

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K15346

研究課題名（和文）ラグランジュ型非ダルシー流解析モデルの改良と応用～現場適用を目指して～

研究課題名（英文）Improvement and application of numerical models for non-Darcy flow based on Lagrangian method -for the purpose of on-site application-

研究代表者

泉 智揮（Izumi, Tomoki）

愛媛大学・農学研究科・准教授

研究者番号：40574372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ダルシー則に従わない浸透流（非ダルシー流）の解析が不可欠な現場の問題に取り組むために、ダルシー則を拡張した非線形抵抗則に基づく支配方程式による浸透流解析モデルについて、より一般的な土壌への適用が可能になるように本モデルの汎用性の向上について検討するとともに、具体的な現場の問題として、豪雨時の山地斜面への降雨浸透流および暗渠周りの浸透・排水流の解析への適用可能性を検証した。豪雨時の山地斜面への降雨浸透流解析については不飽和領域の取り扱いについて課題が残ったが、研究目的をおおむね達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の浸透流解析モデルはダルシー則に基づく支配方程式によるものであり、その解析対象はダルシー流が前提である。本研究で改良を加え現場適用を検討した浸透流解析モデルは、ダルシー則を拡張した非線形抵抗則に基づく支配方程式によるものであり、ダルシー流および非ダルシー流を解析できるモデルである。また、近年、豪雨による土砂災害が毎年のように各地で発生していることを背景に、具体的な現場の問題として、豪雨時の山地斜面への降雨浸透流解析への適用可能性の検証に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：In this study, a numerical model for the non-Darcy flow which is developed in the preceding research project is improved to obtain the versatility of the model and its applicability to two in-situ problems that are the rainfall infiltration flow on mountain slopes during heavy rainfall and the infiltration/drainage flow around the underdrain constructed under the multipurpose paddy fields is validated in order to address in-situ problems where the seepage flow analysis that does not follow the Darcy's law is indispensable. A governing equation based on the nonlinear resistance law extending the Darcy's law widely used in the previous models for seepage flow is employed in this model. The validation is conducted through experiments with soil layers in a laboratory scale.

研究分野：水資源システム工学

キーワード：非ダルシー流 地下水浸透流解析 粒子法

1. 研究開始当初の背景

近年、地球規模の気候変動により極端な降雨事象の頻発が懸念されている。豪雨により懸念される災害の一つに土砂災害があるが、その発生には降雨浸透が大きく寄与する。したがって、土壌への浸透量を定量的に把握することは、土砂災害の発生予測や防災・減災に対して非常に重要である。一般に、土壌への浸透流はダルシー則に支配されるが、山地斜面土壌などの高透水層での降雨浸透では、局所的に大きな非ダルシー流が生じる可能性があり、従来のダルシー則に基づく浸透流理論の適用に限界があることが指摘されている[1]。

一方で農業土木分野では、従来から、暗渠排水による排水性の改善を目的とした農地整備が行われてきており、その効果が検証されているところである。暗渠を含む農地地下の流れは、暗渠に近づくにつれダルシー流から非ダルシー流に遷移し、暗渠内では浸透流ではなく水流となる。数値解析によるアプローチから暗渠排水の効果を検証するためには、これらの流れを統一的に取り扱う必要があるが、従来のダルシー則に基づく浸透流理論では不十分である。

このような非ダルシー流に対しては、ダルシー則を拡張した Forchheimer 則や Izbash 則が提案されている。しかしながら、浸透流を定量的に評価する上で有効なツールとなる非ダルシー流を解析できる数値モデルはほとんど提案されていない。そこで研究代表者は、先の研究課題 (JSPS 科研費 26850154: ラグランジュ型地下水浸透流モデルの開発～非ダルシー流れの解析を目指して～) において、ダルシー則の適応限界について既往の文献や自身らによる土層実験[2]に基づいて検討するとともに、ダルシー流および非ダルシー流を解析できる数値モデル (DNDF モデル) を開発してきた[3]。当該モデルは、連続式とナビエ・ストークス式に Forchheimer 則を付加した運動方程式を支配方程式として、粒子法 (MPS 法) を用いて離散化するものである。先の研究課題においては、均質な多孔質媒体への浸透問題に対する当該モデルの妥当性について定性的な検証および土層実験結果に基づく定量的な検証に取り組んでおり、次の段階として、現場土壌を想定した不均質土壌に対する適用可能性の検証および実際の現場土壌への適用可能性の検証が挙げられている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、先の研究課題で研究代表者が開発した DNDF モデルについて、(1)汎用性を向上させることと(2)現場の問題に適用を検討することである。すなわち、現場の問題への適用を考える場合、現場土壌の不均質性や成層化を考慮できることが求められるため、まず、DNDF モデルが不均質な土壌や成層化した土壌における浸透流解析にも適用できるように改良し、DNDF モデルの汎用性を向上させる。次に、非ダルシー流の解析が不可欠な現場の問題として、豪雨時の山地斜面への降雨浸透流解析および暗渠周りの浸透・排水流解析という 2 つの具体的な問題を対象に汎用性を向上させた DNDF モデルを適用し、その適用可能性を検証する。

