

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06106

研究課題名(和文) 生体磁気計測を目指した光ポンピング原子磁気センサによる多点同時・広域計測法の研究

研究課題名(英文) Simultaneous multilocation and wide-area measurements with an optically pumped atomic magnetometer toward biomagnetic-field measurements

研究代表者

伊藤 陽介 (Ito, Yosuke)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：20589189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：生体磁気計測を目指し、光ポンピング原子磁気センサの新たな多点同時計測手法として、MRI的な手法とCT的な手法の検討を行なった。MRI的な手法ではポンプ光を変調することにより、多点計測を実現可能であることを実証した。CT的な手法では、新たに作製したプローブ光検出器により安価に多点計測が行えるようになった。軸対称性を有する計測対象に対して、信号取得後の信号処理により信号画像を復元することができた。

研究成果の概要(英文)：We suggested the novel methods inspired by MRI and CT to realize simultaneous multilocation measurements with an optically pumped atomic magnetometer (OPAM) toward biomagnetic-field measurements. For the MRI-like method, the pump beams of the OPAM was modulated to encode the signals. We successfully demonstrated simultaneous multilocation measurements by this technique. For the CT-like method, first of all, we fabricated a new multi-channel probe-beam detector at a reasonably low cost. This detector made us acquire 10 signals simultaneously. With this detector, we measured the magnetic-field distribution generated from a loop coil and successfully reconstructed the field map by the signal processing.

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 多点計測

### 1. 研究開始当初の背景

近年、生体磁気計測に向けた磁気センサとして光ポンピング原子磁気センサ(OPAM)が注目されている[1]。OPAM はレーザー光によるアルカリ金属原子の光ポンピング現象を利用したもので、冷媒を必要としない上、超伝導量子干渉素子(SQUID)を超える磁場感度が理論的、実験的に得られている[2,3]。このセンサで計測可能なのは、ポンプ光とプローブ光が交差する領域であり、通常は 1 計測点(1 ボクセル)のみの磁場が検出される。このためセンサの多チャンネル化は、小型の OPAM を多数配列することで実現されてきた[4]。しかし、これにはセンサセル内のアルカリ金属原子の密度、バッファガス圧をすべてのセルで一定とし、さらに入射させるレーザー光に付随する光学系をそれぞれのチャンネルについて個別に構築する必要があるため、装置が複雑になる問題点があった。

この問題点を解決するため、本報告者らはアルカリ金属原子として、K と Rb の 2 種類を用いたハイブリッド型のセンサを提案し[5,6]、センサセル内部で多点計測を行なう手法を開発してきた。これは光ポンピングにより生じた K のスピン偏極を、混合ガス内部で K と Rb とがスピン交換衝突することで Rb へ移行することにより Rb 原子ガス全体にほぼ均一なスピン偏極を生じさせる技術である。このセンサが従来の OPAM と比較して高い空間均一性を有することを実証しており[7]、実際に心臓から生じる磁場の分布も計測している。しかしながら、この手法ではプローブ光伝播方向の磁場分布を同時計測することは不可能である。

### 2. 研究の目的

本研究では、生体信号を 3 次元の画像として取得するため、磁気共鳴画像法(MRI)の周波数・位相エンコードやコンピュータ断層撮影(CT)等に着想を得て、プローブ光伝播方向を含めた 3 次元の画像を得る手法を提案する。これは単に 3 次元画像を容易に得られるのみならず、従来の光ポンピング原子磁気センサを複数配列するような手法では困難であった計測チャンネルの高密度化につながり、光ポンピング原子磁気センサを用いた生体磁気計測を強力に発展させる技術となりうる。

### 3. 研究の方法

本研究では、ポンプ光を周波数もしくは位相変調し、複数の信号成分を有するプローブ光をロックイン検波することにより元の信号を復調する手法により磁場分布を得る手法を確立する。また、CT のように多方向から入射させたレーザー光により得られた情報から連立方程式を立て空間分布を計算する手法についても検証し、それらの手法について総括することを目的としている。研究期間内には以下のことを明らかにする。

### (1) MRI 的な手法による磁場分布計測の検討

チョッピングによる単純なポンプ光の ON/OFF や強度変調、円偏光度の変調などのポンプ光の変調手法によりセンサ感度や計測帯域幅がどのように影響されるか、またチャンネル間のクロストークの有無を調べ、実際に磁場分布計測を実施する。

