# Double-Wayland テストを用いた心疾患の検知に関する研究

日大生産工(院) 〇山崎 大志 日大生産工 綱島 均 岐阜医療科学大 高田 宗樹 愛知県立循環器呼吸器病センター 山田 功

1 緒言

心房細動(AF)の治療法の一つにカテーテル・アブ レーションがある<sup>1)</sup>。カテーテル・アブレーションは、 心臓内に挿入した電極カテーテルで不整脈発生部位を焼 灼することで AF を抑えるものである。開胸手術を必要 としないため患者への負担が軽く、手術が成功すれば根 本的な治療となる。しかし、一般には不整脈発生部位を 特定せず、経験的な部位に対して焼灼が行われるため施 術に平均3から4時間を要し、AF に関しては2回のア ブレーションが必要になる患者は約半数である。そこで、 施術の時間短縮と精度向上を計るため、心臓に位置・深 度を変化させてカテーテルを挿入し、カテーテル心電図 (C-ECG)により不整脈発生部位を特定して処置を行 う試みがなされている<sup>2</sup>。

C-ECG から疾病の診断を行う際,測定信号から異常 の有無を判断することになるが,ノイズなどの様々な要 因で判断が困難な場合も多いため,信号解析をする必要 がある。しかし、ノイズが極端に多い場合,有意な信号 がノイズに埋もれ,解析出来ないことがある。このとき, 有効な方法の一つに決定論的性質の定量評価手法がある。 本研究では、C-ECG に対して定量評価手法の一つであ る Double-Wayland テストを行い<sup>3</sup>,不整脈発生部位の 特定を検討した。

## 2 決定論的性質の定量評価法

# 2.1 決定論的性質

C-ECG のような生体信号は必ずしも可微分なもので なく、平均や分散などの統計解析やスペクトル解析とい った一般的な解析の適用が困難である。

しかし、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 は決定論的な信号となるであろう。また、 AF 時には、心房は高頻度で電気的に興奮しており心房 の電気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。すなわち、C-ECG は不規則性を増すため、 C-ECG の生成過程には何らかの決定論的な性質の有無 があるものと考えられる。そこで、この決定論的性質を 定量化し、評価することで、周波数領域には現れなかっ た変化が明らかになる可能性があり、フラクタル次元解 析による魚の運動軌跡の環境負荷依存性に対する解析<sup>4</sup> などに応用されている。本研究では、ノイズの影響には それほど左右されない<sup>5</sup>というメリットより、Wayland テスト<sup>6</sup>と Double-Wayland テストを用いた。

## 2.2 解析法

2.2.1 アトラクタの構造と再構成

信号からアトラクタと呼ばれる構造体を再構成する際, 信号の性質すべてが受け継がれることが望ましい。そこ で,自己相関関数により時系列データの要素間の線形相 関がなくなる最も小さい時差を見積もる。時差t'におけ る自己相関係数r(t')は

$$r(t') = \frac{E[(x_t - \mathbf{m})(x_{t+t'} - \mathbf{m})]}{\sqrt{E[(x_t - \mathbf{m})^2]}\sqrt{E[(x_{t+t'} - \mathbf{m})^2]}}$$
(1)

で定義される。ここで、 $\{x_i\}$ は時系列データを、**m**は  $\{x_i\}$ の平均値を表す。t'を増加させたとき、はじめて  $r(t') \le e^{-1}$ となるときをt' = tとし、時系列データの要 素間の線形相関が消失したとみなす。このtは埋め込み 時差と呼ばれる。

次に*t* おきに抽出した成分を並べて得られる配列から m次元遅延座標を次のように構築する。

$$\mathbf{x}_{t} = (x_{t}, x_{t+t}, x_{t+2t}, \cdots, x_{t+(m-1)t})$$
(2)

この系列 $\{\mathbf{x}_t\}_{t=0}^{n-m}$ を m 次元位相空間に埋め込むことに よりアトラクタを再構成することができる<sup> $\eta$ </sup>。

再構成されたアトラクタは、信号の特徴が構造上に現 れることが期待され、アトラクタを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、異常の構造が複 雑な場合、判断に主観が伴う恐れがあるため、以下の方 法によりアトラクタの構造の複雑さを定量化した。

Study on Detection of Heart Disease by Using Double Wayland Test

Taishi YAMAZAKI, Hitoshi TSUNASHIMA, Hiroki TAKADA and Isao YAMADA

#### 2.2.2 Wayland テスト

参照点とその近傍の数十点の距離に関して計算し、統計的に処理する点で、Grassberger-Procaccia アルゴリズム<sup>8</sup>よりも計算量が少ないものとなっている。これにより、従来の計算方法より格段に計算時間を短縮することに成功している。また、観測点の数の有限性から埋め込み次元を大きくとっても確率過程で生成された時系列か否かの判別が難しいことがよくあったが<sup>9 10</sup>、Wayland テストおよび Double-Wayland テストでは簡易に判別できることがある。