3. 研究の方法

研究目的(1)については、現場の土壌を想定したより一般的な土壌として不均質な土壌および成層化した土壌を対象とする。不均質な土壌として、2種類のガラスビーズを一定の割合で混合した土壌、成層化した土壌として、2種類のガラスビーズを層状に配置した土壌を用い、これらを充填した土層を作成し浸透実験を実施し、土層浸透実験結果に対する数値解析結果の再現性の観点から DNDF モデルの適用可能性を検討する。

浸透実験では、表 1 に示す試料 1 および試料 2 を用い、図 1 に示すような装置を用いて浸透実験を行う。流入側の水位を最大 6 段階 (最小動水勾配(1)～最大動水勾配(6)) に変化させて、流速と動水勾配の関係を調べる。また、土層は次のように作成する。すなわち、成層化した土壌として、下層に試料 1 + 上層に試料 2 を充填したものを 2 層 (A) とし、下層に試料 2 + 上層に試料 1 を充填したものを 2 層 (B) とする。不均質な土壌として、試料 1 : 試料 2 = 7 : 3 (体積比)、試料 1 : 試料 2 = 3 : 7、試料 1 : 試料 2 = 5 : 5 で充填したものをそれぞれ混合層 (A)、(B)、(C) とする。

ここでの解析では、MPS 法の解像度 (粒子径) を 1cm とする。図 2 に、解析領域の初期状態の 1 例を示す。解析領域の右側は計算のための助走区間であり、浸透実験の動水勾配を再現するために、水位の段階ごとに流入高さを設定する。解析の時間ステップは  $1.0 \times 10^{-3}$  から  $1.0 \times 10^{-4}$  秒

表 1: 試料の物性値

	試料 1	試料 2	試料 3	試料 4	試料 5	試料 6	試料 7
分類	GB	GB	JR	JR	GB	GB	GB
間隙率 (%)	42.0	37.0	44.6	43.5	41.8	38.9	37.2
50% 粒径 (m)	$5.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$8.3 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$
透水係数 (m/s)	$1.4 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-2}$	$1.6 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$8.3 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-3}$

GB: ガラスビーズ, JR: 砂利

とし、定常状態まで計算する．モデルパラメータである Forchheimer 則の係数は、浸透実験をもとにフィッティングにより求めた値を用いる．

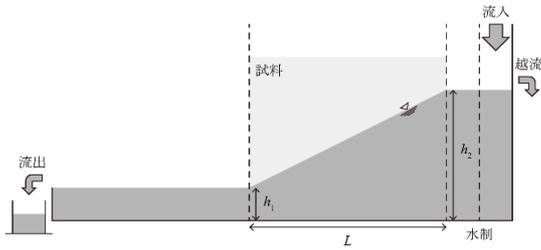


図 1：浸透実験の概要

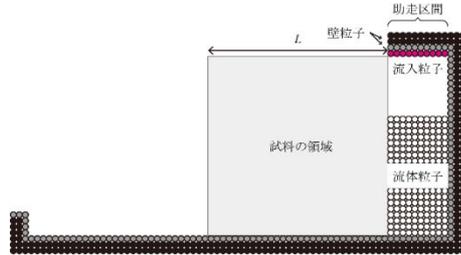


図 2：解析領域の初期状態の 1 例

研究目的(2)の豪雨時の山地斜面への降雨浸透流解析については、山地斜面を模した土層を作成し降雨浸透実験を実施するとともに、DNDF モデルによる数値解析を実施し、土層実験結果に対する数値解析結果の再現性を調べる．

