

# 水田の熱環境緩和機能(1)

屋外観測による検証

|       |          |
|-------|----------|
| 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5号    |
| 巻号補足  |          |
| 掲載ページ | p. 1-13  |
| 発行年月  | 2005年12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1部 屋外観測による検証 ——

大 上 博 基

### 目 次

- I. はじめに
- II. 熱収支で評価する水田の熱環境緩和機能
- III. 水田による熱環境緩和機能の費用換算
- IV. 気温の低下で評価する水田の熱環境緩和機能
- V. 水田における熱収支特性と気温条件の関係
- VI. おわりに

### I. はじめに

農業には、食料を長期的に安定的に供給する食料保障の機能のほか、農業による土地・水利用が自然生態系の物質循環系に組み込まれるがゆえに発揮される国土保全・環境保全の機能などの多面的機能がある。農業の多面的機能は、対価を受けない外部経済として供給される一方で、日本の地域・流域のように生産・生活・生態環境が一つの空間で共存する場合は、市民に公平に供給される公共財的な性質を有する（日本学会会議，2001）。したがって、多面的機能の仕組みを科学的に解明すると同時に、変化してゆく地球環境や社会情勢と対峙しながら多面的機能を最大限に引き出すための方策を示し続けることは、学術的にも社会的にも必要性の高い研究課題である。

農業の多面的機能の一つに含まれる気候緩和機能は、農地における蒸発散作用で気温が低下すること、すなわち主として熱環境緩和機能を指している。市街地における緑化空間による熱環境緩和機能に関する研究は、とくにヒートア

イランドを軽減するための都市計画を目的として、近年多数の研究が展開している。これに対して、農地による熱環境緩和機能に関する研究の進展は、以下のように整理できる。

灌漑された農地が周囲の熱環境に及ぼす影響は、乾燥地域では古くから研究されてきた。ただし本来の研究の背景は、大量の蒸発散によって水分を消費する移流効果を定量化し、水資源の高度利用化をめざすことであった。移流効果とは、一般に高温・乾燥気候下に灌漑農地のような湿潤地が存在すると、放射エネルギーに由来する量を超える蒸発散量が観測されることをいう。蒸発散のための付加的なエネルギーは高温大気から地表面への熱輸送（負値の顕熱フラックス）である。大量の蒸発散で水分を消費する引き換えに、その周囲の熱環境は緩和される。

移流効果自体の研究は、Horton (1917) が US Weather Bureau の年報データにその現象を見出し、Tanner (1957) がその機構を解説したことで始まったと見られる (大上, 1992 b)。これに続いて Hudson (1964) らは、スーダンの広大な灌漑農地と非灌漑裸地で鉛直および水平方向に蒸発パンを設置し、移流効果の観測を行った。非灌漑裸地では強い移流効果のため蒸発計蒸発量が多く、灌漑裸地に進入する距離 (fetch) に伴って蒸発計蒸発量が減少する。このとき、蒸発計蒸発量と蒸発散量との間には補完関係が成り立つ (Bouchet, 1963; Morton, 1965; Seguin, 1975; 大上, 1992 a)。Hudson (1964) らの研究において、ある地点で測定された蒸発計蒸発量は、局所的な熱環境の指標と解釈できる (大上, 1992 b)。

一方、灌漑農地における熱収支や気温分布の測定は、Dyer & Crawford (1965), Rosenberg (1969), Hanks et al. (1971), Rosenberg & Verma (1978), Brakke et al. (1978) によって次々と行われた。これらの中で Brakke et al. (1978) は、非灌漑畑の風下に隣接する灌漑アルファルファ畑において、水平方向4地点、鉛直方向6点の気温・湿度分布を夏期に測定し、風下方向への著しい気温低下すなわち熱環境緩和効果を観測した。また、乾燥地域にある灌漑地の気温・湿度分布や蒸発散量に関する数値実験が、Elliott (1958), de Vries (1959), Philip (1959), Rider et al. (1963), Rao et al. (1974) などによって行われた。