### (2) CT 的な手法による磁場分布計測の検討

プローブ光の入射方向を変え、複数の信号を取得する。その複数の信号から磁場分布情報を再構成する。このときの空間分解能やチャンネル間のクロストークに与えるセンサ特性の影響について調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) MRI 的な手法による磁場分布計測の検討

図 1 に本実験の装置図を示す。ポンプ光を 2 本に分割し、それぞれを別の周波数で変調する。まず、光チョップを変調器として使い、変調周波数が信号強度に与える影響について調べた。図 2 に結果を示す。スピン偏極の生成と緩和時間が有限であることにより、変調周波数が高くなるにつれ信号強度が低下し、感度も pT オーダとなった。この変調方式を用いて、ループコイルから発生する磁場

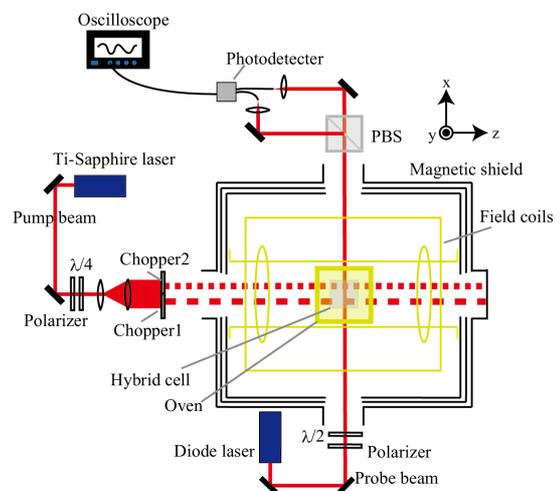


図 1 MRI 的な手法の実験装置図

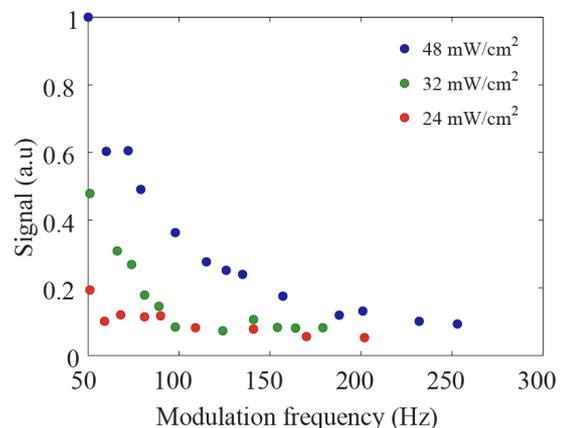


図 2 変調周波数に対する信号強度の変化

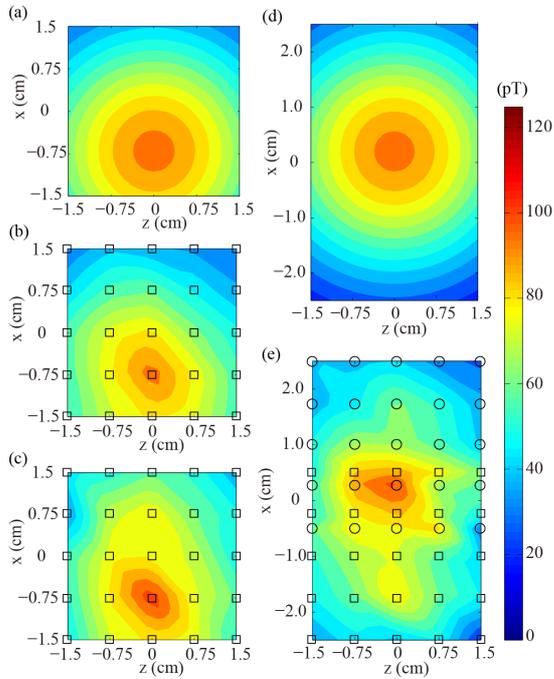


図3 ループコイルから生じる磁場の計測結果。(a),(d) 発生する磁場の計算値、(b) ポンプ光を変調せず、1点ずつ計測した結果、(c) 変調された1本のポンプ光により1点ずつ計測した結果、(e) 変調された2本のポンプ光により2点ずつ計測した結果

