

令和 3 年 4 月 26 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04563

研究課題名（和文）種々のメッシュ層導入による炭素繊維複合材の層間特性モディファイ

研究課題名（英文）Modifying the Interlaminar Properties of Carbon Fibre Composites by Introducing a Variety of Mesh Layers

研究代表者

中谷 隼人（Nakatani, Hayato）

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90584417

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）：CFRP（炭素繊維強化プラスチック）積層板にメッシュ構造を導入し層間メッシュ層とすることで、特定の部位の層間特性を選択的かつ簡単にモディファイし、材料または構造全体の損傷許容性を改善する独自の技術に取り組んだ。層間メッシュ層の導入により層間破壊靱性が約2.8倍程度まで増加することを示し、このメカニズムをX線CT等で観察した複雑なき裂進展経路や層間せん断負荷における大変形能より明らかにした。さらにこの技術の適用により、破壊につながる層間はく離を抑制しつつ、CFRP積層板内部での大量の損傷蓄積が可能となることで、耐疲労性や耐衝撃性が改善することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CFRP積層板の層間にメッシュ構造を導入することで、微小き裂の発生を許容しつつ、これが材料の破壊につながる大規模な層間はく離として進展することを回避できることを示した。また、層間メッシュ層導入によって材料内で損傷を蓄積させるという独自の手法により材料・構造の耐疲労性・耐衝撃性の改善にアプローチした。層間メッシュ層の導入は任意の位置の層間特性を改善またはモディファイでき、CFRP積層板の特定の損傷発生限からの損傷進展の抑制を可能とする。これは複合材料を用いた構造デザインの自由度を高める画期的な技術であり、複合材料の適用拡大に大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：A unique technique that selectively and easily modifies the interlaminar properties of a specific part of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates to improve the damage tolerance of the material or the structure by introducing mesh structures as mesh interlayers was developed. The interlaminar fracture toughness of the CFRP laminates could be increased by a factor of about 2.8 by introducing the mesh interlayers, and this toughening mechanism was clarified by the complex crack propagation paths observed by X-ray CT and the large deformation capacity under interlaminar shear loading. Furthermore, the application of this technique improved fatigue resistance and impact resistance of the CFRP laminates by allowing a large amount of damage to accumulate inside the material while suppressing the delamination that leads to their fracture.

研究分野：複合材料工学

キーワード：CFRP 層間破壊靱性 層間せん断強度 き裂進展 層間はく離 メッシュ構造 疲労寿命 ファイバメタル積層材

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

CFRPをはじめとする炭素繊維複合材料は、優れた比剛性・比強度を有していることから、航空宇宙構造への適用が進んで久しく、最近では高級車だけでなく一般的な自動車の構造にも適用されつつある。一般的にはCFRP積層板として構造に適用されるが、板厚方向に配向する炭素繊維が存在せずに層間特性が劣るために層間はく離等の損傷が発生しやすいことで知られる。このことに対し、熱可塑性樹脂粒子を層間に分散させたり、ニードルなどを打ち込むことで板厚方向に炭素繊維を配向させたりすることなどによる層間高靱性化技術も開発が進むが、これらの多くは材料全体を対象としたものである。

そこで、炭素繊維の不連続部といった特定の損傷発生源からの損傷進展を抑制するために、材料・構造の全体を、例えば層間高靱性化するのではなく、必要な箇所のみで層間特性を目的に応じてモディファイする技術の実現が求められる。場所・部位ごとによって異なる要求に対して、層間特性をひとつひとつ適切なものにするすることで、構造全体の強度や寿命、損傷許容性が向上すると考えられる。

### 2. 研究の目的

複合材料積層板の力学特性は、材料内部でのき裂発生およびき裂進展に支配される。このため、き裂の発生もしくは進展を抑制する必要があるが、CFRPは比較的低応力で母材き裂といった微小なき裂が発生することで知られるため、これを防ぐことは容易ではない。よってここでは、発生したき裂が進展し、これが大規模な層間はく離となることで材料・構造の破壊につながることを回避する。そこで本研究では、高分子製または金属製の様々な形状・構造のメッシュを、特性のモディファイが必要とされるCFRP層間にのみ局所的に挿入し層間メッシュ層とすることで、層間でのき裂進展経路が複雑になるよう誘導する。これにより複合材料積層板の層間破壊靱性を向上させ、さらには耐衝撃性および損傷許容性の改善にもつながる層間特性モディファイ技術を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

