

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13734

研究課題名(和文) バラスト振動変形挙動評価技術と地震防災・減災機能を強化する鉄道安全技術の構築

研究課題名(英文) Development and Estimation of Mathematical Modeling for Ballast Simulations and Earthquake Resistant Ballast Ground Mixed with the Stabilized Structure

研究代表者

奥村 弘 (Okumura, Hiroshi)

富山大学・学術研究部教育研究推進系・准教授

研究者番号：30355838

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)：地震大国・日本において首都直下型地震や南海トラフ巨大地震などの発生が予測されている中、バラスト基礎地盤のレジリエントな防災・減災機能の強化のため、バラスト基礎地盤の耐震性抵抗力を向上させるハード的対策技術と、その理論的支柱となる数値解析法が求められている。バラスト粒状体により構成される地盤の材料特性と、そのメカニズムを解明する新しい弾性体力学を構築し、大型三軸試験による実証データとシミュレーションとの整合により、耐震性に優れた地盤の評価技術を確立し、地盤の耐震性を高める安定化構造体と耐震基礎を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したマルチスケール変分法に基づく有限要素法では、バラスト材料力学だけでなく様々な物理現象に対する適用一般性を持つため、ほとんどの土木・地盤・工業材料における不均質材料の力学的材料特性を解明することができる。現在、土木・地盤・工業分野などにおける非均質材料の力学特性を定量的に分析する技術はバラスト材料のみならず幅広い分野において重要な存在となっており、将来的にも本研究開発課題は分野を超えた新材料の創出・高度化が得られる。今般、広島県で甚大な被害を及ぼした土石流が記憶に新しいが、本研究が成功した場合には、土石流の高精度予測技術としても応用できる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, earthquakes with an epicenter in Tokyo metropolitan area and Nankai Trough area have been predicted to occur in Japan. What we should start right now is to research and develop a resilient disaster prevention and mitigation functions of ballast foundations. A hardware technology to improve the seismic resistance of ballast foundations is required. Therefore we have studied and developed its numerical modelings and numerical analysis method. In this research, the modeling is to elucidate the material properties and mechanism of soil composed of ballast granular materials. Furthermore, by comparing the empirical data from a large scale triaxial test with the simulation, we were able to determine the effect of the earthquake resistance. A stabilized structure and an earthquake-resistant foundation were developed to improve the earthquake resistance of the ground.

研究分野：計算力学

キーワード：マルチスケール変分法 固体力学 流体力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の背景: 150年の鉄道史において、列車の発展に対し、バラスト(砕石)軌道はその評価技術の不在により敷設計画・安全性評価・メンテナンス計画などが経験的に実施されてきた。研究代表者はバラスト内へ高強度人工ブロックを投入し、コストを掛けずに軌道の沈下を抑制する技術を開発してきた。鉄道バラスト軌道は重要な交通インフラであり、耐震性向上は必要不可欠である。バラスト軌道破壊の修復・復旧には膨大な維持・補修費が必要であり、バラスト道床のレジリエントな防災・減災機能の強化のため、バラスト道床抵抗力を向上させるハード的対策技術と、その理論的支柱となる数値解析法が求められている。

(2) 実用化への技術課題: 基礎地盤材料を構成する単粒度砕石(バラスト砕石)の個々としての物理的・化学的性質や工学的分類は、観察と粒度試験などにより地盤材料として分類されているが、単粒度砕石の集合(地盤全体)としての力学的材料特性や応答のメカニズムは理論的に解明されていない。鉄道の単粒度砕石に関する従来の研究では「軌道破壊現象」と高強度人工ブロックを投入した混合軌道の「沈下抑制効果」のメカニズムが理論解明できず、実用化の重要な技術課題となっている。

