

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26850154

研究課題名(和文) 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～

研究課題名(英文) Development of numerical model for groundwater flow based on Lagrangian method
-for the purpose of analyzing non-Darcy flow-

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：一般に、多孔質媒体中の水分移動にはダルシー則が適用されるが、粒径の大きな砂や礫中の高動水勾配下での水分移動では、ダルシー則が成立しない非ダルシー流になることが指摘されている。本研究では、ダルシー流と非ダルシー流を同時に解析できる浸透流解析モデルを開発したものである。土層浸透実験を通して、ダルシー則の適用範囲について確認するとともに、開発した数値モデルの妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Darcy's law is generally applied to water movement through porous media. However, it has been indicated that flow under high Reynolds numbers does not always satisfy Darcy's law, and it is known as non-Darcy flow. This study developed a numerical model for non-Darcy flow based on Lagrangian method. Through seepage experiments in soil layer, the range in which Darcy's law could be applied was confirmed while referring to the previous researches. The numerical model developed was also validated.

研究分野：水資源システム工学

キーワード：水理 浸透流 非ダルシー流 粒子法 浸透実験

1. 研究開始当初の背景

一般に、多孔質媒体中の水分移動に対してダルシー則が適用される。しかしながら、粒径の大きな砂や礫中の高動水勾配下での水分移動では、ダルシー則が成立しない非ダルシー流になることが指摘されている[1]。具体的な事例では、粗い礫などから構成される河床での地下水流れ[2]や、山地斜面における高透水層での降雨不飽和浸透[3]が報告されている。したがって、このような現象を取り扱う際に従来のダルシー則に基づく浸透流理論を適用するだけでは不十分であり、ダルシー流と非ダルシー流を同時に取り扱うことのできる浸透流理論を適用すべきである。

これまでに、非ダルシー流の運動方程式として、Forchheimer 則や Izbash 則が提案されており、そのモデルパラメータについて理論的あるいは実験的な議論がなされている(例えば[4]、[5])。しかしながら、数値解析モデルの開発に関する研究はほとんどなされていない。

2. 研究の目的

ダルシー流と非ダルシー流を同時に取り扱うことのできる浸透流解析モデルの開発を目的とする。

数値解析モデルの開発において、安定な数値解を得るためには、移流項を適切に取り扱うことが重要である。従来からの数値計算スキームの多くは、オイラー法である差分法や有限要素法を用いて離散化するため、支配方程式に移流項が現れ、この移流項に対して不適切な離散化を行うと数値拡散や数値振動といった問題が生じる。また、計算格子の生成が計算時間や解析精度に強く影響するため、複雑形状に対する格子生成もオイラー法を用いる場合の課題である。これに対して、ラグランジュ法による数値計算スキームも提案されてきている。ラグランジュ法では、支配方程式に移流項が現れないうえ、そもそも計算格子を必要としない。

そこで、ラグランジュ型の地下水浸透流モデルを構築するとともに、土層実験を実施して、解析モデルの妥当性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 土層浸透実験

堤体浸透実験

表1に示すような物性をもつ透水性の異なる試料を図1のように充填した土層を作成し、流入側の水位を変化させたときの流出量を測定し、動水勾配と流速の関係を調べ、ダルシー則の適用限界について調べるとともに、既往の非ダルシー流に関する提案式と比較および実験式の構築を行う。

降雨浸透実験

堤体浸透実験で用いた試料のうち、標準砂、砂、ガラスビーズ(大)、砂利を、それぞれ、図2のような土層に均一に充填し、斜面勾配

表1: 対象試料の物性値

	標準砂	ガラスビーズ(小)	砂	ガラスビーズ(大)	砂利
間隙率 (%)	30.7	27.0	28.0	35.0	42.7
中央粒径 (m)	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	5.4×10^{-4}	2.0×10^{-3}	1.75×10^{-2}
透水係数 (m/s)	1.47×10^{-4}	1.83×10^{-4}	3.23×10^{-4}	4.26×10^{-2}	2.38×10^{-1}

