

水田の熱環境緩和機能(2)

モデルを用いた数値シミュレーションによる検証

誌名	水利科学
ISSN	00394858
著者名	大上,博基
発行元	水利科学研究所
巻/号	49巻6号
巻号補足	
掲載ページ	p. 59-73
発行年月	2006年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



水田の熱環境緩和機能

—— 第2部 モデルを用いた数値シミュレーションによる検証 ——

大 上 博 基

目 次

- I. はじめに
- II. 単層モデルを用いた熱環境緩和効果の評価
 - 1. 地表面温度の成り立ち
 - 2. 水田, 畑地, 土壌面, 浅い水面における地表面温度の比較
 - 3. 蒸発散量と熱環境緩和機能の関係
- III. 多層モデルを用いた熱環境緩和機能の評価
 - 1. 水田水面の役割
 - 2. イネ群落の役割
- IV. おわりに

I. はじめに

市街地と農地が共存する地域では、農地が周囲の熱環境緩和に役立つ（大上，2005）ため、農地の有する公共財としての価値は積極的に評価されてよい。また、農地の熱環境緩和機能の仕組みを科学的に解明し、変化してゆく地球環境や社会情勢のなかでその機能を最大限に引き出すための方策を示すことは、学術的にも社会的にも必要性の高い研究課題である。

第1部（大上，2005）では、農地と非農地における熱収支と温度環境の観測結果を援用し、農地の熱環境緩和機能を検証した。また、水田においてこの機能がとくに優れていることを示し、これを人工的に代替した場合の費用を試算した。さらに、水田が熱の吸源となる気温条件を解説した。

本報では、まず水田、畑地、土壌面、浅い水面における地表面温度の測定結果と単層モデルによる計算結果を用いて、熱環境緩和機能の仕組みをやや巨視的に解説する。そして、畑地や水面と比較し水田の地表面温度が低く抑えられる原因を検証する。また、熱環境緩和機能が蒸発散すなわち水分消費の代償の上で成り立つことを考慮し、蒸発散量と熱環境緩和機能の関係を解説する。さらに、水田の多層モデルによる計算結果を用いて、熱環境緩和機能の仕組みをより微視的に解説する。そして、水田による熱環境緩和効果の具体的な根拠を検証する。

Ⅱ. 単層モデルを用いた熱環境緩和効果の評価

1. 地表面温度の成り立ち

たとえば水田は水面とイネ群落からなる鉛直方向に分布した地表面であるため、そのエネルギー交換面は鉛直方向の広がりを持つが、単層モデルではこれを鉛直方向の次元がない薄い地表面と近似してエネルギー交換を表現する。この場合に水田の地表面温度とは、水面とイネ群落を総合した地表面の温度である。

放射収支式と熱収支式は次の式で表される。

$$\begin{aligned}(1 - a) St + Ld - Lu &= Rn \\ &= H + LE + G + \Delta W\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 a は albedo ($0 \sim 1$ で無次元)であり、 St は全天日射量、 Rn は正味放射量、 H は顕熱フラックス、 LE は潜熱フラックス、 G は地中熱フラックス、 ΔW は貯熱変化量である。 Ld と Lu はそれぞれ下向き(大気から地表面へ)と上向き(地表面から大気へ)の長波放射量であり、次式で表される。

$$Ld = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (2)$$

$$Lu = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (3)$$

ここで ϵ_a と ϵ_s はそれぞれ地表面と大気の射出率、 σ はStefan-Boltzmann係数、 T_a は基準高度(本稿では2 m)の気温、 T_s は地表面温度である。

次に、 H と LE を一般によく用いられるバルク輸送式で表現すると、

$$H = C_p \rho c_h u (T_s - T_a) \quad (4)$$

$$LE = C_p \rho c_h u \beta [e^*(T_s) - e_a] / \gamma \quad (5)$$

ここで $C_p \rho$ は大気 の 体積熱容量である。 u は基準高度の風速、 $e^*(T_s)$ と e_a はそれぞれ T_s における飽和水蒸気圧と基準高度の水蒸気圧、 γ は乾湿計定数である。 c_h は顕熱輸送に対するバルク輸送係数であり、主として地表面（植生を含む）の空気力学的な粗度によって決まるため、水面や土壌面よりは植生のある地表面の方が大きく、背の高い植生ほど値が大きいと考えるよい。 β は蒸発効率であり表面の水分状態を表し、0（完全乾燥面）から1（水面などの完全湿潤面）まで変化する。また、(4) 式における $c_h u$ および (5) 式における $c_h u \beta$ の代わりに、次の抵抗概念を適用してもよい。

