



Title	高度な農地水管理のための水田水温シミュレーション
Author(s)	丸山, 篤志; 石田, 祐宣; 桑形, 恒男 他
Citation	低温科学, 77, 137-144
Issue Date	2019-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.77.137
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74001
Type	departmental bulletin paper
File Information	17_p137-144.pdf



高度な農地水管理のための水田水温シミュレーション

丸山 篤志¹⁾, 石田 祐宣²⁾, 桑形 恒男¹⁾, 渡辺 力³⁾

2018 年 12 月 27 日受付, 2019 年 1 月 17 日受理

陸面大気相互作用によって形成される農耕地の熱環境は、作物の生育や収量を左右するなど農業上の重要な役割を果たしている。群落微気象モデルの農業における利用例として、イネの生育に影響を及ぼす水田水温のシミュレーションについて解説した。水田水温を推定する既存モデルをレビューするとともに、田面と群落の熱収支に基づいたモデルを紹介し、田面における熱交換係数の特性を論じた。これをもとに、水田の水深や灌漑時刻など水管理方法によって水田水温がどのように変化するかシミュレーションを行った。その結果から、水管理方法が水田群落の熱環境に強く影響を及ぼしている可能性を示した。

Simulation of paddy water temperature for advanced water management on agricultural lands

Atsushi Maruyama¹, Sachinobu Ishida², Tsuneo Kuwagata¹ and Tsutomu Watanabe³

The thermal environment of the agricultural land formed by the interaction between the land surface and the atmosphere plays an important role in agriculture to affect growth and yield of crops. As an application example of micro-meteorological model in agriculture, a water temperature simulation of rice paddies was described. In addition to reviewing existing models estimating paddy water temperature, a model based on the energy budgets of the ground and the plant canopy was explained in detail, and the characteristics of the heat exchange coefficient on the paddy ground surface was also discussed. Based on these knowledge, it was simulated how the paddy water temperature is changed by water management such as water depth and irrigation time in paddy fields. It was suggested from the result that the water management strongly affects the thermal environment in paddy fields.

キーワード：作物生育, 自然対流, 粗度長, 熱輸送, 深水管理

Crop growth, Natural convection, Roughness length, Heat exchange, Deep-flooding management

1. はじめに

陸面と大気との相互作用によって形成される農耕地の地温や群落温度などの熱環境は、作物の生育や収量に影

響を及ぼす。一方で、農耕地では栽培する作物・作期の選択、あるいは土壌の耕起や水管理などによって陸面の状態を人為的に変化させることができる。そのため、農業においては、古くから陸面と大気との熱交換（あるい

連絡先

丸山 篤志

農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター

〒305-8604 茨城県つくば市観音台 3-1-3

Tel. 029-838-8148

e-mail: maruyama@affrc.go.jp

1) 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター

Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization, Tsukuba, Japan

2) 弘前大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, Hirosaki, Japan

3) 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

は運動量・物質交換)を効果的に利用することで作物の生産が行なわれてきた。例えば、農耕地における“畝”はその典型的なものの一つであろう。畝は、平坦な耕地の比較的高い場所に作物体を規則的に配置させることで、作物の日射環境や風通しをよくすると同時に、地温や土壌水分を適切に保つ役割を果たしている。あるいは、農耕地の“灌漑”も熱環境や水環境を大きく変化させる重要なものである。灌漑によって土壌水分は増加し、土壌熱容量および日中の潜熱の増加によって一般に地表面温度の振幅は減少する。さらに、水田では水深も人為的に変化させることができるため、その管理方法によっても水田水温などの熱環境が変化する。

水田水温は、イネの発育、伸長、展葉、受精など様々な生育過程に影響を及ぼす (Shimono et al., 2004; Roel et al., 2005; Murai-Hatano et al., 2008; Julia and Dingkuhn, 2013; Fukui et al., 2017)。特に、穂ばらみ期の低温による受精障害の発生は収量に直接的な影響を及ぼす。夏季の低温日の水田水温は一般的に気温よりも高い傾向があり (Ku wagata et al., 2008)、さらに水深が深いほど水田水温の日平均値が高いことが経験的に知られている (佐藤, 1960; Uchijima, 1976; Stuerz et al., 2014)。そのため、低温期間中に深水管理によって稲体を保温することで、低温障害を回避する技術が発達してきた (Satake et al., 1988)。このような気象条件や水管理方法による水田の熱環境の変化を把握することは、陸面における熱交換や熱収支が農業でどのような役割を果たしているのか理解する上で重要であろう。ここでは、農業における群落微気象モデルの利用例として、水田水温のシミュレーションを紹介する。すなわち、水田水温を推定する群落微気象モデル、田面 (群落下の地表面: 水面または土壌面) における熱交換係数の特性、さらに水管理方法による水温変化のシミュレーションについて解説する。

