

学会賞受賞研究

## 土中浸透現象の数値解析モデリングに関する研究

泉 智揮\*

Tomoki IZUMI:

Numerical Modeling for Seepage Phenomena in Soil

### Abstract

Water is essential resources for agriculture. Agricultural water use accounts for approximately 70 percent of the total water use in the world. Recently, the world population is projected to grow rapidly and to reach 10 billion people by 2050. Water demand for agricultural as well as domestic water is also estimated to increase in order to feed the increasing population. It is necessary to discuss how water resources can be developed and/or wisely used. To understand and control water movement in soil is effective in terms of wise-use of water resources. Physical phenomena such as soil water movement are generally described by ordinary/partial differential equations. These differential equations are numerically solved by use of computers because of rapid progress in computers in recent years. Author has addressed a numerical modeling for non-Darcy flow through coarse porous media using MPS (moving particle simulation) method, and inverse modeling and numerical investigations of variably saturated subsurface water flow in isothermal/non-isothermal soil. The former got an award of “Encouragement Prize”, Chugoku-Shikoku Branch, Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering in October 2017, the latter got an award of “2017 Japan Rainwater Catchment Systems Association Young Scientists Award” in November 2017. In this report, the outline of these studies is introduced.

**Key words:** Numerical modeling, Numerical analysis, Soil water movement, Seepage flow, Finite element method, MPS (moving particle simulation) method

### 1. 学会賞受賞の経緯

平成 29 年 10 月 26 日 (木) に、とくぎんトモニプラザで開催された「第 72 回農業農村工学会中国四国支部講演会」において、「MPS 法による非ダルシー流の数値解析モデル」という研究課題に対して支部賞 (奨励賞) を受賞した。また、同年 11 月 3 日 (土) ~4 日 (日) に愛媛大学農学部で開催された「第 25 回日本雨水資源化システム学会大会」において、「等温・非等温土壌における飽和不飽和地下水浸透流の逆解析と順解析に関する研究」に対して学会賞 (奨励賞) を受賞した。これらの研究課題の遂行においては、京都大学在学中か

ら京都大学名誉教授 河地利彦先生、愛媛大学着任後は藤原正幸先生 (現 京都大学大学院農学研究科教授) をはじめ、多くの方々のご指導・ご鞭撻ならびにご支援を賜った。ここに心より感謝申し上げる。また、実験や解析において、愛媛大学農学部水資源システム工学教育分野の学生諸氏からも協力をいただいたことに対して深く御礼申し上げます。

### 2. はじめに

当該研究課題は、2 件とも、土中の水分移動の数値解析モデリングに関する研究である。農業を営む上で土中の水分移動を的確に把握することは、世界人口の爆発的な増加にともなうさらなる食料増産という社会的需要に対して、限りある水資源を持続可能な状態で

2018 年 12 月 1 日受領

2018 年 12 月 1 日受理

\*愛媛大学大学院農学研究科水資源システム工学教育分野

うまく利用していく上で非常に重要である。近年は農業分野においても ICT の適用が盛んに進められているが、土中水分のモニタリング等に加えて水分移動の数値解析を行うことでより効果的な栽培管理・制御が実現可能になるであろう。

このたび、上記 2 件の学会賞受賞課題について紹介する機会を得た。以下では、前者の研究課題についてその概要を述べる。後者については泉 (2018) を参照されたい。

### 3. MPS 法による非ダルシー流の数値解析

#### 3.1. 研究の背景

一般に、土中の水分移動は、流速が動水勾配に比例するというダルシー則（線形則）に支配される。このダルシー則は経験則であるが、流体の運動方程式であるナビエ・ストークス式において、定常状態の層流を仮定することでも導くことができる。層流とは、流れの慣性力と粘性力の比で定義されるレイノルズ数が低い流れである。したがって、レイノルズ数が高い流れになると、必ずしもダルシー則を満たさないと考えられるが、事実、高レイノルズ数の流れはダルシー則を満たさない非ダルシー流になることが Bear (1972) などによって指摘されている。非ダルシー流として、具体的には、粗い礫などから構成される河床間隙を流れる地下水や山地斜面における高透水層での降雨不飽和浸透などが挙げられるが、特に農業農村分野においては暗渠周りの流れなどが挙げられる。このような非ダルシー流に対して、ダルシー則に代わる Forchheimer 則や Izbash 則などの非線形則が提案されている。海岸工学分野では、透過性の消波構造物中の流れを非ダルシー流と仮定し、その数値解析モデルが提案されている (Akbari and Namin, 2013; Akbari, 2014)。しかしながら、上述のような非ダルシー流となる浸透流に対する数値解析モデルについてはほとんど提案されていない。

