

生体反応のゆらぎを指標にした 運動時の安全対策の試み

聖マリアンナ医科大学	吉岡利忠
(共同研究者) 同	山下勝正
同	田中修
同	小林康孝

Fractuation of Heart Rate Variability is a Useful Tool for the Safety Direction of Exercise Training

by

Toshitada Yoshioka, Katsumasa Yamashita - Goto,
Osamu Tanaka, Yasutaka Kobayashi

Department of Physiology, St. Marianna University School of Medicine

ABSTRACT

The purposes of the present study were to examine the relationship between exercise stress and heart rate variability. The subjects performed running exercise for 2 km with maximal effort, having the interval that was 24 hours, 1, 2 weeks, and 3 months. During and after exercise, beat to beat heart rate variability, gravitational change were monitored for 48 hours after exercise. Spectral analysis of spontaneous heart rate fluctuation ($1/f^*$) was calculated by MemCalc system, and total spectral power was divided into high frequency power (0.15-0.4 Hz : HF : parasympathetic nervous system activity indicator) and low frequency power (0.03-0.15 Hz : LF). During exercise, both LF and HF were depressed. In the case of 24 hours interval between exercises, the responses of heart rate fluctuation ($1/f^*$) to exercise different from those in other exercise intervals.

On the other hand, the responses of LF/HF (sympathetic nervous system activity indicator) to exercise after 1-week-interval were differed from those after exercise with other interval. However, the levels of heart rate and gravity during exercise, the time of running, and the responses of serum enzyme activities to exercise were almost constant all trials, independent on the interval of exercises. These results suggest that the spectral analysis of heart rate variability was a useful tool for the autonomic responses to exercise stress, the safety direction of exercise training, and the effective direction for training.

要 旨

運動開始前のスクリーニングとして心拍数のゆらぎの有用性について検討した。被験者に 2 km 走のタイムトライアルを異なる間隔 (24 時間, 1, 2 週間および 3 カ月) で負荷し, 運動中, 後の心拍数, 加速度の変化を記録した。R-R 間隔のデータをスペクトル解析し, トータルパワーを低周波数成分 (LF) と副交感神経活動の指標とされる高周波数成分 (HF) に分類した。また, 心拍変動の $1/f^x$ ゆらぎについて検討を加えた。LF, HF ともに運動により強く抑制された。

$1/f^x$ の係数 x は, 運動負荷により大きく変動し, 運動間隔が 24 時間の場合, 他の運動間隔のときとは大きく異なる変動を示した。また, 交感神経活動の指標とされる LF/HF の運動負荷による変動は, 運動間隔が 1 週間のときにのみ, 顕著な変動が認められた。また, 各運動負荷中の心拍数および加速度データ, 走行時間, 血清酵素活性値の変動から, 本研究で用いた運動負荷は, 運動間隔によりその負荷強度に大きな差異はなかったと考えられた。以上のことから, 運動負荷による生体反応を検出できる心拍変動のスペクトル解析は, 運動時の事故防止あるいはトレーニング効率の向上を考えるうえで極めて有用な手段であると考えられた。

緒 言

健康の維持および増進のため運動が普及する一方で, 運動中, 後に発生する突然死などの事故が多く発生している。このような, 事故の発生を未然に防ぐために事前のメディカルチェックや運動指導, さらに事故発生要因の検討などが盛んに行われている。しかしながら, 現在のところ決め手となる策は得られていないのが現状である。われわれは, 個人個人の持つ概日リズムや自律神経活動などと生体負担度の二つの大きな要因が偶然にも重なり合った場合に事故が発生するのではないかと考えた。なぜなら, 同じような状況におかれている人, さらにより過酷な条件でも事故にいたらないケースがあるからである。

運動ストレスによる生体負担度は血清酵素活性にある程度反映される^{21, 23)}。そこで, 概日リズムや自律神経活動の指標^{8, 20)}として容易に測定できる心拍数を用いて, 運動ストレスによる生体負担度と心拍のゆらぎの関係を検討し, 運動開始前のスクリーニングとして心拍数のゆらぎの有用性について検討する。

1. 方 法

被験者は, 日常定期的に運動を行っていない健康成人男子を対象に実施した。各被験者の身体的特徴は表 1 に示した。被験者に対して, 2 km 走という一定距離の運動負荷を異なる間隔にて数回

表1 Physical characteristics of the subjects

	Age	Height	Weight
Y. T	26	185	64
M. H	26	170	67
K. Y	28	173	75
O. T	29	168	74
T. T	30	170	85
K. G	30	173	72
T. K	33	170	56
mean	28.9	172.7	70.4
SD	2.2	5.2	8.5

行わせ、それぞれの運動負荷に対する心拍数、R-R 間隔の応答を分析した。運動負荷の間隔は24 時間、1 週間、2 週間および3 カ月（血清酵素に関する実験は2 カ月）とした。2 km 走はタイムトライアルとして各走行ごとにゴールタイムを記録した。被験者には2 km を全力で走るように指示を出し、さらに運動負荷と運動負荷の間に積極的な身体運動は避けるように指導した。分析データの収集は、運動前（安静時）、運動中、運動直後、1、3、6、24、30、36、48時間後に行った。分析サンプルはアクティブトレサ AC-300（GMS 社）により、心拍数、R-R 間隔、加速度、

傾斜データならびに心電図を同時に記録し、得られたデータをパーソナルコンピュータ（PC-9821 Ap：NEC 社）に取り込み MemCalc（GMS 社）により解析を行った。

心拍変動を示す R-R 間隔のデータを最大エントロピー（MEM）法によるスペクトル解析し、結果を対数表示（ $\log 10 - \log 10$ ）し、このスペクトル（周波数帯域：0.04～0.4）の最小二乗フィッティング（LSF）により得られた回帰直線方程式の傾きから心拍変動の $1/f$ ゆらぎを分析した。さらに時変スペクトルは、0.04～0.15 Hz を低周波成分（low frequency power：以下、LF とする）、0.15～0.4 Hz を高周波成分（high frequency power：以下、HF とする）とした。心拍変動の各スペクトルは、安静時、運動中、運動直後、運動後3、6、24、30、および48時間にそれぞれ10 分間の R-R 間隔のデータより算出した。また、同様の運動負荷の血清酵素活性値への影響を検討するために、血清中のクレアチンキナーゼ（CK）、乳酸脱水酵素（LDH）、GOT、GPT の各活性値を測定した。なお、本研究では傾斜データは分析の対象から除外した。