2. 水田水温を推定する群落微気象モデル

気象条件から水田水温を推定するため、これまでに多くの研究が行なわれており、各種のモデルが提案されている。ほとんどのモデルは地表面の熱収支理論に基づいており、大きく3種類に分類される。すなわち、1) 田面の熱収支式に基づいて水温を計算するモデル (Uchijima, 1963; 高見ほか, 1989; 丸山ほか, 1998; Cofalini et al., 2005; Ohta and Kimura, 2007; Ku wagata et al., 2008)、2) 田面と群落の熱収支式に基づいて水温を計算するモデル (Maruyama and Ku wagata, 2010; Smesrud et al., 2014; Nishida et al., 2018)、3) さらに群落を多層に分割して各

層の熱収支式を解いた上で水温を計算するモデル (井上, 1985; Kim et al., 2001; Saptomo et al., 2004) である。1) のモデルの利点は、構造が簡単のために計算や解釈が容易なことであり、水田水温の広域分布や気候との基本的な関係性を評価するのに適している。一方で、群落を通じた水温への間接的な影響、例えば気孔の環境応答や群落温度の影響は評価することができない。2) のモデルの利点は、上記の群落を通じた影響を評価できることであり、水温と同時に群落温度や水面の蒸発量、群落の蒸散量を個別に計算できる。そのため、群落微気象と作物との基本的な関係性を評価するのに適している。3) のモデルの利点は、群落温度の鉛直分布や群落内の乱流輸送を含めた総合的な微気象環境を評価できることである。そのため、作物の器官ごとの熱環境の評価や、葉群分布による微気象の変化の評価などにも広く利用することができる。一方で、モデルの構造が複雑なため、その計算には群落の特性に応じた数多くの熱力学的・生理的なパラメータを必要とする。

ここでは、2) のモデルに分類される Maruyama and Ku wagata (2010) をもとに、水田の水深と流入・流出を考慮することで、水管理の影響も評価できるようにした水田水温のシミュレーションモデル (Maruyama et al., 2017) を紹介する。モデルの理論的背景は本巻の桑形ほかの解説「水田群落微気象モデルの概要と農学分野への応用」で詳しく述べているが、図1に示す田面と群落における熱収支を以下の式で表す。

$$\begin{aligned} Rn_g &= H_g + IE_g + G_w + G_s \\ Rn_c &= H_c + IE_c \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 Rn は正味放射量、 H は顕熱フラックス、 IE は潜熱フラックスで、添え字の g と c はそれぞれ、田面－

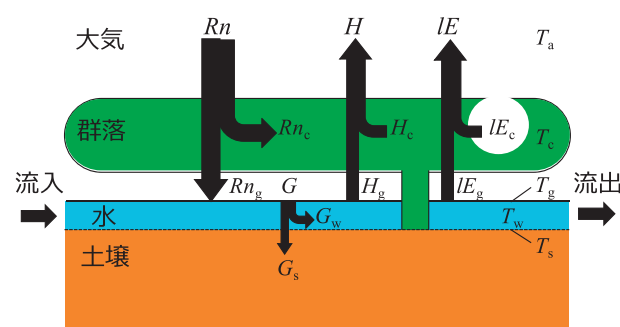


図1: 水田における田面および群落の熱収支の模式図。 T_a は気温、 T_w は水温、 T_g は田面温度、 T_s は土壌面温度、 Rn は正味放射量、 H は顕熱フラックス、 IE は潜熱フラックス、 G_w は水体の貯熱量変化、 G_s は地中熱フラックスで、添え字の g と c はそれぞれ田面－大気間と群落－大気間のエネルギー交換を表す。Maruyama et al. (2017) の図をもとに作成。

大気間と群落－大気間のエネルギー交換を表す．田面下への熱フラックスは，水体の貯熱量変化 G_w および地中熱フラックス G_s の2つの項に分けている．なお，単位はここでは省略する．田面と群落における正味放射量は以下の放射収支式で表す．

$$\begin{aligned} Rn_g &= (1-r_g)\tau_s R_s + \tau_L R_L + (1-\tau_L)\sigma T_c^4 - \sigma T_g^4 \\ Rn_c &= (1-r)R_s - (1-r_g)\tau_s R_s + (1-\tau_L)(R_L + \sigma T_g^4) - 2(1-\tau_L)\sigma T_c^4 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで， r_g は田面のアルベド， R_s と R_L は群落上への下向きの短波放射と長波放射， τ_s と τ_L は短波放射と長波放射に対する群落の透過率， σ はステファン・ボルツマン定数， T_g は田面温度， T_c は群落温度である（ τ_s は本巻の桑形ほかの解説における透過率 τ と定義が異なるので注意）．なお，田面と群落は長波放射に対して黒体（射出率 = 1）と仮定している．田面－大気間と群落－大気間における熱交換は以下のバルク輸送式で表す．

