

電気インピーダンス法による導電率分布可視化と その実験的検証

音川 英一[○], 早野 誠治, 齋藤 兆古 (法政大学大学院)

堀井 清之 (白百合女子大学)

Visualization of Conductivity Distribution by Electrical Impedance Method and Its Experimental Verification

Eiichi OTOGAWA, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

With the developments of modern high-speed computer, X-ray tomography and MRI are widely used as a deterministic tool of medical diagnosis. On the other side, EIT (Electrical Impedance Tomography) is now developing mainly for industrial use. Fundamental difference between them is that MRI or X-ray tomography needs not to handle the functional measured data, but EIT is based on the functional nature of the measurable data. Namely, EIT requires a solution of ill-posed system equations but MRI or X-ray tomography does not require the solution of such the ill-posed system equations. In the present paper, we propose one of the most reliable solution methodologies accompanying with EIT development.

Keywords: Generalized Vector Sampled Pattern Matching method, Inverse parameter problems, Functional type tomography

1. はじめに

現在, 主として医療用に実用化されている X 線 CT や MRI などのトモグラフィー技術は, 断層撮影対象を直線的に通過することが保証される X 線, マイクロ波などを照射し, それらが対象を通過する際の減衰率を対象断面に沿って測定し, 測定データから逆フーリエ変換, 重み付き投影法, Radon 変換などを用いて断層影像を得る.

他方, 関数型トモグラフィーである電気インピーダンス法 (Electrical Impedance Tomography, 以下, EIT と略記) では注入電流が対象内で直進せず拡散する. EIT は, 二次元断面中の媒質パラメータを一元的周辺電圧から求めることに帰するから, 式の数 (一次元的断周辺電圧) よりも未知数の数 (二次元断面中の導電率) が多い不適切な線形システムとなるため, 一意的な解が得られない.

以上のように, 非常に困難な問題を抱える関数型トモグラフィーであるが, 断層撮影を行うために必要とされる装置が比較的安価で, 且つ小型なもので実現できるという利点を有する. MRIには強力な磁界生成のために超電導磁石などの比較的大型な装置を必要とし, その価格も比較的高価なものとなる. 他方, EITには対象に電流を注入するための定電流源, 対象表面電位を測定する電圧

計のみを必要とし, それらの機器は比較的小型であり, 安価である. これらの利点から, 関数型トモグラフィーは, 多くの人口を抱える中国では国家計画として研究・開発がなされている.¹⁾

近年, 村井や加川等によって提唱されたセンシビリティ行列法へ筆者等が提唱した GVSPM (Generalized Sampled Pattern Matching) 法を適用した結果, Newton 法や特異値分解法等よりも良好な結果が武居等や Dong 等によって報告されている.^{2,3,4,5)}

筆者らは, 以上のような現状を鑑み, 対象内の導電率の違いに起因する電圧分布の相違を電気双極子で表現し, GVSPM 法を適用する全く新しい EIT 理論を提案し, その妥当性をシミュレーションによって吟味した結果, 比較的良好な結果を得られた.^{6,7)} 本論文では実験によってその妥当性を検証する.

2. 理論的背景

2.1 逆起電力と電気双極子による定式化

Fig. 1(a)に示す対象領域 A に対して電流 $I[A]$ を注入した場合, 対象領域内部には逆起電力分布 (電圧分布) $V_A(x,y)[V]$ が生じる. 同様に Fig. 1(b)に示す領域 A 内に異なる導電率の部分を追加した領域 B に電流 $I[A]$ を注入した場合, 対象領域内部には逆起電力分布 $V_B(x,y)[V]$ が

生じる。両者の逆起電力分布の相違（差分）は対象内の導電率変化に起因する式(1)で与えられる逆起電力分布 $V_C(x,y)$ となる。この逆起電力分布 $V_C(x,y)$ は導電率が変化した部分の電気双極子の集合からなると考える。

$$V_B(x,y) - V_A(x,y) = V_C(x,y) \quad (1)$$

EIT の目的は、対象領域表面で測定される電圧分布から、対象領域内部の導電率分布を推定することにある。導電率分布の推定は、導電率の変化による逆起電力分布 $V_C(x,y)$ が与える対象周辺電圧分布から電気双極子の位置と大きさを推定することと等価である。⁸⁾

