

心拍ゆらぎ非線型解析による スポーツメディカルチェック

山 形 大 学 八 巻 通 安

Nonlinear Analysis on Heart Rate Variability for the Sports Medical Check

by

Michiyasu Yamaki

*Department of Medical informatics,
Yamagata University School of Medicine,
Yamagata University*

ABSTRACT

Background : It is known that heart rate shows a complex behavior, attributed to the nonlinear nature of its generating and modulating system. Analyzing the nonlinear properties in the heart rate variability (HRV). may deepen the understanding of the pathophysiological modulation of HRV.

Methods : In 34 patients (mean age 65 ± 9 years, 20 ischemic heart disease, 4 cardiomyopathy, 3 valvular heart disease, 6 chest pain syndrome and one congestive heart failure due to renal dysfunction), a CM5 electrocardiogram was recorded from 5:00 to 6:00 AM by use of the digitalized monitoring system (FS-2100, Fukuda Denshi Co., Tokyo, Japan). With regard to the time series of RR intervals, two non-linear measures, the largest Lyapunov exponent and the correlation dimension were calculated. The following standard HRV index were also measured: 1). mean heart rate, 2) standard deviation of NN intervals (SDNN), 3) the percentage of differences between adjacent NN intervals > 50 msec (% NN50), 4) low frequency (LF, 0.04-0.15 Hz),

5) high frequency (HF, 0.15-0.40 Hz). The hemodynamic indices were compared with those heart rate variability measures.

Results : The largest Lyapunov exponent decreased age-dependently, as well as SDNN or % NN50. The largest Lyapunov exponents were also correlated with SDNN ($r=0.85$, $p<0.01$). The patients were divided into two groups; elevated LVEDP (left ventricular end-diastolic pressure ≥ 14 mmHg, $n=7$). or normal LVEDP (<14 mmHg, $n=24$). Elevated LVEDP group showed lower SDNN and lower Lyapunov exponents, compared with normal LVEDP group. However, correlation dimensions were independent from hemodynamic parameters.

Conclusion : Non-linear analysis can detect the hemodynamic impairment in patients with myocardial dysfunction. Therefore, this will be used for the purpose of sports medical check. (271 ward)

要 旨

【目的】我々は心拍ゆらぎ変動の時系列データについて非線形解析を行い時系列データのフタクトル性の指標：相関次元と、集束性の指標：リアプノフ指数を測定した。さらにこれらの指標と血行動態との相関から非線形心拍変動指標の持つ意義について検討し、スポーツメディカルチェックへの応用可能性を検討した。

【方法】当院にて心臓カテーテル検査にて血行動態の評価を行った34例について、モニター心電図記録をもとにRR時系列データを作成し標準偏差 (SD), % RR50, 高周波成分 (HF), 低周波/高周波 (LF/HF), 相関次元, リアプノフ指数を求め、これらの指標と血行動態諸指標との相関を検討した。

【結果】リアプノフ指数は年齢に依存して減少し、SDと相関を認めた。また左室拡張末期が上昇した群においてSDおよびリアプノフ指数の減少を認めた。

【結語】リアプノフ指数は血行動態を反映する指標となり、スポーツメディカルチェックへの応用が可能であると思われた。

緒 言

近年、高齢者を含む一般へのスポーツの普及とともに循環系の異常をスクリーニングする必要性が増してきている。心拍計測は簡便かつ、非侵襲的でありスポーツにおけるメディカルチェックに最も適した方法のひとつである。

心拍には心拍変動と呼ばれるゆらぎがあり、最近このゆらぎ測定から自律神経機能の推定などが主に線形解析なされている。しかし生体现象は本来、非線形的要素が多く含まれ心拍変動にも非線形性が証明されている¹⁻⁴⁾。現在、心拍ゆらぎを解析する上で、適切な非線形解析の適合が望まれる。近年、非線形解析のひとつであるカオス解析が注目されており、律動的な現象が不規則になる過程を理論付けている。私どもは心拍ゆらぎにこのカオス解析を応用することで、心拍を制御する系の異常を認識することが可能ではないかと考えた。

そこで本研究の目的は、心拍ゆらぎに対する非線形解析を取り入れることが心拍制御系の異常を検出できるか否かを明らかにし、スポーツメディカルチェックへの応用性を検討することである。