$$\begin{aligned} H_g &= c_p \rho C_{Hg} U (T_g - T_a) \\ lE_g &= l \rho C_{Eg} U (q_{sat}(T_g) - q_a) \\ H_c &= c_p \rho C_{Hc} U (T_c - T_a) \\ lE_c &= l \rho C_{Ec} U (q_{sat}(T_c) - q_a) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで， c_p は大気の大気定圧比熱， ρ は大気密度， l は水の気化熱， T_a は気温， q_a は大気比湿， U は風速， $q_{sat}(T_g)$ および $q_{sat}(T_c)$ は T_g および T_c に対する飽和比湿， C_H および C_E は顕熱および潜熱に対するバルク輸送係数である．最後に，水体の貯熱量変化および地中熱フラックスは，それぞれ水深の関数および強制復元法（Watanabe, 1994）に基づいた土壌面温度の関数として以下の式で表す．

$$\begin{aligned} G_w &= c_w \rho_w D_w \frac{dT_w}{dt} + c_w \rho_w Q_{in} (T_w - T_{in}) - c_w \rho_w Q_{out} (T_w - T_{out}) \\ G_s &= \left(\frac{c_s \rho_s \lambda_s \omega}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{\omega} \frac{dT_s}{dt} + (T_s - T_{s0}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで， c_w は水の比熱， ρ_w は水の密度， D_w は水深， T_w は水温， Q_{in} は流入量， Q_{out} は流出量， T_{in} は流入する水の温度， T_{out} は流出する水の温度， T_{s0} は土壌面温度， T_s は土壌面温度の日平均値， ω は日周変化の角周波数， c_s は土壌の比熱， ρ_s は土壌の密度， λ_s は土壌の熱伝導率である．

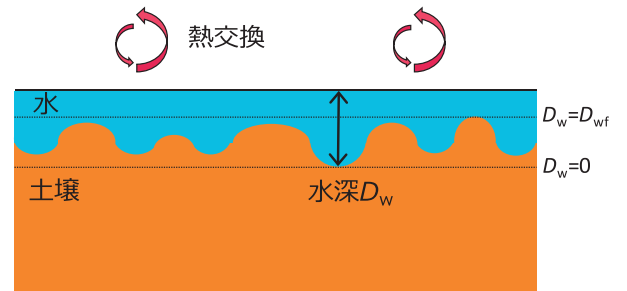
ここで，水面と土壌面は水体の層に接していることから $T_g = T_w = T_s$ とおくと，式 (1) - (4) の10個の方程式に，気象条件 (R_s , R_L , T_a , q_a , U)，水管理条件 (D_w , Q_{in} , Q_{out} , T_{in} , T_{out})，放射パラメータ (r_g , r , m_s , m_L) およびバルク輸送係数 (C_{Hg} , C_{Eg} , C_{Hc} , C_{Ec}) を与えることで，同方程式中の水温を含めた10個の未知数 (T_w ,

T_c , Rn_g , Rn_c , H_g , H_c , lE_g , lE_c , G_w , G_s) を数値的に求めることができる．このうち，放射パラメータは，作物の葉面積指数および葉の傾き具合によって変化するが，イネの生育期間を通じた熱収支の計算ができるよう，それらの要因と作物生育との関係がモデル化されている（Maruyama et al., 2007）．同様に，バルク輸送係数も群落の高さや葉面積指数，平均的な気孔コンダクタンスによって変化するが，それらの要因と作物生育との関係がモデル化されている（Maruyama and Kuwagata, 2008）．バルク輸送係数はさらに田面の凸凹の鉛直スケールにも依存し，その特性を次節で紹介する．

3. 田面における熱交換係数の特性

田面－大気間の熱交換に影響を及ぼす田面の凸凹の鉛直スケール（粗度長）は，図2に示すように水田の水深によって土壌面が水没（あるいは露出）することで変化すると考えられる．そこで，Maruyama et al. (2013) は，田面の幾何学的な粗度長と水深との関係を以下の簡単な一次関数で表した．

（土壌面が水没している場合）



（土壌面が露出している場合）

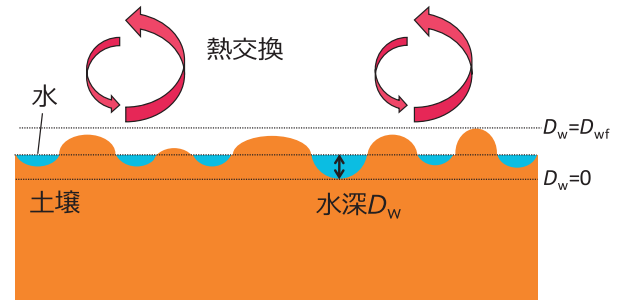


図2：田面における粗度長変化の模式図。
 D_w は水深， D_{wf} は土壌面が水没するときの水深で， $D_w > D_{wf}$ のときの田面は全て水面となり， $0 < D_w < D_{wf}$ のときの田面は水面と土壌面の両方を含む。

