作物の蒸発散に関する研究

(1) 水田蒸発散の季節・品種別特性と簡易推定法

桜谷 哲夫*・堀江 武**

(* 九州農業試験場畑作物部
** 京都大学農学部)

Studies on Evapotranspiration from Crops
(1) On Seasonal Changes, Varietal Differences and
The Simplified Methods of Estimate in
Evapotranspiration of Paddy Rice

Tetsuo SAKURATANI* and Takeshi HORIE**

(* Laboratory of Meteorological Disaster, Kyushu Natl. Agric.
Exp. Stn., Yokoichi-cho, Miyakonojo 885, Japan.
** Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto 606,
Japan.)

1. は し が き

最近、農業生産を維持しつつ、さらに水を有効に利用するための方策の研究に対して従来以上に大きな期待が寄せられている。それは、近い将来、農業用水と民生用水との競合の増加が懸念されるうえ、水源から遠く隔たった地帯への農耕地拡大の要求が高まってきていることによる。これを背景に、作物の生産と水利用に関する研究が畑・水田作を問わず活発になされている。これらの広範な研究を推進するうえで、耕地蒸発散と作物・気象要因との関係解析、および蒸発散の推定法の開発は重要な位置を占める。

本報告で対象とした水田の蒸発散特性に関して、我国では1950年代以降数多くの研究成果が蓄積されている。すなわち、1950～60年代には、水田蒸発散量の測定が各地でなされるとともに、気象条件との関係が明らかにされ(たとえば、羽生・小野, 1960; 佐藤, 1960)水利用計画などに広く利用された。1960年代以降は、接地気層の物理学と測定器の進歩に伴って、水田の水・熱収支機構が研究され(Iwakiri, 1965; 蒸発散研究グループ, 1967B; Seo and Yamaguchi, 1968), その成果が水田蒸発散量のより精密な推定法の開発に利用されている。

このように、多くの成果が提出されているが、水田に

おけるより効率的な水利用を図るためには、まだ未解決な問題が若干残されている。その第一は、水田蒸発散が気象要因によってのみ支配されているのか、あるいは気象要因と生育ステージの両方によって支配されているのかという問題である。この点にまで言及した報告は我国ではあまり見あたらないようである。

第二に、超多収穫稲が我国に導入されているが、我国で外国稲の蒸発散特性を研究した例が少ないことである。外国稲の導入拡大を図るための基礎として、外国稲と日本稲の蒸発散特性の差異を解明しておくことが重要である。

そして第三に、水田蒸発散の推定法の確立である。作物蒸散は物質生産と密接に関係していることが知られている。水稻においても、水田蒸発散や作物蒸散とバイオマスや収量との間に高い相関関係のあることが明らかにされてきた(杉本, 1975; Shih *et al.*, 1983)。蒸発散の推定は、用水量の決定のみならず、このような生産予測においても必要とされている。蒸発散量の推定法として従来より種々な方法が提案されているが、簡易で精度の高い方法の開発が望まれている。

本研究は、以上のような背景のもとに、①水田蒸発散、イネ個体群蒸散および水面蒸発の季節変化の解明、②日本稲と外国稲の蒸発散特性の差異の解明、③水田蒸発散の簡易推定法の確立、を目的としたものであり、一応の結果を得たので報告する。

昭和58年4月7日 全国大会にて発表

昭和60年2月20日 受理

2. 研究方法

2.1 圃場

蒸発散の測定を、既報(堀江・桜谷, 1985)の研究の一環として、筑波の農業技術研究所構内に1982年に設定した試験区においてマイクロライシメータによって行った。試験区の構成とイネの栽培条件については既報(堀江・桜谷, 1985)に詳述してあるが、本稿を理解するために必要な事項について以下に略記しておく。

試験圃場を、作期を異にする区と品種を異にする区より構成した。前者には、品種「日本晴」を、3月31日移植日を第1作期区(N1)とし、7月5日移植日を第8作期区(N8)とする8作期で栽培した。これによって、4月から10月までの幅広い気象条件下で蒸発散を測定することができた。後者には、日印交配品種の「密陽23号」とインド型の「IR-36」を日本晴の5番目の作期(N5)と同様の作期(5月24日移植)で栽培した。この外国稲2品種とN5の水田面積はそれぞれ500m²であった。他の試験区の面積はすべて40m²であった。これらの試験区は4haの水田圃場内に設定されたので主要生育期間には試験圃場周囲からの移流の影響は小さかったものとみられる。

