

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01421

研究課題名(和文) 超高感度光ポンピング磁気センサを用いた完全非接触型3次元断層画像化技術の開発

研究課題名(英文) Development of technology for a contactless 3D tomography using ultra-sensitive optically-pumped atomic magnetometers.

研究代表者

根武谷 吾 (Nebuya, Satoru)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・客員研究員

研究者番号：00276180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では電流誘導磁気トモグラフィに必要なOPAM (Optically-Pumped Atomic Magnetometer)のプロトタイプ開発を行った。試作OPAMの感度は5.281 [pT/rtHz]であり、さらに2枚の平板電極(40×80 mm)を距離240 mm離して定電流印加した際に、中央に設置したOPAMは、ペットボトル水底面が2.5 cmから10.0 cmまでの移動を明確に検出できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

OPAMの実現によりCIMTが可能となるだけでなく、単一チャンネルの測定ができるだけでも、測定対象物の内部を非接触・非破壊で観測できることを意味する。本研究で開発するCIMTは、ヒトの非接触換気・心拍情報検出、断層画像取得だけに留まらず、非接触で農作物や動物の内部電気特性変化がモニタリングできるため、学術的な知見だけでなく、例えば遠隔医療や、農・畜産業の効率化などの利益が生じると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have developed an Optically-Pumped Atomic Magnetometer (OPAM) to measure magnetic field induced by current injection with high sensitivity and high frequency for Current Induced Magnetic Tomography (CIMT). OPAM is a sensor that utilizes the optical pumping phenomenon in which the valence spin is polarized when light of a specific wavelength is incident on an alkali metal atom. OPAM has traditionally been studied under precision fixing, vibration isolation and strict magnetic shielding. We developed an OPAM measurement system that modularized the optical system in order to improve the adaptability to the living body. In this study, we report that we applied PLL (Phase-Locked Loop) to an OPAM module and achieved a minimum resolution of 5.281 [pT/rtHz]. Then, single channel CIMT had successfully detected a water tank.

研究分野：生体医工学

キーワード：光ポンピング原子磁気センサ OPAM 非接触定電流印加 高感度磁気センサ 断層画像 CIMT

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在用いられている生体の断層画像測定法の一つとして EIT (Electrical Impedance Tomography : EIT)がある。EIT は、体表面上に貼付した電極対から数 mA 程度の微弱電流を流し、体内のインピーダンス変化に応じて生じる体表面上の電圧または電位差から、生体内の導電率分布または導電率変化の分布を画像化する技術である。しかし現在の測定方法では、電極と皮膚の接着状態の問題や、測定用ベルトを巻いた位置のみの断層画像しか得ることができないといった問題点がある。したがって、測定対象に完全に非接触で測定することで、測定部位を問わず断層画を得ることが必要であると言える。EIT の測定電流により生体内における電流密度分布(導電率分布)に応じた微弱な磁場分布も同時に発生していると考えられる。この磁場を生体外側の複数点で非接触に測定することで、測定した磁場データを用いて電磁界の逆問題を解き、生体内の導電率分布を求めようというのが CIMT(Current Induced Magnetic Tomography : 電流誘導磁気トモグラフィ)の基本的な考え方である。CIMT の実現には非接触で電流を印加する必要があり、そのためには数百 kHz 以上の高周波が必要である。しかし、現在このような高周波かつ微少な磁気信号に対応しうる磁気センサは存在しない。そこで我々は光ポンピング原子磁気センサ(OPAM : Optically-Pumped Atomic Magnetometer)に着目した。OPAM はアルカリ金属と光・磁気の相互作用による磁気工学回転を利用して磁気計測を行うセンサであり、原理上 MHz~GHz に及び高周波にも対応しうるため、CIMT に適すると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、(1)高周波数かつ非シールド下・可搬の OPAM モジュールの開発、および(2)これを用いた非接触インピーダンス計測の実証を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1)OPAM モジュールの作成

