

令和 3 年 4 月 21 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K12152

研究課題名（和文）医療・ヘルスケアを目的とした磁界方式人体通信システムの開発研究

研究課題名（英文）Research and development of magnetically coupled intra body communication system for medical and healthcare applications

研究代表者

伊藤 建一（Kenichi, Ito）

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：10288251

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、包括的に技術的課題を解決し、磁界方式人体通信を用いたウェアラブル端末間通信の実用化技術を構築することである。

まず、各種磁界結合方式の信号伝送損失特性を解析した。次に、各方式の等価回路モデルを作成・解析し、共鳴結合方式の共鳴周波数特性の最適設計の指針を得た。次に、各結合方式の通信特性を評価した。また生体への安全性についても検討を行い、安全性が非常に高いことを確認した。さらに、2コイル無線電力伝送システムについて検討し、最適な電力伝送効率を実現できる可能性を示した。最後に実際に磁界方式人体通信機を試作した。このように、磁界方式人体通信の実用化技術に関する各種成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人体通信の伝送方式として磁界を用いた方法に関する研究はほとんど行われておらず、これからの発展可能性が非常に大きい研究課題である。本研究では、ボディエリアネットワーク（BAN）に適用可能な通信方式の中で最も優れた手法となりうる磁界方式人体通信システムの実用化技術に関する各種成果を得ることができた。この実用化技術は、医療・ヘルスケア用BANだけでなく、汎用的な用途（例えばワイヤレスイヤホン等）の通信システムにも適用が可能である。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a practical healthcare wearable device with terminal-to-terminal communication using magnetically coupled, intra body communication (IBC) by comprehensively resolving the associated technical problems. We analyzed the characteristics of signal transmission loss for various magnetic-field-coupling methods and developed their equivalent circuit models. Based on this analysis, we formulated a guideline to optimize the resonant frequency characteristics of the resonant coupling method. Then, the communication characteristics of all coupling methods were evaluated. Additionally, we examined and evaluated a 2-coil wireless power transmission system to achieve optimum power transmission efficiency. Finally, we fabricated a prototype of a magnetically coupled, IBC-based wearable device. Thus, we obtained multiple results using the designed system. We also evaluated and verified the device safety for applications to living organisms.

研究分野：生体工学

キーワード：人体通信 磁界方式 医療・ヘルスケア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、世界中の先進国で高齢化が進み、高齢者の健康管理が問題となっている。この問題を解決するために、医療・ヘルスケア分野では、各種生体計測センサを搭載したウェアラブル端末を人体周囲に分散配置し、体温、心電図などの生体情報をモニタリングすることで、健康維持・管理に役立てるシステムが提案されている。このウェアラブル端末間の通信方式には、Bluetooth や ZigBee などの近距離無線通信方式の他に、人体通信方式が検討されている。人体通信方式は人体を通信路として用いるため、無線方式と比べて一般的に干渉性や秘匿性に優れているという特徴がある。人体通信の信号伝送方式として、これまで主に 2 つの方式（電流方式と電界方式）が研究されてきたが、近年、従来の 2 つの方式よりも多くの点で優れている磁界方式が提案された。

2. 研究の目的

この最近提案された磁界方式は従来の 2 つの方式より下記の点で有利な点を持ち、より高性能なウェアラブル端末間通信を実現できる可能性を秘めている。1) 磁界は基準電極なしで検出が可能であるため、従来の 2 つの方式と異なり基準電極で検出された信号の変動の影響を受けない。2) 周囲環境に高透磁率の物質がある特殊な場合を除き、周囲環境の物質の透磁率はおおまかに同じであると考えてよいため、磁界は導体の接近を含め周囲環境の影響を受けにくい。3) 生体組織の透磁率は部位によらずほぼ均一であるため、磁界は人体特性の影響をあまり受けず、人体内を少ない減衰で通過できる。さらに、人体のガイド効果によって損失特性が良くなる可能性も示唆されている。