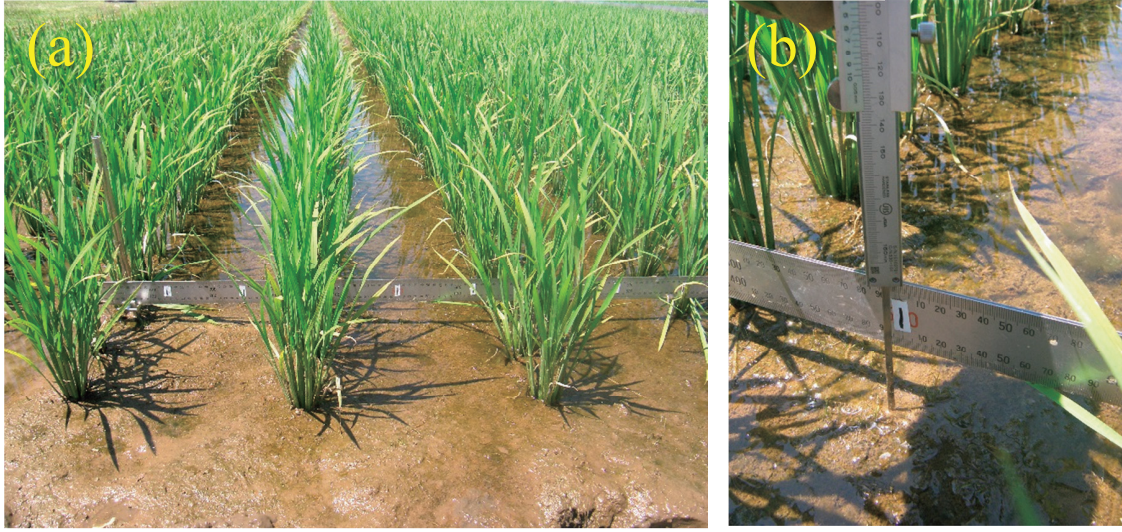


図3：水田における土壌面の幾何学的な粗度長 (h_{0s}) の計測の様子。
(a) 基準高度に水平に設置した直尺 (b) ノギスによる基準高度から土壌面までの鉛直距離の計測。

$$h_0 = \begin{cases} h_{0s} \left(1 - \frac{D_w}{D_{wf}}\right), & (D_w < D_{wf}) \\ 0, & (D_w \geq D_{wf}) \end{cases} \quad (5)$$

ここで, h_0 は田面の幾何学的な粗度長, h_{0s} は排水時における土壌面の幾何学的な粗度長, D_w は水深, D_{wf} は土壌面が完全に水没するときの水深である。湛水時における水面の幾何学的粗度長は土壌面と比べて十分に小さいことから, ここでは無視している。

幾何学的な粗度長の定義は, Kondo and Yamazawa (1986) に従って $h_0 = 2\sigma$ (σ は標高の標準偏差) とし, 図3に示すように実際の水田でノギスを用いて基準高度からの偏差を 0.125 m 間隔で計測した。その結果, 土壌面の幾何学的な粗度長は測線の方によって異なり, 畝に対して平行な方向で 21.9 mm, 直交する方向で 28.6 mm であった。この結果から水田における土壌面の幾何学的な粗度長の代表値を $h_{0s} = 25$ mm とし, さらに水深がその 2 倍 ($= 4\sigma$) になったとき土壌面がほぼ水没すると考えて $D_{wf} = 50$ mm とした。これらの値は水田の土壌特性や地域によっても異なると考えられるが, イネの移植栽培では一般的に機械による代かきが行なわれるため, 移植直後の水田では同程度の値になるものと思われる。

次に, 幾何学的な粗度長と空気力学的な粗度長の理論的な関係を Kondo and Yamazawa (1986) に従って以下のように表す。

$$\left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{z_{0s}}\right)^{-2} = \left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{h_0} + R\right)^{-2} \quad (6)$$

$$\left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{z_{0s}}\right)^{-1} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{z_{Ts}}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{h_0} + R\right)^{-1} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{h_0} + R + B_H^{-1}\right)^{-1}$$

$$\left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{z_{0s}}\right)^{-1} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{z_{qs}}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{h_0} + R\right)^{-1} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{z_a}{h_0} + R + B_E^{-1}\right)^{-1}$$