はじめに、一方向強化CFRP積層板に層間メッシュ層を導入することによる層間破壊靱性の変化を、4点曲げによるENF (End Notched Flexure) 試験により評価する。また、メッシュに沿ったき裂進展をマイクロフォーカスX線CTにより観察することで、層間高靱性化のメカニズムについて考察する。挿入するメッシュの形状パラメータのうち開口率に着目し、これが層間破壊靱性とき裂進展挙動に及ぼす影響について明らかにする。層間破壊靱性以外の層間特性への層間メッシュ層導入の影響として層間せん断強度を取り上げ、これを目違い切欠き試験片に対する圧縮試験により評価する。

次に、層間メッシュ層導入による層間特性の改善が、CFRP積層板の機械的特性に及ぼす影響を実験的に評価する。まず、CFRPアングルプライ積層板に層間メッシュ層を導入し、準静的な引張負荷下での変形挙動と引張-引張疲労負荷下での疲労寿命を、詳細な損傷観察により明らかにする。さらに、挿入するメッシュを金属製としファイバメタル積層材の一種とした際の耐衝撃性を落錘衝撃試験により検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) CFRP積層板への層間メッシュ層導入による層間高靱性化とそのメカニズム

一方向Carbon/Epoxyプリプレグ (T700SC/2592, 140 $\mu$ m/ply, 東レ) と、ポリアミド (Polyamide, PA) メッシュ (線径 50 $\mu$ m, NBC メッシュテック) を積層しオートクレーブ成形した試験片 [0<sub>12</sub>/PA/0<sub>12</sub>] に対し、4ENF 試験を実施しモード II でのき裂進展における R カーブ (き裂進展抵抗曲線) を取得した (図 1)。これより、PA メッシュを用いた層間メッシュ層の導入により、これを有さない場合と比較して、き裂進展初期の層間破壊靱性値である  $G_{IIc}$  が約 1.5 倍、き裂進展過程での層間破壊靱性値である  $G_{IIr}$  が約 2.8 倍に増加した。

モデル材料として PA メッシュ (線径 130 $\mu$ m) を挿入した CFRP 積層板を用い 4ENF 試験を実施し、き裂先端付近をマイクロフォーカス X 線 CT (inspeXio SMX-90CT Plus, 島津製作所) を用いて観察した (図 2)。本研究で提案するような層間メッシュ層を導入することにより、そこでのき裂進展は PA 繊維/エポキシ界面はく離として進展すること、またその進展挙動としては、き裂の先端付近では PA 繊維の一部に沿った界面はく離が先行し、き裂の後方では PA 繊維の周方向に界面はく離がひろがることが明らかとなった。これはき裂先端の位置を明示的に決めることができないことを示しているため、R カーブの横軸として用いるき裂長さについてのいくつかの定義の仕方を検討した。

また、一定の線径 (ここでは 45 $\mu$ m) のもと、異なる開口率 (35%, 46%, 62%) のメッシュを用いた層間メッシュ層を導入した場合の層間破壊靱性値の変化も評価した (図 3)。特にき裂進展過程での層間破壊靱性値である  $G_{IIr}$  が、ある開口率でピークを示し、これを試験片端面から観察

したき裂進展面の移動回数や、マイクロフォーカス X 線 CT を用いたき裂進展面の複雑さより説明した。

層間破壊靱性以外の層間特性として層間せん断強度を取り上げ、これに層間メッシュ層の導入が及ぼす影響を目違い切欠き試験片に対する圧縮試験により評価した。試験片としては上記と同様のプリプレグを用いた $[0_{32}]$ 、PA メッシュを挿入した $[0_{16}/\text{PA mesh}/0_{16}]$ 、PA メッシュとほぼ同様の厚みの PA シートを挿入した $[0_{16}/\text{PA sheet}/0_{16}]$ の 3 種類を用いた層間メッシュ層を導入し、CFRP 層とメッシュ層の間で破壊が発生することで、層間メッシュ層を導入しない場合（つまり、CFRP 層間）と比較して、層間せん断強度は同程度ながらも、破断変位が約 1.5 倍となった（図 4）。これは、PA メッシュの空隙に含浸したエポキシ樹脂が、メッシュ構造に沿ってはく離するという複雑な破壊様相を示すためであると考えられる。一方で、PA シートを挿入した場合は層間せん断強度が約 15% 低下し、破断変位も約 25% 低下した。メッシュおよびシートどちらも同一材料であるにも関わらず、大きな変形の許容が可能となることから、層間へのメッシュ構造導入の有効性が明らかとなった。

