HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	水田群落微気象モデルの概要と農学分野への応用
Author(s)	桑形, 恒男; 伊川, 浩樹; 丸山, 篤志 他
Citation	低温科学, 77, 125-136
Issue Date	2019-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.77.125
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74000
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p125-136.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 77 （2019） 125–136
doi: 10.14943/lowtemsci. 77. 125

水田群落微気象モデルの概要と農学分野への応用

桑形　恒男[1)]，伊川　浩樹[1)]，丸山　篤志[1)]，小野　圭介[1)]
吉本　真由美[1)]，石田　祐宣[2)]，渡辺　力[3)]

2018 年 12 月 29 日受付，2019 年 1 月 17 日受理

本報告では水田群落―大気間の運動量・熱・物質輸送と群落微気象環境を物理的な理論に基づき再現する，「水田群落微気象モデル」の概要について説明し，農学分野での応用例について簡単に紹介する．はじめにモデルの構造と基本式について解説した上で，水田微気象を特徴付けるモデル中の重要なパラメータについて説明する．次に農学分野への応用として，イネの生育や稔実に影響を与える地温や水田水温の評価，コメ品質ならびに高温不稔の発生に影響を及ぼす穂温の推定に加え，イネの生育期間を通した蒸発散量の推移や，収量と直接関係した群落光合成の評価例について，将来の高大気 CO_2 濃度環境に対する影響評価を含めて紹介する．

Micro-climate model for a rice paddy field and its application to agriculture

Tsuneo Kuwagata[1], Hiroki Ikawa[1], Atsushi Maruyama[1], Keisuke Ono[1], Mayumi Yoshimoto[1], Sachinobu Ishida[2] and Tsutomu Watanabe[3]

We introduce the outline of the micro-climate model for a rice paddy field, which simulates the physical processes of momentum, heat and substances (such as H_2O and CO_2) exchanges between rice crop canopy and atmosphere and micro-meteorological conditions in the canopy. First, the structure of the model is explained, and the set of equations are described. We also explain the several model parameters which play important roles in the exchange processes between the rice crop canopy and the atmosphere and the micro-meteorology in the canopy. The model is useful not only for agro-environment studies, but also for agricultural practices, through the estimations of agro-environmental conditions in the rice paddy field, such as paddy water and soil temperatures, evapotranspiration, photosynthesis, and leaf and panicle temperatures of rice crop.

キーワード：作物―大気相互作用，蒸発散，水田微気象，地表面熱収支，作物生産環境
Crop-atmosphere interaction, Evapotranspiration, Micro-meteorology of rice paddy, Land surface heat balance, Crop production environment

連絡先
桑形　恒男
農研機構　農業環境変動研究センター
〒306–8604　茨城県つくば市観音台 3–1–3
Tel. 029–848–8202
e-mail：kuwa@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

1．はじめに

水田や畑地などの作物群落（湛水層や土壌層を含む）と大気との間では，運動量・熱・物質（水蒸気や二酸化炭素）が大気乱流によって効率的に輸送されている．それら大気乱流による輸送過程を通して，作物体の温度分布や群落内の気温・湿度・二酸化炭素濃度などの群落微気象環境が，群落外の気象条件と作物の生理・生態的な特性に依存した形で形成される．

一方，作物群落と大気間の二酸化炭素や水蒸気の輸送は，作物群落の光合成や蒸発散の変化を通して，作物の収量や水利用に直接的な影響を与える．葉温や穂温などの作物体の温度や群落内の気温・湿度分布，根域の温度や土壌水分もまた，作物の生育や品質，病虫害の発生などに大きな影響を与える．例えば水稲においては，出穂・開花時ならびに登熟前期の穂温が，猛暑年の不稔率増加やコメの品質低下に直接の影響を与えている可能性が示唆されている（Hasegawa et al., 2011; Yoshimoto et al., 2011 など）．また作物病害を引き起こす糸状菌やバクテリアは，結露や降雨による葉面の濡れが原因で植物体に感染しやすくなる．イネの最重要病害である「いもち病」の場合，気温 15〜25℃で夜間に葉の濡れが 10 時間以上継続すると，いもち病菌が葉に侵入することが知られている（越水，1988）．

作物や自然植生を含む植物群落と大気間の運動量・熱・物質輸送は，大気に対しても様々なスケールで影響を与える．例えば耕作期間中の水田においては，顕熱に比べて潜熱輸送が卓越するため，晴天日の日中に周囲に比べて低温となる（Kuwagata et al., 2014, 2018）．これは水田の気候緩和作用として知られている．また北半球で暖候期に大気 CO_2 濃度が低下するのは，陸上の植物活動の活発化にともない，植物が光合成によって大気中の CO_2 を大量に吸収することが原因である．

本報告では，われわれの研究グループがこれまで開発してきた，水田群落―大気間の運動量・熱・物質輸送と群落微気象環境を物理的な理論に基づき再現する，「水田群落微気象モデル」の概要について説明し，その農学分野における応用例について簡単に紹介する．

2．モデルの構造と基本式

2.1　基本式

「水田群落微気象モデル」の基本的な考え方は，Kondo and Watanabe（1992）に基づいており（近藤，1994; Watanabe, 1994），それに水田群落微気象を正確に再現するために必要な改良がなされている（Kuwagata et al., 1998）．水平方向に一様な水田を想定し，植物群落層（一層）と湛水層ならび土壌層との間の熱交換をモデル化する（図 1）．群落下の地表面（水面または土壌面）ならび群落層（全体を一層とする）の熱収支は，それぞれ次式によって表すことができる．

$$S_g+m_L L_d+(1-m_L)\sigma T_c^4=\sigma T_g^4+H_g+lE_g+G \quad (1)$$

$$S_c+(1-m_L)(L_d+\sigma T_g^4)=2(1-m_L)\sigma T_c^4+H_c+lE_c \quad (2)$$

ここで S_g と S_c はそれぞれ群落下の地表面と群落層が吸収する日射量，H_g と lE_g は群落下の地表面から大気に輸送される顕熱ならび潜熱フラックス（W m^{-2}），H_c と lE_c は群落層から大気に輸送される顕熱ならび潜熱フラックス（W m^{-2}）を表す．ただし E_g は群落下の地表面から大気への蒸発速度（kg m^{-2} s^{-1}），E_c は群落層から大気への蒸発散速度（kg m^{-2} s^{-1}），l は水の気化熱（J kg^{-1}）である．また L_d は群落上端に入射する下向き長波放射量（大気放射）（W m^{-2}）を，G は群落下の土壌や湛水層に蓄えられる熱フラックス（W m^{-2}）をそれぞれ表している．さらに T_g と T_c は，群落下の地表面ならびに群落層の温度（K），m_L は群落層の長波放射量に対する透過率，σ はステファンボルツマン定数（$=5.67\times10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}）である．群落下の地表面と群落層を構成する個々の葉は長波放射に対して黒体（射出率＝1）であると仮定している．

群落下の地表面－大気間と群落層－大気間における顕熱 H と潜熱 lE の交換量は，以下のバルク輸送式で表すことができる．

$$H_g=c_p\rho C_{Hg}U(T_g-T_a) \quad (3)$$

$$lE_g=l\rho C_{Eg}U(q_{sat}(T_g)-q_a) \quad (4)$$

$$H_c=c_p\rho C_{Hc}U(T_c-T_a) \quad (5)$$

$$lE_c=l\rho C_{Ec}U(q_{sat}(T_c)-q_a) \quad (6)$$

ここで T_a，q_a，U は，それぞれ群落上における気温（K），比湿（kg kg^{-1}），風速（m s^{-1}）であり，q_{sat}（T_g）と q_{sat}（T_c）は地表面温度 T_g と群落温度（群落層の平均的な温度）T_c に対する飽和比湿（kg kg^{-1}），c_p は空気の定圧比熱（J kg^{-1} K^{-1}），ρ は大気密度（kg m^{-3}）をそれぞれ表す．また C_{Hg} と C_{Eg} は群落下の地表面－大気間の顕熱と潜熱フラックスに対するバルク輸送係数（無次元），C_{Hc} と C_{Ec} は群落層－大気間の顕熱と潜熱フラックスに対するバルク輸送係数（無次元）である．