Fig. 2 に示す電気双極子の作る電圧は式(2)で与えられる。ここで、 $V_P[V]$ は電荷 $Q[C]$ を有する電気双極子が距離 $r[m]$ 離れた点 P に作るポテンシャルである。また、 $\epsilon[F/m]$ は空間の誘電率である。

$$V_p = \frac{Q\delta \cos \theta}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11x} & G_{11y} & \cdots & G_{1mx} & G_{1my} \\ G_{21x} & G_{21y} & \cdots & G_{2mx} & G_{2my} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{n1x} & G_{n1y} & \cdots & G_{nmx} & G_{nmy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1x} \\ Q_{1y} \\ \vdots \\ Q_{mx} \\ Q_{my} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{GQ}$$

$$G_{ijx} = \frac{\cos \theta_{ijx}}{r_{ij}^2}$$

$$G_{ijy} = \frac{\cos \theta_{ijy}}{r_{ij}^2} = \frac{\sin \theta_{ijx}}{r_{ij}^2}$$

Fig. 3 に示すように、対象領域を取り囲む周辺電圧分布は対象領域内を離散化した複数点の電気双極子の X 成分、 Y 成分が作るポテンシャル分布の線形和であると考えられる。よって、対象領域表面の測定電圧分布は電気双極子の作るポテンシャルを表す式(2)を用いて、式(3)で与えられる。ただし、 $\delta=4\pi\epsilon$ とする。

式(3)のシステム方程式から求めるべきは任意の位置の逆起電力、即ち、電気双極子の大きさ $\mathbf{Q}[C]$ であるから、行列 \mathbf{G} の逆行列を左辺の表面電圧の測定値 $\mathbf{V}[V]$ に掛けることになる。ところが、対象領域周辺に設置できる測定電極数は有限個に限定されるため、一般に行列 \mathbf{G} は正方行列にならない。したがって、この問題は不適切な線形システム方程式を解く逆問題に帰する。本論文では、この不適切な線形システム方程式の解法として GVSPM 法を採用する。

2.2 各測定データの扱いと畳み込み演算

通常の間数型 EIT では、可能な電流注入電極対によって得られる線形システムを全て連立して解くが、電気双

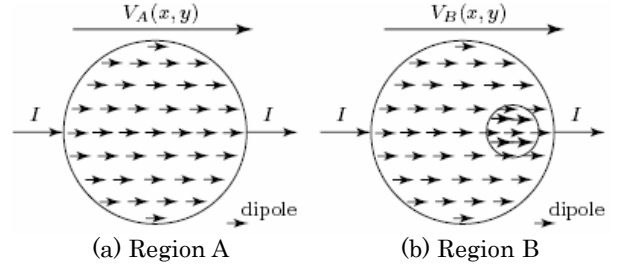


Fig. 1 Counter Electromotive Force by Different Resistance

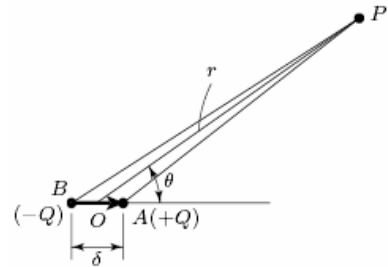
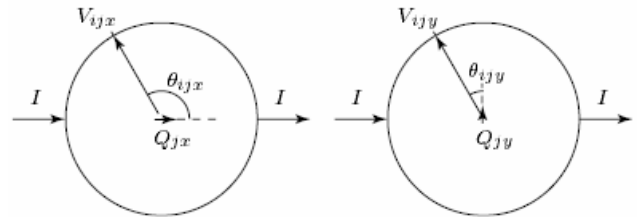


Fig. 2 Electric Dipole



(a)X Component of Dipole (b)Y Component of Dipole
Fig. 3 Measurable Voltage and Voltage Dipole

極子を用いた本定式化法においては、電流の通電状態を変えることは求めるべき解である電気双極子を変えることを意味するため、電極の組み合わせの違いによるデータを単純に連立することはできない。現在、この問題点に対する解決策を模索中である。

代替案として個々の電流注入で得られる線形システムを独立に解き、得られた結果から電流の注入方向を変化させても共通に算出される電圧双極子分布を畳み込み演算で抽出する。換言すれば、 n 個のシステム方程式を独立に解き、電気双極子の大きさ Q_i 、即ち、導電率分布 Z_i を求める。得られた導電率分布 Z_i を 0 から 1 の間に正規化し、式(4)を用いて n 回の畳み込み演算 (convolution) を行うことで、逆問題による解の信頼性向上を図る。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 \otimes \mathbf{Z}_2 \otimes \cdots \otimes \mathbf{Z}_{n/2} \quad (4)$$

