

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：43701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04710

研究課題名(和文) 実施工に寄与するポーラスコンクリートの実践的品質管理技術の提案

研究課題名(英文) Proposal of practical quality control technique for on-site porous concrete

研究代表者

畑中 重光 (Hatanaka, Shigemitsu)

岐阜市立女子短期大学・その他部局等・学長

研究者番号：00183088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ポーラスコンクリート(以下、POC)は、内部に連続空隙を有し、透水性、植栽性など、多様な性能を期待できる新しい社会基盤材料である。本研究は、研究代表者らのこれまでの長期にわたる研究の延長線上にある。すなわち、住環境の改善、都市型水害の軽減などへのPOCの応用を、実践的でより信頼性のある段階へステップアップさせようとするものである。

本研究では、現場施工したPOCの品質保証を目指し、その空隙率を現場で簡易に推定するための新たな手法として超音波速度法(表面法)の適用を選択し、適用時の留意点を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、住環境の改善、都市型水害の軽減などへのPOCの応用を、実践的でより信頼性のある段階へステップアップさせようとするものである。本研究では、現場施工したPOCの品質保証を目指し、その空隙率を現場で簡易に推定するための新たな手法として超音波速度法(表面法)の適用を選択し、適用時の留意点を提示した。

本研究によって、POCの内部構造(主に空隙率)とヤング係数、固有振動数、超音波伝播速度、そして超音波伝播経路の関係が初めて明らかとなった点は学術的価値が高い。また、これらの知見を基に、現場施工されたPOCの空隙率の推定を可能にした点は実用的であり、社会的意義が高いと考える。

研究成果の概要(英文)：Porous concrete (hereinafter, POC) is a new social infrastructure material that has continuous voids inside and can provide various performance such as e.g. permeability and planting. This study is an extension of the long-term research of principal investigators. That is, it tries to step up the application of POC to the improvement of the living environment and the reduction of the urban flood damage to a practical, more reliable stage.

In this study, we selected the application of ultrasonic velocity (surface method) as a new method for easily estimating the porosity in the field with the aim of quality assurance of POC constructed on site, and presented the points to note when applying.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：ポーラスコンクリート 透水性コンクリート 空隙率 品質管理 非破壊検査 超音波速度法 動弾性係数 固有振動数

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

研究課題名「実施工に寄与するポーラスコンクリートの実践的品質管理技術の提案」

1. 研究開始当初の背景

ポーラスコンクリート (以下、POC) は、内部に連続空隙を有し、透水性、植栽性など、多様な性能を期待できる新しい社会基盤材料である。本申請は、研究代表者らのこれまでの長期にわたる研究の延長線上にある。すなわち、住環境の改善、都市型水害の軽減などへの POC の応用を、実践的でより信頼性のある段階へステップアップさせようとするものである。

2. 研究の目的

本研究では、POC を製造した後の現場対応工程 (運搬、締固め、など) における品質変化について、そのメカニズムを明確に把握し、品質確保のための新たな技術・方策を提示する。

具体的には、主に以下の2点について提示する

- (1) POC を製造した後の工程 (運搬、締固め) における品質変化について、そのメカニズムを明確にし、品質確保のための技術・方策を提示
- (2) 現場施工された POC 構造体の品質を管理するための簡便な手法として超音波速度法および打音 (衝撃弾性波) 分析法を採用し、簡易で実用的な非破壊検査手法を提示

3. 研究の方法

平成 31 年度 (研究初年度) は、以下の 2 シリーズの実験的検討を行った。実験 1 では、35℃ 程度の暑中条件下における POC の運搬と品質確保を目的とし、各種混和剤の効果を調べた。ここでは、実際の運搬状況を実験室で模擬するため、小型ミキサにインバータを取り付けて低速回転を実現 (アジテータ車の運搬を模擬) させた。この結果を踏まえ、実機のアジテータ車での練混ぜと振動締固め機を使用した実大施工を実施した。実験 2 では、現場打設された POC の空隙率を推定することを目的とし、既に行った「対面法」による基礎的検討を踏まえ、ここでは、現場構造体への適用性が高い「表面法」への応用について検討した。