群落下の土壌や湛水層に蓄えられる熱フラックス G

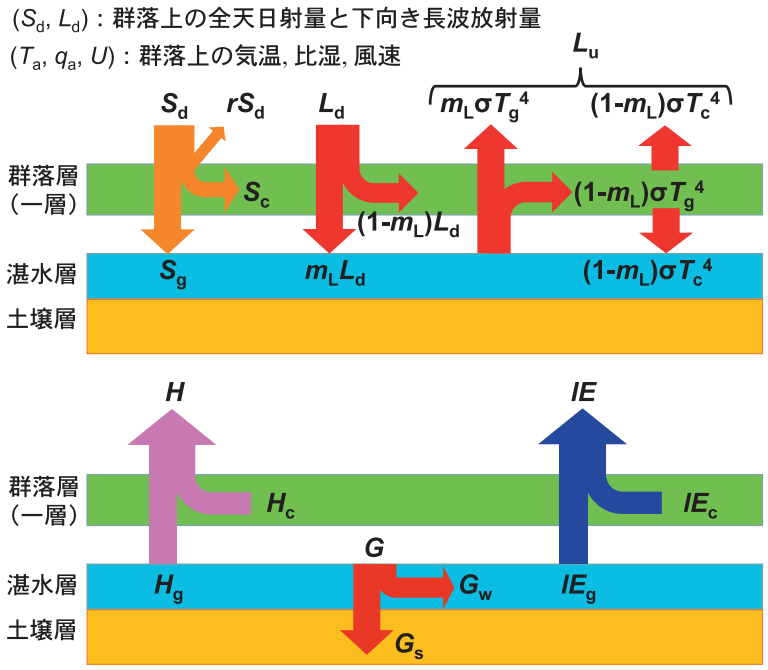


図 1：「水田群落微気象モデル」における植物群落層と湛水層ならび土壌層との間の熱交換過程の模式図.
各矢印は 3 層の間で交換される熱フラックスを表している．ここで群落下の地表面温度 T_g は湛水層の水温 T_w（鉛直方向に一定値を仮定）と一致する（式 11）．上側の図が放射フラックス，下側の図がそれ以外のフラックス（顕熱・潜熱フラックスと地表面下に輸送される熱フラックス）をそれぞれ表している．$L_u = m_L\sigma T_g^4 + (1-m_L)\sigma T_c^4$ は群落から大気に放出される長波放射フラックスである（本文中では説明省略）．

は次式で表すことができる．

$$G = G_w + G_s \tag{7}$$

ここで G_w と G_s は湛水層の貯熱量変化と土壌層への熱フラックス（W m^{-2}）で，それぞれ次式によって表される．

$$G_w = c_w\rho_w D_w\frac{\partial T_w}{\partial t} + c_w\rho_w w_p^*(T_w - T_w^*) \tag{8}$$

$$G_s = -\lambda_s\frac{\partial T_s}{\partial z}\bigg|_{z=0} \tag{9}$$

c_w は水の比熱（J kg^{-1} K^{-1}），ρ_w は水の密度（kg m^{-3}），D_w は湛水層の深さ（m），w^*_p は水田外からの水の流入速度（m s^{-1}），T_w は湛水層の水温（鉛直方向に一定と仮定）（K），T^*_w は水田外から流入する水の温度（K）である．また λ_s は土壌の熱伝導率（W m^{-1} K^{-1}），T_s は土壌温度（K），z は土壌面からの深さ（m）を表す．

土壌温度 T_s の鉛直分布の時間変化は，以下の熱伝導方程式によって表すことができる．

$$c_s\rho_s\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_s\frac{\partial T_s}{\partial z}\right) - c_w\rho_w w_p\frac{\partial T_s}{\partial z} \tag{10}$$

c_s は土壌の比熱（J kg^{-1} K^{-1}），ρ_s は土壌の密度（kg m^{-3}），w_p は土壌内の水の鉛直フラックス（m s^{-1}）（下向きに正で深さによらず一定値とする）である．

式（1）～（10）が「水田群落微気象モデル」の基本式となる．ここで式（1）～（6）における T_g は湛水層の水温 T_w と等しく，土壌面表層の温度 $T_{s(z=0)}$ は水温 T_w と一致する．

$$T_g = T_w \tag{11}$$

$$T_{s(z=0)} = T_w \tag{12}$$

10 個の基本式（式 1～10）に対して，未知数は 10 個（T_w, T_c, $T_s(z)$, H_g, H_c, lE_g, lE_c, G, G_w, G_s）となり，これら 10 個の未知数に対して式（1）～（10）を解くことができる．ここで地温鉛直分布 $T_s(z)$ は深さ z の関数であるが，偏微分方程式（10）の数値解として求まる．詳細な地温の鉛直分布が不要な場合は，式（10）の代わりに強制復元法などに基づいたより簡易な式も利用可能である（Maruyama et al., 2017）．

モデル計算の実行には群落上の気象データ（T_a, q_a, U, S_d, L_d）が入力データとして必要である（S_d は全天日射量）．群落下の地表面と群落層が吸収する日射量 S_g と S_c については，群落上の全天日射量 S_d から評価し，その評価手法に関しては 2.2 節で説明する．また水田外からの水の流入量 w^*_p，水田外から流入する水の温度

T^*_w，土壌内の水の鉛直フラックス w_p については外部条件として与える．土壌に関する物理パラメータ（c_s, ρ_s, λ_s）に関しては，既存文献や実測データに基づき決定する．群落下の地表面－大気間ならび群落層－大気間の顕熱と潜熱フラックスに対するバルク輸送係数（C_{Hg}, C_{Eg}, C_{Hc}, C_{Ec}）は群落下の地表面と群落層，大気間の熱輸送に関する最も重要なパラメータであり，2.3 節で詳しく説明する．

2.2　日射ならびに長波放射

群落下の地表面と群落層が吸収する日射量 S_g と S_c は，植物群落内の日射伝達モデルを用いて評価することができる．植物群落内の日射伝達モデルには，群落による一次元の日射吸収のみを考慮した簡単なものから，群落内の三次元的な日射吸収・透過・反射過程を考慮した複雑なものまで，さまざまなモデルが考案されていて，目的に応じて任意のモデルを用いることが可能である．ここでは Ikawa et al.（2018）などで使用している，群落内での一次元的な日射の吸収・透過・反射を考慮した簡易なモデル（2 成分モデル，Appendix）に基づく，S_g と S_c の算定式について紹介する．

2 成分モデルに基づく群落下の地表面と群落層が吸収する日射量 S_g と S_c はいずれも全天日射量 S_d に比例する．

$$S_g=\tau S_d \tag{13}$$

$$S_c=(1-r-\tau)S_d \tag{14}$$

τ と r は群落層全体で定義される日射に対する透過率と反射率（アルベド）であり，次式で表すことができる．

$$\tau=(2\alpha/A)(1-r_g) \tag{15}$$

$$r=[1-\alpha(A/B)]/r_f' \tag{16}$$

r_g は群落下の地表面のアルベド（日射に対する反射率）で，式中のパラメータ（r_f', α, A, B）は次式で表される．

$$r_f'=r_f/(1-\tau_f) \tag{17}$$

$$\alpha=(1-r_f'^2)^{1/2} \tag{18}$$

$$A=(1-r_f'r_g+\alpha)\exp(\alpha F' LAI) -(1-r_f'r_g-\alpha)\exp(-\alpha F' LAI) \tag{19}$$

$$B=(1-r_f'r_g+\alpha)\exp(\alpha F' LAI) +(1-r_f'r_g-\alpha)\exp(-\alpha F' LAI) \tag{20}$$

$$F'=F(1-\tau_f) \tag{21}$$

ここで r_f は個葉のアルベド，τ_f は個葉の日射透過率，F は葉の傾きを表すファクター（葉の傾きがランダムに分布した条件で $F=0.5$），LAI は植物群落の葉面積指数（$m^2\ m^{-2}$）である．

