

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04589

研究課題名（和文）スーパー台風通過時の飛散物拡散に着目した都市域での長時間停電リスク評価

研究課題名（英文）Risk of long term power outage in urban areas due to wind-borne debris during super typhoon

研究代表者

友清 衣利子 (Tomokiyo, Eriko)

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・教授

研究者番号：30346829

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）：強風による構造物被害では、風力による被害だけでなく破損した断片等が飛散物となって被害が連鎖して拡大する。本研究では飛散物の絡みつきによる電線への影響を検証した。飛散物が構造物に付着すると、強風作用面積が増えて構造物にかかる力は増大する。付着物の絡みついたケーブル張力を計測したところ、付着物の重量は張力の増大に強く影響し、付着物の瞬間的な変形は張力変動に影響を及ぼした。風圧による平均的な張力増大に加えて、風速変動と付着物の挙動が張力の変動に影響を与えることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、強風下でのケーブル張力の変動に及ぼす付着物の影響を検証した。飛来物の付着による構造物への影響を定量的に把握することは被害拡大の要因分析の一助となる。もって、大規模停電を引き起こした強風被害要因の究明に資する情報が提供できる。近年の台風による広域での長期間停電原因の一つに、飛来物による設備の損傷が挙げられており、飛散物が付着した送配電設備の挙動が分れば、飛散物被害の低減対策を検討し、都市部での停電や断水、さらには通信遮断等の重要インフラの機能不全リスクの低減が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In the case of structural damage caused by strong winds, not only damage due to wind force but also damaged fragments and other flying debris can cause a chain of damage that can expand. In this study, the effect of entanglement of flying debris on electric wires was examined. When flying debris adheres to a structure, the area subjected to strong winds increases, and the force on the structure increases. Measurements of cable tension due to entanglement of attached objects showed that the weight of the attached objects had a strong influence on the increase in tension, and the instantaneous deformation of the attached objects affected the tension fluctuation. In addition to the average tension increase due to wind pressure, wind speed fluctuations and the behavior of the adhesions were found to affect the tension fluctuations.

研究分野：風工学

キーワード：飛散物 張力変動 強風被害

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

強風による構造物被害では、風力そのものによる被害だけでなく破損した断片等が飛散物となって被害が連鎖して拡大する。2018年台風21号では、大阪都市部の高層ビルの上層でも飛散物による被害が生じたほか、住宅街では、比較的耐風性能が良い住宅でも飛散物被害が拡大した。強風による飛散物の隣接構造物への衝突は都市部での被害を拡大させるが、1次被害が発生するような高風速場が長時間継続することと、飛散物が衝突する範囲に住宅や配電柱のような構造物が密集していることが、さらなる被害拡大の条件となる。スーパー台風の都市部襲来は、この2つの条件を満たしている。

耐風設計では、風洞実験等に基づく風力係数と地域別の設計風速によって風荷重が定められる。風洞実験では、風速変動が比較的小さな風況下で、建物単独での風力や風圧計測が行われるのが一般的で、建物が密集した都市域での複雑な風況は地表面粗度係数以外では設計に考慮されていない。一方、風速変動の小さな風況下での飛散物の挙動は実験や数値解析を用いて導かれており、さらに大きな風速変化が飛散物の飛散範囲を広げることは、指摘されている。都市部で発生する飛散物の振る舞いを把握するためには、建物が密集した領域での複雑な風況に着目する必要があり、刻一刻と変化する風況が飛散物の挙動に影響を及ぼすと考えられるが、その詳細は明らかではない。

球状や板状の飛散物の挙動や衝撃力は数値解析によって検討されており、風洞実験によって木材や鉄球等の塊状の飛散物が衝突した際の構造物の被害形態は検討されているが、実際には金属屋根葺き材や農業用ハウスのポリ塩化ビニールシートなどのシート状の物体が飛散することも多い。しかし、シート状の飛散物の挙動を数値解析で追うことは非常に難しく、実験的な検証が必要となり、シート状の飛散物による構造物への影響はほとんど検討されていない。都市部での長期間の停電を引き起こす配電柱などの電力設備の損壊要因の一つに飛散物が挙げられている10)が、具体的な状況は明らかではない。電線の切断だけでなくシートまたは板状の飛散物が絡みつくことによる風力増大での損壊が考えられているが、簡易なモデルでの計算しか行われておらず、絡みついた飛来物の動揺の影響などは検討されていない。