2.2 測定方法

本実験で用いたマイクロライシメータは、Tomar and O' Toole (1980 A) が用いたものと基本的に同じであり、面積600cm²、深さ60cmの有底ステンレスパンと水位を拡大して測るマリオット管より構成された(堀江・桜谷, 1982)。

試験区の耕起後、1試験区につき3台のパンを、1台を試験区中央に、他の2台を、40m²の試験区では中央のパンの左右1mの点(長辺に平行)に、500m²の試験区では同様に10mの点に埋設した。このとき掘り取った土壌をできるだけ土層を攪乱しないようにパンに充填した。水面蒸発量測定用として用いた中央のパンを除く2台のパンには、各試験区への田植時にイネを2株(1株3本植)ずつ移植した。3台のパンとも水深が3~4cmとなるようにマリオット管の高さを調節した。

マリオット管の水位を毎朝9時に読取り、前日の同時刻における水位との差にマリオット管とパンの面積比を乗じた値を前日の蒸発(散)量とした。前日9時から当日9時の間に降水があった場合でも、マリオット管の水位が低下していたときは上と同様にして求めた値を前日の蒸発(散)量とした。水位に変化がみられなかったときには前日の蒸発(散)量を0とした。従って、雨天日の蒸発(散)量にはある程度の誤差を含んでいたものとみられる。2台のパンの平均値を水田蒸発散量とし、蒸散量は

蒸発散量と水面蒸発量の差から求めた。

純放射とアルベドを、N1, N4, N5 および N7 の植被上約1mの高度で、それぞれ風防型純放射計とゴルチンスキー日射計を用いて測定した。水田の気温と湿度はN1に設置した熱電対通風乾湿計(地上高1.5m)により求めた。日射量と風速は、試験圃場から約300mのところにある観測露場での測定値を使用した。

2.3 基準蒸発散

本稿では、蒸発散に及ぼす生育ステージの影響を調べるにあたり、蒸発散と基準蒸発散との比を求めて気象条件の影響を消去しようとした。ここで、基準蒸発散(*ETR*)は「水分欠乏のない生育の活発な草高8~15cmの密生した広い牧草地からの蒸発散」(Doorenbos and Pruitt, 1977)と定義される。気候資料から*ETR*を求めるために、Doorenbos and Pruitt (1977)は、改良Penman法、日射法、Blaney-Criddle法および蒸発計法の4つを提案している。Penman法は水田蒸発散と高い相関関係にあることが報告されているので(蒸発散研究グループ, 1967B)、本稿では上の4方法のうち次式で示される改良Penman法を用いた。

$$ETR = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) (e_s - e) \right] \quad (1)$$

ここで、 R_n は純放射量[MJ・m⁻²]、 $f(u)$ は風速の関数、 e_s は日平均気温における飽和水蒸気圧[mb]、 e は日平均水蒸気圧[mb]、 Δ は日平均気温における飽和水蒸気圧—温度曲線の傾度[mb・℃⁻¹]、 γ は乾湿計定数[mb・℃⁻¹]、 L は蒸発潜熱[J・g⁻¹]、 c は気候によって定まる経験定数、そしてここでの*ETR*の単位はmm・day⁻¹である。 R_n と $f(u)$ は、Doorenbos and Pruitt (1977)に従って、それぞれ次式から求めた。

$$R_n = (1 - A) R_s - R_{ln} \quad (2)$$

$$R_s = [c_1 + c_2 (\tau / \tau_0)] R_0$$

$$R_{ln} = \sigma T_a^4 (c_3 - c_4 \sqrt{e}) [0.1 + 0.9 (\tau / \tau_0)]$$

$$f(u) = 0.27 + 0.233 u \quad (3)$$

ここで、 A はアルベド、 R_s は日射量[MJ・m⁻²]、 R_{ln} は長波有効放射量[MJ・m⁻²]、 τ は日照時間[h]、 τ_0 は日照時間[h]、 R_0 は大気圏外日射量[MJ・m⁻²]、 σ はStefan-Boltzman定数[4.90×10⁻⁹ MJ・m⁻² K⁻⁴]、 u は2m高での日平均風速[m・s⁻¹]、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 は経験定数である。本研究では、 A の値として0.25を、 c_1 と c_2 の値としてそれぞれ0.25と0.50を、潤湿地帯の c_3 と c_4 の値としてそれぞれ0.56と0.079を用いた。我国の気候条件を考慮し(1)式中の $c=1.0$ と仮定した。

