

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04389

研究課題名（和文）高損失液剤中動作ダイポールアンテナを用いた電界強度推定法の100kHz帯への拡張

研究課題名（英文）Extension of electric field intensity estimation method using dipole antenna operating in high-loss liquid to 100 kHz band

研究代表者

石井 望（Ishii, Nozomu）

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：50232236

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：電気自動車無線電力伝送用に検討されている100kHz帯において比吸収率プローブ校正を実施するため、液剤中における標準ダイポールアンテナによる電界強度推定について検討した。具体的には、可動領域を40cm×40cm×20cm以上とする実験系を構築し、コモンモード電流発生について実験的に確認した。ゲーティング技術によりコモンモード電流の影響を軽減し、送信アンテナ係数の距離特性が数値計算結果に一致することを確認した。このことにより、プローブ校正実施のための適切なアンテナ・プローブ間距離についての知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気自動車への無線電力給電を実用するにあたり、人体への電波防護に関する定量評価法を確立しなければならない。本研究では、携帯電話等の電波防護指針で利用される比吸収率という量に着目して、その評価に必要なプローブ校正法の検討を実施した。プローブ校正は、プローブ受信電界強度とそれに対する出力電圧の間の関連付けを行うことであり、本研究では、100kHz帯に特有の問題点、すなわち、コモンモード電流の影響が現れるよりも短い距離で、プローブ校正を実施可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to perform specific absorption rate probe calibration in the 100 kHz band, which is being considered for electric vehicle wireless power transmission, electric field intensity estimation using a reference dipole antenna in the tissue equivalent liquid was investigated. We constructed an experimental system in which the antenna can be moved up to 40 cm, and experimentally confirmed the distance at which the common-mode current starts to appear. The effect of the common-mode current can be reduced by gating technique, and it was confirmed that the distance characteristics of the transmit antenna factor agree with the corresponding numerical results. This fact provides insight into the appropriate antenna-to-probe distance for performing the probe calibration.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：100kHz帯 比吸収率 プローブ 標準ダイポール 校正

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 無線電力伝送 (WPT) 技術の普及のためには、その電波の安全性への懸念を払拭しなければならない。このため、電波防護指針に定められている指針値に対する適合性評価を行うことが一般的である。特に、電気自動車用無線充電において利用される周波数帯 (100kHz 帯) における比吸収率 (SAR) 評価を実現するためには、SAR プローブ校正技術を確立する必要がある。このような社会的な要請の下、本研究において 100kHz 帯における標準電界法を確立し、SAR プローブ校正の実現に寄与する。

(2) この種の標準化技術を確立する上で重要なファクタは、新しい標準化技術がこれまでに合意されている標準化技術の拡張となっていることが望ましい。研究代表者は、WPT 技術を応用したデバイスに対する適合性評価技術として、MHz 帯における SAR プローブ校正に必要な液剤中標準電界推定法について検討を行っており、この標準電界推定法を用いて SAR プローブ校正が可能であることを実験的に確認している。当然の帰結として、この MHz 帯における標準電界推定法を 100 kHz 帯へ拡張することを着想した。

(3) 予備実験の段階で、5 MHz と 10 MHz の $|S_{21}|$ の距離特性を比較すると、ほぼレベルに変化がないという結果が得られた。すなわち、周波数に対してスケール不変モデルが成り立つ領域が存在することをわかった。この領域はダイポールからの電界が距離の逆 3 乗に比例する領域に対応しており、特に導電媒質では、電界が周波数に関係ない距離特性を示す。このことから、原理的には MHz 帯で使用した実験室内に容易に設置可能な水槽内で、100 kHz 帯における微小ダイポールアンテナによる標準電界を推定できると判断した。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、前述の予測を実験的に確認し、100kHz 帯において液剤中での平均電界強度推定を行う上で問題となりうる事項について検討し、対策を講じることである。

(2) 学術的独自性と創造性は、導電媒質において、アンテナの極近傍では、100kHz 帯～MHz 帯の周波数において、電磁界の振る舞いが周波数に依存せず、同じ媒質、同じアンテナを利用すれば、距離特性が同一であるという事実に着目し、MHz 帯と同じ実験系で平均電界強度推定を実施する点である。

