

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2022

課題番号：16KK0118

研究課題名（和文）高度放射線治療のための安価・簡便・高精度なリアルタイム生体断層撮影技術の開発（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Development of the impedance tomography technique for the real-time radiation therapy(Fostering Joint International Research)

研究代表者

遊佐 訓孝 (Yusa, Noritaka)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60466779

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,500,000円

渡航期間：4ヶ月

研究成果の概要（和文）：対象表面の電位分布から対象内部の電磁気的特性を再構成するインピーダンストモグラフィ技術の高精度化のための研究を行った。現在脳波測定にて用いられているものと同等の機能を有する測定系を汎用装置を用いて構築し、複数の逆解析アルゴリズムを開発した。水ファントムを用いた測定試験を実施し、得られた信号から水ファントム中の異常部の位置・大きさを画像として確認することに成功した。また、各種測定条件が逆解析の精度に及ぼす影響の評価を行った。しかしながらその一方、当初想定されていた電磁場の重ね合わせによる空間分解能の高精度化を確認することはできなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

被曝の可能性が無くまた非侵襲で対象内部の導電率分布を3次元的可視化することができるインピーダンストモグラフィは、医療のみならず様々な分野における検査・診断に有益であると期待される一方で、得られる画像の空間分解能が低いという問題のため、適用先が限定的となっている。本研究において、電磁非破壊検査技術である渦電流探傷法のきず評価能において有効であった電磁場の重ねあわせの有効性を確認することはできず、ともに電磁現象に基づく技術であるとはいえ、渦電流探傷法の開発を通じて得られた知見と技術はインピーダンストモグラフィの高度化に必ずしも寄与しないことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：This study attempted to enhance the spatial resolution of the impedance tomography technique to evaluate the internal impedance distribution from the voltages measured on the surface of the target. An experimental system was prepared using general purpose instruments; a few inverse analysis algorithms were developed to evaluate the impedance distribution. The results of the verification tests using a water tank phantom confirmed that the system and the algorithm enabled to evaluate the size and the location of an anomaly inside the tank as an image. Further numerical investigations were performed to evaluate the factors that affect the quality of the results. In contrast, however, this study could not confirm the significant improvement of the spatial resolution by superposing several electromagnetic fields originally expected.

研究分野：原子力工学

キーワード：断層撮影 非破壊評価 電気インピーダンス

1. 研究開始当初の背景

我が国においては現状死因の 1/3 をがんが占め、また今後益々その割合は増えると考えられていることを受け、放射線治療に対する注目がこれまで以上に高まってきている。放射線治療においては腫瘍組織に線量を集中させることが肝要であるが、腫瘍によっては呼吸などにより治療時に数 cm 以上移動しうることが、効率的・効果的な治療の妨げとなっている。このような課題に対しては、放射線による治療中のリアルタイム撮影や変位計などによる呼吸状態の把握など複数の技術が既に開発・臨床にて用いられている。しかしながら、前者は高精度である一方で不要な被曝に繋がるという大きな問題があり、後者は測定対象が表面位置及び形状であるため測定値が内部の状態を定量的にどの程度反映しているかは必ずしも明確ではない。

電気インピーダンストモグラフィーとは、対象表面に取り付けられた電極より微弱な電流を流し、その際の対象の表面電位分布から対象内部のインピーダンスの分布を 3 次元的に画像化する技術である。用いられる電流は微弱であるために対象に損傷を与えることは無く、また放射線を用いることもないので対象が被曝することも無い。実際の度合いなどは腫瘍により異なるものの、腫瘍によっては電気インピーダンスの値が正常組織とはわずかに異なることが知られていることから、電気インピーダンストモグラフィーは放射線治療時の腫瘍位置追跡技術としてのリアルタイム生体断層撮影技術に繋がらうものと期待される。

しかしながらその一方、一般的に電気インピーダンストモグラフィーにて得られる対象内部の情報は、X 線 CT や MRI などの一般的な断層撮影技術と比べるとはるかに空間分解能が低いという問題がある。そのため、現状電気インピーダンストモグラフィーの適用先は極めて限定的である。

