

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05125

研究課題名(和文)中性子イメージングによる鉄筋コンクリート内部の変形解析と付着モデルの検証

研究課題名(英文) Deformation analysis inside reinforced concrete using neutron imaging technique and verification of bond model

研究代表者

鈴木 裕士 (Suzuki, Hiroshi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・リーダー

研究者番号：10373242

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、中性子イメージング技術と画像解析法を組み合わせたコンクリート内部の変形解析技術の開発を目的とした。中性子イメージング技術により撮像したコンクリート内部に埋設したマーカより、画像解析によりその座標を抽出し、さらに、その座標位置の変化に基づき、有限要素解析技術と組み合わせてコンクリート内部の変形状態を解析する方法を提案した。実際に両引き載荷中のコンクリート内部の変形状態を解析した結果、開発した変形解析技術により、非破壊でコンクリート内部の変形状態を明らかにできることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、国民の社会生活を支えるインフラ構造物や建築構造物に代表される鉄筋コンクリート構造物について、その安全性向上や長期利活用に向けた取り組みに対して、新たに中性子科学を応用することを目的とした学際研究である。本研究で得られた成果によって、これまでは直接観察が困難であったコンクリート内部の変形状態を明らかにできる可能性があり、本技術を応用すれば、鉄筋コンクリート構造物の安全性や耐久性に支配的な鉄筋コンクリートの付着機構の詳しい理解につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：We have suggested a novel method to observe internal deformation of concrete by the neutron transmission imaging technique with image analysis. The transmission image of concrete is taken by neutron imaging technique, and the coordinates of the markers dispersed in concrete are extracted by the image analysis technique developed in this study. Then, the deformation condition inside the concrete can be analyzed by the finite element analysis method based on the change in the coordinate position taken by the image analysis method. We applied this technique to an evaluation of inside deformation of concrete under tensile loading, and it was clarified that the developed deformation analysis technique can evaluate the deformation state inside the concrete nondestructively.

研究分野：材料強度学、中性子科学

キーワード：中性子イメージング 鉄筋コンクリート ひび割れ 変形 非破壊 有限要素解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート(RC)は、圧縮に強いコンクリートと引張に強い鉄筋を相補的に組み合わせた複合材料であり、RC構造物の一体性や性能を確保するうえで、鉄筋とコンクリート間の付着定着挙動を理解することが重要である。しかし、この付着定着挙動は、ミクロ的な応力伝達、各材料の構成則、巨視的な連鎖的破壊など、様々な要因が影響し合っているため、従来の強度試験による検証はもちろんのこと、有限要素法(FEM)や剛体-バネモデル(RBSM)による解析をもってその理解は難しい。特に、鉄筋とコンクリート間の相互作用を模擬する「付着すべり挙動モデル」に大きな影響を受けるため、FEMやRBSMによる解析結果の妥当性の検証と付着定着挙動の理解には、RC内部、特に鉄筋周囲のコンクリートを含めた変形挙動を実験的に明らかにする必要がある。これに対し、研究代表者の鈴木らは、中性子回折法を用いたコンクリート内部の鉄筋の非破壊ひずみ測定技術を開発し、コンクリートと鉄筋の界面に働く付着応力度分布の精密測定を可能にした。本測定技術により、鉄筋のリブ周りの局所的な付着応力度分布の測定だけでなく、コンクリートのひび割れや鉄筋腐食に伴う付着劣化の観察に成功するなど、従来のひずみゲージ法では捉えることの難しかった付着定着挙動の定量評価が可能になった。一方、RCの付着すべり挙動モデルを検討するうえでは、鉄筋だけでなく、鉄筋周囲のコンクリートの変形挙動を定量的に評価することも重要である。しかしながら、現在において、鉄筋コンクリート内部の非破壊ひずみ測定を可能にする技術は存在しない。