(3) 本研究の到達目標は以下のとおりである。

- (A) 100kHz 帯における食塩水中での標準ダイポールアンテナの送信アンテナ係数評価
- (B) 100kHz 帯における食塩水中での動作する標準ダイポールアンテナの実現・改良
- (C) 上記送信アンテナ係数評価が適正に実現可能となる距離の確定とその理由付け

3. 研究の方法

設定された到達目標(A)～(C)を達成すべく、以下の項目を実施した。

- (1) 電動ステージにより、アンテナ可動領域を 350mm 以上とする実験系を構築した。〔目標(A)〕
- (2) 長さ 25 mm および 100 mm のシース付ダイポールアンテナを試作した。〔目標(B)〕
- (3) モーメント法を利用して、0.074 mol/l 濃度食塩水内、100 kHz 帯におけるシース付ダイポールアンテナに関する電界強度および伝送係数 S_{21} の大きさの距離特性を計算した。〔目標(A)〕
- (4) ネットワークアナライザを用いて、0.074 mol/l 濃度食塩水内、100 kHz 帯におけるシース付ダイポールアンテナに関する伝送係数 S_{21} の大きさおよび送信アンテナ係数の距離特性を測定した。〔目標(A)〕
- (5) シース付折り返しダイポールアンテナの試作を行い、アンテナ間の伝送係数測定を実施した。〔目標(A), (B)〕
- (6) 被膜あり／なしの 1 点給電シールドループアンテナの試作を行い、アンテナ間の伝送係数測定を実施した。〔目標(A), (B)〕
- (7) 送信アンテナ係数を得るためには直接波のみが必要である。このため、直接波以外の成分、例えば、ラテラル波およびコモンモード電流の発生の有無を調べ、対策を検討した。〔目標(C)〕
- (8) ラテラル波の発生を分析するために、空気・食塩水 2 層の境界値問題の理論解について検討した。〔目標(C)〕
- (9) プローブ校正係数には不確かさを付す必要があるため、本平均電界強度推定における不確かさの要因の評価を行った。〔目標(C)〕

4. 研究成果

(1) 図 1 に示す実験系を構築し、組織等価液剤 (0.074 mol/l 食塩水) を満たした水槽内にアンテナを挿入し、その間の伝送特性 S_{21} の大きさの距離特性をベクトルネットワークアナライザ (VNA) で測定する。アンテナはシース付ダイポールアンテナであり、その長さは 25 mm と 100 mm である。ダイポールの向きは水面に平行、垂直の 2 通りの測定を実施したが、本報告では水平対向の結果のみを載せる。シース付ダイポールアンテナは、2 本のセミリジッドケーブルで平衡給電されており、180° 位相差を確保するために 180° ハイブリッド結合器を使用している。水槽のサイズは、900 mm × 445 mm × 450 mm であり、液剤は水槽底面から 300 mm まで満たす。周波数は 50 kHz ~ 200.05 MHz までの 6 点としている。図 2 (a) と (b) に、水平対向、ダイポール長 25 mm と 100 mm の場合の S_{21} の大きさの距離特性を示す。ダイポール長 25 mm では、周波数が低いほど、短い距離で S_{21} の大きさのレベルが一定になる傾向があることがわかる。これに対して、ダイポール長 100 mm では、200.05 MHz を除いて、 S_{21} の大きさの距離特性が類似することがわかる。このように、周波数が低く、アンテナ長が短いときに、 S_{21} の距離特性は理論曲線から逸脱することがわかる。

