

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420398

研究課題名(和文)直線状ベクトルポテンシャル生成のための二重コイルとその応用

研究課題名(英文)Coiled coil for a generation of lineally arranged vector potential and its applications

研究代表者

大坊 真洋(DAIBO, Masahiro)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：20344616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：回転のない(磁場の無い)ベクトルポテンシャルを発生させるために、細長く柔軟なソレノイドコイルをさらに円筒に巻きつけたコイルのコイル構造を持った二重コイル(ベクトルポテンシャルコイル)を作製した。ベクトルポテンシャルの中に二次導線を配置したところ、ベクトルポテンシャルの時間微分に比例した開放電圧が発生した。この二次導線を超伝導体で電磁シールドしても、シールドが無い時と同じ電圧が観測された。また二次導線を超伝導体としても、同じ電圧であった。遮蔽環境内へ電界を発生できることから、通信、非破壊検査、医療診断などへの展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We created a complex coiled coil (vector-potential coil) to generate a curl-free vector potential. The vector-potential coil that use a long flexible solenoid wound around a hollow cylinder. A voltage across a secondary conductor is proportional to the time rate of change of the primary current. We also present the transparency properties of the vector potential through a thick metal whose thickness is larger than the skin depth at the test frequency. Moreover, we replaced the hollow cylinder with a hollow superconducting cylinder, which provides an ideal magnetic shielding. However, even with this magnetic shielding, the voltage induced across the secondary coils (both superconductor and copper) remains the same as in the case of the nonmagnetic nonconducting hollow cylinder. This approach can form the basis of new types of electrical equipment with unique characteristics not only in the quantum-mechanics regime but also in the macroscopic regime.

研究分野：磁気計測

キーワード：ベクトルポテンシャル コイル トランス 非侵襲診断 非破壊検査 電界発生

1. 研究開始当初の背景

ベクトルポテンシャルとは、電位のようなスカラー量ではなく、方向性を有したポテンシャルであり、電界や磁界を統一した概念である。電磁波の理論を構築したマクスウェルはベクトルポテンシャルを物理量と考えていた。しかしながら、実際に扱うことができ、観測にかかるのは電界や磁界であったので、ベクトルポテンシャルは数学上の産物で物理量ではないという扱いをされた時代もあった。

アハラノフとボームは、電子が磁界も電界もない空間であっても、そこを通過する時に位相が変化するといったアハラノフ・ボーム効果を1959年に発表している。

ベクトルポテンシャルの実在性について、決着をつけたのが日立フェローの故外村彰博士である。超伝導体のマイスナー効果による完全磁気遮蔽されたドーナツ状の磁性体リングを製作し、内側と外側を通った電子波を干渉させて、アハラノフ・ボーム効果を見事に実証した(1986年)。この実験結果により、ベクトルポテンシャルは電子波の位相を変化させることができる物理量であると確認された。

さて、我々は超伝導量子干渉素子(SQUID)を使用して、半導体にレーザー光を照射した時に発生する磁場を高感度に高空間分解能で計測する光磁気顕微鏡を開発してきた。

さらに、カリウムやルビジウムなどの最外殻電子が1個のアルカリ金属原子に対して、吸収波長と一致した円偏光レーザーを照射することによって、原子をスピン偏極させて超高感度で磁気を検出する原子力計の開発も行ってきた。これは、フォトンのスピン1を、電子スピンの-1/2から+1/2の遷移に使うことでスピン偏極させ、歳差運動にともなって透過レーザーの偏光が変化することで観察することによって磁場を計測する原理である。

磁場の発散はゼロであるので、その磁場が何か別のベクトルの回転で表されても、発散がゼロであることには変わりがないから、 $B = \text{rot } A$ で表されるベクトルポテンシャル A があっても良い。それでは回転の無い A はどうすれば発生できるのだろうか。回転がなければ磁場にならないから、磁場を発生させずに各種のデバイスに電気的な作用ができるのではないかと考えた。そこで、まずベクトルポテンシャルを発生させるコイルを作製し、その特性や応用を検討した。