この畳み込みによる方法は、電極組み合わせ数を増やすことが、必ずしも解の精度を向上させることを意味しないため、可能な限りの電極組み合わせ数を取ることなく、表面設置電極 n 個に対して、電流注入点数は $n/2$ 個となるように電極組み合わせを設定する。具体例として、Fig. 4 に示すように表面電極数が 12 個存在する場合、対象領域への電流注入対数は 6 方向とする。

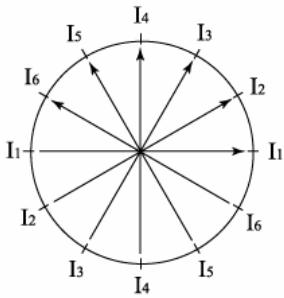


Fig. 4 Pairs of Electrodes for Current Injection

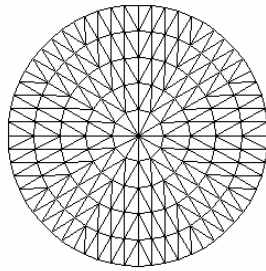


Fig. 5 Discretized Region Model for Tomography

Table 1 Various Constants of tested System

測定対象トレイ	アクリル樹脂製, 直径 20cm, 銅板電極 24 極 (H=2cm W=1cm D=0.3mm), 水深 1cm
測定対象オブジェクト	銅ブロック (H=2cm W=2cm D=2cm), 発泡スチロールブロック (H=2cm W=2cm D=2cm)
標準抵抗	1kΩ
Function Generator	KIKUSUI MODEL 4502
アンプ	NF Electronic Instruments 4025 HIGH SPEED POWER AMPLIFIR
オシロスコープ	YOKOGAWA DL7100

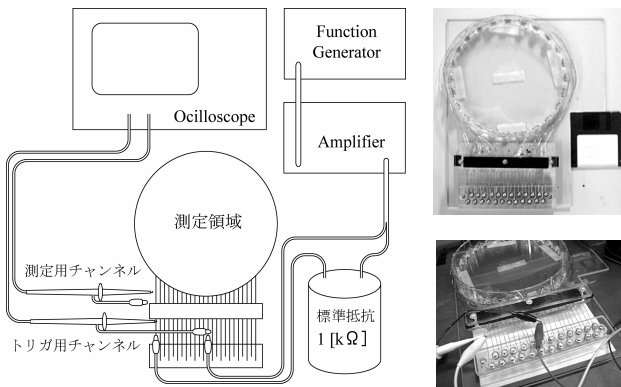
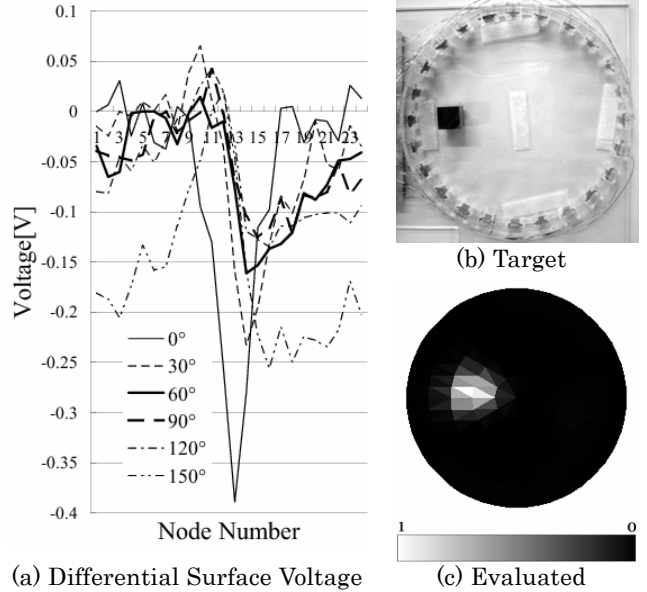


Fig. 6 Schematic Diagram of the tested EIT

3. 実験による検証

以上のような理論的背景を前提とした実験によって我々の手法の妥当性を検証する。断層撮影領域の離散化は Fig. 5 のように行い、実験には Fig. 6 に示すような実験システムを構築した。装置の各パラメータは Table. 1 に示す通りである。このような実験装置を用いて、測定対象トレイの周囲に設置された電極から得られた電圧波形の実効値を式(3)の測定電圧値として、領域内の銅ブロック、発泡スチロール・ブロックの位置を推定する。

