

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32607

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630190

研究課題名(和文)高周波電流誘起磁気トモグラフィ技術の開発

研究課題名(英文)Development of high frequency current induced magnetic tomography technology

研究代表者

熊谷 寛 (KUMAGAI, HIROSHI)

北里大学・医療衛生学部・教授

研究者番号：00211889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：電気インピーダンスCT技術、磁気計測技術、レーザー技術を融合させることで、これまで実現できなかった安全・非侵襲・非接触で生体内の導電率分布を断層画像として取得するシステムの開発を目指した。まず電流誘起磁気トモグラフィ法を提案し、1kHzの8チャンネル電流誘起磁気トモグラフィの水槽ファントム実験システムを開発し、水槽内の導電率分布の画像化に成功し、電流誘起磁気トモグラフィの可能性を示すことができた。次に非接触電流注入装置を開発し、高周波光ポンピング原子磁気センサとの統合に必要な同センサの高周波特性について研究を行い、100kHzの磁束密度変化の高感度観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：By integrating electrical impedance CT technology, magnetic measurement technology, and laser technology, we aimed to develop a system that acquires conductivity distribution in vivo as a tomographic image in a safe, noninvasive, noncontact manner that could not be realized so far. We first proposed a current induced magnetic tomography method, developed a water bath phantom experiment system of 1 kHz 8 channel current induced magnetic tomography, succeeded in imaging the conductivity distribution in aquarium, possibility of current induced magnetic tomography could be shown. Next, we developed a noncontact current injection device, studied high frequency characteristics of the sensor necessary for integration with a high frequency optically pumped atomic magnetometer, succeeded in high sensitivity observation of magnetic flux density change at 100 kHz.

研究分野：医療工学

キーワード：磁気 トモグラフィ 電流誘導

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

急速に高齢化が進み 2025 年には 65 歳以上の高齢者が人口の 30% を超え、寝たきり人口が 450 万人になると予想されている。特に医療の面に与える影響は極めて大きく、2025 年には医療費が 59 兆円、さらに介護費を加えると 94 兆円にもものぼると言われている。他方では少子化の深刻な問題があり、現状の経済力を維持するには高齢者の労働力確保が不可避である。高齢化に伴って疾病の罹患率は高まるため、10 年後には簡易的に早期の疾病を検出できる高性能な在宅医療システムが開発できることにより、肉体的には健康でかつ痴呆も伴わない精神状態を維持できることにより、高い労働力を確保でき、さらに医療費の大幅な削減にもつながる一定の目処がたてられる。

全身の疾病を一括して検出するためには、X 線 CT や MRI (磁気共鳴画像化技術)、さらには SQUID (超伝導量子干渉計) がある。しかしシステム導入、測定環境の整備には莫大なコストがかかる。現状の技術では家庭・地域レベルで簡易的にかつ質の高い全身の総合的診断を行うことは極めて困難で、健康寿命限界へ挑戦するためにも新たな在宅医療システムの開発が希求されている。

そこで管理区域や磁気シールドを必要としない、新たな在宅診断計測システムである、次世代生体トモグラフィ装置である非接触電流誘起磁気トモグラフィ

(Non-Contact Current Induced Magnetic Tomography) 技術の開発を提案する。これが本研究の目的である。

これまで、生体の電気インピーダンスを測定することで肺などの機能画像を構築する電気インピーダンス(Electrical Impedance Tomography: EIT)技術の研究がされてきたが、EIT では電流を生体に注入する電極とそれによって生じた電圧を検出する電極を体表面上に貼り付ける必要があるため、電極面積の物理的な制約から、最大 64ch、空間分解能 2mm 角程度の解像度にとどまっている。さらに全身を走査するには、電極を全身に貼り付ける必要があるため、現実的には難しい。いっぽう申請者らは EIT の開発に加えて、磁気インピーダンスセンサや光ポンピング原子磁気センサを用いた高感度磁気計測技術の開発を行っている。特に後者のセンサは光が磁場中を透過する際に偏波面が回転する現象である磁気光学効果を利用したものであり、小型・低コストで SQUID レベルの測定感度( $10^{-12}$  T $\sim$  $10^{-15}$  T) を実現することが可能である。しかし生体磁気から得られる情報は、神経電気活動によるものであり、ガン・肺炎・脳梗塞などの組織異常を検出することは困難であった。