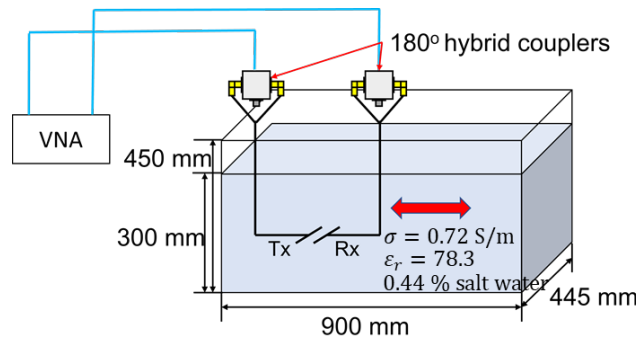
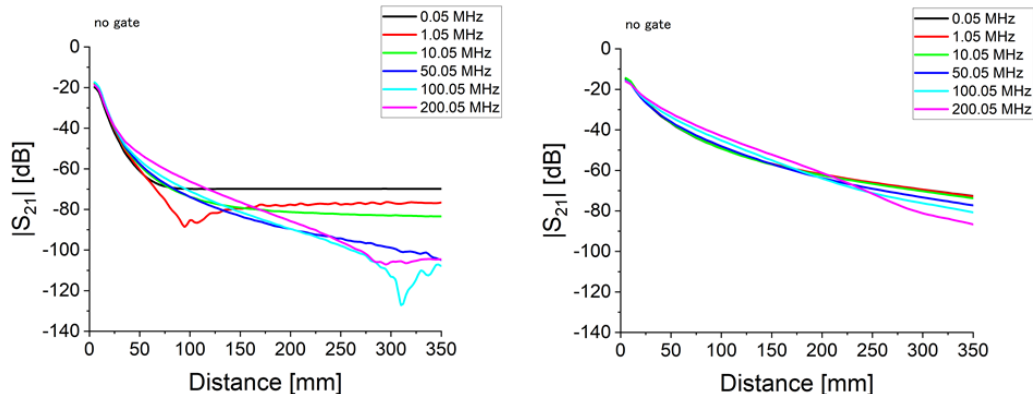


図 1 実験系の概略

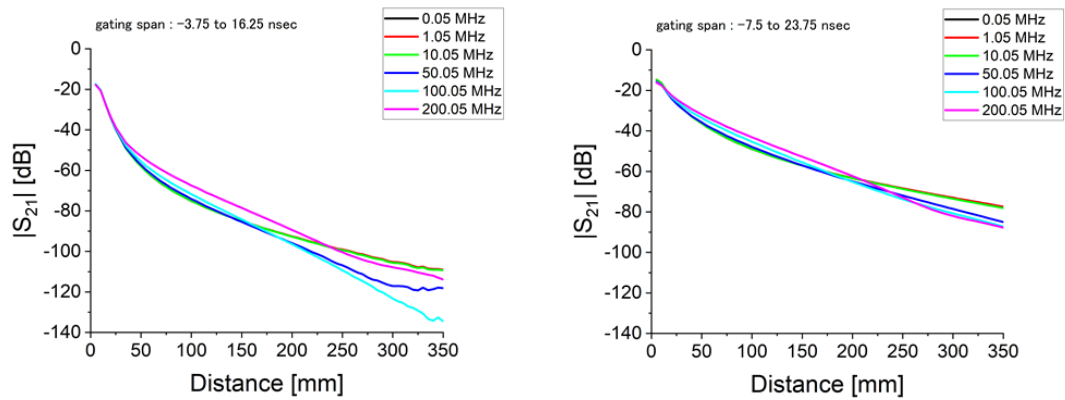


(a) ダイポール長 25 mm

(b) ダイポール長 100 mm

図 2 水平対向における伝送特性の大きさ $|S_{21}|$ の距離特性 (ゲーティング前)

