

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11337

研究課題名（和文）マルチフェイズ並列解法による多相連成災害の予測と現象解明

研究課題名（英文）Multiphase parallel computation method to predict and understand disasters caused by gas-liquid-solid interactions

研究代表者

牛島 省（Ushijima, Satoru）

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号：70324655

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マルチフェイズ・並列計算手法の適用性に関する検討を行い、以下の成果を得た。(1) 礫層上面に衝突する鉛直下方噴流によって生ずる礫粒子運動と水流の連成過程が適切に計算されることが示され、礫粒子の移動経路や間隙水圧、礫粒子間の接触力などが計算で得られた。(2) 礫層下面から流入する鉛直上昇流により、(1)と同様に現象を再現する計算結果が得られることを確認した。(3) 高粘性流体や非ニュートン流体の基本的な挙動、また吸水性粒子間の浸透流などに対して、それらの特性を再現する計算結果が得られることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、マルチフェイズ・並列計算手法の適用性に関する検討を行い、約1万7千個の礫粒子から構成される礫層に水流が作用する流体固体連成現象を適切に数値計算できることが示された。この解法では、個々の礫粒子を複数の四面体要素で表し、礫粒子に作用する流体力は、固体に作用する圧力と粘性応力に相当する計算結果から求める。礫粒子の接触力や移動経路、間隙水圧など、現象解明に役立つ計算結果が得られることが示された。この結果をまとめた論文は、令和2年5月に応用力学論文賞を受賞し、一定の学術的評価が得られたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the applicability of the multiphase parallel computation method has been investigated mainly to the fluid-solid interaction problems. The obtained results are summarised as follows: (1) Hydraulic experiments and numerical predictions were conducted for the local scour on the gravel bed caused by an impinging vertical water jet. It was confirmed that the calculated gravel-bed shapes are in good agreement with the experimental results. In addition, the total traveling length of each gravel particle, contact forces between particles, and pore water pressure were obtained with the computation method. (2) Similar results to (1) were shown in case that the upward vertical flow enters from the bottom of the gravel particles with the computation method. (3) It was shown that the essential characteristics are reasonably calculated for the high viscous fluids, non-Newtonian fluids and seepage flows among the absorbent particles.

研究分野：計算科学

キーワード：マルチフェイズモデル 流体固体連成 固気液多相場 局所洗掘現象 浸透流 並列計算

## 1. 研究開始当初の背景

比較的簡単な多相連成現象，例えば気液界面(自由液面)の変動や，水流により海底砂面が変形する問題では，液相以外の相は移動境界として扱う計算手法がこれまでに提案されている．しかし，自然災害などの実現象は極めて複雑であり，多数の固体の移動と衝突，激しく変動する自由液面など，従来の連成解法では取り扱いが難しい課題が多く含まれている．このため，経験則を使用せずに，多相間の力学連成を十分な精度で扱え，しかも数値的に安定かつ高効率なマルチフェイズ並列計算手法の有効性を確認することが期待されていた．

## 2. 研究の目的

津波・高潮・洪水に伴う土砂輸送や漂流物災害などの自然災害の多くは，現象の素過程に着目すると，固気液相が複雑に連成する多相現象と見ることができるとしている．この多相連成災害を，経験則を使わずに，直接数値的に再現することを目的として，申請者はマルチフェイズ解法の開発と検証を進めてきた．本研究では，このマルチフェイズ解法を，より広範かつ大規模な問題を扱えるように拡張すること，すなわちモデルの高度化と，高速演算法の導入を進め，さらに計算結果を利用して実現象のメカニズムを解明することを目的とする．