$$c_h u = 1 / r_a \quad (6)$$

$$c_h u \beta = 1 / (r_a + r_c) \quad (7)$$

r_a は境界層抵抗である。 r_c は植生地表面の場合には群落抵抗を表し、土壌面の場合には蒸発抵抗を表す。水面の場合は $r_c = 0$ である。したがって β は、

$$\beta = \frac{r_a}{r_a + r_c} \quad (8)$$

と表すことができる。植生地表面の場合は、気孔抵抗を r_s とすると $r_c = r_s / \text{LAI}$ と表せるので、気孔が開くと β が大きくなると考えるよい。ここで LAI は葉面積指数である。(2) ～ (5) 式を (1) 式に代入すると、与えられた気象条件 (S_t , T_a , e_a , u) 下で、 c_h および β を既知パラメータとして T_s が決定される。それと同時に、 H と LE も計算され熱収支が解かれる。

2. 水田、畑地、土壌面、浅い水面における地表面温度の比較

図1に、蒸発効率 (β) とバルク輸送係数 (c_h) という地表面の性質の違いが地表面温度 (T_s) に及ぼす影響を示す。与えた気象条件 (1994年8月29～31日12～16時の平均) は、 $S_t = 651.8 \text{ Wm}^{-2}$, $T_a = 32.7^\circ\text{C}$, $e_a = 29.9 \text{ hPa}$, $u = 3.22 \text{ ms}^{-1}$ であった。図中のシンボルは各地表面における測定結果を表す。曲線は、下からトウモロコシ畑、水田、乾燥土壌、半乾燥土壌、浅い水面についての計算結果を表している。 c_h は、トウモロコシ畑、水田、土壌面、浅い水面

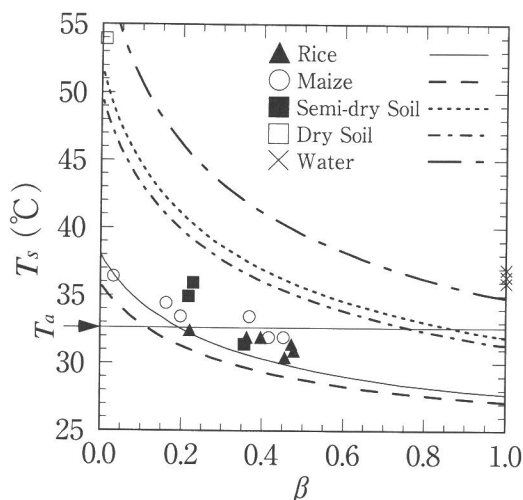


図1 蒸発効率(β)とパルク輸送係数(c_h)の違いが地表面温度(T_s)に及ぼす影響。曲線は計算値, シンボルは測定値を表す。 c_h は, トウモロコシ畑, 水田, 土壌面, 浅い水面の順で小さくなる

の順で小さくなる。浅い水面とは, 1時間単位程度の熱収支において ΔW が無視できるような静止した水面を指す。ただし図中で「Water」と称して β を0から1まで与えて計算された T_s は, 浅い水面と同じ空気力学的粗度をもつ表面の温度を表しており, 水面温度は $\beta = 1$ のときの T_s である。同様に, 水田の T_s は $\beta = 0.4 \sim 0.8$ 程度, トウモロコシ畑の T_s は $\beta = 0.2 \sim 0.6$ 程度の場合における T_s を見ればよい。計算値と測定値がよく一致していない理由は, 各地表面の c_h に風速鉛直分布の対数分布則を仮定した概略値を用いていることと, $G + \Delta W = 0$ と簡略化したことである。しかし, 測定結果と計算結果で表された β および c_h と T_s の定性的な関係は一致していると判断できる。

T_s が気温(T_a)よりも低いとき, (4)式の顕熱フラックス(H)とボーエン比($B_o = H / LE$)は負値になる。概して B_o の小さい地表面ほど熱環境が緩和されていると評価してよく, 第1部で説明したように B_o が負値であれば熱の吸源となり, 熱環境緩和機能に優れた地表面となる。測定結果と計算結果は, 一般に β が大きく(地表面が湿潤)になるほど T_s が低く, c_h が大きい地表面ほど T_s が低くなる傾向を表している。ただし熱の吸源となる β の条件は, 地表面の種類によって異なることがわかる。