2. 研究の目的

我々が考案したのは、ソレノイドコイル(子コイル)をさらにソレノイド状(親コイル)に巻いた二重コイルである(図1)。十分に長いコイルでは、コイルの内側には磁束が集中して存在するが、外側では磁束密度が非常に小さくなり、事実上磁場は無いとみなすことができる。一方、ベクトルポテンシャル A は、子コイルの外側にも電流と平行に存在するはずである。

子コイルを円筒に巻きつけて構成される親コイルの内側では、子コイルがつくるベクトルポテンシャルは、対向する子コイルがつくるベクトルポテンシャルと同じ向きになる。隣接する子コイルの隙間のベクトルポテンシャルは逆向きになるので、相殺される。その結果、親コイルの内側には親コイルの中心軸と平行で直線的なベクトルポテンシャル A が生成されるはずである。我々は、このようなコイルをベクトルポテンシャルコイルと呼ぶ。

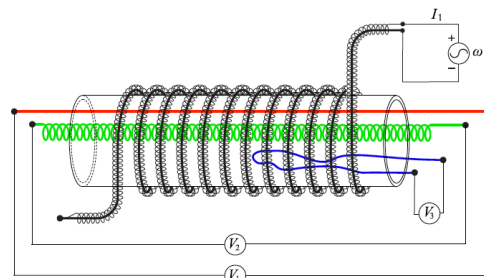


図1 ベクトルポテンシャルコイルおよびトランスフォーマー

この研究の目的は、これまでマクロ領域ではほとんど利用されてこなかったベクトルポテンシャルについて、漏洩磁場などの副次的な要素を出来るだけ排除して実験できるように、ベクトルポテンシャルのみを発生させる特殊なコイルを作製することである。

そして、二次導体を設けたベクトルポテンシャルトランスを作製して、ベクトルポテンシャルを計測し評価する方法を開発する。そして、渦なしの平行なベクトルポテンシャルを発生する機器を作製し、応用研究のための基盤を固める。

3. 研究の方法

実施する研究内容は3つに大別できる。

(1) 空間的に平行なベクトルポテンシャルを発生する二重コイルの製作

電流が流れると、その周囲には磁束が回転するように発生し、さらにその磁束の周りにはベクトルポテンシャルが渦を巻いて存在している。電流密度 J とベクトルポテンシャル A の関係は、低周波では $\text{rot rot } A = \mu_0 J$ で表される。つまり、この逆構造を作れば、単純な一方向を向いた A を生成することができると考えられる。

別の見方をすると、磁束密度 B は、 $B = \text{rot } A$ であり、 $J = \text{rot } H$ であるので H は A に、 J は B に対応する。ソレノイドコイルによって、電流から均一な磁場を生成できることの類似性を使うと、 B をソレノイド状に巻きつければ均一な A が発生できることが予想される。

①ソレノイド型

二重コイルの基本形であり、図1に示した形状である。

②球型

ベクトルポテンシャル A は、 $\text{div } A = 0$ の

クーロンゲージに限定されないが、もしもこの制限がかかるのであれば、ベクトルポテンシャルは連続でなければならないから、空間的に均一なベクトルポテンシャルを形成するには、球にソレノイドを巻きつけた球型が理想的と考えられる。

③スパイラル型

平面上に渦巻状に配置するとスパイラル型のコイルになる。このコイルは長さの短いソレノイドコイルと考えることもできるし、コイルの内側を外側に展開したソレノイドコイルと考えることもできる。

④トロイダル型

親コイルの両端を閉じたトロイダル型への展開も考えられる。この場合は、コイル端部の影響が無くなり、ゲージ依存性を調べることができる。また、ベクトルポテンシャルが再度ループになるので、トロイダルの中央では磁場が表出するかどうか、遠隔作用なのか近接作用なのか調べることができる。

(2) 時間的に変動する動的なベクトルポテンシャルによる電界の発生

ベクトルポテンシャルコイルの電流を交流にすると、電流と同相でベクトルポテンシャルが発生する。ベクトルポテンシャルの観測には、ベクトルポテンシャルコイルの内部の空間に、導線を配置したトランスを作製して行う。