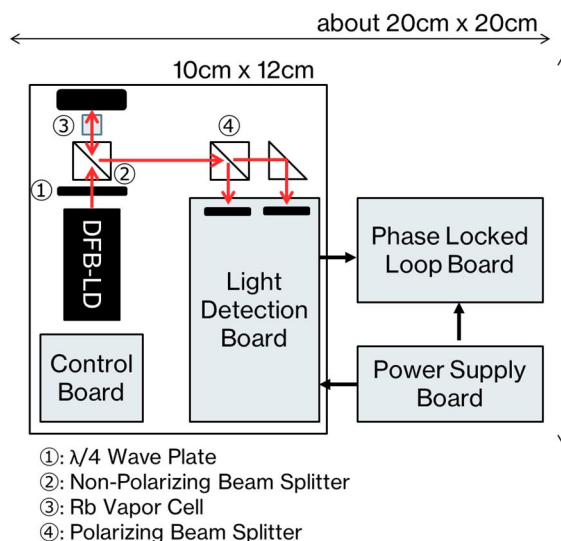


図1 作成した OPAM モジュールのブロック図

図1のようなブロック図の OPAM モジュールを作成した。光源には分布帰還型レーザーダイオード(DFB-LD : Distributed Feedback Laser Diode)を用い、795 nm、約 2 mW で出力した。出力光を円偏光とした後、Rb セルへ入射した。検出部では偏光ビームスプリッターおよび2つのフォトダイオードを用いて差分増幅偏光計を構成し偏波面の回転を検出した。その後、PLL(Phase Locked Loop)基板において DFT(Discrete Fourier Transform)を行い、励起周波数における複素振幅を記録した。

#### (2)OPAM モジュールの基礎性能評価

本研究において作成した OPAM モジュール内の Rb セル近傍に 10 mH 巻線インダクタを設置し PLL 基板より電流を印加した。このときに生じる漏れ磁場による偏波面の変化を検出し、複素振幅からパワーを求めた。この時 Rb セル-インダクタ間の距離を変化させることで印加磁場強度を変化させ、その時の複素振幅からパワーを求めて比較した。

### (3) 1ch 非接触電流誘導磁気インピーダンス計測の実証

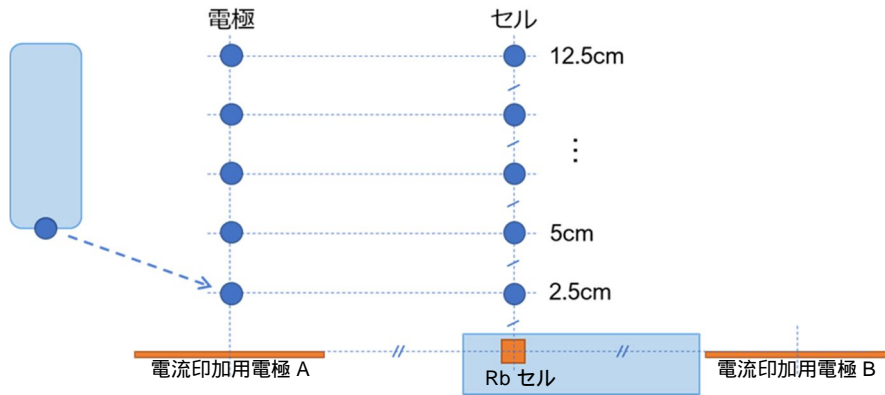


図2 測定環境の概略図

作成した OPAM モジュールを用いて図2のような実験系を構築した。PLL 基板より2枚の平板電極(40×80 mm)を用いて 10 kHz 以上の高周波電流を空气中に印加した。この時、誘電体(ミネラルウォーター)を電極中心上及び Rb セル中心上において高さを 2.5 cm ずつ変化させ、その時のパワーをそれぞれの軸上で十分に試料を話したときの信号を基準として正規化を行い比較した。