## 3. 研究の方法

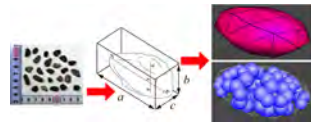
本研究では，マルチフェイズ解法に対して，(A) モデルの高度化，(B) 高速演算法の導入，(C) 計算結果に基づく現象のメカニズムの解明，を行うという方法で研究展開を図る．(A) モデルの高度化では，固体形状，例えば礫粒子の形状やそのばらつきをより精度良く表現するモデルを検討した．また，(B) 高速演算法の導入では，京都大学のスーパーコンピュータシステム(Intel Xeon Phi KNL) の必要なノード数を通年確保して，メニーコアシステムにおけるハイブリッド並列演算法を，計算機アーキテクチャに適した形で導入し，高演算負荷となるホットスポットの高速計算を進めた．さらに，(C) 計算結果に基づく現象のメカニズムの解明では，1万個以上の礫粒子群と流体との連成問題に対して，個々の礫粒子の移動経路や，礫粒子に作用する流体力および他の粒子との接触力，また粒子間隙流体の圧力などが数値計算で得られることを示した．これらの数値計算で得られた物理量から，礫粒子層の非定常的な洗掘過程を明らかにした．また，自由水面流中の3次元柔軟物体の連成計算手法により得られた数値計算結果から，物体の変形と自由水面変動の減衰との関係を考察した．

## 4. 研究成果

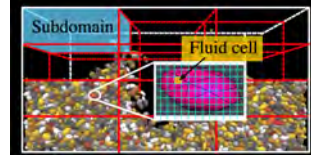
本研究では，マルチフェイズ・並列計算手法の適用性に関する検討を行い，以下の成果を得た．

- (1) コロケート格子有限体積法によるマクスウェル流体の構成式の離散化手法について検討を行った．この研究では，粘弾性流体を表すモデルの一つである非圧縮性マクスウェル流体の基礎方程式を2次元コロケート格子上で有限体積法により計算する手法を検討した．著者が提案したコロケート格子を用いる非圧縮性ニュートン流体の解法を改良し，マクスウェル流体の構成式を基礎方程式に加え，運動方程式中の応力項を計算する際の流速の参照点を空間的にコンパクトにする手法を提案し，非物理的な数値振動を抑制できることを数値実験により確認した．さらに，流速の発散を制御可能なC-HSMAC法を圧力解法に用いることにより，通常のSMAC法で発生する可能性のある応力の数値振動を抑制できることを確認した．最後に，簡単な数値実験を通じて，提案された計算手法によりマクスウェル流体の弾性的な挙動を定性的に再現できることを示した．
- (2) 接触を伴いながら移動する多数の固体粒子と気液相との力学的な連成を扱うことが可能な並列計算手法の適用性を検討した．この解法では，固体粒子に作用する流体力は，相平均モデルにより計算された圧力と粘性の発散を体積積分して求められる．また，固体粒子は，複数の四面体要素により表現され，表面内部に接触判定球を配置して，個別要素法により接触が扱われる．

## 礫粒子のモデリングと並列解法

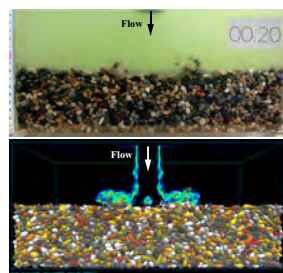


- 各礫を四面体要素で表し、複数の接触判定球 (CDS) を内部に設定



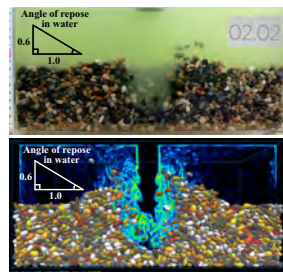
- 流体計算セルを礫より細かく設定、領域分割による並列計算

### 1. 非平衡洗掘過程 ( $t = 0.2$ [s])



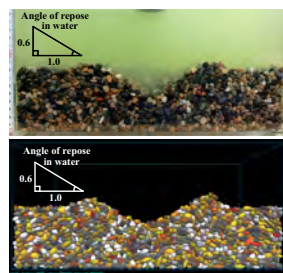
- 噴流衝突部付近で礫面洗掘, その外周部で礫粒子の堆積が進行し, 礫面形状が時間とともに変化する