一方，熱収支式（1）と（2）における群落層の長波放射に対する透過率 m_L は次式で表される．

$$m_L=\exp(-d_f F_L\, LAI) \tag{22}$$

F_L は葉の傾きを表すファクター（葉の傾きがランダムに分布した条件で $F_L=0.5$）で，便宜上の都合で日射伝達における F とは別の記号で表記する．また $d_f=1.66$（全方向に一様な大気放射を仮定）を使用する．

2.3　バルク輸送係数

ここでは「水田群落微気象モデル」の最も重要なパラメータである，群落下の地表面－大気間ならび群落層－大気間の顕熱と潜熱フラックスに対するバルク輸送係数（C_{Hg}, C_{Eg}, C_{Hc}, C_{Ec}）について説明する．これらのバルク輸送係数は，接地境界層の乱流による輸送理論に基づいて評価することができる．なお，バルク輸送係数の概念や理論的背景については，本巻の石田祐宣氏の解説「農耕地における地表面交換係数」を参照されたい．

2.3.1　中立条件

中立な大気条件（群落上の高さ約 100 m 以下の仮温位が鉛直方向に一定な場合に相当）において，群落下の地表面－大気間の顕熱（または潜熱）フラックスに対するバルク輸送係数（$(C_{Hg})_N$（または（$C_{Eg})_N$）と，群落層－大気間の顕熱（または潜熱）フラックスに対するバルク輸送係数（$(C_{Hc})_N$（または（$C_{Ec})_N$）の間には，以下の関係式が成り立つ（Kondo and Watanabe, 1992）．

$$(C_H)_N=(C_{Hg})_N+(C_{Hc})_N \tag{23}$$

$$(C_E)_N=(C_{Eg})_N+(C_{Ec})_N \tag{24}$$

ここで $(C_H)_N$ ならび $(C_E)_N$ は，群落層と群落下の地表面を合わせた群落全体の顕熱（$H=H_g+H_c$）ならび潜熱フラックス（$lE=lE_g+lE_c$）に対するバルク輸送係数である．添え字 N は中立条件での値であることを示している．

群落下の地表面－大気間のバルク輸送係数，ならび群落全体（群落層＋地表面）－大気間のバルク輸送係数は，それぞれ次式によって評価することができる．

$$(C_{Hg})_N=\frac{k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}-d}{z_{T+}}\right)}=\frac{f_{hg}k^2}{\left(\ln\frac{z_a}{z_{0s}}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}}{z_{Ts}}\right)} \tag{25}$$

$$(C_{Eg})_N=\frac{k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}-d}{z_{q+}}\right)}=\frac{f_{eg}k^2}{\left(\ln\frac{z_a}{z_{0s}}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}}{z_{qs}}\right)} \quad (26)$$

$$(C_{Mg})_N=\frac{k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)\left(\ln\frac{z_a-d}{z_{0+}}\right)}=\frac{f_{mg}k^2}{\left(\ln\frac{z_a}{z_{0s}}\right)^2} \quad (27)$$

$$(C_H)_N=\frac{k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}-d}{z_T}\right)} \quad (28)$$

$$(C_E)_N=\frac{k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}-d}{z_q}\right)} \quad (29)$$

$$(C_M)_N=\frac{k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)^2} \quad (30)$$

ここで $(C_{Mg})_N$ ならび $(C_M)_N$ はそれぞれ，群落下の地表面－大気間ならび群落全体－大気間の運動量交換に関するバルク輸送係数を表す．また k はカルマン係数，z_a は群落上における風速の測定高度（m），z_{a1} は気温と湿度の測定高度である．一方，(z_{0s}, z_{Ts}, z_{qs}) は群落内の風速，気温，比湿分布に対する群落下の地表面の空気力学的粗度を表し，群落下の地表面（水面または土壌面）の空気力学的な粗さに依存する．さらに (z_0, z_T, z_q) は群落上の風速，気温，比湿分布に対する群落全体の空気力学的粗度（m），d はそれら分布に対する群落全体のゼロ面変位（m），(z_{0+}, z_{T+}, z_{q+}) は群落内の地表面の運動量と熱，水蒸気輸送に対する長さパラメータを表し，群落の高さ h（m）や葉面積指数 LAI などの関数となる（2.3.3 を参照）．式 (25)～(27) においては，それぞれ 2 番目の等号の両辺の比較からパラメータ f_{hg} と f_{eg}，f_{mg} の値が求まり，それらの値を非中立な大気条件における，群落下の地表面－大気間の顕熱（または潜熱）フラックスと運動量交換に対するバルク輸送係数の評価（2.3.2 の式 33～39）において使用する．

最後に，群落層－大気間の顕熱（または潜熱）フラックスに対するバルク輸送係数 $(C_{Hc})_N$（または $(C_{Ec})_N$）を，式 (30)～(31) を用いて算定する．

$$(C_{Hc})_N=(C_H)_N-(C_{Hg})_N=\frac{f_{hc}k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}-d}{z_T}\right)} \quad (31)$$

$$(C_{Ec})_N=(C_E)_N-(C_{Eg})_N=\frac{f_{ec}k^2}{\left(\ln\frac{z_a-d}{z_0}\right)\left(\ln\frac{z_{a1}-d}{z_q}\right)} \quad (32)$$

ここでは式 (25)～(26) の場合と同様に，それぞれ 2 番目の等号の両辺の比較からパラメータ f_{hc} と f_{ec} の値が求まり，それらの値を非中立な大気条件における，群落層－大気間の顕熱（または潜熱）フラックスに対するバルク輸送係数の計算（2.3.2 の式 40 と式 41）に使用する．

2.3.2　非中立条件

非中立な大気条件における，群落下の地表面－大気間の顕熱（または潜熱）フラックスに対するバルク輸送係数 C_{Hg}（または C_{Eg}）ならび，群落下の地表面－大気間の運動量交換に対するバルク輸送係数 C_{Mg} は，それぞれ次式を用いて評価することができる．

$$C_{Hg1}=\frac{f_{hg}k^2}{\Psi_M(z_a,z_{0s},L_g)\Psi_H(z_{a1},z_{Ts},L_g)} \quad (33)$$

$$C_{Hg2}=C_f(T_w-T)^{1/3}/U \quad (34)$$

$$C_{Hg}=\max\left[C_{Hg1}, C_{Hg2}\right] \quad (35)$$

$$C_{Eg1}=\frac{f_{eg}k^2}{\Psi_M(z_a,z_{0s},L_g)\Psi_E(z_{a1},z_{qs},L_g)} \quad (36)$$

$$C_{Eg2}=C_f(T_w-T)^{1/3}/U \quad (37)$$

$$C_{Eg}=\begin{cases}C_{Eg1} & \text{when } C_{Hg}=C_{Hg1}\\ C_{Eg2} & \text{when } C_{Hg}=C_{Hg2}\end{cases} \quad (38)$$

$$C_{Mg}=\frac{f_{mg}k^2}{\left[\Psi_M(z_a,z_{0s},L_g)\right]^2}\ (\text{when } C_{Hg}=C_{Hg1}) \quad (39)$$