以上より、層間メッシュ層はこれを導入する任意の位置の層間特性を改善またはモディファイすることが可能であり、CFRP 積層板の補修部や繊維不連続部等といった特定の損傷発生限からの損傷進展の抑制を可能とする材料デザインに貢献する技術であるといえる。

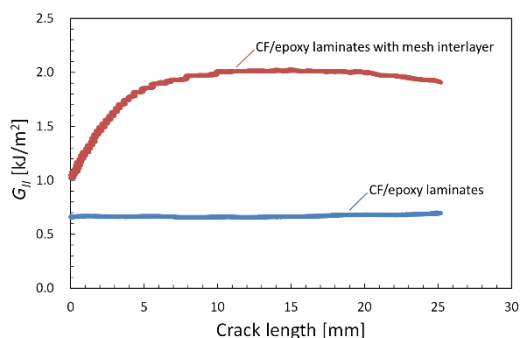


図 1 層間メッシュ層を導入した CFRP 積層板の R カーブ（モード II）

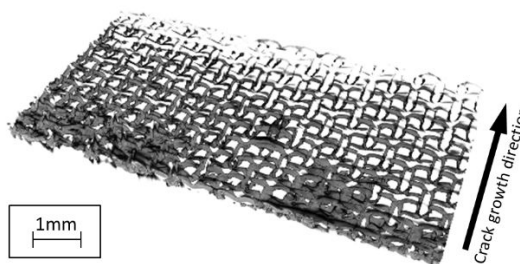


図 2 メッシュに沿ったき裂進展の様子

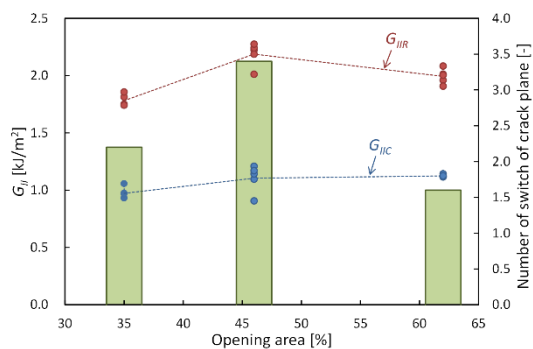


図 3 メッシュ構造の開口率と  $G_{II}$  値の関係

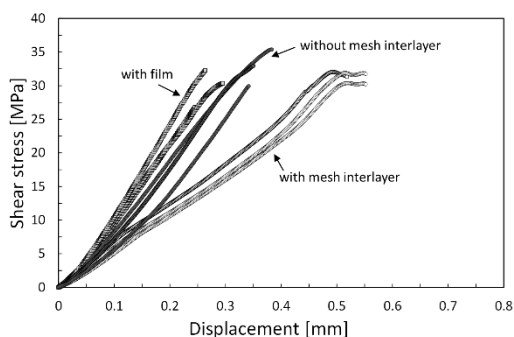


図 4 目違い切欠き試験片を用いた層間せん断強度評価の結果

## (2) 層間メッシュ層が CFRP 積層板の機械的特性に及ぼす影響

層間メッシュ層導入による材料デザインの例のひとつとして CFRP アングルプライ積層板への適用を評価した。±45°アングルプライ積層板は引張負荷によりまず発生するマトリックスクラックが層間に進展することにより破壊する。これに対し PA メッシュを用いた層間メッシュ層を +45/-45 層間に導入することによる機械的特性の変化を評価した。準静的な引張試験より、層間メッシュ層を導入した CFRP アングルプライ積層板 $[45_2/\text{PA mesh}/-45_2]_S$ は、これを有さない場合 $[45_2/-45_2]_S$ と比較して、破断ひずみが増加し約 12% ひずみまでの大変形挙動を示すことを明らかにした（図 5）。PA フィルムを用いた場合はひずみが数%の時点でフィルムと CFRP 層の層間はく離が発生し、強度と破断ひずみが小さかったことから、メッシュ構造の有効性が示された。また、引張試験後の試験片端面の観察から、 $[45_2/-45_2]_S$ では試験片内で発生したき裂の開口が大きくなり層間はく離にまで進展する傾向があるのに対し、 $[45_2/\text{PA mesh}/-45_2]_S$ ではき裂の開口が大きくなり層間はく離にまで進展する前に、他の箇所新たなき裂が発生しこれが蓄積する傾向がみられた（図 6）。メソスケール損傷モデルを用いた損傷解析からも、マトリックスクラックの蓄積による累積塑性ひずみが大きくなったと考察された。よって、層間メッシュ層導入によるアングルプライ積層板の大変形挙動は、層間破壊靱性や層間せん断強度が増加によって、マトリックスクラックが発生してもこれが層間はく離につながらず、マトリックスクラックが材料内で蓄積されるためであることを、実験および解析より説明した。