(2) S_{21} の距離特性が理想的な曲線から逸脱する理由としては、送信アンテナから水面に鉛直上方向に伝搬し、その後、水面を伝わり、受信アンテナの直上の水面から受信アンテナに鉛直下方向に伝搬するラテラル波 (アップアンドダウン波) が存在すること、もしくは、給電ケーブルにコモンモード電流が流れることが想定される。ラテラル波の経路のうち、水面経路を金属板で遮ったときに S_{21} のレベルが変動しなかったことから、逸脱の理由はコモンモード電流の影響であると特定した。コモンモードであれば、ケーブルの外導体上での多重反射が原因であることが想定される。50 kHz の周波数でフェライトの電流吸収動作が見込めないことから、ケーブルへのフェライトビーズ装荷はコモンモード除去には利用できない。本研究では、測定された S_{21} をタイムドメインに変換し、ゲーティング関数を乗じることで、時間的に繰り返し波としてみえるインパルス応答のうち、最初のパルスのみを取り出す操作を行い、周波数領域に戻した。このことにより、コモンモードによる多重反射を軽減した。その結果を図 3 に示す。図 3(a) からわかるように、ダイポール長が 25 mm の場合は、途中で距離特性の傾きが大きく緩やかになっていた現象が解消され、理想的な曲線が得られていると考えられる。図 3(b) のダイポール長 100 mm の場合は、そもそも距離特性の傾きが途中で大きく変化していないため、ゲーティング前後で距離特性に差異はほぼ観測されない。



(a) ダイポール長 25 mm (b) ダイポール長 100 mm
 図 3 水平対向における伝送特性の大きさ $|S_{21}|$ の距離特性 (ゲーティング後)

(3) (2)での考察をモーメント法によるシミュレーション結果と比較して検討する。図 4 は、ダイポール長 25 mm、50 kHz における水平対向時の伝送特性 S_{21} の大きさの距離特性の比較である。ゲーティング後の結果が、ほぼモーメント法による計算結果に類似していることがわかる。ここで、完全に一致していないことがポイントである。つまり、ゲーティング技術により、コモンモードの多重反射を完全に消し去ることはできない。なぜならば、ゲーティングで残した最初のパルス (の時間範囲) にも多重反射が少なからず影響するためである。このため、ゲーティングでコモンモードが除去できるからといって、もともとコモンモードの影響が強かった距離で S_{21} に基づくプローブ校正を行うと、コモンモードに関わる不確かさが大きく寄与することを考慮しなければならない。すなわち、ゲーティングなしでコモンモードの影響がない距離範囲での校正が必要とされる。なお、ダイナミックレンジが十分確保できるのであれば、EO/OE 変換を利用してケーブルの一部を光ファイバに置き換え、コモンモードの影響を抑圧することも可能であると考えられる。光ファイバを利用したコモンモード軽減については今後の課題としたい。

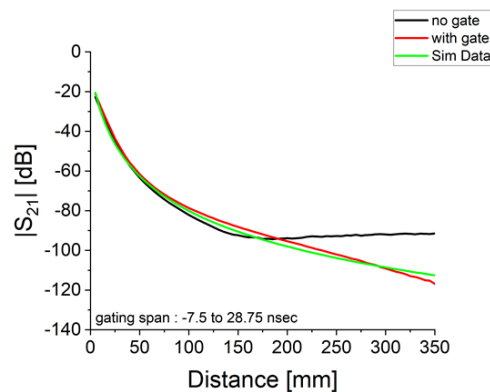


図 4 ダイポール長 25mm、50kHz における水平対向時の伝送特性の大きさ $|S_{21}|$ の距離特性の比較

(4) シース付折り返しダイポールアンテナの試作を行い、その送信アンテナ係数の測定を実施した。50 kHz の場合、アンテナの反射特性 S_{11} , S_{22} の大きさが極めて 1 に近く、アンテナ整合を取ることが難しいことが判明した。 $|S_{21}|$ の距離特性について、シース付ダイポールアンテナに比べて、全体的にレベルが低くなり、測定できる距離範囲が限られてしまうという問題が生じた。ダイポールに比べて構造がやや複雑になるうえ、反射特性、伝送特性ともダイポールに劣り、食塩水を介しての弱結合のために折り返し効果を期待できないことから、標準アンテナとしてシース付ダイポールアンテナを利用することとした。

(5) 1 点給電シルデッドループアンテナによるプローブ校正の可能性を検討するため、ループ被膜状態を 3 通りに変化させて、100 MHz 帯における 0.074 mol/l 濃度食塩水内における同ループアンテナ間の伝送係数 S_{21} および送信ループアンテナ係数の距離特性の測定を実施した。その結果、被膜の有無が距離特性に影響を及ぼさないことを確認できた。