以上の研究は灌漑農地による熱環境緩和機能に関する研究の先駆けとして興味深い。蒸発散による大量の水分消費と表裏一体の関係にある灌漑農地の熱

環境緩和機能は、乾燥地域にあって水資源の有効利用が第一の課題であった諸外国では、あまり積極的に評価されなかった感がある。また、都市におけるヒートアイランドに関する研究が進展し（たとえば Oke, 1979）、都市に点在する緑地や水辺の熱環境緩和機能が評価される一方で、諸外国における広大な灌漑農地は生活空間と明確に分離されていることも、農地の熱環境緩和機能が評価されにくい理由であると考えられる。

これに対して地目が混在する土地利用条件の日本では、農地と市街地が同一の地域・流域に共存する場合が多いため、市街地にある緑地や水辺などと同様に農地による熱環境緩和機能も積極的に評価されてよい。本報では、筆者らが行った夏季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する。また、水田においてこの機能がとくに大きいことを示し、これを人工的に代替した場合の費用換算を示す。さらに、水田が周囲の熱を吸収する気温条件を解説する。

## II. 熱収支で評価する水田の熱環境緩和機能

まず、土地利用の異なる地表面の熱環境を比較するために、水田、非灌漑ジャガイモ畑、裸地における地表面の熱収支特性を比較する。一般に放射収支式と熱収支式は、

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

と表される。ここで、 $St$ は全天日射量、 $a$ はalbedo、 $Ld$ は大気長波放射量、 $Lu$ は地表長波放射量、 $Rn$ は正味放射量である。熱収支項目  $H$ 、 $LE$ 、 $G$ 、 $\Delta S$ はそれぞれ顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱フラックス、貯熱変化量である。各熱収支項目への分配は時間的に変化する（たとえば大上他, 1993参照）が、日中の平均的な熱収支特性からその地表面の熱環境を評価すると、 $LE$ への分配が多いほど温度上昇を抑制し熱環境を緩和する性質が強く、 $H$ への分配が多いほど温度上昇を助長する性質が強いと考えてよい。

表1に、互いに近接したこれら3区画で同時に測定した日中平均の熱収支を示す。また正味放射量を100%とした各熱収支項目への分配率も表示した。 $H$ と $LE$ への分配はボーエン比熱収支法で算定した。例に挙げた2期間は、それ

表1 土地利用の違いによる熱収支の比較（各期間6～18時の平均値）

|               | 草丈 (cm) | $Rn$      | $LE$      | $H$      | $G + \Delta S$ |
|---------------|---------|-----------|-----------|----------|----------------|
| 1988年7月21-31日 |         |           |           |          |                |
| 水田            | 63      | 316 (100) | 256 (81)  | 29 (9)   | 31 (10)        |
| ジャガイモ畑        | 51      | 294 (100) | 248 (84)  | 43 (15)  | 3 (1)          |
| 裸地            |         | 279 (100) | 162 (58)  | 94 (34)  | 24 (8)         |
| 1988年8月18-19日 |         |           |           |          |                |
| 水田            | 82      | 328 (100) | 329 (100) | -27 (-8) | 26 (8)         |
| ジャガイモ畑        | 34      | 353 (100) | 305 (87)  | 29 (8)   | 19 (5)         |
| 裸地            |         | 303 (100) | 177 (58)  | 99 (33)  | 27 (9)         |

注：単位は $Wm^{-2}$ ，カッコ内は各地表面における正味放射量を100%とした分配率

ぞれイネが幼穂形成期と登熟期，ジャガイモが開花期と葉が枯れ始めた時期であり，草丈は表中に示すとおりであった。2期間ともその数日前から連続した晴天日であり，畑地と裸地の土壌水分状態はpF値にすると2.7～2.9という乾燥状態であった。潜熱フラックスへの分配率を3区画で比較すると，水田で最大，乾燥した裸地で最小であった。顕熱フラックスへの分配率は，乾燥した裸地で最大，水田で最小でありとくに8月18-19日には負値であった。次章で解説するように，熱環境緩和機能の有無や強さは，地目の混在する地域において相対的に評価される。このように各区画における熱収支を比較すると，水田が最も熱環境を緩和する性質が強く，畑地はそれに次いで熱環境を緩和する機能を有し，植生のない裸地は温度上昇を助長する性質が強いと評価できる。

