

心拍と収縮期血圧の時系列周波数解析によるフラクタル成分にみられる起立負荷時の変化

Changes in the Fractal Component of Spectral Analysis of Heart Rate Variability and Systolic Blood Pressure Variability During the Head-Up Tilt Test

荒居 広明
佐藤 廣*¹
山本真千子*²
内田 昌嗣*³
中町 隆史*⁴
金子 隆*¹
有川 拓男*¹
坪光 雄介*¹
相澤 忠範*¹
飯沼 宏之*¹
加藤 和三*¹

Hiroaki ARAI, BS
Hiroshi SATO, MD*¹
Machiko YAMAMOTO, PhD*²
Masatsugu UCHIDA, MD*³
Takafumi NAKAMACHI, MD*⁴
Takashi KANEKO, MD*¹
Takuo ARIKAWA, MD*¹
Yusuke TSUBOKO, MD*¹
Tadanori AIZAWA, MD, FJCC*¹
Hiroyuki IINUMA, MD*¹
Kazuzo KATO, MD*¹

Abstract

Blood pressure and heart rate change are related to the level of physical activity, and are correlated with each other. Heart rate and blood pressure signals were investigated by coarse graining spectral analysis and changes in the harmonic and non-harmonic (fractal) power were examined during the head-up tilt test.

Fourteen healthy subjects, 9 men and 5 women (mean age 30.4 ± 1.0 years) completed the test protocol of 15 min supine rest followed by the head-up tilt (80°) test. Heart rate was measured continuously with standard bipolar leads and electrocardiography. A finger cuff was placed on the left index finger for beat-by-beat recording of systolic blood pressure based on the continuous noninvasive method, and the impulse train was stored on a personal computer for spectral analysis. The harmonic component, the integrated powers in the low-frequency and high-frequency regions, and the fractal component were then calculated. The fractal component was plotted on a log power versus log frequency plane with spectral index β estimated as the slope of the linear regression of this $1/f^\beta$ plot.

RR-interval was significantly shorter during the head-up tilt position than in the supine rest position with a marked reduction in the high-frequency power. The ratio of fractal component for total power was increased and the slope β of the $1/f^\beta$ relationship was significantly greater in the head-up tilt (1.61 ± 0.05) than in the supine rest (0.92 ± 0.07) position.

Systolic blood pressure showed a significant increase during head-up tilt, and marked increases in high-frequency power and fractal power. However, both the ratio of fractal component for total power and the slope β remained unchanged. Further studies are needed to clarify whether the slope β is essentially stable or variable in some conditions.

—J Cardiol 1999; 34(4): 211-217

心臓血管研究所附属病院 放射線部, *¹循環器内科: 〒106-0032 東京都港区六本木7-3-10; *²宮城大学 看護学部, 宮城; *³埼玉医科大学 第二内科, 埼玉; *⁴獨協医科大学 第一内科, 栃木

Department of Radiology, *¹Division of Cardiology, Cardiovascular Institute Hospital, Tokyo; *²Department of Nursing, Miyagi University, Miyagi; *³The Second Department of Internal Medicine, Saitama Medical School, Saitama; *⁴The First Department of Internal Medicine, Dokkyo University School of Medicine, Tochigi

Address for reprints: ARAI H, BS, Department of Radiology, Cardiovascular Institute Hospital, Roppongi 7-3-10, Minato-ku, Tokyo 106-0032

Manuscript received January 22, 1999; revised May 24, 1999; accepted June 25, 1999

Key Words

- Heart rate (heart rate variability)
- Spectrum analysis (fractal nature)

- Blood pressure (systolic blood pressure variability)
- Exercise tests (head-up tilt test)