1. 研究方法

対象は、当院にて心臓カテーテル検査を施行し血行動態指標を測定した患者34名。基礎疾患として、心筋症4例、弁膜症3例、急性心筋梗塞7例、陳旧性心筋梗塞2例、労作性狭心症5例、異型狭心症6例、胸痛症候群6例、慢性腎不全に伴う、うっ血性心不全1例であった。血行動態指標としては、心胸郭比、左室拡張末期圧 (LVEDP)、右室拡張末期圧 (RVEDP)、平均肺動脈圧 (PA mean)、平均肺動脈楔入圧 (PCW mean)、心係数 (CI) を用いた。心拍変動指標に関しては、心臓カテーテル検査施行日の翌日午前4時から6時の間で就寝中の1時間分のCM5誘導心電図をフクダ電子製モニター心電図システムFS-2100で測定し、フクダ電子製モニター心電図解析システムDMW-9000Hにて4msごとにAD変換しRR時系列データとした。それらにおいて線形解析の指標として、平均RR間隔、RR間隔変動の標準偏差 (SD)、%RR50 (近接する正常心拍RR間隔の変動が50ms以上である頻度) を、また高速フーリエ変換にて求めたRR間隔変動高周波成分 (HF, 0.15-0.40 Hz)、低周波成分 (LF, 0.04-0.15 Hz) / 高周波成分比 (LF/HF) を、非線型解析の指標としては複雑性の指標として相関次元⁵⁾を、初期値鋭敏性の指標としてリアプノフ指数⁶⁾を求めた。その上で、臨床上的指標及び心拍変動指

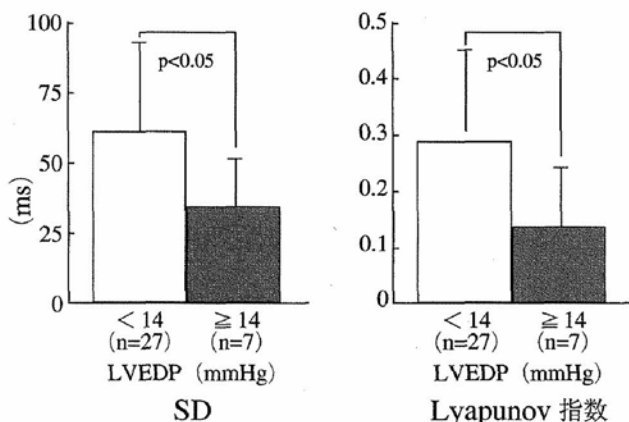


図1 Lyapunov 指数とSD, HFとの相関 SD=RR間隔の標準偏差, HF=高周波成分

標の相関を求め検討した。

1. 1 統計的検討

計測値は平均±標準偏差で表した。2群間の平均値の差の検討はunpaired t検定を用いた。相関関係はSpearman's rank correlationを用いて検討した。有意水準は0.05以下とした。

2. 研究結果

2. 1 諸指標の相関

年齢とSD ($r=-.681$, $p<0.0001$), HF ($r=-.467$, $p<0.01$), リアプノフ指数 ($r=-.598$, $p<0.0001$) との逆相関を認め、リアプノフ指数にSDとの正相関 ($r=-0.85$, $p<0.0001$) を認めた (図1)。リアプノフ指数は%RR50 ($r=0.421$, $p<0.05$) およびHF ($r=0.482$, $p<0.01$, 図1) に、またHFとCIに弱い正相関 ($r=0.417$, $P<0.05$) を認めた。リアプノフ指数は年齢に依存して減少した ($r=0.60$, $p<0.01$, 図2)。

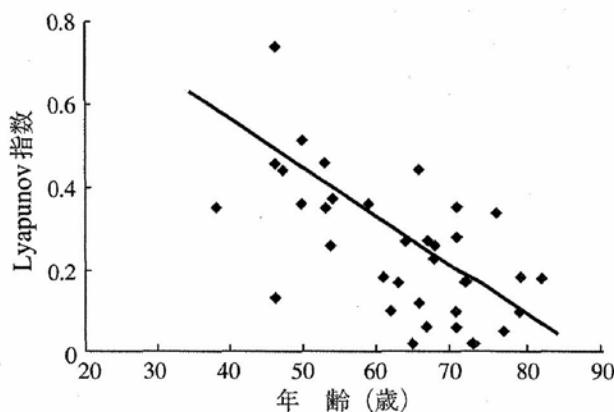


図2 Lyapunov 指数と年齢との関係

2. 2 血行動態との対比

また、今回の検討においてLVEDPで対象を2群に分け心拍変動指標を比較検討したところLVEDPが上昇した群においてSDおよびリアプノフ指数の減少を認めた (表1, 図3)。一方、その他の血行動態指標でのグループ分けによる検討においては有意差は認められなかった。相関