2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究は、代表者がこれまでの構造物の検査・評価のための検査開発研究を通じて開発してきた技術、特に電磁非破壊検査技術の一つである渦電流探傷法において有効性が確認された他の電磁現象を用いた検査技術への適用検討も進められている、複数の電磁場を重ね合わせることで測定信号から対象形状評価能を飛躍的に向上させる技術に基づく、電気インピーダンストモグラフィーによる対象内インピーダンス分布の高分解能評価技術の開発を目的とする。

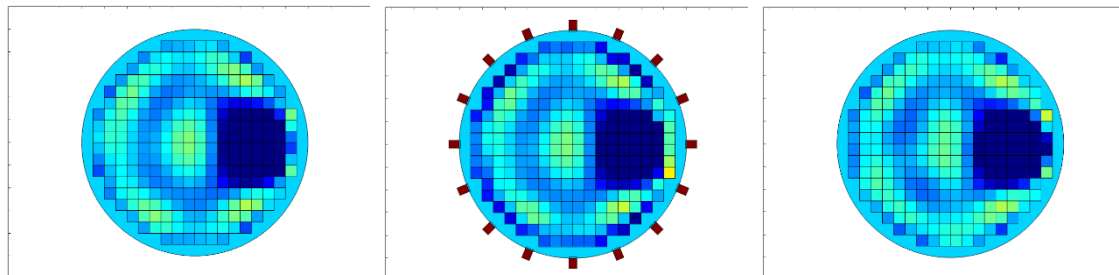
3. 研究の方法

研究代表者のこれまでの研究は構造物を対象としたものに限定されているため、電気インピーダンストモグラフィーにおいては著名な英国 University College London のグループにおいて生体に対する電気インピーダンストモグラフィー技術を学び、また同等の測定及び信号処理システムを構築する。加えて、電磁場の解析において著名である米国 Michigan State University 及びフランス Paris-Sud において最新の逆解析技術について学び、上記の複数の電磁場の重ね合わせに基づく技術を適用することで、測定信号から対象内部のインピーダンス分布を 3 次元的に評価できる数値解析アルゴリズムを開発する。

4. 研究成果

英国 University College London のグループにおいて開発された回路基板及びそれを通じて制御される汎用装置の組み合わせ、及び測定信号に対して複数のフィルタ処理を加えることにより、高価な専用機器を用いることなく、電気インピーダンストモグラフィーのための多チャンネル自動測定を行うことができる測定システムを構築した。また、3 次元有限要素法解析による、任意の対象内異常及び電流印加パターンに対する対象表面電位分布解析プログラム、また対象内部を多数のボクセル領域に分割し、各ボクセルの導電率変化と表面電位変化を関係づけるための疑似逆行列を疑似並列計算により効率的に評価するためのプログラムを開発した。

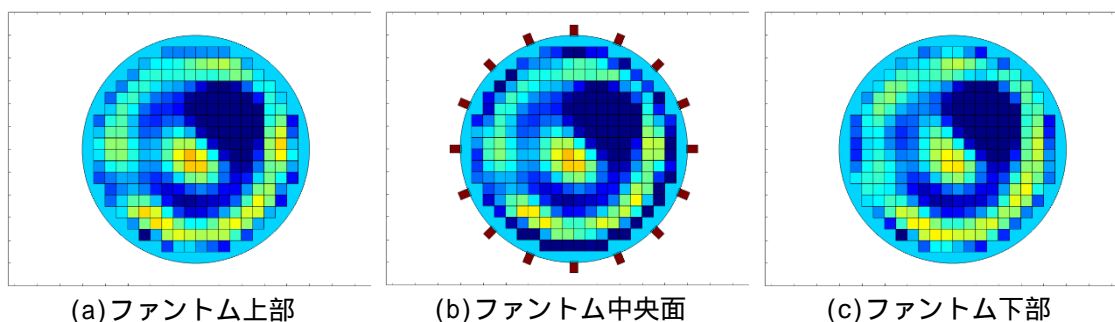
直径 200mm、高さ 80mm の水ファントムに対して、高さ方向中央部に周方向同一間隔 16 か所に取り付けられた電極から電流を印加した際の電極電位からファントム内に設けた異常部の位置及び大きさを評価した結果の例を図 1 ~ 3 に示す。各図はファントムの高さ 75%、50%、25%での断面におけるインピーダンス分布であり、水色が水部分、深い青色が水よりも導電率が低い領域、緑～赤が水よりも導電率が高い領域を示している。信号の安定化のため、ファントム底面中央部