本研究の目的は、包括的に技術的課題を解決し、上記のように優れた特徴を持つ磁界方式人体通信を用いたウェアラブル端末間通信の実用化技術を構築することである。

3. 研究の方法

(1) 各結合方式の信号伝送特性と生体安全性評価

無線電力伝送で提案・検討されている非共鳴結合方式、低 Q 共鳴結合方式、高 Q 共鳴結合方式を対象とした。非共鳴結合方式は、送信側と受信側にコイルをそれぞれ一つずつ配置し、コイル間の純粋な磁気的な結合によって信号を伝送する方式である。低 Q 共鳴結合方式は送受信コイルにキャパシタを追加する方式であり、高 Q 共鳴結合方式は送受信コイルの他に共鳴用コイルとキャパシタをそれぞれ追加する方式である。両方式とも、共鳴現象によって信号損失の低減を試みることが特徴である。

本項目では、有限要素と送受信機回路等を融合したモデルを用いて、磁界方式の信号伝送特性及び生体安全性について検討した。解析には商用ソフトウェア COMSOL5.4 を使用した。生体の安全性を評価では、ICNIRP ガイドラインに基づく体内電界強度及び局所 SAR を用いた。

(2) 各結合方式の最適設計の検討

本項目では、等価回路モデルを用いて、非共鳴結合方式の信号損失量の周波数特性と高 Q 共鳴結合方式の信号損失量の共鳴周波数特性を解析した。

(3) 各結合方式の通信特性評価

本項目では、各結合方式の周波数特性をベクトルネットワークアナライザで計測し、逆離散フーリエ変換を用いて通信路インパルス応答を算出することによって、計算機シミュレーションにより各種磁界結合方式の BER 特性を評価した。

(4) L セクションマッチングネットワークを用いた動的最適化の検討

本項目では、送受信機の二つのコイルの位置関係が変化した場合において、その位置関係における最小損失量を与えるシステムについて検討した。具体的には、相互インダクタンスをリアルタイムで推定することによって、最適なトランスデューサ電力利得を与えるマッチングネットワークを構成できるか検討した。

(5) 磁界方式人体通信機の試作

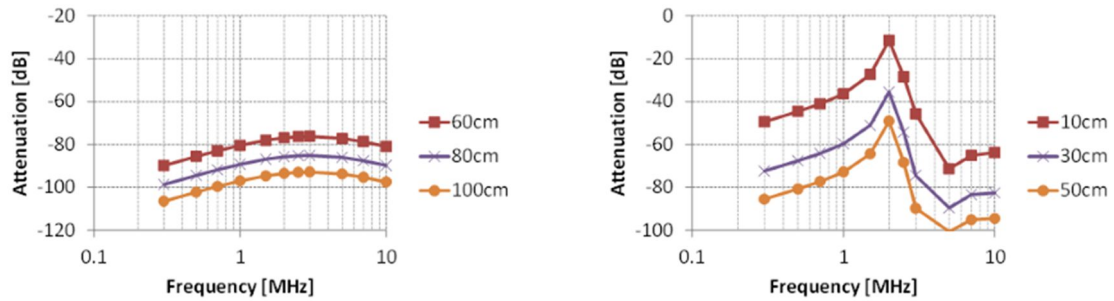
本項目では、実際に磁界方式人体通信機を試作した。変調方式は QPSK、通信速度は 500kbps である。送信機は DE1-SoC FPGA ボード、受信機は LPC-Link2 を用いて開発した。