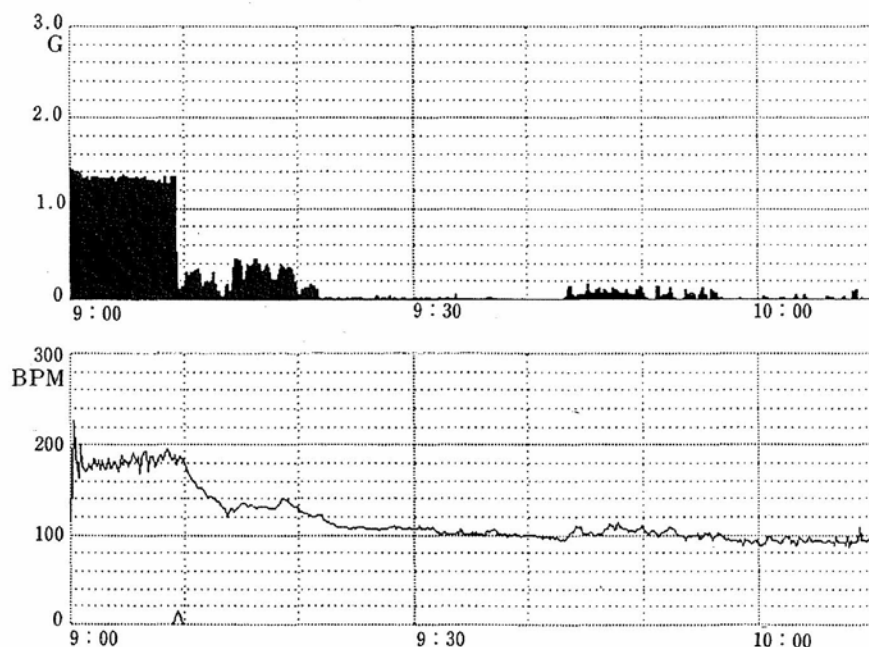


図1 Changes in gravity and heart rate during and after exercise in the subject KG
Upper ; gravity lower ; heart rate

2. 結果

運動開始直後から運動終了1時間後までの心拍数および加速度の一例を図1に示した。運動直後より心拍数、加速度ともに急激に上昇し、心拍数は約180拍/分、加速度は約1.3 Gに達していた。加速度、心拍数ともに走行中大幅に変化していないことから、ほぼ一定負荷の運動であったことが

推察される（被験者：KY，走行時間：9分15秒）。図2に走行途中に大幅にペースダウンした例を示した。この被験者は運動開始直後に心拍数は約250拍/分、加速度は約2 Gまで上昇し、約5分後に大幅に走行ペースが減少し、その結果心拍数は一時120拍/分、加速度は1.2 Gになったことを示している（被験者：TT，走行時間：13分30秒）。

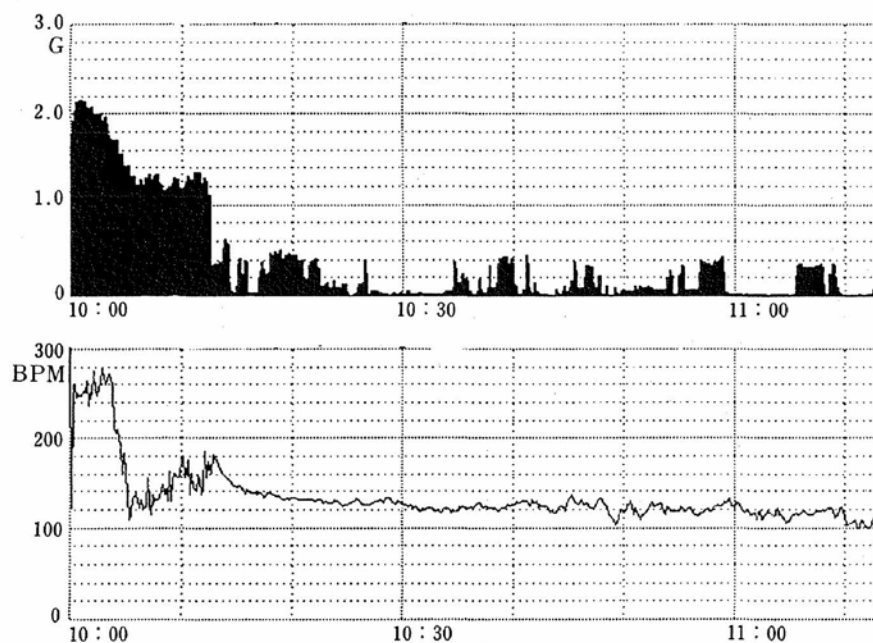


図2 Changes in gravity and heart rate during and after exercise in the subject TT
Upper ; gravity lower ; heart rate