分布の計測を行った。その結果を図3に示す。変調周波数は116 Hzと82 Hzとした。変調を行なう方式の場合、行わない場合より理論値から外れてきたが、おおむね一致する結果が得られた。感度の低下した原因としては、チョッパの回転周波数が単一でなく、時間揺らぎを有しているためである。

次に、変調手法をEOMとして、ポンプ光の強度変調を行った。光チョッパの場合と異なり、EOMでは光強度を正弦波的に滑らかに変化させることができる。図4に信号強度のポンプ光強度依存性を示す。変調周波数は31 Hzと43 Hzとした。光チョッパの場合では変調周波数の高調波成分が強く出ていたが、EOMではそれがほとんど観測されず、効率の良い変調が可能であることを確認した。このとき、計測感度は150 - 300 fT/Hz<sup>1/2</sup>と光チョッパを用いた場合と比較し、大幅に改善した。

実際にこれを心磁計測に適用した結果を図5に示す。変調周波数は心磁信号の帯域を考えて、それぞれ83 Hzと123 Hzとした。被験者は24歳健康常男性であり、得られた信号は0.5-40 Hzのバンドパスフィルタをかけた上、10信号分を加算平均した。それぞれのチャンネルで心磁信号の特徴的な波形を観測できた。Ch. 1については、原信号成分との混信が起ってしまったため、変調周波数は対象の帯域に合わせて設定する必要があることがわかった。

またプローブ光の検出器をフォトダイオードアレイとして、磁場分布計測を行った。

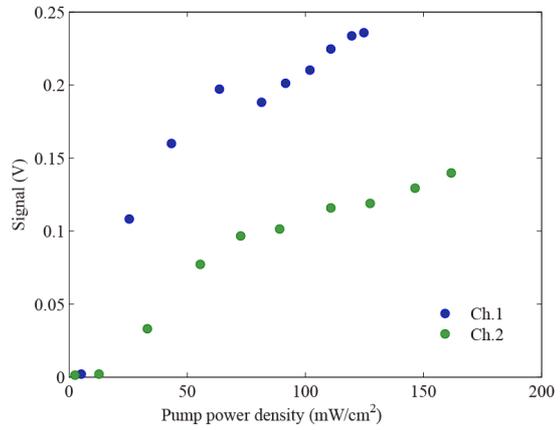


図4 EOMにより変調した場合の信号強度のポンプ光強度依存性

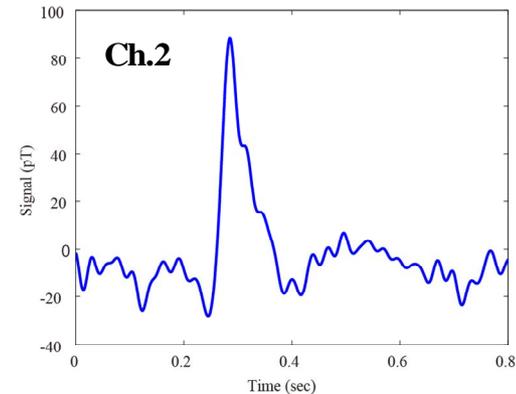
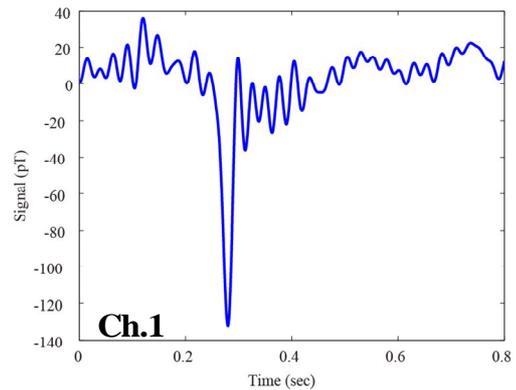


図5 EOMで変調した場合の心磁計測波形

このとき、ポンプ光は変調せずに、検出器を変更したことによる影響を確認した。この場合でも、ポンプ光伝播方向の磁場分布を計測することができたが、フォトダイオードアレイ自身の電気雑音の影響が大きく、感度が低下した。しかし、これらの実験からMRI的手法を適用することにより、磁場の3次元空間分布の計測が可能となることがわかった。