ここで, z_{0s} , z_{Ts} , z_{qs} はそれぞれ, 運動量, 熱, 水蒸気に対する空気力学的な粗度長である。これらの粗度長をもとに, 大気安定度の影響を適切に考慮することで, 田面－大気間のバルク輸送係数を計算することができる (Watanabe, 1994)。ただし, 水蒸気については表面での飽和を仮定しており, 水面や飽和した土壌表面など湿った表面を対象とする。また, k はカルマン定数, z_a は参照高度である。 R , B_H^{-1} , B_E^{-1} はそれぞれ, 粗度関数, 底層スタントン数, 底層ダルトン数と呼ばれる表面のごく近傍における運動量, 熱, 水蒸気輸送の特徴を表す無次元数で, 粗度長に加えて空気の動粘性係数や分子拡散係数から計算される (詳しくは Maruyama et al., 2017)。なお, この式を用いて先ほどの土壌面の幾何学的な粗度長 ($h_{0s} = 25$ mm) を空気力学的な粗度長に換算すると, $z_{0s} = 5$ mm, $z_{Ts} = z_{qs} = 0.15$ mm に相当する。

一方で, 群落内では一般的に風速が小さいため, 田面－大気間の熱交換は強制対流だけでなく自然対流にも支配される。ところが, バルク輸送係数の計算における大気安定度の補正ではその影響を十分には表現することができない。そこで, 自然対流条件下におけるバルク輸送係数を Kondo and Ishida (1997) に従って以下の式で表す (詳しくは本巻の石田の解説「農耕地における地表面交換係数」を参照)。

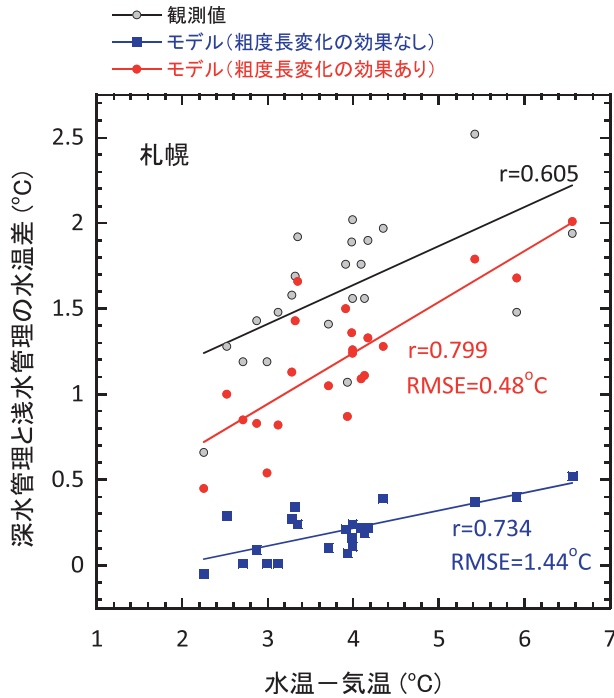


図4：深水管理と浅水管理の水田水温の差 (ΔT) に対するモデルの再現性。

ΔT の実測値およびモデル計算値 (縦軸) を深水管理の水田水温と気温の差 (横軸) に対してプロットしてある。2011 年 7 月 6 日～27 日の北海道農業研究センター (札幌市豊平区) の水田におけるイネの生育初期の観測値および解析結果 (Maruyama et al., 2017) をもとに作成。

$$\begin{aligned} C_{Hg}U &= c_f(T_g - T_a)^{\frac{1}{3}} \\ C_{Eg}U &= c_f(T_g - T_a)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 c_f は自然対流に対する熱交換係数であり、この値も土壌面の幾何学的な粗度長によって変化すると考えられることから、以下の一次関数で表す。

$$c_f = c_{fw} + (c_{fs} - c_{fw}) \frac{h_0}{h_{0s}} \quad (8)$$

ここで、 c_{fw} と c_{fs} は水田における水面と土壌面の自然対流に対する熱交換係数である。これらの値を水田の移植後における熱収支観測から求めた結果、 $c_{fw} = 0.0024$ 、 $c_{fs} = 0.0036$ が得られた。このうち水面に対する値は、過去に湖や海面で得られている値よりもやや大きい。これは水面上に存在する群落が熱交換面の温度むらを生じさせる粗度物体として作用することで、通常の開かれた水面よりも熱交換係数が大きくなったものと推察される。

このようにして、水深による幾何学的な粗度長の変化が式 (5) で計算され、強制対流および自然対流の条件下での熱交換速度が式 (6) および式 (7) - (8) で計算される。実際の計算では、両方で計算される値のどちらか大きいほうを熱交換速度として用いる。図 4 は、水深に

よる幾何学的な粗度長の変化が水温にどのように関わっているのかを示す解析例である。この図には、札幌における深水管理 (水深 10 cm) と浅水管理 (水深 0 cm) の水田の水温差 (ΔT : 日平均値) について、実際の観測値とモデルによる計算値が示されている。 ΔT は水温と気温との差に依存する傾向があるため、図の横軸に深水管理の水温と気温との差をとってある。また、モデルによる計算値として、式 (5) を用いて h_0 を変化させた場合 (粗度長変化の効果あり) と変化させない場合 (粗度長変化の効果なし) の 2 つを示した。 ΔT は最大で 2°C 程度に達したが、モデルで粗度長変化の効果を考慮しない場合はこの温度差をほとんど再現できないのに対し、考慮した場合には観測結果に近い値が得られており、粗度長の変化が水温にかなりの影響を与えていることがわかる。すなわち、水深が浅い場合には土壌面が露出することで田面の粗度長が大きくなり、大気との熱交換が活発になることで水温が低くなる。反対に、水深が深い場合には土壌面が水没することで田面の粗度長が小さくなり、大気との熱交換が抑制されることで水温が高くなる (図 2 を参照)。