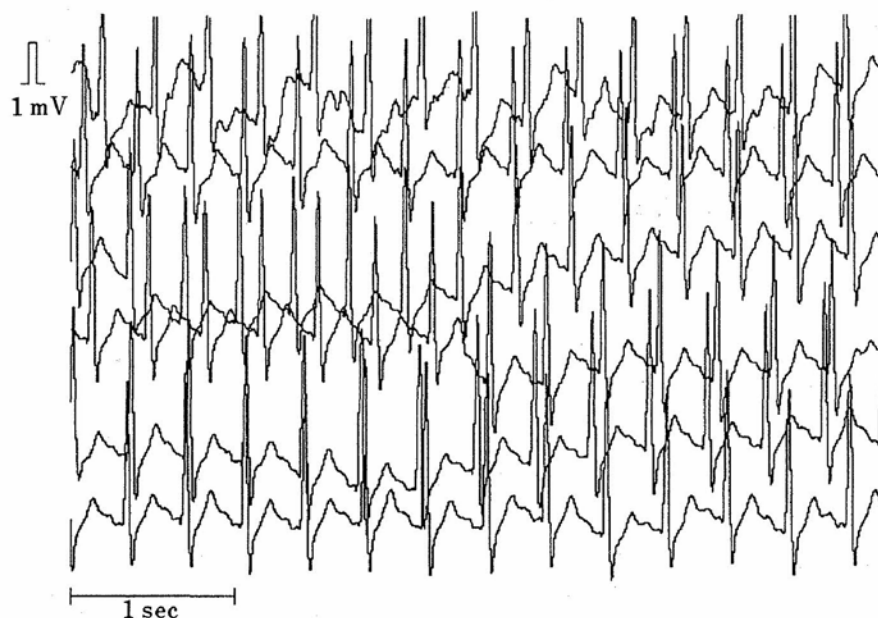


図3 ECG record immediately after exercise in the subject KG

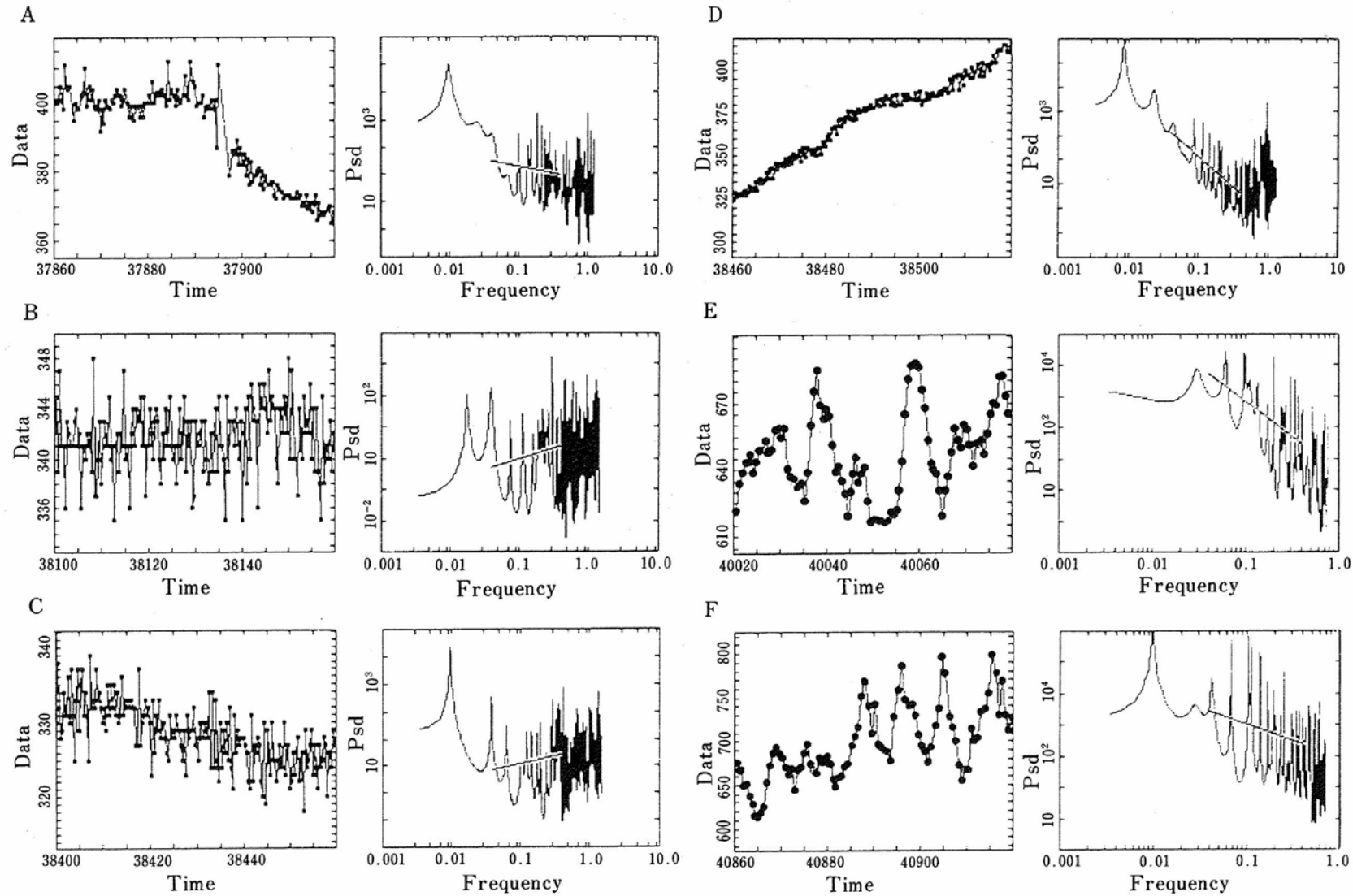


図4 Changes in the R-R intervals, the power spectrum analysis of R-R interval during and after exercise
 Left; the R-R interval right; the power spectrum of R-R interval
 The fluctuation ($1/f^*$) of R-R interval was indicated by the regression line in the power spectrum (left)
 A; rest and starting of exercise ($x = -0.505$) B; during exercise (the middle of exercise; $x = 0.691$) C; during exercise (the end of exercise; $x = 0.562$) D; immediately after exercise ($x = -2.534$) E; 30 min after exercise ($x = -2.244$) F; 60 min after exercise ($x = -1.055$)

運動直後に AC-300 システムにより記録された心電図波形を図 3 に示した。このように、本研究で利用したシステムにより連続かつ長時間のデータ収集、ならびにその解析が可能であった。さらに R-R 間隔のデータを MemCalc により分析することで、 $1/f$ 、LF、HF、LF/HF の各項目について計算が可能であった。図 4 に R-R 間隔のデータ解析の一部を示した。R-R 間隔は、安静時から運動開始 (図 4-A) より減少し、運動中 (図 4-B, C) はほぼ一定値を示し運動終了後、(図 4-D) 急激な上昇を示している。パワースペクトラム解析では、運動開始により低周波成分 (Low frequency power: LF) の低下および $1/f$ の係数 x の増加が認められる (図 4-A, B, C)。運動終了により高周波成分 (High frequency power: HF) の低下および LF の増加が観察され、 $1/f$ の x は激減し $-2.2 \sim -2.5$ まで低下し (図 4-D, E)、運動終了 1 時間後に -1.0 まで再び上昇し (図 4-F)、心拍変動はほぼ $1/f$ ゆらぎを取り戻している。

図 5 にパワースペクトルの経時的な変化を示した。運動負荷中は各周波数帯のパワーは減少し、運動終了後増加している (図 5-A)。運動終了 3 時間後に再びパワーの抑制が認められ (図 5-B)、6 時間後に逆にその増加が見られる (図 5-C)。

2.1 心拍変動のゆらぎ

心拍変動のゆらぎは、R-R 間隔のパワースペクトル解析結果の $\text{Log } 10\text{-log } 10$ グラフにおける回帰直線の傾きから求められるもので、 $1/f^x$ の f の係数 x で示され、係数が 1 のとき、 $1/f$ ゆらぎとなる¹⁵⁾。運動負荷による $1/f$ の f の係

