

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
Effect of Irrigation Water Temperature on Soil Temperature in Paddy Fields under Saturated Irrigation

○泉 智揮*・林 美沙*
○Tomoki IZUMI, Misa HAYASHI

1. はじめに

近年発生が顕著な水稲の高温障害に対して、追加的な用水の確保が困難な地域においては、飽水管理という、湛水せずに土壌を常に湿潤状態に保つ水管理が、節水的な対策手法の一つとして有効である。飽水管理水田の地温形成について、Izumi and Takeuchi (2014) は、地質条件が影響を与えることを指摘している。しかしながら、水田の地温形成には、用水温や降雨の温度も影響することが考えられる。そこで本研究では、用水温が飽水管理水田の地温形成に与える影響について、数値シミュレーションにより検討する。

2. 支配方程式

本研究では、以下に示す熱輸送と水分移動の連成モデルを用いる (Izumi and Takeuchi, 2014)。
熱輸送モデル：

$$\frac{\partial (C_h T_s)}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T_s) \quad (1)$$

$$C_h = (1 - \phi) c_s + \theta c_w \quad (2)$$

$$\lambda = b_1 + b_2 \theta + b_3 \theta^{0.5} \quad (3)$$

ここで、 C_h は土壌の体積熱容量、 T_s は地温、 t は時間、 λ は土壌の熱伝導係数、 ϕ は間隙率、 c_s は土粒子の体積熱容量、 c_w は水の体積熱容量、 θ は体積含水率、 b_1 、 b_2 、 b_3 は形状パラメータである。

水分移動モデル：

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} + W S_w S_s \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(-K \left(\nabla h + \frac{\rho(T_s) - \rho_r}{\rho_r} \nabla z \right) \right) \quad (4)$$

$$W = \begin{cases} 1 & (\psi \geq 0) \\ 0 & (\psi < 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$S_s = \rho_r g (\beta_s + \phi \beta_w) \quad (6)$$

$$K = K_r (S_e) K_T (T_s) K_s \quad (7)$$

$$h = \frac{p}{\rho_r g} + z = \psi + z \quad (8)$$

ここで、 S_w は飽和度、 S_s は比貯留係数、 ψ は圧力水頭、 K は不飽和透水係数、 h は全水頭、 z は上向きを正とする鉛直方向の長さ、 $\rho(T_s)$ は地温 T_s における水の密度、 ρ_r は基準地温 T_r における水の密度、 g は重力加速度、 β_s 、 β_w はそれぞれ土と水の圧縮係数、 K_r は相対透水係数、 K_T は地温に対する透水係数の補正係数、 K_s は飽和透水係数、 S_e は有効飽和度、 p は水圧である。

土壌水理特性には van Genuchten-Mualem 型の以下の式を用いる。

$$S_e(\psi) = \frac{1}{(1 + (\alpha |\psi|)^{n_{vg}})^{m_{vg}}} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

$$m_{vg} = 1 - \frac{1}{n_{vg}} \quad (10)$$

$$K_r = S_e^{1/2} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/m_{vg}} \right)^{m_{vg}} \right)^2 \quad (11)$$

$$K_T = \frac{\mu_r}{\mu(T_s)} \quad (12)$$

ここで、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 α 、 m_{vg} 、 n_{vg} は形状パラメータ、 μ_r 、 $\mu(T_s)$ はそれぞれ温度 T_r 、 T_s における粘性係数である。

これらの支配方程式に対して、初期条件および境界条件を与件し、空間方向には標準 Galerkin 有限要素法、時間方向には有限差分法を用いて離散化する。

3. 解析条件

解析領域は、用水路を含む水田の一部を対象とした鉛直 2 次元の土壌断面とする (図 1)。水稲の品種は作付けの多いコシヒカリを想定し、高温障害の生起に係する登熟期にあたる 20 日間 (8 月上旬から下旬) を計算期間とする。

初期条件には、定常状態を与件するために、事前に数日間計算した地温と圧力水頭値を計算格子の各節点に与える。

境界条件は図 1 のように与件する。まず、地表面については、地表面を水田、用水路、畦畔

*愛媛大学農学部, Faculty of Agriculture, Ehime University.

