

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03847

研究課題名（和文）セラミック遮熱コーティングのプロセスベース離散化モデルの開発

研究課題名（英文）Development of process-based discretized model for ceramic thermal barrier coatings

研究代表者

荒井 正行（Arai, Masayuki）

東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号：40371314

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ガスタービン動翼表面に施されているTBCの非弾性変形と損傷プロセスを数値シミュレーションすることを目的に、Brickモデルと非線形Cohesiveモデルを融合した新しいマイクロモデルを開発するとともに、我々がこれまでに進めてきた損傷連成非弾性構成式によるマクロモデルと組み合わせたマイクロマクロ結合シミュレーションを試みた。得られた結果は、複雑な非弾性変形と損傷過程を適切にシミュレーションできていることを確認した。さらに、Brickモデルを多角形モデルに拡張した平面充填構造体を対象に数値解析を行った。この結果、頂点数と負荷方向を制御することで高破壊靱性化を達成できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通じて得られた成果により、TBCの微視的構造を起点としてバイオミメティクスによる新しい微視的構造概念を得ることができた。これらの成果により、効率的に新しい材料の開発に資することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to simulate numerically the inelastic deformation and damage process in TBCs on the surface of gas turbine blades, we developed a new micro-model by combining the brick model and the nonlinear cohesive model. The obtained results showed that the complex inelastic deformation and damage processes could be simulated properly. In addition, the brick model was extended to a plane-packed tessellated structure, and numerical analysis was performed. The results showed that high fracture toughness can be achieved by controlling the number of vertices and the loading direction.

研究分野：材料強度学

キーワード：セラミック遮熱コーティング バイオミメティクス 微視的構造 Brickモデル Cohesiveモデル 平面充填構造体 破壊靱性値 新材料

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化を防止するために高効率化ガスタービン (GT) 発電が注目されている。これら GT においては、燃焼ガスから GT 動翼を保護するためにセラミック遮熱コーティング (TBC) が施されている。長期に亘り安定した電力供給を保証するためには、TBC に生じるき裂やはく離発生を正確に予測することが求められている。この要請に答えるためには、複雑な温度・応力変動下での TBC に生じる応力を正確に評価しなければならない。これまでは金属材料のための構成方程式がそのまま TBC に適用されてきた。しかしながら、組織異方性、負荷方向に対する変形異方性など TBC に特有な性質を既存の構成方程式では十分に表現できておらず、TBC に生じる応力に対するさらなる評価精度の向上が求められていた。

2. 研究の目的

上述した背景に鑑みて本研究では、これまでの問題点を克服した TBC のための応力解析モデルを開発する上での第一歩として、土木工学などで用いられている Brick モデルに着目し、これに基づいた TBC のための新しい解析モデルを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

3-1. プラズマ溶射条件とスプラット形状の関係:

様々な粒子速度条件のもとで大気プラズマ溶射により TBC を成膜する。その後、電解研磨により基材とボンドコート溶解させて、膜厚さ 500 μm のセラミックコーティングの試料を準備する。走査型電子顕微鏡 (SEM) により撮影された TBC の微視的組織に対して画像処理を行い、スプラット形状を統計的に調査する。そして、プラズマ溶射条件とスプラット形状の関係を明らかにする。

3-2. プラズマ溶射条件と TBC 薄状試験片の応力-ひずみ曲線の関係:

先に準備した膜厚さ 500 μm のセラミックコーティングの薄膜試験片を対象に曲げ負荷試験を実施する。これによりセラミックコーティングの非線形応力-ひずみ曲線を取得する。これらのデータは解析モデルの材料定数を決定するために使用される。

3-3. TBC の Brick モデルの開発:

TBC の微視的組織をレンガ構造でモデル化する。さらにレンガ同士を非線形 Cohesive 結合モデルにて結合した Brick モデルを開発する。プラズマ溶射条件の違いがレンガのアスペクト比、Cohesive 結合モデルにおける結合定数に反映される。同結合モデルにおいては、引張負荷方向に対してすべり変形を許容し、除荷・圧縮負荷方向に対しては固着するようモデル化する。これにより TBC 変形に特有な現象であった負荷方向の異方性を表現する。さらに、Cohesive 結合モデルにおける凝集エネルギーが臨界値に達したら破断することで、スプラットバウンダリーでのき裂発生と進展をシミュレーションできる。これらに基づいて、有限要素解析のための剛性方程式を定式化する。

