

浸透水の温度が地下水流れに与える影響解析 Analysis of Effects on Groundwater Flow by Infiltration-Water Temperature

○吉村 悠太郎*・竹内 潤一郎**・武馬 夏希**・藤原 正幸*
Yutaro Yoshimura, Junichiro Takeuchi, Natsuki Buma, and Masayuki Fujihara

1. はじめに

農業用水が多く必要となる灌漑期には水田に多くの用水が灌漑される。灌漑用水は作物の成長や蒸発散に利用され、残りは地下へと浸透していく。水資源が乏しい地域では地中へと浸透した地下水をポンプで揚水することで再利用することも少なくなく、水質や水温は上流側の影響を強く受けると考えられる。一般に温度の年変動の少ない地下水に対して、浸透水は季節によって温度が大きく変化する。浸透水と地下水の温度差により密度流が生じることも考えられ、地下水の流速分布に影響することも予測される。地下水の流れの変化は硝酸などの溶質輸送にも影響を与えるため、これらのことを把握することは地下水管理をするうえで重要である。

本報告では、温度依存の密度流を考慮した地下水流と熱輸送に関する支配方程式を採用し、代かき期と夏期を想定した浸透水が地下水流に与える影響を数値実験により解析を行う。

2. 支配方程式

ここでは、鉛直 2 次元の領域を対象とし、流れ関数を用いた定式化を行う^[1,2]。流速と流れ関数 $\Psi(x, z)$ の関係を以下のように定義する。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} = u, \quad -\frac{\partial \Psi}{\partial x} = w \quad (1)$$

ここで、 x と z はそれぞれ無次元化された水平方向、上向きを正としたときの鉛直方向の座標であり、 u と w はそれぞれ x 方向と z 方向の無次元化された速度である。(1)式で定義された流れ関数を用いることにより、飽和した多孔質媒体での密度流は以下の式で表される。

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = R_a \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

$$R_a = \frac{\gamma K_s \Delta \rho H}{D \rho} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{(\rho C)_w}{(\rho C)_{ws}} \quad (4)$$

$$\Delta \rho = \rho(T_{\min}) - \rho(T_{\max}) \quad (5)$$

ここで、 R_a はレイリー数、 γ は水の熱容量 $(\rho C)_w$ と水と土粒子を合わせた熱容量 $(\rho C)_{ws}$ の比、 $\Delta \rho$ は対象としている領域内の水の最小温度と最大温度における密度差、 K_s は飽和透水係数、 ρ は水の密度、 H は対象領域の鉛直方向の厚さ、 D は飽和多孔質媒体の熱拡散係数、 T_{\min} と T_{\max} はそれぞれ最小と最大の温度である。

また、熱の移流分散方程式は以下の無次元化された方程式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (7)$$

ここで、 θ は無次元化された温度、 T は水の温度、 t は無次元化された時間である。

3. 対象領域および計算条件

対象領域を、図 1 に示すような矩形の領域とし、図に示されるような境界条件を与える。流れに関しては、右方向に一定の動水勾配で流れ、上部から浸透水が流入してくることを想定している。温度に関しては、下部が恒温状態でそれよりも温度の低い、あるいは高い浸透水が流入することを想定している。

(2)、(6)式の空間に対する離散化には有限要素法を適用し、時間に対して完全陰解法を採用する。

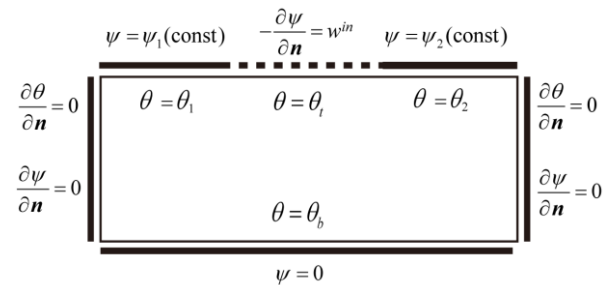


図 1: 対象領域と境界条件

Fig.1: Objective domain and boundary conditions

*京都大学大学院農学研究科 (Graduate School of Agriculture, Kyoto University)

**農林水産省農村振興局 (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries)

キーワード: 密度流, レイリー数, 数値実験

4. 解析結果

以下の3つのケースに対して、それぞれ R_a が10と50の場合の数値実験を行う。

- ・ケース1: $\psi_1 = 5, \psi_2 = 10, \theta_t = 0, \theta_b = 1$
- ・ケース2: $\psi_1 = 5, \psi_2 = 20, \theta_t = 0, \theta_b = 1$
- ・ケース3: $\psi_1 = 5, \psi_2 = 10, \theta_t = 1, \theta_b = 0$

ケース1と2では、下部の温度(15°C)に対して低い温度(4°C)の水が浸入する場合、ケース3では高い温度(30°C)の水が浸入する場合で

ある。ケース2はケース1よりも浸入量が多い場合である。

計算結果を図2から4に示す。図2, 4の流れ関数の等高線からは、温度の低い水の方がより深くまで浸透していることが分かる。図2, 3からは浸入量が多いほど温度変化の影響も大きいことが分かる。また、いずれの結果においても、レイリー数が大きくなると、流れは乱れることが分かる。