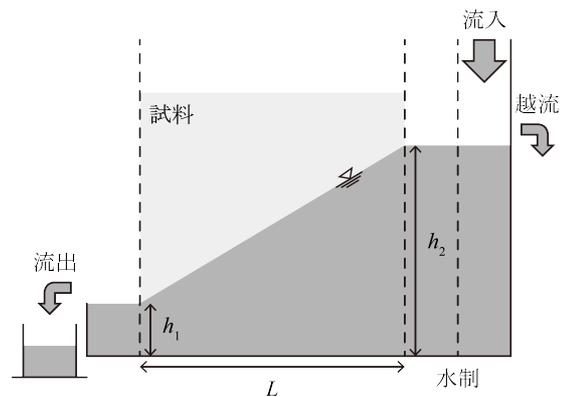


図1: 堤体浸透実験の模式図

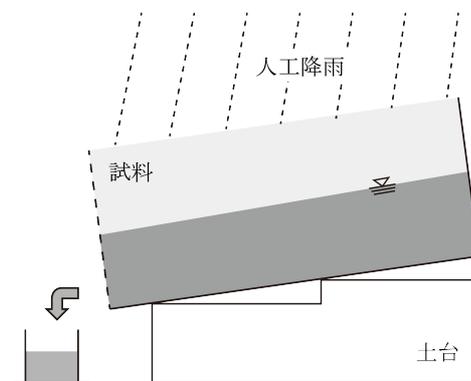


図2: 降雨浸透実験の模式図

1/10 および 1/5 の場合において降雨強度 95mm/h の雨を一定時間与え、土層からの流出量を測定し、土層中の非ダルシー流の発生状況について調べる。

(2) 浸透流解析モデルの構築と検証

支配方程式は、連続式とナビエ・ストークス式に非線形抵抗則を付加した運動方程式とする。本支配方程式におけるモデルパラメータは、非線形抵抗則のパラメータ(係数)であるが、これには、既往のモデルを採用する場合と、実験結果にもとづくフィッティングパラメータとする場合について検討する。

支配方程式に対して、ラグランジュ型の離散化手法である MPS (Moving Particle Simulation) 法[6]を用いて離散化する。

数値解析モデルの検証として、まず、図1のような浸透実験を想定し、中央粒径や間隙率の異なる種々の仮想領域における数値モ

デルの実行可能性を調べ、次に、図1の浸透実験に適用し、実験結果と計算結果の比較から、数値解析モデルの妥当性を調べる。

4. 研究成果

(1) 土層浸透実験

堤体浸透実験

実験結果をもとに整理した動水勾配と流速の関係を図3に示す。結果から、標準砂、ガラスビーズ(小)、砂は、線形で近似できる(ダルシー則が適用できる)ことがわかる。一方で、ガラスビーズ(大)、砂利は、線形で近似できない(ダルシー則が適用できない)ことがわかる。

これらのことから、砂とガラスビーズ(大)の間にダルシー則の適用限界があると考えられる。ダルシー則の適用範囲について、一般に、レイノルズ数で評価される。本実験によるダルシー則の適用限界があると考えられた範囲は、レイノルズ数で0.35~11の範囲であり、この範囲は、既往文献[1]によって指摘されている範囲と整合する。

次に、図3の結果に対して回帰分析を行い、非ダルシー流の運動方程式であるForchheimer則およびIzbash則におけるモデルパラメータを推定し比較した。その結果、Forchheimer則を適用したほうが、わずかではあるが、決定係数が大きく、Izbash則よりも精度が高いことがわかった。

最後に、本実験結果をもとに、精度が高かったForchheimer則に対して、中央粒径および間隙率をパラメータとする実験式を求めた。

降雨浸透実験

図4に、本実験結果の一例として、砂利土層における1時間あたりの流出量の経時変化を示す。また、表2に、本実験結果から算出した2ケースの斜面勾配に対する各試料の最大レイノルズ数を示す。示されたように、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が0.35~11であることを考慮すると、対象試料の中でも粒径が大きいガラスビーズ(大)土層と砂利土層において、浸透流がダルシー則をはずれ、非ダルシー流に遷移している可能性が示唆される。ただし、このことについては、斜面の非ダルシー流に関する既往研究がほとんどなく、一般化するためには、今後データを蓄積し判断する必要がある。

(2) 浸透流解析モデルの構築と検証

本研究では、堤体浸透実験の結果、わずかではあるが精度の高かったForchheimer則を支配方程式における非線形抵抗則として採用した。Forchheimer則は、動水勾配と流速の関係を二次式で近似するものであり、したがって、Forchheimer則におけるモデルパラメータは流速の一次および二次の項の係数である。

