

磁界・電界併用による心臓内の導電経路推定

土井 達也¹⁾、 早野 誠治²⁾、 斎藤 兆古³⁾
法政大学 工学部

Electrical Conducting Path Estimation in Human heart by Combining Magnetic with Electric Fields

Tatsuya DOI, Seiji HAYANO, and Yoshifuru SAITO
College of Engineering, Hosei University

Abstract

Recently, it has shown that the medical diagnosis of human heart is reduced to searching for the defect positions of electrical conducting path in the human heart. The electrical conducting path searching in the human heart is one of the inverse source problems which is difficult to get a unique solution. This paper proposes an approach to identifying the electrical conducting paths in the human heart by measuring both of the local magnetic and electric fields. As a result, it is revealed that our method makes it possible to show the distinguished differences between the normal and abnormal human hearts.

1. はじめに

人間のみならず多くの生物の心臓は、電気信号で筋肉が刺激され血液の循環を司る役割を担っている。このため、人間の心臓異常の診断に心臓の位置する体表面上の電圧を測定し、血液の圧力波、すなわち脈拍と同期した電気信号波形解析が有用であることが知られている。換言すれば、心電図（ECG）による心臓診断である。他方、超電導体の量子効果を利用して、高感度磁束計（SQUID）が開発され、心臓の位置する体表面上の磁界分布（MCG）を測定することが可能となった。このSQUIDで測定された体表面上の磁界分布から心臓内の磁界源の位置・大きさ等を推定し、心電図では得られなかったより詳細な心臓診断を行う研究がなされている¹⁾。

局所的に測定された磁界から磁界源、または電界から電圧源を推定する問題はいわゆる逆問題を解くことに帰する。このような問題は、フィールド源の分布や性質を求めるフィールド源推定に関する逆問題であり、測定できる

フィールドが局所的であるために一意的な解は期待できない。

一方、媒質推定に関する逆問題は外部から既知のフィールドを対象に加えることができ、さらに、その応答を理想的に測定可能であれば一意的な解が期待できる。この媒質推定の逆問題の医学的実用例としては、X線などを用いたComputed Tomography (CT)がある²⁾。

しかし、生体内の電気信号伝達のメカニズムが、神経細胞に電荷が蓄積され、ある数居値を越える電圧に達した時点で次の細胞に電荷が移動する形式で行われるために、心臓は導電率が変化する経路は一定しているが、電気信号が伝わるつど経路の導電率が変化する系と考えられる。換言すれば、心臓の電気現象は、心筋の伸縮を司る神経の刺激が電気信号として伝達され、電気信号が伝わる経路そのものは正常な場合と異常な場合で異なるけれども一定していて、電気信号が伝わる経路の導電率は常に一定でない。従って、心臓内の電気信号経路推定に限定した場合、単純な媒質推定に関する逆問題として取

1) 大学院博士課程 2) 電気電子工学科専任講師 3) 電気電子工学科教授
〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2

り扱うことは不可能であり、心臓自身の持つ未知フィールド源を前提とする媒質推定に関する逆問題となる。

従来から筆者等は、このような心臓内の導電率分布を一意的に推定する方法として、磁界ベクトルアローマップと電界ベクトルアローマップを併用し、体表面上に投影された電力密度分布から心臓内の導電率分布を推定する方法を提案してきた⁽³⁾。この方法では、解を一意的に求めることが可能であるが、3次元的な情報が得られない欠点があった。

このため、本稿では、局所的に測定された電界および磁界分布から逆問題的な手法で未知のフィールド源を前提とする媒質推定を行う方法を提案する。本稿で用いた方法は、まず最初に、測定面上の電位分布の勾配をとることにより得られた電界分布からSampled Pattern Matching法（以下、SPM法と略記）によって3次元的な電圧分布を推定する⁽⁴⁻⁹⁾。同様に、測定面上の磁界分布からSPM法によって3次元的な電流分布を推定する。さらに、推定された電圧分布と電流分布の相関を取り、電力密度分布を求め、この電力密度分布から対象領域内の導電経路を推定する。この方法のキーポイントは、電界・磁界測定を併用し、対象領域内の電力密度分布から導電経路を推定することにある。

