

令和元年5月24日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04448

研究課題名(和文) ポーラスコンクリートの透水性能の高精度評価と集中豪雨時の都市防災機能の強靱化

研究課題名(英文) High Precision Evaluation of Permeability of Porous Concrete and Toughening of Disaster Mitigation Function of Urban Areas

研究代表者

畑中 重光 (Hatanaka, Shigemitsu)

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：00183088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：ポーラスコンクリート(POC)は従来、常時の住環境の改善手法として期待されてきた。本研究では、これに非常時の防災機能を付加することを目指した。すなわち、建物周囲の道路や駐車場などの舗装断面に厚版のPOCを適用し、地盤への透水機能に加え、舗装層内における貯水・排水速度の制御を行うことで、市街地から川への雨水の流出量の低減効果と流出の遅延効果を同時に付与できることを実験及びシミュレーション解析によって示した。ここでは、POC内部の水の流れがほぼ乱流であることを立証し、新たな非線形の透水式を定量化している。一連の研究で、近年の「ゲリラ豪雨」などの都市型水害の対策にも応用できることが定量的に示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポーラスコンクリート(POC)は、既に環境負荷低減や生物共生の分野で十分に実用の域に達している。一方で、近年、いわゆる「ゲリラ豪雨」が発生すると、アスファルトコンクリート舗装等の被覆面積が多い都市部では、雨水が水路や河川に短時間で流入するために溢水・氾濫が生じ、多くの水害が発生している。このような状況下で、都市型水害を防ぐ治水対策が強く求められている。本研究では、ダルシー則の非線形性に配慮した実験とシミュレーション解析(粒子法を適用)により、POCの透水性能推定手法を開発し、住宅地街区内の雨水の動きを制御できる貯水・排水システムへと発展させ、環境と防災の両方の性能を期待し得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：Porous concrete (POC) is well known as an environmentally friendly material so far. Recently the short-term heavy rains have been frequently occurring and increasing number of flood disasters is unfortunately expected. The application of POC for pavements is thought to be an effective countermeasure against the floods. However, at present the flow dynamics of water in POC is not well-understood for estimating and controlling the flow rate of rain. In POC application for road surfaces, it is important to understand the flow dynamics for evaluating the permeability performance.

In the present research, firstly the authors grasped hydraulic property of POC and constructed a non-linear permeability model of POC. Further, we carried out a simulation of outflow behavior of rainwater from a city area into a river. It was found that we can expect not only the delay in the outflow and also the decrease in the peak amount of outflow by the wide application of POC pavement in the city area.

研究分野：建築構造材料、コンクリート工学

キーワード：コンクリート ポーラスコンクリート 透水性 集中豪雨 都市水害

### 1. 研究開始当初の背景

ポーラスコンクリート(POC)には、**図-1**に示すように、普通コンクリートにはない多様な機能が期待できる。既に、透水性舗装や植生基盤など環境負荷低減や生物共生の分野では、課題は残されているものの十分に実用の域に達している。

一方で、近年、いわゆる「ゲリラ豪雨」が発生すると、アスファルトコンクリート舗装等の被覆面積が多い都市部では、雨水が水路や河川に短時間で流入するために溢水・氾濫が生じ、多くの水害を引き起こしている。このような状況下で、都市型水害を防ぐ治水対策が強く求められている。

現状では、都市部の治水対策として、調整池を整備するか、地下に巨大な貯水施設を建設する等の対策を講じている。しかし、用地の確保や巨額の建設費用の問題だけでなく、普段は機能しない施設であるため、極めて非効率であることは否めない。

このような状況に鑑み、研究代表者らの一連の研究成果を応用することで、従来期待した常時の住環境の整備だけでなく、非常時の防災機能を付加できる都市型水害対策システムを開発できるとの着想に至った。すなわち、建物周囲の道路や駐車場などの舗装断面に厚版の POC を適用し、舗装層内における貯水・排水速度の制御を行うことで、雨水の流出量の低減効果と流出遅延効果を同時に付与できる舗装断面の設計手法を開発するとともに、その中を流れる水の挙動をシミュレートできれば、環境性能に加え防災性能にも配慮した POC の設計マニュアルを提示することができるとの着想に至った。