地表面ごとに β が T_s に及ぼす影響を比較すると、次のような特徴が抽出できる。第一に、 T_s は $\beta = 1$ の水面よりも $\beta < 1$ の水田や畑地の方が低い。これは水田や畑地の c_h が水面よりも大きい効果による。第二に、水田と畑地の β を比べると水田の方が高いため、 T_s は水田の方が低い。水田の方が β が高い原因は、水田の群落下に水面があることとトウモロコシよりもイネの気孔開度の方が大きいためである。また、本実験結果では水田の β は0.5以下であるが、一般に午前中は午後よりも気孔開度が大きいため、水田の β はもっと高い。さらに午後でも0.8前後に達することがある（大上，1996）。水田で T_s が気温よりも低くなり熱環境を緩和する能力が高いのは、この二つの効果による。

3. 蒸発散量と熱環境緩和機能の関係

熱環境緩和機能が蒸発散すなわち水分消費の代償の上で成り立つことを考慮し、蒸発散量（潜熱フラックス； LE ）が各地表面の T_s に及ぼす影響（図2）を検討する。図2は、図1と同様に一定の気象条件を与え、 β と c_h を変化させて計算した結果である。両者の間には線形関係が成り立ち、各直線の右下端（トウモロコシ畑は図の範囲外）が $\beta = 1$ の場合に相当する。蒸発散量が等しい条件で地表面ごとの T_s を比較すると、 T_s が気温（ T_a ）付近よりも高い状態（ B_o が正值の場合）では c_h の大きい地表面ほど T_s が低いことがわかる。すなわちこの場合には、蒸発散による消費水量あたりの熱環境緩和効果は、水面や土壌面よりも植生のあるほうが高いと評価できる。これは、 c_h の大きい地表面は、蒸発散だけではなく顕熱輸送によっても効果的に地表の冷却が行われることを意味している。

しかし、地表面がより湿潤になり（ β が1に近づき） T_s が T_a よりも低く（ B_o が負値に）なると、 c_h の小さい地表面ほど T_s の低下には限界があるが、少ない蒸発散量で T_s が低下することがわかる。したがって、水面や湿潤な土壌面よりも植生のある地表面のほうが地表面温度を低下させる能力は高いが、その代償として蒸発散損失が大きくなる可能性も高い。これは B_o が正值の場合と反対に、 c_h の大きい地表面では大気からの顕熱輸送（移流）によって効果的に吸熱と蒸発散が行われることを意味している。ただし、水面蒸発量（「Water」の右端）に等しい蒸発散量（ LE ）で各地表面の T_s を比較すると、その差は小さいが、水面、土壌面、トウモロコシ畑、水田の順で T_s が低くなる。これらの検討結果から、水田では蒸発散量が大きくなる可能性もあるが、

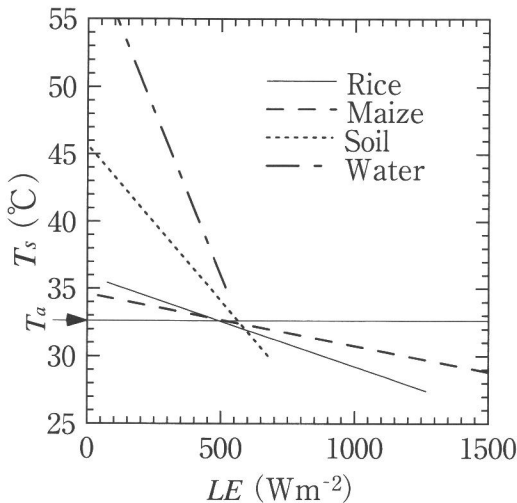


図2 蒸発散量（潜熱フラックス； LE ）が各地表面の T_s に及ぼす影響。気象条件を一定とし、 β ($0 \leq \beta \leq 1$) と c_h を変化させて計算。各直線の左上端が $\beta = 0$ ，右下端が $\beta = 1$ の条件。 c_h は、トウモロコシ畑，水田，土壌面，浅い水面の順で小さくなる