(6) ラテラル波の発生を分析するために、大気・食塩水 2 層の境界値問題について、電磁界をスペクトル積分にて表現し、その評価を行った。その結果、Bessel 関数の零点に着目する二重指数関数型積分公式を利用することにより、高速かつ精度よく積分が評価できることを確認した。

(7) 送信アンテナ係数推定に係る不確かさ評価を実施し、結論として、100 kHz 帯において、コモンモード電流の寄与が大きくない限り、拡張不確かさで 4 % 以内に収まることを確認した。送信アンテナ係数推定に係る不確かさの要因としては、アンテナの位置、長さ、液剤の導電率、比誘電率実部、 S_{11} 、 S_{22} 、 S_{21} に加えて、コモンモード電流の発生が挙げられる。コモンモード電流の発生を除く不確かさ要因に係る公差 (tolerance) はモンテカルロシミュレーション (MCS, 5000 回試行) およびネットワークアナライザの不確かさ計算シート (測定器メーカー Web サイトよりダウンロード) により評価した。コモンモード電流発生に係る公差は、不確かさを評価するアンテナ間距離において、ゲーティング前後の S_{21} の大きさの dB 差より算出する。ゲーティング前後で S_{21} の大きさのレベルが全体的に変動することがあるので、アンテナ間最小距離において S_{21} の大きさのレベルが一致するように補正を行う。表 1 に、50 kHz におけるコモンモード電流に起因する標準不確かさの評価例を示す。アンテナ長 100 mm の場合にはコモンモード電流に起因する不確かさは無視できるが、アンテナ 25 mm の場合には 3 % 程度の標準不確かさが生じるため、送信アンテナ係数推定全体の不確かさへの寄与が無視できない。

表 1 水平対向時、アンテナ間距離 50 mm および 70 mm におけるコモンモード電流に起因する標準不確かさ (周波数: 50 kHz)

アンテナ長	アンテナ間距離	
	50 mm	70 mm
25 mm	3.1 %	3.3 %
100 mm	0.04 %	0.31 %

表 2 および表 3 に、水平対向時、アンテナ距離 50 mm として、アンテナ長 25 mm および 100 mm における送信アンテナ係数の不確かさバジェットを示す。周波数は 50 kHz である。アンテナ長 25 mm および 100 mm に共通して、液剤導電率および $|S_{21}|$ による不確かさの寄与が大きい。液剤導電率の寄与が大きいのは 50 kHz において液剤中で電界が導電率に反比例するためである。 $|S_{21}|$ の公差が大きいのは、減衰が大きい媒質中での $|S_{21}|$ 測定では、 $|S_{21}|$ のレベルが小さいためである。また、アンテナ長 25 mm の場合はアンテナ 100 mm の場合に比べて、コモンモード発生に係る不確かさの増大分だけ、送信アンテナ係数の不確かさが増える。ひとたびコモンモードが発生すると、コモンモード発生による不確かさが全体の不確かさを支配する傾向にある。このことから、コモンモードが発生しないようなアンテナ長、アンテナ距離を選んで送信アンテナ係数の推定、すなわち、アンテナからの平均電界強度の推定を行うことが必要である。

表 2 水平対向時、アンテナ長 25 mm、アンテナ間距離 50 mm における送信アンテナ係数の不確かさバジェット (周波数: 50 kHz)

不確かさ要因	公差[%]	分布	除数	感度係数	標準不確かさ[%]	備考
アンテナ距離	0.7	矩形	1.73	-	0.45	MCS, $N = 5000$
アンテナ長	0.5	矩形	1.73	-	0.11	MCS, $N = 5000$
液剤導電率	1.2	正規	2.00	-	1.2	MCS, $N = 5000$
液剤誘電率	30	正規	2.00	-	0.0	MCS, $N = 5000$
コモンモード	9.4	矩形	1.73	-	3.1	MCS, $N = 5000$
$ S_{21} $	5.7	矩形	1.73	1.00	3.3	$ S_{21} = -61.0$ dB
$ S_{11} $	7.0	矩形	1.73	0.011	0.043	$ S_{11} = -19.7$ dB
$ S_{22} $	6.4	矩形	1.73	0.014	0.050	$ S_{22} = -18.8$ dB
合成標準不確かさ					4.7	
拡張不確かさ ($k = 2$)					9.4	