### 2. 研究の目的

これまで注目してきた常時の住環境の改善に加え、近年、各地で被害が急増している「ゲリラ豪雨」などの都市型水害の対策にも POC の技術を応用する。

本研究では、ダルシー則の非線形性に配慮した実験とシミュレーション解析（粒子法を適用）により、POC の透水性能を高精度で推定できる手法を開発し、住宅地街区内の雨水の動きを制御できる貯水・排水システムへと発展させる。さらに同システムを現実の街区に適用して実証実験を行うと共に、環境と防災の両方の性能を考慮した POC の性能設計マニュアルを提示する。

### 3. 研究の方法

本研究では、POC 舗装による都市型水害対策工法の実現に向け、主に以下の項目(1)～(5)について取り組む。**図-2**に、研究の流れと各研究テーマの相関を示す。

#### (1) 高精度な POC の透水モデルの提示

POC の透水速度は一般の地盤材料と比べて非常に大きいものが多く、研究代表者らの研究結果からは、粒度の大きい礫と同様に乱流等の影響で、通常のダルシー則が成立しないことが明らかとなった。このため、下式に示す非線形ダルシー則に基づく透水挙動の高精度な表現モデルを提示する。

$$v = k' i^m$$

ここに、 $v$ ：流速、 $k'$ ：非線形透水係数、

$i$ ：動水勾配、 $m$ ：実験定数

#### (2) 粒子法を用いた POC の非線形透水挙動のシミュレーション解析

POC 舗装内部の実際の水の流動挙動を再現した実験を行い、その挙動を粒子法によるシミュレーション解析によって検証する。さらに、上記(1)で得られた高精度透水モデルに、実験結果および検証結果を応用し、POC の材料特性、流路の境界条件等の諸要因の影響を考慮できる POC の簡易透水モデルを実用に向けて定量化する。

#### (3) 降雨量および降雨波形に応じた POC 舗装の排水シミュレーション

上記(2)で得られた簡易透水モデルを用いて、街区レベルでシミュレーション計算を行い、降雨と POC 舗装の条件を変化させた場合の水害対策効果について明らかにする。

#### (4) 都市型水害対策のための POC 舗装システムの実大施工実験

上記(1)～(3)の結果を受けて、実際の敷地に都市型水害対策のための実大施工実験を行う。本実大試験体を用い、施工された舗装の強度、空隙率などの基本的な情報以外に、降雨時にお

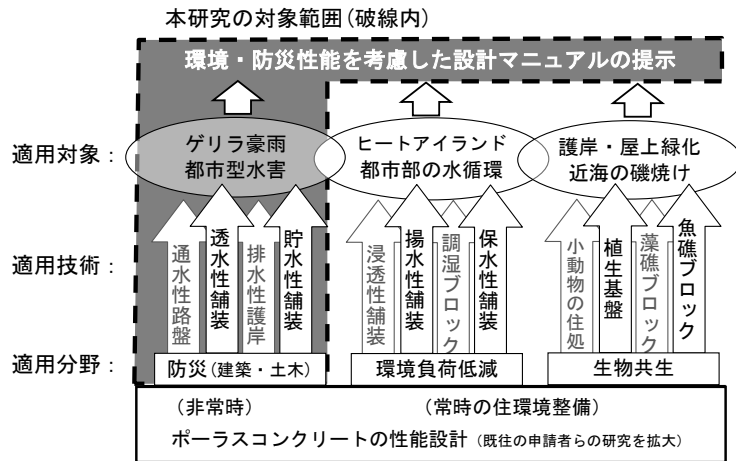


図-1 ポーラスコンクリート(POC)の適用分野の拡大

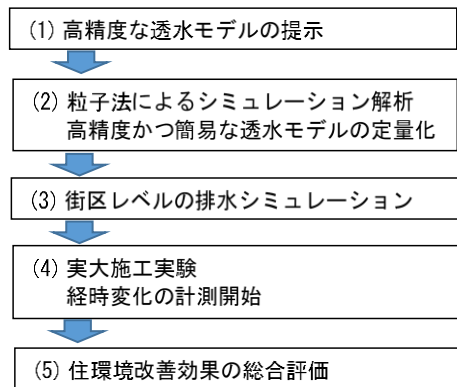


図-2 本研究の流れ

いては排水性能、また晴天時には温熱性能に関する測定を行う。

(5) 住環境改善効果の総合的評価方法の提示（性能設計マニュアルの提示）

POC 舗装システムによる街区レベルの住環境の改善効果について、従来の美観やヒートアイランド現象の緩和効果などに加え、水害対策効果をも含めた総合的評価方法を提示する。