まず、表3に示すような中央粒径や間隙率の異なる種々の仮想領域における解析結果

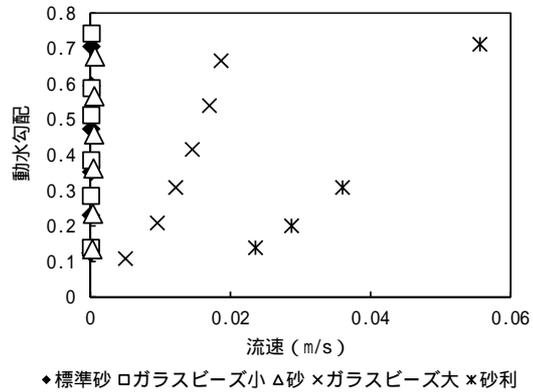


図3：動水勾配と流速の関係

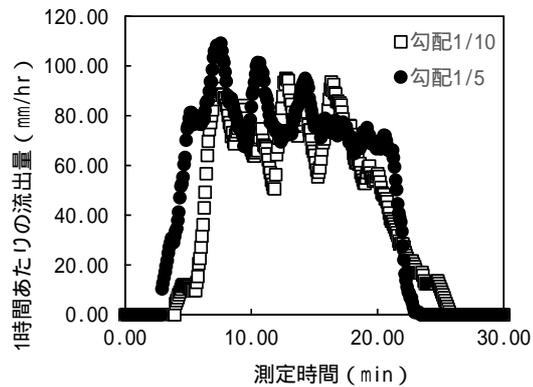


図4：砂利土層からの流出量の経時変化

表2：各試料の最大レイノルズ数

斜面勾配	最大レイノルズ数	
	1/10	1/5
標準砂	0.018	0.019
砂	0.047	0.056
ガラスビーズ(大)	0.36	0.39
砂利	3.1	3.5

を示す。図5は、MPS法で解析するために0.01mの粒子で表された解析領域の初期状態を示している。図6(a)~図11(a)は解析ケース1~3および7~9における200秒後の流速場、図6(b)~図11(b)はレイノルズ数分布を示す。

流速場の結果から、中央粒径が大きいほど、また、間隙率が大きいほど浸透流速が速くなる様子がシミュレートできている。また、レイノルズ数の分布から、流速場と同様に、中央粒径が大きいほど、また、間隙率が大きいほどレイノルズ数が大きくなることがシミュレートできている。一般に、ダルシー流から非ダルシー流に遷移するときのレイノルズ数は1から10であることが知られている[1]。したがって、このことを踏まえると、Case 2とCase 8においてダルシー流と非ダ

表 3 : 解析ケースとパラメータ

	間隙率	中央粒径 (m)
Case 1	0.35	1.0×10^{-3}
Case 2	0.35	2.0×10^{-3}
Case 3	0.35	4.0×10^{-3}
Case 4	0.35	6.0×10^{-3}
Case 5	0.35	8.0×10^{-3}
Case 6	0.35	1.0×10^{-2}
Case 7	0.30	1.0×10^{-3}
Case 8	0.50	1.0×10^{-3}
Case 9	0.70	1.0×10^{-3}

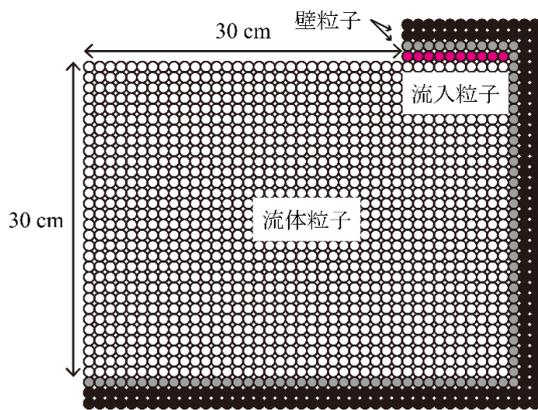
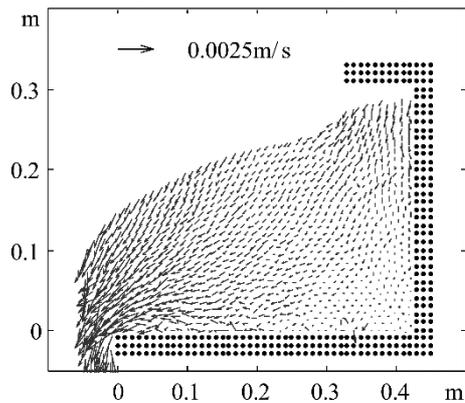
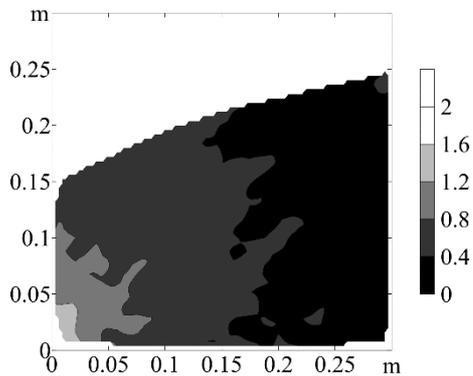