3-4. Brick モデル・非線形 Cohesive 結合モデルの有限要素解析コードへの組み込み:

Brick 要素と非線形 Cohesive 結合モデルを商業用有限要素解析プログラム MARC のユーザーサブルーチンとして組み込み、TBC システムの変形挙動と応力変化を解析するとともに、き裂発生と進展シミュレーションを試みる。

4. 研究成果

4-1. プラズマ溶射条件とスプラットのアスペクト比(a/b)の関係:

表 1 に示す溶射条件のもとで大気プラズマ溶射により TBC を成膜し、電解研磨により基材とボンドコートを溶解させて、セラミックコーティングそのものの薄膜状試験片を準備した。

表 1 溶射条件

Specimen name	L	Std	H
Spraying method	APS		
Spraying gun	Unicoat/F4 gun		
Working gas	Ar + H ₂		
Spraying material	ZrO ₂ -8wt.%Y ₂ O ₃ (METCO 204NS)		
Ar flow [NLPM]	20	30	40
Power [kW]	22	41	45
Particle velocity [m/s]	113	210	272
Particle temperature [K]	2681	2952	2927

さらに得られた試験片断面観察に基づいて、溶射条件とスプラット形状の関係を調べた。これにより、スプラット形状の測定結果に基づき溶射粒子の運動エネルギーを変数にもつ関数とし

てスプラット形状を特徴づけることに成功した (図 1).

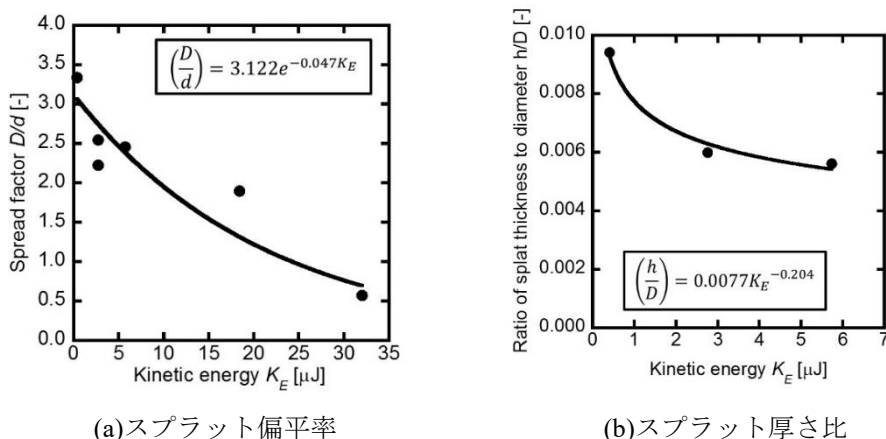


図 1 スプラット形状と溶射粉末の運動エネルギーの関係 (●印は測定結果, 実線は本研究で求めた評価式)

4-2. プラズマ溶射条件と TBC 薄状試験片の応力-ひずみ曲線の関係:

先に準備したセラミックコーティングの薄膜試験片を対象に曲げ負荷試験を実施し, 同材の非線形応力-ひずみ曲線を得た (図 3 中の実線). これにより溶射粒子速度が低下するにつれて測定される応力-ひずみ曲線に強い非線形性を発現することを認めた. 試験中ならびに試験後の試験片断面に対する走査型電子顕微鏡 (SEM) による詳細観察を行った結果, 曲げ負荷に伴ってスプラットが界面に沿って相互にすべりを生じていること, さらにマイクロクラックがスプラット界面に沿って発生, 進展していく様子が認められた. これらのことから, 本研究で提案しようとする Brick モデルのモデル化のための基礎的データが得られた.