ここで Ψ_M (z_a, z_{0s}, L_g)，Ψ_H (z_{a1}, z_{0T}, L_g)，Ψ_E (z_{a1}, z_{0q}, L_g) は，群落下の地表面に接する大気層（群落内）の風速，気温，比湿分布に対する無次元プロファイル関数で，風速ならび気温・湿度の測定高度（z_a と z_{a1}），地表面の粗度（z_{0s}, z_{Ts}, z_{qs}），群落下の地表面－大気間の運動量・熱・水蒸気輸送に関するモニン-オブコフの安定度スケール L_g（m）の関数で表され，具体的な関数形に関しては近藤（1994）に記載されている．ここで群落下の地表面－大気間の運動量交換に対するバルク輸送係数 C_{Mg} は，L_g の計算（式 44 と式 46）に使用する．

弱風で日射が強い条件では，群落下の地表面－大気間の熱・水蒸気輸送に対する自然対流の効果が卓越する．群落が存在すると地表面直上の風速が弱くなり，自然対流による輸送が生じやすい．本モデルでは自然対流の理論から算定されるバルク輸送係数（式 34 と式 37）が，接地境界層の乱流による輸送理論に基づくバルク輸送係数（式 33 と式 36）を上回った場合に，自然対流による輸送が支配すると仮定し，両者のバルク輸送係数の大きい方

を採用する．式（34）と（37）における C_f は群落下の地表面の粗さに依存した係数であるが，湛水層の深さが十分にある水面の場合は，$C_f = 1.2 \sim 2.4 \times 10^{-3}\ \mathrm{m\,s^{-1}\,K^{-1/3}}$ が使用できる（Kondo and Ishida, 1997; Maruyama et al., 2017）．

同様に，群落層－大気間の顕熱（または潜熱）フラックスに対するバルク輸送係数 C_{Hc}（または C_{Ec}）ならび，群落全体－大気間の運動量交換に対するバルク輸送係数 C_M は，次式より評価する．

$$C_{Hc} = \frac{f_{hc} k^2}{\Psi_M(z_a - d, z_0, L)\,\Psi_H(z_{a1} - d, z_T, L)} \tag{40}$$

$$C_{Ec} = \frac{f_{ec} k^2}{\Psi_M(z_a - d, z_0, L)\,\Psi_E(z_{a1} - d, z_q, L)} \tag{41}$$

$$C_M = \frac{k^2}{[\Psi_M(z_a - d, z_0, L)]^2} \tag{42}$$

$\Psi_M\ (z_a - d, z_0, L)$，$\Psi_H\ (z_{a1} - d, z_T, L)$，$\Psi_E\ (z_{a1} - d, z_q, L)$ は，群落上の風速，気温，比湿分布に対する無次元プロファイル関数で，群落下の地表面に接する大気層（群落内）の風速，気温，比湿分布に対する無次元プロファイル関数と同一の関数形（近藤，1994）を用いる．ここで C_M は群落全体－大気間の運動量・熱・水蒸気輸送に対するモニン－オブコフの安定度スケール L の計算（式 43 と式 45）に使用する．

大気の安定度の指標となるモニン－オブコフの安定度スケール L と L_g は，次式によって計算される．

$$L = -\frac{\Theta_0 u_*^3}{kgH_v/(c_p\rho)} \tag{43}$$

$$L_g = -\frac{\Theta_0 u_{*g}^3}{kgH_{vg}/(c_p\rho)} \tag{44}$$

$$u_*^2 = C_M u^2 \tag{45}$$

$$u_{*g}^2 = C_{Mg} u^2 \tag{46}$$

$$H_v = H + 0.608\,T_v c_p E \tag{47}$$

$$H_{vg} = H_g + 0.608\,T_v c_p E_g \tag{48}$$

$$H = H_g + H_c \tag{49}$$

$$E = E_g + E_c \tag{50}$$

ここで g は重力加速度（$\mathrm{m\,s^{-2}}$），Θ_0 は基準となる温位（K），u_* と u_{*g} はそれぞれ群落全体ならびに群落下の地表面の摩擦速度（$\mathrm{m\,s^{-1}}$），$T_v\ (= (1 + 0.608\,q_a)\,T_a)$ は群落上の仮温度（K）を表す．

2.3.3　群落下の地表面と群落層の輸送過程を支配する輸送パラメータの評価

群落上の風速，気温，比湿分布に対する粗度（z_0, z_T, z_q）とゼロ面変位 d，群落下の地表面の運動量と熱，水蒸気輸送に対する長さパラメータ（z_{0+}, z_{T+}, z_{q+}）は，群落下の地表面－大気間ならび群落層－大気間の顕熱と潜熱フラックスに対するバルク輸送係数（$C_{Hg}, C_{Eg}, C_{Hc}, C_{Ec}$）を評価する上で，最も基本的かつ重要な輸送パラメータである．

いずれの輸送パラメータとも，群落の高さ h や葉面積指数 LAI，個葉－大気間の運動量，熱，水蒸気に関する輸送係数（c_d, c_h, c_e），群落下の地表面の粗度（z_{0s}, z_{Ts}, z_{qs}）の関数となる．

$$d = f_d(LAI, h, c_d) \tag{51}$$

$$z_0 = f_{z0}(LAI, h, c_d, z_{0s}) \tag{52}$$

$$z_T = f_{zT}(LAI, h, c_d, c_h, z_{0s}, z_{Ts}) \tag{53}$$

$$z_q = f_{zq}(LAI, h, c_d, c_e, z_{0s}, z_{qs}) \tag{54}$$

$$z_{0+} = f_{zT}(LAI, h, c_d, z_{0s}) \tag{55}$$

$$z_{T+} = f_{zT}(LAI, h, c_d, z_{Ts}) \tag{56}$$

$$z_{q+} = f_{zq}(LAI, h, c_d, z_{qs}) \tag{57}$$

これらの輸送パラメータは，植物群落内外の放射伝達，乱流輸送，群落と群落下の地表面の熱収支に関わる各プロセスの相互作用を理論的に扱った多層の群落輸送モデルを数値的に解くことによって評価することができる（Kondo and Watanabe, 1992; 近藤，1994）．われわれの研究グループの「水田群落微気象モデル」（標準版）においては，多層の群落輸送モデルに基づく実験式を使用している（近藤，1994; Watanabe, 1994）．

2.4　水田微気象を特徴付ける各種パラメータ

前節でも述べたように，群落下の地表面－大気間ならび群落層－大気間の顕熱と潜熱フラックスに対するバルク輸送係数（$C_{Hg}, C_{Eg}, C_{Hc}, C_{Ec}$）は群落下の地表面と群落層，大気間の熱輸送に関する最も重要な係数である．それぞれの係数の大きさによって，群落下の地表面と群落層からの顕熱・潜熱フラックスの大小関係や，群落層における顕熱と潜熱フラックスの比率などが変化し，水温 T_w や地温 T_s，群落温度 T_c にも影響を与える．バルク輸送係数はいずれも，群落の高さ h や葉面積指数 LAI，個葉－大気間の運動量，熱，水蒸気に関する輸送係数（c_d, c_h, c_e），地表面の粗度（z_{0s}, z_{Ts}, z_{qs}）などの各種パラメータ

の関数となる（2.3.3 を参照）．

一方，全天日射量 S_d の，群落下の地表面と群落層の吸収日射量 S_g と S_c への分配率（S_g/S_d ならび S_c/S_d）と，群落層の長波放射に対する透過率 m_L も，群落下の地表面と群落層のエネルギー分配を支配する重要な要因である．群落下の地表面と群落層のエネルギー分配の変化は，前述のバルク輸送係数と同様に，群落下の地表面・群落層と大気との間の顕熱・潜熱フラックスならびに，水温 T_w や地温 T_s，群落温度 T_c に影響を与える．これら日射の分配率（S_g/S_d ならび S_c/S_d）と長波放射の透過率 m_L に対しては，群落の繁茂度の指標となる葉面積指数 LAI に加え，地表面のアルベド r_g，個葉のアルベド r_f，個葉の日射透過率 τ_f，葉の傾きを表すファクター F など，群落層の光学的な特性などを表すパラメータが大きく影響する（2.2 節を参照）．