数 x の経時的変化の一例を運動負荷の間隔別に図 6 に示した。運動間隔が 24 時間の場合において、 x は最も高レベルで推移している。

次いで、第 1 回目の運動負荷となり運動間隔が 2 週間および 3 カ月では x の値は逆に低くなって

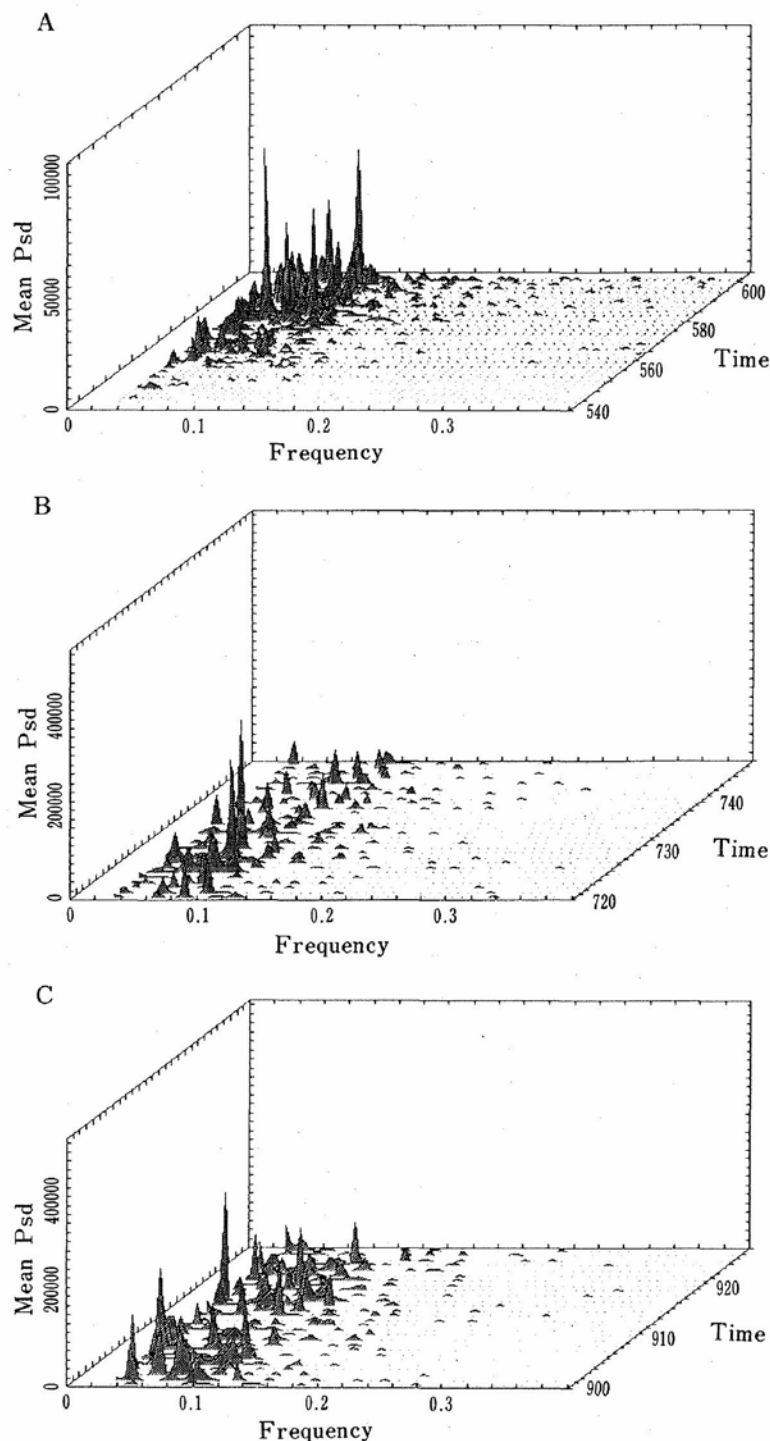


図 5 Changes in power spectrum during and after exercise
A ; during and after exercise
B ; 3 hours after exercise C ; 6 hours after exercise

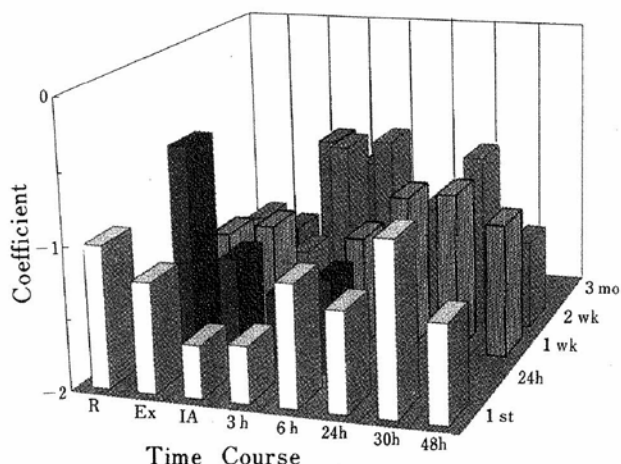


図6 Changes in the fluctuations ($1/f^*$) of R-R intervals during and after exercise
Time scale; minute S1; during exercise S2; immediately after exercise S3; 3 hours after exercise S4; 6 hours after exercise A; The first exercise B; exercise with 24-hour-interval C; exercise with 2-week-interval D; exercise with 3-month-interval

いる。運動負荷に伴う x の変動とは別に、経時的な一定周期の変動、すなわち x の値は内在リズムをもって常に変動していることがわかる。この f の係数である x の経時的な変動について被験者全員のデータの平均値を、運動負荷条件別に図7に示した。第1回目の運動負荷では、運動中から運動直後、運動後3時間後にかけて減少する傾向が認められた。このような変動は、若干の周期に差異が認められるものの、運動負荷間隔が1, 2週間および3カ月でも認められた。しかし、24時間の間隔で運動負荷を行った場合は、運動中に顕著な増加が認められ、運動終了直後から3時間後にかけて減少した。