本定式化法は直流を前提としたものであるが、実際に直流電流を流すと水が電気分解を起こすなどのノイズ要因が懸念されるため、交流で行うことにする。交流で行うことによって生じる、リアクタンス成分の影響をでき



(a) Differential Surface Voltage (c) Evaluated
Fig. 7 Result of Experiment (Copper Block)

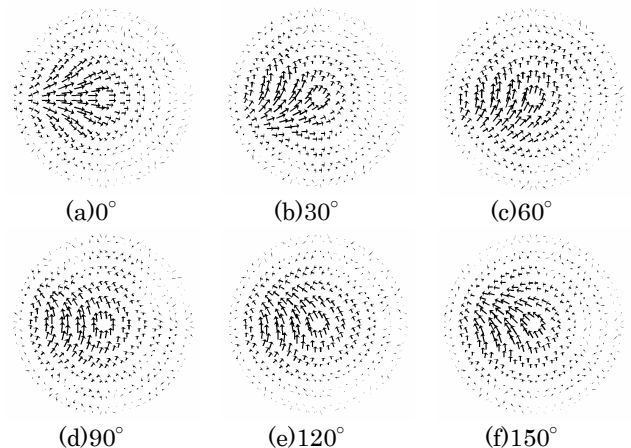


Fig. 8 Voltage Dipole Distributions obtained by solving Eq. (3) independently

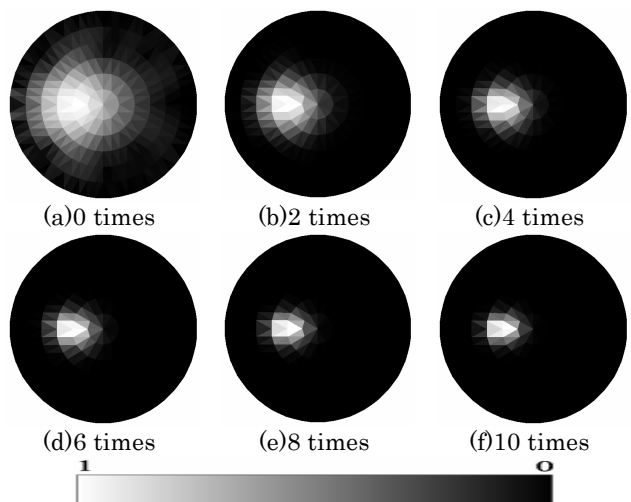


Fig. 9 Convolution Process

るだけ減らすため、測定対象トレイの電極間インピーダンスの周波数特性を測定し、得られた共振周波数から、電源の駆動周波数を 3[kHz]と決定した。測定対象トレイ

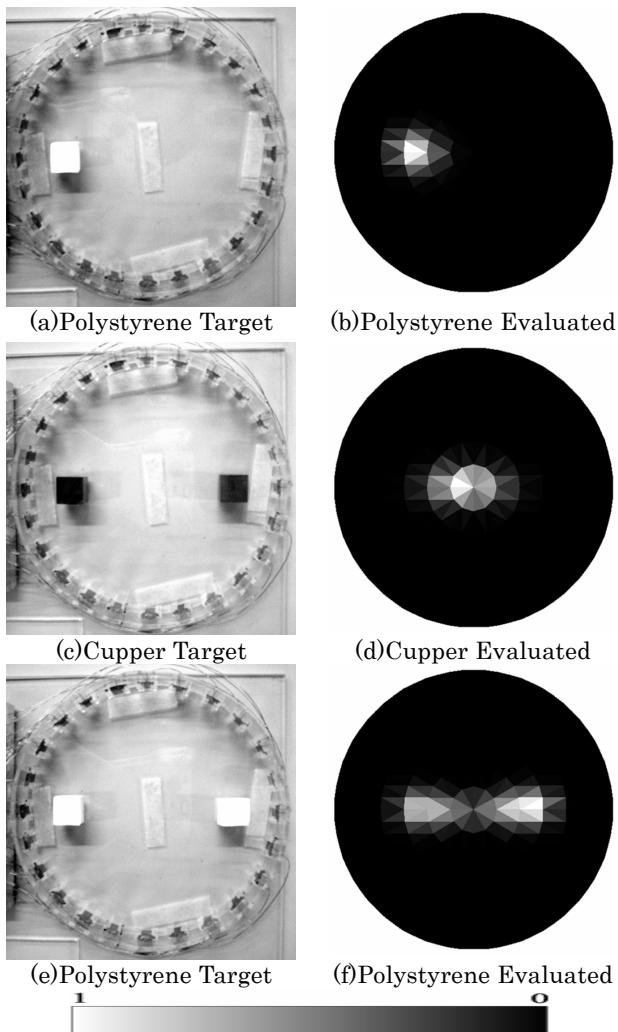


Fig. 10 Exact and Evaluated Conductance Distributions

の抵抗値は3[kHz]付近で、およそ20[k Ω]である。本実験ではトレイの両端電位差がおおよそ10[V]（波高値）になるように電流を流すことにする。

Fig. 7 に銅ブロックを用いた実験結果を示す。電流の通電方向による各システム方程式の解はFig. 8 のようになっている。畳み込み演算の過程はFig. 9 のようになっている。図に表記されている角度は電流の通電方向を表しており、Fig. 4 における I_1 を角度 0° 、 I_2 を角度 30° とし、半時計方向に定義する。

その他、Fig. 10 のような結果も得られている。水に対して導電率が大きい銅と小さい発泡スチロールとは表面電位の変化が逆であるはずだが、算出された電気双極子の有する電荷の絶対値を取って畳み込み処理を行うため、その導電率の大きさに関する情報は失われることになり、図Fig. 7 (c)、Fig. 10 (b)の結果は近いものとなっている。

Fig. 10 (d) の発泡スチロール・ブロック二個を対象とした場合は比較的良好な結果が得られたが、Fig. 10 (b) の銅ブロック二個を対象とした場合では良い結果が得られなかった。これは、銅の場合は二個のターゲットを分離するためには周辺電圧の変化が十分に得られなかったためと考えられる。

4. まとめ

本論文は抵抗素子に電流を流した際に生じる電圧降下が逆起電力で表すことができる点に注目し、その逆起電力を電気双極子として扱うことで、導電率パラメータ推定問題である EIT に電気双極子を用いた新たな定式化法を提案した。また、提案した方法の妥当性を実験によって検証し、比較的良好な結果を得た。よって、EIT 問題を電気双極子分布探査問題へ定式化することの妥当性が検証された。

参考文献