簡単なモデルを用いて計算機シミュレーションを行い、さらに、実際の心臓診断に応用した結果、良好な結果が得られたので報告する。

2. 電界・磁界併用による導電経路推定

直方体中の導電率の大きい部分に電流が流れているモデルを仮定し、直方体表面につくる電界および磁界分布からこの電流経路を推定する問題を考える。このような直方体領域では、静的電流系が成り立ち、電流密度 J と電界 E の関係はオームの法則

$$J = \kappa E, \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 κ は導電率である。変位電流が無視できる場合、電流密度 J は、次の条件

$$\nabla \cdot J = 0, \quad (2)$$

を満足しなければならない。他方、電界 E は電圧 V の関数であり、

$$E = -\nabla V, \quad (3)$$

で表されるから、結局

$$-\nabla \cdot (\kappa \nabla V) = 0, \quad (4)$$

が支配方程式となる。

本稿では、まず最初に、このモデルの直方体表面上の局所的な磁界分布からSPM法によって直方体内部の3次元的な電流分布を推定する。同様に、局所的な電界分布からSPM法によって直方体内部の3次元的な電圧分布を推定する。そして、推定された電流分布と電圧分布の内積を取ることで得られる電力密度分布から直方体内部の導電経路の推定を行う。

図1にシミュレーションによる例題を示す。図1(a)は、正解の電流（導電率）分布である。図1(b)は、直方体上面の面に垂直方向の磁界分布からSPM法によって推定された3次元的な電流分布である。図1(c)は、直方体上面の電界分布からSPM法によって推定された3次元的な電圧分布である。図1(d)は、図1(b)と図1(c)の内積を取ることで得られた3次元的な電力密度分布である。図1(d)の結果から、直方体内部の電流経路がある程度推定可能なことが

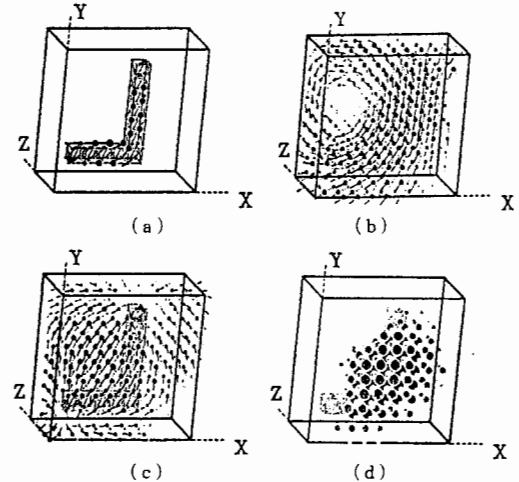


図1 シミュレーション結果。(a) 正確な電流（導電率）分布、(b) 局所的な磁界分布から推定した電流分布、(c) 局所的な電界分布から推定した電圧分布、(d) 電力密度分布。

わかる。なお、直方体表面上の局所的な磁界分布および電界分布の計算には、有限要素法を用いた。

3. 心臓診断への応用

3. 1. 電気刺激系と区間モデル

心臓の電気刺激系は、洞房結節、房室結節、ヒス束、右脚、左脚およびプルキンエ線維からなる。洞房結節はPacemaker的に電気信号を発生し、周囲の心房筋に伝導した後、房室結節に集電され、ヒス束を通じて右脚と左脚に分かれて電流が流れる。左脚の電流は前方線と後方線に分流し、脚枝は樹枝状に細かく枝分かれして心内膜側より筋層内に分布して、末端のプルキンエ線維で電流の流れが終る。これらの電気刺激系は単に導電率が大きい部分から構成される系でなく、電荷蓄積による電圧増加が導電率を大きくする系と解釈されるべきであることが通常の電気回路と本質的に異なる。しかし、ある部分からある部分へ電流が流れる区間は一種の単純な静的電流分布系とモデル化することは第一近似として充分であろう。