本研究では、以下の問に答えることで、強風下での被害連鎖の低減方法を探る。

- ・長時間継続する高風速下での飛散物被害はどのような状況で拡大するのか。
- ・構造物密集地域の複雑な風況の中で、板またはシート状飛散物はどのように振る舞うのか。
- ・飛散物付着による風力増大や付着物の動揺は構造物損傷にどのような影響を与えるのか。

### 2. 研究の目的

強風が長時間継続し、風速や風向の変動が大きな都市域の風況下での、シート状飛散物の発生状況と飛散挙動を明らかにし、飛散物の衝突や絡みつきによる構造物破損への影響を検証することで、特に配電設備等の電力インフラに対する飛散物による2次被害リスクを評価し、被害連鎖の低減と防止対策の基礎資料の提供を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)文献調査と被害調査による被害実態の把握、(2)被害実態に基づく構造物の耐力評価、(3)風洞実験による飛散物の挙動検証を行った。

(1)文献および現地被害調査をもとに飛散物被害実態を把握した。特にシート状飛散物の飛散および構造物への付着状況をこれまでの撮影画像を用いて整理した。

(2)シートまたは板状飛散物の被害実態に基づいて物体が付着した構造物のモデルを構築し、構造物の静的構造計算を実施した。

(3)風洞設備の構築を行い、風洞内風況を確認したのち、ハイスピードカメラ撮影を用いて板やシート状の可撓性飛散物の強風下での挙動を把握した。

### 4. 研究成果

#### (1) 飛散物被害実態の把握

著者らは、文献1)で竜巻による飛来物の形状や種類を地域の土地利用状況とともに述べた。住宅地などの密集地に配された配電柱および配電線には、金属屋根の一部や農業用ビニールシート、網戸など周辺構造物からの飛来物が多く衝突したり付着したりしていた。写真1と2にその様子を示す。いずれの電柱も倒壊はしていないが、竜巻通過後も飛来物は付着したままで、衝突するだけでなく、長時間にわたって風作用面積の増加をもたらすと考えられる。

#### (2) 静的構造計算による荷重の検証

規格が定められており、破壊荷重等が明瞭である配電柱に着目して静的構造解析を行った。強風下での電柱や標識の損壊状態から、作用風速を算定した報告は複数あり、それらを参考に一般的な配電柱をモデル化した。配電柱および送電線の寸法を図1に示す。簡単のため、柱を支える支線はなく、広告板や変圧器等の付属物もないとする。また、飛来物付着による風荷重の変化を算定するため、飛来物も同時にモデル化する。本報では、写真1に丸で示す網戸の付着状態を図2のようにモデル化した。飛来物①付着モデルとする。電線にシート状の飛来物が巻き付いた



写真1 電線と電柱への飛来物の付着



写真2 電線へのシート状飛来物の付着

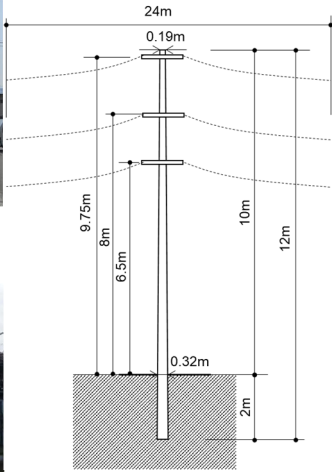


図1 電柱モデルの寸法 (ケースAとB)

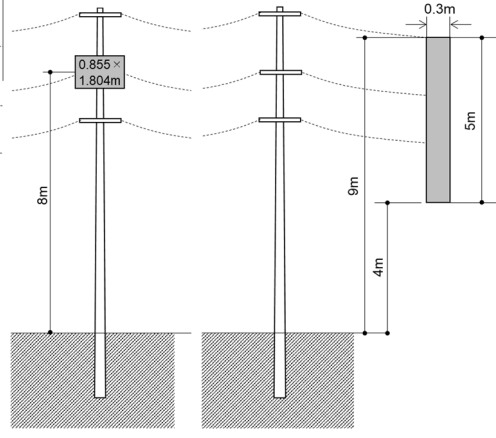


図2 飛来物①の寸法 (ケースC)