(3) 数値解析上の問題: これまでに粉体や粒状体の数値解析では、主に離散要素法(Discrete Element Method、略してDEM)が用いられてきた。DEMでは、粉体・粒状体の塊を構成している粒子の一粒一粒を、塊全体(粒子の集合体)の空間スケール(サイズ)と相対的に微小な「離散粒子」として擬似させる(通常、離散粒子は、円形・球体・多面体など数値解析上あるいは形而上、扱い易い形状が選ばれる)。また、一般的に離散粒子の複数個間に働く力学モデリングの煩雑化を避けるため、離散粒子は同一形状・同一スケールつまりすべて同じ大きさ(粒子径分布を有するアプローチもあるが同一形状として擬似される場合が多い)の謂わば「粒ぞろい」の粒子運動シミュレーションを実行する。このとき、もっともらしい数値解析結果を得るために離散粒子の個数を所望にまで増やす。その個数を粗く見積もると、離散粒子の個数を n としたとき、粒子径は $1/n$ となり、3次元計算では n^3 個程度にまで離散粒子の個数が飛躍的に増大していく。つまり、DEMシミュレーションにおける計算上のボトルネックの一つは計算機メモリ量の制約である。ちなみに、この制約を少しでも緩めるためにGPU(Graphics Processing Unit、略してGPU)計算によるアプローチも試みられてはいるが、結局はGPUメモリの上限に突き当たる。そして、個々の離散粒子の運動は、ニュートンの第2法則に基づいたラグランジュ的運動方程式によって表現され、離散粒子間に働く力学的作用については、単純なバネ、ダッシュポットおよびフリクションスライダーを用いてモデル化される場合が多い。一方、バラスト粒状体は単粒度といえども個々の形状はてんでばらばらで、それぞれのサイズは約数センチメートルもあり(参考までに砂粒子の径は0.02から2ミリメートル)、解析対象となる地盤全体の空間スケールはせいぜい数十から数百メートル程度と相対的に小さい。DEMや粒子法では「離散粒子の個数 n を無数に増やせば、粒子径は $1/n$ の収束速度で微分値の如くどんどん微小に漸近し、それらの疑似総体は実体に近づくであろう」という哲学的態度が見える。しかしながら、この態度ではバラスト地盤の数値モデリングは研究開発着手即座にして理論的破綻手前にて窮すること必至であり、粒子間に働く力学的作用もバラスト粒状体の空間スケールとさらにはそれぞれにて異なる複雑形状を考えればバネ、ダッシュポット、フリクションスライダーだけで説明することは心許ない。また、地盤中に散在させる安定化構造体を円形あるいは球体として形状モデリングさせることはできないため、DEMや粒子法のアプローチでは通用しがたい。

2. 研究の目的

バラスト地盤抵抗力を向上させるハード的対策技術の理論的支柱となる数値解析法を開発する。本研究では、安定化構造体(直方体形状の高強度人工ブロック)が混入された単粒度バラスト砕石により構成される基礎地盤を対象とする。検証には、大型三軸圧縮試験において得られている実証データと数値解析結果を比較することにより実施する。具体的には、従来の大型三軸圧縮試験において見受けられたバラスト供試体の挙動との一致を確かめる。そして、安定化構造体を投入した混合単粒度砕石の沈下抑制効果メカニズムの理論的解明を探究する。

3. 研究の方法

(1) 数値モデルの開発: 大型三軸圧縮試験により得られる実証データと比較するために、単粒度砕石により構成された基礎地盤に安定化構造体を混入した数値モデルを構築する。大型三軸圧縮試験により得られたバラスト供試体の挙動と、本数値モデルに基づく数値解析結果と照らし合わせることで、本研究で開発した数値モデルの有効性および整合性を検討する。なお、本数値モデルは、基礎地盤を構成する単粒度砕石の局所的かつマルチスケール現象が、単粒度砕石集合体としての基礎地盤に及ぼす力学的材料特性とそのメカニズムを表現することができるものが望ましい。このとき、基礎地盤に混入された安定化構造体との接点あるいは接着面に生じる接触力のモデリングも併せて開発する必要がある。

(2) 数値解析手法の開発: 基礎地盤における力学的微視現象を捕捉するため、マルチスケール変分法に基づく計算力学手法を開発する。このとき、固体内を伝播する波動問題にも資するものでなければならない。そこで、計算力学手法を構築する微分方程式としては、弾性体や波動現象を解析するうえで基本となる移流拡散方程式および保存系力学方程式を対象とする。