さらに，水田における負値の顕熱フラックスは移流効果を表しており，大気から水田へ熱が輸送され水田が熱の吸源になっていることを意味する。このように，乾燥地だけではなく湿潤気候の日本でも，とくに高温条件下では宅地や舗装地などと混在する水田で負値の顕熱フラックスが観測される。水田は，吸収した放射エネルギーのほとんどを潜熱フラックスすなわち蒸発散で消費する代わりに，熱環境を緩和し高温時には大気の顕熱を吸収して大気を冷却する能力を有することがわかる。過去の熱収支に関する研究成果によると，負値の顕熱フラックスは植生のある地表面で夕方にししばし観測される。その原因の一つをV.で解説するが，夕方以外の時間帯や日中平均で顕熱フラックスが負値

になることはきわめて特殊なケースであり、水田における熱収支の特異性であるといつてよい。

### Ⅲ. 水田による熱環境緩和機能の費用換算

水田における正午前後の潜熱フラックスは、夏季の晴天日には $600 \text{ Wm}^{-2}$ 前後に達する。そこで、これに相当する熱エネルギーをエアコンで除去することを考え、水田の熱環境緩和機能を費用換算してみる。いくつかの家電メーカーの最新（2005年）諸元によると、家庭用のエアコンの冷房能力は2.2 kW（6畳用）～4.0 kW（14畳用）程度であり平均消費電力は300～800 Wである。冷房能力は、室外と室内の気温をそれぞれ $35^{\circ}\text{C}$ と $27^{\circ}\text{C}$ として1時間に室内から除去できる熱量を表す。除去される室内の熱エネルギーの熱源は、室内外における放射収支と熱収支の結果として、床面、壁面、天井面から顕熱フラックスとして室内に放出される熱である。したがって室内と水田とでは、放射収支と熱収支の構造が異なり空気の冷却方法自体も異なるので物理的な比較はできないが、あえて両者の能力を比較すると次のようになる。

水田からの潜熱フラックス $600 \text{ Wm}^{-2}$ は、 $3.7\sim 6.7 \text{ m}^2$ の面積に1台の割合で設置されたエアコンが除去できる熱エネルギーに相当する。すなわち水田の熱環境緩和機能は、 $1.9\sim 2.6 \text{ m}$ 四方に家庭用のエアコンがおよそ1台設置された状態に相当する。

圃場整備された1区画 $100 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ の水田であれば、6畳用のエアコンは約800台、14畳用のエアコンは約450台稼動している状態に相当する。これらのエアコンを1日に8時間、60日間運転すると、6畳用のエアコンならば約250万円、14畳用のエアコンならば約390万円の電気料金がかかる。また、この水田による熱環境緩和機能を石油エネルギーで代替するためには、火力発電の $\text{CO}_2$ 排出原単位を $0.69 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ とすると、約100 tの $\text{CO}_2$ が排出されることになる。さらに、こうして排出された $\text{CO}_2$ をあえて水田で固定するためには、水田の純光合成速度を日中平均で $15 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ （大上，2004）とすると、約9万 $\text{m}^2$ の水田すなわち熱を除去する水田の約30倍の水田面積を必要とする。このように、水田の熱環境緩和機能を人工的に代替するためには、膨大な設備と電力を必要とし、大量の $\text{CO}_2$ を排出しなければならない。