#### 4. 研究成果

(平成28年度)

(1) 非線形ダルシー則に基づく高精度透水性評価

ポーラスコンクリート (POC) の流速と動水勾配の関係は、乱流等の影響を受け、明らかに曲線的となり、既往の線形ダルシー則による近似では、動水勾配によって透水係数の値が大きく異なるため、透水挙動の予測時に極めて大きな誤差が発生する恐れがある (図-3 参照)。

一方、非線形ダルシー則による近似では、高精度な近似が可能となる。現時点で非線形ダルシー則を POC に適用した研究例はほとんど無い。初年度は、一連の実験結果に基づき、代表例の POC について非線形透水係数の評価式を提示した。

(2) 水平方向透水試験

POC 舗装内部の水の挙動を把握するために不可欠な、水平方向の透水試験を行った。本研究では、既存の水平方向透水試験機を改造し、舗装内部の水流だけでなく、降雨および舗装上面・側面からの流入水の挙動を実験的に評価した (図-4、図-5 参照)。水平方向透水実験結果を鉛直方向透水試験結果と比較し、試験方法によらず、非線形透水モデルが適用できることを立証した (図-6 参照)。また、透水試験装置による実験結果を粒子法によるシミュレーション解析によって検証した。

(3) 排水シミュレーション

街区レベルの計画には、実大実験による評価の前段階として、提案する簡易透水モデルを用いた数値シミュレーションを行った。POC 舗装では、普通コンクリート舗装と比べて、街区からの雨水の流出水量のピークを大幅に遅延させ、かつピーク値を若干抑制できると考えられるが、本解析結果により、その効果の定量的な評価を行った。

(4) 舗装版の耐久性評価

POC 舗装の耐久性については、まだ不明な点が多いタイヤに対する耐摩耗と目詰まりに関して調べた。

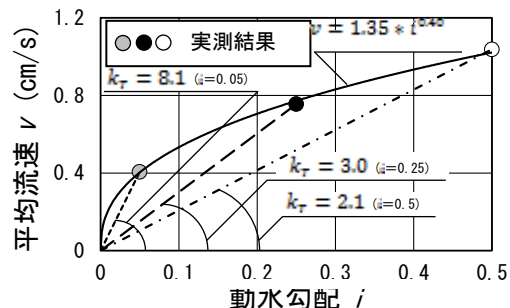


図-3 POC の透水試験結果の例

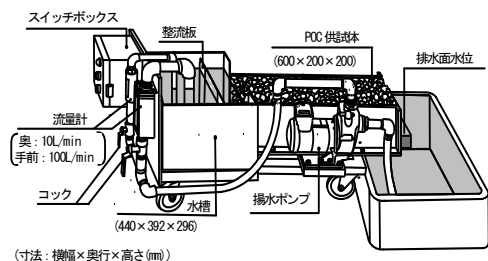


図-4 水平方向の透水試験装置

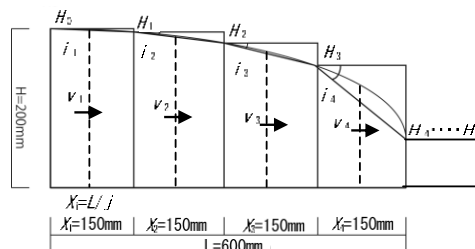


図-5 POC 内の水の流動状況と動水勾配

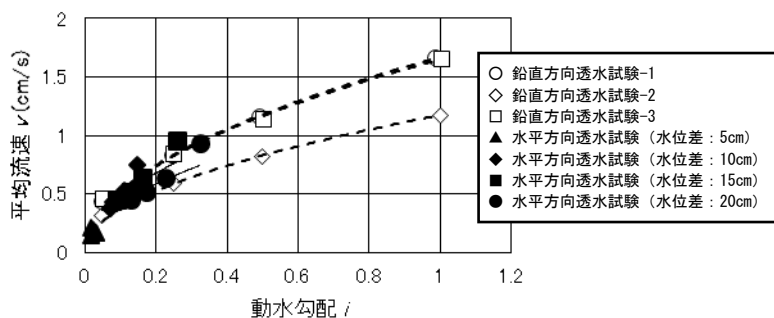


図-6 平均流速と動水勾配の関係に及ぼす透水試験方法の影響

(6号碎石, 全空隙率 25%)