### 2. 研究の目的

これまで開発された疾患の画像診断法として、X 線 CT や MRI (磁気共鳴画像化技術)、さらには SQUID (超伝導量子干渉計) が利用されているが、X 線被曝問題やシステム導入・環境整備に莫大なコストがかかることが問題であった。

本研究では、電気インピーダンス CT 技術、磁気計測技術、レーザー技術を融合させることで、これまで実現できなかった安全・非侵襲・非接触で生体内の導電率分布を断層画像として全身走査できるシステムを開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究はまず初年度に、既存の磁気センサを用いたファントム実験によって提案法の理論的な検出精度を検討し、高周波電流を非接触注入することでファントム内の導電率分布を推定するために必要な磁気検出感度を求める。次年度はこの目標値を実現する、高周波光ポンピング原子磁気センサの開発を行う。最終年度は、非接触電流注入技術と高周波光ポンピング原子磁気センサ技術を統合して、非接触生体イメージング装置システムを開発し、有効な導電率分布画像再構成アルゴリズムを開発する。これらの研究によって、申請者らが提案する方法の有効性と将来性を明らかにすることが申請期間での本研究の目的である。

### 4. 研究成果

平成 26 年度は、我々が提案した電流誘起磁気トモグラフィ (CIMT) 法において、測定対象物の導電率分布をどの程度の精度で検出できるかを検討するため、ファントム実験装置を構築した。入手可能な市販の磁気インピーダンスセンサは測定周波数 1kHz 以下、検出磁界 $>3$ nT の仕様であったため、100kHz 以上を必要とする非接触電流注入法を用いず、電極を介して 1kHz 以下の電流を注入した。

(1) 非導体を水槽に置かない場合、(2) 非導体を水槽の中央に置く場合、(3) 非導体を水槽中央から 20mm 端に寄せる場合、の 3 つの場合で測定を行なった。水槽の直径は 150mm であり、水槽内の水の導電率は 20mS/cm、水深は 140mm とした。非導体には直径約 70mm のガラス瓶を用い、印加電流は 766.6Hz、5mA (rms) の正弦波とした。

磁気インピーダンスセンサを用いた 8 チャンネル電流誘起磁気トモグラフィの水槽ファントム実験システムを開発し、開発したシステムを用いて測定された磁場データから水槽内の導電率分布の画像化に成功し、電流誘起磁気トモグラフィの可能性を示すことができた。実験では、150mm 水槽に対して非導体が 70mm という極端に大きいものであったが、導電率の変化による微弱

な磁場を測定し、EIT画像再構築を行えるまでの精度に達することができた。

平成27年度は、電流誘起磁気トモグラフィに必要な4つの技術開発を行った。

第1は、高周波インピーダンス測定回路を開発した。電流誘起磁気トモグラフィでは100kHzから5MHzまでの高周波電流を、空気を介して測定対象物に流す必要がある。このため広帯域で高精度測定が可能な、4電極法インピーダンス測定回路を開発した。

第2に、体幹形状推定アルゴリズムを開発した。電流誘起磁気トモグラフィでは、画像化する体幹形状をできるだけ正確に取得することで、再構成画像の測定精度を向上させることが可能である。しかしながら簡易的な3Dスキャナでは、例えば呼吸によって体幹形状が変化している対象物をリアルタイムに測定することが難しい。そこで、歪みゲージを模した曲率センサを組み込んだ長尺フレキシブル基板を開発した。長さは100mmで均等に16箇所曲率センサを組み込んだ。今年度はこれらのセンサから得られる曲率を想定して、2名の胸部CT画像からセンサ位置に相当する曲率を測定し、胸部形状を推定するアルゴリズムを開発した。