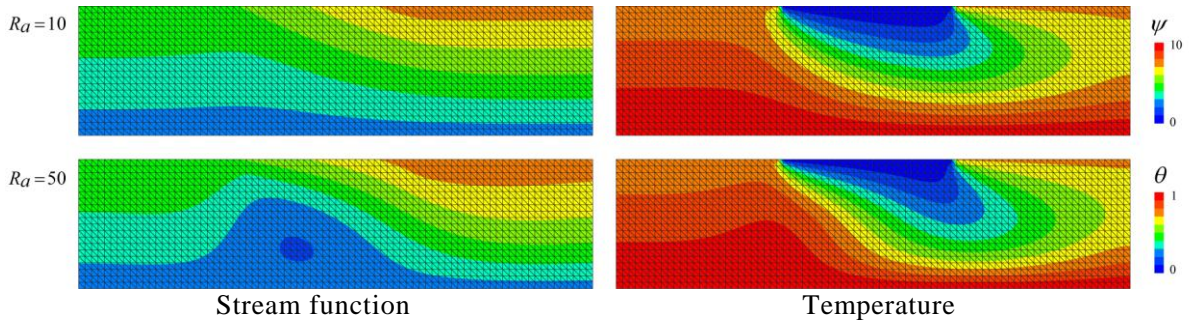


図 2: ケース 1 / Fig.2: Case 1

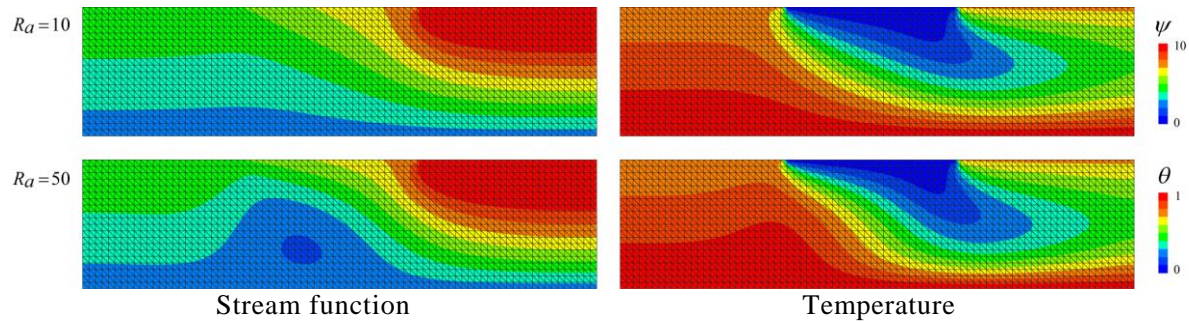


図 3: ケース 2 / Fig.3: Case 2

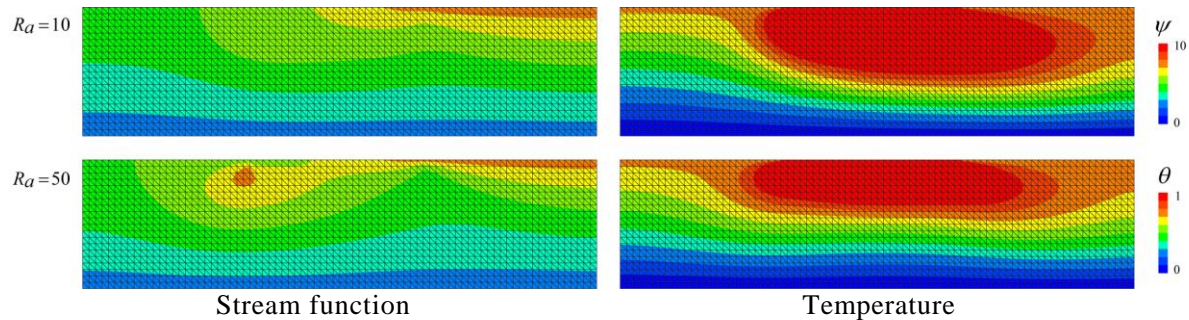


図 4: ケース 3 / Fig.4: Case 3

5. まとめ

浸透水の温度が与える地下水流れへの影響を調べるため、密度流に関する数値実験を行った。その結果、浸透水の温度が低い場合は、温度が高い場合に比べてより深くまで浸透することが示され、この流れに伴う溶質輸送により、汚染物質もより深く浸透していくことが懸念される。

参考文献

- [1] Yusa, Y. (1983) Numerical experiment of groundwater motion under geothermal condition -Vying between potential flow and thermal convective flow-, *Journal of Geothermal Research Society of Japan*, 5 (1), pp.23-38 (in Japanese).
- [2] Holzbecher, E. (1998) *Modeling Density-Driven Flow in Porous Media*, Springer.