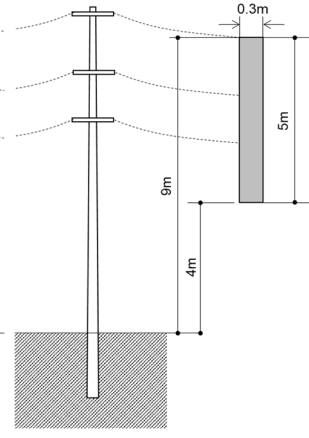


図3 飛来物②の寸法 (ケースD)

写真2に示すような事例は図3のようにモデル化した。飛来物②付着モデルとする。実際には、付着位置や付着時の形状によって配電柱の倒壊に影響を与える転倒モーメントは異なると考えられるが、ここでは最も簡易なモデルを用い、ケースA：電柱単体、ケースB：電線を考慮した電柱、ケースC：電柱に飛来物が付着、ケースD：電線に飛来物が付着の4ケースに対して、転倒モーメントおよび破壊荷重に至る時の風速値を求めた。

文献2), 3)に基づき、単柱式で支線がない電柱の強度計算式をもとめ、転倒モーメントと破壊荷重を求めた。一方で、風荷重強度は、式(1)で表される。

$$K_3 = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{d3}, \quad K_4 = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{d4} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は空気密度  $1.23\text{kg/m}^3$ 、抗力係数は電柱に対して  $C_{d1} = 0.8$ 、電線に対して  $C_{d1} = 1.0$  とした。写真2の電柱に作用した風速は  $V = 55\text{m/s}$  と推定した<sup>1)</sup>。

飛来物が付着している場合には、飛来物にかかる転倒モーメントを考慮した式(2)を用いる。

$$M_t = K_1 \frac{(2D_1 + D_0)H^2}{6} + K_2 S \sum dh + K_3 Ah' + K_4 \frac{B(H_t^2 - H_b^2)}{2} \quad (2)$$

飛来物①と②にかかる風荷重強度は式(3)で求める。

$$K_3 = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{d3}, \quad K_4 = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{d4} \quad (3)$$

ここで、 $A$  は飛来物①の面積、 $h'$  は電柱への飛来物①の付着高さで、 $B$  は飛来物②の幅、 $H_t$  は飛来物②の上端高さ、 $H_b$  は飛来物②の下端高さとする。飛来物①および②の抗力係数は  $C_{d3} = C_{d4} = 1.2$  とする。

図4に風速  $55\text{m/s}$  の場合のそれぞれの解析ケースでの基部の転倒モーメントを比較する。図中の破線は抵抗モーメントの値を示す。電柱単体での転倒モーメントは小さいが、電線を考慮すると転倒モーメントは増大する。飛来物付着の影響も大きく、それぞれ転倒モーメントが増大する。また、実際には飛来物が電線に付着するケースでは片側の電線に重量がかかり、電柱の左右に不均等な張力が生じると考えられる。一般に電線張力は左右で釣り合うように設計が行われることから、不均等張力は倒壊の一要因となる。

図5に破壊荷重到達時の風速をまとめた。電柱単体であれば、平均風速  $100\text{m/s}$  を超える強風でも破壊に至らないと考えられるが、飛来物が付着するケースでは、風速  $60\text{m/s}$  程度で破壊に