降雨浸透実験では、表 1 に示す試料 3～試料 7 を用い、図 3 に示すような装置を用いる．実験条件は、斜面勾配について 10%と 20%の 2 条件、降雨強度について 50mm/h と 100mm/h の 2 条件とし、降雨を 30 分間与え、土層からの流出量を測定する．また、土層末端（下流端）における水深を計測し、レイノルズ数を算出する．

ここでの解析では、MPS 法の解像度（粒子径）を 1cm, 0.5cm, 0.2cm とする．図 4 に、解析領域（解析の初期状態）の 1 例を示す．流入境界として、降雨浸透実験を再現するために流入粒子に降雨強度 50mm/h, 100mm/h に相当する流速を与える．解析の時間ステップは  $1.0 \times 10^{-3}$  から  $1.0 \times 10^{-4}$  秒とし、計算時間は 1800 秒間（30 分間）とする．

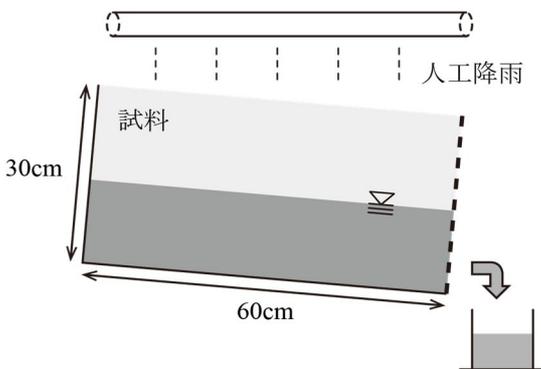


図 3：降雨浸透実験の概要

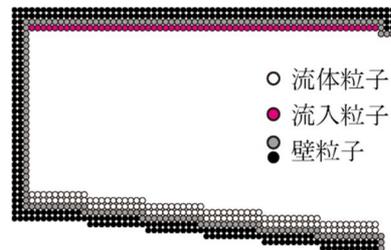


図 4：解析領域の初期状態の 1 例

研究目的(2)の暗渠周りの浸透・排水流解析については、土地改良事業計画設計基準「暗きょ排水」をもとに暗渠を有する土層を作成して湛水状態からの排水実験を実施するとともに、DNDF モデルによる数値解析を実施し、土層実験結果に対する数値解析結果の再現性を調べる．

浸透実験では、疎水材を想定した試料として表 1 に示した試料 5 および試料 6 を用い、図 5 に示すような装置を用いる．暗渠排水を有する圃場の構造を踏まえると、作土、深土、疎水材から成る土層を作成し検討すべきであるが、スケールが大きくなりすぎることから、ここでは疎水材部分に注目する（試料として用いたガラスビーズのみを土層に充填する）こととし、湛水状態からの排水実験を実施し、流出量を測定する．

ここでの解析は、MPS 法の解像度（粒子径）を 0.5cm, 0.2cm とする．図 6 に、解析領域（解析の初期状態）の 1 例を示す．解析の時間ステップは  $1.0 \times 10^{-3}$  から  $1.0 \times 10^{-4}$  秒とし、計算時間は 120 秒とする．

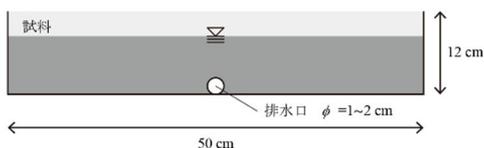


図 5：暗渠排水実験の概要

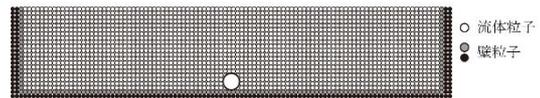


図 6：解析領域の初期状態の 1 例

#### 4. 研究成果

研究目的(1)の結果について、図7に各勾配における試料末端部の流速の実測値との絶対誤差とその平均を示す。図7より全体として勾配が大きいほど誤差が大きくなる傾向があるが、誤差は最大で7mm/s、絶対誤差の平均で見ると5mm/s程度と小さく、比較の実測値に近い解析結果を得られることがわかる。また、動水勾配と流速の間には非線形な関係がみられ、非ダルシー流が現れていることが示唆された。したがって、DNDFモデルの混合試料への適用可能性は高いと考えられる。また、モデルパラメータである Forchheimer 則の係数が解析精度に大きく影響するため、既往モデルの検討も含めて適切に決定する必要があることもわかった。