#### Ⅳ. 気温の低下で評価する水田の熱環境緩和機能

市街地に存在する農地がローカルな熱環境に及ぼす影響を検討するために、アスファルト舗装面で囲まれた水田とジャガイモ畑（各30 m × 20 m）内において、水平方向15 m 間隔で5 地点、鉛直方向4 高度（60, 80, 100, 200 cm）の気温分布を同時測定した（大上他, 1994）。とくに水田の風上には約70 m にわたってアスファルトで舗装した駐車場と建物がある。晴天日に測定された2 次元気温分布の例を図1 に示す。イネの生育期は登熟期で群落高が約65 cm, ジャガイモは葉が枯れ始めていた。畑地の土壌水分は、2 日前の降雨のために湿潤状態から徐々に乾燥の進行する状態であった。図示したのは、地域の卓越風である南西～西南西の風向であった時の測定結果である。したがって図中0 m, 30 m, 60 m の各地点はそれぞれ、アスファルト舗装面の風下端（水田風上端）、水田と畑地の境界、畑地風下端にあたる。

すべての時間に共通した気温分布の特徴は、大気の流れ方向に気温が低下するように水平方向の温度勾配が現れている点である。このことから、水田ではアスファルト舗装地よりも気温が常に低く、アスファルト舗装地上で温度上昇した大気の水田上に輸送され（顕熱の移流）、水田で温度が低下していることがわかる。

時間ごとに気温分布の形態を比較すると、次のような特徴が見出せる。まず9 時には、水田上においても高度が高くなるとともに気温が低くなる負の鉛直勾配が現れている。これは、日中における接地境界層の一般的な鉛直温度勾配であり、顕熱が水田から大気に輸送されている（顕熱フラックスが正值である）ことを表している。また、同高度で比較すると水田の方が畑地よりも気温が高かった。その原因は、風上のアスファルト舗装地から温度の高い大気が入り込んだためと、同高度でも水田の方が群落に近いためである。したがってこの時間には、水田とジャガイモ畑が同様に熱環境を緩和していると評価できる。

一方午後（12, 15, 18時）には、水田群落上に低温域が現われ、気温鉛直分布は高度が高くなるとともに気温が高くなるという逆転勾配を示した。この温度勾配は、顕熱が大気から水田に輸送されている（顕熱フラックスが負値である）ことを表している。それと同時に水田西側（0～15 m）の水平気温勾配から、アスファルト舗装地から水田に顕熱が移流したことがわかる。12時の気温