Wayland テストは、遅延座標からランダムに M 個の 点 $\mathbf{x}_{t_0}$ を選び、各 $\mathbf{x}_n$ の最近接ベクトルを K 個取り出し、 { $\mathbf{x}_{t_i}$ }<sup>k</sup><sub>i=1</sub>とする。そして、各 $t_i$ ( $i = 0,1,\dots,K$ )に対する軌道 変化ベクトル $\mathbf{v}_t = \mathbf{x}_{t+1} - \mathbf{x}_t$ を

$$E = \frac{1}{K+1} \sum_{i=0}^{K} \frac{\left\| v_{i_i} - \bar{v} \right\|}{\left\| \bar{v} \right\|}$$
(3)

により方向のばらつきを評価する。ここで,

$$\bar{v} = \frac{1}{K+1} \sum_{i=0}^{K} v_{i_i}$$
(4)

である。 Eは並進誤差(Translation error) と呼ばれる。 これら M 個の中間値を取る操作を Q 回繰り返すことで得 られる数値列の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,図 1(a)のように最近 接ベクトルの向きがそろっており,アトラクタの軌跡は なめらかになる。この場合,埋め込み次元の増大に従い アトラクタが正確に再構成されるため並進誤差は一定の 値に近づいていく。逆に,信号に規則性がない場合,図 1(b)のように最近接ベクトルの向きはばらばらになり,ア トラクタの軌跡は複雑なものとなる。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。

## 2.2.3 Double-Wayland テスト

Wayland テストより推定される並進誤差は,信号の ノイズ汚染が深刻な場合,推定された並進誤差に影響が 出てくることがあり,測定信号から異常を検知すること が困難になる<sup>5</sup>。そこで,もとの信号の時系列差分  $\{x_n - x_{n-1}\}$ からアトラクタを再構築した後,Wayland テ ストと同様の手順を行い,並進誤差を推定する。 Double-Wayland テストでは,信号が確率過程により生 成されている場合,推定される並進誤差は,Wayland テ ストのものより高い値をとる。これは,確率過程により 生成された時系列の時間差分は、ノイズの影響により埋 め込み空間において微分不可能な軌道を再構成すること が多いためであり,規則的な時間差分の時系列から推定



upon degree of determinism

された並進誤差は、時系列データの時間差分をとらない 状態から推定された並進誤差より減少することが示され ている<sup>3</sup>。この性質を用い、Wayland テストと Double-Wayland テストにより得られる並進誤差の比較によりノ イズ汚染が深刻な測定信号を評価することができる<sup>3</sup>。

## 3 C-ECGの解析

3.1 解析条件

今回提供された C-ECG のデータは発作性心房細動患 者 6例の治療中に記録された。記録時間は 0.01 秒間隔で 31 秒前後である。

カテーテルを挿入する際,カテーテルの先に取り付け られたセンサ側の番地に従い,測定位置をAからC,CS, DからHと区分けしている。各測定位置においてカテー テルの挿入深度が lmm おきに異なる部位(領域)でC-ECGの測定を行なっている。

本研究においては、この測定結果に対し、 M=51, K=4, Q=10 なる係数条件のもとで Wayland テスト, Double-Wayland テストを行い、並進誤差を算出した。

3.2 並進誤差の比較による解析

被験者 6名のうちの典型例である 1名の C-ECG の測 定結果の一部を図 2から図 4までの(a)に示す。縦軸は電 位,横軸は時間を表している。位置はカテーテル先端の センサによる区分けを,深度は C-ECG の測定の際,肺 静脈入口部にカテーテルの挿入した深度の範囲を示す。 これらに Wayland テスト, Double-Wayland テストを 行った結果,図 2から図 4までの(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。 3.3 解析結果

図 2 から図 4 までの(a) では、C-ECG は、測定部位の 違いやノイズの影響により異なることが考慮され、異常 部位の断定は困難である。まず、図 2(b)の Wayland テ ストと Double-Wayland テストの結果を比較すると、 Double-Wayland テストにより得られた並進誤差は Wayland テストのものより低値をとった。従って、図 2(a)における C-ECG の生成過程は規則性をもつと予測 される。 次に、図 3(b)の結果を比較すると、Double-Wayland テストにより得られた並進誤差は、Wayland テストのも のより高値をとった。よって、図 3(a)の C-ECG は確率 過程により生成されていると考えられた。このように、 Wayland テストと Double-Wayland テストの並進誤差 の比較で、C-ECG に規則性があるか否かをより正確に 検出することができる。同様にして図 4(b)を考えると、 図 2 と波形は異なるが、図 4(a)の C-ECG は規則性をも つと予測される。以上より、図 2、図 4 の部位は正常と 考えられ、図 3 の部位は不整脈発生部位であると予測さ れる。この結果は、医師の所見と一致しており、並進誤 差の比較により不整脈発生部位を検出できたと考えられ る。ただ、双方の並進誤差が同値に近い値をとった場合、 現段階では判断ができない。