4-3. TBC の Brick モデルの開発:

研究の方法でも述べたように, TBC の微視的組織を Brick (レンガ構造) でモデル化することを試みた. 構築したモデルの模式図を図 2 に示す. 図に示すようにスプラットを Brick で置き換えるとともに, Brick 同士を非線形 Cohesive 結合モデルにて結合している. さらに Brick そのものも劈開破壊するようモデル化がなされている. ここで, 溶射条件は Brick の形状ならびに Cohesive モデルにおける材料定数に反映される. これらのモデル化に基づいて定式化した.

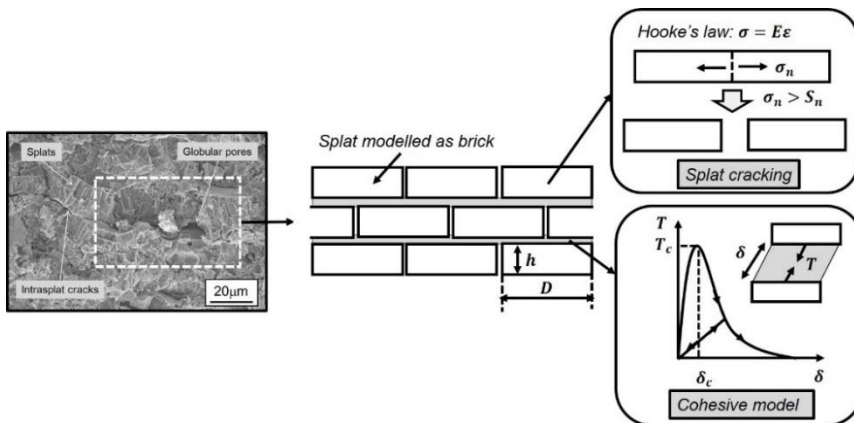
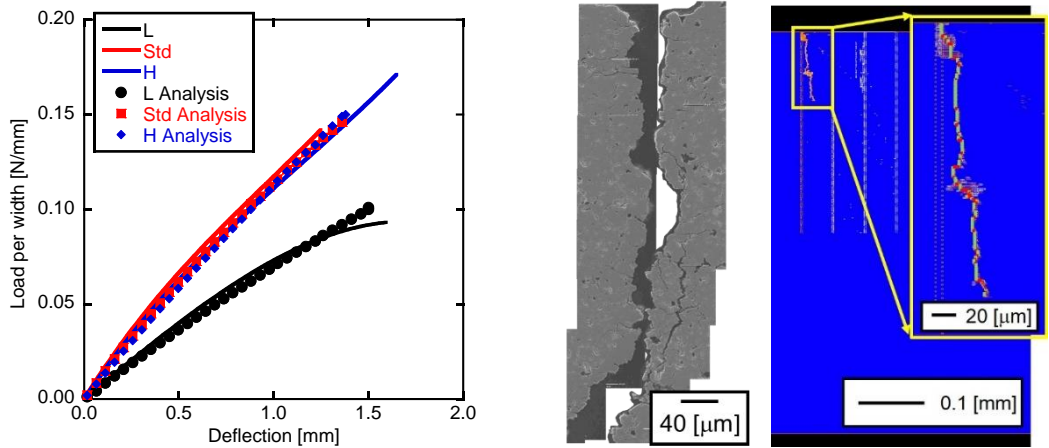


図 2 TBC の微視的構造と非線形変形挙動を考慮した Brick モデルの模式図

4-4. Brik モデル・非線形 Cohesive 結合モデルの有限要素解析コードへの組み込み:

Brick 要素と非線形 Cohesive 結合モデルを商業用有限要素解析プログラム MARC のユーザーサブルーチンとして組み込んだ. あわせて, ボンドコート (CoNiCrAlY 合金) には温度依存性を考慮した弾塑性構成方程式を, 基材には Ni 基超合金 IN738LC を想定するとともに, Chaboche 粘弾塑性構成方程式をそれぞれ組み込んだ. これにより TBC システムの変形と応力解析を行うとともに, き裂発生と進展シミュレーションを試みた. この結果, 曲げ負荷とともに荷重-たわみ曲線に認められた非線形性を忠実に表現できるとともに, スプラット境界で発生したマイクロクラックの発生と伝ばを適切に表現できることを立証した. これらの成果を図 3 にまとめて示す.



