

最小自乗余弦スペクトル解析による中高齢者の心拍変動の特性

東風谷 祐子, 疋田 あかり, 市丸 雄平
(平成 24 年 1 月 31 日査読受理日)

Characteristics of Heart Rate Variability in Middle-aged and Elderly People by using Cosine Spectrum Method

KOCHIYA, Yuko HIKITA, Akari and ICHIMARU, Yuhei
(Accepted for publication 31 January 2012)

キーワード：心拍, 呼吸性不整脈, 高齢者, 最小自乗余弦スペクトル解析

Key words : heart rate, respiratory sinus arrhythmia, elderly, cosine spectrum method

1. 緒言

我が国の総人口に占める 65 歳以上人口の割合を示す高齢化率は, 平成 22 年 10 月 1 日時点で 23.1% であり, 上昇しつづけている。人口の高齢化に伴い, 各種疾患を有する者の割合は増加し, 平成 20 年の患者調査では高齢者の受療率が他の年齢階級に比べて高い水準にあることが示されている。その背景として, 加齢に伴う身体的・生理的变化が生じ, 臓器の機能低下がもたらされることがあげられる。その一つに, 心機能や自律神経機能の低下があり, これらの機能低下は高血圧関連疾患や心疾患の予後不良の一因になっている。自律神経系は, 交感神経系と副交感神経系より構成されており, 内臓器官を支配し, 生体の恒常性を保つための神経性調節機能をつかさどる。心臓自律神経活動を評価する非侵襲的方法として, 心拍変動が用いられている。臨床では冠動脈疾患, 不整脈, 心不全, 高血圧などの心血管疾患の診断や予後評価, 糖尿病患者の自律神経機能評価に応用されている。また, 心拍変動解析は, 臨床以外においても広く用いられており, 睡眠の評価, 運動強度の推定, 近年では情報化社会における精神作業負担やリラクゼーション効果に関する研究などがあげられる。

心拍変動は, 呼吸による影響を受け, 吸気時に心電図 RR 間隔は短縮し, 呼気時に延長する¹⁾²⁾。この呼吸に従った心拍の変動は呼吸性不整脈 (Respiratory Sinus Arrhythmia: RSA) と呼ばれ, スペクトル解析により呼吸の周期に一致した周波数帯域 (0.15-0.4 Hz) に認められ, 0.15 Hz 以下は低周波領域であり LF (Low Frequency) 成分, 0.15 Hz 以上は高周波数帯域であることから HF (High Frequency) 成分とも呼ばれる。この呼吸性変動の遠心路は副交感神経である。RSA の振幅は, 呼吸の周波数が低くなるにつれて増大し, 0.1 Hz で最大値を示すことが報告されており³⁾⁴⁾, RSA 振幅による副交感神経機能

の測定には呼吸をコントロールすることが必要とされている。私たちは, 以前に最小自乗余弦スペクトル解析法による RSA 振幅を測定する自動解析システムを構築し, 若年女性の RSA 振幅を検討した⁵⁾。本方法は, 呼吸性不整脈の振幅を絶対値として評価することが可能である。今回, 高齢者を対象として, 0.1 Hz にコントロールした制御呼吸を行い, 同様の解析システムにより RSA 振幅特性について検討したので報告する。

2. 方法

2.1 対象と方法

対象は, 首都圏の住民を対象に実施した公開講座に参加し, 心電図計測を行った 46 歳から 84 歳の男女 87 名 (男性 30 名, 女性 57 名) とした。平均年齢は, 66.4 ± 6.4 歳 (男性 68.1 ± 4.7 歳, 女性 65.5 ± 7.0 歳) であった。実験に際して事前にインフォームドコンセントを行い, 同意を得た。心電図測定には, Daily Care BioMedical 社製のポータブル心拍変動測定器チェック・マイハート (12 cm(W) × 8 cm(H) × 2 cm(D), 116 g) を使用した。この機器の A/D 変換のサンプリング周波数は, 250 Hz に設定されている。心電図の電極装着部位は, 胸骨柄および胸部誘導 V5 の位置 (CM5 誘導) とした。測定は, 安静座位にて 1) 自発呼吸, 2) 呼吸周波数を 0.1 Hz にコントロールした制御呼吸 (6 回/分の 10 秒周期呼吸) の 2 パターンを 5 分間ずつ, 計 10 分間行った。

