測の試み」の補助による。

文 献

- 1) Choukroun M-L, Varene F, Adjustment in oxygen transport during head-out immersion in water at different temperatures. *J Appl Physiol* 1990;68(4):1475-80
- 2) Myers GA, Martin GJ, Magid NM, Barnett PS, Schaad JW, Weiss JS, Lesch M, Singer DH. Power spectral analyses of heart rate variability in sudden cardiac death : Comparison to other methods. *IEEE Trans Biomed Eng* 1986; BME-33(12): 1149-56
- 3) 大塚邦明,心拍変動の評価法,呼と循, 1994; 42(2) 125-32
- 4) 市丸雄平,小笠原正彦,片山宗一,自律神経障害者における心拍リズムとゆらぎ. *BME*, 1994; 8(10): 36-48
- 5) Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Barger AC, Cohen RJ, Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of heart to heart cardiovascular control. *Science* 1981;213: 220-2
- 6) Ichimaru Y, Kodama Y, Yanaga T, Circadian changes of heart rate variability. *Proc Computers in cardiology, IEEE Computer society press*, 1988;315-8
- 7) 大塚邦明,中島茂子,菊池長徳,心拍リズムのサーカディアン変動と1/fゆらぎ. *BME* 1994;8(10):17-21

- 8) Kobayashi M, Musha T, 1/f Fluctuation of Heartbeat Period. *IEEE Tran Biomed Eng*, 1982; 29(6):456-7
- 9) Kero P, Antila K, Ylitalo V, Vlimki I, Decreased heart rate variation in decerebration syndrome : Quantitative clinical criterion of brain death?, *Pediatrics*, 1978; 62(3): 307-11
- 10) Tamura T, Nakajima K, Maekawa T, Soejima Y, Kuroda Y, Heart rate fluctuations in post-operative and brain death-patients. AIP conference proceedings 285, Noise in physical systems and 1/f fluctuations, 1993; 693-700
- 11) 中島一樹,吉村拓巳,田村俊世,長 篤志,三池秀敏,戸川達男, 浴槽内心電図法を用いた入浴中の心拍ゆらぎ変化. 第9回生体・生理シンポジウム論文集, 1994; 255-8
- 12) 吉村拓巳,中島一樹,田村俊世,三池秀敏,戸川達男, 無拘束浴槽内心拍数モニタの開発とその評価. 医用電子と生体工学, 1994; 32(4):246-53
- 13) Yamamoto Y, Hughson RL, On the fractal nature of heart rate variability in humans: effect of data length and β -adrenergic blockade. *Am J Physiol*, 1994; 266 (*Regulatory Integrative Comp Physiol* 35): R40-9
- 14) 北 義人,石瀬 淳,相沢芳樹,由雄裕之,皆川冬樹,清水賢巳,中林 肇,竹田亮祐, 脳死症例に見られる緩徐な動脈圧の周期性動揺に関する検討. 自律神経, 1993; 30: 105-11
- 15) 水田博久,八名和夫, 心拍ゆらぎの1/f スペクトル推定. *BME* 1994; 8(10) 13-6
- 16) Brown TE, Beightok LA, Koh J, Eckberg DL, Important influence of respiration on human R-R interval power spectra is largely ignored. *J Appl Physiol* 1993; 75(5):2310-17
- 17) 鈴木泰三,星 猛, 新生理学講義1. 東京 南山堂 1988, 143
- 18) Derion T, Guy HJB, Tsukimoto K, Schaffartzik W, Prediletto R, Poole DC, Knight DR, Wagner PD, Ventilation-perfusion relationships in the lung during head-out water immersion. *J Appl Physiol* 1992; 72(1): 64-72