以上の理由から、心臓の電気刺激系の区間モデルとして、心臓を含む直方体領域で静的電流系が成り立つと考える。区間モデルの直方体と他の部分との境界はノイマン境界条件が成り立つと仮定する。これは、実際の心臓では必ずしも成り立つ境界条件で無い。しかし、局所的な磁界・電界分布から心臓内の導電率分布が推定可能かどうかのシミュレーションモデルとしては妥当なモデルである。

本稿では、心臓の電気刺激系が、部分区間の導電率の大きい部分と小さな部分からなる導体に直流電流が分布する静的電流系で表されると仮定した第一近似の区間モデルを前提とする。

3. 2. 実際の心臓診断への応用

心磁図によって測定された体表面上の局所的な磁界分布からSPM法によって直方体内部の3次元電流分布を推定する。また、心電図から得られた体表面上の電位分布から電界分布を計算する。局所的な電界分布からSPM法によって直方体内部の3次元電圧分布を推定する。そして、推定された電流分布と電圧分布の内積を取ることによって得られる電力密度分布から直方体内部の導電経路の推定を行う。正

常な場合と疾患のある場合の心臓の導電経路の比較を行うことにより心臓診断を行う。しかしながら、心臓の電気信号経路は正常な場合と疾患をもつ場合で異なるが、全く異なるわけではなく、ある一部分に疾患を持つ場合がほとんどである。従って、正確な心臓診断を行うためには、導電経路の時間変化をみる必要があるとなる。

実際の心臓の心磁図・心電図のデータを適用した例を図2-4に示す。

図2は、正常な心臓のQRS波34[ms]での推定結果を示す。図2(a), (b), (c)は、それぞれ、実際の心電図から推定された電圧分布、実際の心磁図から推定された電流分布、推定された電圧分布、推定された電圧分布[図2(a)]と電流分布[図2(b)]の相関をとることによって得られた電力密度分布を示す。このような推定をQRS波の各瞬間ごとに行い、電力密度分布の時間変化から心臓内の導電経路を推定する。

図3に、正常な場合のQRS波の各瞬間における電力密度分布を示す。それぞれの図において、破線の部分が測定面をあらわし、推定された電力密度の大きさは濃淡で表してある。また、図中の心臓のモデルは、推定された電力密度分布の位置をわかりやすくするためのものである。

図4は、正常な場合、Right bundle branch block (RBBB) 症候群、Left bundle branch block (LBBB) 症候群、Wolff-Perkinson-White

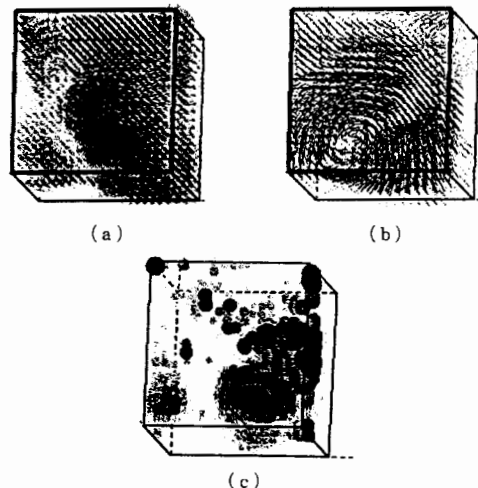


図2 心臓内の電力密度分布推定 (正常な場合、QRS波34[ms])。 (a) 心電図から推定された電圧分布、 (b) 心磁図から推定された電流分布、 (c) 電力密度分布。