通常の磁気トランスは磁束がコイルを横切る時に電圧を発生すると説明されるが、ベクトルポテンシャルトランスは磁場が無い空間で電磁誘導を起こすことができる。ベクトルポテンシャルが時間変化すれば、式(1)の電圧が導線の両端に発生するはずである。

$$V = \int_c \frac{\partial A}{\partial t} \cdot ds \quad (1)$$

ベクトルポテンシャルは必ずしもループになっている必要はないので、磁場が無くても誘導することができる。二次導線の形状や引き回し、トポロジーの関係を変化させて、発生する電圧を計測する。

ベクトルポテンシャルが時間的に変化すると、電界と同等になるが、この電界はコイルで発生できるので、キャパシターで発生させる時のように環境に暴露されたむき出しの電極は不要となる。

(3) 時間的に変動しない静的なベクトルポテンシャルの利用

光ポンピング原子磁力計にベクトルポテンシャルを印加して、スピン制御に利用できないか実験する。

4. 研究成果

(1) ソレノイド型のベクトルポテンシャルコイル及びトランス

子コイルは、単位長当たりの巻き数、巻方向、断面積、条数、絶縁体の厚みなどが異なる7種類のコイルを作製した。その子コイルをさらに、様々な太さ、長さの円筒に巻きつけ、

その円筒の空洞に様々な引き回し、巻数の二次コイルを配置して、トランスを構成して伝達特性を調べた。最も細い子コイルは、ギターの弦のような大きさと構造である。下記、代表的な2つの場合について報告する。

① 常伝導ベクトルポテンシャルトランス

製作したコイルのパラメータは、子コイルの単位長当たりの巻き数 $n_0 = 710 \text{ turn/m}$, 親コイルの単位長当たりの巻き数 $n_1 = 227 \text{ turn/m}$, 子コイルの断面積 $S = 7.07 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 親コイルの半径 $a = 0.021 \text{ m}$, 親コイルの長さ $L = 0.16 \text{ m}$ である。一次コイルのインダクタンスは $58 \mu\text{H}$, 抵抗は 10 kHz の時で 9.4Ω であった。図2に外観写真を示す。

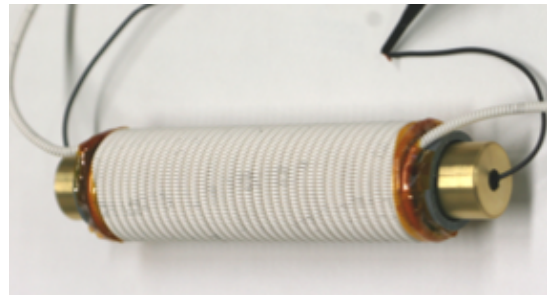


図2 真鍮で二次導体をシールドした場合
白色線は柔軟で長いソレノイドコイルでベクトルポテンシャルコイルの一次コイル、黒色線は二次導体。

さらに、一次コイルと二次コイルの間に真鍮製の円筒も配置した。真鍮円筒の壁の厚みは 10.5 mm であり、測定周波数 10 kHz の表皮深さよりも十分に厚い。

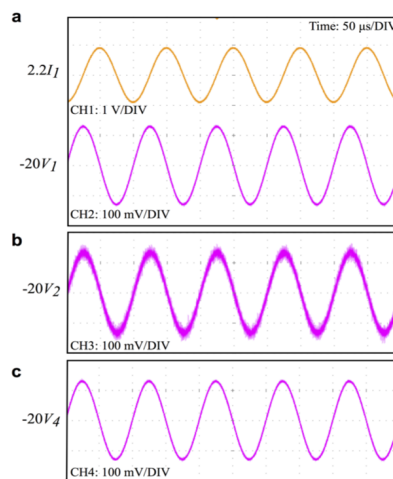


図3 ベクトルポテンシャルトランスの誘導電圧波形

図3には様々な形状の二次コイルを挿入した時の二次コイル両端に現れた開放電圧波形を示す。図3(a)の上側は、一次コイルに接続した 2.2Ω の直列抵抗の両端に発生した電圧であり、一次電流に対応している。交流で駆動しており、 $\omega = 6.283 \times 10^4 \text{ rad/s}$, $I_m = 810$

mApp である。図 3 (a) の下側は図 1 の二次コイルが直線の場合の V_1 に対応しており、二次開放電圧を増幅率が 20 倍の反転アンプで計測した波形である。位相が 90° シフトした微分波形になっている。

