

フラクタル次元解析による心疾患の検知に関する研究

山崎 大志¹, 網島 均², 高田 宗樹³, 山田 功⁴

¹ 日本大学大学院, ² 日本大学,

³ 岐阜医療科学大学保健科学部, ⁴ 愛知県立循環器呼吸器病センター

心房細動の治療方法のひとつにカテーテル・アブレーションがある。これは開胸手術ではないため患者にかかる負担が軽く、成功すれば根治になるというメリットがある。しかし、一般には心房性期外収縮起源部位の特定を行わずに、経験的な部分に対し処置が行われているため、手技時間の平均は3から4時間を要する。その成功率は7割から8割に止まり、心房細動に関しては再発率が高く、2回アブレーションが必要となる患者は約半数である。そこで、心房性期外収縮起源部位を特定することで手術の時間短縮・精度向上を図る試みがなされている。本研究ではカテーテル心電図にフラクタル次元解析を行い、心房性期外収縮起源部位の検出ができないかを検討する。

Study on detection of heart disease by using fractal dimensional analyses

Taishi YAMAZAKI¹, Hitoshi TSUNASHIMA², Hiroki TAKADA³ and Isao YAMADA⁴

¹ Graduate School of Nihon University, ² Nihon University,

³ Gifu University of Medical Science, ⁴ Aichi Cardiovascular and Respiratory Center

The electrode catheter ablation is one of remedies of the atrial fibrillation (AF). This operation causes little stress than the other methods for patients, and is expected as a radical cure. However, it takes several hours to operate without discovered parts of premature atrial contractions (PAC) in general, and the reoperations are often required. We then attempt enhancing accuracy to discover parts of the PAC. In this study, fractal dimensions were derived from catheter electrocardiograms (C-ECGs) in order to examine whether we can detect anomalous signals involved in the AF. The results suggested that the fractal dimensional analysis of the C-ECGs was useful to shorten the operation time.

Key Words: Fractal dimension, Embedding, Attractor, Wayland Test, Double-Wayland Test, Translation Error

1. 緒言

心房細動の治療法にカテーテル・アブレーション¹⁾がある。この手術は、開胸手術を必要がないので患者への負担が軽く、成功すれば根本的な治療となる。一般には心房細動を起こす部分(心房性期外収縮起源部位)を特定せず、経験的な部位に対して電気的に焼灼するため時間を要する。そこで、心臓にカテーテルを位置・深度を変化させて挿入し、カテーテル心電図

(C-ECG)の電位差をみることで心房性期外収縮起源部位を特定して処置を行うことで時間の短縮を計り、施術の精度を高める試みがなされつつある²⁾。

このC-ECGから疾病の診断を行う際、測定された信号から異常の有無を判断することになり、容易に判断できる場合もあるが、ノイズなどの様々な要因で判断が困難なことは十分にありえる。よって、この判断を容易にするために信号をうまく解析する必要がある。

信号の解析には周波数解析が広く用いられているが、ノイズが極端に多い場合、信号がノイズに埋もれ、解析できない場合がある。このような場合、有効な解析方法のひとつに次元解析がある。

本研究ではこのC-ECGの信号に対し、次元解析の一つであるフラクタル次元解析³⁾を行い、測定された信号から異常を検出することにより、心房性期外収縮起源部位を特定できないかを検討した。

2. フラクタル次元解析

2.1 フラクタルについて

フラクタルとは同じ形状の繰り返す自己相似性をもつ図形で、これらは一部を拡大しても同様に複雑な形状が現れるため、非線形な部分が存在し、微分を用いた解析ができない。そこで、このフラクタルを定量化し、評価するために導入されたのがフラクタル次元である。フラクタル次元を求めて信号を評価する方法がフラクタル次元解析であり、周波数の領域では現れなかった変化が明らかになる可能性がある。また、ノイズの影響を除去できるというメリットがあるので、複雑な信号の解析に適していると考えられる。このフラクタル次元解析はこれまでに脳磁計信号の解析⁴⁾などに応用されている。

2.2. 次元解析法

2.2.1. 自己相関関数

得られた信号からアトラクタと呼ばれる構造体を再構成する際⁵⁾、信号の性質すべてが受け継がれることが望ましい。しかし、信号の生成機構の本質は時系列データの要素間の線形相関に隠されることが多い。そこで、自己相関関数で線形相関がなくなる最も小さい時差 τ を見積もる必要がある。これは、埋め込み時差と呼ばれ、 τ おきに抽出し、並べることによって得られる配列： $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ から遅延座標を構築する。

2.2.2. データの埋め込みとアトラクタの構造

上記のようにして構築した配列から、 m 次元遅延座標を次のように構築する。

$$x_i = (x_{1,i}, x_{2,i}, x_{3,i}, \dots, x_{m,i}) \quad (1)$$

この系列 $\{x_i\}_{i=0}^K$ を m 次元空間に埋め込むことによりアトラクタを再構成できる。

信号の特徴が、再構成されたアトラクタの構造に現れることが予測される。よって、異常の構造を特定できれば、信号からアトラクタをつくり、比較することで、異常の検出ができる可能性がある。しかし、構造が複雑な場合、判断に主観が伴う恐れがある。