## 4. 研究成果

### (1) OPAM モジュールの基礎性能評価

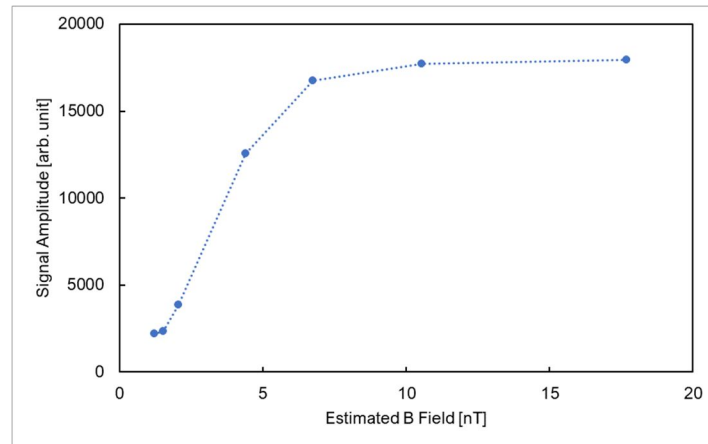


図3 磁束密度 振幅曲線

図3に推定磁束密度に対する信号振幅の関係を示す。10 kHz 以上の周波数において、およそ 2~5 nT<sub>p-p</sub> の範囲で直線的に振幅が変化し、その傾きは 3604.039 [1/nT]であった。また、取得した波形におけるフロアノイズは 19.033 [1/Hz<sup>1/2</sup>]であった。これらより、この OPAM モジュールは 5.281 [pT/ Hz<sup>1/2</sup>]の感度(最小分解能)を持つことが確認された。