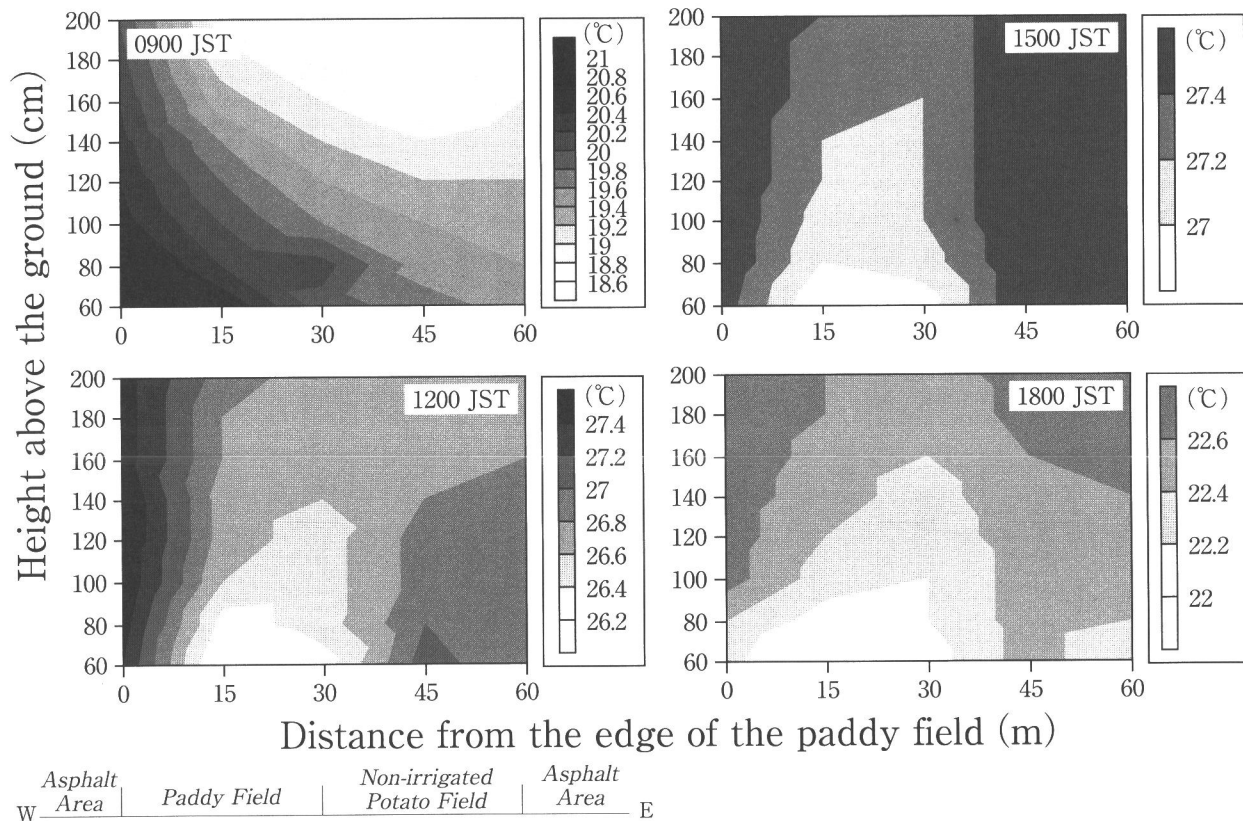


図1 アスファルト舗装面、水田、ジャガイモ畑が隣接するエリアで測定された2次元気温分布。風向は南西～西西南西(図の左から右へ)。(1992年8月27日)

分布を例にとると、水田の中央部に当たる15 m 地点のイネ群落付近（高度60 cm）において、気温が最も低かった。高度60 cm では、15 m 地点の気温はアスファルト舗装地風下端の0 m 地点よりも1.3℃低く、ジャガイモ畑中央の45 m 地点よりも1.0℃低かった。高度200 cm の気温は、30～60 m 地点で最も低く、0 m 地点よりも0.8℃低かった。これらの測定結果は、アスファルト舗装面が熱の湧源となり、水田が熱の吸源となったことを示している。この実験圃場では、水田による空冷効果が水平方向40 m 以上の風下にまで達していることがわかる。

9時の気温分布からは、水田と畑地もアスファルト舗装面と同様に熱の湧源になっていることがわかる。ただし、大気の流れ方向に発生した水平の気温勾配は、アスファルト舗装面から水田と畑地への顕熱輸送を表しており、それは水田と畑地で顕熱の放出と気温の上昇が抑制されていることと相互作用の関係にある。したがってこの場合には、アスファルト舗装面で形成された高温環境と対比して、水田と畑地が相対的な熱環境緩和機能を持つと評価できる。一方、地表面上で気温の鉛直勾配が逆転すると、地表面が熱の吸源となる。午後の水田における気温分布がそれである。この場合には、水田が周囲の熱を吸収して大気冷却機能を発揮するため、絶対的な熱環境緩和機能を持つと評価できる。

以上のように、熱環境緩和機能は二つのレベルに分類できる。市街地の中にある水辺や緑地は、一般に前者の熱環境緩和機能を有する。その中で水田は、さらに後者の熱環境緩和機能を有する。

## V. 水田における熱収支特性と気温条件の関係

ある地表面が熱の湧源となるか吸源となるかは、顕熱フラックスの正負かボーエン比 ( $B_o$ ) ;

$$B_o = H / LE$$

の正負で区別することができる。ボーエン比は、気象条件（日射量、気温、飽差、風速）、土壤水分条件、植生条件で変化するが、水田の微気象観測データからボーエン比と気象条件（日射量、気温、飽差、風速）との相関性を検討した結果、気温との相関が最も高かった（大上他、2000）。高度140 cm の気温 ( $T_a$ ) とボーエン比 ( $B_o$ ) の関係を、時間帯ごとに図2 (a) ～ (d) に示す。

