

バイタルサインにみられる複雑性の解析

東京大学新領域創成科学研究科 小谷 潔

1. はじめに

バイタルサインとは心拍、呼吸、血圧、体温などを指し、主に自律神経によって制御されている。近年の計測機器の小型化・高精度化によって、バイタルサインは日常生活下で、しかも長期間のモニタリングが可能になりつつある。しかしながら、そのようなデータは従来解析されてきたデータに比べて長時間かつ複雑であるため、有効な情報をどのように取り出すのかについてはまだ研究途上といえ、非線形動力学や統計物理学を含めた先端の知見の応用が必要といえる。そこで本稿では、バイタルサインのひとつである心拍変動に対するアプローチとして、呼吸位相領域での解析と長期データの統計物理解析について述べる。

2. 呼吸位相領域の解析

心拍変動の周期成分は自律神経の活動指標とされており、周波数解析して得られた呼吸性の変動(Respiratory Sinus Arrhythmia: RSA)のパワー(一般的には 0.15–0.5Hz のパワー)が副交感神経の活動指標として用いられている^[1]。RSA を用いた副交感神経活動の評価は、簡便さや無侵襲性などから幅広く用いられているが、実用的な見地からはより短時間で高精度な抽出法が求められている。そこで我々は呼吸位相領域での RSA 抽出手法を提案している。信号処理アルゴリズムは図 1(a)に示すとおりである。はじめに、呼吸の信号 $s(t)$ に対して解析信号による瞬時位相 $\phi(t)$ を

$$\psi(t) = s(t) + j\tilde{s}(t) = A(t)e^{j\phi(t)}$$

ただし

$$\tilde{s}(t) = \pi^{-1} \text{P.V.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

のように算出する。そして心拍変動時系列を補間後、呼吸位相に対して等間隔にリサンプリングする。さらにデータ選択後、呼吸位相に対して瞬時拍動間隔をプロットすることで呼吸の心拍動に与える影響をみることができる。この手法で得られた RSA の振幅は、暗算負荷実験において従来法である周波数解析の結果よりも負荷の変化に追従する事が示された。また、波形を外乱の条件に応じて分類し、平均波形を評価することで、通常は呼吸性の変動に埋もれている外乱の影響を定量化することができた (図 1(b))^[2-4]。

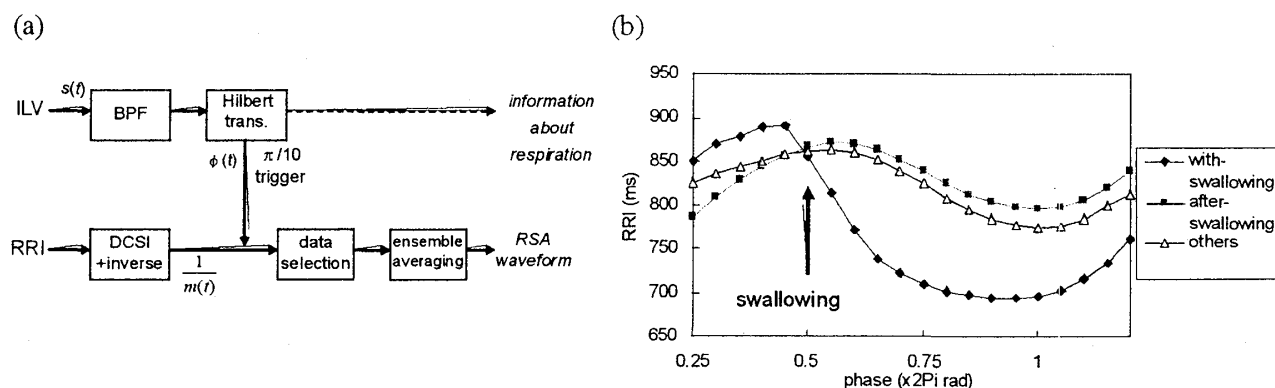


図1 (a) 呼吸位相領域での心拍変動解析手法 (b) 嚥下の心拍変動に与える影響の解析例

3. 長期心拍変動の統計物理解析

一方で、近年では心拍変動の長期モニタリングによって、確率分布やフラクタル特性などに着目した統計物理解析が可能となり、病態に応じた特性の変化などが報告されている^[5]。しかしながら、統計物理現象を生体の制御機構とその病態変化の解明につなげるにあたり、実験のみのアプローチでは、データ長さ、個体差、実験条件などの制約を受けてしまう。そこで我々は心臓血管系モデルを用いたアプローチを行っている。構築したモデルのブロック図は図2(a)のとおりであり、時間遅れの入った非線形常微分方程式の連立によって構成されている。モデルの概要は以下の通りである。まず血压の情報から圧反射の大きさが決定される。そして、交感神経活動と副交感神経活動は圧反射と呼吸の関数として決定される。心臓には副交感神経と交感神経の心臓への活動が伝わり、心臓のペースメーカー細胞である洞結節で電位が積分される。洞結節の電位が閾値を越えると心臓が拍動し、電位はリセットされる。収縮期の血压は静脈帰還流を考慮した Frank-Starling の法則によって、拡張期の血压は血管を制御する交感神経の関数で得られる。さらに図2(a)の ξ_1 , ξ_2 の位置にモノフラクタルである fBm(fractal Brownian motion) ノイズをそれぞれ加え、モデルを駆動する。