(平成29年度)

(1) 非線形ダルシー則に基づく高精度な透水性評価

昨年度は、非線形ダルシー則を POC に適用し、非線形透水係数の評価式を提示した。今年度

は、これを低い動水勾配の条件化でも適用できることを一連の実験によって立証した。

(2) 水平方向透水試験と実大降雨実験

POC 舗装内部の水の挙動を把握するために不可欠な水平方向の透水試験を昨年度に引き続き実施した。本年度は、実験要因を拡大し、より広範囲な実験結果を得た。また既設の大型 POC 製排水実験槽に各種の断面の POC 版を打設し、実大降雨実験による POC 内部の水の流れを検証した (図-7、図-8 参照)。また、透水試験装置による実験結果を粒子法 (MPS 法) によるシミュレーション解析によって検証するため、2 次元及び 3 次元の POC モデル試験体を作成して水平方向透水試験を実施した (図-9、図-10 参照)。粒子法によるシミュレーションで POC 内部の水の動きをほぼ再現できつつある (図-11、図-12 参照)。

なお、当初計画していた実大施工実験は、実際の降雨条件では得られるデータが少ないことを勘案し、上記の大型降雨実験および MPS 法による排水シミュレーションを充実させることでその代替とすることとした。

(3) 街区レベルの排水シミュレーション

街区レベルの計画には、提案する簡易透水モデルを用いた数値シミュレーションを行うことが望ましい。予備解析によって、POC 舗装では普通コンクリート舗装と比べて、街区からの雨水の流出量のピークを大幅に遅延させ、かつピーク値を若干抑制できることが示された。本年度は、その効果の定量的な予測を行うため、解析ケースを増し、より汎用的な議論を行った。

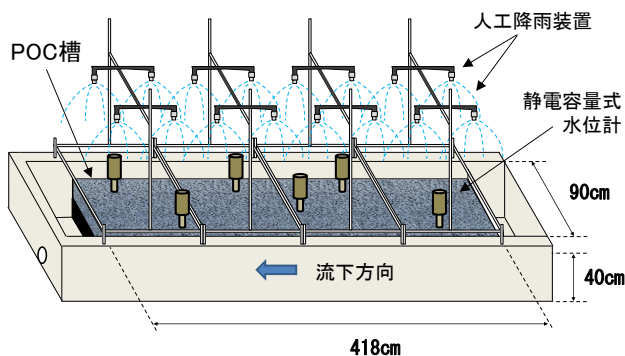


図-7 大型 POC 槽を用いた雨水流出実験装置

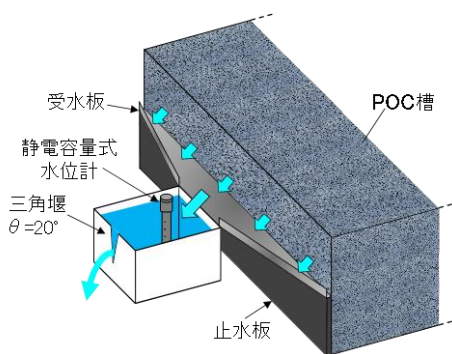


図-8 下流端における流量測定手法

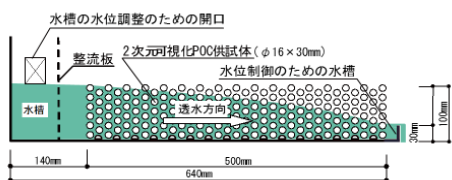


図-9 水平方向透水試験装置 (2次元)