2.2 解析方法

記録したデータは, チェック・マイハート HRV 解析ソフトウェアを用いて, 心電図 RR 間隔を自動算出した。その後, 心拍の誤認識をマニュアルで校正した。校正後の RR 間隔は, デジタル値化されたファイル形式でコンピュータに送信した。最小自乗余弦スペクトル解析には, Microsoft Excel を用いた。Visual Basic for Appli-

cation を用いて連続する RR 間隔を読み込み、最小自乗余弦スペクトル法を用いて 30 秒毎の心拍変動の周期性成分を抽出するプログラムを作成した。余弦曲線は次式に示した。

$$Y=M+A\cos(2\pi t/\omega-\theta)\cdots\cdots(1)$$

M: MESOR (平均値) A: Amplitude (振幅)
 t: time (時間) ω : Period (周期) θ : Acrophase (位相)
 本研究では、高周波領域の適切な周期 (ω) を求めるため、周期を 2 秒より 10 秒まで 0.1 秒ずつ変化させて、原波形と、推定された余弦曲線の差である残差の平方和が最小となる余弦曲線を最適余弦曲線とみなして検出した。この余弦曲線の適合性の指標として、確率 (Probability) を直接法で求めた⁶⁾。Probability は、原波形が余弦曲線にあてはまるほど非常に低い値を示す。そのため、心拍および呼吸リズムの規則性を定量的に把握することが可能であると考えられる。Probability の値はマイナスの乗数になるため、今回 Probability の逆数の対数を取り、RA (Rhythm Adaptability) と定義した。

$$RA=\log(1/Probability)\cdots\cdots(2)$$

RA の値が高いほど、原波形が余弦曲線に適合し、リズム性があるものとみなした。

2.3 統計処理

統計学的検定には、paired t-検定、unpaired t-検定を用いた。相関関係の検定には Pearson の積率相関係数を用いた。いずれも $p < 0.05$ を有意差ありとみなした。

3. 結果

3.1 対象の心電図所見

上室性期外収縮、心室性期外収縮、心房細動などの不整脈が、87 例中 26 例でみられた。男女別では、男性が 30 例中 12 例、女性が 57 例中 14 例であり、女性に比べ男性で不整脈がみられる割合が多い傾向を示した。不整脈がみられた 26 例の平均年齢は 69.7 ± 5.1 歳であり、不整脈がみられなかった 61 例の平均年齢 65.0 ± 6.4 歳に比べて高値を示し、統計学的に有意差が認められた ($p < 0.05$)。また、26 例中 11 例は自発呼吸および制御呼吸で不整脈が認められ

たが、8 例は自発呼吸でのみ不整脈が認められ、7 例は制御呼吸でのみ不整脈が認められた。

全例の心拍数は、平均 68.1 ± 9.8 bpm であり、そのうち 60 bpm 以下を示したのは 16 例、90 bpm 以上は 5 例であった。図 1 は、心拍数と年齢の散布図を示したものであるが、有意な相関は認められなかった。

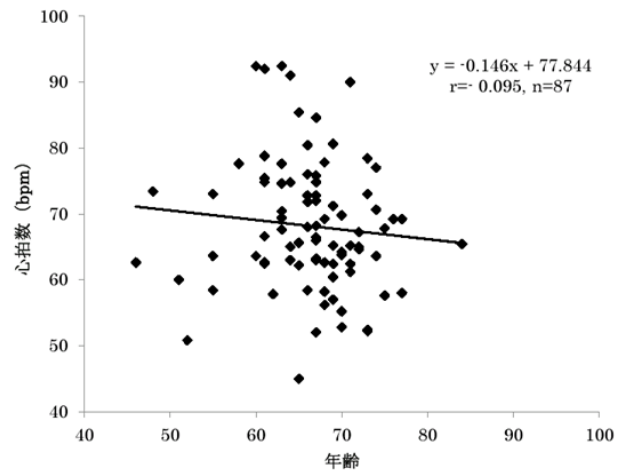


図 1 心拍数と年齢の相関

3.2 自発呼吸および制御呼吸における心拍数、振幅 (Amplitude) の変化

不整脈がみられた 26 例 (男性 12 例、女性 14 例)、ノイズの混入により R 波の認識が正確にできなかった 3 例 (男性 2 例、女性 1 例)、および制御呼吸で 0.1 Hz の呼吸コントロールがされていなかった男性 1 例のデータを除外し、57 例のデータについて心拍時系列の最小自乗余弦スペクトル解析を行った。