消費水量に対する熱環境緩和機能がきわめて高いと評価できる。

Ⅲ．多層モデルを用いた熱環境緩和機能の評価

本章では、水田が熱環境緩和機能を有する具体的な原因を明らかにすることを目的として、水田の顕熱フラックス (H) またはボーエン比 (Bo) が負値となる原因が水田のどこにあるかを説明する。説明のための方法として、イネ群落を多層に分け、群落各層における個葉の放射収支・熱収支、群落内部と上部における熱と水蒸気の乱流輸送などを表現する方程式系を解く多層モデル（たとえば Oue, 2001；大上, 2003 b）を用いる。また、葉面の熱収支は個葉に入射する放射エネルギーに大きく支配されるため、群落内部では個葉の熱収支が個々の葉で大きく異なり、葉の両側でも異なる。そこで、群落各層で上側（陽側）の葉と下側（陰側）の葉について別々の放射収支・熱収支式を解き、陽側と陰側における顕熱・潜熱フラックスおよび葉面温度を計算する。この多層モデル（大上, 2003 b）は、陽側と陰側に分けないモデルよりも葉温、群落内部

の気温・湿度の各鉛直分布の再現性が優れていて、水田の熱環境緩和効果が具体的にどこにあるのかを示すのにも適している。

図3に、この多層モデルで計算された水面および群落各層の植物体陽側と陰側における顕熱・潜熱フラックスの鉛直分布計算例を示す。例として示した日は、12時以外は曇りがちで薄日のさす天候であった。また生育期は出穂期で $LAI = 4.6$ 、群落下の水面はイネ群落で十分に覆われた状態であった。図中、 H_{c1} と H_{c2} はそれぞれ植物体の陽側と陰側における顕熱フラックス、 LE_{c1} と LE_{c2} はそれぞれ植物体の陽側と陰側における潜熱フラックスである。 $z = 0$ における H_{c1} と LE_{c1} は、水面の顕熱・潜熱フラックスを表す。

1. 水田水面の役割

図3より、水面の顕熱フラックスは日中を通して負値であり、イネ群落下部の水面が熱の吸源になっていることがわかる。その結果、水面における潜熱フラックスが水田全体の潜熱フラックスに占める割合は24～31%に達した。ただし、この割合は生育期や植物体面積密度によっても変化する（大上，2004）。前述のように植生のない水面ではボーエン比が負値になりにくいのに対し、イネ群落で十分に覆われると、水面はボーエン比が負値になりやすい性質に変化する。

以下にその原因を、前述と同様の簡単な数値シミュレーションを用いて解説する。多層モデルを用いた数値シミュレーション結果によれば、開けた水面が $LAI = 4.6$ のイネ群落で覆われることにより、水面に入射する日射量は約20%程度にまで減少し（大上，2003 b），水面上10 cm の風速は50%以下に減衰し，水面上10 cm の湿度は相対湿度で10%程度上昇するが，気温は1～2℃程度上昇する場合と低下する場合がある（大上，未発表）。そこでこれらの変化を考慮に入れて，前図に例示した日の12時における気象条件； $St = 760 \text{ W m}^{-2}$ ， $T_a = 29.3^\circ\text{C}$ ， $e_a = 26.8 \text{ hPa}$ （相対湿度 $RH = 63.5\%$ ）， $u = 1.8 \text{ ms}^{-1}$ を基準とし，日射量（ St ），気温（ T_a ），相対湿度（ RH ）をそれぞれ変化させてボーエン比（ Bo ）を計算した（図4 a，b）。これらの図において群落で覆われることによる各効果を見るためには， $St = 170$ ， 760 W m^{-2} ， $T_a = 27$ ， 29.3 ， 31°C （図4 a）， $RH = 63.5$ ， 75% （図4 b）における Bo を相互に比較すればよい。また，図4（a），（b）の計算には開けた水面における輸送係数を適用したが，図4（c）ではイネ群落で覆われた水面に相当する輸送係数（群落で覆われることで