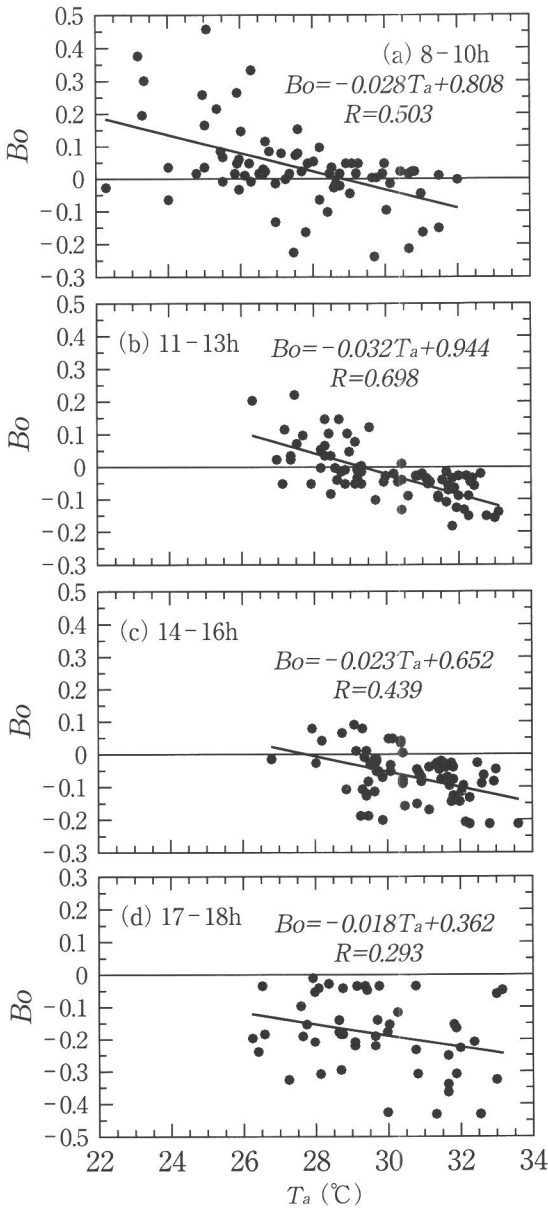


図2 水田における気温 ( $T_a$ ) とボーエン比 ( $Bo$ ) の関係 (1998年7月29日～9月9日)

測定期間は分けつ終期から乳熟期に至る生育期であった。図から、気温の上昇に伴ってボーエン比が低下し、潜熱への分配が増加する傾向にあることがわかる。また、ある気温よりも高い条件では、ボーエン比が負値になり水田が熱の吸源となることがわかる。両者の間に線形相関を仮定すると、ボーエン比が負値になる気温条件は、8～10時に28.9℃以上、11～13時に29.5℃以上、14～16時に28.3℃以上、17～18時に19.9℃以上である。このように、水田が熱の吸源となる原因の一つは、高温条件であるといえる。

一般に、水面などの完全湿潤面でボーエン比が気温上昇とともに低下する性質を持つ（ボーエン比の気温依存性）のは、理論的には飽和水蒸気圧が気温に対して指数関数的に増加するため（Priestley, 1966; 樫根, 1980; 近藤, 1994）である。さまざまな水面における測定結果によると、ボーエン比が負値になる条件は32℃以上（Priestley & Taylor, 1972）であり、完全に湿った地表面上の気温はこれ以上に上昇しない（樫根, 1980）という結論が得られている。また、気温より葉温が低くなる現象は、従来から多数報告されている。たとえば Linacre (1967) は、水分と日射量を十分に供給した様々な植物の葉温  $T_s$  と気温  $T_a$  の測定例をレビューし、それ以上高いと  $T_s < T_a$  となる気温が31℃前後にあることを示している。

図に示した結果から、水田は完全湿潤面における32℃や多くの植物における31℃よりもかなり低い上限温度を有し、温度上昇を抑制する能力が極めて高いといえる。以上の検討結果から、表1に示した2期間において8月18～19日に水田が熱の吸源となった原因の一つは、高温条件であると考えられる。2期間における最高気温（高度2m）は、7月21～31日に28.5℃、8月18～19日に31.0℃であった。また、図1で午後の水田が熱の吸源となったのに対して9時には水田が熱の湧源となった原因の一つは、9時の気温が20℃前後と低かったためである。