表 1 は、自発呼吸および制御呼吸における心拍数、周期、振幅および RA の 5 分間の平均 \pm 標準偏差を示したものである。いずれの指標においても、男性と女性の間で有意差は認められなかった。全例の自発呼吸と制御呼吸の比較において、周期は、自発呼吸で 5.3 ± 1.5 sec、制御呼吸で 9.4 ± 1.0 sec であり、10 秒周期の呼吸を行った制御呼吸では呼吸の周期に一致した心拍の変動が確認された。RA についても、自発呼吸で 1.5 ± 0.7 、制御呼吸で 3.4 ± 2.6 であり、

表 1 自発呼吸および制御呼吸における心拍数、周期、振幅、RA

	測定条件	全体 (n=57)	男性 (n=15)	女性 (n=42)
心拍数 (bpm)	自発呼吸	68.7 ± 10.2	69.3 ± 11.5	68.4 ± 9.8
	制御呼吸	$69.9 \pm 10.0^*$	70.2 ± 9.7	69.8 ± 10.2
周期 (sec)	自発呼吸	5.3 ± 1.5	5.7 ± 1.6	5.1 ± 1.5
	制御呼吸	$9.4 \pm 1.0^*$	9.7 ± 0.5	9.3 ± 1.1
振幅 (bpm)	自発呼吸	1.3 ± 0.6	1.1 ± 0.4	1.3 ± 0.7
	制御呼吸	$3.1 \pm 1.7^*$	3.0 ± 1.5	3.1 ± 1.8
RA	自発呼吸	1.5 ± 0.7	1.3 ± 0.6	1.5 ± 0.7
	制御呼吸	$3.4 \pm 2.6^*$	4.2 ± 3.0	3.1 ± 2.4

* $p < 0.01$ 自発呼吸と制御呼吸の比較

制御呼吸で統計学的に有意に高い値を示し ($p<0.01$), 呼吸が規則的に行われていたことが推測された。

心拍数は、自発呼吸で 68.7 ± 10.2 bpm, 制御呼吸で 69.9 ± 10.0 bpm であり, 制御呼吸で統計学的に有意に高い値を示した ($p<0.01$). また, 振幅は, 自発呼吸で 1.3 ± 0.6 bpm, 制御呼吸で 3.1 ± 1.7 bpm であり, 制御呼吸で統計学的に有意に高値を示した ($p<0.01$).

3.3 振幅と年齢, 振幅と安静時心拍数の相関性

振幅と年齢, 振幅と安静時心拍数の関連性を検討した。図2は, 制御呼吸時の振幅と年齢の散布図を示したものであり, 有意な負の相関が認められた。また, ここには示していないが, 自発呼吸においても振幅と年齢の間に有意な負の相関が認められた。これより, 高齢になると, 振幅が低下する傾向が認められた ($p<0.05$)。図3は, 制御呼吸時の振幅と自発呼吸時の心拍数の散布図を示したものであるが, 有意な相関は認められなかった。

