

● 一般演題

ウェーブレット理論に基づく新しい心電計

—独立成分分析 (ICA) による心房細動 f 波の分離—

さいたま市石川医院 石川 康 宏
平塚市民病院産婦人科 藤本 喜展・持丸 文雄

要 約

独立成分分析 (ICA) により、心房細動の f 波を単離し、ウェーブレット解析にてその構造を検討した。f 波は、不規則な 2 層、もしくは、3 層からなる蜂の巣状の構造を呈し、小回路を形成しながら、次々と伝播していくものと考えられ、リエントリー説を支持する結果を得た。カオス・フラクタル解析では、Hurst 係数は 0.99244 であり、最大 Lyapunov 係数は 0.0022 であった。これらの事実は、本症例の f 波が治療に抵抗性のある安定な構造を有していることを示している。

はじめに

ウェーブレット変換は、Fourier 変換と異なり、時間と周波数の 2 次元での解析が可能である。ウェーブレット変換は、自然科学における数学的な顕微鏡に例えられ、微細な変化や不連続を捉えるのに優れた方法である。このウェーブレット変換の優れた分解能を引き出すためには、通常的心電計の 250 Hz ではサンプリング周波数が低く不十分である。われわれは、サンプリング周波数を 5 kHz とし、Gabor8Power をマザー・ウェーブレット (mother wavelet) として用い、心電図波形の連続ウェーブレット変換 (CWT) における形態的特徴について検討した。心電図波形の QRS の主成分は瓢箪型を呈し、p 波は重畳する周波数成分より構成されており、洞結節から His 束にいたる p 波の刺激伝導路が非侵襲的に観察された。T 波も、主として四つ

の周波数成分より構成され、T3, T4 と名づけた構成成分が融合する点を T 波の終点とすることで、従来、科学的な測定が不可能であった QT 間隔を決定することを可能にした^{1,2)}。すでに、われわれは、ウェーブレット解析において、非侵襲的に妊婦の腹壁より得られた胎児心電図で、母体 QRS の近傍に胎児心電図波形があると、胎児心電図波形が母体 QRS の影響を受けて形態的に変形することを報告したが²⁾、同じ現象が心房細動 (AF) における f 波の特性の解析においても観察される。f 波は、QRS の存在により、その近傍での観察が妨げられる。独立成分分析 (ICA) では、観測されたデータは、相互に最大に、独立である成分へ、すなわち、相互情報量を最少にするように線形に変換される。ICA を用いて、AF における QRS から f 波を単離することで、QRS の影響を避けて、CWT にて f 波の特性の分析を試みた。

1 方 法

われわれは、ウェーブレット解析、ICA に対応しいマルチチャンネルの心電計を作成した¹⁾。心電アンプは日本光電の AC-601G を使用し、エルメック社の EC-2360 A/D コンバータにてデジタル化してパーソナル・コンピュータにデータファイルとして取り込んだ。サンプリング周波数は 5 kHz である。CWT は Mallat³⁾、Ishikawa⁴⁾の方法で、Gabor8Power を使用した。CWT の定義は、

