

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：31302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630172

研究課題名(和文) 室温で動作する生体内挿入用集積化磁界センサの開発

研究課題名(英文) Thin film magnetic field sensor inside body at room temperature

研究代表者

藪上 信 (YABUKAMI, Shin)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：00302232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：(a)センサ素子の小型化 センサヘッドサイズが数mm角以下のセンサ素子を開発した。磁界に対するキャリアの位相変化感度は最高で約300 degree/Oe 程度まで高感度化した。(b)回路の小型化 市販の位相差検出用ICであるAD8302と開発した薄膜磁界センサ素子と組み合わせてコンパクト化した。(c)センサのモジュール化 PLL回路によるセンサ素子の発信器をモジュール化し、システムとしての磁界検出分解能を評価した。センサヘッドとの組み合わせで約100pT程度の磁界検出分解能を得た。(d)ワイヤレスセンサを作製し、無線で磁界の検出が可能であることを実験的に確認した。

研究成果の概要(英文)：A very sensitive thin film sensor was developed using a meandering coplanar line fabricated from SrTiO film (3  $\mu\text{m}$  thick), amorphous CoNbZr film (1.0 mm x 2.45 mm, 0.3  $\mu\text{m}$ -2  $\mu\text{m}$  thick) and Cu/Cr film (2  $\mu\text{m}$ /0.1  $\mu\text{m}$ ). The deposited SrTiO film enhanced the sensitivity of a magnetic field sensor, a phase change of more than 300 degrees/Oe being achieved. The maximum phase change (sensitivity) was observed for a CoNbZr film thickness of around 0.5-1  $\mu\text{m}$ . The optimum CoNbZr film thickness was realized by the tradeoff between the sensitive bias field and the volume of the CoNbZr film. A sensor module was composed of meandering sensor element and commercial IC. A resolution of about 100 pT was obtained the module. We succeeded in wireless magnetic field measurement using the sensor module.

研究分野：磁気工学、計測工学

キーワード：計測システム

## 1. 研究開始当初の背景

脳磁界や心磁界等の生体磁気信号は脳の神経細胞や心筋の電氣的興奮に伴って発生する微弱磁界 ( $10^{-13}\text{T} \sim 10^{-10}\text{T}$  程度) であり、従来超伝導量子干渉素子 (SQUID 磁束計、液体ヘリウムで要冷却) によって計測され、てんかん、脳外科手術前の診断、脳機能の解明、心疾患の診断等に用いられている。申請する磁界センサは磁性薄膜の透磁率変化を表皮効果、強磁性共鳴を利用して測定するもので申請者らにより室温で動作する薄膜磁界センサとしては世界ではじめて  $10^{-13}\text{T}$  台の磁界検出分解能と心磁界の多点計測に成功した。本センサの SQUID 磁束計に対する最大の特長は室温で動作し、集積化可能な点であることから、センサ素子と処理回路等をカテーテルあるいはハンディな基板へ一体的に搭載して、生体内部等の測定部位近傍で高い SN 比、高い空間分解能の磁界計測を目指す着想を得た。提案するセンサが実現できれば心臓外科手術時の心筋活動のモニタ等の医学的なニーズと良好に整合すると考えられる。

## 2. 研究の目的

集積化磁界センサ素子を数 mm 角以下に小型化し、信号処理回路および駆動回路と同一基板上に一体構成する。有線 (電氣的引き出し線がある状態) で  $100\text{ pT}$  ( $10^{-10}\text{T}$ ) 台の微弱磁界計測を目指す。さらにワイヤレスでの磁界情報の取得を試みる。

## 3. 研究の方法

3-1 SrTiO 等の強誘電体薄膜、磁性薄膜、導体薄膜を用いて微細加工技術によりミアンダコプレーナ構造のセンサ素子を作製し、波長短縮効果によりセンサの高感度化をはかる。

3-2 センサ素子、汎用位相検波 IC 等によりコンパクトなセンサモジュールを開発し、 $100\text{ pT}$  程度の磁界検出分解能を目指す。またワイヤレスに磁界を検出する。