第3に、有限要素モデル(FEM)による非接触電流分布のシミュレーションを行った。直径400mm、高さ250mm環状構造中心層に、幅35mm、高さ50mmの非接触用電極を8個配置したFEMモデルを構築した。モデルの要素数は715630、節点数は152645点であった。環状中心には、長軸150mm、短軸90mmの楕円近似した胸郭モデルを配置した。胸郭モデルには、両肺と心臓を配置した。電極モデルから空気( $1 \times 10^{-6}$  S/m)を介して0.56 S/mの筋肉モデルで覆われた楕円胸部モデルに電流を印加した。肺の導電率は0.08 S/m、心臓の導電率には0.7 S/mの値を用いた。シミュレーションの結果、対向する2つの電極から胸部モデル内に電流が印加されることが確認され、組織毎に電流密度がことなることが模擬された。これにより非接触で電流を印加しても、生体内の導電率分布によって電流密度が異なる、すなわち電流によって誘導される磁気信号によって生体内の導電率分布が画像化できる可能性が高いことがわかった。

第4に、高周波光ポンピング原子磁気センサシステムの開発を進めた。まず、ソレノイドコイル印加電流伝送導線の周波数特性について検討を行った。ソレノイドコイルに電流増幅器により増幅させた電流を印加させる時、BNCケーブルを用いた。BNCケーブルの特性インピーダンスは50Ωであり、コイル部分のインピーダンスが異なるため、BNCケーブルと導電の接続面で電流波の反射が起き、電流値の低下やノイズといった問題が生じたため、マッチング回路を作成した。光ポンピング原子磁気センサ

の高周波磁場特性に関しては、光ポンピング原子磁気センサの高周波磁気特性を明らかにするためにソレノイドコイル印加電流の周波数・ソレノイドコイル印加電流の振幅・レーザーパワーの3つのパラメータを指定し、変化させて実験を行った。検出に関してフィルタ特性がQ=4.32のBPF使用し、ソレノイドコイル印加電流が100kHzまでならオシロスコープで確認することができた。

平成28年度は、本研究課題の最終年度である。前年度までに構築した、非接触電流注入装置と高周波光ポンピング原子磁気センサの統合に必要な、ポンピング原子磁気センサの高周波特性について研究を行った。

100kHzまで分散曲線を観測することができたとともに、感度の見積もりを行うことができた。しかし、これ以上では分散曲線を観測することができず、当然、感度の見積もりも行うことができなかった。この理由として、実験に用いている差動増幅器の周波数帯域が足りていないことが原因として挙げられる。また、高周波のランプ波形では、ソレノイドコイルにおいて過渡応答が発生し、銅線でも相互に誘導を起こしてしまいノイズが発生したが、測定系を一体化することでノイズを大幅に低減することが可能性を見いだすことができた。結果として、CIMT利用の最低条件である100kHzの磁束密度変化を観測できることが確認できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

Takeda S and Kumagai H, "Laser polarized Xe NMR and MRI at ultra-low magnetic fields", Proc. SPIE 10068, Imaging, Manipulation, and Analysis of Biomolecules, Cells, and Tissues XV, 査読無、2017、100681M

武田 俊、熊谷 寛、"スピン交換光ポンピングによる $^{131}\text{Xe}$ の超偏極と極低磁場における核磁気共鳴信号の増大"、電気学会論文誌C、査読有、Vol.137、No.4、2017、604-606

根武谷吾、"電気インピーダンストモグラフィ(EIT)で肺の換気分布を見える化!"、呼吸器ケア、査読有、14(1)、2016、94-98

岩下義明、根武谷吾、小池朋孝、今井寛、"Electrical Impedance Tomography (EIT)を用いて肺胞リクルートメント効果の確認を行った1例"、日本集中治療医学会雑誌、査読有、Vol.23、2016、675-676

一二三奏、根武谷吾、熊谷寛、"ウェアラブル電気インピーダンストモグラ

フィに有用な胸郭形状推定法”、日本医療機器学会論文誌、査読有、Vol.86(5)、2016、450-458  
熊谷寛、根武谷吾、鈴木英行、”電流誘導磁気トモグラフィ技術”、電気学会研究会資料、査読無、OQD-15、2015、13-16

〔学会発表〕(計17件)