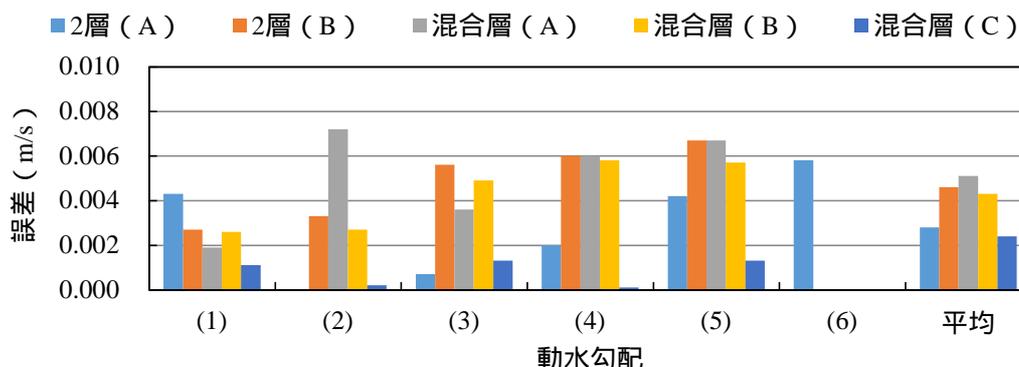


図7：流速の実測値と解析値との絶対誤差 (m/s)

研究目的(2)の豪雨時の山地斜面への降雨浸透流解析への適用結果について、各実験条件における最大レイノルズ数を調べると、ダルシー流から非ダルシー流に遷移するレイノルズ数の範囲は1~10[4]であるとすると、試料3~5および試料6の降雨強度の強い条件において非ダルシー流が現れた可能性が示唆された。また、図8と図9にそれぞれ解像度1cmと解像度0.2cmにおける流出量を水位に換算した水位上昇高(m)の実測値との誤差(=解析値-実測値)を示す。解像度1cmでは最大で0.0479m、解像度0.2cmでは約0.0378mであり、材質の比較では、ガラスビーズ(試料5~試料7)より砂利(試料3および試料4)のほうが誤差が大きい。解像度を1cmから0.2cmに小さくすることで、誤差が約0.01m小さくなることがわかる。しかしながら、解像度を1/5倍にすると、反対に、解析に約2倍の時間がかかった。したがって、解析においては、計算精度と計算時間のトレードオフについて検討が必要である。また、全ての条件において解析値のほうが実測値よりも値が大きい。これは、降雨浸透実験では不飽和領域が観測されたが、DNDFモデルでは不飽和浸透を考慮していないためと考えられる。したがって、不飽和領域を考慮することができるようにDNDFモデルを改良することが課題であるといえる。

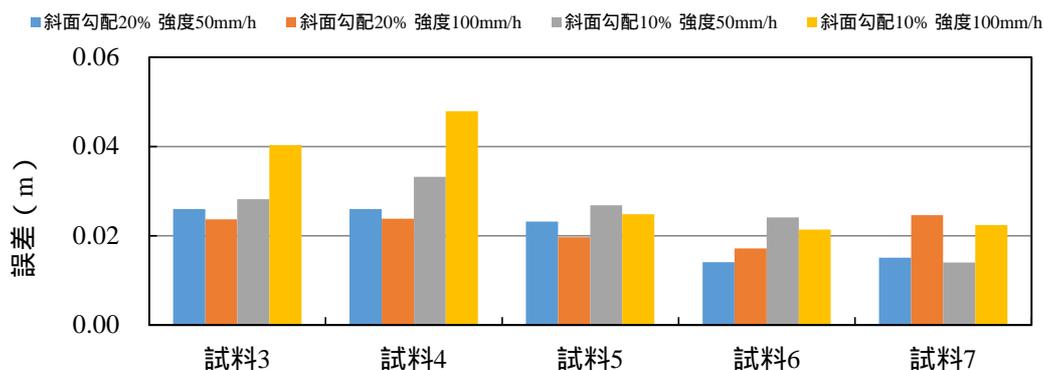


図8：解像度1cmにおける水位換算した流出量の解析値と実測値の誤差(m)