## (2) CT的な手法による磁場分布計測の検討

まず、感度よくプローブ光を複数本受光するための検出器を作製した。空間分解能を高くするため、受光面のサイズが2.5 mm x 2.5 mmで素子端のデッドスペースの小さいものを配列し、10チャンネル同時計測可能な検出器を作製した。その外観を図6に示す。センサ密度は2.5個/cmと高密度で、軸型のグラジ

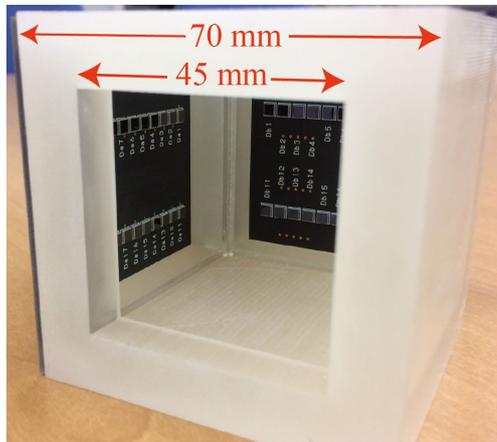


図6 作製したプローブ光検出器

オメータ構成にも対応するよう、上下に 10 チャンネルを有するセンサである。この検出器を用いた OPAM の感度計測結果を図 7 に示す。狭い受光面による信号強度の低下も見られず、各チャンネルにおいて 10-20 fT/Hz<sup>1/2</sup> と十分に高い感度での多点計測が可能となった。このとき、信号増幅器についても自作することで、市販の増幅器等を用いていた場合に比べ、1 チャンネル当たり 1/10 以下の価格で検出器を構成することができた。

これを用いて、センサ直上に配置したループコイルから出力される磁場分布の計測を行った。このときループコイルから出力される磁場は軸対象であることから、検出した信号からアーベル変換により磁場分布を計算した。センサセルが立方体のため、単純にアーベル変換を適用はできないが、その分を考慮に入れると、理論値との大きなずれのない磁場分布の計測ができた。さらにポンプ光の分割・拡大による計測方向の増加についても検討した。現状のセンサセルの加熱系の窓が四方にしかないため、2 方向からの入射に限られる。このとき、フルランクの行列計算が可能なのはポンプ光、プローブ光を 2 本ずつ入射したとして 4 ボクセルとなり、それ以上の多点計測を行うことが困難である。このことから同時計測を行う場合はセンサセルの全周を窓にし、多方向からプローブ光を入射する必要がある。しかしながら、この場合、それぞれのプローブ光により、スピン偏極の緩和が生じるため、プローブ光入射方向を増やすことで、計測感度が低下する。また、ポンプ光と直交しない方向から入射するプローブ光は信号の位相シフトが生じるため、画像構成の際にその補正を行う必要があると考えられる。

#### <引用文献>

- [1] I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred and M. V. Romalis, *Nature* **422**, 596 (2003).  
 [2] J. C. Allred, R. N. Lyman, T. W. Kornack and M. V. Romalis, *Phys. Rev. Lett.* **89**(13),

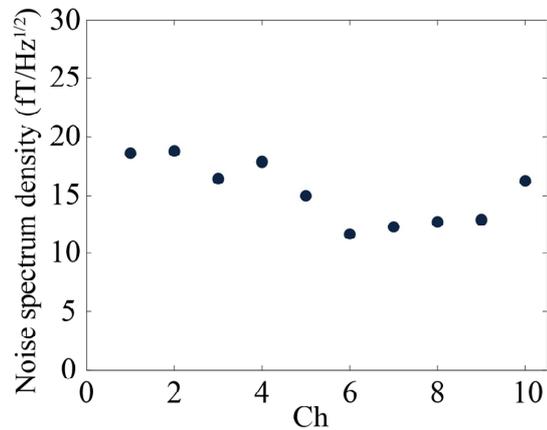


図7 作製したプローブ光検出器の各チャンネルにおける計測感度

130801 (2002).

[3] H. B. Dang, A. C. Maloof and M. V. Romalis, *Appl. Phys. Lett.* **97**(15), 151110 (2010).