そこで本研究では、非ダルシー流となる浸透流の数値解析モデルの開発を目的としている。なお、本研究は JSPS 科研費 26850154 の研究成果の一部である。

#### 3.2. 非ダルシー流解析モデルの概要

数値解析モデルの支配方程式は非圧縮を仮定した連続式とナビエ・ストークス式の運動方程式に非線形抵抗則として Forchheimer 則を付加したものである。Forchheimer 則には対象とする土壌に応じて与件する必要があるパラメータが含まれる。このパラメータにはいくつかの既往モデルがあり、対象とする土壌などの多孔質媒体に応じて検討する必要があるが、ここでは、Akbari and Namin (2013) のモデルを採用している。

支配方程式の離散化には、MPS (Moving Particle Simulation) 法 (Koshizuka et al., 1995) を採用する。MPS 法は粒子法的一种である。粒子法とは、流体などの連続体を有限個の粒子の集合体であると考え、その粒子間の相互作用を計算し支配方程式を解く手法である。粒子法は計算格子を用いないラグランジュ的な手法であるので、計算格子を用いる差分法や有限体積法、有限要素法といったオイラー的な手法において取扱いに注意を要する移流項の離散化にともなう数値拡散や数値振動の問題が生じない。また、水面形の追跡、すなわち、自由水面を有する流れの解析も容易である。

#### 3.4. 数値解析例

構築した数値解析モデルの適用例として、図 1 に示すような浸透場における解析結果を示す。図 2 は、図 1 のような浸透場の MPS 法によるモデル化を示したものである。図 2 の右部は、図 1 の浸透場を再現するために、水位を一定とする境界条件を与えるためのものである。図 3 と図 4 に、それぞれ、計算開始から 200 秒後の流れ場とレイノルズ数分布を示す。図 3 より、水は放物線状の浸潤線を描きながら水位の高い右側から水位の低い左側に流れていること、図 4 より、下流につれてレイノルズ数が大きくなり、ダルシー流から非ダルシー流に遷移するといわれているレイノルズ数の範囲 (1~10) にあることがわかる。流れ場やレイノルズ数分布は、多孔質媒体の中央粒径や間隙率といった物性値に依存し、中央粒径が大きいほど、また、間隙率が大きいほど流速ならびにレイノルズ数が大きくなる。解析例では、その定性的な解析結果の妥当性を確認している。さらに、本数値解析モデルの定量的な妥当性を検証するためには、本モデルの支配方程式が解析的に解けないため、土層実験などの模型実験を実施して、その実験結果に対する数値解の再現性を検討していく必要がある。

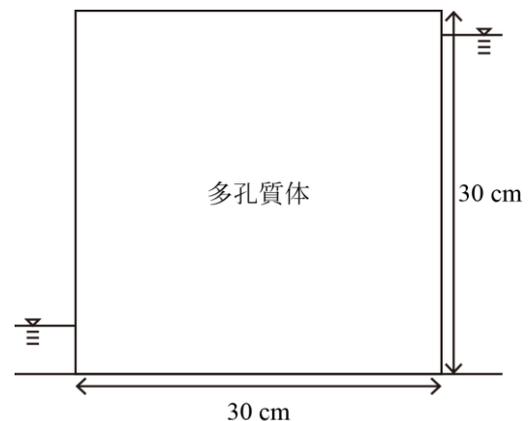


図 1 対象とする浸透場 (泉, 2016)

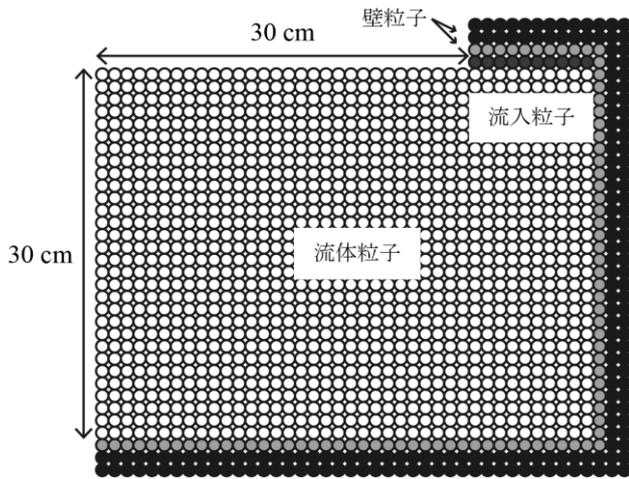


図2 MPS法によるモデル化 (泉, 2016)