3. 結 果

3.1 葉面積指数とアルベド

日本晴の各作期における葉面積指数(LAI)の推移が既報(堀江・桜谷, 1985)の Fig. 2 に示されている。これを後述の蒸発散の推移と対比させるために再掲載したのが Fig. 2B のハッチの部分である。LAI は出穂期ごろ最大となっており、移植後最大に達するまでの所要日数は移植期が遅いほど短くなっている。これはあとの作期ほど高温下で栽培されたため生長が促進されたことによる。最大 LAI はあとの作期ほど小さくなる傾向にあり、N1~N4 は約 6 であったが N5~N8 は約 5 であった。

N1, N4 および N5 において得られた LAI とアルベドとの関係を示したのが Fig. 1 である。アルベドの変化パターンに作期による明瞭な差は認められず、いずれも LAI の小さい領域(0~3)では急激に増加し、LAI が約 3 以上では増加が鈍化している。図中の実線は、蒸発散研究グループ(1967A)が提出した次式を、パラメータ $A_f=0.21$, $A_0=0.07$, $k=0.50$ として描いたものである。

$$A = A_f - (A_f - A_0) \exp(-kF) \quad (4)$$

ここで、 A_f と A_0 はそれぞれ地面が完全に植被で覆われたときと植被のないときの反射率、 F は葉面積指数、 k は減衰係数である。各測点はおおむねこの曲線の周囲に分布し、LAI とアルベドとの関係は(4)式によって良く表わされることが確かめられた。上の各パラメータの値は既報(堀江・桜谷, 1985)で得られた値にきわめて近い。

Fig. 1. Dependence of albedo on leaf area index (LAI) for "Nipponbare" rice grown in three different cropping seasons.

3.2 蒸発, 蒸散, 蒸発散の季節変化

3.2.1 水面蒸発

日本晴の各作期における水田植被下の半旬平均水面蒸発量(E)の推移を示したのが Fig. 2A の点線である。LAI の小さい生育初期には、 E の値が天候によってかなり大きく変動しているが、最大値は約 $6 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ に達している。この値は盛夏期の蒸発散量(ET)に匹敵しているのが注目される。N1 のように初期生育が長期にわたる試験区では、 E が ET の大部分を占める期間が 1 カ月近くに達している。LAI の増加につれて E は減少し、LAI の最大期頃には ET の中で E の占める割合は 10% 程度となっている。

気象条件の影響を消去するために、 E/ET を求めた。同一 LAI で E/ET に作期による差異は認められなかった。そこで、全作期の E/ET について、LAI の 1.0 の幅でグルーピングして平均値と標準偏差を計算した。その結果を Fig. 3 に示す。測点の変動はやや大きい、LAI が約 3 までは LAI の増加につれて E/ET は急激に減少し、LAI が約 3 以上では減少が鈍化している。LAI と E/ET との関係は、Uchijima (1961) および岩切(1964)が提案した次式によってよく表わされた。

$$\frac{E}{ET} = e^{-kF} \quad (5)$$

ここで、 F は葉面積指数である。パラメータ k は本実験では 0.40 となり、岩切(1964)の得た値(0.44)に近かった。

3.2.2 蒸 散

個体群蒸散量(T)の生育に伴う推移が Fig. 2A に細い実線で示されている。 T は LAI の増大に伴って増加し、LAI の最大期ごろには ET の約 90% までに達した。移植期の遅い程、田植直後からの T の増加が急になっている。これは、前述のようにあとの作期ほど LAI の増加が急なためである。

上と同様にして T/ET と LAI との関係を求めた。それが Fig. 3 に示されている。 E/ET とは全く逆に最初は急激にあとは緩やかに増加している。両者の関係は次式で表わされた。

$$\frac{T}{ET} = 1 - e^{-0.40F} \quad (6)$$

3.2.3 蒸発散

E と T の合計値である水田蒸発散(ET)の推移を Fig. 2A に太い実線で示してある。全生育期間を通してみると、 ET は生育ステージとは無関係に天候によってのみ影響されながら推移しているようにみえる。8 作期のうち最も長期の測定がなされた N1 に着目すると、 ET の最大は 5 月に現われており、盛夏期の 7~8 月はやや小

Fig. 2. (A) Seasonal change of evaporation (E), transpiration (T) and evapotranspiration (ET) from paddy fields for "Nipponbare" rice grown in eight different cropping seasons (five-day mean).
(B) Seasonal change of LAI and the ratio of ET to reference ET (ETR) for "Nipponbare" rice grown in eight different cropping seasons.