## 4. 研究成果

### 4-1 位相変化型センサの試作

図 1 は試作したミアンダ状コプレーナ線路構造のセンサ素子を示したものである。本センサは誘電体薄膜の波長短縮効果を利用して磁界に対する大きな位相変化を得ることから SrTiO 薄膜を使用し、なるべく小面積で高感度を得るために、コプレーナ線路を折り曲げた構造にしたものである。センサ素子は、Cu 薄膜によるミアンダ状コプレーナ線路、SrTiO 薄膜、アモルファス CoNbZr 薄膜から構成され、センサ素子はガラス基板にリフトオフプロセスにより積層した。コプレーナ線路は特性インピーダンスが約  $50\ \Omega$  となるように、導体幅を  $110\ \mu\text{m}$ 、地導体幅を  $50\ \mu\text{m}$ 、隣接導体間隔を  $20\ \mu\text{m}$  とした。アモルファス CoNbZr 薄膜 ( $1\text{ mm} \times 2.45\text{ mm}$ 、膜厚は  $0.3\text{--}2\ \mu\text{m}$ ) は RF スパッタ法によりパワー  $200\ \text{W}$ 、Ar ガス圧  $20\ \text{mtorr}$  で成膜し、磁界中熱処理 (回転磁界中熱処理を  $400\ \text{K}$  で 2 時間後、静磁界中熱処理  $200\ \text{K}$  で 1 時間、磁界強度は

$0.3\ \text{T}$ ) により弱い一軸磁気異方性をコプレーナ線路の幅方向へ付与した。絶縁層として強誘電体薄膜である SrTiO 薄膜を約  $3\ \mu\text{m}$  成膜した。これはコプレーナ線路の実効的誘電率を高めることを意図したためである。SrTiO 薄膜は RF スパッタにより成膜した。スパッタ条件は Ar ガス圧  $20\ \text{mtorr}$ 、パワー  $200\ \text{W}$ 、基板加熱機構の温度は  $130\ \text{K}$  とした。終端開放のコプレーナ線路のインピーダンスを測定し、有限要素法による電界解析結果を対応させることで、SrTiO 薄膜の比誘電率は 31 程度であることを確認した。導体は Cu 薄膜 (約  $2\ \mu\text{m}$  厚) を RF スパッタ法により成膜し、リフトオフでコプレーナ構造に加工した。Cu 薄膜の地下層として Cr 薄膜 (約  $0.1\ \mu\text{m}$  厚) を SrTiO 薄膜と Cu 薄膜の密着性を高めるために成膜した。

### 4-2 磁界に対するキャリアの位相差測定

センサ素子をマグネットに配置し、センサの電極にはウエハプローブ (ピコプローブ製 40-GSG-150) を電氣的に接触させ、同軸ケーブルを介してネットワークアナライザ (アジレントテクノロジー 8722ES) と接続した。直流電源 (アドバンテスト製 R6243) を用いて磁性薄膜の磁化困難軸方向へ直流磁界を加えて、静的に変化させた。ネットワークアナライザの透過係数 ( $S_{21}$ ) の振幅および位相差を磁界変化に応じて測定した。ネットワークアナライザと直流電源はパソコンを介して GP-IB で制御した。ネットワークアナライザの周波数範囲は  $50\ \text{MHz}$  から  $10\ \text{GHz}$  まで変化させた。バンド幅は  $3\ \text{kHz}$ 、平均化回数は 16 回、周波数点は 200 点とした。各バイアス磁界において周波数スキャンして、保存した。図 2 は試作した図 1 の寸法のセンサ素子についてセンサのキャリアの位相変化に対する印加磁界および周波数の傾向を示したものである。CoNbZr 薄膜の膜厚は  $0.75\ \mu\text{m}$  とした。 $7.5\ \text{Oe}$  付近において、キャリア周波数約  $2.85\ \text{GHz}$  付近で位相変化が最大となり、その傾きは最大で  $300\ \text{degree/Oe}$  以上となった。