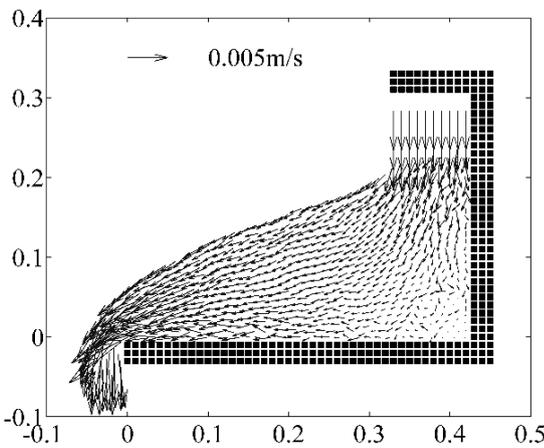


図3 200秒後の流れ場 (泉, 2016)

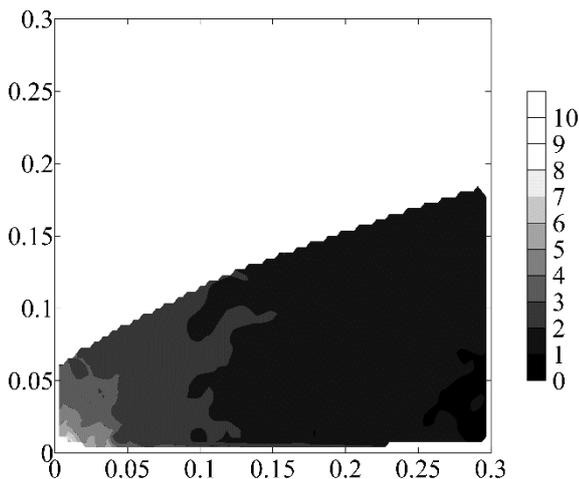


図4 200秒後のレイノルズ数分布 (泉, 2016)

### 3.5. 今後の展望

現在までに、土層実験を通して数値解の再現性の検討を行い定量的な妥当性の検証を行ってきた (Izumi and Mizuta, 2018). その一方で、すでに述べたように、非ダルシー流の抵抗則として採用した Forchheimer 則

に含まれるパラメータには、いくつかの既往モデルが報告されている (例えば, Sidiropoulou et al., 2007). そこで泉ら (2018) では、既往モデルによる解析結果についての検討も行っている. そして今後は、高透水性の山地斜面を想定した斜面土層における浸透実験を実施し、本モデルの適用可能性を検証していく予定である.

### 4. おわりに

平成 30 年 7 月豪雨では、記録的な大雨により、愛媛県内の多くの樹園地で斜面災害が発生した. このような樹園地斜面の降雨浸透の解析に対しても、ダルシー則を基礎とした解析モデルに加えて本モデルの適用も有効ではないかと考えている. 本受賞を契機として今後も教育・研究に邁進していく所存である.

### 引用文献

- 泉智揮 (2016) : 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講演要旨集, 120-122.
- 泉智揮 (2018) : 等温・非等温土壌における飽和不飽和地下水浸透流の逆解析と順解析に関する研究. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 23 (2) : 53-54.
- 泉智揮・黒田翔汰・山下尚之 (2018) : 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. 平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 632-633.
- 森本敏弘・浅井光輝・笠間清伸・藤澤和謙・井元佑介 (2014) : 安定化 ISPH 法による拡張ダルシー則とナビエ・ストークス方程式の統一解法. *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, 70(2) : I\_213-I\_221.
- Akbari, H., and Namin, M.M. (2013) Moving particle method for modeling wave interaction with porous structures. *Coastal Engineering* 74: 59-73.
- Akbari, H. (2014) Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures. *Coastal Engineering* 89: 1-19.
- Bear, J. (1972) *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing Company, Inc.
- Izumi, T., and Mizuta, J. (2018) Numerical model for non-Darcy flow through coarse porous media using the moving particle simulation method, *Thermal Science* (Online first).
- Koshizuka, S., and Oka, Y. (1995) A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation. *Computational Fluid Dynamics J.* 4(1): 29-46.
- Sidiropoulou, M.G., Moutsopoulos, K.N., and Tsihrintzis, V.A. (2007) Determination of Forchheimer equation coefficients  $a$  and  $b$ . *Hydrological Processes* 21: 533-554.