4. 研究成果

(1)本研究開発では、安定化構造体として直方体形状の高強度人工ブロックであるモモコキューブ®（特許第 5156900「単粒度骨材からなる構造物の基礎及びその施工方法」）を用い、基礎地盤を構成する単粒度碎石（図 1）の局所的な運動とマルチスケール構造が、それら集合体としての基礎地盤に及ぼす力学的材料特性とそのメカニズムを表現することができる数理モデルを構築する。

さて、研究代表者は思案を重ね、バラスト粒状体により構成される基礎地盤の力学特性は弾性体と見なして差し支えないことに考え至った。なぜなら、バラスト粒状体個々の形状を平均化すれば球体であり、降伏条件に達しなければ、その粒子の集合体はある種の弾性体として挙動することが実証的に分かっているからである。逆に、バラスト基礎地盤が弾性体でなければ、応力・ひずみ関係式（フックの法則）は成り立たないはずであり、バラスト基礎地盤の抵抗力は生じなくなってしまふ。そこで本研究では、この弾性体中にバラスト粒状体と異なる力学特性を有する安定化構造体である高強度人工ブロックを混在させ、その基礎地盤全体の力学挙動および力学特性を解明するために新しい弾性体力学理論を構築する。

まず、ユークリッド座標系 $x \in \Omega$ において、変位場を \mathbf{u} とし、次式による平面応力状態とした弾性体応力 $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}, E, \nu)$ と外力（体積力：地震動など） \mathbf{f} のつり合い方程式を考える（図 2）。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \rho \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega \quad (28)$$

ここで、 ρ は密度であるが、弾性体と高強度人工ブロックの密度は異なるため、 $\rho = \rho(x)$ は空間に分布する関数と見なせる。さらに、弾性係数 $E(x)$ とポアソン比 $\nu(x)$ も分布関数となる。このことにより、この弾性体力学は高強度人工ブロックの自由界面（表面）を有する問題と見なせる。このとき、本研究で提案する新しい弾性体モデリングでは、バラスト粒状体（平均化すれば球体）と高強度人工ブロックの表面接触面 $\Sigma = \partial\Omega^b$ において以下の運動学的条件(29)と、ブロック自由界面（表面）の法線ベクトルを \mathbf{n} としたときの動力学的条件(30)を与える。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^b \quad \text{on } \Sigma \quad (29)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} - \boldsymbol{\sigma}^b \cdot \mathbf{n} = \alpha \kappa^b (1 - \kappa / \kappa^b) \mathbf{n} \quad \text{on } \Sigma \quad (30)$$

ここで、上付き文字 b は高強度人工ブロックを指す。また、 κ はバラスト粒状体（球体）の平均曲率、 κ^b は高強度人工ブロックの曲率、 α は表面接触力モデルにおけるパラメータである。もし、式(30)において、 $\kappa = \kappa^b$ を選べば、動力学的条件の表面接触力はゼロとなることから、高強度人工ブロック形状に円形（2次元）あるいは球体（3次元）を選んだ場合、バラスト地盤の抵抗力はなんら改善しないことが理論的に示される。このとき、動力学的条件は、接触面 Σ をまたがる法線方向の応力 $[p]$ のジャンプ条件である：

$$[p] = p - p^b = \alpha \kappa^b \quad \text{on } \Sigma \quad (31)$$

この高強度人工ブロック自由界面を有する弾性体に対する有限要素法による解析のため、高強度人工ブロック表面（自由界面） Σ の挙動を表すレベルセット(Level Set)関数 φ と距離関数 dist を次のように導入する：

$$\varphi(x) = \begin{cases} +\text{dist}(x, \Sigma) & (x \in \Omega^b) \\ 0 & \text{on } \Sigma \\ -\text{dist}(x, \Sigma) & (x \in \Omega) \end{cases} \quad (32)$$

ここで、レベルセット関数は以下の性質を有する。

$$|\nabla \varphi| = 1$$

また、自由界面 Σ 上の法線ベクトル \mathbf{n} はレベルセット関数を用いて以下のように求めることができる。

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \Big|_{\varphi=0} \quad (33)$$