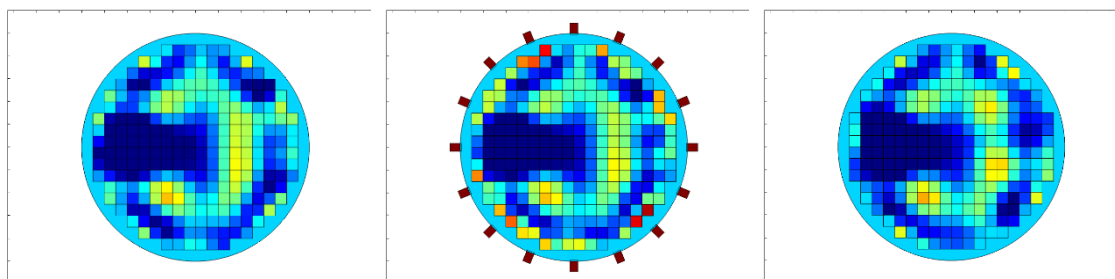
(a)ファントム上部 (b)ファントム中央面 (c)ファントム下部

図 1 インピーダンス分布評価結果 (異常部位置: 左)

を設置させ、また印加電流は 10Hz の交流電流を用いた。異常部の評価には、3次元有限要素法解析により得られた疑似逆行列と、J 曲線に基づく適切化を用いた。図 1 ~ 3 はそれぞれ、異常部として約 50mm 角の絶縁矩形柱を図中右、右上、そして左に設けた場合の測定結果に対する結果である。異常部として用いた絶縁角柱はファントムの底部から水面上まで達しているため、得られた結果は異常部の位置と大きさを概ね正しく反映しているといえることができる。しかしながらその一方、異常部以外の水領域に対応するボクセルの導電率も一様一定とはなっておらず、場所によっては異常部と同程度に水領域との差異が大きな導電率が得られてしまっている。この結果を受け、様々な電流印加条件及びそれらの重ね合わせが対象内部の電気インピーダンス分布の評価精度に与える影響について、同様の水ファントム異常部評価に基づく詳細な評価・分析を行ったが、渦電流探傷法において確認されたような、異常部評価の顕著な定量性の向上を確認することはできなかった。



(a)ファントム上部 (b)ファントム中央面 (c)ファントム下部
図 2 インピーダンス分布評価結果 (異常部位置: 右上)

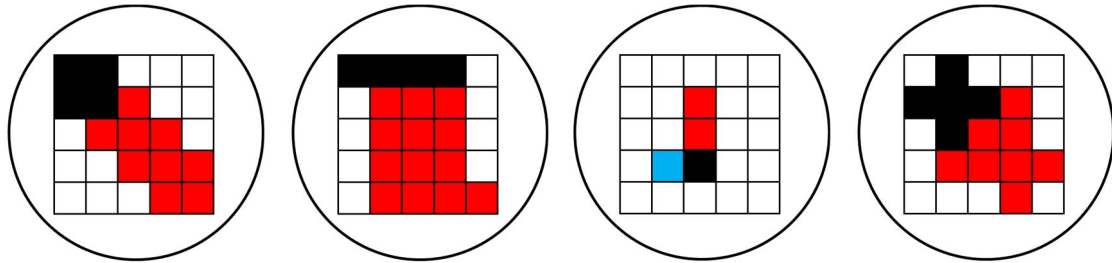


(a)ファントム上部 (b)ファントム中央面 (c)ファントム下部
図 3 インピーダンス分布評価結果 (異常部位置: 左)