令和 2 年度 (研究 2 年度) は、現場での空隙率推定を目的として以下の 2 シリーズの実験的検討を行った。実験 1 では、POC の動弾性係数と空隙率関係について、空隙率および骨材粒径を変更させた POC 試験体を用いた実験、並びにセメントペーストの中に球形の発泡スチロールを配置して、空隙の量と径を定量的に変化させた試験体を用いた実験を行った。実験 2 では、まず空隙、骨材および結合材より成る POC の簡易な物理モデルを提案し、その弾性係数-空隙率関係について理論的検討を行った。また、空隙率を大幅に変化させた POC 試験体の弾性挙動-空隙率関係 (動弾性係数、超音波伝播速度、固有振動数-空隙率関係) について実験を行い、物理モデルの妥当性を確認した。

令和 3 年度 (最終年度) は、既往および本申請の研究結果に基づき、各種条件下での POC 構造体の品質保証という観点から、現場における空隙率推定について簡易で実用的な手法について検討した。すなわち、検討した推定手法としては、打音法、超音波速度法、AI による画像認識の 3 種類である。

4. 研究成果

(1) 年度別成果の概要

平成 31 年度 (研究初年度) の実験 1 の結果、高性能 AE 減水剤 (遅延形) をセメント質量の 0.4% 程度使用することで、低速攪拌時間が 90 分以上になっても十分なワーカビリティが確保できることが実証された。実験 2 の結果、発・受信子と POC の接触媒質には、実用上グリッドよりもシリコンシートが適していること、適切な押し付け力が存在すること、などが明らかとなった。また今後、超音波の伝播経路推定について検討するため、対面法で適用した最短経路シミュレーション探索法の応用について考察した。

令和 2 年度 (研究 2 年度) の実験の結果、POC の動弾性係数-空隙率関係は、骨材、ペーストおよび空隙の三要素を用いた簡単な物理モデルに基づく線形式で表示できること、超音波伝播速度-空隙率関係、および固有振動数-空隙率関係は、弾性振動波動論に基づく 2 次の関数でほぼ表示できることなどが確認された。

令和 3 年度 (最終年度) には、3 種類の空隙率推定方法を比較検討した結果、打音法による推定では、周波数スペクトル (FFT) 分析結果に基づく一次固有周期が、部材の形状寸法や (境界) 支持条件によって異なることから、現場で実用するには条件設定が容易ではないこと、超音波速度法による推定では、電源を

必要とするものの、装置が準備できれば現場での実用性に優れていること、AI 画像認識による推定では、POC 部材表面の画像に加えて POC 内部の空隙との関係に影響する諸条件の情報を与える必要があり、さらなる研究が必要であること、などが明らかになった。

以上の研究成果に基づき、現時点では、現場 POC の空隙率推定手法として超音波速度法(表面法)を用いることが現実的であるという結論を得た。その精度を確保するため、POC 内部の超音波の伝搬経路についても実験的に検討し、普通コンクリートとは異なる興味深い事実を得た。

得られた成果については、今後論文として学会誌などに公表する予定である。

(2) 令和 2 年度の研究成果の紹介

以下、令和 2 年度の研究成果である「動弾性特性に基づく透水性コンクリートの空隙率推定」について取りまとめた成果（第 7 回コンクリート建造物の非破壊検査シンポジウム）を掲載する。

要旨：本研究では、透水性コンクリートの動的性質に着目し、動弾性係数と空隙率の関係を理論的に評価するために、透水性コンクリートの空隙、骨材、セメントペーストによる単純な物理モデルを提案し、その妥当性を実験により確認した。その結果、透水性コンクリートの動弾性率と空隙率の関係は単純な物理モデルに基づく線形関数で表示できること、また、固有振動数—空隙率関係、超音波伝播速度—空隙率関係は二次関数により表示できること、などが理論的かつ実験的に確認された。

キーワード：透水性コンクリート、ポーラスコンクリート、空隙率、非破壊検査、品質評価

1. はじめに

透水性コンクリート（ポーラスコンクリート、以下 POC と略記）は、連続した空隙構造により透水・排水・保水性、吸音性および緑化性など多様な性質を持つコンクリートである¹⁾。これらの性質を生かし、透水性舗装、緑化など多くの面で POC が適用されている。

POC の空隙の量あるいは空隙率はその命であり、空隙率を評価できれば、他の各性質もほぼ評価できると言える。そのため筆者らは、超音波法および打音法など弾性波法を用いた非破壊試験による POC の空隙率推定について実験的研究を行ってきた^{2),3)}。これら方法による POC の品質評価のフローを図-1 に示す。