図 3 (b) は、図 1 の V_2 に対応した電圧であり、二次コイルがソレノイドになっている場合である。この場合、ベクトルポテンシャルコイルの内側の空間に磁場があれば、大きな誘導電圧が発生するはずであるが、結果はノイズが増えているものの、信号周波数の振幅には影響がなく直線導体の時と同じ電圧が発生している。二次側のソレノイドコイルの内側に透磁率の高い鉄心を挿入しても信号に変化はなかった。磁場が無いことは、ホールセンサーや後述の原子磁力計でも確認している。誘導電圧の理論式を式 (2) に示す。

$$V_1 = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \cdot d\mathbf{z} = \mu_0 n_0 n_1 S \omega (\sqrt{a^2 + L^2} - a) I_m \cos(\omega t) \quad (2)$$

ここで、 μ_0 : 真空の透磁率、 n_0 : 細いソレノイドコイル (子コイル) の単位長あたりの巻き数、 n_1 : 細いソレノイドコイルをさらにシリンダーに巻いた時のグローバルな単位長あたりの巻き数、 S : 細いソレノイドコイルの断面積、 ω : 角周波数、 a : シリンダーの半径、 L : シリンダーの長さ、 I_m : 電流振幅、 t : 時間である。 V_1 は細いソレノイドコイルに $I_m \sin(\omega t)$ の電流を流した時の二次コイルの開放電圧である。

実際に実験をしてみるとベクトルポテンシャルはゲージにより $\text{div } \mathbf{A} = 0$ に制限されないため、磁束のようなコイル端でのエッジ効果はなかった。すなわち理論式は非常にシンプルになり式 (3) で与えら、これは実験結果とよく一致した。

$$V_1 = \mu_0 n_0 n_1 S \omega L I_m \cos(\omega t) \quad (3)$$

図 3 (c) は、真鍮の円筒を電磁シールドとして一次コイルと二次コイルの間に配置した場合の結果である。交流の電磁波が侵入できる表皮深さ δ は式 (4) で与えられる。

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (4)$$

磁場が導体に印加された場合には、その導体に渦電流が流れて侵入しようとする磁場を打ち消す。しかしベクトルポテンシャルの場合は、ベクトルポテンシャルが回転しないので (磁場がないので)、渦電流が発生しない。それ故に励起信号は、対象物内部にまで侵入することができる。実験結果は、これを証明しており、シールドがあった場合でもシールドが無い時と全く同じ電圧が発生している。これは金属の導体で覆われていても内部に電圧の誘導が可能であることを示している。

また、発生する二次電圧は一次電流の微分に比例するが、その極性は一次電流の変化を妨げる方向であり、いわゆるこれはベクトルポテンシャル版のレンツの法則とも言える。

周波数特性も評価したが、共振を過ぎてもシールドの有無で出力電圧が変化することはない、シールドを接地しても変化がなかった。

図 1 の V_3 のように二次コイルを途中で U ターンさせた場合は、途中がどのような経路になっていても出力電圧はゼロになった。これは、導体が電界を拾い集めて電圧として積算する (線積分する) 時に、ベクトルポテンシャルと平行な成分だけが使われるためである。磁束と誘導電圧が外積で表されるのに対して、ベクトルポテンシャルと誘導電圧は内積の関係になる。

なお、一次コイルの端部からの漏れ磁束の影響が懸念されるが、その端部は二次コイルよりも 1 m 以上離して配置しており、またその端部を動かしてみても出力電圧には変化がなく、事実上の問題はない。