最後に,図2から図4のC-ECGからPSDを求め,比較したものを図5に示す。各領域における測定条件は異

なり、(a)と(b)ではレベルの違いがあるが、ピークの周 波数は同様に近い波長域に分布しているため、正常か AF かの判断が困難である。

3.4 不整脈発生部位の検出

Wayland テスト, Double-Wayland テストより得ら れた並進誤差より,不整脈発生部位を特定するため,

$$e = \sum_{i \ge 7}^{10} \{ E_{trans}(v, i) - E_{trans}(x, i) \}$$
(5)

を算出した。 $E_{trans}(x,i)$ ,  $E_{trans}(v,i)$ はそれぞれ Wayland テスト, 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。 $\varepsilon$ は, 信号が規則的な場合,負の値となり,小さいほど規則性 の度合いは強まる。逆に,信号が不規則な場合, $\varepsilon$ は正 の値をとり,大きいほど不規則性の度合いが強まる。よ って, $\varepsilon$ が小さいほど正常であり,大きいほど AF の可能 性が高いと考えることができる。



Fig.4 Analytical result (position A, depth 3-4mm)

この式(5)の値 εを用いて図 6を作成した。横軸はカテー テルを肺静脈入口部に挿入した深さを、縦軸は位置を表し ている。εは、低いほど黒色で、高いほど白色で表示した。 この白色を検知することで不整脈発生部位を特定できる。 また、CECG のデータのない部分は斜線で表示した。この 図 6 では、図 2 と図 4 の CS9-10mm と A3-4mm の部位は 黒に近い色になっており、正常であると予測される。

図3のA5-6mmの不整脈発生部位であると予測される部 位は、白よりの色となった。また、図2から図5のように 結果は表示していないが、Eの1-2mmの部位にも白色が見 られるため、この部位も不整脈発生部位である可能性が高 いと予測される。Wayland テストと Double-Wayland テ ストより得られる並進誤差が同値に近い値をとった部位で は白色と黒色の中間の灰色となっている。



Fig.6 Local atrium plexus

4 結言

心疾患の検知に向けて不整脈発生部位の検出のため、C-ECGに関する Double-Wayland テストを行った。結果、以下の結論が得られた。

(1) C-ECG の信号に対し Double-Wayland テストを行い, Wayland テストにより得られた並進誤差と比較,相対的に 判断することで AFを特定できる可能性が示唆された。 (2) 式(5)より Wayland テスト, Double-Wayland テスト により得られた並進誤差を数値化し比較することで肺静脈 入口部における計測部位の規則性・不規則性を可視化し, 不整脈発生部位が限局できる可能性が得られた。

本論文では心疾患として AF を検討対象にしたが、心房 細動に限らず、心臓の異常は常に不規則性を増大させる方 向に進むため、今後の展開として、Double-Wayland テス トによる他の心疾患の検知についても期待できる。

#### 参考文献

1)Kobayashi, Y., The Roll of Catheter Ablation in the Treatment of Atrial Fibrillation, Journal of Nippon Medical School; Vol.69, No.3 (2002), pp.290-293.

2)Sanders, P., Berenfeld, O., Hocini, M, Jaïs, P., Vaidyanathan, R., Hsu, L., Garrigue, S., Takahashi, Y., Rotter, M., Sacher, F., Scavée, S., Ploutz-Snyder, R., Jalife, J. and Haïssaguerre, M., Spectral analysis identifies sites of high-frequency activity maintaining atrial fibrillation in humans, Circulation; Vol.112, No.6 (2005), pp.789-797.

3)Takada, H., Shimizu, Y., Hoshina, H. and Shiozawa, T., Wayland tests for differenced time series could evaluate degrees of visible determinism, Bulletin of the Society for Science on Form, Vol.19, No.3 (2004), pp.301-310.

4)Masahiro, N. and Nakagawa, M., Chaos and fractals analysis to environmental load dependency of fish's movement, IEICE technical report. Circuits and systems, Vol.105, No.275 (2005), pp.31-36

5)Takada, H., Hoshina, H., Tsunashima, H. and Miyao, M, Does Translation Error estimated by Double-Wayland Test depend upon Noise-Amplitude?, ISPJ Symposium Series, Vol.2005, No.11 (2005), pp.57-64.

6)Wayland, R., Bromley, D. and Pickett, D., Passamante A Recognizing determinism in a time series. PHYSICAL REVIEW LETTERS., Vol.70, No.5 (1993), pp.580–582.

7)Takens, F., Detecting strange attractors in turbulence, Lecture Note in Mathematics, Vol.898 (1981), pp366-381.

8)Yamazaki, H., Mino, M., Nagashima H. and Warden M., Strange Attractor of Chaotic Magnons Observed in Ferromagnetic (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CuCl<sub>4</sub>, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.56, No.2 (1987), pp.742-750.

9)Takens, F., Lecture Notes in Mathematics, Vol.898 (1981), pp.366-381.

10)Ruelle, D., Deterministic chaos: The science and the fiction, Proc. R. Soc. Lond. A, Vol.427 (1989), pp.241-248.