図 3 に距離関数 dist のコンター分布図($\text{dist} = 0$ がブロック表面)を示す。図 3 のように、レベルセット関数と距離関数を用いて、複数（有限個）かつ任意形状の高強度人工ブロックを表現することができる。さらに、高強度人工ブロックの自由界面近傍を表現するために、近似ヘビサイ



図 1 安定化構造体と単粒度碎石

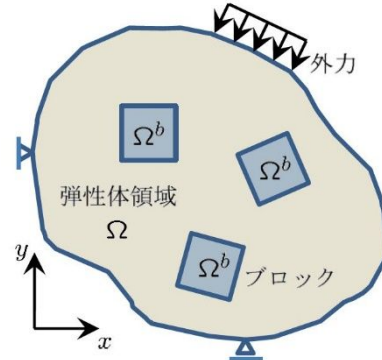


図 2 数理モデル

ド関数 H と近似デルタ関数 δ を導入する .

$$H(\phi, D) = \frac{1}{2} \max \left[-1, \min \left\{ \frac{\phi}{D} + \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi \phi}{D} \right) \right\} \right] \quad (34)$$

$$\delta(\phi, D) = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\pi \phi}{D} \right) \right\} \left\{ \text{sign} \left(1, \frac{\phi}{D} + 1 \right) - \text{sign} \left(1, \frac{\phi}{D} - 1 \right) \right\} \quad (35)$$

ここで, D はブロック表面近傍の界面幅である . このとき, 近似ヘビサイド関数と近似デルタ関数はレベルセット関数によって, 図 3 のような分布が得られる . このとき, 式(28)に対して, 三角形 1 次要素 (3 次元問題では四面体 1 次要素) を用いた有限要素近似により計算機上で数値解析を行うことができる . ここで, 本数値解析により得られた正規化したパラスト領域にブロック無しのもと, 四角形ブロックを混入した場合の弾性体解析結果のコンターを示す (図 4) . なお, ここでコンターは水平方向の変位 u を示している . これらの数値解析結果より, 四角形の高強度人工ブロックでは, パラスト粒状体の局所的な回転モーメント力の組み合わせによってパラスト粒状体集合の地盤全体に生ずる載荷抵抗力を高めていることが分かる . 次に, この正規化したパラスト地盤中に, 9 個の四角形ブロックをランダムに配置した場合の数値解析結果を図 5 に示す . この数値解析結果では, 実用に最も近いブロックをランダム配置した弾性体変形解析において, ブロック無しの場合と比較して, 鉛直変位が 2 割 ~ 3 割も低減されている . このことは, 従来の大型三軸圧縮試験において見られたパラスト供試体の挙動と一致していることを示している . さらに, 本研究において提唱したパラストと高強度人工ブロック間に作用する表面接触力モデルの妥当性が検証できたといえる . さらに, 安定化構造体として高強度人工ブロックを投入した単粒度碎石の「沈下抑制効果」のメカニズムは, 論理的に解明が深まったといえる .