(a) 荷重-たわみ曲線（解析結果との比較） (b) き裂進展シミュレーションの一例（SEM 観察結果との比較）

図3 本研究で開発した Brick モデルによる解析結果

4-5. Brick モデルの平面充填構造体への拡張（提案研究の新規分野への展開の試み）：

本研究で開発した TBC のための Brick モデルを多角形が規則的に配置された平面充填構造体へ拡張することを試みた。ここで、平面充填構造とは Brick モデルに相当する長方形のみならず三角形、六角形などの多角形から微視的組織から構成されるものであり、近年、バイオミネラルの観点から注目されているものである。本研究では、Brick モデルを多角形モデルへ理論拡張するとともに連続転位分布法に基づいてマイクロクラックが界面上を進展するよう Cohesive 概念を展開している点に本取り組みのオリジナリティーがある。

図4に解析結果の一例を示す。多角形の頂点数ならびに負荷方向に依存してき裂進展経路に対して Complexity が増加していることがわかる。これらはき裂面積の増加による破壊靱性値の向上が期待できるものである。

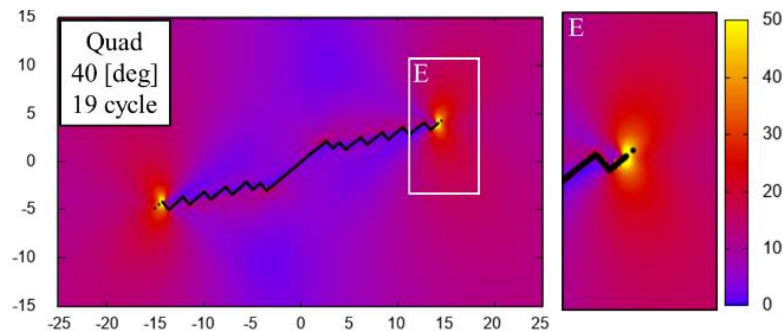


図4 長方形要素からなる平面充填構造体中を進展するき裂（疲労負荷）

き裂進展経路に対する Complexity を定量的に表現するためにフラクタル次元を導入した。フラクタル次元が破壊靱性値に及ぼす影響を調べた結果、図5に示すようにフラクタル次元に伴って破壊靱性値が増加する傾向が認められた。フラクタル次元は、負荷方向ならびに多角形要素における頂点数に依存していることから、これらの量を最適化することでさらに材料の高靱性が図れる可能性のあることが示唆された。

