

数値計算による水稻の高温登熟障害抑制のためのかけ流し灌漑の検討

Numerical simulation on continuous irrigation with running water for preventing high temperature damage to rice grain ripening

西田和弘* 宇尾卓也* 光安麻里恵* 吉田修一郎*

Kazuhiro Nishida, Takuya Uo, Marie Mitsuyas, Shuichiro Yoshida,

水稻の高温障害対策として、冷水かけ流し灌漑が注目されている。この冷水かけ流しの効果は、水田内の水平水移動に伴う熱の移流と、田面水-水稻-大気間の熱交換によって決まる。本研究では、水田内の水移動、水移動に伴う熱の移流を考慮した水稻と田面水の熱収支を計算する数値プログラムを作成し、これを用いた数値計算により、異なる流量・水深・風速の下でのかけ流し灌漑の効果を検討した。

基礎方程式

水田内の水移動は一次元流れであると単純化した。この場合、田面水の水収支は(1)式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} - I - ET \quad (1)$$

ここで Q : 単位水田幅あたりの流量, h : 水深, I : 浸透フラックス, ET : 蒸発散 t : 時間, x : 水口からの距離である。

水田の長さを L とし、水田内の水位が場所によらず同じであると仮定すると、水田全体の水収支式は(2)式となる。

$$L \frac{\partial h}{\partial t} = q_{in} - q_{out}(h) - (I + ET)L \quad (2)$$

ここで、 q_{in} は単位水田幅あたり灌漑水量($m^2 s^{-1}$)、 $q_{out}(h)$ は排水量であり水深 h の関数である。

(2)式を解くことで、水深変化が計算できる。

各場所の単位幅流量は(1)(2)式より

$$Q(x) = q_{in} \left(1 - \frac{x}{L}\right) + q_{out} \left(\frac{x}{L}\right) \quad (3)$$

となり、灌漑水量、排水量と x から計算出来る。

田面水と水稻の熱収支式は Kondo and Watanabe (1992) の 2 層モデルに水平水移動に伴う熱の移流項を加えたものを用いた。

$$f_v R_{\downarrow} + (1 - f_v) \sigma T_c^4 = \sigma T_w^4 + H_w + LE_w + G + C_w \frac{\partial h T_w}{\partial t} + C_w \frac{\partial Q T_w}{\partial x} + C_w I T_w \quad (4)$$

$$(1 - f_v)(R_{\downarrow} + \sigma T_w^4) = 2(1 - f_v) \sigma T_c^4 + H_c + LE_c \quad (5)$$

ここで、 T_w : 水温, T_c : 葉温, R : 入力放射量(日射+天空放射), f_v : 透過率, H_w, H_c : 水面, 群落からの顕熱, LE_w, LE_c : 水面, 群落からの潜熱, G : 地中熱伝導, C_w : 水の体積熱容量である。(4)式が田面水の、(5)式が水稻の熱収支式である。(4)(5)式中の潜熱・顕熱フラックスは、バルク式により計算した。バルク輸送係数は Watanabe(1994)の式を用いた。

地温分布は、水平方向の熱伝導を無視した、鉛直一次元熱伝導移流方程式により計算した、

$$C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} - C_w I \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (6)$$

ここで、 T_s : 深さごとの地温, C_s : 土壌の体積熱容量, K_s : 土壌の熱伝導率, z : 深さである。

数値計算方法

水平方向に田面水と群落を、水平・鉛直方向に土壌を有限差分法で離散化し水温・葉温・地温を以下の方法で計算した。まず、水収支式(2)式をニュートンラフソン法で計算し、水深および場所ごとの単位幅流量を計算した。

得た水深と流量および仮の地表面温度 T_s^0 の下で、(4)(5)式をニュートンラフソン法で解き、水温、葉温および各種フラックス(長波、顕熱、潜熱、 G)を計算した。ただし、移流項は風上差分で解いた。得た G を境界条件として(6)式を陰的差分法で解き、深さごとの T_s を計算した。この T_s と T_s^0 が一致するまで反復計算し、水温・葉温・地温を得た。

の計算を水平方向の差分点の上流側から

* 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agric. and Life Sciences, The Univ. of Tokyo
キーワード: 高温登熟障害, かけ流し灌漑, 熱収支式

順番に計算することで、水平方向の、水温、葉温、深さごとの地温を計算した。

計算条件

気象条件は、入力放射量 400Wm^{-2} (夜間を想定)、気温 25 、相対湿度 80% 、で一定とした。また、葉面積指数 4 、群落高さ 1m 、初期水温、初期地温、下端境界地温は 25 、灌漑水温 20 とした。風速 1m s^{-1} 、初期水深 (=セキ板上端の高さ) 1cm 、灌漑水量 5mm h^{-1} 、を基準とし、灌漑水量の違い(水深一定(灌漑水量=浸透量)、 $3, 5, 10\text{mm h}^{-1}$)の4条件、

セキ板の高さ (=初期水深) を ($1, 3, 10\text{cm}$) の3条件、風速を2条件($0, 1\text{m s}^{-1}$)に変化させた場合のかけ流しの効果を比較した。水平方向の節点数は20点、鉛直方向の土壌の節点数は30点数とし、空間刻みは 10s とした。