はじめに

ヒトの心拍と心拍の間隔は一定ではなく揺らいでいる。この揺らぎを解析することによって心拍を制御している自律神経活動の評価がなされている¹⁻⁴⁾。心拍と心拍の間隔の時系列の周波数解析を行うと、周期的な調和振動成分と非調和振動成分に分離することができる⁵⁾。この非調和振動成分は白色雑音ではなく、 $1/f$ 成分と呼ばれ、周波数とパワーを対数変換すると負の直線相関関係を持つ。これはKobayashiら⁶⁾によって初めて報告された。 $1/f^\beta$ 型のスペクトルは自己相似(フラクタル)性を持ち、その特徴はスペクトル指数である β の値によって決まる⁷⁻⁹⁾。 β の値は起立負荷^{10,11)}、下半身陰圧負荷^{10,12)}、運動負荷¹³⁾などの身体的負荷により増加する。また、アトロピンにより β は増加する¹⁴⁾が、 β 遮断薬では β は不変である¹⁵⁾。また心不全¹⁶⁾の病的状態で増加することが報告されている。

一方、血圧と心拍数は圧受容体を介して密接に関連して変動している。また、収縮期血圧変動のスペクトル解析を行うと、心拍のスペクトルと同様に調和振動成分と非調和振動成分がある¹⁷⁾。収縮期血圧の非調和振動成分は、心拍の非調和振動成分が β で特徴づけられるのと同じように β で特徴づけられる。Butlerら¹⁶⁾は、心不全では心拍の β は増加するが収縮期血圧の β は不変であることを報告しているが、収縮期血圧の非調和振動成分の β に関しては検討が少なく不明な点が多い。そこで、本研究では起立負荷試験時の収縮期血圧の時系列を周波数解析して、その調和振動成分と非調和振動成分およびスペクトル解析によって得られる諸指数がどのように変化するかを調べた。

対象と方法

1. 対 象

被験者は本研究の趣旨を理解したうえで同意を得た健康な男性9例、女性5例(平均年齢30.4 ± 1.0歳)である。

2. 方 法

1) 起立負荷試験

起立負荷試験は足底板付きのtilt台(ミナト製)を用いて行った。まず、安静仰臥位の状態で、胸部双極誘導心電図を心電計(Hewlett Packard製)を用いて連続的に計測した。また、血圧は左手第3指に非侵襲的連続血圧測定用のカフ(Finapres 2300, Ohmeda製)を巻いて測定した。校正用に1分間隔で右上腕に血圧測定用カフを巻いて監視した。血圧、心拍数が安定したことを確認した後、起立負荷試験を施行した。15分間の安静仰臥位の後、電動式モーターで試験台を80°に傾け15分間の受動起立の状態とした。

2) スペクトル解析

心電計からのアナログ信号をTTL信号出力アンプ(フクダ電子製)に接続し、R波に同期したTTL信号をA/D変換器(PCN-2198, PCテクノロジー製)に送り、1,000 Hzで計測して、パーソナルコンピューター(PC9801RX, 日本電気製)に取り込み、連続するRR間隔を記録した。収縮期血圧は、Finapresからの連続血圧値のうち、心電計からの各RR間隔内の最大値を収縮期血圧として離散的な時系列値を上記のパーソナルコンピューターに保存した。RR間隔および収縮期血圧の変動のスペクトル解析の対象となる時系列は、安静仰臥位15分間のうち最後の5分間の時系列と、起立開始後10分から15分までの5分間の時系列とした。

これらの時系列をYamamotoらが考案した粗視化スペクトル法(coarse graining spectral analysis: CGSA法)^{5,9,10,12-16)}に従いスペクトル解析した。CGSA法により、時系列データのスペクトルを調和振動成分と非調和振動成分に分離した。非調和振動成分のパワーが周波数 f に対して、 $1/f^\beta$ 型になるとき、このパワーはフラクタル性を持つという。このフラクタルパワーと周波数を両対数で展開して、ナイキスト周波数の0.025-0.5倍の範囲を一回帰式にあてはめて、傾きの絶対値 β を求めた。RR間隔と収縮期血圧の安静仰臥位時および起立負荷時の時系列とCGSA法により分離された非調和振動成分のパワーの周波数特性の典型