### 2. saltation-collapse 平衡状態 ( $t = 2.2$ [s])



- 流れによる礫粒子の巻き上げ・崩落が平衡状態にあり, 安息角より急勾配で礫面形状はほぼ一定に見える

### 3. 安息角静止状態 (噴流停止後)



- 礫層が崩落し, 礫面角度が水中安息角に近い状態で静止した礫面洗掘形状となる

約 16,700 個の平均粒径約 7mm の礫粒子を含む約 80mm の礫層に, 流速約 1.2m/s の鉛直噴流を 3 秒間衝突させる実験結果に, この解法を適用した. 計算には, 京都大学のスーパーコンピュータ CRAY XC40 を利用し, 4,352 コアを利用する並列計算を行った. その結果, 礫粒子移動過程は, (A) 非平衡洗掘過程, (B) saltation-collapse 平衡状態, (C) 安息角静止状態, という 3 段階

に分類され、それぞれの過程が適切に計算されることを確認した。この研究成果を掲載した論文は、令和2年5月に応用力学論文賞を受賞し、一定の学術的評価が得られたと考えられる。

- (3) ニュートン流体である高粘性液体を鉛直下方に流入させて、上面に開口部を有する2次元矩形容器内に充填する数値計算を行った。周囲の低粘性気体を同時に計算するため、密度と粘性の異なる2つの非圧縮性流体に対する相平均モデルを利用し、これをコロケート格子有限体積法で離散化した。特に、計算セル境界における粘性係数、密度および流速の平均化手法に考察を加え、ダムブレイク問題を通じてその有効性を確認した。提案された計算手法を用いて、高さ  $H$  の矩形容器に幅  $d$  の上部流入口から高粘性液体を充填する問題を計算した結果、高粘性液体のレイノルズ数  $Re$  と  $H/d$  の条件により発生する、steady filling, spreading, splashing, buckling という異なるフローパターンが既往研究と同様に再現されることを示した。
- (4) 埋め込み境界法や相平均モデルでは、離散化した運動方程式右辺に現われる流体と固体の相互作用項に、流体計算の時間増分  $\Delta t$  が含まれる。本報では、この相互作用項に含まれる  $\Delta t$  が計算結果に与える影響を確認するため、相平均モデルを用いてダルシー則が成り立つ低レイノルズ数領域を対象とした粒子間隙流れの数値実験を行った。均一な球を規則的に配置した場合、および複数の異なる粒径を有する球をランダムに配置した場合のそれぞれについて、空間分解能と時間分解能に関する検討を行った結果、空隙に対するセル解像度  $R_s$  を 5000 ~ 10000 程度に設定することで十分な空間分解能を設定できることを確認し、このとき、拡散数  $D$  を  $6.0 \times 10^{-3}$  以下に設定すれば、 $\Delta t$  が計算結果に与える影響を十分小さくできることがわかった。
- (5) The damping effects on the free-surface motions due to the presence of the deformable solid bodies suspended in the fluid were numerically investigated. The computational method is based on a full Eulerian model that can deal with the interactions between Newtonian fluids and visco-hyperelastic solid bodies. In the numerical predictions, the free-surface motions caused by the so-called dam-break conditions, including four spherical visco-hyperelastic bodies, were calculated with two cases of non-dimensional shear moduli,  $G = 0.1$  and  $10.0$ , of the visco-hyperelastic bodies, which have the same density as that of the liquid phase. As a result of the computations, the following reasonable results were obtained; when the solid bodies are highly flexible ( $G = 0.1$ ), the free-surface motions are almost the same as those having no solid bodies. In contrast, it was demonstrated that the damping effects are obviously large in case that the stiffness of solid bodies increases ( $G = 10.0$ ).
- (6) In the computations of incompressible fluids, it is essentially important to obtain accurately the velocity components that satisfy the incompressible condition ( $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ ) as well as the pressure variables which are consistent with the velocity fields. For this purpose, a pressure-velocity correction method (C-HSMAC method) has been proposed by Ushijima et al. (2002) with a finite volume method (FVM) for incompressible fluids. The purpose of this paper is to estimate the effects of the unsatisfied incompressible condition on the passive scalar convection and to confirm that the C-HSMAC method is able to suppress them. The C-HSMAC and usual SMAC methods were applied to the passive scalar convection in the cavity having an oscillating top wall. It was concluded that the unsatisfied incompressible condition may cause the unphysical scalar overshoots in the SMAC method. In contrast, the C-HSMAC method enables us to control  $|\nabla \cdot \mathbf{u}|$  with the given threshold  $\epsilon_D$  and to suppress such overshoots. In addition, it was demonstrated that the C-HSMAC method allows us to obtain reasonable results without overshoots even in combination with a higher-order scheme for convection terms with finer cell divisions.