2.2 Low frequency power

Low frequency power (LF) の運動負荷によ

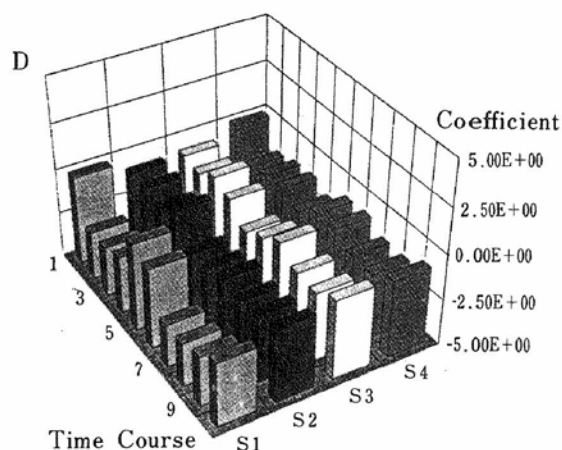
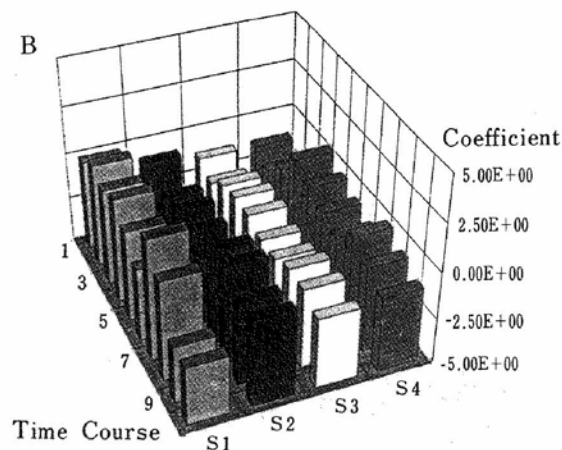
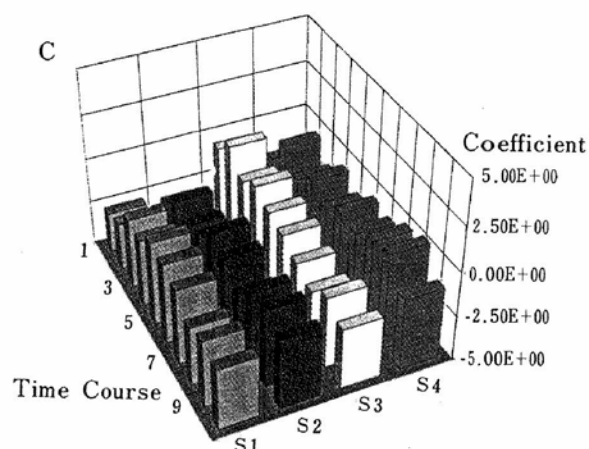
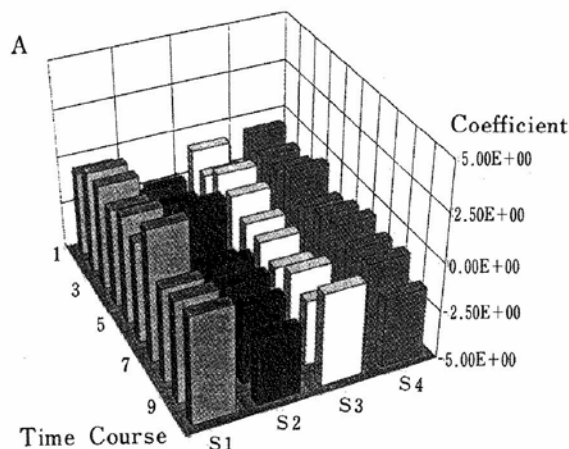


図7 Changes in the fluctuations ($1/f^*$) of R-R intervals during and after exercise
R; rest Ex; during exercise IA; immediately after exercise 1st; The first exercise 24h; exercise with 24-hour-interval 1wk; exercise with 1-week-interval 2wk; exercise with 2-week-interval 3mo; exercise with 3-month-interval

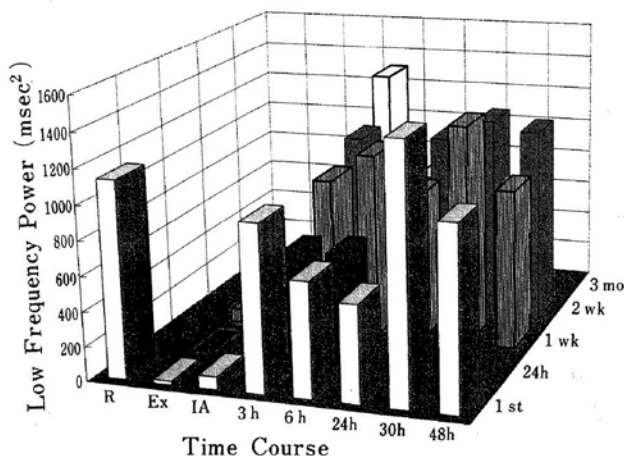


図8 Changes in low frequency power during and after exercise
Abbreviations are the same as in Fig. 6

る変化は、全被験者の平均値を図8に示した。LFは運動負荷中に、大きく抑制される傾向が認められた。この運動による抑制は運動後3時間には消失し、LFの増加が認められ、その後周期的に変動する様相を示した。運動負荷中におけるLFの抑制は、すべての運動負荷間隔の条件において認められた。しかし、その抑制レベルは運動間隔により異なり、運動間隔が24時間のときが最も強く、運動間隔が1週間で最も弱くなる傾向が認められた。

運動負荷によるLFの運動後3時間以後の変動パターンは、運動負荷の間隔により異なるものであった。運動間隔が24時間では、LFの値は他の運動負荷条件に比して低いレベルで推移した。また、運動間隔が3カ月の場合、運動後3時間におけるLFが最高値を示した。

2.3 High frequency power

High frequency power (HF)の運動負荷による変化は、図9に全被験者の平均値を示した。HFもLFと同様に、すべての運動間隔の条件で運動負荷中に大きな抑制が認められた。この運動による抑制は、運動後3時間から徐々に消失し、HFの増加が認められた。運動間隔が1週間の場合、運動負荷による抑制は最も弱いものであった。

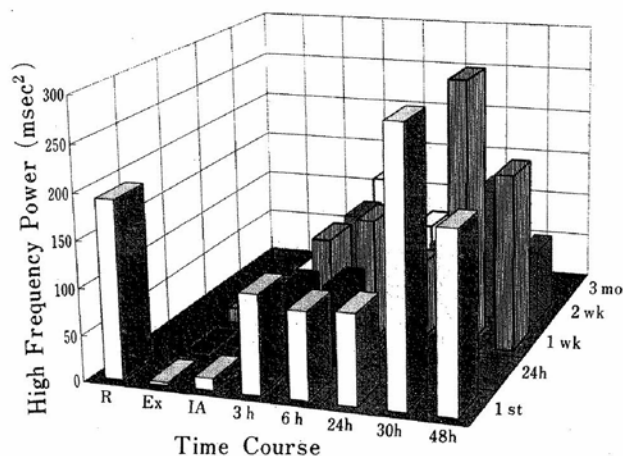


図9 Changes in high frequency power during and after exercise
Abbreviations are the same as in Fig. 6

第1回目の運動負荷、運動間隔が1、2週間では、運動後30時間でHFのピークが出現した。すべての運動間隔の条件において、運動負荷後のHFは大きな変動を示し、さらに元来内在すると思われる大きな周期的な変動も認められた。