表 3 水平対向時、アンテナ長 100 mm、アンテナ間距離 50 mm における送信アンテナ係数の不確かさバジェット (周波数: 50 kHz)

不確かさ要因	公差[%]	分布	除数	感度係数	標準不確かさ[%]	備考
アンテナ距離	0.7	矩形	1.73	-	0.45	MCS, $N = 5000$
アンテナ長	0.5	矩形	1.73	-	0.11	MCS, $N = 5000$
液剤導電率	1.2	正規	2.00	-	1.2	MCS, $N = 5000$
液剤誘電率	30	正規	2.00	-	0.0	MCS, $N = 5000$
コモンモード	3.4	矩形	1.73	-	0.04	MCS, $N = 5000$
$ S_{21} $	1.9	矩形	1.73	1.00	1.1	$ S_{21} = -36.6$ dB
$ S_{11} $	3.4	矩形	1.73	0.18	0.35	$ S_{11} = -8.3$ dB
$ S_{22} $	3.4	矩形	1.73	0.18	0.35	$ S_{22} = -8.2$ dB
合成標準不確かさ					1.8	
拡張不確かさ ($k = 2$)					3.6	

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 増田 力, 石井 望, チャカロタイ ジェドヴィスノブ, 清水 悠斗, 和氣 加奈子, 渡辺 聡一
2. 発表標題 長尺水槽を用いたkHz帯組織等価液剤中における送受信アンテナ間の伝送特性測定に関する検討
3. 学会等名 無線端末・アンテナシステム測定技術研究会資料
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井 望, 坂井 洸太
2. 発表標題 海中疑似スケールモデルにおけるシールドドループアンテナ間の伝送特性の距離依存性
3. 学会等名 2020信学ソ大（通信）, B-1-119, p.119, オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田 力, 石井 望, チャカロタイ ジェドヴィスノブ, 清水 悠斗, 和氣 加奈子, 渡辺 聡一
2. 発表標題 長尺水槽を用いたkHz帯組織等価液剤中における基準アンテナの送信アンテナ係数の測定
3. 学会等名 B-1-120, p.120, オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田 力, 石井 望, チャカロタイジェドヴィスノブ, 清水悠斗, 和氣加奈子, 渡辺聡一
2. 発表標題 Mixed-mode Sパラメータ測定に基づく長尺水槽を用いたkHz帯組織等価液剤中における基準アンテナの送信アンテナ係数の評価
3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, 3E-4, p.84, オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井 望, 高橋 応明, 陳 強, 吉田 弘
2. 発表標題 浅海海中位置推定に特化した電界数値積分の高速化について
3. 学会等名 信学技報 AP2020-84, pp.60-65, オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Riki Masuda, Nozomu Ishii, Yuto Shimizu, Jerdvisanop Chakarothai, Kanako Wake, and Soichi Watanabe
2. 発表標題 Distance Dependence of Transmission Characteristics Between Small Dipole Antennas in Tissue Equivalent Liquid Operated in kHz Band
3. 学会等名 Proceedings of ISAP2020, 3B2-1, pp.401-402, Osaka, Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井 望, 清水 悠斗, チャカロタイ ジェドウィスノブ, 和氣 加奈子, 渡辺 聡一
2. 発表標題 食塩水内でのダイポールアンテナ間の伝送測定における不平衡電流の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線端末・アンテナシステム測定技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井 望, チャカロタイ ジェドウィスノブ, 清水 悠斗, 和氣 加奈子, 渡辺 聡一
2. 発表標題 GHz帯組織等価液剤中シース付ダイポールアンテナの送信アンテナ係数の距離特性
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020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
---------	---------