- 1) Tian, H., He, W. and Saito, Y. : A Study of Reconstruction Algorithm for Electrical Impedance Tomography, The 2nd Japan, Australia and New Zealand Joint Seminar, January Kanazawa, Japan (2002) pp. 24-25.
- 2) Murai, T. and Kagawa, Y. : Electrical impedance computed tomography based on a finite element model IEEE Trans. Biomed. Eng. Vol. 32 (1985) pp. 177- 84.
- 3) Endo, H., Hayano, S., Saito, Y. and Miya, K. : Generalized vector sampled pattern matching method- theory and applications Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VI) (Studies Appl. Electromagn. Mech. 23) ed Kojima, F. (The Netherlands: IOS Press) (2002) pp. 285- 92.
- 4) 武居 昌宏, 李 輝, 越智 光昭, 齋藤 兆古, 堀井 清之: サンプルパターン・マッチング法による固気二相流 CT 画像の再構成, 可視化情報学会論文集, Vol. 22, No. 9, (2002) pp. 71-78.
- 5) Dong, G., Bayford, R., Gao, S., Saito, Y., Yerworth, R., Holder, D., Yan, W. : The application of the generalized vector sample pattern matching method for EIT image reconstruction, Physiol. Meas. (2003) 449- 46624.
- 6) 音川 英一, 早野 誠治, 齋藤 兆古, 堀井 清之: パラメータ推定に関する逆問題とその関数型トモグラフィーへの応用, 可視化情報学会論文集, Vol. 23, No. 1, (2003) pp. 103-106.
- 7) 音川 英一, 早野 誠治, 齋藤 兆古: 電気インピーダンス法に関する一考察, 電子情報通信学会, Vol. 23, No. 1, (2003) pp. 103-106.
- 8) Saotome, H., Doi, T., Hayano, S., Saito, Y. : Crack identification in metallic materials, IEEE Transaction on Magnetics Vol. MAG-29, No. 2, March, (1993) pp. 1861-1864.