2.4 LF/HF ratio

交感神経機能を示すと考えられているLF/HF ratio^{8, 15)}は、全被験者の平均値として図10に示した。第1回目の運動負荷によるLF/HF ratioの変動は、運動直後より運動後3時間まで高値を示し、その後やや低下する傾向が認められた。し

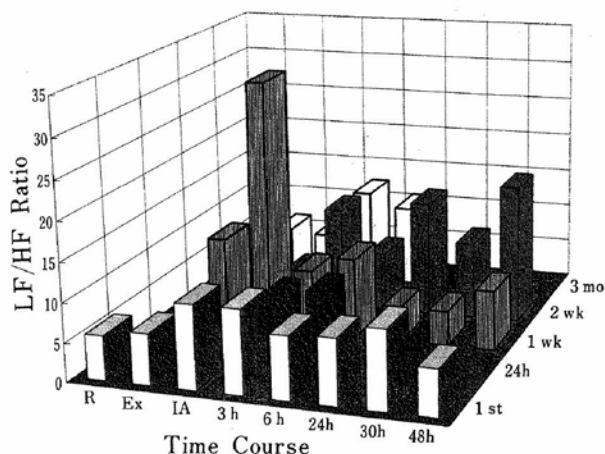


図10 Changes in the value of the ratio of low frequency power per high frequency power during and after exercise
Abbreviations are the same as in Fig. 6

かし、全体として顕著な変化ではなかった。同様の傾向は、運動間隔が3カ月の時にも認められた。運動間隔が24時間の場合でも、大きな変化は認められなかった。運動間隔が1週間になると運動直後から運動後3時間後まで顕著な上昇が認められた。運動間隔が2週間では周期的な L/H ratio の増減が認められ、その変化は第1回目の運動負荷、運動間隔が24時間および3カ月の場合に比べて大きいものであった。

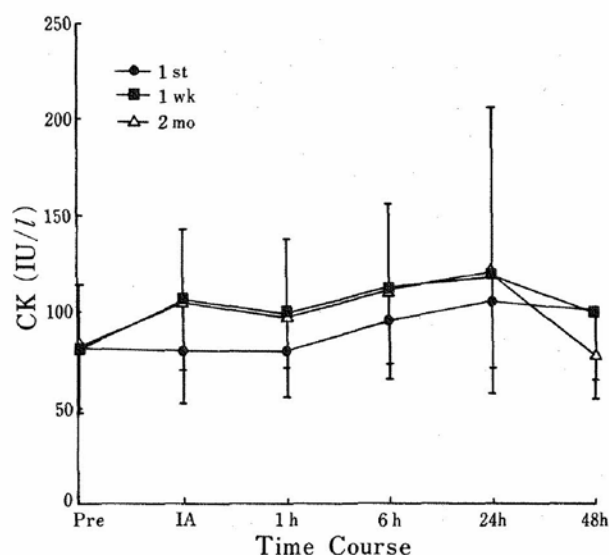


図11 Changes in serum creatine kinase (CK) activity
Pre; rest IA; immediately after exercise
1st; The first exercise 1wk; exercise with
1-week-interval 2mo; exercise with 2-
month-interval

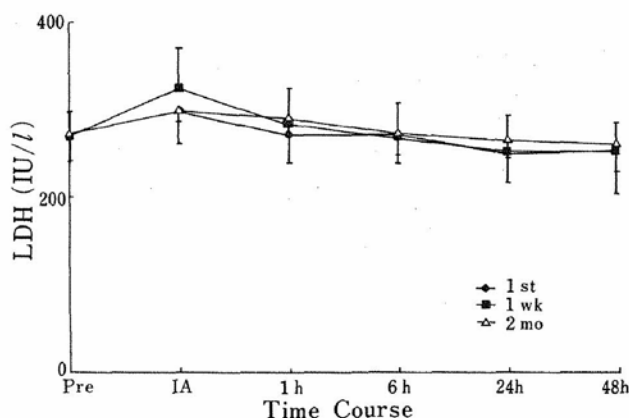


図12 Changes in serum lactate dehydrogenase (LDH) activity
Abbreviations are the same as in Fig. 10

2.5 血清酵素活性値

運動負荷による各血清酵素活性値の変動を図11～図13に示した。生体負担度の指標として頻繁に用いられている CK²¹⁻²³⁾ は、運動間隔の違いにより血清中の活性値に大きな差異は認められなかった。LDH, GOT, GPT も同様に、運動間隔による血清中の活性値の変化に顕著な差は見られなかった。また、運動負荷中の心拍数および加速度データから、本研究で用いた運動負荷は、運動間隔によりその負荷強度に大きな差異はなかったと考えた。

3. 考 察

生体を維持するうえで営まれている細胞レベルでのすべての反応には、一定のリズムがあり、さらにそのリズムには微妙なゆらぎ²⁴⁾が存在する。このゆらぎは分子レベルでも存在することが確認

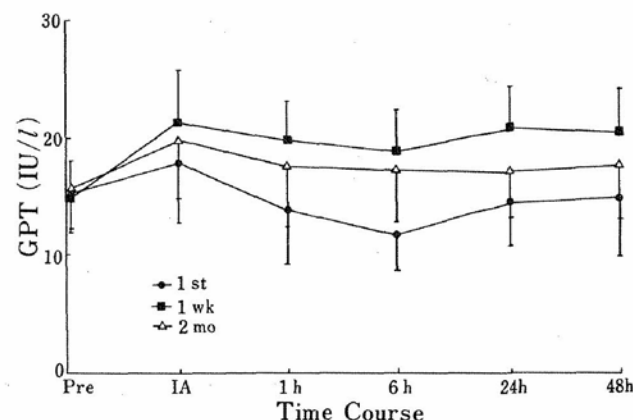
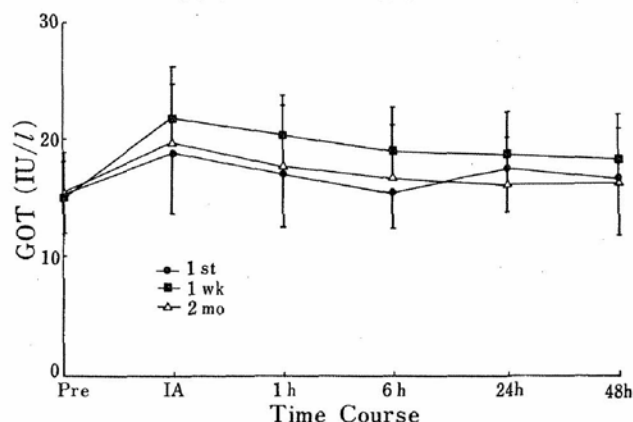