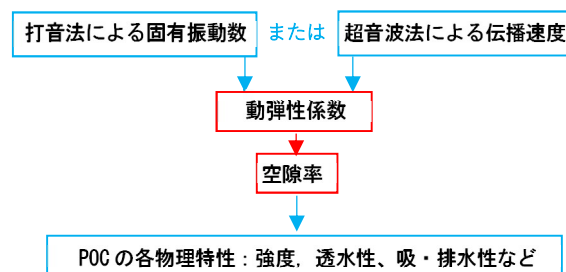


図-1 打音法・超音波法による POC の品質評価のフロー

本研究では、その理論的裏付けを解明することを目的とし、POC の空隙、骨材および結合材による簡易な物理モデルを提案し、その弾性係数と空隙率の関係について理論的検討を行った。また、空隙率を大幅に変化させた POC 試験体について打音法および超音波法の実験を行い、弾性挙動と空隙率の関係（動弾性係数、超音波伝播速度、固有振動数と空隙率の関係）について複数の物理モデルの適用性を検討する。なお、本論文は既発表論文⁴⁾の一部内容を編集し、再執筆したものである。

2. モデル

2.1 普通コンクリートの物理モデル

普通コンクリートの弾性係数の予測モデルとしては、図-2 に示す各物理モデルが提案されている⁵⁾。POC は比較的大きな連続空隙を多く持つことが特徴であり、その空隙が力学特性に大きく影響を与える。

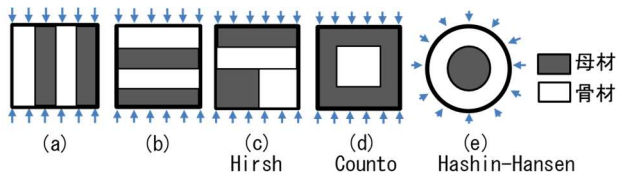


図-2 普通コンクリートの各物理モデル⁵⁾

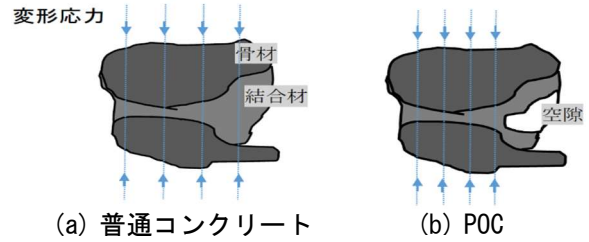


図-3 一次元応力分布のイメージ図

2.2 POC 内部の応力分布

図-3 に、普通コンクリートと POC 内部の一次元的縦応力の分布モデルを示す。ここで設定する簡略モデルでは空隙が応力を分担しない。そのため、空隙が存在する位置の縦方向には応力が伝達されず、応力が固体部分に集中する。そのため、POC の見かけ（平均）の弾性係数は、空隙率が 0%，ペーストで骨材が埋まった状態時に最大となり、ペーストがなくなると 0 となる特徴がある