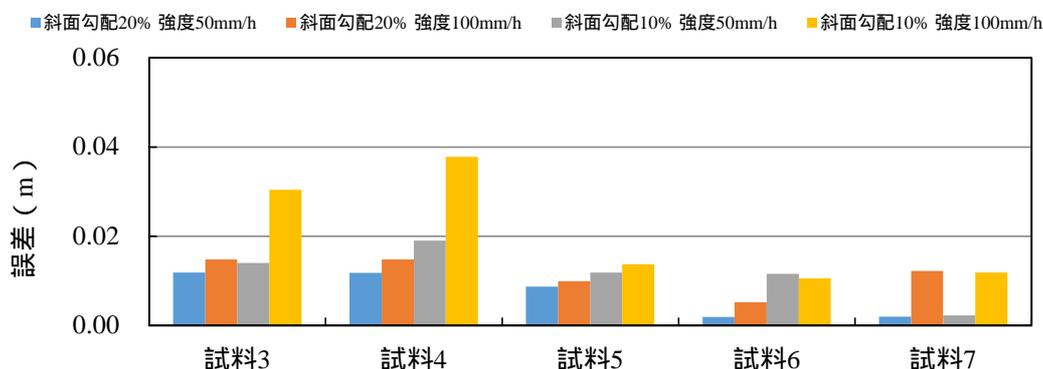


図9：解像度0.2cmにおける水位換算した流出量の解析値と実測値の誤差(m)

研究目的(2)の暗渠周りの浸透・排水流解析への適用結果について、図 10 および図 11 にそれぞれ試料 5 および試料 6 を用いた浸透実験における解像度 0.5cm で解析した累積流出量を示す。試料 5 の解析結果は、流出初期に実験結果との差がみられ、流出後期にはほぼ一致していることがわかる。流出初期の差は、流出量の測定法にも改善の余地があると考えられ、その差はもう少し小さくなると考えられる。試料 6 の解析結果は、流出初期には実験結果とほぼ一致するが、流出後期では差がみられ、解析結果のほうがわずかに過大になっていることがわかる。この誤差は Forchheimer 則の係数について検討することで改善されることが考えられる。したがって、これらのことから DNDF モデルの暗渠周りの浸透・排水流解析への適用可能性は高いと考えられる。ただし、ここでの解析は鉛直 2 次元で行ったが、暗渠内の水流を考慮すると 3 次元で行うことが望ましい。計算コストの増大が予想されるが、作土や深度を含む暗渠周りの土壌断面の拡張と、3 次元計算が今後の課題である。

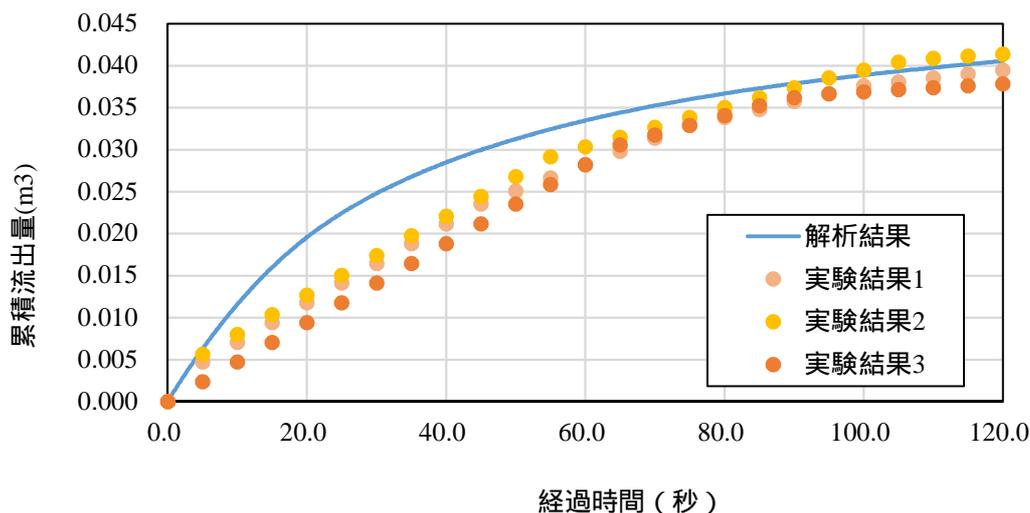


図 10：試料 5 を用いた浸透実験における累積流出量 (m<sup>3</sup>)