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 0件）

1. 著者名 Nobuyuki Hirooka and Satoru Ushijima	4. 巻 12
2. 論文標題 Computation of Free-Surface Flows Including Particles through Porous Media Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 8,14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.12.8	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 Satoru Ushijima, Niku Guinea and Daisuke Toriu	4. 巻 12
2. 論文標題 Numerical Prediction for Damping Effects of Suspended Deformable Bodies on Wave Motions of Free-Surface Flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 2,7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.12.2	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 永野 浩大, 鳥生 大祐, 牛島 省	4. 巻 76
2. 論文標題 吸水性粒子の間隙における自由液面流れの数値解析手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_109, I_117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_109	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 九鬼 愛夢, 鳥生 大祐, 牛島 省	4. 巻 76
2. 論文標題 有限体積法による高粘性ニュートン流体の容器充填の数値計算	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_131, I_141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_131	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 S. Ushijima, H. Tanaka, D. Toriu	4. 巻 6
2. 論文標題 Validity of Pressure-Velocity Correction Algorithm (C-HSMAC method) for Incompressible Fluids with Passive Scalar Convection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. ADV. SIMULAT. SCI. ENG.	6. 最初と最後の頁 260-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.6.260	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 田中 寛樹, 鳥生 大祐, 牛島 省	4. 巻 75
2. 論文標題 固体粒子の間隙流体計算における時間・空間分解能の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_269-I_276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_269	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 牛島 省, 鳥生 大祐, 柳 博文, 田中 寛樹	4. 巻 75
2. 論文標題 鉛直噴流による礫粒子群輸送と saltation-collapse 平衡の数値解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_289-I_300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_289	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 永野 浩大, 鳥生 大祐, 牛島 省	4. 巻 Vol.74
2. 論文標題 コロケート格子有限体積法によるマクスウェル流体の構成式の離散化手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_277-I_284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.74. I_277	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27件（うち招待講演 1件／うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Niku Guinea, 九鬼 愛夢, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 Computations of Highly Viscous Newtonian Fluids and Visco-Hyperelastic Solid Bodies with Multi-phase Modeling
3. 学会等名 京都大学第15回ICTイノベーション
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 寛樹, 大野 絢平, 永野 浩大, 廣岡 信行, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 粒子間隙流れに対するマルチフェイズ解法の適用例
3. 学会等名 京都大学第14回ICTイノベーション
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 寛樹, 牛島 省, 鳥生 大祐, 柳 博文
2. 発表標題 固体・流体間の力学連成を考慮した鉛直噴流による礫群輸送のマルチフェイズ並列計算
3. 学会等名 京都大学第13回ICTイノベーション
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永野 浩大, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 非圧縮性粘弾性流体の圧力解法
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳 博文, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 多相場モデルを用いた礫群輸送の3次元並列計算
3. 学会等名 計算工学講演会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永野 浩大, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 コロケート格子有限体積法によるマクスウェル流体構成則の計算法
3. 学会等名 土木学会第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣岡 信行, 牛島 省
2. 発表標題 パネ・ダッシュポット支持された捕捉粒子で分離される粒子群と自由表面流れの計算
3. 学会等名 第23回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永野 浩大, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 吸水性粒子の間隙における自由液面流れの数値解析手法
3. 学会等名 第23回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 田中 寛樹, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 非球形粒子間隙を通過する Non-Boussinesq 密度流の数値解析
