

田面水と水稻の熱収支式の近似解析解による 水稻の高温登熟障害抑制のためのかけ流し灌漑の検討

Approximate analytical solution of water and canopy temperature on the two layer model of heat balance of paddy field to analyze continuous irrigation with running water for preventing high temperature damage to rice grain ripening

○西田和弘* 宇尾卓也* 吉田修一郎* 塩沢 昌*

Kazuhiro Nishida, Takuya Uo, Shuichiro Yoshida, Sho Shiozawa,

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、熱の移流項を考慮した水稻と田面水の熱収支式の近似解を求め、解と解のパラメータを考察することで、かけ流し灌漑の効果を検討した。

基礎方程式

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基礎方程式として用いた。

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

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

ここで、 T_w :水温、 T_c :植生温度、 R_{\downarrow} :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、 Q :単位水田幅あたりの流量、 h :水深、 C_w :水の体積熱容量、 t :時間、 x :水口からの距離。(1)式が田面水の、(2)式が水稻の熱収支式である。

(1)(2)式は温度(T_w, T_c)に関する非線形項を持つため、厳密な解析解を得ることは難しい。そこで、各フラックス項を温度に対して線形化し、温度に関しての線形式に変換した。

葉温と水温の関係(葉温の解)

(2)式の線形式を植生温度 T_c について解き水温 T_w について整理すると(3)式となる、

$$T_c = a_{Tc} T_w + b_{Tc} \quad (3)$$

$$a_{Tc} = \frac{4(1 - f_v) \sigma T_a^3}{8(1 - f_v) \sigma T_a^3 + K_{HC} + K_{LEC}} \quad (4)$$

ここで a_{Tc}, b_{Tc} は気象条件、植生条件で決まる係数、 K_{HC}, K_{LEC} は顕熱、潜熱の交換係数、 σ はステファンボルツマン係数である。係数 a_{Tc} は水温の葉温への影響を表し、これが大きいほど水温の影響が植生温度に及ぶ。すなわち、(3)式より、かけ流し灌漑等の水管理によって、水温が ΔT_w 変化した場合、植生温度は、 $a_{Tc} \Delta T_w$ 変化することがわかる。Fig.1に a_{Tc} と風速の関係の一例を示す。無風条件では水温低下に伴う植生温度低下は大きく $a_{Tc}=0.5$ であるが、風速の増加に伴い、 a_{Tc} は低下した(風速1 m/sで、0.17(夜)、0.07(昼))。風速の増加は、顕熱・潜熱による大気との熱交換を増加させるため、植生の熱収支における田面水からの放射の影響が相対的に小さくなる。したがって、風速の増加に伴い、かけ流し灌漑による植生温度低下効果は減少する。

水温の解

単位幅流量 Q 、水深 h を時間によらず一定(流速 $v=Q/h$ 一定)と仮定し、(1)式の線形式を、 $s = x - vt$ 、 $t = t$ により座標変換すると、(1)式は単純な1階の常微分方程式になる。これを初期条件($t=t_0$ で $T_w(s, t_0)$)の下で解き、元の座標に戻すと、水温の解は(5)式となる。

$$T_w(x, t) = T_w^{\infty} + (T_w(x - vt, t_0) - T_w^{\infty}) \exp\left(-\frac{a_{Tc} T_w}{C_w h} (t - t_0)\right) \quad (5)$$

ここで、 T_w^{∞} は気象条件で決まる平衡温度、 a_{Tc} は気象・植生・土壌の条件で決まる係数である。灌漑水の到達の有無に注意して初期条件($x > vt$ で初期水温 $T_w(x, 0), x < vt$ で灌漑水温 $T_w(0, x - vt)$)

* 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、水田の熱収支

を選ぶと、水温は距離 x と灌漑水の到達距離 vt の関係で次のように表すことが出来る。

1) $x > vt$ (灌漑水が未到達)

$$T_w(x,t) = T_w^\infty + (T_w(x-vt,0) - T_w^\infty) \exp\left(-\frac{a_{T_w}}{C_w h v} t\right) \quad (6)$$