4. 水管理方法による水温変化のシミュレーション

これまでに解説した群落微気象モデルと田面の熱交換係数のモデルを用いることで、様々な気象条件や水管理方法による水田水温の変化をシミュレーションできる。図 5 には、イネの低温障害が発生するような気象条件を想定し、札幌の 6 月の低温日を対象に、水深の変化が水田水温にどのような影響を与えるのかシミュレーションした結果を示す。

日平均水温は水深の増加とともに上昇する傾向がみられ、その上昇幅は最大で 2.5°C に達している。特に、田面の粗度長が変化する水深 5 cm 以下の範囲での上昇が顕著であり、水田水温が田面の粗度長に強く依存していることがわかる。このことから、水田において低温障害の対策として実施される深水管理 (Satake et al., 1988) は、稲体の一部を (気温よりも水温が高いため) 水面下で保温すると同時に、水温自体も上昇させる効果のあることがわかる。日最高水温は、水深 5 cm 以下の範囲では日平均水温と同様に水深の増加とともに上昇する傾向がみられるが、水深 5 cm 以上の範囲では逆に低下する傾向がみられる。これは、水体の体積熱容量が土壌よりも大きいため、水体が増加すると熱収支の結果として表面温度の日変化が小さくなるためである。一方で、日最低水温は水深の増加とともに単調に上昇し、水体の熱容

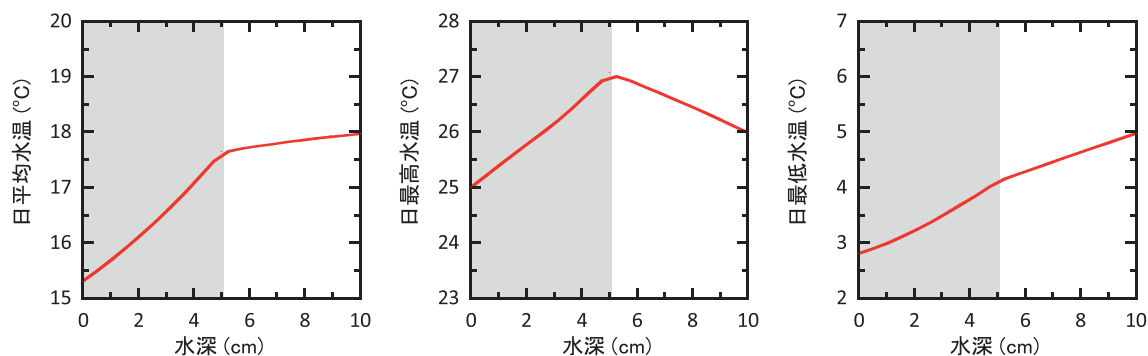


図5：異なる水深に対する水温変化のシミュレーション。

(計算条件：日平均気温 10°C ，気温日較差 10.8°C ，水蒸気圧 8.5 hPa ，日射量 350 W m^{-2} ，風速 2 m s^{-1} ，葉面積指数 $0.25\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$)。

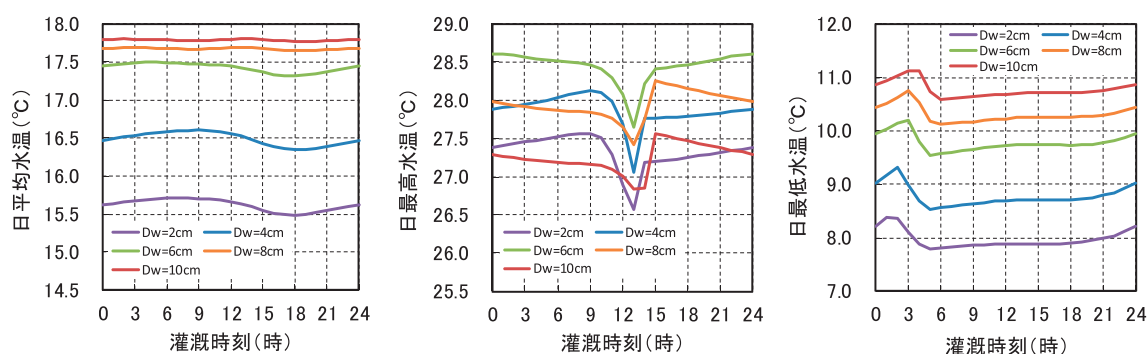


図6：異なる灌漑時刻に対する水温変化のシミュレーション。

(計算条件：日平均気温 10°C ，気温日較差 10.8°C ，水蒸気圧 8.5 hPa ，日射量 350 W m^{-2} ，風速 2 m s^{-1} ，葉面積指数 $0.25\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$)。