ベクトルポテンシャルによる発生電圧は、磁場による発生電圧よりも小さく、寄生効果による擬似信号でないか十分に注意する必要がある。例えば図 4 に示すように有限の太さのコイルを 3 次元空間に巻きつける都合上、斜めに捻れながら配置することになる。その結果、本来利用したい A_1 の成分の他に、電流全体がコイルの軸方向に進む A_2 の成分、コイルの軸に巻き付く A_3 の成分がある。特に A_3 の成分は回転しているので、磁場成分となる。 A_2 と A_3 の成分を無くするために、子コイルの中に同軸に帰還導線を配置し、子コイルの一端で周囲を周回する導線と帰還導線を短絡させた。これにより帰還電流が A_2 と A_3 の成分をキャンセルし、 A_1 の成分だけを使うことができる。

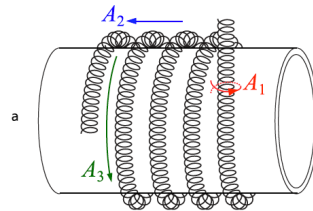


図 4 ベクトルポテンシャルの各成分

②超伝導ベクトルポテンシャルトランス

次に、シールドの透過性を更に確認するために、超伝導シールドを用いた実験も行った。十分に長いソレノイドコイルの外側には磁場が事実上無いことを踏まえて、さらに超伝導シールドにより磁場が無い空間を準備した。ビスマス 2223 相系の超伝導体である

$\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.26}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ (BPSCCO) の円筒を電磁シールドとして用いた。臨界温度は 108 K であり、液体窒素 77 K で冷却した。シールドファクターは 20 Hz-10 kHz の範囲で 10^6 以上である。

一次コイルは常伝導の銅製であり、単位長あたりの巻き数 $n_0 = 3300$ turns/m、グローバルな巻き数 $N_1 = 20$ turns である。一次コイルの端部は、芯線と巻線をクライオスタットの外側の室温部で短絡し、グローバル巻き

数による寄生磁場の発生と、往復方向それぞれに発生するベクトルポテンシャルをキャンセルした。

直線状の二次コイルには、銅と BiSrCaCuO (BSCCO) 超伝導ワイヤーの 2 種類を用いた。

一次電流と二次開放電圧の相互インピーダンスと位相関係を周波数を変えながら調べた結果を図 5 に示す。

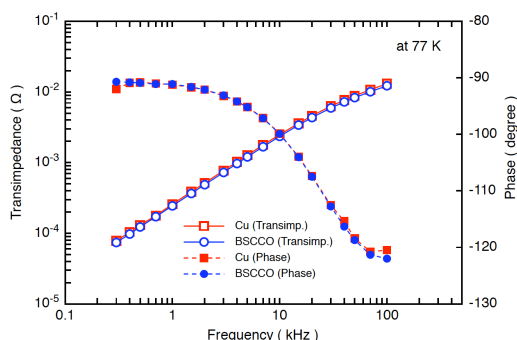


図 5 超伝導シールド内に銅および BiSrCaCuO 超伝導二次コイルを配置した時の、相互インピーダンスと位相の周波数特性。

その結果は興味深いもので、超伝導シールドが有っても無くても、出力電圧には変化がなかった。つまりベクトルポテンシャルは超伝導シールドに妨げられることなく透過し、一次側と二次側を結合させることができる。磁場が導体に触れなくても電磁誘導と同等のことが実現できる。

ベクトルポテンシャルが、磁場よりも本質的な物理量であり、空間自体が持っている性質が変わると理解すれば、一次コイルと二次コイルの間に物体があっても遮られることができなく、信号またはエネルギーを伝達することができる。

また、BSCCO ワイヤーは保護のために銀合金の膜で外側から覆われているが、たとえ銀合金に電圧が発生したとしても、BSCCO で短絡されて電圧が発生しないのではないかと当初は考えられたが、出力電圧は銅コイルの場合と変わりがなかった。