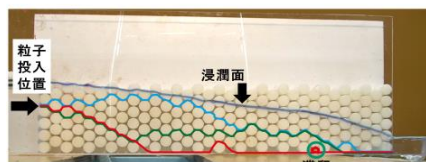


図-10 同じ位置からの粒子の軌跡 (3パターン)

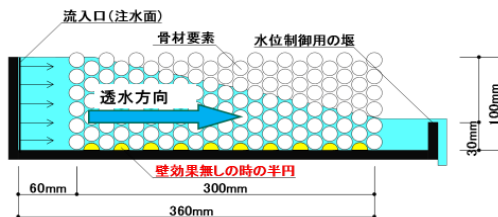
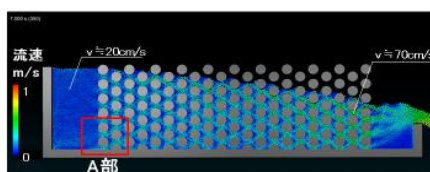
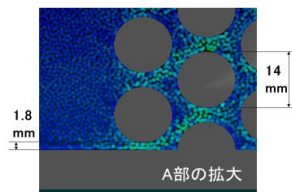


図-11 水平透水試験の MPS 法シミュレーションモデル (2次元)



(a) 全体像



(b) 流入口の拡大図

図-12 シミュレーション結果 (2次元) の一例



## (平成30年度)

研究最終年度であるため、以下の項目を実施した。

(1) 粒子法 (MPS 法) によってポーラスコンクリート (POC) 内部の水の動きをより精度よく再現するための留意点について取りまとめ、実験を再現する透水シミュレーションを実施した。その結果、透水シミュレーションを確実に進めるための新たな手法を考案できた。今後の MPS 法の適用研究に役立つ知見が得られたと考える。

(2) 集中豪雨時の POC 内部の水の流れを予測するため、これまでの研究結果に基づいて非線形透水モデルを適用し、その有効性を示すとともに、シミュレーション予測手法を提示した。その結果、POC を街区に適用した場合の水の流れをよりの確に把握できるようになったと考える。

(3) さまざまな条件を有する街区における豪雨の排水パターンについて検討し、いくつかの事例について POC の有効性を例証した。特に、アスファルト舗装と POC 舗装の相違点、POC の特性に応じた川への排水性能の変化など、定量的に例示することができるようになった。ただし、当初予定した「住環境改善効果の総合的評価方法の提示」すなわち性能設計マニュアルの提示までには至っていない。引き続き検討したい

その他、以下の事項も実施した。

(4) POC の運搬による品質の変化を調べ、品質保証上の留意事項を例示した。

(5) POC の品質 (空隙率) を非破壊的に知るための有効な手法の一つとして弾性波法 (超音波法と打撃法) の有効性を示し、その適用方法についても提示した。この知見は、現場での品質管理と品質保証につながるものと期待できる。

(6) 国内での研究報告に加え、研究成果を国外にも公表した。すでに国際会議で 2 編公表し、国際雑誌には現在 2 編を投稿中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 19 件、すべて査読有り)