量の増加の影響を受けて、水深 5 cm 以上の範囲でも上昇が続いている。

一般に、作物の生育は温度の日平均値だけでなく日最高値や日最低値にも左右される (Lobell, 2007)。そのため、水深の変化は、日平均水温と同時に日最高水温や日最低水温の変化も通じて複雑な形でイネの生育に影響を与えていると考えられる。また、低温（あるいは高温）によるイネの受精障害の発生では、 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ の温度変化によって稔実率が最大で 30% 以上も異なることが知られている (Shimono et al, 2005; Maruyama et al., 2013)。そのため、受精障害の発生するような気象条件下では、水深など水管理方法の違いが、水温の変化を通じてイネの収量にも影響を与えている可能性がある。

次に、水管理で毎日の水深を一定に保った場合に、灌漑時刻によって水田水温がどのように異なるのかシミュレーションした結果を図 6 に示す。ここでは、先のシミュレーションと同様に札幌の 6 月の低温日を対象に、それぞれ異なる時刻 (1~24 時) に灌漑を実施した場合の水田水温を計算している。減水深は 20 mm day^{-1} と仮定し、前日からの減水分を補給するために水深 20 mm

相当の灌漑を定時刻に行い、流入した水は水田全体に速やかに広がるものと仮定している。また、流入水の温度は、水源からの距離が十分に離れた用水路を想定し、前日の水田水温の日平均値に等しいと仮定している。

日平均水温に着目すると、水深が浅い場合は灌漑時刻によって温度が変化し、3~9 時に灌漑を行ったときの温度が高く、反対に 18 時頃に灌漑を行ったときの温度が低いことがわかる。これは主に、午前中に灌漑を行なうことで熱交換の活発な日中の水深が比較的深くなり、それによって粗度長が小さいことが水温を高める方向に作用するためである (前節を参照)。一方で、水深が深い場合には温度変化があまり明瞭でない。すなわち、日平均水温は水深が浅い場合ほど灌漑時刻による違いが現れやすいといえる。次に、日最高水温に着目すると、全ての水深において、灌漑時刻によって温度が大きく変化しており、特に 12~14 時に灌漑を行ったときの温度が低い。これは、本来の日最高水温が出現する時刻に比較的低い温度の用水が流入することで、日最高水温が低く抑えられるためである。日最低水温も、同様に全ての水深において灌漑時刻による温度変化が大きく、温度が最も高く

なる灌漑時刻は1~4時の間であった(なお、水深が深いほどその時刻が遅い傾向がみられる)。反対に、水温が最も低くなる灌漑時刻は5~6時であり、わずかな灌漑時刻の違いが水田の熱環境に大きな影響を及ぼすことがわかる。

以上のように、水深および灌漑時刻によって水田水温は変化するため、水管理を適切に行うことで、水田水温を少しだけ制御することが可能である。同様のシミュレーションは、任意の気象条件に対して実行できるため、その結果から水田水温を高く(あるいは低く)する最適な時刻に灌漑を行うことで、イネの生育に適切になるよう温度制御する高度な水管理を行うことができる。このようなモデルシミュレーションに基づいた水管理は現在、水田の圃場水管理システム(若杉ほか, 2018)にも応用されており、気象予報値をもとに冷害対策のために水田水温を高める最適な灌漑時刻を計算し、圃場の給水装置を自動で遠隔操作する仕組みが構築されている。このように、陸面における熱交換や熱収支の基礎知識を、気象データやシミュレーションに基づいて農耕地で効果的に活用する新たな利用方法が広まっている。