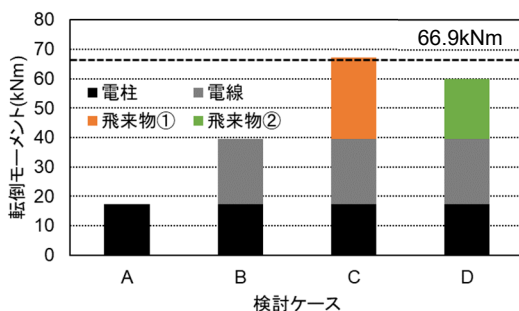


図4 転倒モーメントの比較

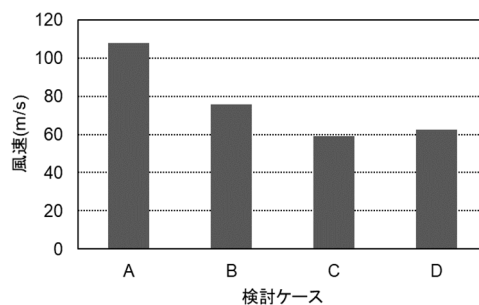


図5 破壊荷重時の推定風速

たる可能性がある。

上述したように、電線に飛来物が付着した場合、左右の配電線張力が不均等になると考えられる。電線に飛来物が付着すると、下向きにかかる重量が増大し、水平方向の不均等な張力が生じる。実際には強風による風荷重に加えて、電線張力が不均等にかかることから、電柱がねじれる向きに力が生じ、転倒モーメントとねじれモーメントを考慮した検討を行う必要があると考えられる。

(3) 風洞実験による飛散物挙動と張力の確認

1) 実験設備と計測装置

工業用ファンを使用して著者らが自作した風洞設備とひずみゲージを用いた簡易型の張力計を使って、ケーブルの張力を測定した。写真3に風洞全景を示す。図6に風洞流出面の25か所で計測した5秒間の平均風速と乱れの強さを示すが、平均風速は断面内ではほぼ一様となり、乱れの強さは1%以下であった。本風洞はファンの出力を変化させることで、最大で平均風速約16m/sを発生させることができる。

本実験では流出面から50mm風上側の断面中央にケーブルを設置した(写真4)。ケーブルは一端をピン支持になるように固定し、他端を金属板に接続した。金属板の両面にひずみゲージを貼付し、金属板のひずみを測定する。ケーブルには直径0.36mmのワイヤ(より線)を用いた。ワイヤ単体では単位重量と受風面積が微小で張力に有意な差が生じないため、本田らの実験<sup>4)</sup>を参考にワイヤを直径5mmのシリコン製チューブに通して設置することで単位重量と受風面積を増大させた。文献<sup>4)</sup>を参考に、ワイヤはサグ比0.078となるように設置した。ワイヤの支持点高さからの弛度(たるみ)は35mmとなる。付着物として、金属板を想定した市販のアルミ箔(厚さ0.011mm)と農業ハウス用のシートを想定したポリエチレンシート(厚さ0.01mmと0.02mm)を使用した。ケーブルの風下の風洞断面中央位置で簡易型熱線風速計によって実験風速を計測した。平均風速を実験パラメータとする。平均張力は静ひずみ計による平均出力値を読み取り、荷重-ひずみ関係をもとに荷重に換算した。

パラメータとした風速は、6m/s,8m/s,10m/sの3ケースで、徐々に風速を増大させる場合と低減させる場合で張力計測を行った。付着物は前述のようにアルミ箔とポリエチレンシートの2種類とし、その大きさをパラメータとする。

2) 風速変化によるケーブル張力への影響

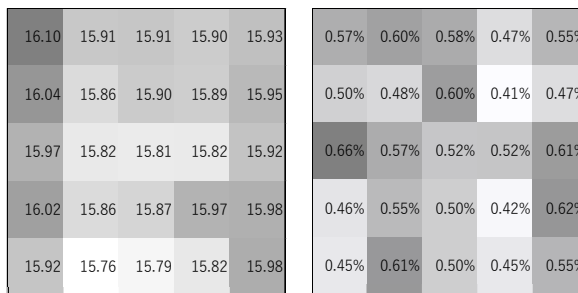
基準となる無風時のケーブル張力平均値を放物線式による数値計算で求めた。ここで、ワイヤ単体の重量は0.31gf、シリコンチューブ重量は6.48gfである。弛度35mmとすると初期の平均張力は0.107Nであった。