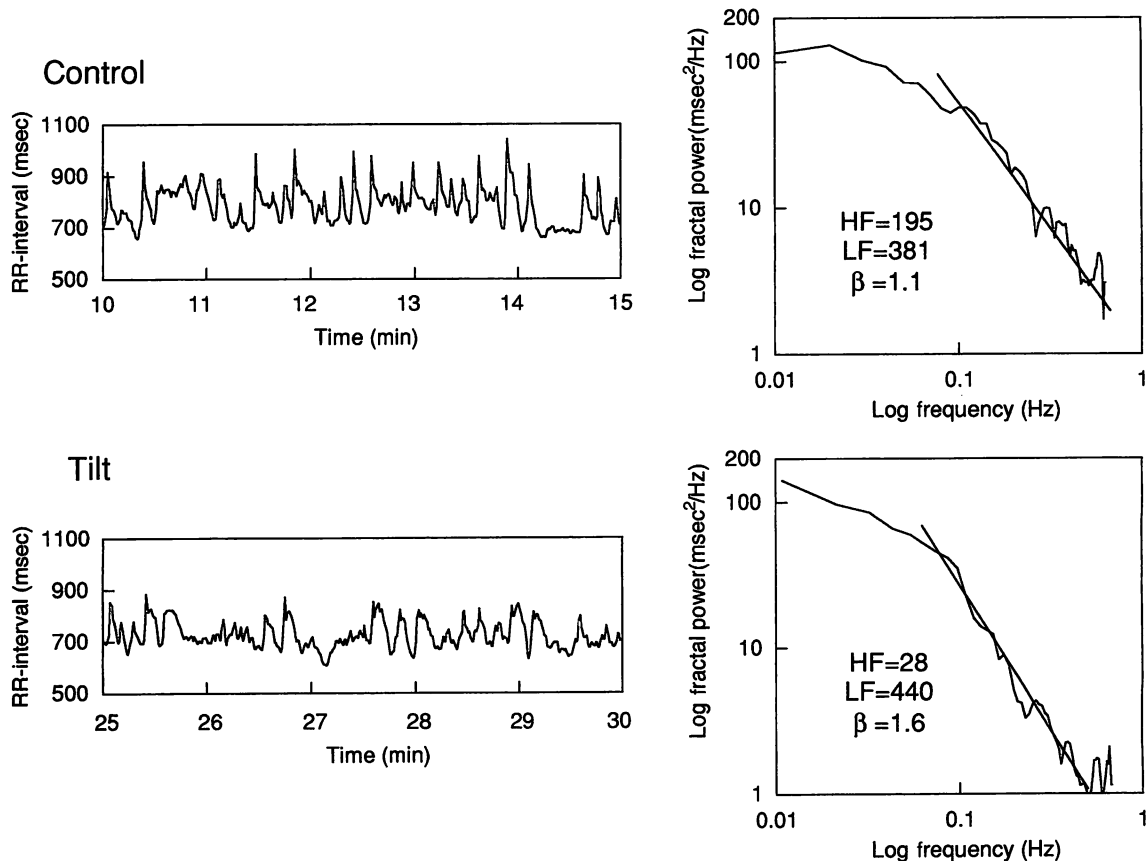


Fig. 1 RR-interval series(left column) and fractal component of heart rate variability(right column) during supine rest (upper row) and the head-up tilt test(lower row)

HF = high-frequency power; LF = low-frequency power; β = slope of the log fractal power versus log frequency.

的な例を **Figs. 1, 2** に示す。 β は大きいほど心拍変動の複雑さが小さいことを示す。一方、調和振動成分パワーのうち、0-0.15 Hz の成分を低周波成分パワー、0.15-1.0 Hz の成分を高周波成分パワーとした。調和振動成分と非調和振動成分の和を時系列データのスペクトルの全パワーとした。本研究ではスペクトル解析より得られた諸指標の常用対数を比較した。また、 $\log(\text{高周波成分パワー})$ ならびに $(\text{高周波成分パワー})/(\text{全パワー})$ を迷走神経活動の指標とし、 $(\text{低周波成分パワー})/(\text{高周波成分パワー})$ を交感神経活動の指標と考えた。