Note: Broken lines and numerals in the figure represent mean value of daily ET for main growth period (transplanting date — mid-September), and straight lines the mean value (1.05) of daily ET for eight cropping seasons.

Fig. 3. Dependence of E/ET and T/ET on LAI for "Nipponbare" rice grown in eight different cropping seasons.

Note: Bars in the figure represent standard deviation.

さい値となっている。これは、1982年は5月に晴天日が多く、7～8月が天候不順であったことに起因する。

天候の影響を消去するために、基準蒸発散(ETR)に対する ET の比(ET/ETR)を求め図示したのがFig. 2Bの実線である。図中の点線は、各作期における測定開始日から9月15日までの測点の平均値を表わし、直線は全作期をこみにした平均値($ET/ETR=1.05$)を表わす。図のように、各測点は、9月中旬ごろまでそれぞれの平均値の周囲に分布し、絶対値の推移から予想されたように、 LAI や季節とは全く無関係に推移している。しかし、9月第4半月以降N4～N8において ET/ETR にかなり大きな値が出現した。これは、あとに述べるように、この時期の ETR の過小評価と移流の影響が原因しているように見受けられる。

3.3 蒸発、蒸散、蒸発散の総量

田植直後から成熟期までの水面蒸発、個体群蒸散および水田蒸発散の総量がTable 1に示されている。蒸発総量($\sum E$)は移植期が早いほど多い傾向にあり、N1が320 mm/162 dayであったのに対し、N8ではその37%の118 mm/120 dayであった。これは、早い作期ほど気温が低いいため LAI の増加が遅れ、その間、水面蒸発が卓越したためである。蒸散総量($\sum T$)は $\sum E$ と同様の傾向にあるが、その範囲はN1の360 mm/162 dayからN8の296 mm/120 dayと $\sum E$ ほど差が開いていない。 $\sum E + \sum T$ で表わされる蒸発散総量($\sum ET$)も当然あとの作期ほど少ない傾向を示し、N1の680 mm/162 dayからN8の414 mm/120 dayへと変化している。

全生育期間1日あたり蒸発散量は、N8が3.5 mmとやや少なかった以外は作期による傾向はみられず、3.9～

4.2 mmの間にあり、8作期の平均では4.0 mmとなった。Tomar and O'Toole (1979)は、アジア各地で得られた水田蒸発散の値を整理し、日本については4.4～5.5 mmの範囲にあったと報告しているが、著者らの4.0 mmという値はこれよりも10～30%小さい、また、著者らの値は彼らの報告には含まれていない蒸発散研究グループ(1967B)の値(3.1 mm)およびIwakiri (1965)の値(3.7 mm)よりもそれぞれ29%および8%大きく、宮本・日野(1979)の関東地方南部における推定値に非常に近い。

3.4 品種と蒸発散

外国稲と日本晴の蒸発散特性の差異を調べるために、Fig. 2Bにならって、密陽23号とIR-36の ET/ETR を計算した。その結果がFig. 4に示されている。図にみられるように、これら2品種の ET/ETR は、N5 (Fig. 2B)と同様、9月中旬までは比較的小さな変動で推移している。しかし、詳細にみると両品種とも LAI の最大期頃に弱いピークが認められる。これはN5では認められない現象である。田植直後から9月15日までの ET/ETR の平均値もN5に比べ密陽23号で7.8%、IR-36で10.7%大きい値を示した。

外国稲2品種の ET が LAI 最大期頃にピークをもつ理由として T の増加が予想された。そこで、晴天日(日射量 $20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上)における T/ETR を求め、 LAI との関係で表わしてみた。それがFig. 5である。 LAI が2以上の領域に注目すると、日本晴では比較的測点の変動が小さいのに対し、外国稲2品種はかなり変動が大きく、日本晴の1.4～1.8倍の範囲にまで測点が分布している。これは外国稲2品種の蒸散量が増加しやすい性質をもつ

Table 1. Total amounts of evaporation ($\sum E$), transpiration ($\sum T$), evapotranspiration ($\sum ET$), the ratio of $\sum E$ to $\sum ET$ and mean value of daily ET for total growth periods from transplanting to ripened date of each "Nipponbare" rice grown in eight different cropping seasons.