4. 研究成果

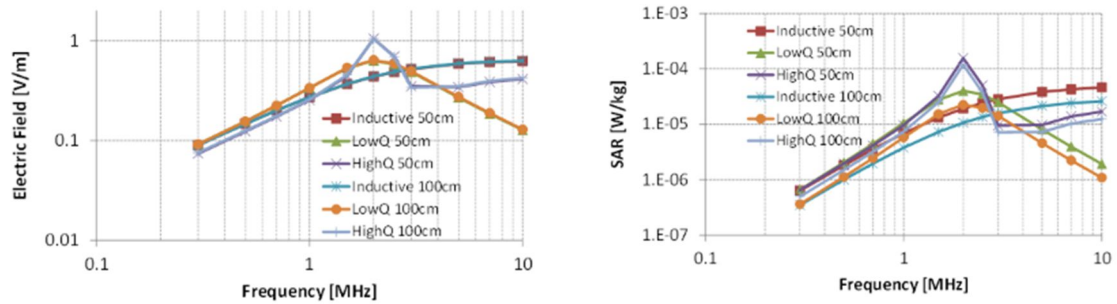
(1) 各結合方式の信号伝送特性と生体安全性評価

図 1(a) に非共鳴誘導結合の信号損失量を示す。コイル間距離の増加に伴い信号損失量は増加したものの、周波数特性は似た形状を示し、各距離において信号損失量は 2~3 MHz で最小となった。図 1(b) に高 Q 共鳴結合の信号損失量を示す。共鳴周波数 2 MHz において信号損失量は、

コイル間距離にかかわらず損失が 20 dB 以上改善されるという結果が得られた．図 2 に各結合方式の体内電界強度と局所 SAR の最大値を示す．体内電界強度と局所 SAR は最も大きい高 Q 共鳴結合の時でもそれぞれ 1 V/m と 0.001 W/kg 程度であり，一般環境制限値よりそれぞれ 2 桁及び 4 桁ほど小さい値となった．