コンクリートのひずみ計測技術を大別すると、接触式と非接触式の2種類に分けられる。ひずみゲージやダイヤルゲージ、FBG光ファイバーセンシング技術などを用いたひずみ計測法は、センサ部分をコンクリート表面に貼付したり埋設したりする接触式の測定技術であり、ひずみや変形の長期モニタリングには有効な計測技術であるが、連続的なひずみ分布の測定やひずみマッピングは難しい。一方、画像解析技術を用いた格子法やデジタル画像相関法(DIC法)は、試験体表面に取り付けたターゲットや表面組織の動きを高分解能力カメラなどで撮影し、画像処理によりその位置の変位やひずみを算出する非接触式の測定方法である。コンクリート表面の二次元ひずみマッピングが可能な測定技術であるが、これだけではコンクリート内部の変形挙動を評価することはできない。それに対し、X線はRC構造の内部欠陥などの非破壊検査に広く用いられる透過イメージング技術であり、特に、X線コンピュータトモグラフィ(CT)技術にDIC法を組み合わせれば、コンクリート内部の体積ひずみの測定も可能になる(DVC法)。一方で、X線に比べて透過能に優れる中性子ビームは、鉄筋を含めたコンクリート内部の可視化が可能である。さらに、コンクリート内部の水分挙動の観察や、共鳴吸収による温度測定も可能であり、X線では捉えることが難しい様々な現象を同時に捉えることも可能になる。したがって、中性子イメージング技術を用いたコンクリート内部のひずみ計測技術を開発すれば、コンクリートの付着定着挙動を理解するうえで重要となる鉄筋周囲のコンクリートの変形・破壊挙動の観察が可能になるだけでなく、例えば、コンクリートの爆裂現象に対し、コンクリート内部の水分挙動や温度変化などを含めた変形破壊挙動の多角的な理解が可能になる。

2. 研究の目的

鉄筋とコンクリート間の付着力は、鉄筋コンクリート構造物の一体性を確保する上で重要なパラメータであり、中性子回折法はこの付着力の測定に有効な手段である。一方、鉄筋コンクリートの付着定着挙動の緻密な理解のためには、鉄筋コンクリート内部に埋設された鉄筋とその周囲にあるコンクリート間の変形相互作用を定量的に評価することも重要である。そこで本研究では、物体内部を透かして見ることのできる中性子イメージング技術に着目することにより、従来の格子法やデジタル画像相関法と組み合わせた“コンクリート内部の非破壊ひずみ計測技術”を開発するとともに、鉄筋とコンクリート間の付着すべり挙動を直接観察することにより、これまでに提案されてきた付着すべり挙動モデルを検証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、中性子イメージング技術を応用したコンクリート内部の変形解析技術を確立させることを目的として、変形解析方法の提案、その解析方法の検証、そして、中性子イメージング技術を用いた実証を行った。

コンクリートに含まれる元素の多くは、中性子ビームの吸収が小さくコントラストがつかにくいいため、単純にDIC法やDVC法を中性子イメージング技術と組み合わせても、コンクリート内部の変形を評価するのは難しい。そこで、中性子に対して高い減衰特性を示す酸化ガドリニウム粉末を混和させたマーカ(以下、Gdマーカと称する)をコンクリート内部に分散させることにより、それらの中性子透過像のコントラストの動きから、画像解析によりコンクリートの変形挙動を可視化することを目指した。なお、中性子イメージング実験には大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)BL22エネルギー分析型中性子イメージング装置RADENを用いた。以下に、それぞれの研究方法の概要を示す。

(1)コンクリート内部の変形解析方法

FFT変換を用いた画像処理：コンクリート内部の変形挙動を評価するために、撮影された画像におけるマーカの重心座標を精確に決定する必要がある。以下に、撮影画像からGdマーカ部分を抽出するための画像処理のフローを簡単に示す。はじめに、によって撮影された透過画像に

ついて、暗電流画像及びシェード画像を用いて画像を標準化し、Median 処理することにより、ホワイトスポットノイズを除去した。その後、精度の高い位置座標を得るために、透過画像に対して高速フーリエ変換 FFT による画像処理を行った。ここでは、マーカの粒形を表すエッジを精度よく抽出し、マーカの重心位置を求め、各マーカの座標として抽出した。