表1 左室拡張末期圧上昇群 (LVEDP ≥ 14) と正常群 (LVEDP < 14) における諸指標の差

	合 計	LVEDP < 14	LVEDP ≥ 14
症例数	34	27	7
年齢	歳 62.8 $\pm$ 11.4	61.1 $\pm$ 10.8	69.3 $\pm$ 11.9
心胸郭比	% 49.9 $\pm$ 5.4	49.2 $\pm$ 4.9	52.6 $\pm$ 6.5
右室末期圧	mmHg 4.97 $\pm$ 2.18	4.81 $\pm$ 2.27	5.57 $\pm$ 1.18
平均肺動脈圧	mmHg 14.5 $\pm$ 3.1	14.2 $\pm$ 3.1	16.0 $\pm$ 2.5
肺動脈楔入圧	mmHg 6.56 $\pm$ 1.94	6.41 $\pm$ 1.9	7.14 $\pm$ 2.34
心係数	2.94 $\pm$ 0.75	2.93 $\pm$ 0.74	3.00 $\pm$ 0.83
RR 間隔	ms 952 $\pm$ 141	971 $\pm$ 142	881 $\pm$ 115
SD	ms 55.7 $\pm$ 30.7	61.1 $\pm$ 31.4	35.0 $\pm$ 16.3 *
% RR50	% 3.87 $\pm$ 6.88	4.69 $\pm$ 7.52	0.72 $\pm$ 0.95
HF	ms ² 109 $\pm$ 158	130 $\pm$ 172	29.8 $\pm$ 25.4
LF/HF	9.39 $\pm$ 6.48	9.92 $\pm$ 7.02	7.36 $\pm$ 3.35
相関次元	8.73 $\pm$ 1.84	8.87 $\pm$ 1.89	8.18 $\pm$ 1.64
Lyapunov 指数	0.26 $\pm$ 0.16	0.29 $\pm$ 0.16	0.14 $\pm$ 0.10 *

略語：SD = RR 間隔の標準偏差，% RR50 = 近接する正常心拍 RR 間隔の変動が 50 ms 以上である頻度，HF = 高周波成分，LF = 低周波成分

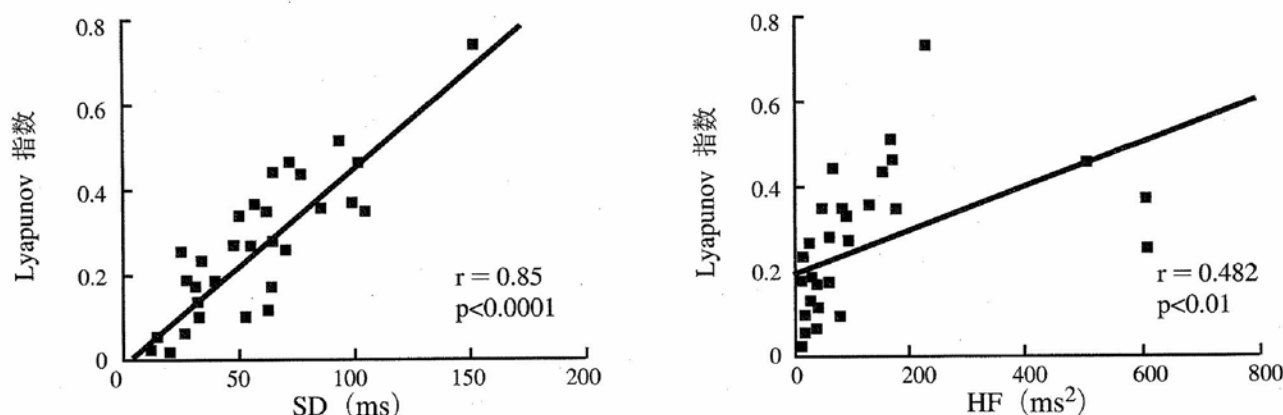


図3 LVEDP < 14 群と ≥ 14 群間の SD, Lyapunov 指数の差異
LVEDP = 左室拡張末期圧, SD = RR 間隔の標準偏差, HF = 高周波成分.

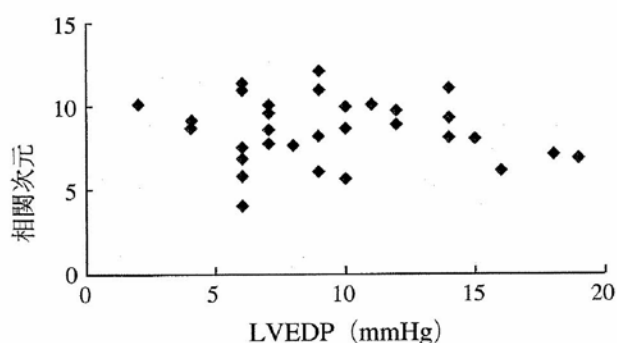


図4 LVEDP と相関次元との関係

次元と LVEDP の間には相関関係は認められなかった (図4).