Notation	Transplant date	Ripened date	Evaporation $\sum E$, mm	Transpiration $\sum T$, mm	Evapotranspiration $\sum ET$, mm	$\sum E/\sum ET$	Mean value of daily ET , mm day ⁻¹
N1	31/Ⅲ	12/Ⅴ	320	360	680	0.47	4.2
N2	12/Ⅳ	14/Ⅴ	272	350	622	0.44	4.0
N3	26/Ⅳ	19/Ⅴ	232	358	590	0.39	4.1
N4	10/Ⅴ	30/Ⅴ	214	348	562	0.38	4.0
N5	24/Ⅴ	11/Ⅵ	212	306	518	0.40	3.9
N6	8/Ⅵ	18/Ⅵ	236	314	550	0.43	4.2
N7	21/Ⅵ	25/Ⅵ	163	304	467	0.35	3.9
N8	5/Ⅶ	5/Ⅶ	118	296	414	0.29	3.5

Note: The number of days with missing data is 3 in N1 and N8, and 4 in N5 and N7.

Fig. 4. Seasonal change of ratio of actual evapotranspiration to the reference one (ET/ETR) and LAI for “Milyang 23” and “IR-36”.

Note: Broken lines in the figure represent mean value of ET/ETR for main growth period from transplanting date to mid-September.

ているためとみられるが、これについては後で若干考察する。

3.5 蒸発散の推定法

現在までのいくつかの研究において、Penman法は水田蒸発散を推定するのにかなり有効であることが明らかにされている(たとえば、蒸発散研究グループ, 1967B)。本研究においても、改良 Penman法を用いた基準蒸発散に係数 1.05 を乗ずることによって水田の半日蒸発散量を相関係数 0.878 ($n=183$) で推定できた。しかし、Penman 法では純放射(または日照時間)と気温のほか、風速と湿度のデータを必要とする。このため、その使用がこれらの気象要素が観測されている地点に限られる。

日射法と Priestley-Taylor 法は、用いる気象要素が 2 個でよいから、適用条件と推定精度についてかなり研究が行われている。しかし、我国の水田に対して、これらの方法を適用した例はみあたらない。以下では両方法の筑波における水田への適用性を研究した。

3.5.1 日射法

日射法には 2~3 の方法があるが、ここでは Makkink (1957) によって提案された次式を用いた。

$$ET = a \frac{4}{4+r} \cdot \frac{R_s}{L} \quad (7)$$

Fig. 5. Ratio of the daily transpiration to the reference evapotranspiration (T/ETR) in clear days (solar radiation $\geq 20.0 \text{ MJ m}^{-2}$) as a function of LAI, for three rice cultivars of “Nipponbare” (N5), “Milyang 23” (K5) and “IR-36” (R5).

ここで、 a は経験定数である。本実験では a がマイクロイシメータ蒸発散量と日射量および気温から求められた。この毎日の推移が Fig. 6 に示されている。ただし、 $ET=0$ のときの a 値($=0$)は除外してある。また、 a 値は N1~N8 のすべての作期について求められたが、各作期において傾向が似ていることと、次に述べる Priestley-Taylor 法の経験定数 α との比較のために、N1, N5, N7 に限って示してある。図のように、 a の変動は比較的小さく、変動係数は 27~35% であった。特に N1 では、生育期間を通し、平均値 $\bar{a}=0.93$ の周囲に各測点がほぼ均一に分布している。N5 と N7 においては、9 月中旬から 10 月にかけて測点の変動が大きくなっており、 a が若干過大評価されている。これは、登熟期においても本試験圃場に限って水田状態を維持したため、周囲からの比較的乾燥した空気の移流によって蒸発散が増加したためと思われる。

移流の影響が少ないとみられた移植期から 9 月中旬までの期間における全作期のデータを回帰分析し、 $\bar{a}=0.88$ が得られた。この値を用いて、(7) 式から半日平均蒸発散量が相関係数 $r=0.912$ ($n=183$) で推定された。この r の値は改良 Penman 法よりもやや高い。日射法の有効性については、我国では矢野ら(1977)が牧草地で確か

Fig. 6. Seasonal change in daily values of α in Eq. (7) and a in Eq. (8), for "Nipponbare" rice grown in three different cropping seasons.