[4] G. Bison, N. Castagna, A. Hofer, P. Knowles, J.-L. Schenker, M. Kasprzak, H. Saudan and A. Weis, *Appl. Phys. Lett.* **95**(17), 173701 (2009).

[5] Y. Ito, H. Ohnishi, K. Kamada and T. Kobayashi, *IEEE Trans. Magn.* **47**(10), 3550 (2011).

[6] Y. Ito, H. Ohnishi, K. Kamada and T. Kobayashi, *AIP Advances* **2**(3), 032127 (2012).

[7] Y. Ito, H. Ohnishi, K. Kamada and T. Kobayashi, *IEEE Trans. Magn.* **48**(11), 3715 (2012).

#### 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 13 件)

Kazumasa Nishi, Yosuke Ito and Tetsuo Kobayashi, “High-sensitivity multi-channel probe beam detector towards MEG measurements of small animals with an optically pumped K-Rb hybrid magnetometer”, *Optics Express*, 査読有, 26(2), 2018, 1988-1996

DOI: 10.1364/OE.26.001988

加藤 健太郎, 笈田 武範, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “小型原子磁気センサモジュールを用いた遠隔磁気粒子イメージング ~ 励磁磁場強度最適化の検討 ~”, *電子情報通信学会技術研究報告*, 査読無, 117 巻 360 号, 2017, 61-66

<https://www.ieice.org/ken/paper/20171216j1aj/>

伊藤 陽介, 小林 哲生, “ラプラス変換を用いた光ポンピング原子磁気センサの過渡応答に関する検討”, *電気学会マグネティックス/光・量子デバイス/フ*

ィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会資料, 査読無, MAG17 巻, 2017, 57-62

<https://ci.nii.ac.jp/naid/40021435014/>

西 和将, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “光ポンピング原子磁気センサによる小動物の脳磁図計測に向けた高感度マルチチャンネルプローブ光検出器”, 電気学会マグネティックス/光・量子デバイス/フィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会資料, 査読無, MAG17 巻, 2017, 1-6

<https://ci.nii.ac.jp/naid/40021434315>

Yuki Mamishin, Yosuke Ito and Tetsuo Kobayashi, “A novel method to accomplish simultaneous multilocation magnetic field measurements based on pump beam modulation of an atomic magnetometer”, IEEE Trans. Magn., 査読有, 53(5), 2017, 4001606

DOI: 10.1109/TMAG.2017.2659649

Hilschensch, H. Natsukawa, Y. Ito, T. Oida, T. Yamamoto and T. Kobayashi, “Remote detected low-field MRI using an optically pumped atomic magnetometer combined with a liquid cooled pre-polarization coil”, Journal of Magnetic Resonance 査読有, 274, 2017, 89-94

DOI:10.1016/j.jmr.2016.11.006

Yosuke Ito, Daichi Sato, Keigo Kamada and Tetsuo Kobayashi, “Optimal densities of alkali metal atoms in an optically pumped K-Rb hybrid atomic magnetometer considering spatial distribution of spin polarization”, Optics Express, 査読有, 24(14), 2016, 15391-15402

DOI: 10.1364/OE.24.015391

加藤 健太郎, 笈田 武範, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “光ポンピング磁気センサを用いた磁気粒子イメージングに向けた磁気信号の遠隔計測”, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 116 巻 520 号, 2017, 65-70

<https://www.ieice.org/ken/paper/20170314JbsN/>

馬見新 友輝, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “ポンプ光変調による原子磁気センサを用いた複数点同時計測法: 電気光学変調方式による 2 点同時計測に関する研究”, 電気学会マグネティックス研究会資料, 査読無, MAG16 巻, 2016, 81-86

[https://ieej.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&page\\_id=13&block\\_id=18&item\\_id=92400&item\\_no=1](https://ieej.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&page_id=13&block_id=18&item_id=92400&item_no=1)

<https://www.ieice.org/ken/paper/20161207tb0u/>

小島 史嵩, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “脳磁図計測に向けた原子磁気センサにおけるグラジオメータ構成法に応じたノイズ低減効果の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 116 巻 342 号, 2016, 47-52