### 4-3 CoNbZr 薄膜の膜厚依存性

図 3 は CoNbZr 薄膜の膜厚に対する位相変化感度を示したものである。ミアンダのコプレーナ本数は 6 本および 8 本を示した。CoNbZr 薄膜の膜厚が  $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$  の範囲でセンサ感度は最大となった。また  $S_{21}$  のゲインは、CoNbZr 薄膜の膜厚が厚くなるに従って、渦電流損等により低下し、コプレーナの本数が多いほど顕著であり、これは直流抵抗が大きいためと考えられる。一般に高感度化のためには低いバイアス磁界と磁性薄膜の体積が大きい方が望ましい。本実験では CoNbZr 薄膜への最適バイアス磁界が膜厚増大により増加する。このため最適な CoNbZr 薄膜の膜厚 ( $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$ ) はこの最適バイアス磁界と磁性薄膜の体積のトレードオフで決まっていると考えられる。

### 4-4 センサモジュール

図 4 は集積化センサ素子と市販の位相検出 IC

(Analog Devices AD8302) を一体化したモジュールの写真を示したものである。センサモジュールは両面ガラエボ基板をプリント基板加工装置(ミツ製 FP-21)により加工し、位相検出 IC 等の電子部品および上記で開発した薄膜センサ素子を実装した。センサモジュールはハンディなセンサヘッドを微弱磁界発生用コイルの近くに配置して、微弱磁界を計測した。AD8302 で電圧に変換された信号は日本ナショナルインスツルメンツ製 AD コンバータ (PXI-6250, 計測速度は 1M サンプル/秒, 16 ビット) を組み込んだ PXI システムで計測した。計測システムの制御ソフトウェアは LabVIEW2011 で作成した。

図 5 は作製したセンサに微弱交流磁界を印加して、モジュールで測定された信号を高速フーリエ変換により周波数スペクトルとして表したものである。励磁コイルは直径 2 mm の銅線を直径 50 mm の非磁性円筒に 20 ターン施した。センサの位置における磁界強度はループコイルによりあらかじめ校正した。図 5 は約 10 nT の微弱磁界を与えたときのセンサからの出力信号のスペクトルを示している。11 Hz のスペクトルは約 10 nT の信号磁界を示している。信号レベルと 11 Hz 付近のノイズレベルの比率から SN 比は約 100 程度得られており、約 100 pT の磁界検出分解能が得られ、開発した汎用センサシステムで、約 100 pT の低周波微弱磁界が検出できたことがわかる。

#### 4-5 ワイヤレスで磁界検出

図 6 はワイヤレスで構成した磁界センサが測定した等価的磁気モーメントを示したものである。励磁コイルから発生した交流磁界(約 1 kHz)を X, Y, Z の各軸に平行方向へセンサを移動させて磁界強度を検出した。センサが励磁コイルから離れるにしたがって、センサ付近の磁界強度は減少した。また X 方向および Y 方向へ平行な方向の移動では、ほぼ磁界強度は変化しないものの、端部では若干減少している。これは励磁コイルから発生する磁界のうち、Z 軸成分を検出していることから考えれば、磁界強度の Z 軸成分が端部ほど減少することから合理的な結果と考えられる。