測定値は平均±標準誤差で表し、統計処理は *t* 検定により行い、 $p < 0.05$ を有意差の判定とした。

結 果

RR 間隔と収縮期血圧のスペクトル解析の結果を

Table 1 に示す。

1. RR 間隔のスペクトル解析

安静仰臥位時に比べ起立負荷時では、RR 間隔が 965.0 ± 42.8 から 769.4 ± 29.7 msec へと有意 ($p < 0.0001$; **Fig. 1**) に短縮した。また、CGSA 法による周波数解析の結果、起立負荷時の全パワーは安静仰臥位時に比べて有意に減少し ($p < 0.01$)、調和振動成分パワーも安静仰臥位時に比べて有意に減少した。調和振動成分のうち低周波成分パワーは安静仰臥位時に比べて有意な差はなかったが、高周波成分パワーは起立負荷時に有意に減少した ($p < 0.0001$; **Table 1**)。迷走神経活動を表す高周波成分の全パワーに対する割合は減少したが、交感神経活動を表す低周波成分と高周波成分の比は増加した ($p < 0.01$)。フラクタルパワーは起立負荷によって変化しなかったが、フラクタルパ

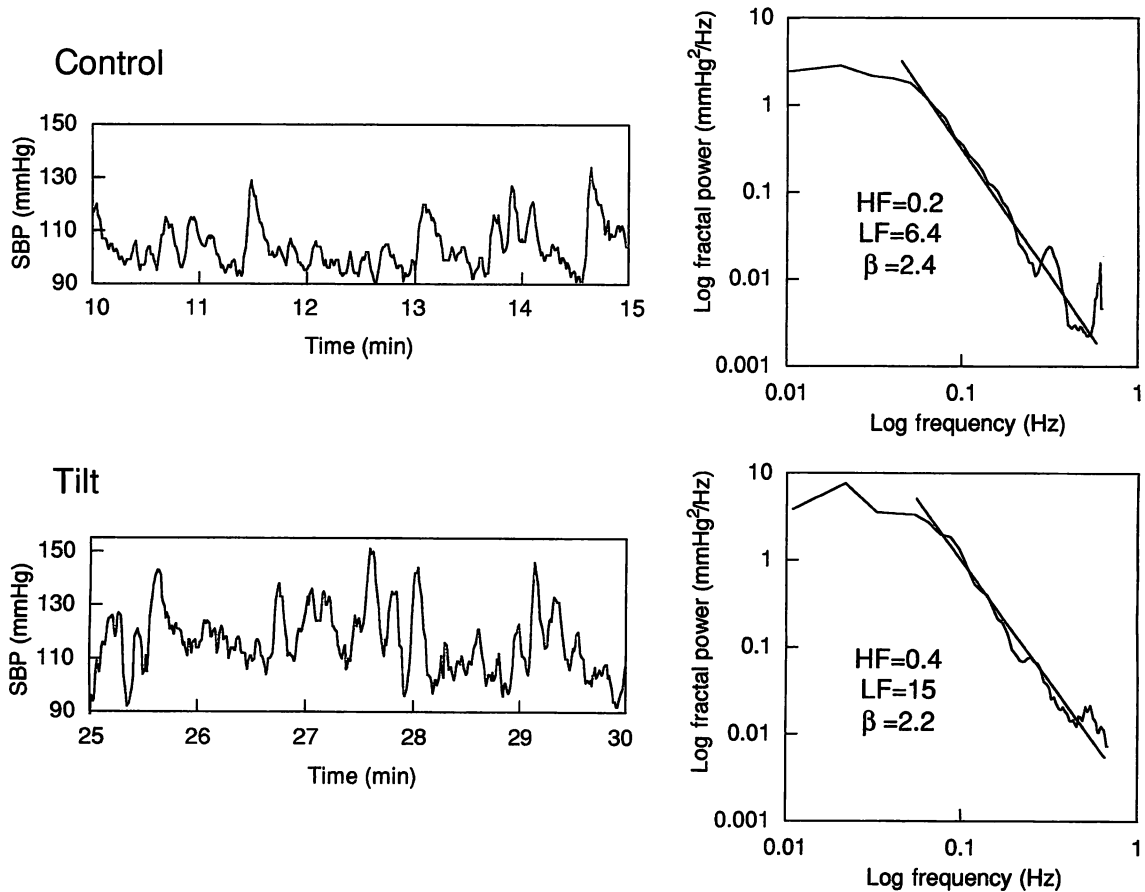


Fig. 2 Systolic blood pressure series (left column) and fractal component of systolic blood pressure variability (right column) during supine rest (upper row) and the head-up tilt test (lower row)
 SBP = systolic blood pressure. Other abbreviations as in Fig. 1.