(a) 非共鳴結合 (b) 高 Q 共鳴結合
図 1 非共鳴結合と高 Q 共鳴結合の信号損失量の周波数特性

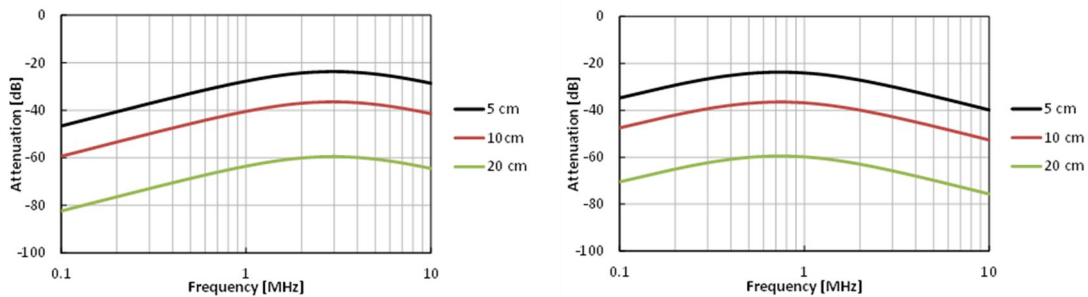


(a) 体内電界強度 (b) 局所 SAR
図 2 各結合方式の体内電界強度と局所 SAR の最大値

(2) 各結合方式の最適設計の検討

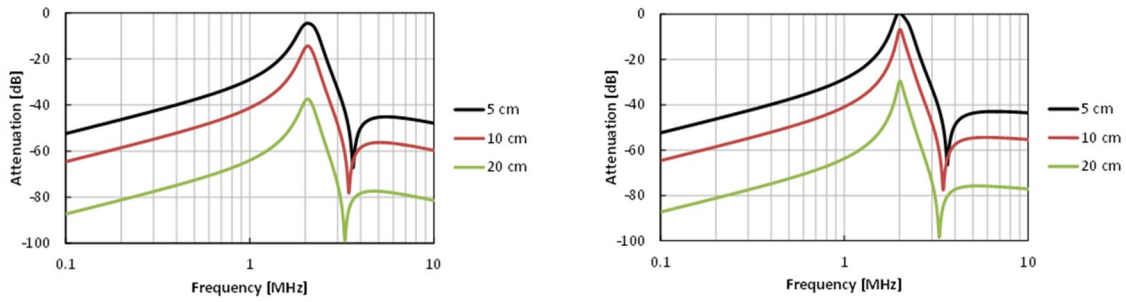
図 3 に非共鳴結合方式の信号損失量を示す．図 3(a)は自己インダクタンス $L_1=L_4 = 3.85\mu\text{H}$ であり，図 3(b)は自己インダクタンス $L_1=L_4 = 15.4\mu\text{H}$ の結果である．全てのコイル間距離において，信号損失量が最小となる周波数帯域は，自己インダクタンスが大きくなるに従い低域側にシフトした．さらに，同じ送受信間距離同士の最小信号損失量を比較すると，上記のように自己インダクタンスによって最小となる周波数帯は異なるものの損失量そのものはほぼ同じであった．これは，自己インダクタンスを調節することによって，送信周波数の損失が最小となるようにシステムを設計できることを意味している．

図 4 に高 Q 共鳴結合方式の信号損失量を示す．図 4(a)は負荷抵抗 $R_L = 50\Omega$ であり，図 4(b)は自己インダクタンス $R_L = 300\Omega$ の結果である．負荷抵抗が大きくなるに従い，2MHz 付近の共鳴波形が鋭くなると共に信号損失量が大きく減少することがわかる．他にも同様な解析を行い，高 Q 共鳴結合方式の共鳴周波数における信号損失量を定める主要因は，共鳴特性は基本的に共鳴用コイルの自己インダクタンス，共鳴用コイルと送受信コイルの結合係数，負荷抵抗によって決まることを明らかにした．これらをパラメータとして用いれば，共鳴特性を適切に設定することが可能となる．



(a) $L_1=L_4 = 3.85\mu\text{H}$ (b) $L_1=L_4 = 15.4\mu\text{H}$

図 3 非共鳴結合方式の自己インダクタンスを変化させた場合の信号損失量



(a) $R_L = 50\Omega$

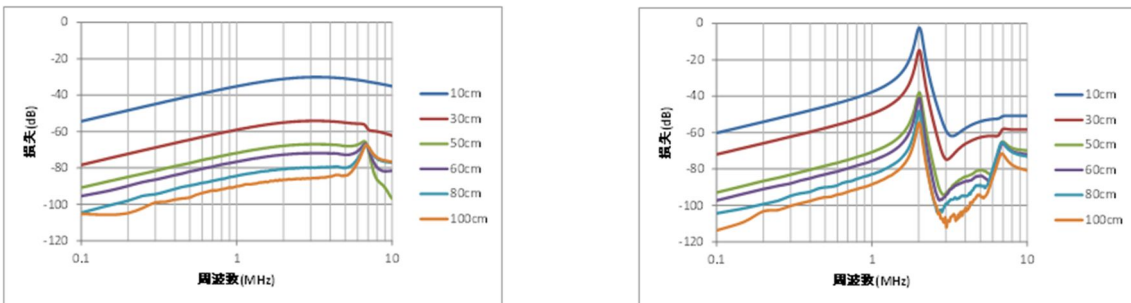
(b) $R_L = 300\Omega$

図4 高Q共鳴結合方式の自己インダクタンスを変化させた場合の信号損失量

(3) 各結合方式の通信特性評価

図5に非共鳴結合方式と高Q共鳴結合方式の信号伝送損失 S_{21} の振幅特性を示す。非共鳴結合方式の振幅特性は、コイル間距離の増加に伴い信号損失量は増加したものの、周波数特性は似た形状を示し、3 MHz付近で損失が最小になる傾向が見受けられた。高Q共鳴結合方式の振幅特性は、共鳴周波数付近で最小となり、コイル間距離にかかわらず損失が30 dB以上改善されるという結果が得られた。なお、両方式とも7 MHz付近で特性変化が観察された。