次に，これらの水田微気象を特徴付ける各種パラメータに関して，簡単に説明する．

2.4.1　群落の高さ h と葉面積指数 LAI

群落の高さ h と葉面積指数 LAI はイネの成長に応じて変化し，群落の熱収支と温度環境に大きな影響を与える．田植え（苗の移植）直後の LAI は 0.1 以下であるが，イネの成長と共に増加し，出穂期には最大 4〜6 程度まで達するが，登熟が進むとやや低下する（Ikawa et al., 2017）．群落の高さ h について田植え直後は 0.1 m 程度であるが，出穂期以降はおおむね 1 m 以上の高さになる．「水田群落微気象モデル」において，h と LAI は原則として外部条件として与えることになる．

顕熱（潜熱）の群落層と群落下の地表面への分配比 H_c/H_g（E_c/E_g）は LAI の増加と共に上昇する．例えば潜熱に関しては，移植直後は群落全体の潜熱 lE の殆どが群落下の地表面（湛水面）からの潜熱 lE_g で占められるのに対して（E_c/E_g〜0），出穂期には lE に占める lE_g の割合が 3 割程度（E_c/E_g=2〜3）まで低下する（Maruyama and Kuwagata, 2010）．

一方，群落の温度環境に関して，湛水層の水温 T_w の日平均値は，LAI が 1〜2 未満では田植え前の水田に比べて高めに推移する．LAI が 2 以上になると田植え前の水田より低くなり，LAI の増加と共に単調に低下するようになる．ただしこれらの特徴は日射量が弱い条件では顕著でない（Kuwagata et al., 1998, 2000, 2008）．LAI が 1〜2 未満で晴天日の水温が田植え前より高くなるのは，群落層が湛水面直上の風速を弱め，水面と大気間の顕熱・潜熱交換を抑制するためで，風が弱い条件ではその効果は小さい．また LAI が 2 以上で水温が低下するのは，湛水面に入射する日射量の減少による水温低下効果が LAI と共に増加し，湛水面と大気間の熱交換抑制による水温上昇効果を上回るためである（Kuwagata et al., 1998, 2000, 2008）．

2.4.2　個葉－大気間の運動量，熱，水蒸気に関する輸送係数（C_d, C_h, C_e）

個葉－大気間の運動量，熱，水蒸気に関する輸送係数（c_d, c_h, c_e）は，それぞれ次式によって定義される（近藤, 1994）．

$$\tau_l=\rho c_d u^2 \tag{58}$$

$$H_l=c_p\rho c_h u(T_l-T)=\frac{c_p\rho(T_l-T)}{r_a} \tag{59}$$

$$E_l=\rho c_e u(q_{sat}(T_l)-q)=\frac{\rho(q_{sat}(T_l)-q)}{r_a+r_s} \tag{60}$$

ここで（τ_l, H_l, E_l）はそれぞれ個葉と大気間の単位面積当たりの運動量輸送量（kg m^{-1} s^{-2}），熱輸送量（W m^{-2}），水蒸気輸送量（kg s^{-1} m^{-2}）を表し，（T, q, u）はそれぞれ葉面の近傍における気温，比湿，風速である．また r_a と r_s はそれぞれ葉面境界層抵抗と気孔抵抗（s m^{-1}）であり，輸送係数（c_h, c_e）との間に以下の関係式が成り立つ（近藤，1994）．

$$c_h=\frac{1}{ur_a} \tag{61}$$

$$c_e=\frac{1}{u(r_a+r_s)} \tag{62}$$

個葉－大気間の運動量，熱輸送は主として葉面境界層における分子拡散によって支配される．運動量，熱に関する輸送係数（c_d, c_h）は，葉のサイズや形，植物群落の構造などに依存し，イネ群落の場合 c_d=0.18，c_h=0.05 程度となる（Watanabe and Kondo, 1990; Kondo and Watanabe, 1992）．一方，個葉－大気間の水蒸気輸送には葉面境界層における分子拡散に加え，気孔内－葉表面間の水蒸気拡散が重要となる．式（62）において c_e の評価と直接関わる気孔抵抗 r_s（$=g_s^{-1}$，g_s は気孔コンダクタンスと呼ばれる）は後者の輸送効率に関わるパラメータであり，気孔の密度や開き具合の影響を強く受ける．また式（61）と（62）より c_e を算定するためには，r_s の他に葉面の近傍における風速 u が必要となるが，「水田群落微気象モデル」においては，植物群落内の風速鉛直分布の解析解（Kondo, 1972）に基づく群落層の平均風速を使用する（Maruyama and Kuwagata, 2008）．

気孔の開き具合は植物の生理的な調節機能を通して，日々の気象条件の日変化やそれに応答した植物の水分状

態などの影響を受けて時間単位で変化する．一般に r_s はこれら変数を用いた関数で経験的に表すことができる．

$$r_s^{-1}=g_s=f_{gs}(S_{abs}, \Psi_l, D_l, T_l, ...) \tag{63}$$

ここで f_{gs} は，葉面の吸収日射量 S_{abs}，葉の水ポテンシャル Ψ_l，葉面における飽差 D_l（hPa），葉温 T_l …などの関数である．「水田群落微気象モデル」では，葉面の吸収日射量のみを考慮した以下の関数を利用している（Maruyama and Kuwagata, 2008, 2010）．

$$r_s^{-1}=g_s=\frac{g_{smax}}{1+S_{absH}/S_{abs}} \tag{64}$$

ここで g_{smax} と S_{absH} は，イネの生育ステージや生育状態に依存したパラメータとなる．また光合成モデルとの結合を前提とした，以下のモデル式も利用可能である（Ono et al., 2013; Ikawa et al., 2018）．

$$r_s^{-1}=g_s=m_{gs}\frac{P_n}{(C_l-\Gamma)(1+D_l/D_0)}+g_{smin} \tag{65}$$

ここで P_n は葉の正味光合成速度（μmol m^{-2} s^{-1}），C_l は葉表面での CO_2 濃度（μmol mol^{-1}），Γ は光合成の CO_2 補償点（μmol mol^{-1}），g_{smin} は気孔コンダクタンスの最小値，m_{gs} と D_0（hPa）はそれぞれ，光合成に対する応答感度と飽差に関する応答特性に関わるパラメータである．

2.4.3　地表面の粗度（z_{0s}, z_{Ts}, z_{qs}）

湛水層の深さが十分に深い場合，群落下の地表面は空気力学的になめらかな面と判断され，実用的には $z_{0s}=0.06$ mm，$z_{Ts}=z_{qs}=0.16$ mm が利用できる．湛水深が概ね 5 cm より浅くなると土壌面が露出し，地表面の粗度が増加する．粗度の変化は地表面（湛水面または土壌面）－大気間の熱交換を通して水温・地温に直接影響を与えることから，水温や地温の正確な評価のために，これら効果のモデル化も実施している（Maruyama et al., 2017）．

2.4.4　地表面と個葉の光学的なパラメータ

湛水温や地温に影響を与える群落下の地表面のアルベド r_g は，湛水の有無や土壌の種類に依存し，湛水が存在する場合は 0.05～0.1 程度の値になる（Kuwagata et al., 2008; Maruyama et al., 2007）．また植物群落の日射・長波放射環境に関わるイネの葉の光学的なパラメータについては，個葉のアルベド $r_f=0.3$，個葉の日射透過率 $\tau_f=0.2$～0.3 を利用し，葉の傾きを表すファクター F と F_L には原則として 0.5（葉の傾きがランダムに分布した条件）を利用するが，F を群落内外の日射量測定に基づくチューニングパラメータとして扱う場合もある（Ikawa et al., 2018; Maruyama et al., 2007）．