キーワード：飽水管理, 熱・水分連成モデル, 数値シミュレーション

に分けて取扱う。熱輸送に対しては、用水温を考慮する場合、用水路はディリクレ境界（D境界）として用水温を与え、それ以外はノイマン境界（N境界）として日射や気温等の熱収支フラックスを与える。用水温を考慮しない場合、すべての地表面境界をN境界とする。水分移動に対しては、水田、用水路をD境界とし、水田には飽水条件として圧力水頭値（ $\psi = 0$ ）を与え、用水路には0.2 mの水深を仮定する（ $\psi = 0.2$ ）。畦畔はN境界とし、降雨と蒸発量の収支フラックスを与える。さらに、領域の左右の側面と底面についてはフラックスゼロのN境界とする。

計算に必要な気象データは気象庁（愛媛県松山市）のデータを用いる。

用水温については、新村と谷口（2013）による用水温の観測データを基準用水温とし、本解析では、基準用水温、基準用水温 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、基準用水温 $\pm 4^\circ\text{C}$ を用水温データとして、地温形成に与える用水温の影響を検討する。

4. 解析結果

まず、表1に、それぞれの用水温を考慮する場合と用水温を考慮しない場合の解析結果について、無降雨日の9日間の平均地温を用水路からの距離ごとにまとめる。表1より、用水温が高くなるほど地温は高くなり、用水温を考慮しない場合が最大となる。しかしながら、用水路から遠くなるほど、地温差は小さくなる。

次に、地温形成に対する用水温以外の影響として気象条件による影響が考えられるため、気象条件の考慮の有無による地温形成への影響を検討する。図2に、基準用水温を与え、気象条件の考慮の有無に対する地温の解析結果について、用水路からの距離が0.4 mにおける深度の異なる4地点の経時変化を示す。図2より、地温は、用水温よりも気象条件に影響を受けやすいことが分かる。この関係は、基準用水温 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、基準用水温 $\pm 4^\circ\text{C}$ に対する解析結果についても同様である。

これらの結果は、用水温が水田の地温形成に影響を与えるものの、気象条件に比べるとその影響は小さいことを示す。

5. まとめ

用水温が飽水管理水田の地温形成に与える影響について検討した。その結果、用水温は水田の地温形成に影響を与えるものの、気象条件に比べるとその影響は小さいと結論づけられた。

地表面：	用水路	畦畔	水田
熱輸送	用水温有 用水温無	D境界 N境界	N境界 N境界
水分移動		D境界	D境界

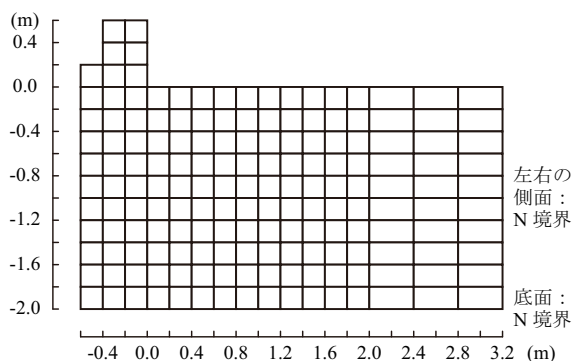
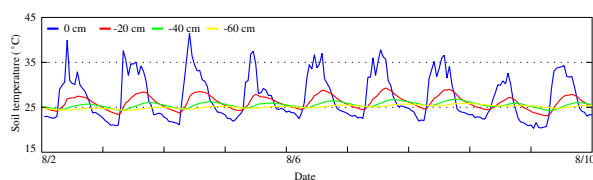


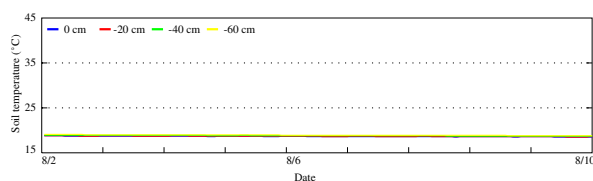
図1: 計算格子と境界条件

表1: 各用水温データに対する地温の解析結果

	用水路からの距離					
	0.2 m	0.4 m	0.6 m	0.8 m	1.0 m	1.2 m
基準用水温 -4°C	25.3	25.4	25.6	25.7	25.8	25.8
基準用水温 -2°C	25.4	25.5	25.7	25.7	25.9	25.9
基準用水温	25.5	25.6	25.8	25.8	25.9	25.9
基準用水温 $+2^\circ\text{C}$	25.7	25.7	25.8	25.9	25.9	25.9
基準用水温 $+4^\circ\text{C}$	25.8	25.8	25.9	25.9	26.0	26.0
用水温考慮無	25.9	25.9	26.0	26.0	26.0	26.0



(a) 気象条件を考慮する場合



(b) 気象条件を考慮しない場合

図2: 気象条件考慮の有無に対する地温の解析結果の比較

引用文献

- [1] Izumi T. and Takeuchi J. (2014): *Journal of Rain-water Catchment Systems*, 19(2), pp.11-17.
- [2] 新村麻美, 谷口智之 (2013): *水土の知*, 81(4), pp.27-30.