結果

Fig.1 は単位幅流量 5mm h^{-1} で、かけ流し灌漑を行った場合の水温分布変化である。水温は時間の経過と共に水口近傍から順に低下した。水口から離れるにつれ水温が低下し始める時間は遅くなりまた水温低下は小さくなった。

Fig.2 に異なる灌漑水量の下での水温分布(10時間後)の比較、Fig.3 に異なるセキ板高さ (=初期水深)の下での水温分布の比較を示す。水温が低下する領域は、灌漑水量が多いほど、また、水深が低いほど、増加した。これは灌漑水量の増加と水深の低下が、灌漑水の到達範囲を増加させるためである。また、灌漑水の増加は遠方の水温をより低下させた。

Fig.4 は無風時と風速 1m s^{-1} 時の葉温分布の計算結果である。無風条件下では、風速 1m s^{-1} と比べ、葉温は 2 以上低く、水温低下に伴う葉温低下も大きかった。一般に風速が増加すると、葉温は大気条件(特に気温)に支配される。そのため、かけ流し灌漑による葉温の冷却効果は、風速の増加に伴って減少する。

以上より、かけ流し灌漑の冷却効果は、灌漑水量が多い、水深が浅い、風速が弱い条件ほど大きくなることが明らかになった。

引用文献:Kondo and Watanabe (1992), Journal of the Atmospheric Sciences, 49(23): 2183-2199. Watanabe, T.,(1994): Boundary-layer meteorology 70, 13-15

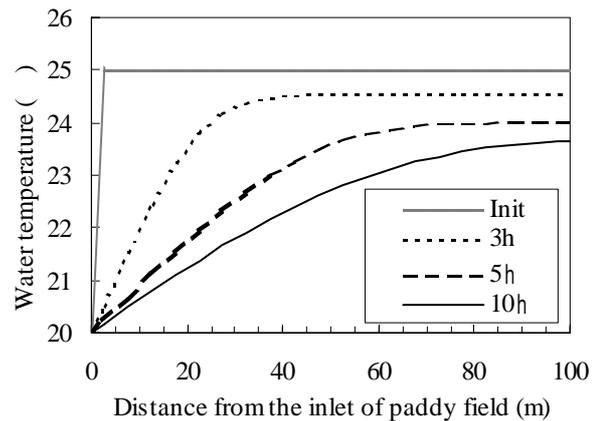


Fig.1 Changes in water temperature distribution.

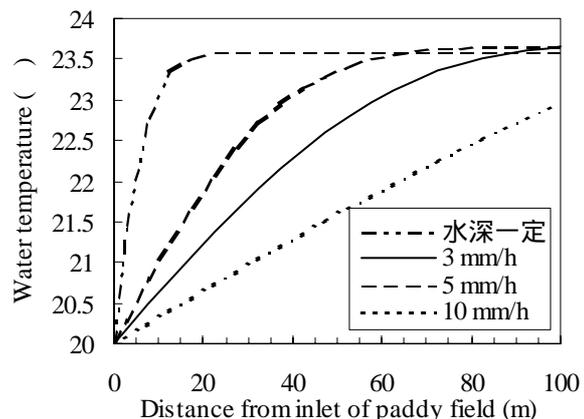


Fig.2 Changes in water temperature distribution under different irrigation rate conditions.

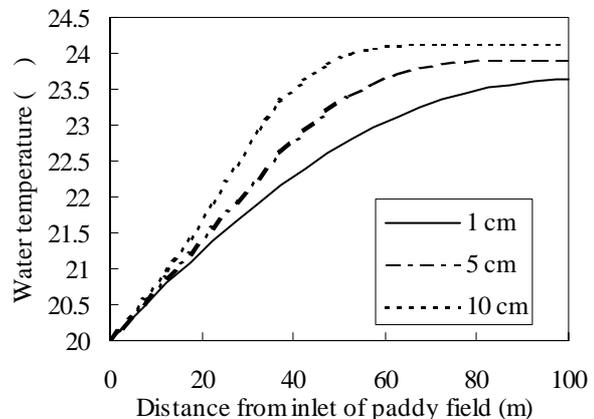


Fig.3 Changes in water temperature distribution under different initial water depth conditions.

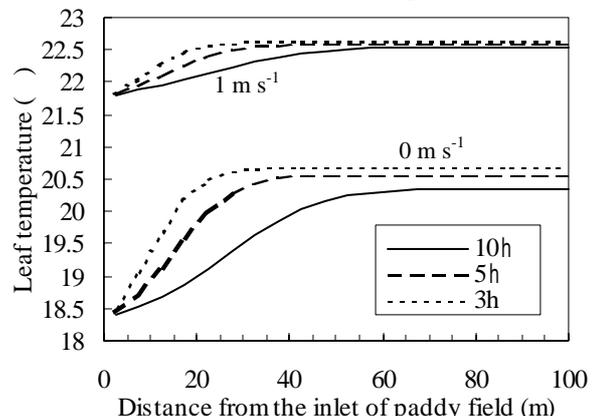


Fig.4 Changes in leaf temperature distribution under different wind speed conditions.