3. 考 察

今回の検討において RR 間隔変動の標準偏差

(SD) および非線型解析の指標で初期値鋭敏性を表すリアプノフ指数が LVEDP で分けた 2 群間において有意差を認め、両者は血行動態異常を反映する指標となることが推測された。一方、自律神経の活動性の指標である RR 間隔変動高周波成分 (HF)、低周波成分/高周波成分比 (LF/HF) は血行動態異常を十分に反映するものではなかった。RR 間隔変動の標準偏差は心拍変動のうち比較的長期的の変動性の指標とされ数分から数 10 分程度の変動を反映する。これに対し HF や LF/HF は数秒程度の変動性を反映するものであるため、RR 間隔変動の標準偏差と HF, LF/HF は基本的に異なる病態生理の指標であることが考えられる。

ここで血行動態異常は比較的長期の心拍変動に反映されることが示されたことは心拍変動の成因を知るうえでも興味深いものと思われる。

一方、心拍変動は心臓突然死を予測することが知られている。Martin⁷⁾は5名の突然死患者においてRR間隔変動の標準偏差が低値であったと述べた。またAlgraら⁸⁾は比較的大規模の集団で心拍変動を検討し、心拍変動の0.05-0.5 Hz成分または0.02-0.05 Hz成分の減少は心臓突然死の予測因子であると述べた。このいずれもが長期の心拍変動成分であることから、長期的変動成分の減少が心臓突然死の予測因子であることを支持する報告である。このような長期的心拍変動の機序は明確でないが、中枢神経系またはホルモン系の変動などが影響している可能性もあり今後の検討課題である。

心拍変動の非線形解析の意義については今まで十分な検討はなされていない。本研究において示された初期値鋭敏性を表すリアプノフ指数がLVEDP上昇例で減少するという結果は病態生理との関連性でいう意味でリアプノフ指数の意義を示した初めてのデータである。リアプノフ指数は初期値鋭敏性を表す指標であり、リアプノフ指数が血行動態異常例で低下するということは、初期状態の変動すなわちRR間隔の突然の変化に対応した心拍変動が出現しにくいことを表している。なぜこのような現象が血行動態障害例で生じるのかについては大変興味深い問題であるが、やはり今後の検討課題である。

心拍変動は両者とも簡単に測定できることからスポーツメディカルチェックに最も適した方法のひとつである。今回、心拍変動のうちRR間隔変動の標準偏差(SD)および非線形解析の指標、リアプノフ指数は血行動態異常を反映する指標と考えられスポーツメディカルチェックのうえで意義深いと考えられる。今後さらに症例の追加や経時的な病態の変化と心拍変動指標の相関に関する

追跡調査を行ってゆく予定である。

4. 結 語

心拍変動のうちRR間隔変動の標準偏差(SD)および非線形解析の指標、リアプノフ指数は血行動態異常を反映する指標と考えられた。心拍変動は簡単に測定できることから、スポーツメディカルチェックに応用が可能と思われた。

文 献

- 1) Lombardi F.; Chaos theory, heart rate variability, and arrhythmic, *Circulation*, 101: 8-10 (2000)
- 2) Pikkujamsa S.M., Makikallio T.H., Sourander L.B., Raiha I.J., Puukka P., Skytta J., Peng C.K., Goldberger A.L., Huikuri H.V.; Cardiac interbeat interval dynamics from childhood to senescence: comparison of conventional and new measures based on fractals and chaos theory, *Circulation*, 100:393-9 (1999)
- 3) Makikallio T.H., Koistinen J., Jordaens L., Tulppo M.P., Wood N., Golosarsky B., Peng C.K., Goldberger A.L., Huikuri H.V.; Heart rate dynamics before spontaneous onset of ventricular fibrillation in patients with healed myocardial infarcts, *Am. J. Cardiol*, 83:880-4 (1999)
- 4) Ho K.K., Moody G.B., Peng C.K., Mietus J.E., Larson M.G., Levy D., Goldberger A.L.; Predicting survival in heart failure case and control subjects by use of fully automated methods for deriving nonlinear and conventional indices of heart rate dynamics, *Circulation*, 96:842-8 (1997)
- 5) Grossberger T.M., Procaccia I.; Measuring the strangeness of a strange attractor, *Physica D*, 9: 198-208 (1983)
- 6) Persson P.B., Wagner C.D.; General principles of chaotic dynamics, *Cardiovasc Res.*, 31:

332-341 (1996)

- 7) Martin G.J., Magid N.M., Myers G., Barnett P.S., Schaad J.W., Weiss J.S., Lesch M., Singer D.H.; Heart rate variability and sudden death secondary to coronary artery disease during ambulatory electrocardiographic monitoring,

Am. J. Cardiol., 60: 86-9 (1987)

- 8) Algra A., Tijssen J.G., Roelandt J.R., Pool J., Lubsen J.; Heart rate variability from 24-hour electrocardiography and the 2-year risk for sudden death, *Circulation*, 88: 180-5 (1993)