ワーの全パワーに対する割合は起立負荷時に増加した。βは安静仰臥位時の0.92 ± 0.07に比べ、起立負荷時は1.61 ± 0.05と増加した(p < 0.0001; Fig. 3)。

2. 収縮期血圧のスペクトル解析

安静仰臥位時に比べ起立負荷時には収縮期血圧が110.7 ± 3.5から125.5 ± 3.3 mmHgへと有意に増加した(Fig. 2)。起立負荷時には全パワーは有意な変化はなく、調和振動成分パワーも有意な変化はなかった。調和振動成分のうち低周波成分パワーは有意な変化はなかったが、高周波成分パワーは増加した(p < 0.001; Table 1)。起立負荷時にフラクタルパワーは増加したが(p < 0.05)、フラクタル成分の全パワーに対する割合に有意な変化はなかった(Table 1)。βも有意な変化はなかった(Fig. 3)。

考 察

心拍間隔と収縮期血圧の安静仰臥位時および起立負荷時の時系列のスペクトル解析を行った。心拍間隔の時系列のスペクトル解析は、自律神経による心拍の変調を定量的に評価することができる^{3,18)}。過去の研究では、仰臥位の自発呼吸時のスペクトル解析の結果、心拍間隔の時系列のβは1.0、収縮期血圧の時系列のβは2.3であった^{10,12,15)}。また、Butlerら¹⁶⁾は健常者および心不全患者のスペクトル解析を試み、フラクタル成分は両者とも全パワーに対し65-80%、健常者の心拍間隔の時系列のβは1.14、心不全患者では1.40、また、収縮期血圧の時系列のβは両者で変わらず、2.3-2.4という値を報告している。本研究では、心拍間隔の時系列については、フラクタルパワーは全パ

Table 1 Spectral analysis of heart rate variability and systolic blood pressure variability

Variable	Heart rate variability			Blood pressure variability		
	Supine	Tilt	<i>p</i> value	Supine	Tilt	<i>p</i> value
Log (TP)	2.93±0.09	2.72±0.07	<0.01	1.13±0.07	1.29±0.07	NS
Log (HP)	2.58±0.1	2.2±0.09	<0.001	0.68±0.09	0.69±0.06	NS
Log (LF)	2.05±0.14	2.04±0.1	NS	0.60±0.10	0.57±0.06	NS
Log (HF)	2.37±0.11	1.55±0.12	<0.0001	-0.39±0.08	-0.11±0.11	<0.001
HF/TP	0.3±0.03	0.08±0.01	<0.0001	0.05±0.01	0.07±0.03	NS
LF/HF	0.79±0.21	4.76±1.37	<0.01	18.02±5.25	7.5±1.8	NS
Log (FP)	2.65±0.08	2.56±0.07	NS	0.90±0.07	1.12±0.10	<0.05
FP/TP(%)	53.48±3.5	68.91±2.55	<0.01	61.23±4.45	70.56±4.56	NS
Slope (β)	0.92±0.07	1.61±0.05	<0.0001	1.80±0.09	1.79±0.12	NS

Values are mean \pm SD.

TP=total power; HP=harmonic power; FP=fractal power. Other abbreviations as in Fig. 1.

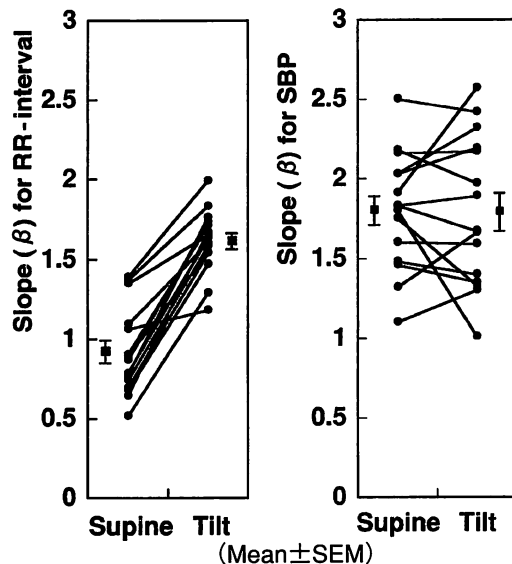


Fig. 3 Line graph showing the slope of the log fractal power versus log frequency for RR-interval series (left) and systolic blood pressure series (right) during supine rest and the head-up tilt test

The slope of the RR-interval was significantly higher in the head-up tilt test than supine rest ($p < 0.00001$). However, the slope of the SBP did not change significantly.