写真5に実験の様子を示す。強風に流されてケーブルが傾き、張力が増大した。図7に付着物なしの場合での平均風速と平均張力との関係を示す。同条件での実験を2回行った。計算による初期張力0.107Nに対し、実験の初期値はやや大きく0.126Nである。風速を徐々に増加させると、風速値の増大に伴って張力はおおむね風速の2乗に比例して増大し、風速10m/sで0.185Nになった。

図8にアルミ箔片をケーブル中央部にぶら下げた場合での平均張力の違いを示す。付着物が微小なため、大きな差は生じなかったが、付着物が大きくなると平均張力が大きくなった。有風化では付着物なしの場合に比べて、付着物がある場合に平均張力が小さくなる傾向があるが、そ



写真3 風洞装置の全景



(a) 5秒平均風速(m/s)

(b) 乱れの強さ

図6 風洞流出面での風速と乱れの強さの分布

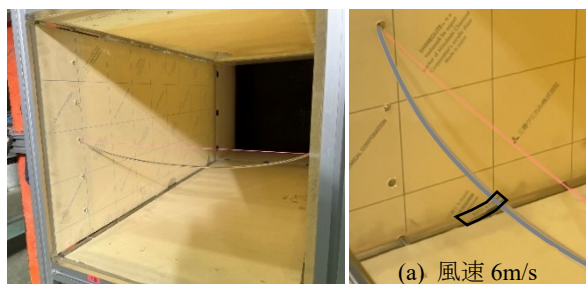


写真4 ワイヤ設置状態

写真5 アルミ箔片の強風下での挙動

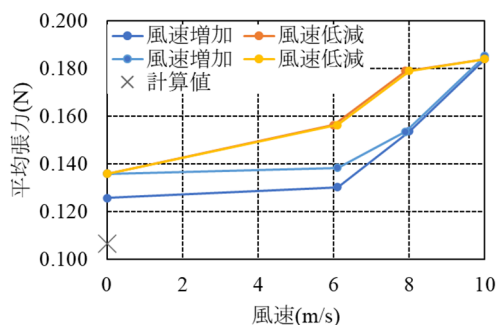


図7 風速と平均張力との関係 (付着物なし)

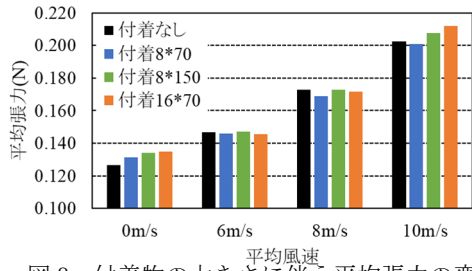


図8 付着物の大きさに伴う平均張力の変化 (アルミ箔片の場合)

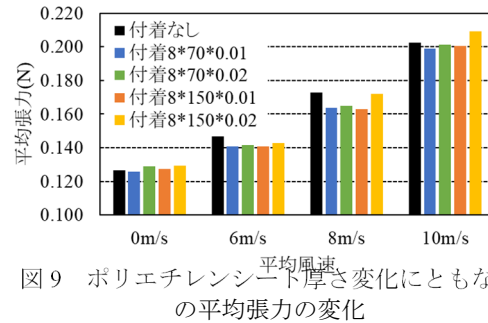


図9 ポリエチレンシート厚さ変化にともなうの平均張力の変化

の要因は不明である。写真5にアルミ箔片を付着させた場合の実験の様子を示す。無風状態では下向きに垂れ下がるが、6m/sや8m/sでは風の流れ方向に傾き、風速10m/sに達すると、付着物が大きくばたつき始めた。

図9にポリエチレンシートをケーブルにぶら下げた場合の平均張力の差を示す。アポリエチレンシートの厚みを変化させた場合、厚さが変化することで付着物重量が変化し、平均張力も増大している。付着物8mm×150mm×0.02mmの場合は特に風速の増大に伴う平均張力の増大が顕著であった。