<https://www.ieice.org/ken/paper/20161207tb0u/>

馬見新 友輝, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “生体磁気計測に向けた光ポンピング原子磁気センサのポンプ光変調による複数点同時計測法”, 電気学会マグネティックス研究会資料, 査読無, MAG15 巻, 2015, 17-22

[https://ieej.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages\\_view\\_main&active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&item\\_id=84732&item\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=18](https://ieej.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=84732&item_no=1&page_id=13&block_id=18)

小島 史嵩, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “光ポンピング K-Rb ハイブリッド原子磁気センサにおける差動計測と心磁図への応用”, 電気学会マグネティックス研究会資料, 査読無, MAG15 巻, 2015, 23-28

[https://ieej.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages\\_view\\_main&active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&item\\_id=84733&item\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=18](https://ieej.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=84733&item_no=1&page_id=13&block_id=18)

S. Ichihara, N. Mizutani, Y. Ito and T. Kobayashi, “Differential measurement using equalized response of optically pumped atomic magnetometers”, IEEE Trans. Magn., 査読有, 52(8), 2016, 4002709

DOI:10.1109/TMAG.2016.2547364

[学会発表](計 25 件)

加藤 健太郎, 笈田 武範, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “小型原子磁気センサモジュールを用いた遠隔磁気粒子イメージング ~ 励磁磁場強度最適化の検討 ~”, 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティックス研究会, 2017

伊藤 陽介, 小林 哲生, “ラプラス変換を用いた光ポンピング原子磁気センサの過渡応答に関する検討”, 電気学会マグネティックス/光・量子デバイス/フィジカルセンサ/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会, 2017

西 和将, 伊藤 陽介, 小林 哲生, “光ポンピング原子磁気センサによる小動物の脳磁図計測に向けた高感度マルチチャンネルプローブ光検出器”, 電気学会マグネティックス/光・量子デバイス/フィジカルセンサ/マイクロマシン・セ

ンサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会, 2017

Kentaro Kato, Takenori Oida, Yosuke Ito and Tetsuo Kobayashi, "Measurements of MNP signals using an atomic magnetometer module with a flux transformer", 生体医工学シンポジウム 2017, 2017

Y. Ito Y. Mamishin and T. Kobayashi, "A Simultaneous Multi-location Measurement Method Based on Pump-Beam Modulation of Atomic Magnetometers by Electro-optic Modulation", 5th Workshop on Optically Pumped Magnetometers (WOPM2017), 2017

K. Nishi, Y. Ito and T. Kobayashi, "A probe beam detection method towards multi-channel MEG measurements for small animals with optically pumped atomic magnetometers", Biomagnetic Sendai 2017, 2017

T. Moriguchi, Y. Ito and T. Kobayashi, "Measurements of magnetic action fields of the median nerve with a multi-channel atomic magnetometer module", Biomagnetic Sendai 2017, 2017

S. Ito, Y. Ito and T. Kobayashi, "Control on bandwidth of an optically pumped atomic magnetometer by negative feedback", Biomagnetic Sendai 2017, 2017

伊藤陽介、笈田武範、小林哲生, "光ポンピング原子磁気センサの開発と医用イメージング", ワークショップ「量子計測と、生物・生命科学」, 2017

Yosuke Ito, Yuki Mamishin and Tetsuo Kobayashi, "Multi-channel optically pumped atomic magnetometers with modulated pump beams", International Workshop on Magnetic Bio-sensing 2016, 2016

Yosuke Ito and Tetsuo Kobayashi, "Development of a K-Rb Hybrid Atomic Magnetometer toward MPI", International Workshop on Magnetic Particle Imaging (IWMPI) 2016, 2016

Yosuke Ito, "An Optically Pumped K-Rb Hybrid Atomic Magnetometer and Its Application", International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering 2016, 2016

Yosuke Ito, Yuki Mamishin, Daichi Sato, Keigo Kamada and Tetsuo Kobayashi, "Simultaneous measurements of magnetic field distributions with an optically pumped K-Rb atomic magnetometer toward biomagnetic field measurements", International

conference on Basic and Clinical multimodal Imaging (BaCI) 2015, 2015

〔その他〕

ホームページ等

<http://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 陽介 (ITO, Yosuke)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20589189

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者