Note: $\bar{a}$ and $\bar{\alpha}$ represent respectively mean value of a and α for total growth periods, and CV refers to the coefficient of variation.

めている。

3.5.2 Priestley-Taylor法

Priestley and Taylor (1972)は、純放射と気温から広い湿面の蒸発散量を求めるための次式を提案した(ただし、原式では地中伝導熱量(G)が付加されているが、日量を対象とした本稿では $R_n \gg G$ と仮定し、 G を無視した)。

$$ET = \alpha \frac{A}{A + r} \cdot \frac{R_n}{L} \quad (8)$$

ここで、 α は経験定数でPriestley and Taylor (1972)は $\alpha = 1.26$ を提案している。

α が純放射の実測値を用いて計算された。この結果がFig. 6に示されている。図より明らかなように、 α の値は各区共にかなり大幅に変動している。特に、N5とN7にみられるように、9月と10月の変動が大きく、N7では $\alpha = 15.6$ に達した日があった。このため変動係数はN7で88%と非常に大きな値となった。一方、全生育期間の α の平均はN1, N5, N7でそれぞれ1.64, 2.00, 2.11であった。特に変動の大きい9月中旬～10月の値を除いて計算しても、N5とN7の α はそれぞれ1.73および1.57となり、Priestley and Taylor (1972)の提案した値(1.26)よりも25～37%大きい。Pruitt and Doorenbos (1977)は、 α が気候帯によって1.21～2.0の範囲をとることを見出している。本実験では α が時期によってもかなり大幅に変化することが確かめられ、 α ＝一定として(8)式を適用することに限界があることがわかった。

α の変動が大きくなった理由を明らかにするために次の解析を行った。(7)式と(8)式から α は次式で表わされる。

$$\alpha = a \cdot \left(\frac{R_n}{R_s} \right)^{-1} \quad (9)$$

上式より明らかなように、 R_n/R_s が一定ならば、Fig. 6の α と a は一定の比率を保って変化するはずである。実際にはそのような関係が明瞭でないのは R_n/R_s が変化していることを意味している。この変化とそれに伴う α の変化がFig. 7に示されている。図中の実線は、N1, N5, N7の全生育期間における a の平均値($\bar{a} = 1.0$)である。図のように、 R_n/R_s は0.4～0.8の間に変化しており、 R_n/R_s の減少に伴って

α の増加傾向が認められる。特に、 R_n/R_s の0.6～0.8の範囲では、測点が $\bar{a} = 1.0$ の周囲に分布し、(9)式の関係がほぼ満たされている。

R_n/R_s が変動する条件は一般的に次の式から見出すことができる。

$$\frac{R_n}{R_s} = (1 - A) - \frac{R_{ln}}{R_s} \quad (10)$$

ここで、 R_{ln} は長波有効放射である。 A と R_s とを一定とすれば、 R_n/R_s は R_{ln} によって変動する。中山・中村(1982)は大根畑における α が10～11月に大きな値を示し、変動も大きくなることを報告している。そして、

Fig. 7. Relation between α of Priestley-Taylor equation and the ratio of daily net radiation (R_n) to solar radiation (R_s).

これは純放射日量が夜間の長波有効放射の増減によって大きく変動するためであることを見出している。また、昼間の純放射量を用いると α の変動はかなり小さくなることも明らかにしている。本実験の場合も、昼間の純放射量に基づく α のCVは、N1, N5, N7において、それぞれ、30.0, 38.6, 39.4%となり、日射法のCV (Fig. 6) に及ばないものの、かなりの低下がみられた。