また、水田に限らず多くの植生や湿潤地表面では、夕方にボーエン比がしばしば負値になる。この実験水田では、午後の時間が進行するにつれてボーエン比が負値となる気温条件が低くなる上に、17～18時に測定されたボーエン比はすべて負値であった。図3(a)～(c)に、イネ群落面温度( $T_s$ )と高度140cmの気温( $T_a$ )の経時変化の例を示す。 $T_s$ が最高に達する時間帯は12～14時頃であるのに対して、 $T_a$ が最高に達する時間帯は14～16時頃であることがわかる。この時間差により、14時以降の時間帯には（本観測期間中においては）、

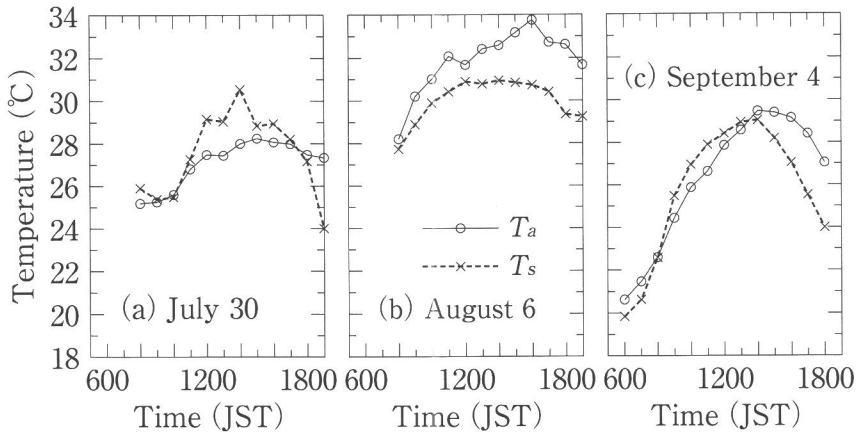


図3 イネ群落表面温度 ( $T_s$ ) と高度140cmの気温 ( $T_a$ ) の経時変化 (1998年)

気温条件によらず  $T_i < T_a$  となりボーエン比が負になることが多くなったといえる。

以上の結果から、ボーエン比が負となる気温条件として、次の2点が考えられる。まず、正午前後の検討結果から、高温条件が主な原因の一つであると考えられる。それに対して夕方、高温条件よりむしろ、植物体表面温度と気温の経時変化パターンの違いにより、 $T_i$  が  $T_a$  よりも低くなる。この現象は、植生がある程度密になると発生しやすくなると考えられる。

## Ⅵ. おわりに

本報では、農地における熱収支と温度環境の観測結果を検討し、農地の熱環境緩和機能を検証した。その結果、水田では顕熱の放出が小さい上にそれが負値になり熱の吸源となることが多いため、農地の中でも熱環境緩和機能がとくに大きいと評価した。また、これを人工的に代替した場合には、膨大な設備と電力を必要とし大量の  $\text{CO}_2$  を排出しなければならないことを具体的な数値で示した。さらに、植生のある地表面や湿潤面が高温条件で熱の吸源になるという一般的な知見に対し、水田はそれらよりも低い気温条件で熱の吸源となるため、温度上昇を抑制する能力が極めて高いと評価した。顕熱フラックスが負値になる具体的な原因は、第2部で解説する。