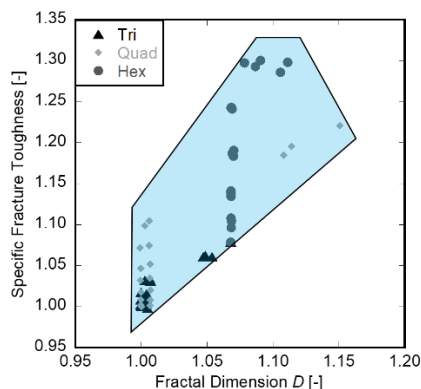


図5 フラクタル次元と破壊靱性値の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Eito Yonemichi, Hiroaki Katori, Masayuki Arai, Kiyohiro Ito, Tatsuo Suidzu	4. 巻 7
2. 論文標題 Brick model for nonlinear deformation and microcracking in thermal barrier coating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.20-00010	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 林 勇佑, 鈴木 健斗, 荒井 正行, 伊藤 潔洋, 樋口 毅, 水津 竜夫	4. 巻 86
2. 論文標題 レーザを用いた急速熱サイクル試験によるTBCの損傷過程	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.19-00426	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 Ryuta Nakajima, Hiroaki Katori, Kiyohiro Ito, Masayuki Arai, Tatsuo Suidzu	4. 巻 2
2. 論文標題 Numerical Simulation on Internal Stress Evolution Based on Formation of Thermally Grown Oxide in Thermal Barrier Coatings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Research Express	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2631-8695/ab9717/	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 Kenji Kaneko, Masayuki Arai	4. 巻 29
2. 論文標題 Evaluation of Shear Fatigue Delamination Strength of Porous Thermal Barrier Coatings by Torsion Pin-Test Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Spray Technology	6. 最初と最後の頁 1002-1015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11666-020-01049-y	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 Masayuki Arai, Hiroaki Katori, Kiyohiro Ito	4. 巻 399
2. 論文標題 Numerical simulation of inelastic deformation and crack propagation in TBC-multilayered Ni-based superalloy subjected to thermo-mechanical loadings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Surface and Coatings Technology	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surcoat.2020.126159	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 Masayuki Arai	4. 巻 218
2. 論文標題 Application of Distributed Dislocation Method to Curved Crack Moving Near a Press-Fitted Inclusion in a Two-Dimensional Infinite Plate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2019.106609	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 Ryuta Nakajima, Hiroaki Katori, Masayuki Arai, Kiyohiro Ito	4. 巻 827
2. 論文標題 Comprehensive Numerical Simulation on Thermally Grown Oxide and Internal Stress Evolutions in Thermal Barrier Coatings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 343-348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yusuke Hayashi, Kento Suzuki, Masayuki Arai, Kiyohiro Ito, Tsuyoshi Higuchi, Yuka Suzuki, Tatsuo Suidzu	4. 巻 827
2. 論文標題 Damage Evaluation of TBC by Rapid Thermal Cycling Test Utilizing a Laser Irradiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 361-366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 H. Katori, M. Arai, K. Ito	4. 巻 774
2. 論文標題 Comprehensive Numerical Simulation of Stress and Damage Fields under Thermo-Mechanical Loading for TBC-Coated Ni-Based Superalloy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 137-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.774.137	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12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Masayuki Arai, Hiroaki Katori, Kiyohiro Ito
2. 発表標題 Creep Fatigue Damage Simulation in Thermal Barrier Coatings Subjected to Thermo-Mechanical Fatigue Loadings
3. 学会等名 13th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryuta Nakajima, Hiroaki Katori, Masayuki Arai, Kiyohiro Ito
2. 発表標題 Comprehensive Numerical Simulation on Thermally Grown Oxide and Internal Stress Evolutions in Thermal Barrier Coatings
3. 学会等名 18th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Hayashi, Kento Suzuki, Masayuki Arai, Kiyohiro Ito, Tsuyoshi Higuchi, Yuka Suzuki, Tatsuo Suidzu
2. 発表標題 Damage Evaluation of TBC by Rapid Thermal Cycling Test based on a Laser Irradiation
3. 学会等名 18th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島龍太, 荒井正行, 伊藤潔洋
2. 発表標題 酸化物成長に伴うTBC内部応力の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本材料学会 第68期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒井正行
2. 発表標題 セラミック遮熱コーティングの高温非弾性解析と損傷評価
3. 学会等名 川崎重工株式会社 技術開発本部 技術交流会, 2019-05, 西明石. (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子堅司, 荒井正行
2. 発表標題 ねじりピンテスト法による多孔質遮熱被膜のせん断疲労はく離強度評価
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米道英音, 荒井正行, 伊藤潔洋
2. 発表標題 Brick モデルによるセラミック遮熱コーティングの変形・破壊に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木健斗, 林勇祐, 荒井正行, 伊藤潔洋, 樋口毅, 鈴木ゆか, 水津竜夫
2. 発表標題 炭酸ガスレーザーによる繰返し照射を受けたTBC の損傷過程について
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林勇祐, 鈴木健斗, 荒井正行, 伊藤潔洋, 樋口毅, 鈴木ゆか, 水津竜夫
2. 発表標題 レーザーを用いた急速加熱サイクル試験によるTBC の損傷過程に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中嶋龍太, 荒井正行, 伊藤潔洋
2. 発表標題 TBCシステムの熱サイクル損傷に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 香取, 荒井, 伊藤
2. 発表標題 熱疲労条件下でのセラミック遮熱コーティングの疲労き裂進展シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Katori, M. Arai, K. Ito
2. 発表標題 Comprehensive Numerical Simulation of Stress and Damage Fields under Thermo-Mechanical Loading for TBC-coated Ni-based Superalloy
3. 学会等名 17th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (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