2.3 POC の物理モデル

上記モデルの応力分担の特徴を考慮し、図-4 に示す POC の各物理モデルを作成した。ここで各物理モデルは、一次元的縦応力のみを考慮している。

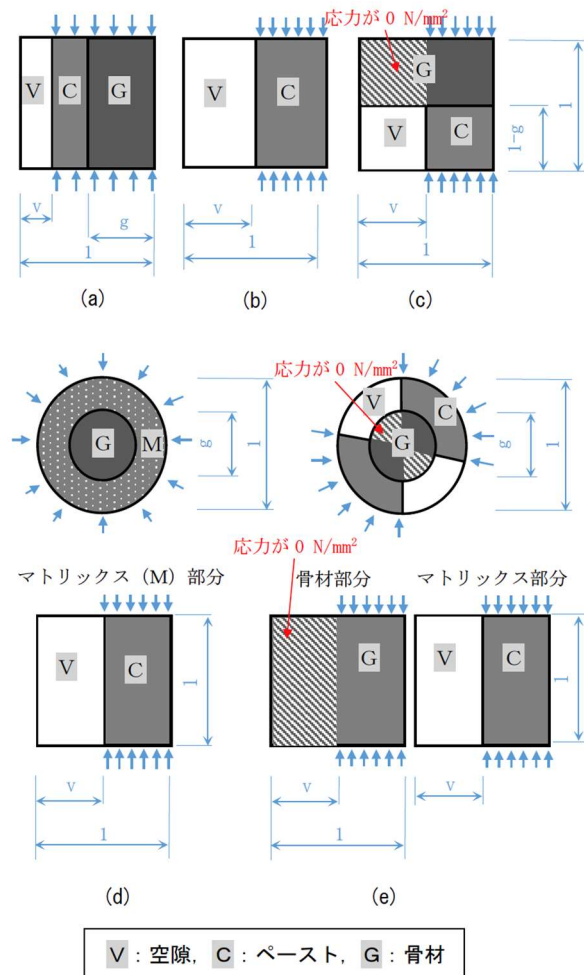


図-4 POC の各物理モデル

2.4 POC の弾性係数の計算

(省略)

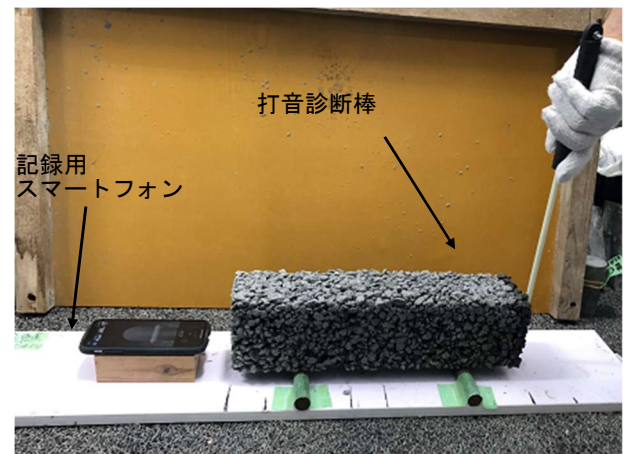


写真-1 打音法試験の測定の様子
(角柱試験体の場合)



写真-2 超音波試験の測定の様子
(円柱試験体の場合)

3. 実験

POC 試験体について、打音法試験（写真-1）および超音波速度試験（写真-2）を行った。得られた実験結果に基づき、POC の弾性係数と空隙率の関係、POC の超音波伝播速度と空隙率の関係、POC の固有振動数と空隙率の関係（図-5）などについて論じた。

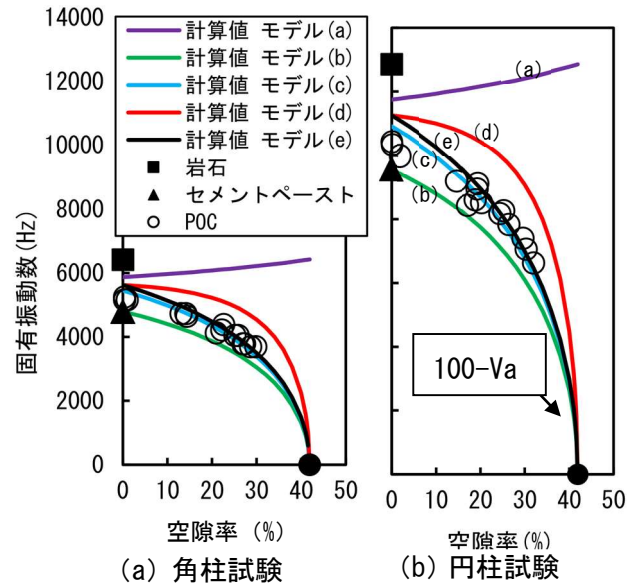


図-5 POC の固有振動数と空隙率の関係

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) POCの動弾性係数－空隙率関係は、骨材、ペーストおよび空隙の三要素を用いた簡単な物理モデルに基づく線形式で表示できた。
- 2) POCの超音波伝播速度－空隙率関係、および固有振動数－空隙率関係は、弾性振動波動論に基づく2次関数で概ね表示できることが確認された。
- 3) POCの動弾性係数、固有振動数の実測結果は物理モデル(c)および(e)による計算結果と比較的近い値となったが、超音波伝播速度の方は実測結果が多少大きくなる傾向が見られた。
- 4) POCの固有振動数は、試験体の寸法、形状などの影響を受けるため、打音法によるPOCの品質評価は施工現場での適用が難しい。ただし、測定条件などを把握できる実験室レベルでの評価には十分適用できる。