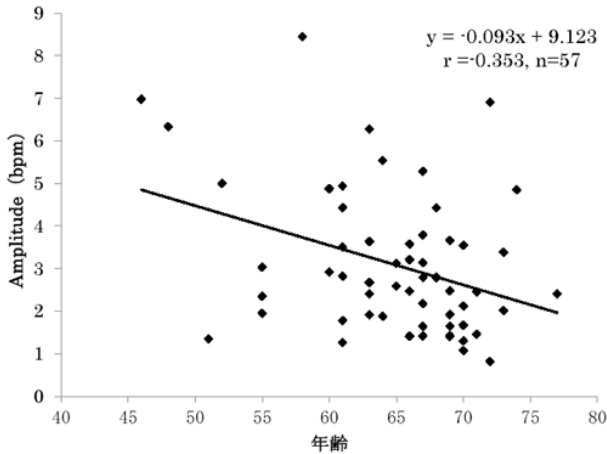


図2 制御呼吸時の振幅 (Amplitude) と年齢の相関

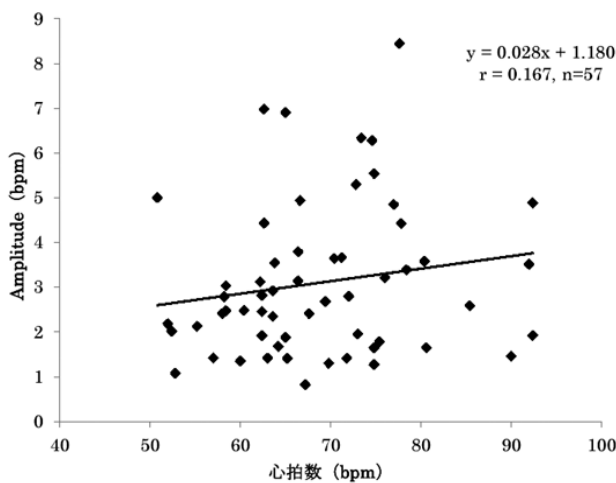


図3 制御呼吸時の振幅 (Amplitude) と自発呼吸時の心拍数の相関

4. 考察

高齢者における心血管系の変化として, 心拍数の減少や不整脈の頻度増加があげられる。この理由として心臓の刺激伝導系の組織学的変化が生じ, 洞結節においては結節細胞の減少や結合織の線維化がみられ⁷⁾⁸⁾, 徐脈性不整脈をきたしやすくなることがあげられる。今回の対象の心拍数は, 平均 68.1 ± 9.8 bpm であり, そのうち 60 bpm 以下の徐脈を示した例は 16 例であった。一方で, 90 bpm 以上を示した例も 5 例みられた。年齢と心拍数の間に相関性は認められなかったが, 我々の先行研究⁵⁾において同様の方法により測定した若年女性 133 名 (年齢 21.0 ± 0.9 歳) の安静座位の心拍数は 76.0 ± 9.0 bpm であり, 若年者に比べ高齢者では心拍数が低下することが示された。

心拍スペクトルを測定する方法としては, 従来より高速フーリエ変換 (FFT) が用いられることが多い。FFT は, データが等間隔であることが基本であり, 心電図の RR 間隔を等間隔なデータに変換するためには一次関数あるいはスプライン関数を用いた補間処理が必要である。また, 原データに対して, 窓関数処理 (ハニング窓, ハミング窓など) を行わなければならない。等間隔データの処理法, 補間時間の設定, 窓関数は研究者, あるいは測定機器では一定化されていない。フーリエ解析した後の高周波成分は低周波成分の影響を多く受けるため, 高周波成分の絶対値で副交感神経機能を推測することができない。一方, 本研究で用いた最小自乗余弦スペクトル法は, ①データのサンプリングが等間隔である必要性がないこと, ②心拍変動の振幅を絶対値で得ること, ③心拍高周波成分に対する低周波成分の影響が少なくなること, および④Amplitude を心拍の MESOR 値で補正できること, などの点でフーリエ解析法よりも優れている⁹⁾¹⁰⁾。つまり, 呼吸性不整脈自体の振幅を絶対値であらわすことが可能であり, このことにより, 年代別の呼吸性不整脈の振幅を比較することも可能となる。

本研究では, 呼吸変動による心拍の振幅 (Amplitude) は, 自発呼吸に比べ, 制御呼吸で有意に高い値を示し, 制御呼吸で 3.1 ± 1.7 bpm であった。前報⁵⁾における若年女性の呼吸性不整脈に基づく心拍変動の振幅は, 制御呼吸で 9.4 ± 3.0 bpm であり, 若年者と高齢者の比較では, 高齢者で心臓迷走神経機能が著しく低下していることが示唆された。加齢による心拍変動の変化について, Hirsch ら¹¹⁾は, RSA 振幅は 35 歳までは年齢との間に負の相関が認められるが, 35 歳を超えると RSA 振幅の低下がみられなくなると報告している。しかし, 今回の対象では, 制御呼吸時の振幅と年齢の間に有意な負の相関が認められ, 既報とは異なった結果が示された。Hirsch らは 22 歳から 78 歳の男女 17 名を対象としており, 本研究の対象と年齢区分が異なっていること, 本研究で対象とした 46 歳以上が少数数であ