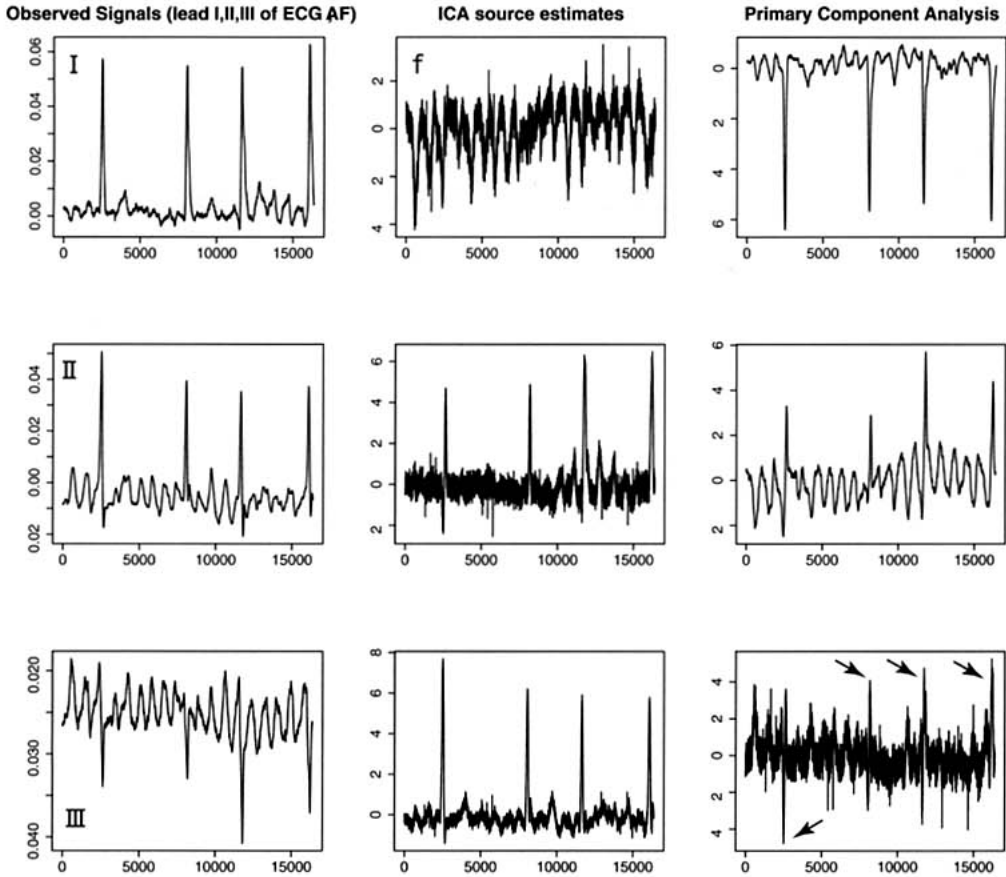


図 1 AF の第 I, II, III 誘導
中央の列は ICA の結果を示す。右の PCA の最下段の図の矢印は、QRS を示し、ICA の最上段と比較し、QRS の混入を認める。

$$(W_{\psi} f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

離散ウェーブレット変換 (DWT) は、Daubechies⁵⁾の方法で行った。ウェーブレットによるノイズ除去は、多重解像度解析 (MRA) における各分解レベルのウェーブレット係数の標準偏差に重みをつけたものを閾値とし、情報コスト関数を指標とする Ishikawa²⁾の方法で行った。ICA は、Aapo Hyvärinen らの Fast Independent Component Analysis⁶⁾により行った。ICA の定義は、下記のごとくであり、

$$x = As$$

$$s = Wx$$

x : observed signal, A : mixing matrix, s : source signals, W : unmixing matrix
contrast function (評価関数) として、

$$G(u) = \frac{1}{a_1} \log \cosh a_1 u$$

を使用した。Hurst 係数は Peters⁷⁾の方法で、Lyapunov 指数は Kantz⁸⁾の方法で計測した。

2 結 果

図 1 は、左の列が 63 歳の AF の患者の第 I, II, III 誘導である。中央の列は ICA の結果を示す。右の列は主成分分析 (PCA) の結果である。PCA の列の最下段の図の矢印は、QRS を示し、

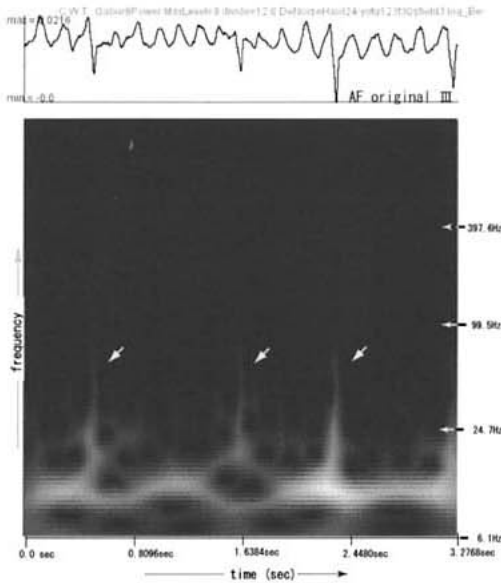


図 2 図 1 の第 III 誘導の Gabor8Power による CWT QRS (矢印) により、近傍の f 波はともに変形をきたす。

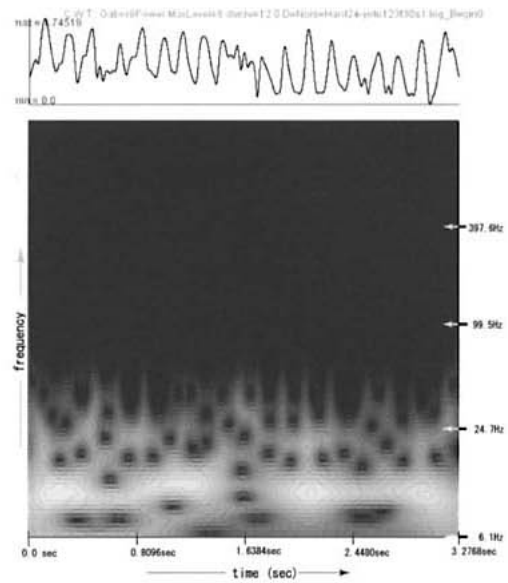


図 3 図 1 の ICA の列の上段の単離された f 波のグラフをウェーブレットにてノイズ除去後の CWT f 波は、不規則な 2 層、もしくは 3 層からなる蜂の巣状の構造を呈した。