図13 Changes in serum GOT and GPT activity
Upper; GOT lower; GPT
Abbreviations are the same as in Fig. 10

されている²⁾。心臓の収縮リズムの表われである心拍数 (R-R 間隔) もこのゆらぎを有していることが知られている¹⁰⁾。心拍数は比較的容易に測定できることから、メディカルチェックの検査としてその有用性は高い。運動時における心拍数のゆらぎに関する研究は、基礎的研究^{4, 13, 25, 26)}にとどまりスポーツ医学への応用はほとんどなされていないのが現状である。これは解析が複雑なため、解析方法により分析結果が異なる^{12, 14, 25)}ことがその1つの要因として挙げられる。

近年、心電図の R-R 間隔の時系列解析から自律神経機能を評価する試みがなされている^{3, 18, 19)}。心拍変動のパワースペクトラムから、副交感神経活動を反映する 0.05~0.15 Hz までの低周波成分と副交感神経活動に修飾された交感神経活動を反映する 0.15~0.50 Hz の高周波成分が評価の対象として用いられている^{9, 17)}。このゆらぎに関しては数多くの報告がみられる^{1, 6, 10)}。

ヒトの心電図 R-R 間隔は、 $1/f^x$ のパワースペクトルを有している⁹⁾。 f^x の係数はおよそ -1 であるが身体運動や重力負荷などによって循環系にストレスを受けると -2 に近づき^{5, 13)}、これは恒常性保持の機能が相対的に失われてくることを示しているとされている¹⁴⁾。また、運動中 $1/f^x$ の係数 x は運動強度の増加に伴い徐々に低下することが報告されている^{13, 26)}。本研究で用いた運動負荷では、運動間隔が24時間の場合を除いて x は運動中に若干低下する傾向が認められた。しかし、この低下は約 0.5 point 程度であり、 $1/f$ ゆらぎが失われていたとは考えにくく、運動の種類によっては運動中でも必ずしも $1/f$ ゆらぎが失われない可能性を示すのかもしれない。一方、運動間隔が24時間の場合では、逆に $1/f$ の f の係数である x は増加傾向にあった。

本研究では、血清酵素活性値の変動、心拍数および加速度データより単一強度の運動負荷であったと考えられ、さらに運動開始直後より運動終了

時までのデータを平均値化して解析しているので、運動強度の変化に伴う x の変動についての考察は難しい。しかし、単に同一運動ストレス負荷に対する心拍応答という観点からは先行研究と比較が可能であると考えられる。Pagani ら¹⁶⁾によると、高血圧患者にトレーニングを負荷することにより、心拍変動のパワースペクトル解析から得た交感神経および副交感神経の活動様式が異なることを報告していることなども考慮する必要がある。以上のことから、本研究で用いた運動負荷に限り運動間隔が24時間のときのみ、その運動に対して生体は特異的な反応を示したことになる。これは同一ストレスに対してであっても、生体が大きく異なる反応を示したことであり、これが運動中の自己、あるいは逆にトレーニング効果を上げる可能性を示す1つの要因なのかもしれない。

$1/f$ の係数 x にはサーカディアンリズムが存在し、睡眠中に低下して -1 に近づき昼間は増加することが報告されている¹⁵⁾。また、自律神経機能に障害がある場合には、 x の値は比較的高値を示し、サーカディアンリズムが喪失している¹⁵⁾。すなわち、本研究で認められた、運動間隔が24時間における運動中の x の増加は、自律神経機能の異常を示すものであるとも考えられ、運動のストレスに対する生体からのシグナルかもしれない。

R-R間隔のパワースペクトラムから得られる HF および LF の各パワー、LF/HF はそれぞれ呼吸に関連した副交感神経機能、圧受容器反射を介した副交感神経に修飾された交感神経、交感神経の活動を正確に示す^{7, 15)}と考えられている。本研究では、運動負荷中に LF および HF はともに抑制される傾向を示した。

一般に、運動中副交感神経は抑制され、交感神経は緊張状態にあるとされている。本研究における運動中の LF/HF の変動では、運動間隔が1週間のときのみ運動負荷中の増加が認められ、第1回目の運動負荷および運動間隔が24時間の場合

には LF/HF の増加は認められなかった。さらに、運動中には HF も抑制が見られていた。LF/HF はむしろ運動直後に顕著な増加が認められた。このことは、運動中には抑制されていた交感神経活動が運動直後に急激に活動が上昇したとは考えにくい。本研究のような約10分間という短時間の運動負荷では、自律神経の活動様式が長時間の運動とは異なる、あるいは短時間の運動では LF/HF は交感神経の活動の指標として用いることはできないことを示すのかもしれない。

LF/HF と $1/f$ の係数 x との関係は正比例の関係にあるとされている。しかしながら、本研究で用いたような短時間の激運動の場合、両者間にこのような関係は認められなかった。これは、両因子がそれぞれ異なるものにより支配されていることを示しているのではないだろうか。

本研究では、R-R 間隔のスペクトル解析により運動間隔が24時間の場合、他の運動間隔（1週間、2週間、3カ月）とは異なる特異な反応を見つけることができた。これは1つのストレス反応として捉えるべきなのか、あるいはトレーナビリティとして捉えるべきなのか疑問が残る。しかし R-R 間隔というごく容易な測定パラメータにより、運動負荷による生体反応を検出できることは運動時の事故防止あるいはトレーニング効率の向上を考えるうえで極めて有用な手段であるといえよう。今後より詳細かつ長期的なデータ解析を進め、より有効な情報を提供したい。

4. 結 論

本研究では、被験者に2 km 走のタイムトライアルを異なる間隔（24時間、1、2週間および3カ月）で負荷し、運動中、後の心拍数、加速度の変化を記録し、運動開始前のスクリーニングとして心拍数のゆらぎの有用性について検討し、以下に示す知見を得た。

1) 低周波数成分 (LF) と副交感神経活動の指

標とされる高周波数成分 (HF) とともに運動により強く抑制された。

2) 心拍変動のゆらぎを示す $1/f^x$ の係数 x は、運動負荷により大きく変動し、運動間隔が24時間の場合、他の運動間隔のときとは大きく異なる変動を示した。

3) 交感神経活動の指標とされる LF/HF の運動負荷による変動は、運動間隔が1週間のときにのみ、顕著な変動が認められた。

4) 各運動負荷中の心拍数および加速度データ、走行時間、血清酵素活性値の変動から本研究で用いた運動負荷は、運動間隔によりその負荷強度に大きな差異はなかったと考えられた。