横関滉平、須藤康子、根武谷吾、氏平政伸、熊谷寛、”電気インピーダンス法による細胞の凍結解凍後の生死判別に関する基礎的検討”、電気学会光・量子デバイス研究会、4月21日(2017)、東京都江東区、芝浦工業大学  
玉利勇賢、根武谷吾、熊谷寛、”電気インピーダンスCTを用いた脈波伝搬速度測定法の検討”、電気学会光・量子デバイス研究会、4月21日(2017)、東京都江東区、芝浦工業大学  
小池朋孝、根武谷吾、熊谷寛、”ヒト骨格筋3次元有限要素モデル(FEM)構築と周波数特性評価の試み”、電気学会光・量子デバイス研究会、4月21日(2017)、東京都江東区、芝浦工業大学  
中武光、武田俊、熊谷寛、根武谷吾、”高感度原子磁気センサの高周波特性”、電気学会光・量子デバイス研究会、4月21日(2017)、東京都江東区、芝浦工業大学  
武田俊、熊谷寛、中武光、”モジュール型光ポンピング原子磁気センサの開発”、電気学会光・量子デバイス研究会、4月21日(2017)、東京都江東区、芝浦工業大学  
Takeda S and Kumagai H, “Laser polarized Xe NMR and MRI at ultra-low magnetic fields”, Photonics West 2017, BIOS2017, Jan. 30(2017), San Francisco(USA)  
根武谷吾、”Electrical Impedance Tomography (EIT) - EITの概要とその有用性 - ”、第9回呼吸機能イメージング研究会学術集会、1月28日(2017)、京都府京都市、京都大学  
Iwata Y, Inaoka H, Nebuya S, Kumagai H, “Pressure control of the simulated vascular access circuit”, Life Engineering Symposium 2016, Nov.5 (2016), Osaka(Japan) Osaka International House Foundation  
Nebuya S, Koike T, Kumagai H, “Simple monitoring methods of respiration using wearable sensors”, Life Engineering Symposium 2016, Nov.5 (2016), Osaka(Japan) Osaka International House Foundation

Nebuya S, Hifumi S, Kumagai H, Brown BH, “Feasible method for chest shape estimation used for EIT, XIV Conference on Electrical Impedance Tomography (EIT)”, XIV Conference on Electrical Impedance Tomography (EIT), June 21 (2016), Stockholm (Sweden)

Nebuya S, Koike T, Imai H, Iwashita Y, Kumagai H, Soma K, Arai M, Brown BH, “A wearable electrical impedance tomography system - Its features and clinical application- ”, 16<sup>th</sup> International Conference in Electrical Impedance Tomography, June 2

(2016), Neuchatel (Switzerland)

根武谷吾、”体幹形状モニタリング技術の医療・ヘルスケア領域への展開”、第55回日本生体医工学会大会、4月28日(2016)、富山県富山市、富山国際会議場

横関滉平、根武谷吾、氏平政伸、熊谷寛、”EIT装置を用いた生体組織解凍過程の3次元モニタリング”、電気学会光・量子デバイス研究会「医療工学応用一般(QIE-2)」、4月22日(2016)、東京都調布市、電気通信大学

武田俊、熊谷寛、”核スピン偏極による極低磁場MRIの核磁気共鳴信号の増大”、電気学会光・量子デバイス研究会「医療工学応用一般(QIE-2)」、4月22日(2016)、東京都調布市、電気通信大学

根武谷吾、小池朋孝、岩下義明、熊谷寛、相馬一亥、新井正康、今井寛、”集中治療室における肺機能評価を実現するウェアラブルEITの開発”、生体医工シンポジウム2015、9月25日(2015)、岡山県岡山市、岡山国際交流センター  
一三奏、根武谷吾、熊谷寛、”ウェアラブル電気インピーダンストモグラフィに有効な胸郭形状推定法”、電気学会光・量子デバイス研究会、4月24日(2015)、神奈川県相模原市、北里大学

熊谷寛、根武谷吾、鈴木英行、電流誘導磁気トモグラフィ技術、電気学会光・量子デバイス研究会、1月26日(2015)、大分県由布市、ゆふいん七色の風

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：

権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

熊谷 寛 (KUMAGAI Hiroshi)  
北里大学・医療衛生学部・教授  
研究者番号：00211889

##### (2) 研究分担者

根武谷 吾 (NEBUYA Satoru)  
北里大学・医療衛生学部・准教授  
研究者番号：00276180

##### (3) 連携研究者 なし

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者 なし

( )