2.2.3. Waylandテスト

定量的に再構成されたアトラクタの構造の複雑さを計量する方法として、Waylandテストがある。

Waylandテストは、遅延座標からランダムに M 個の点 x_i を選び、各 x_i の最近接ベクトルを K 個取り出し、 $\{x_i\}_{i=0}^K$ とする。そして、各 i ($i=0, 1, \dots, K$) に対する軌道変化ベクトル $v_i = x_{i+1} - x_i$ の方向のばらつきを

$$\begin{cases} E = \frac{1}{K+1} \sum_{i=0}^K \frac{\|v_i - \bar{v}\|}{\|v_i\|} \\ \bar{v} = \frac{1}{K+1} \sum_{i=0}^K v_i \end{cases} \quad (2)$$

により評価する。この E は並進誤差と呼ばれる。これらの中間値をとる操作を Q 回繰り返すことで得られる平均値により並進誤差を推定する。

信号の生成過程に規則性があるならば、並進誤差は急激に減少し、アトラクタが存在する空間において明確な極小値をとることがある。逆に、規則性のない信号から見積もられる並進誤差は埋め込み次元に依存しないか、もしくは弱い相関をもって緩やかに減少する傾向がみられる。これらのWaylandテストの結果に基づいて、測定された信号から異常の有無を判断できることがある。

心臓は脳から規則的に鼓動するよう伝達信号を受けているので、C-ECGに関する並進誤差は急激に減少する。逆に、心房細動が生じている場合は、心臓が脳からの伝達信号に依存されない運動をするため、並進誤差は急激に減少しない。

2.2.4. Double-Waylandテスト

Waylandテストの結果として信号から推定される

並進誤差は、信号のノイズ汚染が深刻な場合、解析値に影響が出てくることもあり、測定された信号から異常を検知することが困難になる⁶⁾。そこで、もとの信号の時間差分列 $(x_n - x_{n-1})$ について同様にWaylandテストを行う。これを Double-Wayland テストと呼ぶ。特に、信号が確率過程により生成されている場合、時間差分の時系列から再構成されるアトラクタは複雑な構造をとり、Double-Waylandテストにより推定される並進誤差は、より高い値をとる。

そこで、Waylandテストと Double-Waylandテストの結果として得られる並進誤差を相対的に比較することでアトラクタの複雑さを評価する³⁾。これら双方の値の差をとることで、より正確に測定された信号から異常を検出することができる。

3. 解析結果及び考察

ある被験者の肺静脈における異なる部位(領域)で測定されたC-ECGを図1(a)、図2(a)および図3(a)に示す。縦軸は電位、横軸は時間を表している。それぞれの波形は異なるが、測定部位の違いや、ノイズの影響が考慮されるため、C-ECGでの異常部位の断定は困難である。これらのC-ECGについてWaylandテストおよびDouble-Waylandテストを行った結果、図1(b)、図2(b)、図3(b)を得た。縦軸は並進誤差、横軸はアトラクタを埋め込んだ次元を示している。尚、本研究においては、並進誤差を $M=51, K=4, Q=10$ なる係数条件のもとで算出した。

図1のWaylandテストとDouble-Waylandテストの結果と比較すると、Double-Waylandテストにより得られた並進誤差はWaylandテストにより得られた並進誤差より低い値をとった。従って、C-ECG(図1(a))の生成過程は規則性をもつと予測された。

次に、図2のWaylandテストとDouble-Waylandテストの結果と比較すると、Double-Waylandテストにより得られた並進誤差は、Waylandテストにより得られた並進誤差より高い値となった。よって、図2(a)のC-ECGは確率過程により生成されているものと考えられた。