- 1) 原田守博、畑中重光、三島直生、飯尾尚平：大型実験に基づくポーラスコンクリート舗装の雨水浸透過程および流出抑制効果の評価、土木学会論文集、74(4)、962-972、2018 年
- 2) 松岡卓・畑中重光・原田守博：ポーラスコンクリートの非線形透水モデルの構築と街区からの排水シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、83(750)、1097-1103、2018
- 3) エルドンオチル、藤木諒将、畑中重光、三島直生：超音波法によるポーラスコンクリートの空隙率推定手法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、83(749)、943~951、2018
- 4) 藤木諒将、森下拓海、中川武志、畑中重光：ポーラスコンクリートの諸特性に及ぼす運搬時間と施工方法の影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集、40(1)、1353-1358、2018
- 5) エルドンオチル、畑中重光、三島直生：ポーラスコンクリートの超音波伝播速度に及ぼす接触媒質の影響に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、40(1)、1365-1370、2018
- 6) 松岡卓、Kamalova Zilola、畑中重光：ガラス球モデル内を流れる水の流動実験と MPS 法によるシミュレーションに関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、40(1)、1371-1376、2018
- 7) 坂本英輔、砂田栄治、古井博：ポーラスコンクリートの骨材飛散抵抗性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、39(1)、1459-1464、2017
- 8) 原田守博、飯尾尚平、高橋輝、田口智広、廣瀬翔大：大型屋外実験に基づくポーラスコンクリート舗装の雨水流出抑制効果の評価、名城大学総合研究所紀要、22、101-104、2017
- 9) 原田守博、渡邊英典：粗粒媒体における非線形透水法則に関する考察、土木学会論文集、73(4)、43-48、2017
- 10) 藤木諒将、三島直生、畑中重光、中川武志：ポーラスコンクリートの振動締固めが及ぼす隣接区画および水平方向の空隙率分布への影響に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、39(1)、1483-1488、2017
- 11) エルドンオチル、藤木諒将、三島直生、畑中重光：現場施工されたポーラスコンクリートスラブの品質評価に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、39(1)、1489-1494、2017
- 12) 松岡卓、三島直生、畑中重光、関本亮太：MPS 法を用いたポーラスコンクリートモデル中を流れる水の流動シミュレーション、コンクリート工学年次論文集、39(1)、1501-1506、2017
- 13) 関本亮太、松岡卓、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの非線形透水挙動のモデル化と街区からの排水シミュレーション、コンクリート工学年次論文集、39(1)、1507-1512、2017
- 14) 坂本英輔、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの実施工における強度管理方法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、38(1)、1713-1718、2016
- 15) 藤木諒将、エルドンオチル、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係に及ぼす細骨材の影響に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、38(1)、1719-1724、2016
- 16) エルドンオチル、藤木諒将、三島直生、畑中重光：超音波によるポーラスコンクリー

トの空隙率および曲げ強度の推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、38(1)、1725-1730、2016

- 1 7) 関本亮太、松岡卓、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの水平方向透水性能に及ぼす壁効果の影響と内部の水の流速分布に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、38(1)、1743-1748、2016
- 1 8) 松岡卓、関本亮太、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの非線形透水挙動に及ぼす壁効果の影響とその推定に関する研究、コンクリート工学年次論文集、38(1)、1749-1754、2016
- 1 9) 畑中重光、岡本享久、梶尾聡、國枝稔、三島直生、平岩陸：ポーラスコンクリートの基礎性状と現状：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立を目指して、舗装、51(9)、6-12、2016

#### [学会発表] (計 27 件)

- 1) E. Ridengaoqier, R. Fujiki, and S. Hatanaka : Study on Quality Evaluation of Porous Concrete Using Void Ratio Estimated by Ultrasonic Wave Velocity、43rd Conference on Our World in Concrete & Structures (国際学会)、2018
- 2) Z. Kamalova, T. Matsuoka, S. Hatanaka, and M. Harada : Construction of a Nonlinear Permeability Model of Porous Concrete and Drainage Simulation of Heavy Rain in a Residential Area、43rd Conf. on Our World in Concrete & Structures (国際学会)、2018 (その他は省略)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：原田 守博  
ローマ字氏名：(HARADA, morihiro)  
所属研究機関名：名城大学  
部局名：理工学部  
職名：教授  
研究者番号 (8 桁)：40165030

研究分担者氏名：浦山 益郎  
ローマ字氏名：(URAYAMA, masuro)  
所属研究機関名：三重大学  
部局名：大学院工学研究科  
職名：教授  
研究者番号 (8 桁)：50121380

研究分担者氏名：三島 直生  
ローマ字氏名：(MISHIMA, naoki)  
所属研究機関名：三重大学  
部局名：大学院工学研究科  
職名：准教授  
研究者番号 (8 桁)：30335145

研究分担者氏名：坂本 英輔  
ローマ字氏名：(SAKAMOTO, eisuke)  
所属研究機関名：広島工業大学  
部局名：工学部  
職名：准教授  
研究者番号 (8 桁)：40583539

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：湯浅 幸久  
ローマ字氏名：(YUASA, yukihiro)

研究協力者氏名：前川 明弘  
ローマ字氏名：(MAEGAWA, akihiro)

研究協力者氏名：中川 武志  
ローマ字氏名：(NAKAGAWA, takeshi)

研究協力者氏名：内田 寿久  
ローマ字氏名：(UCHIDA, toshihisa)