前述のように、平均張力は主に付着物の重量で変化した。強風下での付着物の挙動は素材や大きさ、風速によって大きく異なった。風速や付着物の差異は変動張力に表れると考えられる。前述の平均張力計測実験とは条件がやや異なるが、ひずみゲージ貼付の簡易張力計で変動張力の計測を試みた。変動張力計測実験で使用したワイヤはφ0.36mm、シリコンチューブはφ4mmである。ひずみゲージの出力(電圧値)を30秒間記録した。サンプリング周波数は200Hzである。図10に風速ごとに張力の変動係数を比較する。風速の増大に伴って変動係数は小さくなり、付着物がつくとその変動係数は大きくなった。

### 3) ケーブル付着物の挙動の確認

2台のカメラで付着物の動画を撮影し、画像処理をして付着物の動きを数値化する方法を検討した。動画を処理し、付着物の先端部分の動きを把握するため、付着物に蛍光塗料を塗布し、画像の二値化を試みた。(写真6)先端部の重心の動きを図11に示す。リサーチを描くことができた。また、風洞内風速を変化させ、先端部の座標の変動を求めたところ、低風速の方が付着物先端の変動係数が大きくなった。また、ケーブル張力と付着物先端の重心の変動との間には対応関係が見られた。

### (4) 成果のまとめ

本研究では、強風下で生じる飛来物の付着が構造物に及ぼす影響を検討するため、電柱を事例として風作用面の増大および付着物重量の増大の点から、作用する荷重の変化を推定した。飛来物の付着による風作用面積の増大によって、電柱の転倒モーメントは大きく増大した。破壊荷重に至る転倒モーメントが生じる風速を検討したところ、飛来物が付着することで、比較的低風速で破壊に至る可能性があり、飛来物の付着や絡みつきが構造物の破損に大きな影響を与えることが分かった。

また、風洞実験によって付着物がついたケーブルの張力計測を行った。付着物の重量の増加に伴い、ケーブルの平均張力が増大した。また、付着物の有無でケーブルの張力変動を比較したところ、付着物があると強風下での付着物の挙動によって、張力の変動係数が大きくなることが分かった。

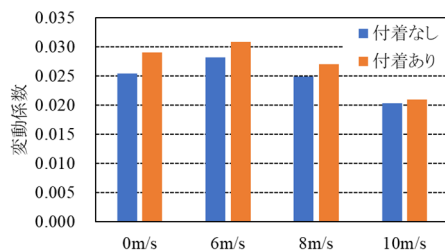


図10 付着物の有無による張力の変動係数の比較

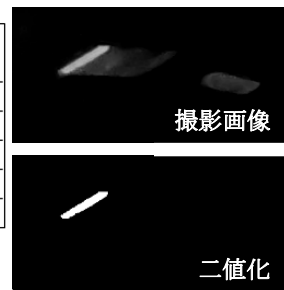


写真6 付着物の動画の例 (蛍光塗料塗布)

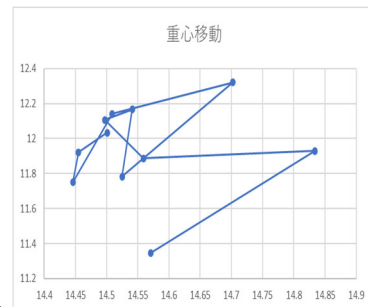


図11 付着物先端の重心移動の変化

### 参考文献

- 1) 代表・前田潤滋, 平成24年5月6日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズムと被害実態の総合調査, 平成24年度文部科学省科学研究費補助金(特別研究促進費)研究成果報告書, 2013.
- 2) 日本電気協会: 配電規程 JEAC7001-1999, 2000.
- 3) JISA5373:プレキャストプレストレストコンクリート製品, 2016.
- 4) 本田誠他: 強風時における送電線不平均張力の基本特性に関する研究(その2)一静的風荷重における不平均長禄測定実験一, 日本建築学会九州支部研究発表会, pp.253-256, 2001.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 友清衣利子
2. 発表標題 風洞実験に基づくケーブル張力変動に及ぼす飛来物付着の影響
3. 学会等名 2022年度 第62回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 友清衣利子
2. 発表標題 電柱の風荷重増大に及ぼす飛来物付着の影響
3. 学会等名 2021年度第61回日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2022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
---------	---------