以上より、運動負荷により生体反応を検出できる心拍変動のスペクトル解析は、運動時の事故防止あるいはトレーニング効率の向上を考えるうえで極めて有用な手段であると考えられた。

謝 辞

稿を終えるに当たり、本研究に対し助成をいただいた財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に感謝の意を表します。また、実験データの分析にご協力いただいた株式会社 GMS の林列成氏、日本電気三栄株式会社 南関東販売本部の吉川嘉智氏に感謝いたします。実験にご協力いただいた聖マリアンナ医科大学第二生理学教室大学院の田添貴史先生、秘書の寺島智恵子さんに感謝致します。

文 献

- 1) Abboud, S., Berenfeld, O., Sadeh, D.; Simulation of high-resolution QRS complex using a ventricular model with a fractal conduction system, Effects of ischemia on high-frequency QRS potentials, *Circ. Res.*, 68, 1751-1760 (1991)
- 2) 足立健吾, 安藤敏夫; 綱引きアクチンフィラメントの揺らぎ運動の解析, 生物物理, 35 (suppl), S 215 (1995)

- 3) Akselrod, S., Gordon, D., Ubel F. A., Shannon, D. C., Barger, A. C., Cohen, R. J. ; Power spectrum analysis of heart rate fluctuation : a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control, *Science*, **213**, 220-221 (1981)
- 4) Arai, Y., Saul, J. P., Albrecht, P., Hartley, L. H., Lilly, L. S., Cohen, R. J., Colucci, W. S. ; Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise, *Am. J. Physiol.*, **256** (*Heart Circ. Physiol.*, **25**), H 132-H 141 (1989)
- 5) Butler, G. C., Yamamoto, Y., Xing, H. C., Northey, D. R., Hughson, R. L. ; Heart rate variability and fractal dimension during orthostatic challengers, *J. Appl. Physiol.*, **75**, 2602-2612 (1993)
- 6) Goldberger, A. L., Bhargava, V., West, B. J., Mandell, A. J. ; On a mechanism of cardiac electrical stability, The fractal hypothesis, *Biophys. J.*, **48**, 525-528 (1985)
- 7) Hayano, J., Yamada, M., Sakakibara, Y., Fujinami, T., Yokoyama, K., Watanabe, Y., Takata, K. ; Short-and longterm effects of cogarette smoking on heart rate variability, *Am. J. Cardiol.* **65**, 84-88 (1990)
- 8) 亀谷 学, 自律神経評価法, 臨床スポーツ医学, **9**, 854-857 (1992)
- 9) 亀谷 学, 橋本信行, 佐々木俊雄, 三須一彦, 桜井庸晴, 加茂 力, 伊藤晴樹, 村山正博, 中村好男, 吉岡正昭, 宮川富三雄 ; 起立性負荷における交感神経活動評価への心拍変動パワースペクトル解析の応用-Lower Body Negative Pressure による検討, 心臓, **26** (Suppl. 4), 49-53 (1994)
- 10) Kobayashi, M. Musha, T. ; 1/f fluctuation of heartbeat period, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **29**, 456-457 (1982)
- 11) Lipsitz, L. A., Mietus, J., Moody, G. B., Goldberger, A. L. ; Spectral characteristics of heart rate variability before and during postural tilt, Relations to aging and risk of syncope, *Circulation*, **81**, 1803-1810 (1990)
- 12) 中村好男 ; 心拍ゆらぎが意味するもの-自律神経とカオス?, *Jpn. J. Sports Sci.*, **14**, 503-508 (1995)
- 13) Nakamura, Y., Yamamoto, Y., Muraoka, I. ; Autonomic control of heart rate during physical exercise and fractal dimension of heart rate variability, *J. Appl. Physiol.* **74**, 875-881 (1993)
- 14) 野崎大地 ; 生体ゆらぎの解析法, *Jpn. J. Sports Sci.*, **14**, 475-489 (1995)
- 15) 大塚邦明 ; 心拍変動と自律神経機能, Annual Review 循環器, 杉本恒明, 松本昭彦, 杉下靖郎, 門間和夫編 ; 中外医学社, 東京, 68-77 (1994)
- 16) Pagani, M., Somers, V., Furlan, R., Dell'Orto, S., Conway, J., Baselli, G., Cerutti, S., Sleight, P., Malliani, A. ; Changes in autonomic regulation induced by physical training in mild hypertension, *Hypertension*, **12**, 600-610 (1988)
- 17) 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., Benson, H. ; Assessment of autonomic function in humans by heart rate spebtral analysis, *Am. J. Physiol.*, **248** (*Heart Circ. Physiol.*, **17**), H 151-H 153 (1985)
- 18) Ravenswaaij-Arts, C. M. A., Kolle, L. A. A., Hopman, J. C. W., Stoelinga, G. B. A., Geijn, H. P. ; Heart rate variability, *Ann. Intern. Med.*, **118**, 436-447 (1993)
- 19) 佐々木俊雄 ; Neck Suction 法における自律神経活動評価-時変係数自己回帰モデルを用いた心拍血圧変動時変スペクトル解析による検討, 聖マリアンナ医大誌, **22**, 470-482 (1994)
- 20) 佐々木俊雄, 亀谷 学, 橋本信行, 三須一彦, 桜井庸晴, 堀田宗文, 加茂 力, 伊藤晴樹, 村山正博, 中村好男 ; 心拍変動パワースペクトル解析を用いた動脈洞圧受容体刺激時の自律神経機能評価-Neck Suction 法による検討, 聖マリアンナ医大誌, **22**, 866-871 (1994)
- 21) 山下勝正, 吉岡利忠, 運動が生体に与える負担度の定量化に関する基礎的研究-クレアチンキナーゼを指標として, 体力研究, **80**, 132-139 (1992)
- 22) 山下勝正, 吉岡利忠 ; 運動に対する生体反応の個体差の要因-血清酵素活性値の個体内変動と個体間の差, 小野スポーツ科学, **1**, 103-114 (1993)
- 23) Yamashita-Goto, K., Yoshioka, T. ; Relationship between exercise-induced creatine kinase release and its activity in muscles, *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, **1**, 19-24 (1994)
- 24) 山本義晴 ; 生体にみられる“ゆらぎ”, *Jpn. J. Sports Sci.*, **14**, 471-474 (1995)
- 25) Yamamoto, Y., Hughson, R. J. ; Coarse-graining spectral analysis : new method for studying heart rate variability, *J. Appl. Physiol.*, **71**, 1143-1150 (1991)
- 26) Yamamoto, Y., Hughson, R. J., Peterson, J. C. ; Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis, *J. Appl. Physiol.*, **71**, 1136-1142 (1991)