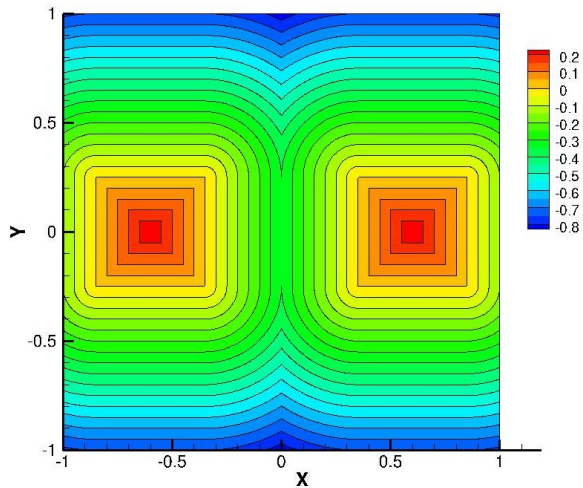


図 3 ブロック表面を表す距離関数の分布

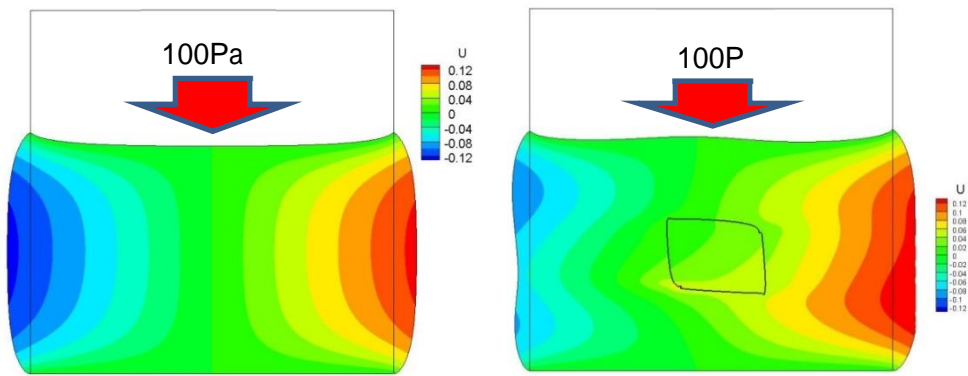


図 4 ブロック形状に対する弾性体解析の変形結果

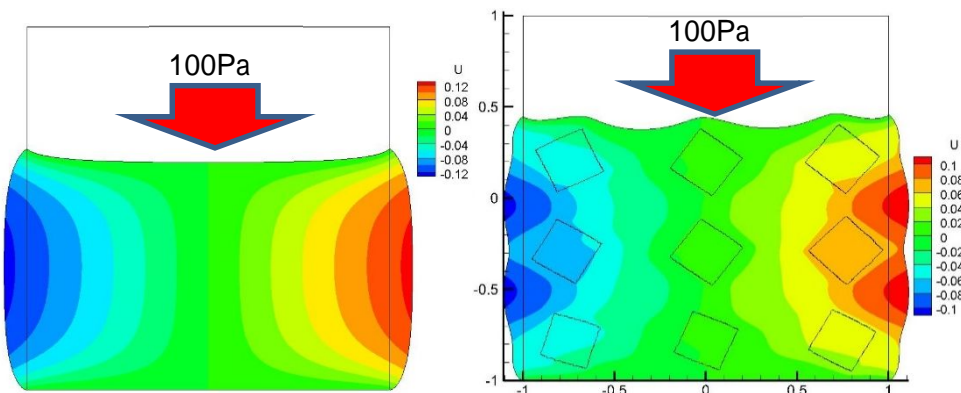


図 5 ランダムに四角形ブロックを配置した弾性体解析の変形結果

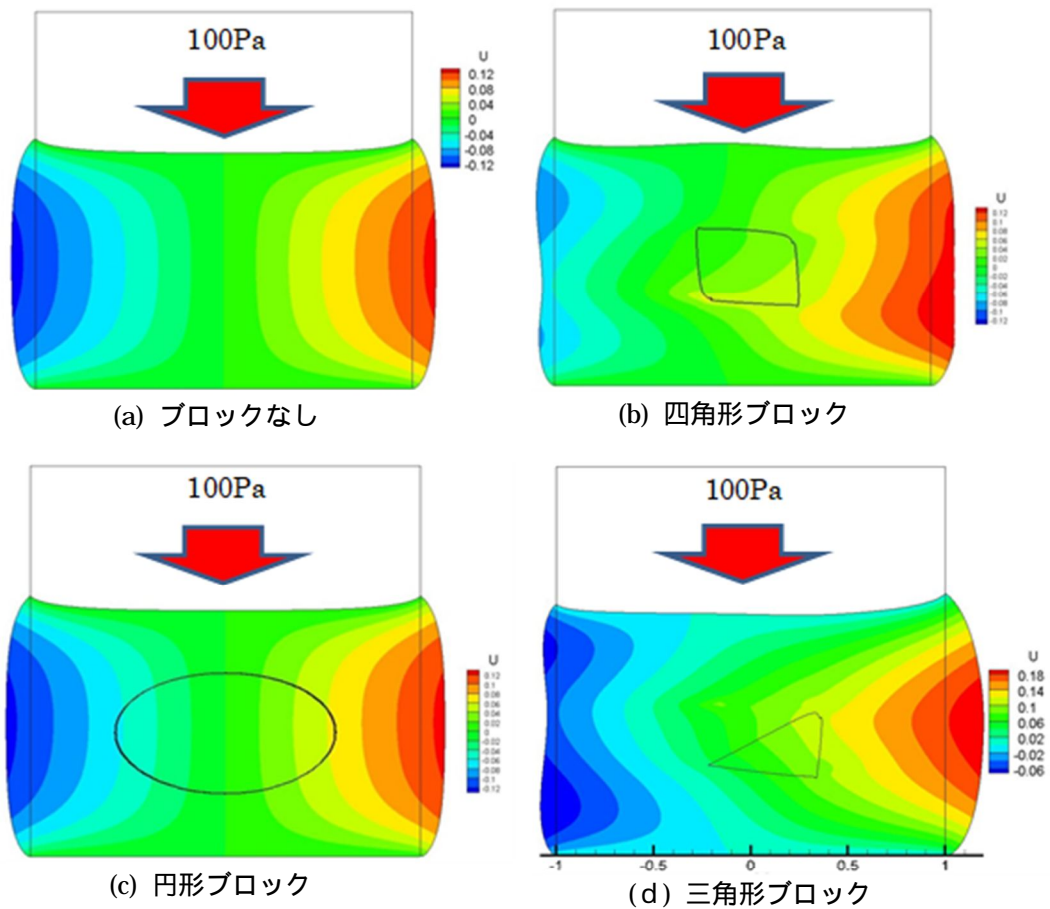


図6 ブロック形状に対する弾性体解析の変形結果

(2) 耐震性に優れた地盤材料評価技術の確立と安定化構造体の最適形状の開発：図6に正規化したバラスト領域に(a)ブロック無し，(b)四角形ブロック，(c)円形ブロック，(d)三角形ブロックを混入した場合の数値解析結果を示す（ここでコンターは水平方向の変位 u ）。これらの計算結果より，円形ブロックではバラスト地盤の抵抗力を高めることはほとんどできないことが分かる．一方，四角形ブロックでは，バラスト粒状体の局所的な回転モーメント力の組み合わせによってバラスト粒状体集合の地盤全体に生ずる荷重抵抗力を高めていることが分かる．三角形ブロックでも若干の効果がみられるものの，水平方向に非対称な変位（側方流動）が発生し，また荷重側の三角形頂点でブロックが著しく変形し，実用的には破壊・破損の可能性があるといえる．このことにより，四角形ブロックが最もバラスト地盤の抵抗力を高める形状であることがわかる．

<引用文献>

松井明，上野実，長橋孝次，前川浩信，梶谷公康：鉄道軌道安定化のための，有機繊維強化コンクリート構造体および安定化工法の開発，富山県工業技術センター研究報告，No.24 (2010.7) p.66.

長橋孝次，上野実，九曜英雄，伊能忠敏：実物大模型による道床バラストの沈下抑制物，土木学会年次学術講演会講演概要集（CD-ROM），Vol.66 (2011.8).

上野実，九曜英雄，山崎泰之，長橋孝次，前川浩信：鉄道軌道安定化のための有機繊維強化コンクリート構造体および安定化工法の開発，富山県工業技術センター研究報告，No.25 (2011.7) p.102.

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 0件）

1. 著者名 Hiroshi Okumura	4. 巻 13 (2)
2. 論文標題 Variational Multiscale Finite Element Method Based on Bubble Element for Steady Advection-Diffusion Equations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Memoirs of The Faculty of Human Development, University of Toyama	6. 最初と最後の頁 297-304
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 奥村 弘	4. 巻 12 (2)
2. 論文標題 バラスト解析に対する弾性体モデルの提案および安定化構造体を混入した耐震バラスト基礎の開発と評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 富山大学人間発達科学部紀要	6. 最初と最後の頁 113-121
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0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----