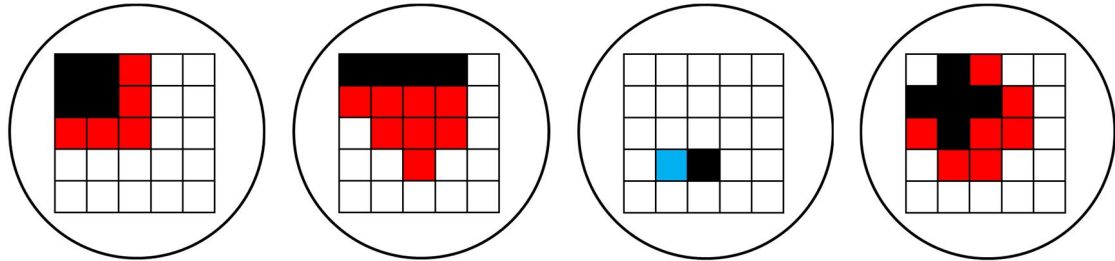
以上の結果は対象を構成する各ボクセルの内部導電率の値そのものを推定しようとしたためであると判断し、各ボクセルが異常部に属するか否かを評価する数値逆解析アルゴリズムの開発と評価を行った。

対象の構成要素の特徴が 2 値的に表現されることから、遺伝的アルゴリズムに基づく逆解析の検討を行った。しかしながら、予備的な評価の結果再構成画像を得るために必要となる計算機資源が膨大となることが明らかとなったため、現状適用報告は非常に乏しいものの、電気インピーダンストモグラフィーにおける画像再構成アルゴリズムとして高い可能性を有すると考えられる単調性原則に基づく数値逆解析プログラムを制作し、数値解析データに基づく各種測定条件が異常部の評価精度に及ぼす影響の評価を行った。

単調性原則に基づく水ファントム内部異常部評価結果の例を図 4、5 に示す。各図黒が真の異常部でありかつ正しく異常部と評価された部位、赤が異常部でないにもかかわらず異常部と評価された部位、そして青が異常部であるにもかかわらず異常部ではないと評価された部位を表している。水ファントムは直径 100mm、高さ 100mm の円柱であり、異常部は上の試験と同様にファントムの底面から上部にまで達しているものを設定した。また、電流印加及び電位測定のための端子はファントムの高さ方向中央部に、周方向等間隔で取り付けられている。図 4 は電極数を 8 とし対向する電極を用いて電流を印加した場合、図 5 は電極数を 32 とし周方向位置が 90 度異なる電極を用いて電流を印加した場合である。図より、評価結果は真値と大きく異なっているとはいえないものの、精度向上の余地は小さくはない。ただし、図 1~3 の結果とは異なり、異常部と正常部の境界が明瞭に得られていることには実用上の価値は高いとも考えられる。ランダムに生成した 16 ケースの異常部に対して、電極数及び電流印可条件が異常部の過大及び過小評価度合いに与える影響を評価したものが表 1 である。単純に用いる電極数が多いほど評価精度が高いということはなく、対象とする異常部の位置と形状に応じた適切な電流印可条件が存在することを示唆した結果となっている。



(a) 条件 1 (b) 条件 2 (c) 条件 3 (d) 条件 4
 図 4 単調性原則に基づく内部異常部評価結果(電極数 8, 電流印加電極間角度 180 度)



(a) 条件 1 (b) 条件 2 (c) 条件 3 (d) 条件 4
 図 5 単調性原則に基づく内部異常部評価結果(電極数 32, 電流印加電極間角度 90 度)

表 1 電極数及び電流印加角度と異常部過大/過少評価率

電流印加電極 間角度 (deg.)	電極数							
	4		8		16		32	
	過大	過少	過大	過少	過大	過少	過大	過少
45	--	--	12	13	15	6	10	46
90	61	0	24	3	15	13	12	41
180	302	0	119	2	99	16	55	36

unit: %

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ウドパ サティッシュ (Udpa Satish)	ミシガン州立大学・College of Engineering・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	レセリエ ドミニク (Lesselier Dominique)	パリ第11大学・Laboratoire des Signaux et Systèmes・Senior Researcher	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ホルダー ダビッド (Holder David)	ユニバーシティカレッジロンドン・Medical Physics and Biomedical Engineering・Professor	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	CentraleSupélec			
米国	Michigan State University			
フランス	CentraleSupélec			
米国	Michigan State University			
英国	University College London			
フランス	CentraleSupélec			
英国	University College London			