2) $x < vt$ (灌漑水が到達)

$$\begin{aligned} T_w(x,t) &= T_w^\infty + (T_w(0, t - \frac{x}{v}) - T_w^\infty) \exp\left(-\frac{a_{T_w}}{C_w h v} x\right) \\ &= T_w^\infty + (T_w(0, t - \frac{x}{v}) - T_w^\infty) \exp\left(-\frac{a_{T_w}}{C_w Q} x\right) \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式より、灌漑水が到達している場所($x < vt$)では、気象条件が同じ場合、単位幅流量 Q によって距離と水温の関係が決まることがわかる。この場合、水口からの距離, x ,が増えると指数関数的に水温が上昇する。Fig.2は、単位幅流量 $0.3 \text{ m}^2/\text{s}$ 水深 3 cm の下での計算例である。ここで、 $\xi = C_w h / a_{T_w}$ と定義すると、 ξ は水温変化が灌漑水温と平衡水温の差の $1/e$ となる距離を表す。この ξ は Q に比例して増加し、また、 a_{T_w} が風速の増加関数であることから、風速が強いほど ξ は減少する(Fig.3)。したがって、 Q の増加、風速低下によって水温低下効果は大きくなる。

Fig.4は同一流量、異なる水深の元での水温分布の計算例である(初期温度 28°C 、灌漑水温 22°C 、気温 25°C で一定、夜間(蒸散なし)、灌漑 10 時間後)。灌漑水が到達している水口近傍では水深によらず、同じ水温となったが、水深が浅いほど、遠方まで灌漑水が到達し、水温低下が見られた。また灌漑水が到達していない遠方では、水深が深いほど高水温となった。

流量が同じ場合、水深が浅いほど流速が速くなるため、同じ時間で比較すると、水深が浅いほど遠方まで灌漑水が到達し(vt が大きくなる)、遠方まで温度低下の影響が及ぶ。また、水深が深いと、平衡温度に達するまでの時間が延びるため、灌漑水が到達していない遠方(水尻付近)では、初期水温の影響が長時間残る。

以上のように、かけ流し灌漑時の水温と植生温度の解を得た。これを種々の気象条件、灌漑水の条件に対し適用することで、かけ流し灌漑の効果が予測できる。

引用文献:Kondo and Watanabe (1992), Journal of the Atmospheric Sciences, 49(23): 2183-2199.

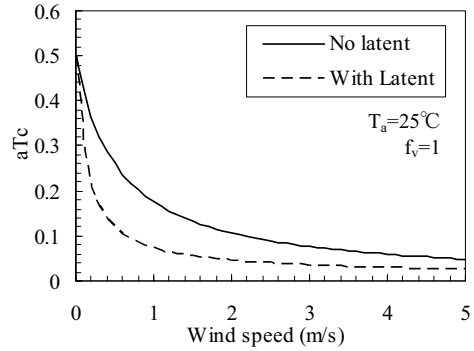


Fig.1 The relationship between aT_c and wind speed. No latent: conditions of no transpiration from vegetation (e.g. Night time), With latent: the existence of the transpiration (e.g. Day time)

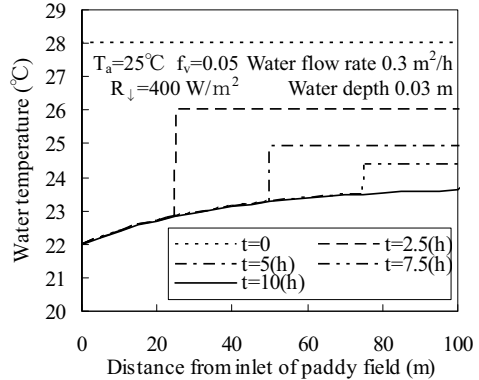


Fig.2 Changes in water temperature profile.

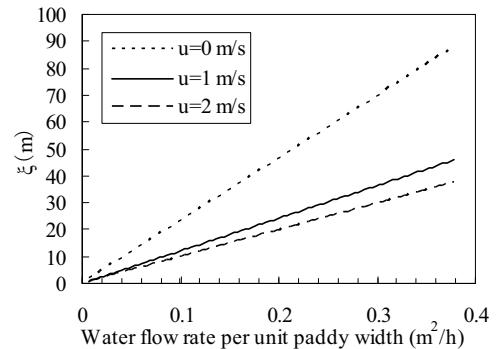


Fig.3 The relationship between water flow rate and ξ . u : wind speed (m/s). No latent condition.

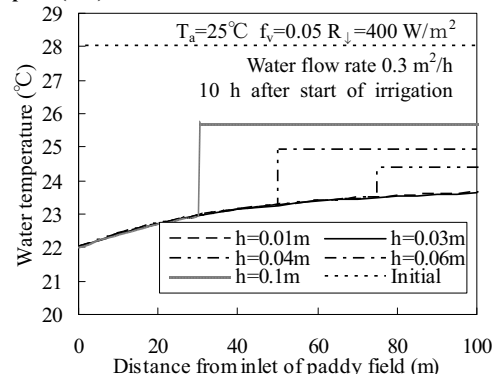


Fig.4 Changes in water temperature profile under different water depth condition. h : water depth