図6に等化器を適用した場合の各結合方式のBER特性を示す。適応等化器には、8タップの線形RLS等化器と6タップの分数間隔フォワードフィルタと2タップのフィードバックフィルタをもつ判定フィードバック等化器を採用した。低Q共鳴及び高Q共鳴結合方式において、等化器を適用することによって大幅にBER特性が改善され、非共鳴結合方式よりも特性が向上した。低Q共鳴結合方式では、同じ変調方式と等化器の組み合わせにおいて、非共鳴結合方式よりも9.0 dB~9.5 dB程度特性が改善された。また、高Q共鳴結合方式では、低Q共鳴結合方式よりもさらに8.0 dB~12.5 dB程度特性が改善された。



(a) 非共鳴結合

(b) 高Q共鳴結合

図5 非共鳴結合方式と高Q共鳴結合方式の信号伝送損失 S_{21} の振幅特性

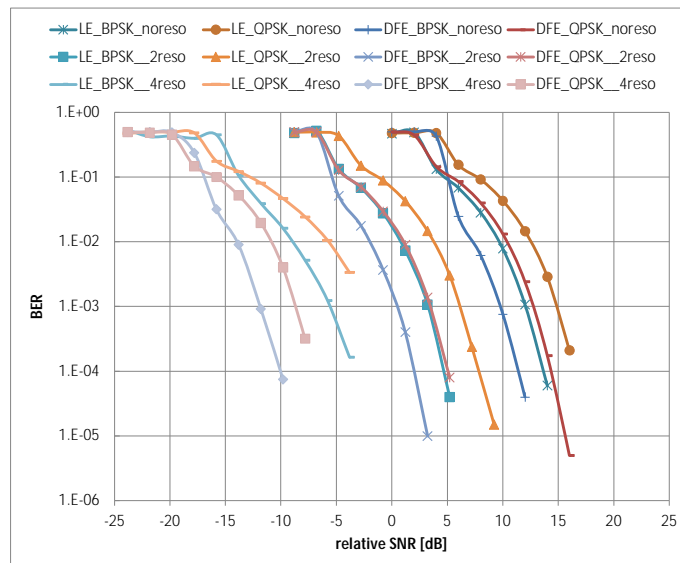


図6 等化器を適用した場合の各結合方式のBER特性

(4) Lセクションマッチングネットワークを用いた動的最適化の検討

図7にトランスデューサ電力利得 G_T の結果を示す。トランスデューサ電力利得 G_T は結合係数 $k = 0.006$ の時にほぼ最大(0.53)と比較的高い効率を示した。図8に各結合係数における相互インダクタンス推定値を示す。このように、推定値は2個得られ、そのうちの片方が実際の相互インダクタンス M の推定値を表している。結合係数 $k = 0.006$ 付近では二つの推定値が近いため少し誤差が大きいものの、比較的良好に相互インダクタンス M が推定できていることがわかる。これらの結果は、2コイルの位置関係が変化しても、その位置関係における相互インダクタンス M を推定することによって、最適な電力伝送に近い効率を実現できることを示している。