ることが理由の一つとして推測される。また、心拍数は、自発呼吸で 68.7 ± 10.2 bpm, 制御呼吸で 69.9 ± 10.0 bpm であり、制御呼吸で有意に高い値を示した ($p < 0.01$)。

本研究では、最小自乗余弦スペクトル解析法により呼吸性不整脈の絶対値を評価し、副交感神経機能の指標として用いた。年代別の副交感神経機能の変化として、高齢者を対象として検討した結果、高齢者では若年者に比べ心拍が徐脈傾向にあるにもかかわらず、呼吸変動による心拍の振幅は制御呼吸で 3.1 ± 1.7 bpm であり、若年者のおよそ 1/3 まで低下し、心臓迷走神経機能が低下していることが示された。また、心臓迷走神経機能の低下が推測されるにもかかわらず、高齢者において心拍数の低下を認めたことは、高齢者の洞機能が低下していることを示唆する所見であると推測した。

《謝辞》

測定にご協力いただきました対象者の皆様に厚く御礼申し上げます。

《引用文献》

- 1) Ludwig C.: Beitrage zur Kenntniss des Einflusses Respirationsbewegungen auf den Blutlauf im Aortensysteme, Arch. Anat. Physiol., 13: 242-302, 1847
- 2) Raschke F, Hildebrandt G.: The mutual interaction between heart beat and respiration. Biological Adaptation, Georg Thieme Verlag, 129, 1982
- 3) Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Barger AC, et al.: Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. Science, 213: 220-222, 1981
- 4) Angelone A, Coulter NA: Respiratory sinus arrhythmia: a frequency dependent phenomenon. J. Appl. Physiol., 19: 479-482, 1964
- 5) 東風谷祐子, 市丸雄平: 若年女性の心拍変動の特性, 東京家政大学附属臨床相談センター紀要 11: 39-44, 2011
- 6) 佐々木隆, 千葉喜彦編: 時間生物学, 朝倉書店, 325-328, 1979
- 7) Lev M: Aging change in the human sinoatrial node. J. Gerontol., 9: 1-9, 1954
- 8) Davis MJ, Pomerance A: Quantitative study of aging change in the human sinoatrial node and intermodal tracts. Br. Heart. J., 34: 150-152, 1972
- 9) Halberg F, Lagoguay M, and Reinberg A.: Human circannual rhythms over a broad spectrum of physiological processes. Inter. J. Chronobiology., 8: 225-268, 1982
- 10) Ichimaru Y: Least Square Multivariate cosine spectrum analysis for ambulatory blood pressure and heart rate. Therapeutic Res., 14: 194-201, 1993
- 11) Hirsch JA, Bishop B: Respiratory sinus arrhythmia in humans: how breathing pattern modulates heart rate. Am. J Physiol., 241: H620-629, 1981

Abstract

To examine the absolute value of the respiratory sinus arrhythmia (RSA) originally proposed by Hirsch et al., we conducted the measurement of RSA in 87 elderly men ($n=30$) and women ($n=57$) ranging in age from 46 to 84 years. Electrocardiogram (ECG) was recorded for 5 minutes in a sitting position under spontaneous breathing and controlled breathing with a frequency of 0.1 Hz. To measure the absolute value of the RSA amplitude, we applied the Least Square Cosine Spectrum Method with a window range of 30 seconds of the heartbeat time series and extracted five parameters (Period, MESOR, Amplitude, Acrophase, and Probability). The mean heart rate and RSA amplitude were significantly increased during controlled breathing compared with spontaneous breathing. The RSA amplitude was 3.1 ± 1.7 bpm during controlled breathing and inversely proportional to the subject's age. We conclude that parasympathetic nervous control to the heart might be decreased in elderly people not only under spontaneous breathing but under controlled breathing.