中央の列の ICA の最上段の図 (f) と比較し、QRS の混入を認める。サンプリング周波数は 5 kHz、データ数は 2^{14} である。

図 2 は、図 1 の左の最下段のグラフである第 III 誘導の Gabor8Power による CWT である。混入する QRS (図の矢印) により、近傍の f 波は、QRS とともに変形をきたし、本来の形態とは異なる可能性がある。

図 3 は、図 1 の ICA による f 波が単離されていると思われる中央列上段のグラフのウェーブレットによるノイズ除去後の Gabor8Power による CWT である。f 波は、不規則な 2 層、もしくは 3 層からなる蜂の巣状の構造を呈し、小回路を形成しながら、次々と伝播していくものと考えられる。

図 4 は、図 3 の一部分の 3 次元表示である。周波数は、グラフの下にいくほど高くなるように描かれている。尾根を結ぶラインは、小回路を形成し、中に窪みがみられる。このような構造が、周波数方向に不規則に 2 段、もしくは 3 段に重なっている。

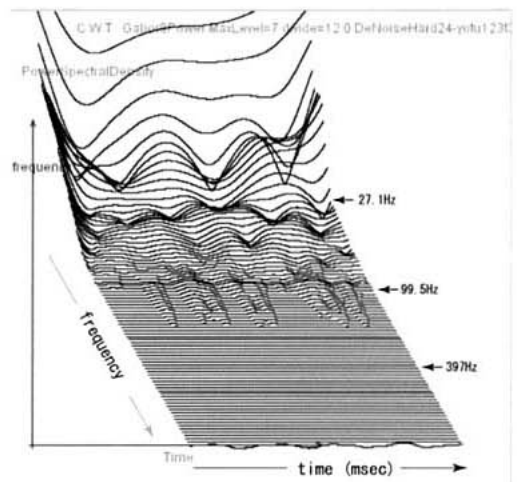


図 4 図 3 の一部分の 3 次元表示
尾根を結ぶラインは、小回路を形成し、中に窪みがみられる。

Hurst 係数は $0.99244 \pm 3.7E-4$ であり、一致率は 0.999 であった。また、カオスの安定性の指標である最大 Lyapunov 指数は 0.0022 であった。

3 考 察

ウェーブレット解析では、解析の対象となる波形の近傍に、Power の大きな他の波形が存在すると、相互に影響して、ともに形態が変化する。AF においても、f 波の CWT での形態は、QRS の存在で歪められる可能性がある。ICA による f 波の単離は、f 波本来の CWT での解析を可能にただけでなく、f 波の波動の特性を解析することも可能にした。非定常で複雑な時系列を特徴づけたり、複雑な物の表面の形状をあらわすのにしばしば使われる Hurst 係数は、0.99244 であった。Hurst 係数 0.5 がランダム・ウォークであり、これ以上になると過去の事象の影響を受け易くなる。Hurst 係数が 1 に近ければ、過去の事象の影響を強く受け、現在の状態を維持しようとする。Lyapunov 指数が正であることは、カオスの定義として用いられ、負または 0 であることは、系が準周期性を示す指標となる。カオスの安定性の指標である最大 Lyapunov 指数は、0.0022 と正ではあるが、0 に極めて近く、通常のカオスで観察される軌道に比べ、f 波が準周期性に近い軌道を描くことが理解できる。以上の検討からは、本症例の f 波は、治療に抵抗性のある robust な構造を有して

いると考えられる。

文 献

- 1) Ishikawa Y, Mochimaru F. Wavelet theory-based analysis of high-frequency, high-resolution electrocardiograms : a new concept for clinical uses. *Prog Biomed Res* 2002;7:179-84.
- 2) Mochimaru F, Fujimoto Y, Ishikawa Y. Detecting the fetal electrocardiogram by wavelet theory-based methods. *Prog Biomed Res* 2002;7:185-93.
- 3) Mallat S. Wavelet tour of signal processing, 2nd edition. San Diego : Academic Press ; 1998. p. 163-219, 249-54.
- 4) Ishikawa Y. Wavelet Analysis for Clinical Medicine (in Japanese) with MEM software on CD-ROM. Tokyo : Medical Publication (IGAKUSHUPPAN) ; 2000. p. 42-76, 154-63, 305-8.
- 5) Daubechies I. Ten lectures on Wavelets. Philadelphia : SIAM Press ; 1992. p. 167-213.
- 6) Hyvärinen A, Karhunen J, Oja E. Independent Component Analysis. New York : John Wiley-Interscience ; 2001. p. 165-202.
- 7) Peters E. Chaos and Order in the Capital Markets. New York : John Wiley & Sons ; 1996. p. 51-81.
- 8) Kantz H, Schreiber T. Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge : Cambridge University Press ; 1997. p. 58-68.