Abbreviations as in Figs. 1, 2.

ワーに対し安静仰臥位時の53%に対して起立負荷時には69%に増加し、 β は0.92から1.61と増加した。起立負荷時での β の増加はButlerらの報告と同じ所見であった。また、収縮期血圧の時系列の β は起立負荷では変わらず、安静仰臥位時、起立負荷時ともに約

1.8であった。

心拍間隔の時系列の β は起立負荷時に増加した。安静仰臥位時に対して起立負荷時には、流体である血液が重力の影響により下半身に貯留し、静脈還流が減少する。その結果、全身に一定の血液供給を確保するために心拍数が増加する。この心拍数の増加はlog(高周波成分パワー)、(高周波成分パワー)/(全パワー)の減少と(低周波成分パワー)/(高周波成分パワー)の増加により、迷走神経活動の低下と交感神経活動の亢進によってもたらされると考えられた。この効果は、仰臥位にて下半身を陰圧にして静脈血流量を増加させたときの効果に似ており、このときも β が増加した¹²⁾。また、心不全患者でも β が増加している¹⁶⁾。起立負荷時は安静仰臥位時に比べ心拍数が増加しており心臓に負荷がかかっている。また、心不全患者は健常者と同じ心拍出量を確保しようとするため心臓の機能の正常な部分により負荷をかける必要がある。このような状態が、心拍を決定する種々のフィードバック機構を持つ因子のうちいくつかを、フィードバックがきかない極限状況にまで至らしめ、調整可能な範囲を狭くしていると考えられることができる。このことは、心拍を司る機構の複雑性を減少させているといえる。

本研究では、収縮期血圧の時系列のスペクトル解析の結果、調和振動成分のうち高周波成分パワーは増加したが、フラクタル成分の全パワーに対する割合や β は変化しなかった。起立負荷により β が不変であったことは、収縮期血圧の時系列の複雑性が安静仰臥位時

と起立負荷時で不変であったことを意味する。この結果は下半身陰圧負荷試験や健常者と心不全患者との比較と同様の結果になっている^{12,16)}。血圧の制御は自律神経活動、心拍数、心拍出量や血管の収縮性、ほかにも多数の因子に依存している¹⁷⁾。これらの因子が安静仰臥位時のときと同様に起立負荷時にも収縮期血圧の制御に関与していると考えられる。

今回の検討では、収縮期血圧の β は変化しなかったが、収縮期血圧の β が本質的に不変であるのか、あるいは何らかの条件で変化するかは、さらに調べる必要があると思われた。そして、収縮期血圧の複雑な調整機能を司る因子の抽出が可能になることを期待する。

要 約

血圧と心拍数は身体活動の程度に応じて対応すべく、相関して変動していると考えられる。そこで、心拍の間隔と収縮期血圧の時系列を周波数解析して、その調和振動成分と非調和振動成分が起立負荷試験によりどのように変化するかを調べた。

対象は健康な男性9例、女性5例(平均年齢 30.4 ± 1.0 歳)である。安静仰臥位15分間の後、電動式モーターで試験台を 80° に傾け15分間の受動起立の状態とした。胸部双極誘導心電図と左手第3指の非侵襲的連続血圧を測定して、連続するRR間隔と収縮期血圧の離散的な時系列値をパーソナルコンピューターに保存し粗視化スペクトル法に従いスペクトル解析して、調和振動成分(低周波成分パワーと高周波成分パワー)と非調和振動成分(フラクタルパワー)に分離した。そして、フラクタルパワーの周波数に対する傾きの絶対値スペクトル指数(β)を求めた。