以上のことから、 α の値が大きく変動するのは、主として夜間の長波有効放射の増減に原因していると結論される。

4. 考 察

水田の ET/ETR を変動させる要因として植被の粗度と気孔抵抗などをあげることができる (Tomar and O'Toole, 1980 B)。このうち、水田の粗度はイネの生育によってかなり変化する (Seo and Yamaguchi, 1968)。また井上ら (1984) は水田植被の平均気孔抵抗が生育時期によって変動することを見出した。一方、LAIの増加は水田植被面のアルベドを増大させる (Fig. 1)。このように、イネの生育に伴って作物要因が変化するにもかかわらず、日本晴の ET/ETR が田植直後から9月中旬まではほぼ一定の値で推移したということは、日本晴の蒸発散量が気象要因によって大きく支配され、作物要因の影響が小さかったことを意味している。湿潤地帯における草丈の低い植生からの蒸発散は主として気象要因、特に純放射によって支配されており、植物要因の影響は比較的小さいといわれているが (Stewart, 1983)、このことが我国の日本稲水田にも適用されることがわかった。

水田での ET/ETR が生育期間中はほぼ一定の値をとることについて、Doorenbos and Pruitt (1979) は、多湿で弱風の地域で、生育中期まで $ET/ETR=1.1$ 、生育後期に0.95となると報告している。これは著者らの求めた値 (1.05) にきわめて近い。一方、蒸発散研究グループ (1967 B) は、著者らの値より11%小さい0.92なる値を提出している。この違いは、(1)式に含まれる $f(u)$ の推定法の差異に起因するものと考えられる。

水田蒸発散に関する既往の研究の多くは、簡易な基準値として蒸発計蒸発量 (EP) を用い、 ET/EP の季節変化を研究している。前出の蒸発散研究グループ (1967 B) は ET/EP が生育前期から後期に向って単調に減少することを見出した。また逆に ET/EP が生育初期から後期にかけて単調に増加するという報告がある (たとえば、佐藤, 1960)。このように、 ET/ETR が生育期間中はほぼ一定の値をとるのに対し、 ET/EP が単調な変動を示す理由については更に研究が必要のように思われる。

上述の $ET/ETR \approx$ 一定なる結果は日本晴において得られたものである。密陽23号とIR-36においてはLAIの最大期頃に ET/ETR の弱いピークが認められた。そして、これは蒸散量の増加によるものであることがわかった。杉本 (1973) は、日本稲とインド稲の蒸散量を比較し、単位葉面積当り蒸散量が日本稲よりインド稲がまきり、特に高温下ではインド稲の蒸散量が著しく大きくなることを報告している。また、丸山ら (1984) もインド稲の要水量は日本稲よりも大きいことを見出しており、それは葉身の気孔抵抗の差異によるものと推論している。

本実験で外国稲2品種の ET/ETR がLAI最大期頃にピークを示したのは、上のような特性がLAIの大きいときに強く現われたためであろう。熱帯や乾燥地帯では、 ET/EP が最高分けつ期と出穂期にピークをもつ双頂型の変化を示すという報告 (たとえば、Sugimoto, 1971; Tomar and O'Toole, 1979) や出穂期にのみ最大値をとるという報告 (たとえば、Chapman and Kininmoth, 1972; Shih *et al.*, 1983) があるが、これは品種の特性と無縁でないように思われる。

日射法が日本晴の水田蒸発散量の推定において良い結果を得たのは、日本晴がインド稲のように高温下でも蒸散量が著しく増加しないことも原因の一つとして考えられる。しかし、我国では牧草地においても日射法が良い結果を得ていることから (矢野ら, 1977)、むしろ我国の多湿な気候条件が日射法の適用性を有利なものにしているとみるのが妥当であろう。すなわち、前述のように、一般に多湿な気候条件では、土壤水分が十分な場合、純放射が蒸発散を大きく支配している。そして、蒸発散日

量とは、純放射日量よりも昼間の純放射量との方が相関が高い(中山・中村, 1982)。一方、日射量は後者と高い相関関係にある。

Priestley-Taylor法は、湿潤な熱帯気候や(Gunston, 1983)、我国では牧草地において(中川, 1982)良い結果が得られている。しかし、本実験の結果では水田への適用性が劣ることがわかった。この主な原因として、純放射日量が夜間の有効放射によって大きく変動することを指摘した。我国においては、秋～冬に長波有効放射が比較的大きくなることから、9月中旬以降に α の値と変動が特に大きくなったのはこのためと推察される。また、 ET/ETR が9月中旬以降に過大評価されたのも、移流の影響に上記の影響が付加されたためと考えられる。