さらにこの評価を発展させ、CFRP アングルプライ積層板が応力集中部を有する場合の疲労特

性に対する層間メッシュ層の影響も実験的に評価した。上記と同様の積層構成の積層板の中央両端に半径 3mm の半円の切り欠きを導入し、これに対して疲労試験（周波数 5Hz, 応力比 0.1）を実施した。その結果、破断までの繰返し数が、層間メッシュ層なしの場合は約  $7.1 \times 10^3$  回だったことに対し、層間メッシュ層を導入することで  $9.3 \times 10^4$  回となり、疲労寿命が著しく増加することを明らかにした。各繰返し数における試験片内部の損傷をマイクロフォーカス X 線 CT により観察すると、層間メッシュ層を有するアングルプライ積層板においては、切り欠き部付近のみならず試験片全体に多数のき裂が観察された（図 7）。破断直前の試験片の損傷量の差は顕著であり、これより層間メッシュ層による層間特性の改善がき裂の蓄積を可能にし、疲労寿命が増加していることを示した。

層間メッシュ層の応用例のひとつとして、上記の評価で用いてきた高分子製のメッシュではなく、金属製のメッシュの適用も試みた。FRP と金属を交互に積層したハイブリッド複合材料であるファイバメタル積層材 (FML) は耐疲労性・耐衝撃性に優れているといわれ、中でも FRP 層の母材に熱可塑性樹脂を用いた Thermoplastic Fiber Metal Laminates (TFML) は、従来の FML と比べ衝撃エネルギーの吸収に優れる。しかし一方で、FRP 層と金属層間の界面強度が低いために界面はく離が容易に発生してしまうという欠点が残されている。そこで金属層をメッシュ構造とした CFRTP/チタンメッシュ積層板を提案した。これと比較のための CFRTP/チタン箔積層板を成形し、落錘による面外衝撃試験を実施した。衝撃負荷後の断面観察（図 8）により、メッシュ構造の導入により、チタン箔を用いた場合のような大規模な界面はく離が発生せず、局所的な損傷の発生のみがみられ、損傷面積や吸収エネルギーに興味深い変化が生じた。