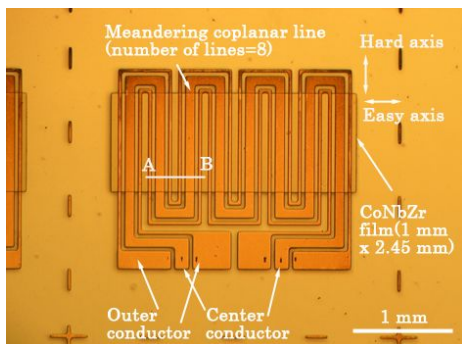


図 1 開発したセンサ素子の写真

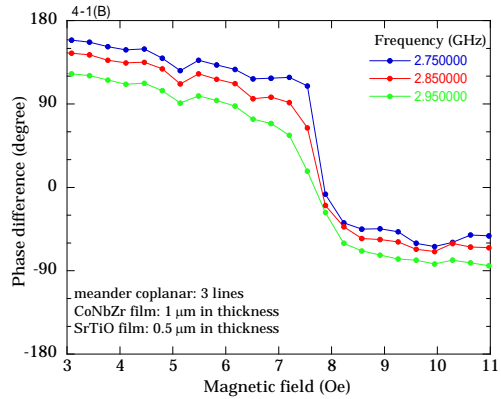


図 2 磁界に対する位相変化

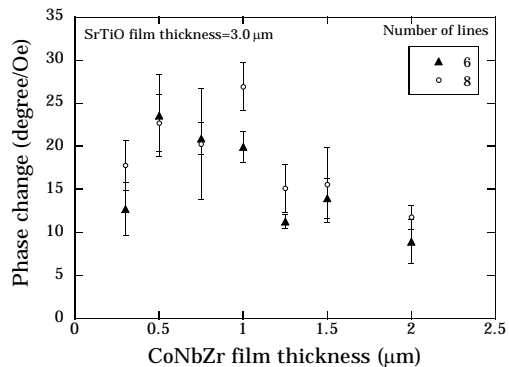


図 3 CoNbZr 薄膜の膜厚とセンサの感度

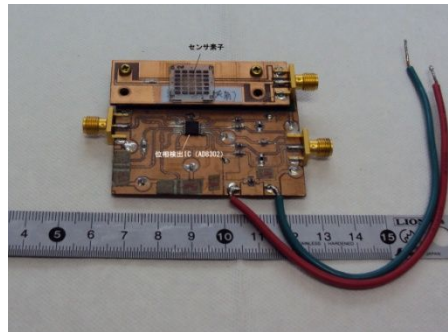


図 4 作製したセンサモジュール

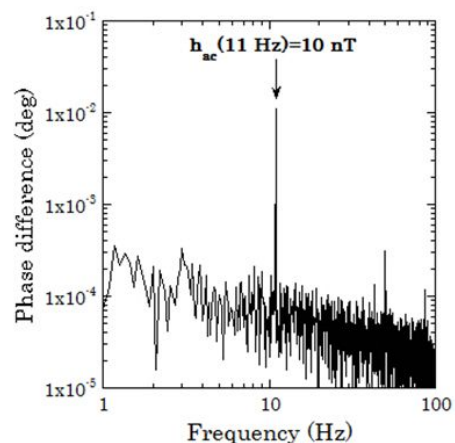


図 5 センサモジュールの磁界検出分解能

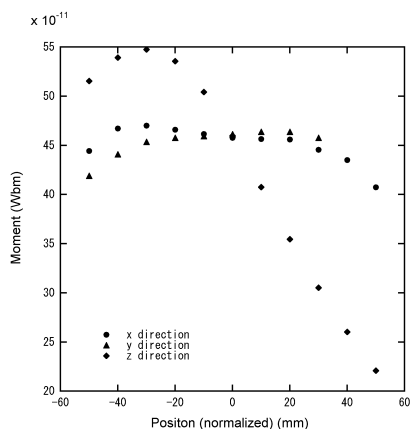


図6 ワイヤレスセンサでの磁界検出

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

H. Uetake, T. Kawakami, K. Moriya, S. Yabukami, and T. Ozawa, Highly Sensitive Thin-Film Magnetic Field Sensor Meandering Coplanar Line, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有, VOL. 51, No. 11, 2015, 4005003

T. Ozawa, S. Yabukami, J. Totsuka, S. Koyama, J. Hayasaka, N. Wako, and K. I. Arai, Measurement of internal defects in aluminum using a nano-granular in-gap magnetic sensor, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 査読有, 117, 2015, 17A305

Hiroaki Uetake, Toshiya Kawakami, Shin Yabukami, Tetsuya Ozawa, Nobukiyo Kobayashi, and Ken Ichi Arai, Highly Sensitive Coplanar Line Thin-Film Sensor Using SrTiO Film, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有, VOL. 50, NO. 11, 2014, 4007604

H. Uetake, S. Yabukami, T. Chiba, T. Ozawa, H. Suzuki, N. Kobayashi, K.I. Arai, Highly Sensitive Thin Film Sensor Using Coplanar Line, Journal of the Magnetism Society of Japan, 査読有, Vol.38, No. 3-1, 2014, 83 - 86