### (2) 1ch 非接触電流誘導磁気インピーダンス計測の実証

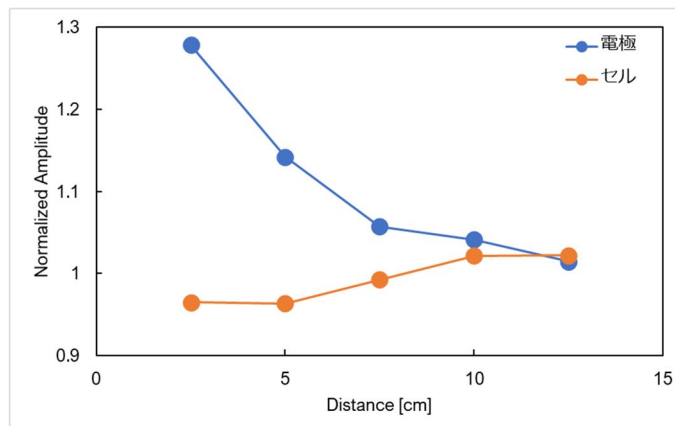


図4 誘電体の距離 正規化振幅曲線

図4に、横軸にそれぞれの軸上における試料の位置、縦軸に正規化振幅をとったグラフを示す。電極中心上において誘電体との距離を電流印加および検出双方を非接触に検出することに成功した。電極上部において特に検出感度が高く、最大で振幅が約 1.3 倍となった。以上の結果から、非接触で電流印可して励起磁気信号を受信する測定原理は実現可能であると考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 横関滉平, 根武谷吾, 氏平政伸, 熊谷 寛	4. 巻 Vol.137(8)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文C	6. 最初と最後の頁 pp.1062-1069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1541/ieejeiss.137.997">https://doi.org/10.1541/ieejeiss.137.997</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 H. Kumagai, R. Yoshimitsu, S. Takeda, E. Ogawa, T. Kosuge, H. Ishikawa, T. Sato, M. Suzuki
2. 発表標題 Preventing Spin Relaxation of Optically Pumped Alkali Metal Atoms in Magnetometer by Atomically Thin Film Coating
3. 学会等名 13th International Conference on Biomedical Electronics and Devices (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊谷寛、武田俊、根武谷吾、小川恵美悠、小菅智裕
2. 発表標題 レーザーによる高感度磁気計測
3. 学会等名 第40回日本レーザー医学会総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田俊、根武谷吾、熊谷寛
2. 発表標題 生体高周波磁気計測に向けた10kHz級ハンドヘルド型光ポンピング原子磁気センサモジュールの開発
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kumagai, S. Kobayashi, S. Takeda, E. Ogawa, H. Ishikawa
2. 発表標題 Preventing spin relaxation of optically pumped alkali metal atoms by atomically-thin hybrid polymer film coating
3. 学会等名 Photonics West 2019, SPIE LASE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玉利勇賢、根武谷吾、熊谷 寛
2. 発表標題 電気インピーダンス法を用いた連続血圧測定法の検討
3. 学会等名 電気学会 光・量子デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武田 俊、熊谷 寛、根武谷吾、中武 光
2. 発表標題 光源一体型の超高感度生体磁気計測モジュールの開発
3. 学会等名 電気学会 光・量子デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小菅智裕、板倉直明、熊谷 寛、根武谷吾
2. 発表標題 筋活動評価における測定簡易化のための多チャンネル表面筋電図解析方法の検討
3. 学会等名 電気学会 光・量子デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武田 俊、熊谷 寛、根武谷 吾、中武 光
2. 発表標題 光ポンピング原子による光源一体型高周波磁気センサモジュールの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nebuya S
2. 発表標題 Wearable sensor technologies for daily health care monitoring
3. 学会等名 the 24th International Display Workshops (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nebuya S
2. 発表標題 Feasible monitoring methods for lung and circulatory functions using wearable sensors
3. 学会等名 2017 International Conference on Electronics Packaging (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 根武谷吾
2. 発表標題 Electrical Impedance Tomography (EIT) - EITの概要とその有用性 -
3. 学会等名 第9回呼吸機能イメージング研究会学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 根武谷吾
2. 発表標題 Electrical Impedance Tomography (EIT) の有用性
3. 学会等名 日本医工学治療学会 第34回学術大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武田俊, 熊谷寛, 中武 光
2. 発表標題 モジュール型光ポンピング原子磁気センサの開発
3. 学会等名 電気学会, 光・量子デバイス研究会, 医療工学応用一般(QIE-3)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中武 光, 武田俊, 熊谷寛, 根武谷吾
2. 発表標題 高感度原子磁気センサの高周波特性
3. 学会等名 電気学会, 光・量子デバイス研究会, 医療工学応用一般(QIE-3)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小池朋孝, 根武谷吾, 熊谷寛
2. 発表標題 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
3. 学会等名 電気学会, 光・量子デバイス研究会, 医療工学応用一般(QIE-3)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 玉利勇賢, 根武谷吾, 熊谷寛
2. 発表標題 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
3. 学会等名 電気学会, 光・量子デバイス研究会, 医療工学応用一般 (QIE-3)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横関滉平, 須藤康子, 根武谷吾, 氏平政伸, 熊谷寛
2. 発表標題 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
3. 学会等名 電気学会, 光・量子デバイス研究会, 医療工学応用一般 (QIE-3)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横関滉平, 須藤康子, 根武谷吾, 氏平政伸, 熊谷寛
2. 発表標題 電気インピーダンス法を用いた細胞の生死判別
3. 学会等名 日本機械学会 第30回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2017年

〔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
研究 分 担 者	今井 寛  (Imai Hiroshi)  (00184804)	三重大学・医学部附属病院・教授   (14101)	



## 6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	熊谷 寛 (Kumagai Hiroshi) (00211889)	北里大学・医療衛生学部・教授  (32607)	
研究分担者	新井 正康 (Arai Masayasu) (50222724)	北里大学・医学部・教授  (32607)	
研究分担者	小池 朋孝 (Koike Tomotaka) (90523506)	北里大学・大学病院・その他  (32607)	
研究分担者	岩下 義明 (Iwashita Yoshiaki) (90525396)	三重大学・医学系研究科・リサーチアソシエイト  (14101)	
研究分担者	野村 健一 (Nomura Ken-ichi) (00580078)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員  (82626)	