このようなモデルにおいて、副交感神経活動、交感神経心臓枝、交感神経血管枝のゲインを順に $k_p, k_{Cne}^s, k_{Cve}^s$ とおき、 $(k_p, k_{Cne}^s, k_{Cve}^s)$ を変化させて健常者の心拍変動と病態変化をモデルで再現する。健常者を想定した状態でのこれらのパラメータ(1.1, 0.7, 0.5)に対して、生理学的な見地からうっ血性心不全(Congestive Heart Failure: CHF)では(0.22, 0.84, 0.6), Primary Autonomic Failure(PAF)では(0.44, 0.28, 0.1)とそれぞれ設定した。それぞれのパラメータにおいて5万拍の擬似心拍変動を50例作成して解析し、Wavelet Transform Modulus Maxima 法^[6]による singularity spectrum からマルチフラクタル性を調べた。その結果、図5(b)のような結果が得られ、文献[5]で示されている健常者のマルチフラクタル性とその病態変化を概ね再現する事ができた^[7]。

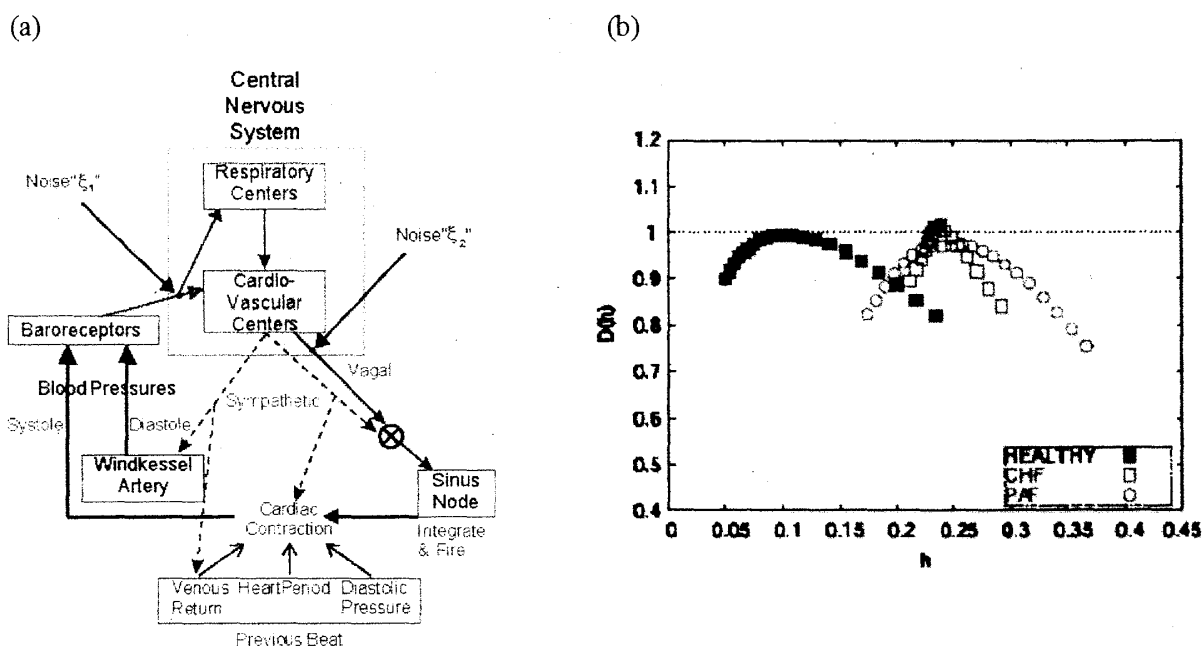


図 2 (a) 心臓血管系モデルのブロック図 (b) シミュレーションで生成した心拍変動の singularity spectrum

参考文献

- [1] Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, *Circulation*, 93, 1043-1065(1996).
- [2] K. Kotani *et al.*, *Meth. Inf. Med.*, 39, 153—156 (2000)
- [3] K. Kotani *et al.*, *Meth. Inf. Med.*, 46, 376—385 (2007)
- [4] K. Kotani *et al.*, *Meth. Inf. Med.*, 46, 179—185 (2007)
- [5] Z. R Struzik *et al.*, *Phys. Rev. E*, 70, 050901(R) (2004)
- [6] J. F. Muzy, E. Bacry, and A. Arneodo, *Int. J. Bifurc. Chaos*, 4, 245—302(1994)
- [7] K. Kotani *et al.*, *Phys. Rev. E*, 72, 041904 (2005).