参考文献

- 1) 畑中重光（編集），透水性コンクリート（POC）の基礎と実践－環境共生型と豪雨対策を指して－，コンクリート新聞社，2019.8
- 2) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：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，Vol.83，No.749，pp.943-951，2018.7
- 3) エルドンオチル，曹偉，畑中重光：打音法によるポーラスコンクリートの空隙率推定，コンクリート工学年次論文集，日本コンクリート工学会，Vol.51，No.1，pp.1439-1444，2019.7
- 4) R. E, S. Hatanaka : Prediction of porosity of pervious concrete based on its dynamic elastic modulus, Results in Materials, Volume 10, 2021, 100192
- 5) 川上英男：コンクリートの弾性係数と近似複合理論，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.497-500，1995
- 6) 日本コンクリート工学会：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研究委員会報告書，pp.330-332，2015.6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10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 0件）

1. 著者名 エルドンオチル, 畑中重光	4. 巻 1
2. 論文標題 ポーラスコンクリートの動弾性係数-空隙率関係に及ぼす骨材粒径および空隙径の影響に関する実験的研究	5. 発行年 2020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 489-490
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 -
1. 著者名 坂本英輔, 蜂須賀央勝	4. 巻 1
2. 論文標題 ポーラスコンクリートの遠心脱水処理装置の作製に関する一検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会中国支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 .33-36
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 -
1. 著者名 坂本英輔, 杉原大祐	4. 巻 Vol. 42, No. 1
2. 論文標題 カナダ法を援用したポーラスコンクリートのアルカリシリカ反応特性に関する一検討	5. 発行年 2020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 1306-1311
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 坂本英輔	4. 巻 Vol. 56
2. 論文標題 ポーラスコンクリートのカンタブロ試験について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 建材試験情報	6. 最初と最後の頁 2-5
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 -

1. 著者名 曹偉、エルドンオチル、畑中重光	4. 巻 41(1)
2. 論文標題 接着媒質の影響を考慮した超音波法（表面法）によるポーラスコンクリートの空隙率推定	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 1433～1438
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 E Ridengaoqier, Shigemitsu Hatanaka	4. 巻 1
2. 論文標題 Hammering Test Evaluation of Dynamic Elastic Modulus and Void Ratio of Pervious Concrete	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)	6. 最初と最後の頁 99-103
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 エルドンオチル、曹偉、畑中重光	4. 巻 41(1)
2. 論文標題 打音法によるポーラスコンクリートの空隙率推定	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 1439～1444
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 森下拓海、中川武志、畑中重光	4. 巻 41(1)
2. 論文標題 ポーラスコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす運搬時間および混和剤の影響に関する実験的研究	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 1463～1468
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 Shigemitsu Hatanaka, Zilola Kamalova, Morihiro Harada	4. 巻 3
2. 論文標題 Construction of a nonlinear permeability model of pervious concrete and drainage simulation of heavy rain in a residential area	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Results in Materials	6. 最初と最後の頁 1
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 Zilola Kamalova, Shigemitsu Hatanaka	4. 巻 24, 6
2. 論文標題 Moving particle simulation for a simplified permeability model of pervious concrete	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers and Concrete, An International Journal	6. 最初と最後の頁 571-578
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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 曹偉、エルドンオチル、畑中重光
2. 発表標題 接着媒質の影響を考慮した超音波法 (表面法) によるポーラスコンクリートの空隙率推定
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 エルドンオチル、曹偉、畑中重光
2. 発表標題 打音法によるポーラスコンクリートの空隙率推定
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森下拓海、中川武志、畑中重光
2. 発表標題 ポーラスコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす運搬時間および混和剤の影響に関する実験的研究
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 畑中重光 (編著)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 コンクリート新聞社	5. 総ページ数 248
3. 書名 透水性コンクリート(POC)の基礎と実践 - 環境共生と豪雨対策を目指して -	

〔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	坂本 英輔 (Sakamoto Eisuke) (40583539)	広島工業大学・工学部・准教授 (35403)	
研究分担者	額 日登敖其尔 (E Ridengaoqier) (50880770)	東京理科大学・工学部建築学科・助教 (32660)	

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
---------	---------