## 引用・参考文献

- Bouchet, R.J. (1963) : Evapotranspiration réelle et potentielle: Signification climatique, Assemblée générale de Berkley, AIHS, Publ., 62, pp.134—142
- Brakke, T.W., Verma, S.B. & Rosenberg, N.J. (1978) : Local and regional components of sensible heat advection, J. Appl. Meteorol., 17, pp.955—963
- de Vries, D.A. (1959) : The influence of irrigation on the energy balance and the climate near the ground, J. Meteorol., 16, pp.256—270
- Dyer, A.J. & Crawford, T.V. (1965) : Observations of the modification of the microclimate at a leading edge, Q. J. Royal Meteorol. Soc., 91, pp.345—348
- Elliott, W.P. (1958) : The growth of the atmospheric internal boundary layer, Trans. Am. Geophys. Union, 39 (6), pp.1048—1054
- Hanks, R.J., Allen, L.H. & Gardner, H.R. (1971) : Advection and evapotranspiration of wide-row sorghum in the Central Great Plains, Agron. J., 60, pp.538—542
- Horton, R.E. (1917) : A new evaporation formula developed, Engineering News-Record, 78, pp.196—199
- Hudson, J.P. (1964) : Evaporation under hot dry conditions - Changes across ten miles of cotton and fallow in the Sudan, Empire Cotton Growing Rev., 41, pp.241—254
- 樺根勇 (1980) : 水文学, 大明堂, pp.102—105
- 近藤純正編著 (1994) : 水環境の気象学, 朝倉書店, pp.142—144
- Linacre, E.T. (1967) : Further notes on a feature of leaf and air temperatures, *Archiv. Meteor. Geophys. Bioklim.*, 16, pp.422—436
- Morton, F.I. (1965) : Potential evaporation and river basin evaporation, Proc. ASCE, Vol.91, No.HY6, pp.67—97
- Oke, T.R. (1979) : Review of Urban Climatology 1973—1976, WMO, 539, p.100
- Philip, J.R. (1959) : The theory of advection: I, J. Meteorol., 16, pp.535—547
- Priestley, C.H.B. (1966) : The limitation of temperature by evaporation in hot climates, *Agric. Meteor.*, 3, pp.241—246
- Priestley, C.H.B. & Taylor, R.J. (1972) : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, Mon. Weather Rev., 100, pp.81—92
- Rao, K.S., Wyngaard, J.C. & Cote, O.R. (1974) : Local advection of momentum, heat, and moisture in micrometeorology, Boundary-Layer Meteorol., 7, pp.331—348
- Rider, N.E., Philip, J.R. & Bradley, E.F. (1963) : The horizontal transport of heat and moisture - A micrometeorological study, Q. J. Royal Meteorol. Soc., 89, pp.507—531
- Rosenberg, N.J. (1969) : Seasonal patterns in evapotranspiration by irrigated Alfalfa in the Central Great Plains, Agron. J., 61, pp.879—886

- Rosenberg, N.J. & Verma, S.B. (1978) : Extreme evapotranspiration by irrigated alfalfa, *J. Appl. Meteorol.*, 17, pp.934-941
- Seguin, B. (1975) : Influence de l'évapotranspiration régionale sur la mesure locale d'évapotranspiration potentielle, *Agric. Meteorol.*, 15, pp.355-370
- 日本学術会議 (2001) : 地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について (答申)
- 大上博基, 大槻恭一, 大原芳夫, 丸山利輔 (1992a) : 補完関係による蒸発散量算定法の狭域への適用, *農土論集*, 161, pp.45-60
- 大上博基, 丸山利輔 (1992b) : 局地蒸発位としての蒸発計蒸発量-蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割 (Ⅱ)-, *農土論集*, 162, pp.151-159
- 大上博基, 田頭秀和, 大槻恭一, 丸山利輔 (1993) : 水田, 畑地, 裸地, アスファルト舗装面における熱収支特性と温度環境, *農土論集*, 164, pp.97-104
- 大上博基, 丸山利輔, 福島忠雄 (1994) : 地目混在化地域の農地における2次元気温分布と熱収支特性, *水文・水資源学会誌*, 7 (2), pp.130-136
- 大上博基, 小野啓子 (2000) : 水田の熱収支特性に及ぼす気象条件と群落抵抗の影響, *農業土木学会論文集*, 208, pp.29-36
- 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
- Tanner, C.B. (1957) : Factors affecting evaporation from plant and soils, *J. Soil Water Conserv.*, 12, pp.221-227

(愛媛大学農学部生物資源学科助教授)