図 5 : MPS 法による解析領域の初期状態

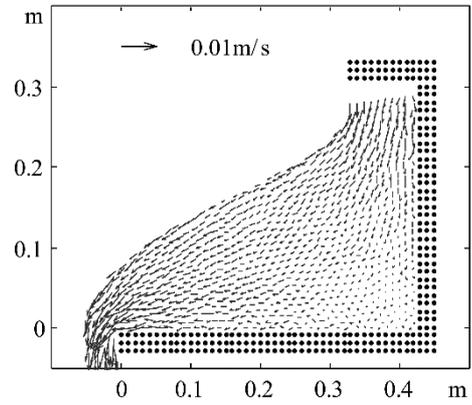


(a)流速場

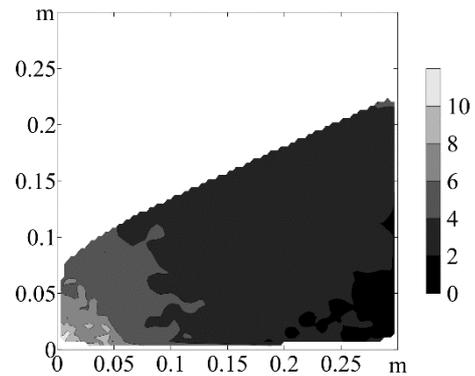


(b)レイノルズ数分布

図 6 : Case 1 における 200 秒後の結果

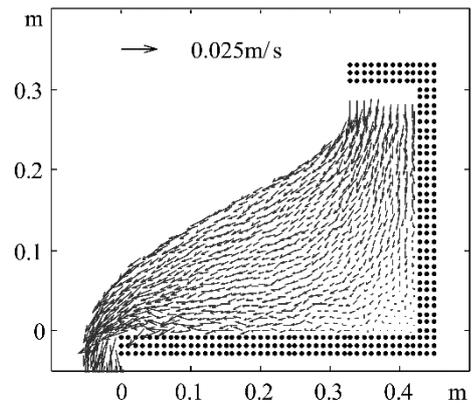


(a)流速場

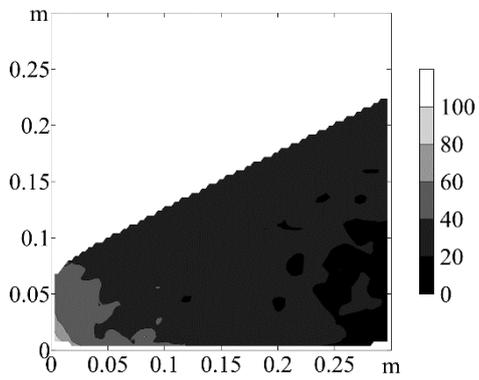


(b)レイノルズ数分布

図 7 : Case 2 における 200 秒後の結果

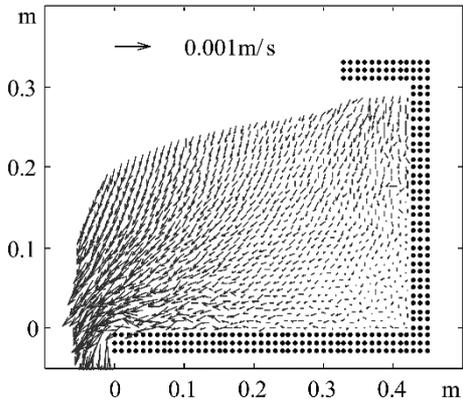


(a)流速場

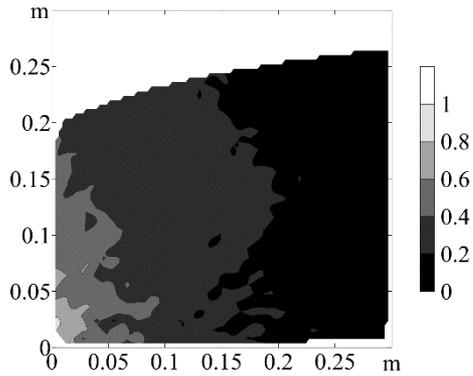


(b)レイノルズ数分布

図 8 : Case 3 における 200 秒後の結果

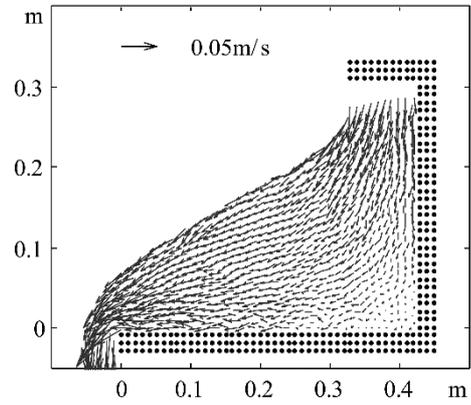


(a)流速場

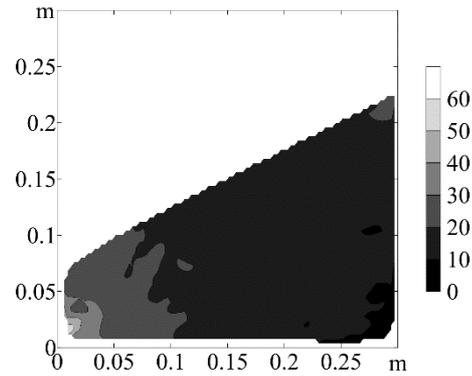


(b)レイノルズ数分布

図 9 : Case 7 における 200 秒後の結果



(a)流速場



(b)レイノルズ数分布

図 11 : Case 9 における 200 秒後の結果