S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, K.I. Arai, Coplanar Line Thin Film Sensor and Measurement of MCG without Magnetic Shielding, Journal of the Magnetism Society of Japan, 査読有, Vol. 38, No. 2-1, 2014, 25 - 28

S. Hashi, S. Yabukami, K. Ishiyama, K. I. Arai, Downsizing of LC Markers for a Wireless Magnetic Position Detection System, Sensor Letters, 査読有, Vol. 11, No. 1, 2013, 98 - 101

藪上 信、加藤和夫、小澤哲也、小林伸聖、荒井賢一、伝送線路型薄膜センサによる心磁界の多点計測、電気学会論文誌 A, Vol.133, No.6, 2013, 372 - 375

小澤哲也、山田洋、佐藤弘二、小島健、藪上信、小林伸聖、中居倫夫、荒井賢一、高周

波キャリア型薄膜磁界センサによる磁気深傷試験装置、Journal of the Magnetism Society of Japan, 査読有, Vol. 37, No. 1, 2013, 1 - 7

〔学会発表〕(計23件)

藪上信、高周波磁気計測、磁気センサ(非常勤講師)、名古屋大学 大学院電子情報システム特別講義、2016.06.08、名古屋市

藪上信、高周波駆動薄膜磁界センサの開発と生体磁気計測への応用、第7回 磁気センサの高機能化と応用調査専門委員会、2015.05.26、東京

H. Uetake, T. Kawakami, K. Moriya, S. Yabukami, T. Ozawa, Highly sensitive thin film magnetic field sensor meandering coplanar line, International Magnetism Conference (Intermag2015), BT-05 2015.05.12、北京

T. Ozawa, S. Yabukami, J. Totsuka, S. Koyama, J. Hayasaka, N. Wako, and K. Arai, Measurement Method for Internal Defects in Aluminum Using a Nano-granular In-gap Magnetic Sensor, 59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference, BR-09, 2014.11.04, Hawaii

上原裕二、古屋篤史、清水香杏、藤崎 淳、安宅 正、田中智大、大島弘敬、中山幸仁、藪上 信、本蔵義信、磁気センサ用アモルファスワイヤの動的磁化過程の解析(招待講演)、第58回スピエレクトロニクス専門研究会(第3回超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会)、2015.03.29、東京

藪上 信、植竹宏明、小澤哲也、小林伸聖、荒井賢一、高周波駆動薄膜磁界センサの開発(招待講演)、第58回スピエレクトロニクス専門研究会(第3回超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会)、2015.03.29、東京

H. Uetake, T. Kawakami, S. Yabukami, T. Ozawa, Highly sensitive coplanar line type integrated magnetic field sensor, IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG Europe 2014, 2014.05.05, ドレスデン

植竹宏明、川上敏弥、森谷健太、藪上 信、小澤哲也、ミアンダコプレーナ線路型薄膜磁界センサの開発、マグネティクス研究会、MAG-15-103, 2015.09.25, 米沢市

藪上 信、植竹宏明、小澤哲也、伝送線路構造の薄膜磁界センサによる心磁界計測、平成27年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会、17-B-a2-1, 2015.09.17, 金沢市

大江 駿、菊池弘昭、植竹宏明、藪上 信、中居倫夫、炉修一郎、石山和志、反磁界分布制御による磁性薄膜磁気センサの小型・高感度化に関する検討、第39回 日本磁気学会学術講演会、9aD-1, 2015.09.09, 名古屋市

植竹宏明、川上敏弥、森谷健太、藪上 信、小澤哲也、ミアンダコプレーナ線路構造の薄

膜磁界センサ素子 第 39 回 日本磁気学会学術講演会、8pD-12、2015.09.08、名古屋市

藪上 信、伝送線路型薄膜磁界センサの開発と心磁界計測への応用(招待講演) 第 169 回スピニクス研究会、2015.03.19、仙台市

川上敏弥、植竹宏明、藪上信、小澤哲也、SrTiO<sub>3</sub> 薄膜を用いた伝送線路型薄膜磁界センサ素子の試作、第 38 回 日本磁気学会学術講演会、5aD-4、2014.09.05、横浜市