3．モデルの応用

3.1　地温と水田水温

水田の水温や地温は，イネの生育や稔実に大きな影響を与えていることが古くから知られており，水温や地温の評価は重要なモデルの応用の一つである．Kuwagata et al.（2008）は田植え前の群落層が存在しない条件（モデル上では $LAI=0$）に「水田群落微気象モデル」を適用し，日々の水温と地温鉛直分布の変化を高精度で再現できることを確かめた．また Kuwagata et al.（1998）では，LAI の変化と気象条件が水温に与える影響を再現できることを確認している．さらに Maruyama et al.（2017）では湛水深の変化による土壌面露出にともなう地表面粗度の変化を Kondo and Yamazawa（1986）の手法に基づきモデル化し，湛水深の変化が日平均水温と水温日変化におよぼす影響を，高い精度で再現することに成功した．後者のモデルの詳細と水田水管理への応用に関しては，本巻の丸山篤志氏の解説「高度な農地水管理のための水田水温のシミュレーション」を参照されたい．

群落層が存在しない条件（$LAI=0$）での日平均水温 $\langle T_{w0}\rangle$ を「水田群落微気象モデル」の簡易版（式 1，3，4 を日平均値 $\langle\cdots\rangle$ に適用したモデルで $\langle G\rangle=0$ を仮定）より計算し，群落層が存在する条件下での日平均水温 $\langle T_w\rangle$ との差 $\langle T_w-T_{w0}\rangle$ を補正することで，田植えから刈り取りまでの日々の日平均水温 $\langle T_w\rangle$ の推移を評価する手法も開発されている（Kuwagata et al., 2008）．ここで $\langle T_w-T_{w0}\rangle$ は，LAI と気象条件（日射量，風速）を用いた実験式により表される．「水田群落微気象モデル」の標準版より簡易に日平均水温 $\langle T_w\rangle$ が評価できることが本手法のメリットで，気候予測シナリオとイネ生育モデルを用いたコメ収量・品質の将来予測（Ishigooka et al., 2017）や，水田水温の影響を考慮したネ発育モデル（Fukui et al., 2017）などで活用され，「モデル結合型作物気象データベース（MeteoCropDB）」（Kuwagata et al., 2011）上のイネ発育予測にも実装されている．

3.2　群落温度環境

1 章でも述べたように，出穂・開花時ならびに登熟前期の穂温が，猛暑年の不稔率増加やコメ品質低下に直接の影響を与えている可能性が示唆されている．「水田群落微気象モデル」（標準版）をベースにして，出穂期以降の穂温を評価するモデル（IM^{2}PACT）が，Yoshimoto et

al.（2011）によって開発されている．このモデルにおいては，次の 3 つのステップで，穂の温度の日変化を計算することができる（詳細に関しては上記論文を参照）．

（1）はじめに，穂の存在が群落微気象に影響を与えないと近似的に仮定し，「水田群落微気象モデル」の基本式（2.1 節）に基づき群落温度 T_c と湛水層の水温 T_w を計算する．水温 T_w と地温は式（8）～（10）で評価するが，水田外からの水の流入に伴う熱移動は考慮していない．

（2）次に，群落内の熱輸送プロセスを考慮して，（1）の結果から穂が存在する高度での気象条件（気温，湿度，風速）を算定する．

（3）最後に（2）で得られた気象条件を穂の熱収支式に適用することで，穂温を計算する．

IM²PACT による数値計算に基づき，2007 年の関東・東海地方を中心とした高温イベント時の穂温の空間分布を評価した．穂温は熱収支によって決まるため，日射量や湿度，風速の影響も受け，気温の空間分布とは必ずしも特徴が一致しないことが明らかとなった（Yoshimoto et al., 2011）．IM²PACT は，「モデル結合型作物気象データベース（MeteoCropDB）」（Kuwagata et al., 2011）に実装され，気象庁における全国の地上気象観測所（約 150 地点）を対象に，任意の時期の穂温や葉温（群落温度）の日変化が評価できる仕組みが構築されている（図 2）．

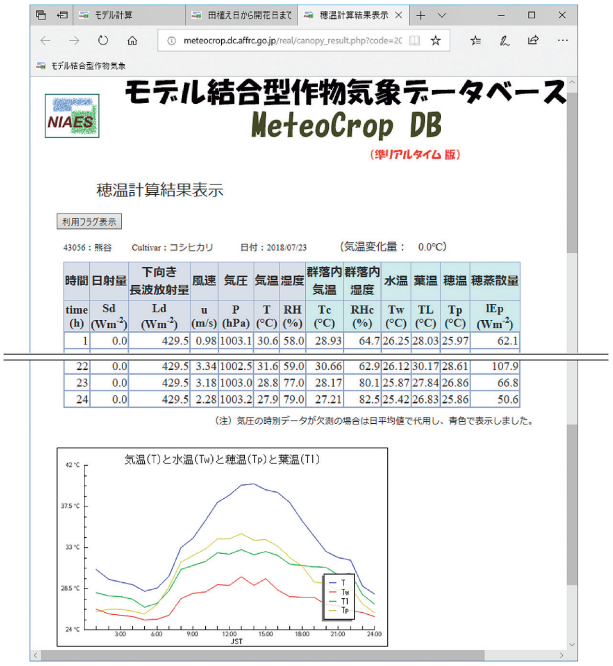


図 2：「モデル結合型作物気象データベース」（MeteoCropDB Ver.2, https://meteocrop.dc.affrc.go.jp/real/）による，群落微気象ならびに穂温の日変化の評価例（2018 年 7 月 23 日，熊谷）．この日，熊谷では 40℃ 以上の高温となったが，昼前後の湿度が 20％台まで低下し，風も比較的強かったため，穂温の日最高値は 34～35℃ 程度にとどまったものと評価された．

3.3　熱収支と蒸発散量

Maruyama and Kuwagata（2010）では「水田群落微気象モデル」に簡易な作物生育モデルを結合することで，九州 3 地域における水稲の生育期間（田植えから収穫まで）を通した水田の熱収支と蒸発散量の日々の変化をモデル計算により評価した．計算結果は実測データとよく一致し，モデルの有用性が確認された．水田では顕熱に比較して潜熱の割合が圧倒的に多く，生育期間を通した全蒸発散量に占める蒸散量の割合は 4 割以上であることがモデル計算によって示された．とりわけ渇水時においては，地域における水利用や灌漑計画の策定のために，水田における水消費量の評価が必要となる．この結合モデルを用いることで，イネの移植時期の変化が水田における水消費量に及ぼす影響の評価が可能となる（Maruyama and Kuwagata, 2010）．また Yoshimoto et al.（2005）は，イネの FACE（free-air CO_2 enrichment）実験において，実測により求めた個葉の気孔コンダクタンス g_s を「水田群落微気象モデル」に適用することで，将来の高 CO_2 濃度環境（200 ppm の大気 CO_2 濃度の上昇）がイネの生育期間を通した蒸発散量と水利用効率（乾物生産量/総蒸発散量）に及ぼす影響を評価した．その結果，イネの蒸発散量は高 CO_2 濃度環境で 8.2％減少し，水利用効率は 19％向上（乾物生産量は 9.1％増加）するという結果を得た．

3.4　群落光合成と蒸発散量の関係

「水田群落微気象モデル」に光合成モデルを組み入れることで，収量と直接関係のある群落光合成が評価できるようになる．Ikawa et al.（2018）では主に生態学分野で利用されている群落光合成モデル（de Pury and Farquhar, 1997）を本モデルに組み入れ，実際の水田における群落光合成と熱収支，湛水温ならび地温鉛直分布の日変化が高精度で再現できることを確かめた（図 3～4）．

