ウィンドウを掛けたフーリエ変換法と ウェーブレット変換法でのダイナミック心拍変動解析

○平柳 要、岩崎賢一、山口喜久、宮本 晃、谷島一嘉
(日本大学医学部衛生学/宇宙医学)

Dynamic analysis of HRV by the windowed short-time
Fourier transform(WSTFT) and the wavelet transform(WT)

Kaname Hirayanagi, Kenichi Iwasaki,
Nobuhisa Yamaguchi, Akira Miyamoto and Kazuyoshi Yajima
(Nihon Univ. School of Med., Dept. of Hygiene & Space Med.)

1. はじめに

近年、心拍変動や血圧変動をスペクトル解析することによって、自律神経機能や心循環調節機能を非侵襲的に把握する試みが内外で多くなされている。そして、心拍変動の高周波成分(0.15~0.4Hz)は呼吸因子(数・深度)によって修飾を受けるものの、心臓副交感(迷走)神経活動を反映する。一方、低周波成分(0.04~0.15Hz)は心臓副交感(迷走)神経活動に加えて、血管運動(収縮)性交感神経活動を反映した血圧の0.1Hz変動(Mayer波)が圧受容体反射機能を介して伝播されたものと考えられている。従来、定常性の高い信号データのスペクトル解析には、Blackman-Turkey法、FFT法、あるいはARモデルに基づいた方法がよく用いられてきた。しかし、自律神経機能は短時間のうちにも大きく変化することがあり得る。そのような場合には通常のスペクトル解析法の適用はあまり望ましくない。そこで、非定常性の高い信号データに適用可能と考えられるウィンドウを掛けた後の短時間フーリエ変換(Windowed Short-Time Fourier Transform; WSTFT)法とウェーブレット変換(Wavelet Transform; WT)法の心拍変動解析への応用可能性を検討した。すなわち、WSTFT法とWT法の二つの方法をバルサルバ(Valsalva)試験時と暗算試験時の心拍変動に適用して、その時間一周波数解析の成績を比較し、二つの解析法による心拍変動のダイナミックなスペクトル解析の基本特性とその有効性について比較検討した。

2. 方 法

健常若年成人を対象に、1)バルサルバ

試験および2)暗算試験を行った。

1) バルサルバ試験

2分間の椅座位安静の後、深吸気から水銀血圧計のゴム管にマウスピースを取り付けた装置で、胸腔内圧が40mmHgになるように口腔内空気圧を保つ“いきみ”動作を15秒間行った。その後、マウスピースをはずし、2分間の安静を保持した。

2) 暗算試験

2分間の椅座位安静の後、100から7を引いて行く暗算負荷を15秒間行った。その後、2分間の安静を保持した。

これら二つの試験において、心電波形から検出されたR-R間隔のみを4分15秒間記録した。これらのビート毎のR-R間隔データを三次スプライン補間によって、0.5秒ごとのR-R間隔データに再サンプリングし直し、それぞれ509個の時系列的R-Rデータを得た。そして、これらのデータに対して、WSTFT法とWT法を適用した。

a) WSTFT法

WSTFT法のウィンドウにはBlackman-Harrisを用い、短時間フーリエ変換には0.5秒毎64個(32秒間)の等間隔データにFFTを適用した。そして、32秒間の解析区間を1秒間ずつずらしたスペクトル解析をして行き、時間一周波数軸上のパワースペクトル、HFパワー(HFP)、LFとHFのパワー比(LFP/HFP)などを求めた。

b) WT法

WT法は、時間領域・周波数領域において、共に局在したさざ波関数 $\phi(t)$ を用意する。この関数と時系列的R-R信号データ $x(t)$ とのコンボリューションを行うが、これはちょうどインパルス応答が $\phi(t)$

であるフィルタをかけることに相当する。そして、結果的に時系列的R-R信号データ $x(t)$ から周波数 Ω 付近、時刻 b 付近の成分が取り出せることになる。ここで、ある時刻での異なる周波数成分を得るために、スケーリングパラメータ a によって $\phi(t)$ を $a^{-0.5}\phi(t/a)$ に伸縮し、シフトパラメータ b によって時間シフトを実現する。その結果は時間一周波数(スケール)軸上の振幅スペクトルとして表示した。

3. 結 果

バルサルバ試験における心拍数(HR)、WSTFT法で求めたHFPとLFP/HFP、およびWT法での時間一周波数(スケール)軸上での振幅スペクトル分布を図1に示した。同様に、暗算試験における結果を図2に示した。バルサルバ負荷時において、WSTFT法で求めたHFPの時系列変化から心臓副交感(迷走)神経活動(HFPが大ならば迷走優位)が推測でき、LFP/HFPの時系列変化から交感・副交感神経の活動バランス(LFP/HFPが大ならば交感優位)が推測できる。一般に、バルサルバ負荷中、迷走優位→迷走抑制&交感優位→迷走優位といった自律神経反応が起こるが、この結果はこれに符号

した。また、暗算負荷中においては交感神経系が賦活されるが、この結果もこれに符号した。一方、WT法では、バルサルバ試験での負荷中の自律神経反応があまりうまく捉えられなかったが、暗算試験では負荷中でのHF帯域スペクトルの減少による相対的な両帯域の振幅スペクトル比(LF/HF)の増大から交感神経系の賦活が推測できた。

4. 考 察

バルサルバ試験、暗算試験、寒冷昇圧試験などのように、自律神経機能が短時間のうちに変わり得るような場合には、R-R間隔や血圧などの信号データの非定常性の問題が立ちはだかり、通常のスペクトル解析法の適用には注意が必要であった。しかし、このような場合にはWSTFT法で解析区間を少しずつずらして行く方法が一つの有効な手段であると思われた。また、WT法はほぼリアルタイムでのスペクトル解析が容易にできるため、今後さらに改良して行けば、R-R間隔や血圧などの変動性の非定常性解析や自律神経機能のダイナミック解析に有用性を発揮するものと考えられた。

図1 バルサルバ試験における自律神経活動指標の時系列的変化

図2 暗算試験における自律神経活動指標の時系列的変化