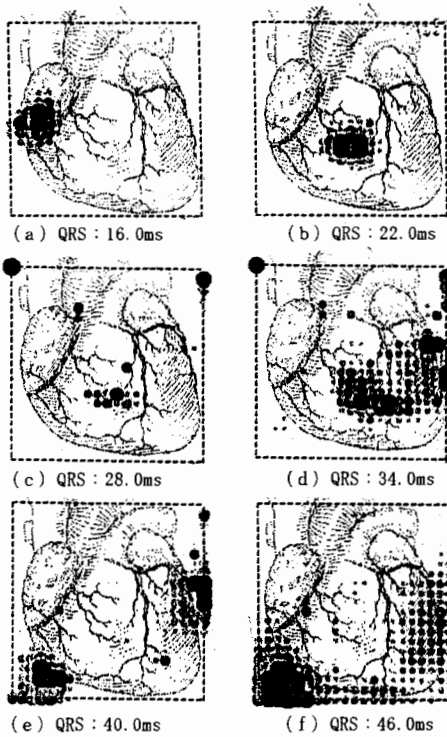


図3 実際の心電図と心磁図から推定された正常な場合の心臓内の電力密度分布。

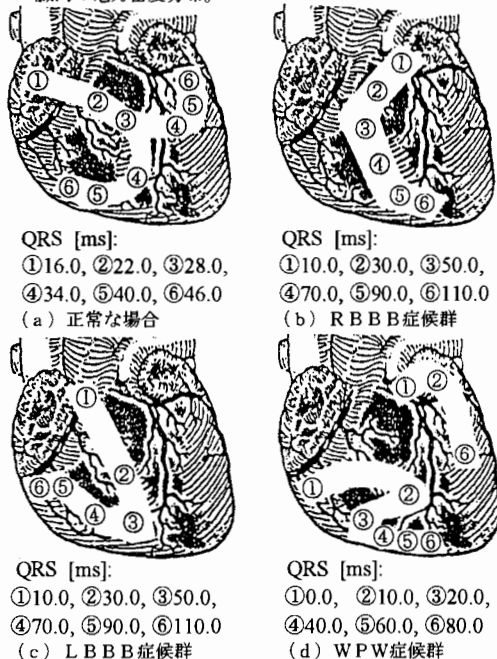


図4 実際の心電図と心磁図から推定された心臓内の導電経路。(a) 正常な場合、(b) RBBB症候群、(c) LBBB症候群、(d) WPW症候群の場合。

(WPW) 症候群の場合の心臓内の導電経路推定の結果を示す。図中の番号は、QRS波の各瞬間に最も強く推定された電力密度分布の位置を示す。明らかに、正常な心臓と各症候群の推定された導電経路の時間変化が明確に異なり、本稿で提案する方法が心臓診断に極めて有効であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、電界・磁界測定を併用し、電力密度分布を推定することで、電流が流れる経路である導電率の大きい部分を推定することが可能であることを有限要素法を用いた計算機シミュレーションによって示した。さらに、実際の心電図・心磁図に適用した結果、心臓疾患は電気伝導経路の時間変化が異なることに起因することが確認された。

謝辞

本稿で採用した心電図・心磁図のデータを快く提供して頂いた徳島大学医学部第二内科の中屋先生に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Anger G., Inverse Problems in Differential Equations, Plenum Press, 1990, New York.
- [2] 岩井、他 編著、医用画像診断装置-CT,MRIを中心として、コロナ社、1988、東京。
- [8] 土井、早野、斎藤、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-94-46.
- [4] Y.Saito, E.Itagaki, and S.Hayano, J.Appl.Phys., Vol.67, No.9, May(1990), pp.5830-5833.
- [5] H.Saotome, K.Kitsuta, S.Hayano, and Y.Saito, IEEE Trans. Magn., MAG-29, No.2 (1993), pp.1389-1394.
- [6] H.Saotome, T.Doi, S.Hayano, and Y.Saito, IEEE Trans. Magn., MAG-29, No.2 (1993), pp.1861-1864.
- [7] H.Saotome, K.Kitsuta, S.Hayano, and Y.Saito, Int. J. Appl. Electromag. Matrls., 3, No.4, (Elsevier Pub. Co. LTD), (1993), pp.297-306.
- [8] 土井、早乙女、早野、斎藤、電学論A, 114巻4号、平成6年4月、pp.290-295.
- [9] T.Doi, S.Hayano, and Y.Saito, Y.Ishihara and E.Matsumoto Ed., Abstracts the Second Japanese-Czech-Slovak Joint Seminar on APPLIED ELECTROMAGNETICS IN MATERIALS, January 19-21, 1994, Kyoto, Japan, pp.43-46.