このモデルを用いて，高い光合成能力を持つインディカの多収品種（タカナリ）と国内で慣行的に栽培されているジャポニカ品種（コシヒカリ）との間の，登熟前期における群落光合成と蒸発散量の違いを評価した結果，「タカナリ」は「コシヒカリ」に比べて，群落光合成は 1 割ほど大きいが，蒸発散量も 5％ほど多くなることがわかった（Ikawa et al., 2018）．さらに FACE 実験で得られた生理パラメータに基づき，大気 CO_2 濃度の上昇の影響を調べたところ，将来の大気 CO_2 濃度（現在より 200

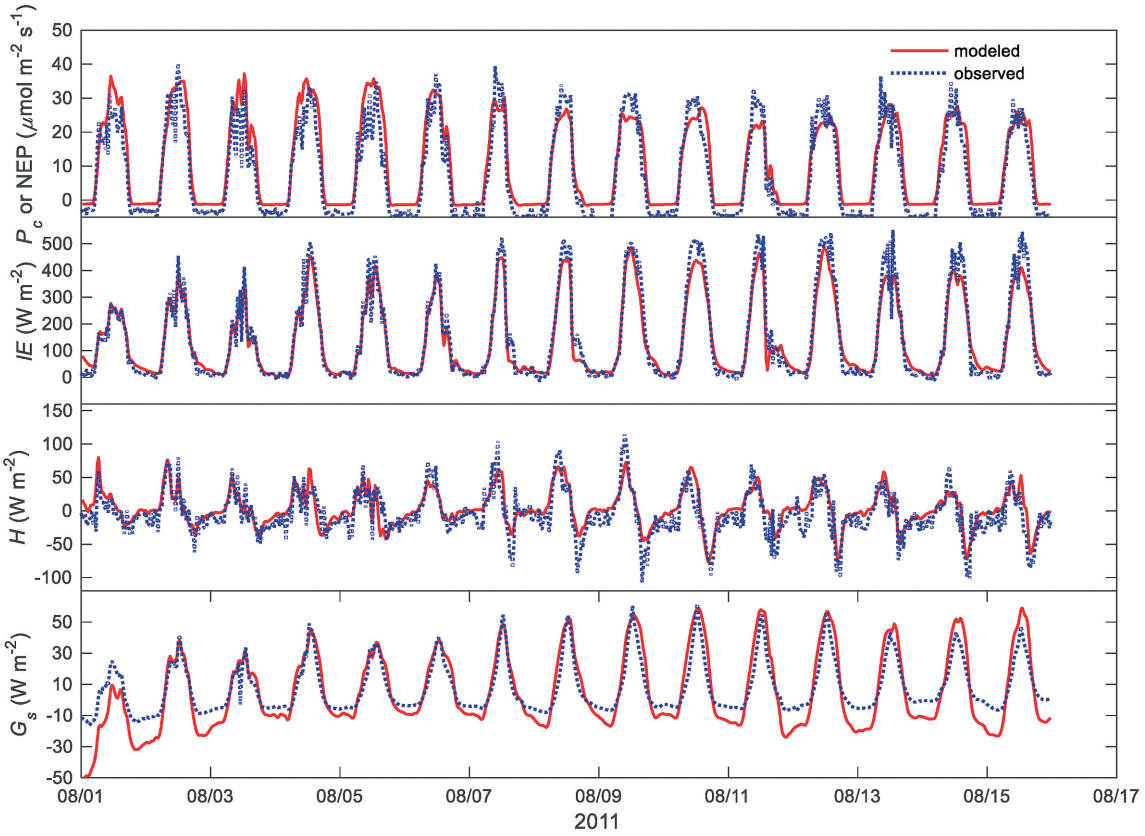


図 3：光合成モデル（de Pury and Farquhar, 1997）を組み入れた「水田群落微気象モデル」によって計算された水田の群落光合成と熱収支の日変化，ならびに観測データとの比較（2011 年 8 月，つくば市の真瀬水田フラックスモニタリングサイト）．
P_c：群落光合成（観測値は純生態系生産力 NEP），lE：潜熱フラックス（蒸発散量），H：顕熱フラックス，G_s：土壌層への熱フラックス．John Wiley and Sons の許可を得て Ikawa et al.（2018）より転載．

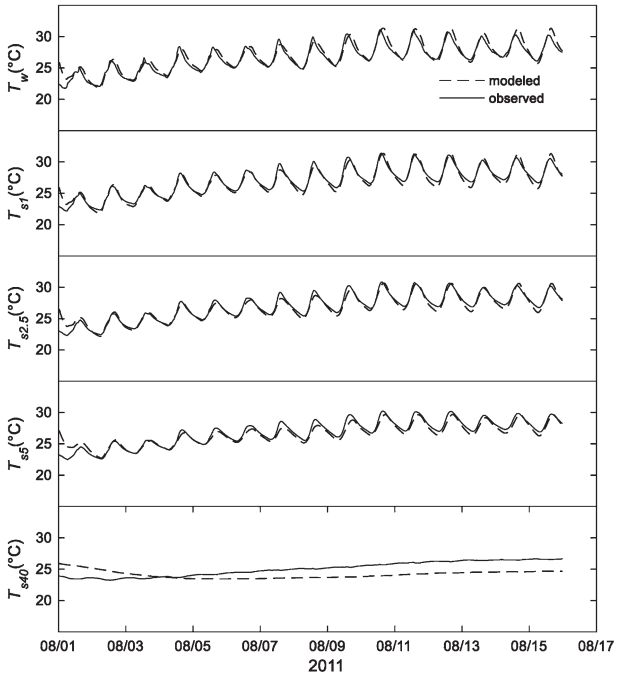


図 4：光合成モデルを組み入れた「水田群落微気象モデル」によって計算された水田の湛水温 Tw ならび地温 Ts の鉛直分布（上から順に，土壌面からの深さ 1，2.5，5，40 cm）の日変化，ならびに観測データとの比較（2011 年 8 月，つくば市の真瀬サイト）．

ppm 上昇）で「タカナリ」を栽培すると，蒸発散量は現在の「コシヒカリ」とほぼ同程度であるが，群落光合成は現在に比べて約 1.3 倍増加するという結果が得られ，水利用の効率が大幅に増加する可能性が示された（Ikawa et al., 2018）．

4．おわりに

前節での説明にあるように「水田群落微気象モデル」は，イネの生育環境や水利用などを把握する上で有用なツールである．著者らは現在，コメ収量・品質の評価が可能なイネ生育モデルとの結合ならび，イネの病害発生予察を目的とした結露や降雨による葉面の濡れ時間の予測（Kuwagata et al., 2000）に加え，水田以外の畑地への拡張（「耕地群落微気象モデル」への発展）や，耕地やその周辺の気象環境が評価可能な大気循環モデルとの結合なども予定していて，今後とも農学ならびにその関連分野における利用拡大が期待される．

参考文献

de Pury, D. G. G. and G. D. Farquhar (1997) Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant Cell Environ.*, **20**, 537–557. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1997.00094.x

Fukui S., Y. Ishigooka, T. Kuwagata, M. Kondo and T. Hasegawa (2017) Taking account of water temperature effects on phenology improves the estimation of rice heading dates: Evidence from 758 field observations across Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **73** (3), 84–91.

Hasegawa, T., T. Ishimaru, M. Kondo T. Kuwagata, M. Yoshimoto and M. Fukuoka (2011) Spikelet sterility of rice observed in the record hot summer of 2007 and the factors associated with its variation. *J. Agric. Meteorol.*, **67** (4), 225–232.