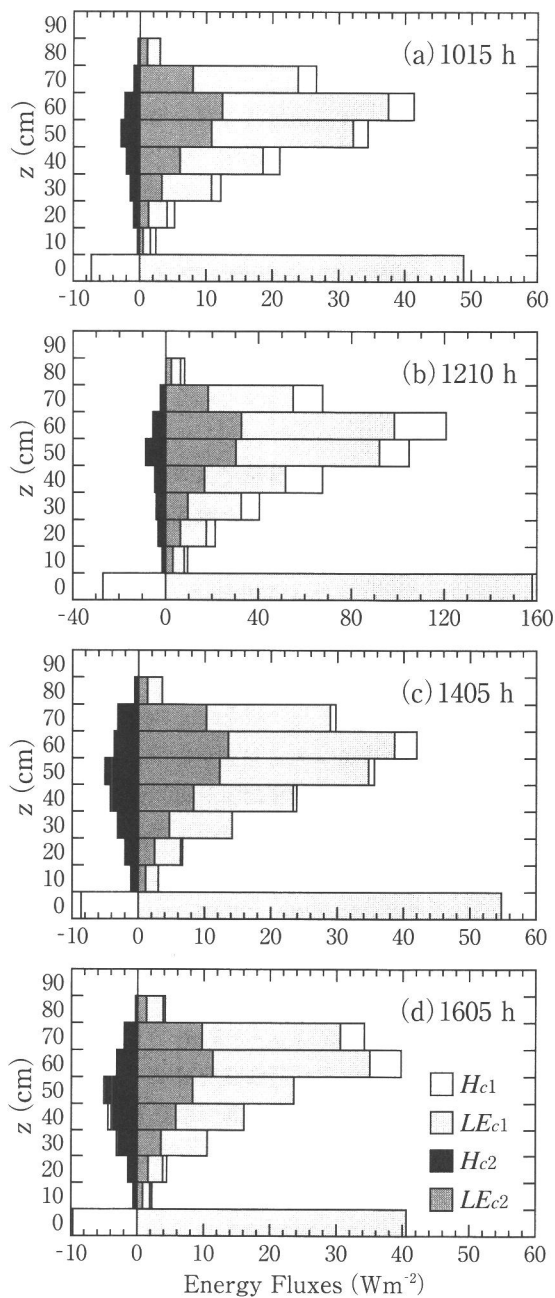


図3 多層モデルで計算した群落各層の植物体陽側(1)と陰側(2)における顕熱フラックス(H_c)と潜熱フラックス(LE_c)の鉛直分布(愛媛大学農学部実験水田, 1998年8月27日)

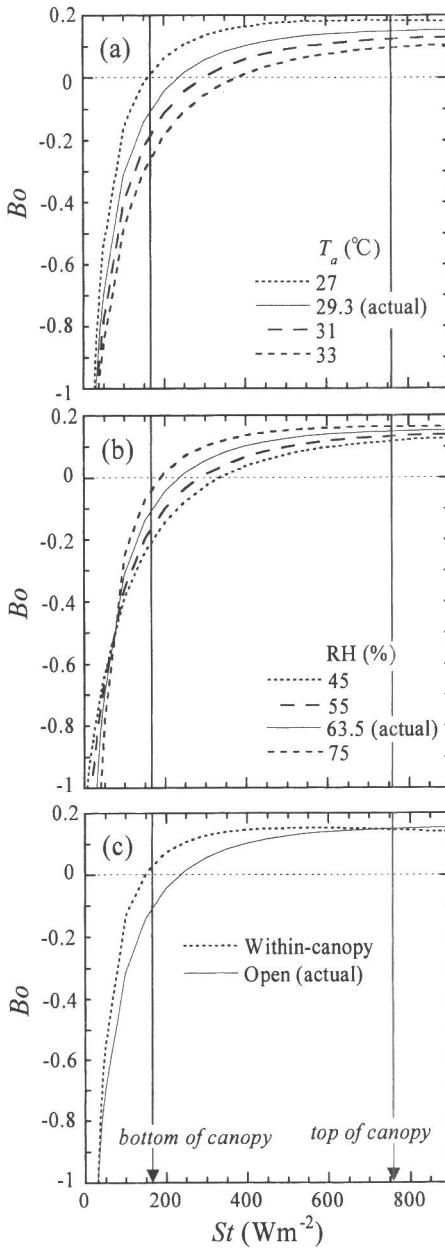


図4 水面日射量 (St) の違いが水面のボーエン比 (Bo) に及ぼす影響。
 $T_a = 29.3^{\circ}C$, $e_a = 26.8hPa$ ($RH = 63.5\%$), $u = 1.8ms^{-1}$, 開けた水面における輸送係数を与えた計算結果を基準 (actual) とし, (a) T_a を 27, 31, $33^{\circ}C$ に変化させた計算結果, (b) RH を 45, 55, 75% に変化させた計算結果, (c) イネ群落で覆われた水面に相当する輸送係数に換えた計算結果