メッシュ生成：コンクリート内部のひずみを計算するために、画像解析によって得られたマーカの重心座標を節点としたメッシュを生成した。メッシュの生成には、オープンソースソフトウェア Paraview を使用した。ここでは、ジオメトリを三角形や四面体要素を使用してメッシュ分割する 2D Delaunay 法を使用した。メッシュ内の任意の三角形の外接円がメッシュの他の点を含まないようにすることで、各三角形のすべての角度の最小角度を最大になるようなメッシュに分割した。

変形解析方法：国立研究開発法人理化学研究所が開発したソフトウェアを利用し、得られたメッシュ画像をもとに、コンクリート内部の変形解析を行った。変形解析には、連続体の有限変形を記述できるひずみとして Green-Lagrange のひずみテンソルを用いた。

(2)変形解析方法の検証

ここでは、(1)に示した変形解析方法の検証のため、コンクリート試験体表面に油性マーカにより描画した直径数 mm の円状マーカを使い、両引き載荷中のコンクリート表面の変形挙動を解析した。

試験体概要：本実験に使用した試験体のコンクリート部は、早強セメントを使用した 50×50×600mm の角柱とし、その中心部に全長約 800mm の異形鉄筋 (SD295D10) を埋設した。コンクリート表面には、油性マーカより描画した直径数 mm の円状マーカを約 5mm 間隔で設置した。

測定概要：両引き載荷の条件は、28MPa を初期値として、126MPa まで 14MPa 間隔とし、デジタルカメラにより、各負荷における試験体表面を撮像した。デジタルカメラには、カメラ部有効画素数が 1200 万画素、撮像素子が 1/2.3 型 CMOS のものを使用した。

(3)中性子イメージングによるコンクリート内部の変形解析の実証

ここでは、コンクリート内部に Gd マーカを埋設した鉄筋コンクリート試験体を用い、中性子イメージングによる変形解析技術の実証試験を行った。

試験体概要：試験体には、(2)で用いた試験体と同じ調合および形状のものを使用した。Gd マーカには、中性子に対して高い減衰特性を持つ酸化ガドリニウム (Gd_2O_3) 粉末を混和したセメントペーストにより作製し、直径約 2mm の球状にした。コンクリートを半量打設した時点で、中性子照射面に対して平行となるように、試験体打設面に Gd マーカを二次元的に散布した。

測定概要：はじめにステージ移動による精度検証を行った。ここでは、RADEN のサンプルステージを動かしながら、その実際の移動距離と、解析によって求めた移動距離を比較し、その測定精度を評価した。次に、両引き載荷試験によりコンクリート内部の変形解析を行った。載荷条件は 0、50、75、87 及び、105MPa とし、各載荷状態で透過画像を取得した。RADEN による空間分解能は 50 μ m/Pixels とし、一枚撮像あたりの照射時間を 15 分、撮影枚数を 6 枚とした。

(4)コンクリート内部と表面の同時変形解析

ここでは、(2)および(3)の結果を踏まえて、中性子イメージングとデジタルカメラを用いて、コンクリート内部と表面で変形解析を行った。両引き載荷を行い、各載荷状態で、コンクリート内部と外部の変形解析を行い、それらの結果を比較した。

試験体概要：試験体のコンクリート部は 60×60×400mm の角柱とし、中央に全長約 600mm の異形鉄筋 (SD295D10) を埋設した。Gd マーカは直径約 1mm の球径とし、コンクリートを半量打設した時点で、中性子照射面に対して平行となるように、試験体打設面に対し約 5mm 間隔で散布した。試験体表面には(2)と同様の手段により、約 5mm 間隔でマーカを設置した。

測定概要：載荷条件は、14、42、70、98、158MPa とし、各載荷状態のコンクリート内部と表面の画像を取得した。まず、中性子イメージングで試験体内部を撮影し、試験体をステージと共に平行移動させ、デジタルカメラで試験体表面の撮影を行った。RADEN の空間分解能は 70 μ m/Pixels とし、一枚撮像あたりの照射時間を 5 分、撮影枚数を 15 枚とした。デジタルカメラは(2)と同じものを使用した。

4. 研究成果

(1) 変形解析方法の検証

ここでは、コンクリート試験体表面に油性マーカにより描画した直径数 mm の円状マーカを使い、両引き載荷中のコンクリート表面の変形挙動を解析した。図 1 は各載荷で求めた試験体表面の引張方向ひずみの分布を示している。図 1 に示す白い点線は、試験後に目視にて確認されたひび割れ位置である。42MPa まではあまり大きな変化は見られないが、56MPa を超えたところから、試験体下部のひび割れ発生位置に大きな引張ひずみの増加が見られた。これは、ひび割れの開口による変位の増加に伴う「見かけ」の引張ひずみであり、この変化からひび割れ発生位置を特定することができる。84MPa になると、いったんひび割れ位置の引張ひずみが減少した。これは、今回測定した範囲外に発生したひび割れによって生じた変形緩和の影響によるもの

と推定される。さらに負荷を加えると、ひび割れ開口幅の増加により、再び引張ひずみの増加が確認できた。また、実際にクラックスケールによって計測したひび割れ幅と比較したとき、提案した変形解析手法により求めたひび割れ幅とほぼ一致していた。以上のように、提案した変形解析手法により、コンクリートの変形状態を明らかにできることが分かった。

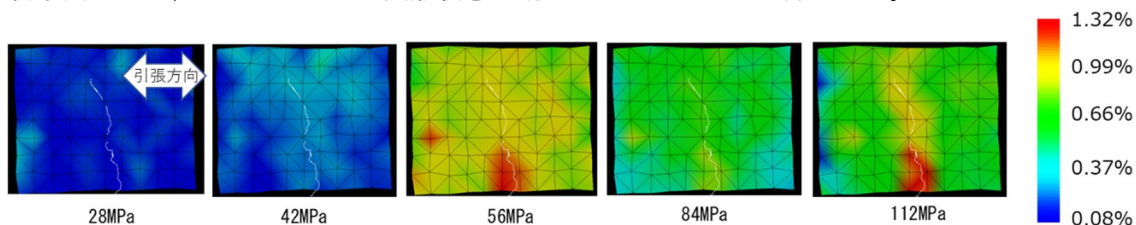


図1 コンクリート表面の変形解析結果

(2) 中性子イメージングによるコンクリート内部の変形解析

ここでは、(1)において検証した手法を中性子イメージングに応用して、コンクリート内部の変形状態を評価した。図2にRADENの実験で得られた透過画像(a)、画像解析により抽出されたGdマーカの画像(b)、Gdマーカの重心座標を基に生成したメッシュ画像(c)を示す。図2(a)の透過画像に映る黒い点がGdマーカであり、赤い線が目視で確認された表面のひび割れ位置を示す。ひび割れは50MPaから75MPaへの载荷中に発生した。次に、ステージ移動による精度検証の結果を図3に示す。画像解析によるマーカ移動量の解析精度は標準偏差で $\pm 50\mu\text{m}$ 以下であり、それを超える変形量であれば評価できることが分かった。

50MPa及び、75MPa 载荷時のコンクリート内部の引張方向ひずみの分布を図4に示す。本結果より、75MPa 载荷時において、局所的に引張ひずみが大きくなっていることがわかる。この引張ひずみの発生位置は、図中に赤い点線で示した試験体表面のひび割れ位置に近いことから、ひび割れ開口に伴う変位の増加が引張ひずみの増加として表れたものと考えられる。本実験により、提案した変形解析方法に中性子イメージングを組み合わせることで、コンクリート内部の変形解析が可能であることが示された。

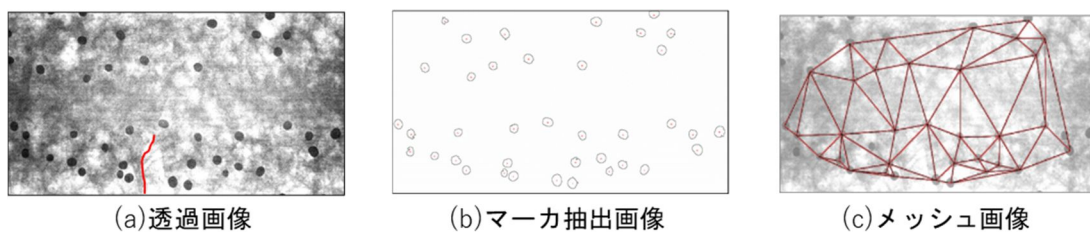


図2 中性子イメージングによる画像取得からメッシュ生成までのプロセス

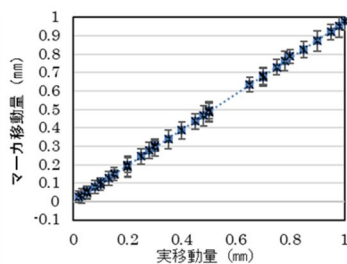


図3 マーカの移動量

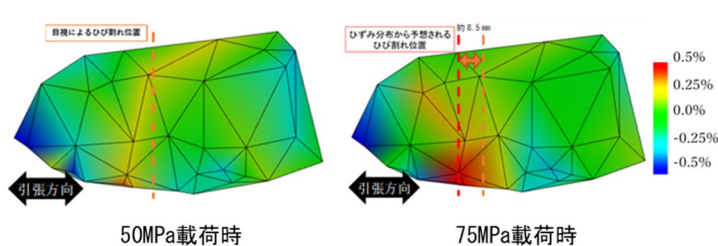


図4 コンクリート内部の変形解析結果

(3) コンクリート内部と表面の同時変形解析

ここでは、(1)と(2)の成果に基づき、デジタルカメラおよび中性子イメージングを用いてコンクリート試験体の表面および内部の変形解析を行い比較した。得られた結果を図5に示す。図中の白い点線が試験後に確認した試験体表面のひび割れ発生位置であり、試験体表面にみられる引張ひずみ発生個所に一致した。しかし、中性子イメージングによって捉えたコンクリート内部の変形状態をみると、ひび割れ付近に引張ひずみの増加は確認できないことから、試験体表面で確認されたひび割れは鉄筋部まで到達していないと推測される。

以上のように、デジタルカメラおよび中性子イメージングを用いることで、コンクリート表面と内部の変形の同時測定が可能となった。

(4) 結論

コンクリートに分散させたマーカ(中性子に対して高い減衰特性を示す酸化ガドリニウム(Gd_2O_3)粉末を混和したセメントペーストで製作した球状マーカ)を中性子イメージングにより撮影し、その透過像にあるマーカの動きを定量的に評価することで、コンクリート内部の変形

状態を約 50 μm の精度で測定できる技術を開発した。

得られたマーカ座標を有限要素解析に取り込む技術を開発するとともに、有限要素解析と画像解析技術を組み合わせたコンクリート内部の変形解析技術を開発した。また、Green-Lagrange のひずみテンソルを用いた変形解析により、精度の高い変形解析が可能であることが分かった。

デジタルカメラおよび中性子イメージングを用いることで、コンクリート表面と内部の変形の同時測定が可能となった。

これまでの研究を通じて、コンクリート内部の変形状態を非破壊・非接触で評価可能な測定技術を開発することができた。しかし、本研究の最終目的としていた付着すべり挙動モデルの検証には至っておらず、これについては今後の検討課題としたい。

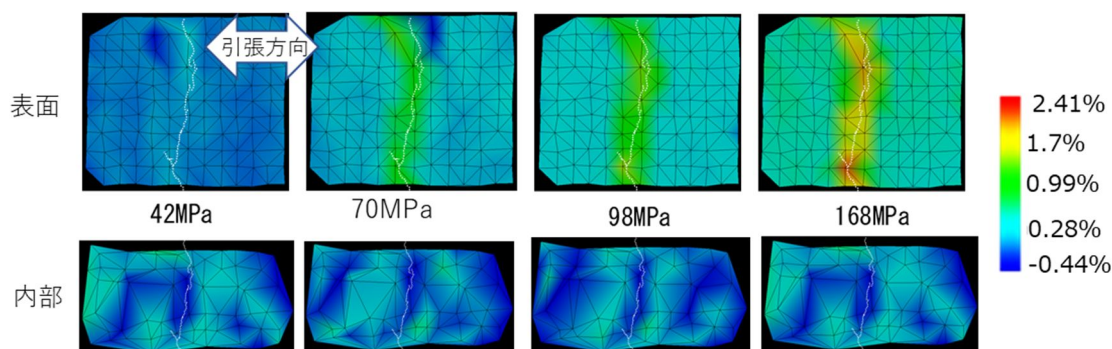


図5 コンクリート内部と表面の変形解析結果

謝辞

本研究は、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の MLF 利用成果公開型実験(課題番号 2017B0206、2019A0218)として実施した。本研究の実施にあたり、日本原子力研究開発機構の篠原武尚博士、総合科学研究機構の松本吉弘博士ほか多くの方のご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

<引用文献>

- H. Suzuki et al., Meas. Sci. Tech., 25 (2014) 025602.
- H. Suzuki et al., JPS Conf. Proc., 8 (2015) 031006.
- M. Kanematsu et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 605 (2009) 154-158.
- T. Shinohara et al., Journal of Physics: Conference Series, 746 (2016) 012007.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 上野一貴、鈴木裕士、小山拓、西尾悠平、兼松 学 | 4. 巻 18 |
| 2. 論文標題 中性子ビーム技術を用いた鉄筋コンクリートの変形破壊挙動の評価 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集 | 6. 最初と最後の頁 647-650 |
| 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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Taku Koyama, Kazuki Ueno, Mariko Sekine, Yoshihiro Matsumoto, Tetsuya Kai, Takenao Shinohara, Hiroshi Iikura, Hiroshi Suzuki, Manabu Kanematsu | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Deformation analysis of reinforced concrete using neutron imaging technique | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Materials Research Proceedings | 6. 最初と最後の頁 155-160 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21741/9781945291678-24 | 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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 上野一貴、鈴木裕士、小山拓、関根麻里子、西尾悠平、兼松学 |
| 2. 発表標題 中性子ビーム技術を用いた鉄筋コンクリートの変形破壊挙動の評価 |
| 3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 上野一貴、鈴木裕士、小山拓、西尾悠平、兼松 学 |
| 2. 発表標題 中性子ビーム技術を用いた鉄筋コンクリートの変形破壊挙動の評価 |
| 3. 学会等名 第18回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 関根麻里子、鈴木裕士、小山拓、兼松学 |
| 2. 発表標題 エネルギー分析型中性子イメージング装置RADEN を用いた鉄筋周辺のコンクリートの変形挙動の観測 |
| 3. 学会等名 2017年度日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiroshi Suzuki, Mariko Sekine, Taku Koyama, Manabu Kanematsu, Hiroshi Iikura, Yoshihiro Matsumoto, Tetsuya Kai, Takenao Shinohara |
| 2. 発表標題 Deformation Analysis of Reinforced Concrete using Neutron Imaging Technique |
| 3. 学会等名 9th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutron and Synchrotron Radiation (国際学会) |
| 4. 発表年 2017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 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 兼松 学 (Kanematsu Manabu) (00312976) | 東京理科大学・理工学部建築学科・教授 (32660) | |
| 研究分担者 | 高村 正人 (Takamura Masato) (00525595) | 国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・ 上級研究員 (82401) | |
| 研究分担者 | 甲斐 哲也 (Kai Tetsuya) (90354737) | 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 J - P A R C センター・研究副主幹 (82110) | |