表 4 : 実験結果と計算結果の比較

	u_{obs} (m/s)	u_{com} (m/s)	h_{1obs} (m)	h_{1com} (m)
ガラス ビーズ (2 mm)	0.0178	0.0032	0.124	0.110
ガラス ビーズ (5 mm)	0.0299	0.0169	0.110	0.080

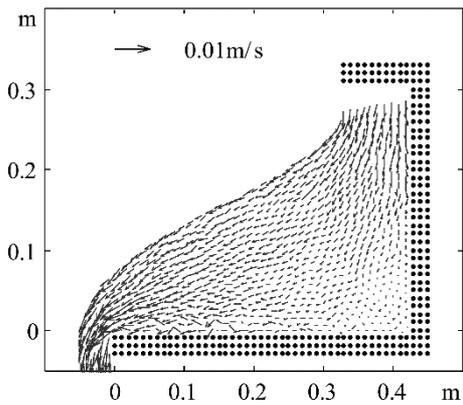
ルシー流の遷移領域であると考えられる。

次に、浸透実験に適用し、構築した数値解析モデルの妥当性について検証した結果について示す。

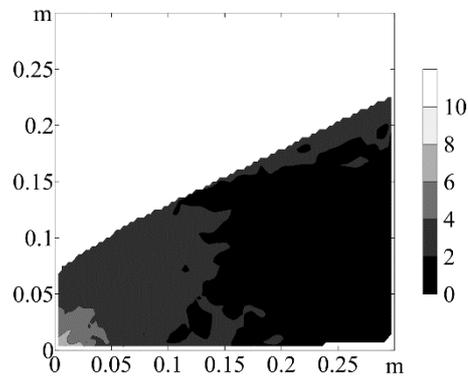
Forchheimer 則におけるモデルパラメータに対して既往のモデルを用いた場合：

表 4 に、図 1 における流出部の流速と水深について、実験結果 (obs) と計算結果 (com) の比較を示す。なお、対象試料は、ガラスビーズ 2mm と 5mm とした。表 4 より、計算流速は実験流速より小さく 0.18~0.57 倍程度である。また、流出部の計算水深も実験水深より小さいが、0.73~0.89 倍程度であり、流速に比べて精度は高い。計算結果が実験結果に対して過小となるのは、Forchheimer 則にもとづく抵抗が実際よりも過大であるためと考えられる。したがって、既往のモデルを用いた場合、実験結果の再現性は低いことがわかった。