起立負荷時には安静仰臥位時に比べて、RR間隔が有意($p < 0.0001$)に短くなった。RR間隔の低周波成分パワーは有意な差はなかったが、高周波成分パワーは有意に減少した。また、フラクタルパワーの全パワーに対する割合は増加し、 β は 0.92 ± 0.07 (安静仰臥位時)から 1.61 ± 0.05 (起立負荷時)に増加した。

また、収縮期血圧は起立負荷時に有意に増加し、収縮期血圧の低周波成分パワーは不変であったが、高周波成分パワーは増加した。フラクタルパワーは増加したが、フラクタルパワーの全パワーに対する割合は不変であった。収縮期血圧の β は変化しなかったが、この値が本質的に不変であるのか、あるいは何らかの条件で変化するかは、さらに調べる必要があると思われた。

J Cardiol 1999; 34(4): 211-217

文 献

- 1) Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Berger AC, Cohen RJ: Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science* 1981; **213**: 220-222
- 2) Berger RD, Saul JP, Cohen RJ: Transfer function analysis of autonomic regulation: I. Canine atrial rate response. *Am J Physiol* 1989; **256**: H142-H152
- 3) Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R, Pizzinelli P, Sandrone G, Malfatto G, Dell'Orto S, Piccaluga E, Turiel M, Baselli G, Cerutti S, Malliani A: Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circ Res* 1986; **59**: 178-193
- 4) Saul JP: Beat-to-beat variations of heart rate reflect modulation of cardiac autonomic outflow. *News Physiol Sci* 1990; **5**: 32-37
- 5) Yamamoto Y, Hughson RL: Coarse graining spectral analysis: A new method for studying heart rate variability. *J Applied Physiol* 1991; **71**: 1143-1150
- 6) Kobayashi M, Musha T: 1/f fluctuation of heartbeat period. *IEEE Trans Biomed Eng* 1982; **29**: 456-457
- 7) Higuchi T: Relationship between the fractal dimension and the power law index for a time series: A numerical investigation. *Physica* 1990; **46D**: 254-264
- 8) Goldberger AL: Fractal electrodynamics of the heart beat. *Ann N Y Acad Sci* 1990; **504**: 403-409
- 9) Yamamoto Y, Hughson RL: Extracting fractal components from time series. *Physica* 1993; **68D**: 250-264
- 10) Butler GC, Yamamoto Y, Xing HC, Northey DR, Hughson RL: Heart rate variability and fractal dimension during orthostatic challenges. *J Appl Physiol* 1993; **75**: 2602-2612
- 11) Lipsitz LA, Mietus J, Moody GB, Goldberger AL: Spectral characteristics of heart rate variability before and during postural tilt: Relations to aging and risk of syncope. *Circulation* 1990; **81**: 1803-1810
- 12) Butler GC, Yamamoto Y, Hughson RL: Fractal nature of short-term systolic BP and HR variability during lower

- body negative pressure. *Am J Physiol* 1994; **267**(Suppl I): R26–R33
- 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* 1993; **74**: 875–881
- 14) Yamamoto Y, Nakamura Y, Sato H, Yamamoto M, Kato K, Hughson RL: On the fractal nature of heart rate variability in humans: Effects of vagal blockade. *Am J Physiol* 1995; **269**(Suppl IV): R830–R837
- 15) Yamamoto Y, Hughson RL: On the fractal nature of heart rate variability in humans: Effects of data length and beta-adrenergic blockade. *Am J Physiol* 1994; **266**(Suppl I): R40–R49
- 16) Butler GC, Ando S, Floras JS: Fractal component of variability of heart rate and systolic blood pressure in congestive heart failure. *Clin Sci* 1997; **92**: 543–550
- 17) Wagner CD, Mrowka R, Nafz B, Persson PB: Complexity and “chaos” in blood pressure after baroreceptor denervation of conscious dogs. *Am J Physiol* 1995; **269**(Suppl V): H1760–H1766
- 18) Saul JP, Albrecht P, Berger RD, Cohen RJ: Analysis of long term of heart rate variability: Methods, 1/f scaling and implications. *Comp Cardiol* 1988; **14**: 419–422