小澤哲也、増子英明、渥美紘一、藪上信、戸塚巡、小山恵史、早坂淳一、若生直樹、荒井賢一、Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor を使用した厚さ測定、第 38 回 日本磁気学会学術講演会、2aC-2、2014.09.02、横浜市

川上敏弥、植竹宏明、藪上 信、小澤哲也、SrTiO<sub>3</sub> 薄膜を用いた高感度な伝送線路型薄膜磁界センサ素子の開発、平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会、1C05、2014.08.21、米沢市

植竹宏明、川上敏弥、藪上 信、小澤哲也、小林伸聖、荒井賢一、SrTiO<sub>3</sub> 薄膜を用いた伝送線路型薄膜磁界センサの開発、電気学会マグネティックス研究会、MAG-14-115、2014.08.08、安曇野市

藪上 信、オンチップ RF 磁気デバイスの調査～センサ 2(生体関係)～、電気学会マグネティックス研究会、2013.12.19、金沢市

木村卓文、藪上信、小澤哲也、宮澤安範、劔重博幸、島田寛、直線マイクロストリップ型プローブによる薄膜透磁率計測、第 37 回日本磁気学会学術講演会、2013.09.06、札幌市

植竹宏明、藪上信、万代裕章、千葉智章、小澤哲也、小林伸聖、荒井賢一、誘電体薄膜によるコプレーナ型薄膜磁界センサの高感度化、第 37 回日本磁気学会学術講演会、2013.09.06、札幌市

小澤哲也、細谷和史、藪上信、戸塚巡、小山恵史、直江正幸、小林伸聖、金田安司、荒井賢一、Nano-Granular In Gap Magnetic Sensor を使用した渦電流探傷、第 37 回日本磁気学会学術講演会、2013.09.05、札幌市

①藪上信、加藤和夫、小澤哲也、小林伸聖、荒井賢一、薄膜磁界センサによるシールドルーム外での心磁界計測、第 37 回日本磁気学会学術講演会、2013.09.03、札幌市

②藪上 信、加藤和夫、小澤哲也、小林伸聖、荒井賢一、伝送線路型薄膜磁界センサによるシールドルーム外での心磁界計測、電気学会マグネティックス リニアドライブ合同研究会、2013.06.21、長野市

③植竹宏明、藪上 信、齋藤芳則、千葉智章、小澤哲也、小林伸聖、荒井賢一、誘電体薄膜を用いた伝送線路型薄膜磁界センサの高感度化、電気学会マグネティックス研究会、

〔図書〕(計 6 件)

藪上信、日本磁気学会、まぐね(初等連載講座 磁界センサとその応用 第 1 回 磁界

センサ概論)、2016、156-163

藪上信(共著) 丸善、磁気便覧(磁界センサ、MI 効果応用素子)、2016、660-664、675-678

藪上 信、電気学会、電気学会誌 第 136 巻 第 1 号 3、高周波キャリア型薄膜センサ、2016、14-17

藪上 信(共著) 技術情報協会、ウェットプロセスによる精密薄膜コーティング技術、2014、271-273

藪上 信(共著) 電気学会、電気学会技術報告 第 1313 号 高周波マイクロ磁気応用技術の最新動向、2014、7-10、45-46

藪上 信他(共著) 株式会社テクノシステム、薄膜の評価技術ハンドブック、2013、261-262

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称：磁界センサとその製造方法

発明者：藪上信、植竹宏明

権利者：東北学院大学

種類：特許

番号：特願 2015-090209

出願年月日：2015.04.27

国内外の別：国内

名称：磁界センサとその製造方法

発明者：藪上信、植竹宏明

権利者：東北学院大学

種類：特許

番号：特願 2014-095429

出願年月日：2014.05.02

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.elec.tohoku-gakuin.ac.jp/yab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藪上 信(YABUKAMI, Shin)

東北学院大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00302232

(2) 研究分担者

芳賀 洋一(HAGA, Yoichi)

東北大学・大学院機械系・教授

研究者番号：00282096