3. 学会等名 第23回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 九鬼 愛夢, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 有限体積法による高粘性ニュートン流体の容器充填の数値計算
3. 学会等名 第23回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野 絢平, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 多数の静止固体間を流れるニュートンおよびビンガム流体から構成される2流体の数値計算
3. 学会等名 第23回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 寛樹, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 相平均を利用する非圧縮性流体-固体連成計算手法の時間分解能
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wei Liu, Daisuke Toriu, Satoru Ushijima
2. 発表標題 Pressure-based Algorithm for Compressible Fluid without Low-Mach-number Approximation
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoru Ushijima, Niku Guinea, Daisuke Toriu, Atomu Kuki
2. 発表標題 Numerical simulation of damping effects on free-surface motions due to deformable bodies
3. 学会等名 JSST 2019, p68, Miyazaki, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodai Nagano, Daisuke Toriu, Satoru Ushijima
2. 発表標題 Computations of free-surface flows in porous media composed of swelling objects
3. 学会等名 JSST 2019, p46, Miyazaki, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuyuki Hirooka and Satoru Ushijima
2. 発表標題 Computation of Free-Surface Flows Including Particles through Porous Media Structure
3. 学会等名 JSST 2019, p62, Miyazaki, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoru Ushijima, Daisuke Toriu and Hiroki Tanaka
2. 発表標題 Parallel Computations of Fluid-Solid and Solid-Solid Interactions in Many Non-Spherical Gravel Particles Driven by Water Flows
3. 学会等名 APCOM 2019 TAIPEI, TAIWAN (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 寛樹, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 3次元相平均モデルによる粒子群中の浸透流の数値解析
3. 学会等名 計算工学講演会論文集, Vol.24, B-03-05 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳 博文, 牛島 省, 鳥生 大祐
2. 発表標題 粒子・流体間の力学連成を考慮した多数の礫粒子輸送の数値計算
3. 学会等名 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoru Ushijima, Daisuke Toriu, Hirofumi Yanagi
2. 発表標題 Multiphase Model to Predict Many Gravel Particles Transported by Free-Surface Flows
3. 学会等名 Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF '18) The 17th International Conference on Fluid Flow Technologies (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Ushijima, H. Tanaka, W. Liu, D. Toriu
2 . 発表標題 Applicability of Pressure-Velocity Correction Algorithm (C-HSMAC method) to Incompressible Fluids with Passive Scalar Convection
3 . 学会等名 JSST 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Ushijima, W. Liu, H. Tanaka, D. Toriu
2 . 発表標題 Computational Method for Compressible Fluids with Pressure-Poisson Equations
3 . 学会等名 JSST 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hirofumi Yanagi, Daisuke Toriu, Satoru Ushijima
2 . 発表標題 3D parallel computation for transportation of gravel particles due to downward water jets
3 . 学会等名 JSST 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kosei Sakakibara, Daisuke Toriu, Satoru Ushijima
2 . 発表標題 Implicit Eulerian method for transportation of multiple deformable objects
3 . 学会等名 JSST 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 柳 博文, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 相平均モデルを用いた鉛直噴流による礫群輸送の数値解析
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榊原 幸星, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 柔軟物体と流体の連成計算手法
3. 学会等名 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牛島 省
2. 発表標題 相平均モデルによる流体・固体連成計算とその応用
3. 学会等名 土木学会応用力学委員会・関東地区応用力学フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 土木学会 応用力学委員会 計算力学小委員会 編	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善株式会社	5. 総ページ数 360
3. 書名 いまさら聞けない計算力学の定石	

1. 著者名 牛島 省	4. 発行年 2020年
2. 出版社 森北出版株式会社	5. 総ページ数 288
3. 書名 数値計算のためのFortran90/95プログラミング入門 (第2版)	

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

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