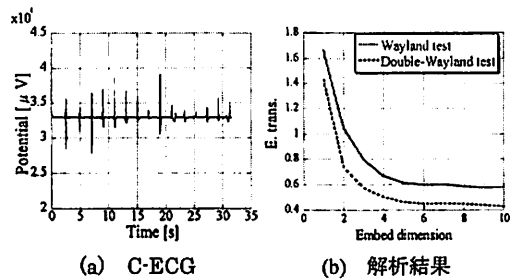


図1 領域CS・深度9-10mmでの解析

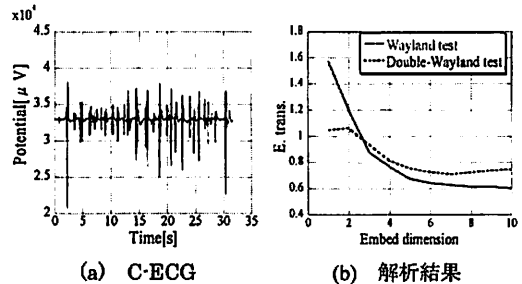


図2 領域A・深度5-6mmでの解析

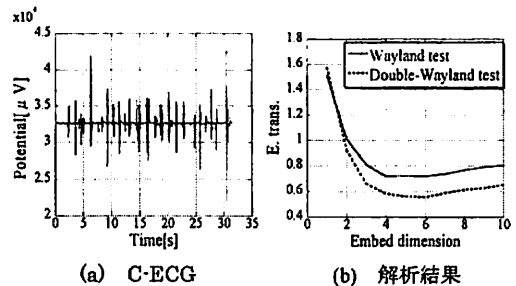


図3 領域A・深度3-4mmでの解析

また、図3のWaylandテストとDouble-Waylandテストの結果と比較すると、図1のようにDouble-Waylandテストにより得られた並進誤差はWaylandテストにより得られた並進誤差より低い値であった。図1のときと同様に、C-ECG(図3(a))の生成過程は規則性をもつと予測される。

心臓は脳や洞結節から規則的に鼓動するよう伝達信号(活動電位)を受けているので、心臓が正常であればC-ECGに関する並進誤差は急激に減少するであろう。また、通常は心臓全体に伝搬した後消失する活動電位が何らかの異常により消失せず心筋内を巡回して拍動を乱すリエントリーや、洞結節以外に異常な生理的ペースメーカーが出現すると、そこで発生した活動電位

が心臓内を伝わってひろがり拍動を乱す異所性自動中枢が心房細動などの発生機序として知られている。これらにより心房細動時には、心房は高頻度で電氣的に興奮しており、心房の電氣的興奮が不規則に心室に伝わり、頻脈にも徐脈にもなり得る。即ち、C-ECGは不規則な信号となるため、その並進誤差は急激に減少しないものと考えられる。

よって、心臓が規則的に鼓動しているため、図1、図3を測定している部位は正常であると考えられる。逆に、図2を測定している部位では心房細動が起きている可能性があり、心房性期外収縮起源部位であると予測される。

よって、心臓が規則的に鼓動しているため、図3を測定している部位は正常であると考えられる。

これらの結果を得られた並進誤差をもとに、心房性期外収縮起源部位を特定するために

$$\varepsilon = \sum_{i=7}^{10} \{E_{trans}(v, i) - E_{trans}(x, i)\} \quad (3)$$

を算出した。ここで、 $E_{trans}(x, i)$ 、 $E_{trans}(v, i)$ はそれぞれWaylandテストおよびDouble-Waylandテストにより埋め込み次元を*i*とする空間において推定された並進誤差を表す。この値は高次元の埋め込み空間において安定性が高いため、式(3)における和をとった。式(3)の値*ε*をもとに図4を作成した。横軸はカテーテルを挿入した深さを、縦軸は位置(領域)を表している。式(3)の値*ε*は、低いほど規則性があり黒色で、高いほどランダムであり、白色で表示した。この白色を見る事で

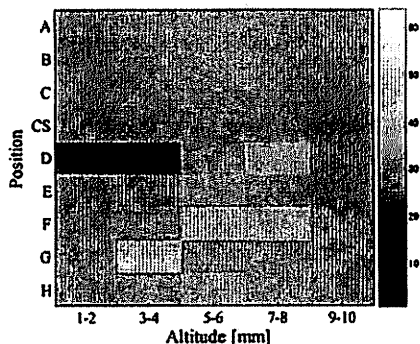


図4 解析異常部位の特定

心房性期外収縮起源部位を特定できる。この図4ではGの3-4mmの部位に白色が見られるため、この部位が心房性期外収縮起源部位である可能性が高いと予測される。

4. 結言

C-ECGに関するフラクタル次元解析をした結果、心房細動を検出できる可能性がみられた。そして、得られた並進誤差より心房細動のおきている可能性のある場所を可視化した。

今後は、解析をかける区間や条件を変更し、解析結果の妥当性を検討する。また、時系列データと時間差分時系列データの解析値より、異常のある場所を図化する際に用いた式(3)を、より判断しやすいよう改良できないか検討する。

参考文献

- 1) 小林義典, 心房細動治療におけるカテーテル・アブレーションの役割, J Nippon Med Sch 202; 69(3), 290-292
- 2) Sanders P et al, Spectral analysis identifies sites of high-frequency activity maintaining atrial fibrillation in humans, Circulation. 2005 Aug 9; 112(6):789-97. Epub 2005 Aug 1.
- 3) 高田他, 時間差分時系列のwaylandテストを併用した時系列における決定論性の評価, 形の科学会誌, 18(3), 301-310
- 4) 金子他, 音声ミスマッチング課題のMEGのフラクタル解析, 第5回脳磁場イメージング
- 5) 松本他, カオスと時系列, 培風館, 2002-11
- 6) 高田他, Double-Wayland テストによって推定される並進誤差のノイズ安定性について, 計算科学シンポジウム論文集 (情報処理学会シンポジウムシリーズ ISPJ Symposium Series, vol.2005, No.11), (2005), pp.57-64