Ikawa, H., C. P. Chen, M. Sikma, M. Yoshimoto, H. Sakai, T. Tokida, Y. Usui, H. Nakamura, K. Ono, A. Maruyama, T. Watanabe, T. Kuwagata, and T. Hasegawa (2018) Increasing canopy photosynthesis in rice can be achieved without a large increase in water use—A model based on free-air CO_2 enrichment. *Glob. Change Biol.*, **24**, 1321–1341.

Ikawa H., K. Ono, M. Mano, K. Kobayashi, T. Takimoto, T. Kuwagata and A. Miyata (2017) Evapotranspiration in a rice paddy field over 13 crop years. *J. Agric. Meteorol.*, **73** (3), 109–118.

Ishigooka Y., S. Fukui, T. Hasegawa, T. Kuwagata, M. Nishmori and M. Kondo (2017) Large-scale evaluation of the effects of adaptation to climate change by shifting transplanting date on rice production and quality in Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **73** (4), 156–173.

越水幸男（1988）アメダス資料による葉いもち発生予察法. 東北農業試験場研究報告，**78**，67–121.

近藤純正（編著）（1994）水環境の気象学 ── 地表面の水収支・熱収支 ──．朝倉書店，東京，348pp.

Kondo, J. (1972) On a product of mixing length and coefficient of momentum absorption within plant canopies. *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 487–488.

Kondo, J. and S. Ishida (1997) Sensible heat flux from the earth's surface under natural convective conditions. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 498–509.

Kondo, J. and T. Watanabe (1992) Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *J. Atmos. Sci.*, **49** (23), 2183–2199.

Kondo, J. and H. Yamazawa (1986) Bulk transfer coefficient over a snow surface. *Bound.-Layer Meteorol.*, **34**, 123–135.

Kuwagata T., S. Haginoya, K. Ono, Y. Ishigooka and A. Miyata (2018) Influence of local land cover on the meteorological conditions in farmland: Case study for rice paddy field near Tsukuba City, Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **74** (4), 140–153.

Kuwagata, T., T. Hamasaki and T. Watanabe (1998) Influence of canopy density on rice paddy field water temperature. *Proc. 23rd Conf. on Agric. For. Meteorol.*, American Meteorological Society, 198–201.

Kuwagata, T., T. Hamasaki and T. Watanabe (2000) Study on the characteristics of rice paddy water temperature and its relation to dew formation on leaves. *Proc. 24th Conf. on Agric. For. Meteorol.*, American Meteorological Society, 133–134.

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.

Kuwagata, T., Y. Ishigooka, M. Fukuoka, M. Yoshimoto, T. Hasegawa, Y. Usui and T. Sekiguchi (2014) Temperature difference between meteorological station and nearby farmland —Case study for Kumagaya City in Japan—. *SOLA*, **10**, 45–49 (doi:10.2151/sola.2014-010).

Kuwagata, T., M. Yoshimoto, Y. Ishigooka, T. Hasegawa, M. Utsumi, M. Nishmori, Y. Masaki and O. Saito (2011) MeteoCrop DB: an agro-meteorological database coupled with crop models for studying climate change impacts on rice in Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **67** (4), 297–306.

Maruyama, A., T. Kuwagata, K. Ohba and T. Maki (2007) Dependence of solar radiation transport in rice canopies on developmental stage. *JARQ*, **41** (1), 39–46.

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** (7–8), 919–930.

Maruyama, A., M. Nemoto, T. Hamasaki, S. Ishida and T. Kuwagata (2017) A water temperature simulation model for rice paddies with variable water depths. *Water Resour. Res.*, DOI:10.1002/2017WR021019.

Ono, K., A. Maruyama, T. Kuwagata, M. Mano, T. Takimoto, K. Hayashi, T. Hasegawa and A. Miyata (2013) Canopy-scale relationships between stomatal conductance and photosynthesis in irrigated rice. *Glob. Change Biol.*, **19**, 2209–2220 (doi:10.1111/gcb.12188).

Yoshimoto, M., M. Fukuoka, T. Hasegawa, M. Utsumi, Y. Ishigooka and T. Kuwagata (2011) Integrated micrometeorology model for panicle and canopy temperature (IM^2 PACT) for rice heat stress studies under climate change. *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 233–247.

Yoshimoto, M., H. Oue and K. Kobayashi (2005) Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO_2 enrichment. *Agric. For. Meteorol.*, **133**, 226–246.

Watanabe, T. (1994) Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Bound.-Layer Meteorol.*, **70**, 13–35.

Watanabe, T. and J. Kondo (1990) The influence of canopy

structure and density upon the mixing length within and above vegetation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68** (2), 227–235.

Appendix

群落内日射量の 2 成分モデル

2 成分モデルでは，群落内の日射を鉛直下向きと上向きの 2 方向の日射成分（それぞれ $S^{\downarrow}$ と $S^{\uparrow}$）のみで表現する．両成分に対する群落内の日射伝達は，以下の連立微分方程式で表される．

$$\frac{dS^{\downarrow}}{dL}=F(1-\tau_f)S^{\downarrow}-Fr_fS^{\uparrow} \tag{A1}$$

$$\frac{dS^{\uparrow}}{dL}=-F(1-\tau_f)S^{\uparrow}-Fr_fS^{\downarrow} \tag{A2}$$

r_f は個葉のアルベド（日射に対する反射率），τ_f は個葉の日射透過率，F は葉の傾きを表すファクター（葉の傾きがランダムに分布した条件で $F=0.5$）である．ここで変数 L は群落下端から積算した単位土地面積当たりの葉面積（$m^2\,m^{-2}$）で，群落上端 $L=LAI$（ここで LAI は葉面積指数）と群落下端 $L=0$ における境界条件は，それぞれ次式で表される．

$$S^{\downarrow}(LAI)=S_d \tag{A3}$$

$$S^{\uparrow}(0)=r_gS^{\downarrow}(0) \tag{A4}$$

S_d は群落上端に入射する日射量（全天日射量），r_g は群落下の地表面のアルベドである．

連立微分方程式（A1）～（A2）を境界条件（A3）～（A4）の下で解くと，次式が得られる．

$$S^{\downarrow}=A_1\exp(\alpha F'L)+A_2\exp(-\alpha F'L) \tag{A5}$$

$$S^{\uparrow}=\frac{A_1}{r_f'}(1-\alpha)\exp(\alpha F'L)+\frac{A_2}{r_f'}\exp(-\alpha F'L) \tag{A6}$$

式中のパラメータ（$r_f', \alpha, A_1, A_2, A, F'$）は次式で表される．

$$r_f'=r_f/(1-\tau_f) \tag{A7}$$

$$\alpha=(1-r_f'^2)^{1/2} \tag{A8}$$

$$A_1=(1-r_f'r_g+\alpha)S_d/A \tag{A9}$$

$$A_2=(1-r_f'r_g-\alpha)S_d/A \tag{A10}$$

$$F'=F(1-\tau_f) \tag{A11}$$

$$A=(1-r_f'r_g+\alpha)\exp(\alpha F'LAI)-(1-r_f'r_g-\alpha)\exp(-\alpha F'LAI) \tag{A12}$$

式（A5）と（A6）より，群落層全体で定義される日射に対する透過率 τ と反射率 r（アルベド）は，最終的に以下のようになる．

$$r=\frac{S^{\uparrow}(LAI)}{S^{\downarrow}(LAI)}=[1-\alpha(A/B)]/r_f' \tag{A13}$$

$$S_g=(1-r_g)S^{\downarrow}(0)=(1-r_g)(2\alpha/A)S_d=\tau S_d \tag{A14}$$

式（A13）中のパラメータ B は次式で表される．

$$B=(1-r_f'r_g+\alpha)\exp(\alpha F'LAI)+(1-r_f'r_g-\alpha)\exp(-\alpha F'LAI) \tag{A15}$$