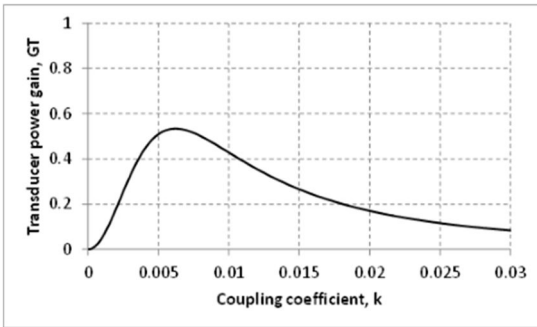


図7 トランスデューサ電力利得 G_T

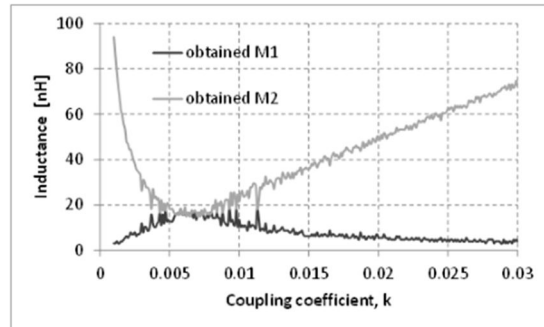


図8 相互インダクタンスの推定値

(5) 磁界方式人体通信機の試作

非共鳴結合方式でコイル間距離を20cmに設定し、周波数10Hz、振幅1V、オフセット2Vの正弦波を送信し、受信できるか確認した。図9に受信波形を示す。受信エラーはあるものの、概ね受信はうまくいっていることが確認できる。

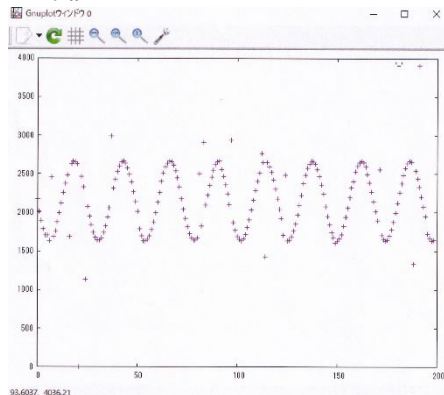


図9 受信波形

以上のように、磁界方式人体通信の実用化技術に関する各種成果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 伊藤建一	4. 巻 13 巻 1 号
2. 論文標題 数値電磁界解析を用いた磁界方式人体通信の信号伝送特性と生体安全性評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11308/tjsst.13.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Ito	4. 巻 Vol. 6 No. 2
2. 論文標題 Study on Magnetically Coupled Intrabody Communication Dynamic Optimization Regarding Two-Coil Power-Transfer System Using L-section Matching Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 298-316
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15748/jasse.6.298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 伊藤建一	4. 巻 Vol. 11 No. 3
2. 論文標題 磁界方式人体通信における共鳴結合方式の最適設計に関する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 23-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11308/tjsst.11.23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 伊藤建一
2. 発表標題 数値電磁界解析を用いた磁界方式人体通信の信号伝送特性と生体安全性評価
3. 学会等名 日本シミュレーション学会令和2 年度第1 回多次元移動通信網研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤建一
2. 発表標題 磁界方式人体通信の通信特性評価 - 各種結合方式の比較 -
3. 学会等名 日本シミュレーション学会令和3 年度第1 回多次元移動通信網研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichi Ito
2. 発表標題 Signal transmission characteristic and biosafety evaluation on magnetically coupled intra-body communication,
3. 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中條瑞生, 森田日明, 伊藤建一
2. 発表標題 ベクトルネットワークアナライザを用いた磁界方式人体通信の信号伝送損失の測定
3. 学会等名 2019年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村山瑠花, 伊藤建一
2. 発表標題 人体通信を用いたウェアラブル生体電気信号測定・通信システム
3. 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology 学生セッション
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenichi Ito
2. 発表標題 Study on Dynamic Optimization of Four-Coil Power Transfer System for Magnetically-Coupled Intra-body Communication
3. 学会等名 The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenichi Ito
2. 発表標題 Dynamic Optimization of Two-Coil Power-Transfer System Using L-Section Matching Network for Magnetically Coupled Intrabody Communication
3. 学会等名 18th Asia Simulation Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田泰昌, 小林航, 伊藤建一
2. 発表標題 磁界方式人体通信の信号伝送損失の遠距離測定
3. 学会等名 平成30年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤建一
2. 発表標題 磁界方式人体通信における共鳴結合方式の最適設計に関する検討
3. 学会等名 日本シミュレーション学会多次元移動通信網研究会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------