参考文献

- Confalonieri, R., L. Mariani and S. Bocchi (2005) Analysis and modelling of water and near water temperatures in flooded rice (*Oryza sativa* L.). *Ecol. Model.*, **183**, 269-280.
- Fukui, S., Y. Ishigooka, T. Kuwagata and T. Hasegawa (2015) A methodology for estimating phenological parameters of rice cultivars utilizing data from common variety trials. *J. Agric. Meteorol.*, **71**, 77-89.
- 井上君夫 (1985) 水田微気象環境のシミュレーションモデル. 農業気象, **40**, 353-360.
- Julia, C. and M. Dingkuhn (2013) Predicting temperature induced sterility of rice spikelets requires simulation of crop-generated microclimate. *Europ. J. Agron.*, **49**, 50-60.
- Kim, W., T. Arai, S. Kanae, T. Oki and K. Musiake (2001) Application of the simple biosphere model (SiB2) to a paddy field for a period of growing season in GAME-Tropics. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **79**, 387-400.
- Kondo, J. and H. Yamazawa (1986) Bulk transfer coefficient over a snow surface. *Bound-Lay. Meteorol.*, **34**, 123-135.
- Kondo, J. and S. Ishida (1997) Sensible heat flux from the earth's surface under natural convective conditions. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 498-509.
- Kuwagata, T., T. Hamasaki and T. Watanabe (2008) Modeling water temperature in a rice paddy for agro-environmental research. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 1754-1766.
- Lobell, D. B. (2007) Changes in diurnal temperature range and national cereal yields. *Agric. For. Meteorol.*, **145**, 229-238.
- 丸山篤志, 大場和彦, 黒瀬義孝 (1998) 平衡水温モデルによる異常気象年の水田水温の推定. 農業気象, **54**, 247-254.
- Maruyama, A., T. Kuwagata, K. Ohba and T. Maki (2007) Dependence of solar radiation transport in rice canopies on developmental stage. *Jpn. Agric. Res. Quart.*, **41**, 39-45.
- Maruyama, A. and T. Kuwagata (2008) Diurnal and seasonal variation in bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 1161-1173.
- Maruyama, A. and T. Kuwagata, (2010) Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies. *Agric. For. Meteorol.*, **150**, 919-930.
- Maruyama, A., W. M. W. Weerakoon, Y. Wakiyama and K. Ohba (2013) Effects of increasing temperatures on spikelet fertility in different rice cultivars based on temperature gradient chamber experiments. *J. Agron. Crop Sci.*, **199**, 416-423.
- Maruyama, A., M. Nemoto, T. Hamasaki, S. Ishida and T. Kuwagata (2017) A water temperature simulation model for rice paddies with variable water depths. *Wat. Res. Res.*, **53**, 10065-10084.
- Murai-Hatano, M., T. Kuwagata, J. Sakurai, H. Nonami, A. Ahamed, K. Nagasuga, T. Matsunami, K. Fukushi, M. Maeshima and M. Okada (2008) Effect of low root temperature on hydraulic conductivity of rice plants and the possible role of aquaporins. *Plant Cell Physiol.*, **49**, 1294-1305.
- Nishida, K., S. Yoshida and S. Shiozawa (2018) Theoretical analysis of the effects of irrigation rate and paddy water depth on water and leaf temperatures in a paddy field continuously irrigated with running water. *Agric. Wat. Manag.*, **198**, 10-18.
- Ohta, S. and A. Kimura (2007) Impacts of climate changes on the temperature of paddy waters and suitable land for rice cultivation in Japan. *Agric. For. Meteorol.*, **147**, 186-198.
- Roel, A., R. G. Mitters, J. W. Eckert and R. E. Plant (2005) Effect of low water temperature on rice yield in California. *Agron. J.*, **97**, 943-948.
- Saptomo, S. K., Y. Nakano, K. Yuge and T. Haraguchi (2004) Observation and simulation of thermal environment in a paddy field. *Paddy Wat. Env.*, **2**, 73-82.
- Satake, T., S. Y. Lee, S. Koike and K. Kariya (1988) Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXVIII. Prevention of cool injury with the newly devised water management practices—effects of the temperature and depth of water before the critical stage. *Jpn. J. Crop Sci.*, **57**, 234-241.
- 佐藤正一 (1960) 本邦暖地の稲作気候と水田微気候ならびに微気候調節に関する研究. 九州農業試験場彙報, **6**, 259-364.
- Shimono, H., T. Hasegawa, S. Fujimura and K. Iwama (2004)

- Response of leaf photosynthesis and plant water status in rice to low water temperature at different growth stages. *Field Crop. Res.*, **89**, 71-83.
- Shimono, H., T. Hasegawa, M. Moriyama, S. Fujimura and T. Nagata (2005) Modeling spikelet sterility induced by low temperature in rice. *Agron. J.*, **97**, 1524-1536.
- Smesrud, J. K., M. S. Boyd, R. H. Cuenca and S. L. Eisner (2014) A mechanistic energy balance model for predicting water temperature in surface flow wetlands. *Ecol. Eng.*, **67**, 11-24.
- Stuerz, S., A. Sow, B. Muller, B. Manneh and F. Asch (2014) Leaf area development in response to meristem temperature and irrigation system in lowland rice. *Field Crop. Res.*, **163**, 74-80.
- 高見晋一, 菅谷博, 鳥山和伸 (1989) 水田水・地温の簡易推定法. 農業気象, **45**, 43-47.
- Uchijima, Z. (1963) An investigation on annual variations in water temperature and heat balance items of shallow water. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. Series A*, **10**, 101-125.
- Uchijima, Z. (1976) Microclimate of the rice crop: *Climate and Rice*, IRRI, 115-140.
- 若杉晃介, 鈴木翔, 丸山篤志 (2018) 圃場水管理システムを用いた ICT のフル活用による高機能水田地帯の構築. 農業農村工学会誌, **86**, 289-292.
- Watanabe, T. (1994) Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Bound-Lay. Meteorol.*, **70**, 13-35.