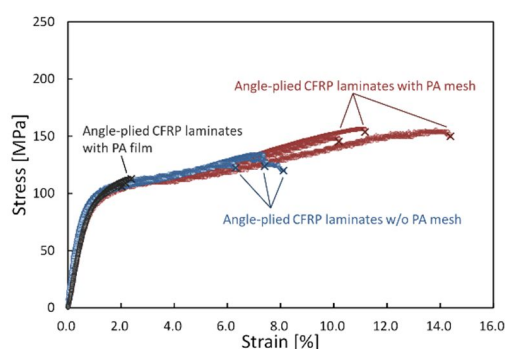


図 5 層間メッシュ層を導入した CFRP アングルプライ積層板の大変形

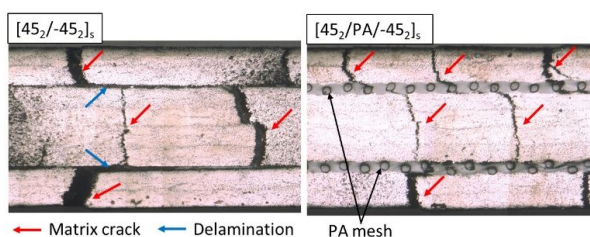


図 6 引張試験後の試験片端面からの損傷観察

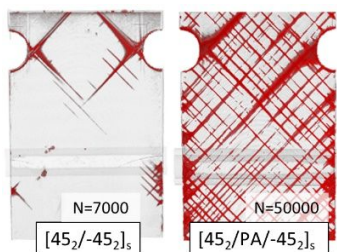


図 7 X 線 CT により観察した疲労試験後の内部き裂の分布

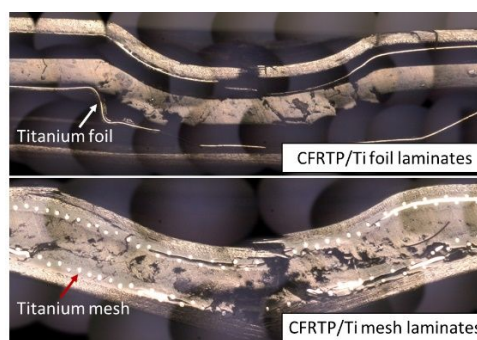


図 8 落錘衝撃負荷による CFRTP/チタンメッシュ積層板の損傷（チタン箔の場合との比較）

以上の通り、CFRP などの複合材料積層板に層間メッシュ層を導入することで簡単にかつ選択的に層間破壊靱性をモディファイできること、またこの技術の適用によって複合材料積層板内での損傷の蓄積により耐疲労性や耐衝撃性が改善することを明らかにした。これは複合材料を用いた構造デザインの自由度を高める画期的な技術である。複合材料の適用拡大に向けたこの技術のさらなる応用については、今後の検討課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 谷勇, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 マイクロボンド試験によるポリアミド/エポキシ界面強度の評価
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2020年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本結香, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 切欠きを有するCFRP積層板の疲労特性に及ぼす層間メッシュ層の影響
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2020年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中谷隼人, 小林史和, 逢坂勝彦
2. 発表標題 層間メッシュ層の導入がUD-CFRP積層板のILSSに及ぼす影響
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議(JCCM-12)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayato Nakatani, Fumikazu Kobayashi and Katsuhiko Osaka
2. 発表標題 Interlaminar Fracture Behaviour of UD-CFRP Laminates with Mesh Interlayer
3. 学会等名 45th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumikazu Kobayashi, Hayato Nakatani and Katsuhiko Osaka
2. 発表標題 Effect of Mesh Interlayer on Interlaminar Shear Strength in Unidirectional CFRP Laminates
3. 学会等名 45th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西立芽, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 CFRTP/チタンメッシュ積層板の成形と面外衝撃特性
3. 学会等名 山梨講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林史和, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 層間メッシュ層の導入がCFRP 積層板の曲げ弾性率とILSS に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会第28回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 層間メッシュ層を有するUD-CFRP積層板のき裂進展挙動
3. 学会等名 第45回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中根正登, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 異なる開口率の層間メッシュ層を導入したCFRP積層板の層間破壊挙動
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議(JCCM-11)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 粟津和弘, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 層間メッシュ層を導入したCFRP テーパ構造の損傷挙動
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議(JCCM-11)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村友祐, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 メッシュ層と異なる孔配置を有するFMLのVaRTM樹脂含浸挙動
3. 学会等名 日本機械学会第27回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林史和, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 3Dプリンタで製作したインターリーブを挿入したCFRP積層板の層間破壊挙動
3. 学会等名 日本機械学会第27回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷隼人, 松井保憲, 飯田陽介, 逢坂勝彦
2. 発表標題 層間メッシュ層導入によるFRP およびFML のVaRTM 樹脂含浸時間の短縮と層間高靱性化
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayato Nakatani and Masato Nakane
2. 発表標題 Interlaminar toughening for CFRP laminates by introducing mesh interlayers with different opening areas
3. 学会等名 Future Generation Symposium on Composite Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷隼人, 中根正登, 逢坂勝彦
2. 発表標題 異なる開口率の層間メッシュ層を導入したCFRP積層板の破壊靱性評価
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議(JCCM-10)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷隼人
2. 発表標題 メッシュ層導入によるCFRPの層間特性モディファイ
3. 学会等名 オートモーティブ・コンポジット研究会 第28回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 中根正登, 中谷隼人, 逢坂勝彦
2. 発表標題 異なる開口率のメッシュを挿入したCFRP積層板の層間破壊靱性評価
3. 学会等名 日本機械学会第26回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中谷隼人, 上田和輝, 逢坂勝彦
2. 発表標題 層間メッシュ層導入によるCFRPアングルプライ積層板の大変形挙動
3. 学会等名 第43回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshinori Sei, Hayato Nakatani and Katsuhiko Osaka
2. 発表標題 Damage Behavior of CFRP/Titanium Mesh Laminates under Three-point Bending Loading
3. 学会等名 The 12th Canada-Japan Workshop on Composites (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuki Ueda, Hayato Nakatani and Katsuhiko Osaka
2. 発表標題 Large Deformation Behavior of Angle-Plied CFRP Laminates by inserting PA Mesh as Interlayer
3. 学会等名 The 12th Canada-Japan Workshop on Composites (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------