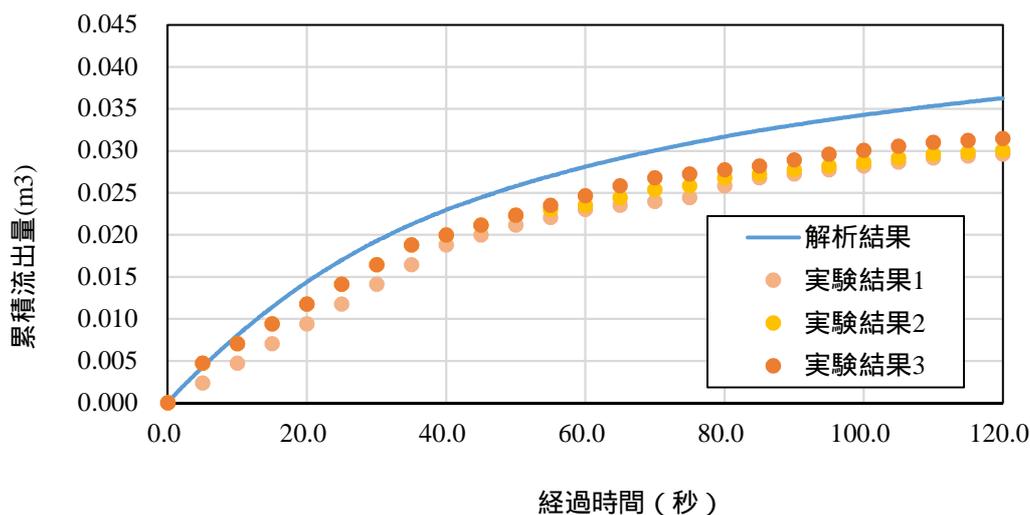


図 11：試料 6 における浸透実験における累積流出量 (m<sup>3</sup>)

< 引用文献 >

- [1] 北原 曜, 林地斜面土層中のパイプフローの特性( )パイプの水理特性, 日林誌, 71(8), pp.317-322, 1989.
- [2] 泉 智揮・下鶴瀬桂太, 非ダルシー流の発生を伴う土層浸透実験, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 10-7, 2016.
- [3] 泉 智揮, MPS 法を用いた非ダルシー流の数値シミュレーション, 日本雨水資源化システム学会第 24 回研究発表会講演要旨集, 8-12, 2016.
- [4] Bear, J., Dynamics of Fluid in Porous Media. Elsevier, 176-184, 1972.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Izumi, T. and Mizuta, J.	4. 巻 22(5)
2. 論文標題 Numerical model for non-Darcy flow through coarse porous media using the moving particle simulation method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Thermal Science	6. 最初と最後の頁 1955-1962
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 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 泉 智揮・尾崎浩平・小林範之
2. 発表標題 急傾斜園地における土壌水分の現地観測と数値解析
3. 学会等名 第74回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林範之・泉 智揮・武山絵美
2. 発表標題 平成30年7月豪雨によるため池の浸潤線変動の検討
3. 学会等名 創立90周年記念2019年度（第68回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 智揮・山下尚之
2. 発表標題 Izbash則に基づく非ダルシー流の数値解析モデル
3. 学会等名 創立90周年記念2019年度（第68回）農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉 智揮
2. 発表標題 Seepage experiment and numerical analysis for non-Darcy flow through coarse porous media
3. 学会等名 数理農学における時系列データのモデル化と解析
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉 智揮・黒田翔汰・山下尚之
2. 発表標題 非ダルシー流解析モデルにおける係数モデルの比較と混合試料への適用
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Izumi, T.
2. 発表標題 Numerical model for non-Darcy flow through coarse porous media using MPS method
3. 学会等名 12th Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉 智揮・水田純也
2. 発表標題 Forchheimer則に基づく非ダルシー流の数値解析モデル
3. 学会等名 平成29年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉 智揮・水田純也
2. 発表標題 MPS法を用いたForchheimer則に基づく非Darcy流の数値解析モデルとその検証
3. 学会等名 第72回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2017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