これらのことから、ベクトルポテンシャルで発生した電界は、超伝導体も含めて導体内部に電界を発生させることができ、多くの応用が期待できる。

③球形、スパイラル型、トロイダル型の各種ベクトルポテンシャルコイル

各種形状のベクトルポテンシャルコイルを作製し、トランスを構成して電気的特性を調べた。図 6 に試作したトロイダル型のトランスの外観を示す。



図 6 トロイダル型ベクトルポテンシャルコイル

トロイダル型の場合は、ソレノイド型と比較して端部の影響が無いメリットがあることを考えていたが、ソレノイドコイルにおける端部の効果は観察されなかった。ドーナツの穴の中心に立ってみると、中空のドーナツの中にはベクトルポテンシャルがあり周回しているが、観測地点ではベクトルポテンシャルが無い。そのため、ソレノイドコイルを置いても誘導電圧は観測されなかった。すなわち、磁束を導線で囲むと電圧が発生するといった遠隔作用の考え方ではなく、その場所に物理量があるか否かで考える近接作用で考えて良いことがわかる。

(3) 時間的に変動しない静的なベクトルポテンシャルの応用

カリウム蒸気を吸収波長の円偏光で光ポンピングし、その透過光の偏光が磁場に応じて回転することを原理とする光ポンピング原子磁力計を使用した実験を行った。直流のベクトルポテンシャルを印加した場合は、磁力計の出力に変化がなく、磁場が漏洩していないことが確認された。なお、この磁力計の感度は 3 kHz で 500 fT 程度である。

直流のベクトルポテンシャルには感度がないが、直流のベクトルポテンシャル印加時には磁気測定が不安定になる現象も確認された。なお、交流のベクトルポテンシャルを印加すると磁場が無いにもかかわらず信号が変化した。ベクトルポテンシャルコイルによって、スピン系を制御できる可能性があり、この詳細については引き続き研究中である。

以上をまとめると、ベクトルポテンシャルコイルを使用すると物体に遮られることなく、物体内部に向きがそろった均一で平行な電界を印加することができる。

これまでベクトルポテンシャルは量子力学の領域でないと効果がないと思われていたが、マクロ領域であっても磁場や外部からの電界印加では実現できないことがベクトルポテンシャルならば実現可能であることを示した。この著しい長所は、物体や生体の内部を電氣的に検査する用途に適しており、新しい非破壊・非侵襲検査に発展できると期待される。

また、このベクトルポテンシャルコイルは、より深く電磁気学を理解するための教材としても有益であろう。

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 2件)

① Masahiro Daibo, Shuzo Oshima, Yoichi Sasaki, and Kento Sugiyama, Vector-Potential Transformer with a Superconducting Secondary Coil and Superconducting Magnetic Shield, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol.26, pp.1-4, 10.1109/TASC.2016.2535139 (2015)

② Masahiro Daibo, Shuzo Oshima, Yoichi Sasaki, and Kento Sugiyama, Vector Potential Coil and Transformer, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, Vol.51, pp.設定無, 10.1109/TMAG.2015.2436439 (2015)

[学会発表] (計 3件)

① 谷藤 将覧、鳥島 淳生、伊藤 駿、大坊真洋、交流ベクトルポテンシャルによる生体への電圧発生、平成28年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」、2016.03.01-2016.03.01, 日本大学工学部、福島県郡山市

② Masahiro Daibo, Shuzo Oshima, and Yoichi Sasaki, Vector-potential transformer with superconducting secondary coil, 12th European Conference on Applied Superconductivity, 2015.09.06-2015.09.10, Lyon, (France).

③ Masahiro Daibo, Shuzo Oshima, Yoichi Sasaki, and Kento Sugiyama, Vector Potential Coil and Transformer, IEEE International Magnetics Conference INTERMAG, 2015.05.11-2015.05.15, BU-01, Beijing, (Chanina).

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称：ベクトルポテンシャル発生装置、ベクトルポテンシャルトランス、シールド透過装置、非接触空間電界発生装置、ヌル回路、およびベクトルポテンシャル発生装置用の構造体
発明者：大坊真洋、大島修三
権利者：岩手大学
種類：特許
番号：特願 2013-273557
出願年月日：2013年12月27日
国内外の別：国内

○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

6. 研究組織

(1) 研究代表者
大坊 真洋 (DAIBO, Masahiro)
岩手大学・工学部・准教授
研究者番号：20344616

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし