

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03345

研究課題名(和文)鉄筋コンクリート造構造体の高温環境下における挙動の包括的観測技術の開発

研究課題名(英文)Development of comprehensive observation technique of the behavior of reinforced concrete subjected to high temperature

研究代表者

兼松 学 (KANEMATSU, MANABU)

東京理科大学・理工学部建築学科・教授

研究者番号：00312976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：火災時のRC造の挙動解明には、高温加熱による組織の変質過程、物質移動、鉄筋および組織の変形、鉄筋の付着劣化等を、同時にそれぞれが干渉することなく観測する必要がある。本研究では、RC部材の高温環境下挙動の包括的観測技術の開発を最終目的とし、基礎物性情報の集積、耐熱FBGひずみセンサの開発、中性子イメージングに拠る高温履歴を受けた鉄筋コンクリートの変形測定技術の開発、中性子イメージングによる高温下物質移動測定技術の開発、高精度化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火災時の鉄筋コンクリートの挙動解明には、高温加熱による組織の変質過程、物質移動、鉄筋および組織の変形、鉄筋の付着劣化等を、同時にそれぞれが干渉することなく観測する技術が必要がある。これまで測定が困難であった鉄筋コンクリートの高温下挙動の測定技術として、中性子イメージングおよび中性子回折法を用いた手法を開発するとともに、耐熱FBGセンサの開発を行った。これにより、これまで観察することのできなかった高温環境下における現象を捉える基盤整備が完了し、今後、高温作用下/作用後のRC部材の耐力評価の精緻な理解が進むことが期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate the behavior of Reinforced Concrete(RC) in fire, it is necessary to observe at the same time, the deterioration process of concrete matrix, mass transfer, deformation of rebar and concrete, and deterioration of adhesion of rebar, without interfering with each other. To develop a comprehensive technique to observe the behavior of RC subjected to the high temperature. We conducted the following five research items within this research project.

1) Accumulation of physical/chemical property of cementitious materials exposed to the high temperature, 2) development of heat resistant FBG(Fiber Bragg Grating) strain sensor, 3) development of CT observation technique of deterioration of RC by neutron imaging, 4) development of deformation measurement technique of concrete matrix by the neutron imaging, and strain measurement of rebar by neutron diffraction method, and 5) development of mass transfer measurement technique by neutron imaging.

研究分野：コンクリート工学・建築材料学

キーワード：鉄筋コンクリート 付着評価 中性子回折法 中性子イメージング 耐熱FBGセンサ 高温

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート(RC)は従来耐火的であると考えられており、火災時においても十分な構造耐力を有するべく設計がなされている。しかしながら、RC造構造物が火災等に曝されると、水酸化カルシウムやカルシウムシリケート化合物などの水和生成物の分解によるコンクリートの強度低下や、温度上昇にともなう鉄筋の強度低下、コンクリートと鉄筋の熱膨張係数差による付着劣化、爆裂による断面欠損などが生じることが知られており、火災中・火災後の性能低下、特に構造耐力の低下が懸念される。近年では都市の高層化に伴う高強度コンクリートの利用や、環境配慮型の混合セメントを積極的に用いたコンクリートの開発が実用化されるに至り、改めて高温環境下における鉄筋コンクリートの挙動について注目が集まっている。

一方、鉄筋コンクリート造構造物の高温環境下における挙動の解明には、コンクリート中の温度分布、コンクリート組織のひずみ・応力分布、鉄筋応力、高温加熱によるコンクリート自体の化学組成および物性の変化と、それに伴うマイクロクラックの進展、鉄筋の付着劣化過程などを同時にかつ測定系に干渉することなく非破壊で評価する手法(包括的観測技術と称す)が必要となる。さらに、爆裂現象や付着劣化、鉄筋降伏に至る熱の影響は、表層から高々数 cm で生じる現象が支配的であり、表層に生じるクラックや骨材界面の影響を無視できない。そのため、より厳密な現象解明にはこれら局所的観測技術の存在(高解像能化)が欠かせないが、従前のゲージや熱電対で得られる離散的情報は局所現象の正確な理解には不十分であり、クラックなどの破壊進展領域の測定にはそもそも適用が困難であった。

2. 研究の目的

火災時の RC 造の挙動解明には、高温加熱による組織の変質過程、物質移動、鉄筋および組織の変形、鉄筋の付着劣化等を、同時にそれぞれが干渉することなく観測する必要がある。本研究では、RC 部材のこれら高温環境下挙動の包括的観測技術の開発を最終目的とする。具体的には、①基礎物性情報の集積を前提として、②耐熱 FBG ひずみセンサおよび中性子回折法による高温下鉄筋応力測定技術の開発と、③中性子イメージングによる高温下物質移動測定技術の開発・高精度化を図る。これらを統合し、画像相関法(コンクリートのひずみ測定)や赤外線法(温度測定)等の既存要素技術を複数組み合わせることで、RC 部材の高温環境下挙動の包括的観測技術の基盤技術の確立を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、①鉄筋コンクリートの構成材料の化学/物性評価手法の開発と情報集積に加え、②耐熱 FBG センサによる高温加熱下の鉄筋のひずみ/応力/付着強度測定技術の開発・応用を試み、鉄筋ひずみ/応力/付着強度評価の可能性を検討した。また、③中性子イメージングを用いたコンクリートの物質移動(水分)と変形挙動解析技術の開発を行い、高温加熱下におけるコンクリートの劣化現象の緻密な評価手法の確立、④以上の測定技術に加え、画像相関法(コンクリートの変形)の開発を行った。以下にその具体を示す。

3. 1 鉄筋コンクリートの構成材料の化学/物性評価手法の検討と情報集積

コンクリートの構成材料の化学的/物理的性質の基礎情報の蓄積を目的とし、温度上昇に伴うセメント硬化体の自由水の蒸発やセメント水和物の脱水といった現象に加え、弾性係数の変化について、TG/DTA、XRD などに加え、TMA(Thermal Mechanical Analysis)および熱間ひずみ測定装置を用いた高温加熱下および高温加熱後のひずみ性状を測定し、水

和物の変化や鉱物組成の観点から検討を行った。大正骨材は、石灰岩および硬質砂岩とし、水セメント比 18、30、50%を対象とした。

3. 2 耐熱 FBG センサの開発

高温下における鉄筋のひずみ測定は従来ひずみゲージでも容易では無く、高温下における鉄筋コンクリートの変形挙動について十分な理解が進んでいるとは言い難い。そこで、本研究では回折格子の書き込みにピコレーザを用いた耐熱 FBG センサを鉄筋のひずみ測定に適用すべく、一連の実験的検証を行った。具体的には、従来鉄筋を用い貼付方法およびひずみ測定方法の検討を行った後、コンクリート中の鉄筋への設置方法を検討しラボレベルでのひずみ測定を行った。さらに、実証的検討として鉄筋コンクリート造実構造物の鉄筋に耐熱 FBG センサを設置し、基礎的情報を蓄積した。

3. 3 中性子イメージングを用いたコンクリートの物質(水分)移動評価技術の開発および変形挙動解析技術の開発

3. 3. 1 中性子イメージングを用いたコンクリートの物質(水分)移動評価技術の開発

高温下における物質(水分)移動特性を明かにするため、中性子イメージングによる鉄筋コンクリート試験体中の水分挙動の測定を行った。中性子イメージングの測定は京都大学複合原子力科学研究所の京都大学研究用原子炉 (KUR)内の B-4 ポートを使用し、出力 1MW 定常運転時の中性子線を使用した。

3. 3. 2 中性子イメージングを用いたコンクリートの変形挙動解析技術の開発

高温下におけるコンクリートの変形挙動を、中性子イメージングにより同時に解析する技術として、中性子イメージング技術に FFT 分析を用いた画像解析技術を組み合わせたコンクリート内部の変形挙動評価技術を提案した。さらに、画像相関法を用いたコンクリート内部の変形計算を行い、発生したひび割れに伴う、コンクリート内部の変形挙動評価の技術の確立を目指した。

本研究項目では、コンクリート内部の変形を測定するために、大強度陽子加速器施設(J-PARC)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(図)を用いて、中性子に対して高い吸収特性をもつ酸化ガドリニウムを用いたマーカ(以下 Gd マーカとする)を内部に散布したコンクリートの透過画像を取得した。次に、高速フーリエ変換(以下 FFT 変換とする)を用いた画像処理を行うことにより、各 Gd マーカの重心座標を取得した。その重心座標を用いて画像相関を行い、載荷前後のコンクリート内部の変形解析を行った。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

4. 1 鉄筋コンクリートの構成材料の化学/物性評価手法の検討と情報集積

本研究項目では、RC 部材の高温環境下挙動の包括的観測技術の基盤技術の一環として、鉄筋コンクリートの構成材料の化学/物性評価手法の検討と情報集積を行った。

4. 2 耐熱 FBG センサの開発

本研究項目では、RC 部材の高温環境下挙動の包括的観測技術の基盤技術の一環として、鉄筋コンクリート用の耐熱 FBG センサの開発を行い以下の成果を得た。

開発した耐熱 FBG ひずみセンサの鉄筋への設置方法(接着・固定方法、被覆の除去方法など)について検討を行うとともに、非加熱および加熱環境下におけるセンサの反応について実験的に検証した。インストールの例を図 1 に示す。一連の検証実験の結果より、標準とす

る耐熱 FBG ひずみセンサのインストール仕様を定め、開発した耐熱 FBG ひずみセンサにより鉄筋コンクリート中の鉄筋ひずみの測定が可能であることを確認した。加えて、開発した耐熱 FBG ひずみセンサと従来型ひずみゲージの両方を取り付けた鉄筋を、鉄筋コンクリート中に埋設し、その測定精度と長期測定の安定性を確認した(図 2)。

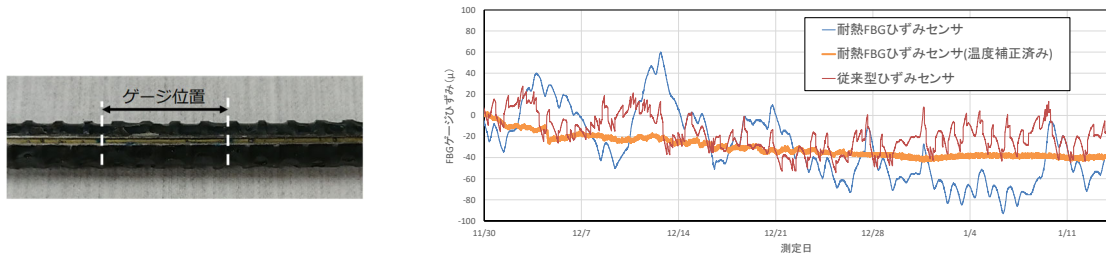


図 1 耐熱 FBG ひずみセンサのインストール例 図 2 FBG ひずみセンサと従来型ひずみセンサの測定結果

4. 3 中性子イメージングを用いたコンクリートの物質(水分)移動評価技術の開発

本研究項目では、RC 部材の高温環境下挙動の包括的観測技術の基盤技術の一環として、中性子イメージングを用いたコンクリートの物質(水分)移動評価技術と熱湿気同時移動解析技術の開発を行い、以下の成果を得た。

図 3 に単位マトリックス当たりの物質量の分布と経過を表すコンタ図を示す。

非定常熱湿気同時移動解析により得られた温度と単位マトリックス当たりの物質減少量の関係から得た値を用いることで、高圧環境の存在領域は時間が経過するとともに試験体深部に移動していることが示された。また、高圧環境の存在領域は水分量が増加している領域の直下に形成されていることが明らかとなり、開発した一連の方法により、中性子イメージングによる高温下物質移動測定技術の開発・高精度化をはかることができ、現象解明のための基礎データを示すことができた。

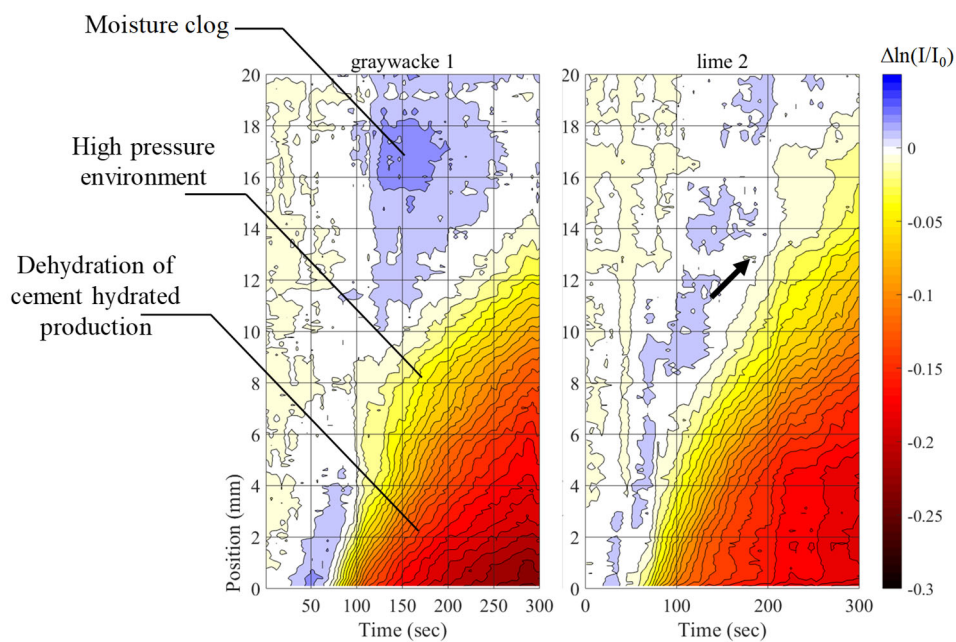


図 3 単位マトリックス当たりの物質量の分布

4. 4 中性子イメージングを用いたコンクリートの変形挙動解析技術の開発

本研究項目では、RC 部材の高温環境下挙動の包括的観測技術の基盤技術の一環として、中性子イメージングを用いたコンクリートの変形挙動解析技術の開発を行い、以下の成果を得た。

コンクリート内部の変形を測定するために、大強度陽子加速器施設(J-PARC)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 を用いて、中性子に対して高い吸収特性をもつ酸化ガドリニウムを用いたマーカ(以下 Gd マーカとする)を内部に散布したコンクリートの透過画像を取得した。高速フーリエ変換(以下 FFT 変換とする)を用いた画像処理を行うことにより、各 Gd マーカの重心座標を取得する手法を開発した。図 4 に開発した画像解析の一連フローを示す。さらに、重心座標から FEM 解析に用いるメッシュを作成し、国立研究開発法人理化学研究所が開発した FEM ソフトを利用し、コンクリート内部の変形計算を行った。実際に鉄筋コンクリートに両引き方向に荷重し、コンクリート内部の変形評価を行う手法を開発した。図 5 に JPARC RADEN 取得画像から、Gd マーカの抽出画像および生成メッシュの一例を示す。

用いた中性子イメージングによる測定は高温の影響をほとんど受けないことから、開発した一連の技術を用いることで、コンクリート表面と内部の変形の同時測定が可能となり、コンクリート表面と内部における、ひび割れに伴う変形の差を観測することが可能となることを示した。

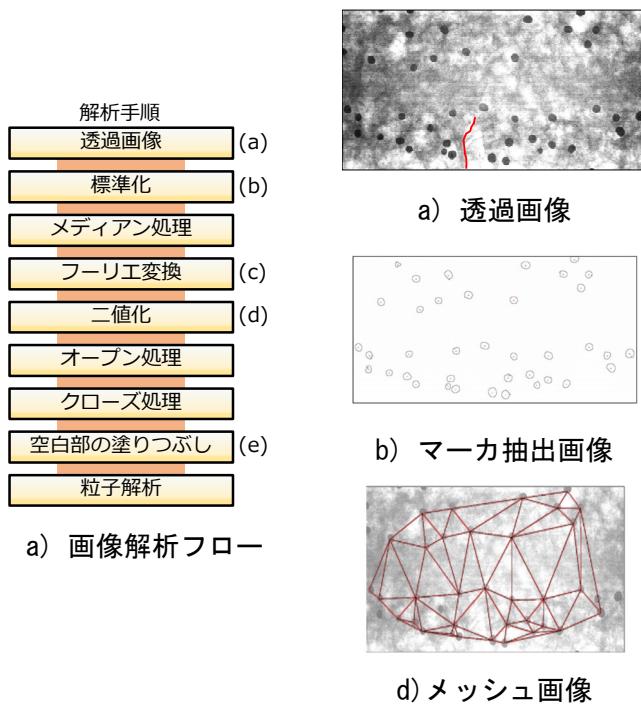


図 4 JPARC TAKUMI による取得データの一例

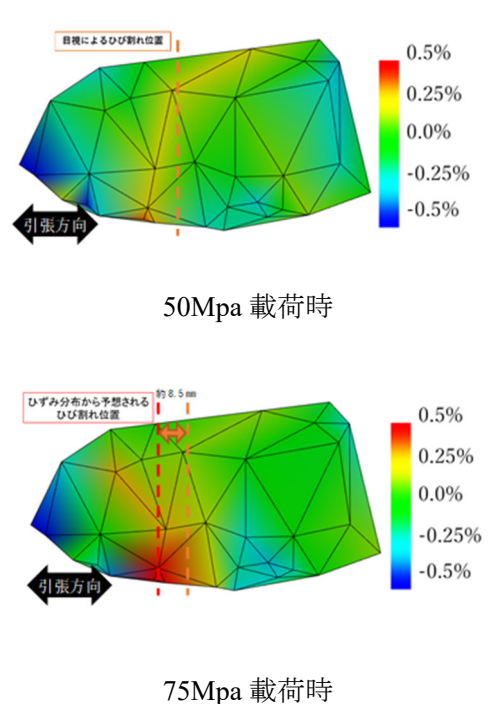


図 5 荷荷時のコンクリート内部の引張軸方向のひずみ成分の計算結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 鈴木 裕士、ハルヨ ステファヌス、楠 浩一、佐竹 高祐、兼松 学、小山 拓、丹羽 章暢、椋山 健二、向井 智久、川崎 卓郎	4. 巻 67
2. 論文標題 中性子回折法による曲げとせん断を受けた鉄筋コンクリートの付着応力度の非破壊評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 180~186
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11396/jjsndi.67.180	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 T. Koyama, K. Ueno, M. Sekine, Y. Matsumoto, T. Kai, T. Shinohara, H. Iikura, H. Suzuki, M. 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） http://dx.doi.org/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 -
1. 著者名 関根麻里子、鈴木裕士、兼松学	4. 巻 40
2. 論文標題 中性子技術を用いたRCの腐食ひび割れの補修による鉄筋付着性能回復の検証	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1545~1550
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 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 T. Koyama, K. Ueno, M. Sekine, Y. Matsumoto, T. Kai, T. Shinohara, H. Iikura, H. Suzuki, M. 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) http://dx.doi.org/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 -

1. 著者名 小山拓、西尾悠平、伊藤大介、兼松学	4. 巻 41
2. 論文標題 中性子イメージングを用いた高強度コンクリート内部の脱水に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1013~1018
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 宮部あづさ、小山拓、西尾悠平、鈴木裕士、兼松学	4. 巻 19
2. 論文標題 受熱した鉄筋コンクリートの付着強度に及ぼす再水和の影響	5. 発行年 2019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 59~64
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 小山拓、宮部あづさ、小林謙祐、上野一貴、西尾悠平、兼松学、鈴木裕士	4. 巻 A-1
2. 論文標題 中性子トモグラフィーを用いた受熱後再養生を施した鉄筋コンクリートの可視化に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 155~156
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 無
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 -

〔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 関根麻里子
2. 発表標題 中性子技術を用いたRCの腐食ひび割れの補修による鉄筋付着性能回復の検証
3. 学会等名 日本コンクリート学会 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野一貴
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 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 H. Suzuki
2. 発表標題 Deformation Analysis of Reinforced Concrete using Neutron Imaging Technique
3. 学会等名 MECA SENS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小山拓
2. 発表標題 中性子イメージングを用いた高強度コンクリート内部の脱水に関する研究
3. 学会等名 日本コンクリート工学会 年次論文大会
4. 発表年 2019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	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	鈴木 裕士 (SUZUKI HIROSHI) (10373242)	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 (82110)	
研究分担者	西尾 悠平 (NISHIO YUHEI) (20793334)	東京理科大学・理工学部建築学科・助教 (32660)	
研究分担者	土屋 直子 (TUCHIYA NAOKO) (60646636)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官 (82115)	
研究分担者	西村 昭彦 (NISHIMURA AKIHIKO) (90370452)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・福島研究開発部 門 福島研究開発拠点 廃炉国際共同研究センター・研究主 幹 (82110)	