小さくなる)を与え、開けた水面における計算結果と比較した。これは風速の違いによる影響と考えてもよい。

B_0 は日射量の減少に伴って低下し、とくに日射量が 300 Wm^{-2} より小さい弱光条件では B_0 が大きく低下する。気温の上昇に伴って B_0 が低下するという B_0 の気温依存性は、第1部で水田における微気象観測結果を用いて示されたが、図4(a)に示す数値実験の結果からも確認できる。また図4(b)より、湿度の上昇に伴って B_0 が上昇することがわかる。図4(c)において、両方の水面に入射する日射量が等しい場合の B_0 を比較すると、 600 Wm^{-2} 以上の強光条件では両者の B_0 には差がないが、 500 Wm^{-2} 以下では群落で覆われて風が減衰することによって B_0 が上昇することがわかる。

さらに、水面が群落で覆われることによって変化する微気象環境の効果を相互に比較するため、 $S_l = 760 \text{ Wm}^{-2}$ と $S_l = 170 \text{ Wm}^{-2}$ の条件において、前記した気温、湿度、輸送係数の違いが B_0 に及ぼす影響を比較する。その結果、入射日射量の違いによる影響が他の変化による影響よりも大きいことがわかる。全天日射量の大きい気象条件下ではとりわけ、群落で覆われることによる日射量の減衰量が大きいいため、 B_0 の低下も大きくなる。以上のように、群落内部の水面で B_0 が負値になる主要な原因は、水面に入射する日射量が小さいためであるといえる。

次に、土壌面が群落で覆われることによる B_0 の変化を調べるため、図1の「Semi-dry Soil」に相当する β を(7)式に適用し、土壌面に入射する日射量 S_l を変化させて B_0 を計算してみた(図5)。浅い水面(Water)と比較すると、 B_0 が負値となる日射量は小さく B_0 の最大値は大きい。弱光条件下で日射量の減少に伴って B_0 が低下する性質は水面と変わらない。ただし強光条件下では、日射量の増加に伴って B_0 が逆に少し低下する傾向もある。この検討結果から、水面でも乾燥した土壌面でもそれが群落で覆われて入射日射量が減少すると B_0 が低下するが、水田水面は B_0 が負値となり熱環境を緩和する能力が高いと評価できる。

2. イネ群落の役割

前節で得られた知見から、群落内の葉面における B_0 も、葉に入射する日射量に大きな影響を受けると考えられる。ただし、個々の葉に入射する実際の日射量は大きく変動するので、モデルで鉛直方向の群落各層における植物体陽側

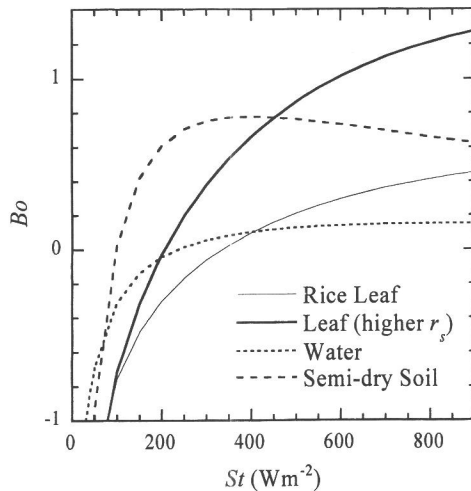


図5 種類の異なる地表面ごとに比較した、入射日射量 (St) とボーエン比 (Bo) の関係。入力気象条件は図4の基準条件と同じ

と陰側の葉に入射する日射量を計算し、陽陰両側における熱分配およびその鉛直分布 (図3) の特徴を検討する。

図3からわかる重要な特徴は、植物体陽側の顕熱フラックスがほとんどの場合に正值である (夕方に群落中部層でわずかに負値) のに対して、植物体陰側の顕熱フラックスはどの場合でも全層で負値となることである。図3に示した計算結果以外でも、ほとんどの場合に陰側の顕熱フラックスは負値であった (大上, 2003 b)。この陰側における負の顕熱フラックスの影響で、14時と16時にはイネ群落全体の顕熱フラックスが負値となった。また水面の熱収支と総合すると、水田全体の顕熱フラックスは、12時以外は負値になった。10時には、イネ群落の顕熱フラックスは正值であったが、水面における負の顕熱フラックスの効果で水田が熱の吸源になったことになる。14時と16時には、水面とイネ群落双方が熱の吸源となったが、イネ群落の方がその規模は大きかった。以上のように、水田の熱環境緩和効果は、主としてイネ群落下部で陰になった水面と陰側のイネ葉によってもたらされる。