Forchheimer 則におけるモデルパラメータをフィッティングパラメータとした場合：



(a)流速場



(b)レイノルズ数分布

図 10 : Case 8 における 200 秒後の結果

Forchheimer 則のモデルパラメータのうち一次の項は、理論的な考察から飽和透水係数の逆数とし、二次の項は計算流速と実験流速の誤差が最小となるよう試行錯誤により決定した。表5に、図1における流出部の流速と水深について、実験結果 (obs) と計算結果 (com) の比較を示す。なお、対象試料は、ガラスビーズ 5mm, 砂利 (小), 砂利 (大) とし、それぞれの試料において動水勾配を最大で6段階設定した。表5より、計算流速は実験流速より大きく 1.46 ~ 2.59 倍程度である。また、計算水深は実験水深の 0.83 ~ 1.25 倍程度であり、先の Forchheimer 則のモデルパラメータに既往のモデルを用いた場合と同様に流速に比べて精度は高い。また、先の Forchheimer 則のモデルパラメータに既往のモデルを用いた場合に比べると、計算流速の精度は高いと考えられるが、実験流速に対して過小であった傾向が逆転し、実験流速に対して過大となった。

表5：実験結果と計算結果の比較

ガラスビーズ (5 mm)				
動水勾配	u_{obs} (m/s)	u_{com} (m/s)	h_{1obs} (m)	h_{1com} (m)
0.175	0.0237	0.0529	0.0600	0.0690
0.223	0.0310	0.0612	0.0630	0.0790
0.335	0.0493	0.0761	0.0790	0.0900
0.476	0.0582	0.0913	0.0950	0.110
0.550	0.0631	0.0962	0.0990	0.120
0.636	0.0735	0.107	0.110	0.130
砂利				
動水勾配	u_{obs} (m/s)	u_{com} (m/s)	h_{1obs} (m)	h_{1com} (m)
0.160	0.0292	0.0756	0.0720	0.0600
0.230	0.0422	0.0873	0.0790	0.0730
0.312	0.0607	0.123	0.0930	0.0890
0.409	0.0761	0.149	0.110	0.100

< 引用文献 >

Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media, 800p.
 Yamada, H., Nakamura, F., Watanabe, Y., Murakami, M., and Nogami, T. (2005): Measuring hydraulic permeability in a streambed using the packer test, Hydrological Processes, 19, pp.2507-2524.
 北原 曜 (1989): 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.
 Sidiropoulou, M.G., Moutsopoulos, K.N., and Tsihrintzis, V.A., Determination of Forchheimer equation coefficients a and b, Hydrological Processes, 21, pp 534-554, 2007.
 Soni, J.P., Islam, N., and Basak, P., An experimental evaluation of

non-Darcian flow in porous media, Journal of Hydrology, 38, pp 231-241, 1978.

Koshizuka, S., and Oka, Y. (1995): A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, Computational Fluid Dynamics J., 4(1), pp.29-46.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Izumi, T., Numerical investigation into the effect of irrigation water temperature on soil temperature in paddy fields under saturated irrigation, Journal of Rainwater Catchment Systems, 20(2), 2015, pp.15-22. 査読有

[学会発表](計7件)

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, 2016.10.29, 京都大学(京都府京都市)

泉 智揮, MPS 法による非ダルシー流の数値解析モデル, 第71回農業農村工学会中国四国支部講演会, 2016.10.27, 松山市総合コミュニティーセンター(愛媛県松山市)

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, 2016.9.1, ハーネル仙台(宮城県仙台市)

泉 智揮・中村壮志・小林範之, 道後平野の地下水水位データへの NMF 適用における初期値依存性と基底数の影響, 第70回農業農村工学会中国四国支部講演会, 2015.10.7, 広島 YMCA 国際文化センター(広島県広島市)

中村壮志・泉 智揮・小林範之・坂本敬介・藤原正幸, 重信川中流域における河川水と地下水の交流, 平成27年度農業農村工学会大会講演会, 2015.9.2, 岡山大学(岡山県岡山市)

泉 智揮・小林範之, 非負値行列因子分解を用いた観測データの特徴抽出, 第69回農業農村工学会中国四国支部講演会, 2014.11.5, とりぎん文化会館(鳥取県鳥取市)

泉 智揮・林 美沙, 用水温が飽水管理水田の地温形成に及ぼす影響の数値解析による検討, 平成26年度農業農村工学会大会講演会, 2014.8.27, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

泉 智揮 (IZUMI, Tomoki)

愛媛大学大学院農学研究科・准教授

研究者番号: 40574372