また陽側顕熱フラックスは $z = 60$ cm の層で極大値 (正值) をとったのに対して、陰側顕熱フラックスはそれより下の $z = 50$ cm の層で極小値 (負値) をとっ

た。 $z = 60$ cm の層は、陽側・陰側ともに潜熱フラックスが極大値をとった層でもあり、葉面積密度が大きく、群落が吸収した放射エネルギーが最大の層であった。 $z = 50$ cm の層は、葉面積密度が最大の層で、個葉に入射する短波放射が大きく減衰した層であった。その結果、イネ群落がある程度成長して蒸散の盛んな水田では、一般に葉面積密度が最大である群落中央部またはそれよりも少し上部が熱の湧源となりやすく、それより下の群落層と水面が熱の吸源となりやすい。この図は各層における群落のフラックスを表現しているので、葉面積密度の大きい $z = 50 \sim 70$ cm の層におけるフラックスの絶対値が大きい。ただし、各層の陰側群落における潜熱フラックスと顕熱フラックスの分配率に着眼すると、概して群落下部層ほど負値の顕熱フラックスの割合が大きい (B_0 が負値でその絶対値が大きい) ことがわかる。

モデルによる計算結果では、群落全体として陰側で吸収される放射エネルギーは陽側で吸収される放射エネルギーの $1/4 \sim 1/3$ である。水田全体あるいは群落全体の放射収支を捉える場合に、陰側の植物体は文字通り陰の存在であるが、個葉の放射収支・熱収支から水田全体の熱収支特性を検討すると、陰側の植物体は熱環境を緩和する大きな役割を果たしていることが指摘できる。

前章で検討したように、水面や土壌面では入射日射量の減少にしたがって B_0 が低下し、とくに弱光条件では B_0 が大きく低下する。同様の現象をイネ葉面について確認するため、(7) 式の r_c を気孔抵抗 (r_s) に置き換え、それを光合成有効放射 (PAR) に対する双曲線型のモデル (大上, 2003 a) で与えたいえ、群落上部層の葉に相当する r_a (水面における r_a の $1/10$ 程度) を与えて B_0 を計算した (図 5 の「Rice Leaf」)。また比較のため、最小気孔抵抗 (日射量が無限大のときの気孔抵抗) がイネの 3 倍に相当する気孔抵抗をもつ葉についても、同様に B_0 を計算した (図 5 の「Leaf (higher r_s)」)。どちらの葉面においても、日射量の増減に対する B_0 の変化傾向は水面の場合と類似している。したがって、弱光条件下で B_0 が負値になるのは地表面の種類によらない熱収支の特徴であることがわかる。群落下部層ほど陰側群落の B_0 が小さい (図 3) のは、群落下部層ほど葉面に入射する日射量が小さいためである。ただし葉面では、 B_0 の最大値は水面の場合より大きい (すなわち強光条件下では個葉は水面よりも熱環境緩和効果が小さい) が、日射量の減少に伴って B_0 が大きく低下する。また、気孔抵抗の大きい葉では 200 Wm^{-2} 以下の日射条件でなければ B_0 が負値まで低下しないが、イネ葉面では水面の場合よりも大きい 350

Wm^{-2} 程度の日射条件で B_o が負値となった。葉面における B_o の最大値が水面より大きいのは、気孔抵抗によって潜熱フラックスが抑制されるためである。日射量の減少に伴う B_o の低下が水面の場合より大きいのは、葉面の方が水面よりも輸送係数が大きいという効果による。また、イネ葉の B_o が水面の B_o よりも大きい日射量で負値に低下するのは、輸送係数の効果に加え、イネの気孔抵抗がある程度小さいためである。さらに、夕方の時間帯に必ずと言ってよいほど水田の B_o が負値になる (Oue, 2005) のは、夕方の弱光条件に加えて、太陽高度が低いために群落上部層で日射の相互遮蔽が大きく、群落中部・下部層へ透過する日射量が極めて小さいこと (大上, 2003 a) と、気温の経時変化に由来する高温条件 (大上, 2005) が原因である。以上のように、群落内部で植物体が相互に日射を遮蔽しあって弱光条件となることにより、イネ群落は熱環境緩和機能を極めて容易に発揮できる。

IV. おわりに

水田の熱環境緩和機能は、潜熱フラックスへの熱分配を促進して表面温度を低く保持し、しばしばボーエン比が負値になって熱の吸源となるという水田の熱収支と微気象環境で特徴化される。単層モデルを用いると、その仕組みは水面や土壌面と比較して大きいバルク輸送係数 (c_h) と、畑地と比較して大きい蒸発効率 (β) で説明できた。またそのために、水田では蒸発散量が大きくなる可能性もあるが、消費水量に対する熱環境緩和機能はきわめて高いと評価した。さらに多層モデルを用い、群落下部の水面と鉛直方向に分布するイネ群落およびその陽側と陰側が熱環境緩和機能に寄与する仕組みを具体的に説明した。

熱環境を緩和する場としての水田の特異性は以下のように整理できる。

- ①どんな種類の表面でも、ボーエン比は弱光、高温、乾燥条件ほど小さくなる。水田の群落最下層部は、イネ群落で日射が遮蔽されて弱光条件になることに加え、水面が十分に湿潤な土壌面であるため、そこではほとんど必ずボーエン比が負値まで低下して大きな熱の吸源となる。
- ②群落内部で日射が遮蔽されて陰になった葉面のボーエン比は負値になりやすい。したがって、群落全体が熱の吸源となるか、または熱環境緩和機能をどれだけ持つかは、陽側の葉面におけるボーエン比がどれだけ低

く抑えられるかによる。イネは気孔抵抗が小さい作物であることに加え、日射量の増加に対する気孔抵抗の低下を十分な水分供給が支持している。その結果、陽側の葉面におけるボーエン比も比較的低い。

- ③同一気象条件下で、開けた水面や土壌面よりもイネ葉のボーエン比が負値となる可能性が高い原因は、群落内の葉が熱と水蒸気を拡散する能力が大きいことに加え、イネの気孔抵抗がある程度小さいためである。
- ④夏季の夕方には必ずと言ってよいほど水田のボーエン比が負値になるのは、②～③の特性に加えて、弱光条件、太陽高度が低いために群落中部層以下への日射透過量が小さいこと、気温の経時変化に由来する高温条件が原因である。
- ⑤水面や湿潤土壌面が物体によって覆われるだけでは、地表面（すなわち水面や土壌面とその「物体」を総合した表面）のボーエン比を負値にするのに十分ではない。「物体」である群落のボーエン比がある程度低くなる必要がある条件である。水田は、気孔抵抗の比較的小さいイネ群落で水面が覆われている場であるため、熱環境緩和機能を容易に発揮できる。

引用・参考文献

- 大上博基（1996）：水田における蒸発効率の実験的算定，水文・水資源学会誌，9（3），pp. 252－258
- Oue, H.（2001）：Effects of Vertical Profiles of Plant Area Density and Stomatal Resistance on the Energy Exchange Processes within a Rice Canopy, Journal of the Meteorological Society of Japan, 79（4），pp. 925－938
- 大上博基（2003 a）：水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究（Ⅰ）—イネの気孔コンダクタンスと個葉光合成のモデル化—，水文・水資源学会誌，16（4），pp. 375－388
- 大上博基（2003 b）：水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究（Ⅱ）—多層モデルを用いた数値シミュレーションによる水田の熱収支特性と水利用効率の検討—，水文・水資源学会誌，16（4），pp. 389－407
- 大上博基（2004）：水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究（Ⅲ）—多層モデルを用いた，LAIの違いが蒸発散量，光合成速度，水利用効率に及ぼす影響の検討—，水文・水資源学会誌，17（3），pp. 274－294
- Oue, H.（2005）：Influences of meteorological and vegetational factors on the partitioning of the energy of a rice paddy field, Hydrological Processes, 19（8），pp. 1567－

1583

大上博基（2005）：水田の熱環境緩和機能——第1部 屋外観測による検証——，水利科学，286，pp. 1－13

（愛媛大学農学部生物資源学科助教授）