5. 摘 要

本研究は、①日本稲水田における水面蒸発、イネ個体群蒸散および蒸発散の季節変化を明らかにすること、②これらの簡易予測法を開発すること、③日本稲と外国稲の蒸発散特性の差異を明らかにすること、を目的にされた。このために、日本稲品種として「日本晴」を、移植時期が3月31日から7月5日までの8作期(N1～N8)で、外国稲品種として「密陽23号」(日印交配品種)と「IR-36」(インド型)をN5に相当する作期で栽培した。蒸発散量および水面蒸発量をマイクロライシメータで測定し、蒸散量を両者の差から求めた。得られた結果は次のように要約される。

1) 生育初期に不順な天候下にあったN7とN8を除けば、葉面積指数(LAI)の小さいときの半月平均水面蒸発量は最大 $5\sim6\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ に達した。これは盛夏期の蒸発散量(ET)に匹敵した(Fig. 2A)。

2) LAI最大期頃の蒸散量(T)は ET の約90%を占めた。

3) ET と基準蒸発散量(ETR)との比(ET/ETR)は、各作期とも田植直後から9月中旬まではば一定値で推移した(Fig. 2B)。このことから、日本晴の主要生育期間の蒸発散は季節やLAIにはほとんど無関係に気象条件によって大きく支配されていることがわかった。N4～N8にみられる9月第4半月以降の ET/ETR の過大評価は、周囲からの移流の影響による ET の増加と夜間の長波有効放射の増加による ETR の過小評価のためと推察された。

4) 移植直後から成熟期までの蒸発散総量(ΣET)は、N1の $680\text{ mm}/162\text{ day}$ からN8の $414\text{ mm}/120\text{ day}$ の間にあった。 ΣET に占める水面蒸発総量(ΣE)の割合は、気温が低い初期生育期間が長い早い作期ほど大きい傾向にあった。生育全期間の日平均蒸発散量は

$40\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、既往の研究で得られている値の中では平均的な値であった(Table 1)。

5) 外国稲2品種の ET/ETR にはLAI最大期頃に弱いピークを認めた(Fig. 4)。また、 $LAI=2$ 以上のときの晴天日に、 T/ETR (T :蒸散量)が日本晴よりも40～80%大きい値を示すことがあった(Fig. 5)。このことから、インド型品種は日本稲よりも高い蒸散特性をもっていることが示唆された。

6) 水面蒸発量と蒸散量は、既往の式と同様な(5)および(6)式によって推定できることがわかった。

7) 蒸発散量の簡易推定法として、日射量と気温のみから求まる日射法(7式)の有効性を認めた。これを用いて、半月平均蒸発散量が相関係数 $r=0.912$ で推定できた。

8) 水田蒸発散の推定を目的とした場合、Priestley-Taylor法の適用性は劣った。これは、主として純放射日量が夜間の有効放射によって大きく変動することに起因するためと考えられた。

謝 辞

本研究は著者らが農業技術研究所気象科(現農業環境技術研究所気象管理科)在任中に行ったものである。本研究を実施するにあたり、当時の物理第一研究室長岩崎尚博士には種々の御援助をいただいた。また業務科の松本公吉、飛田正義両技官には圃場の設定と管理に対し多くの御協力をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

引用文献

- Chapman, A. L. and Kinimonth, W. R., 1972: A water balance model for rain-grown lowland rice in northern Australia. *Agric. Meteorol.*, **10**, 65–82.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977: Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, **24**, FAO, Rome, 179 pp.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H., 1979: Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, **33**, FAO, Rome, 193 pp.
- Gunston, H. and Batchelor, C. H., 1983: A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries. *Agri. Water Management*, **6**, 65–77.
- 羽生寿郎・小野清治, 1960: 寒地水田の蒸発散に関する研究(1), *農業気象*, **16**, 111–118.
- 堀江 武・桜谷哲夫, 1982: 蒸発散の測定法(1), *農業気象*, **38**, 193–195.
- 堀江 武・桜谷哲夫, 1985: イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究, (1)個体群の吸収日射量とパイ

- オマス生産の関係, 農業気象, **40**, 331-342.
- Inoue, K., Sakuratani, T. and Uchijima, Z., 1984: Stomatal resistance of rice leaves as influenced by radiation intensity and air humidity. *J. Agr. Met.*, **40**, 235-242.
- 岩切 敏, 1964: 水稻植被の繁茂にともなう水面熱収支特性の変化について, 農業気象, **19**, 89-95.
- Iwakiri, S., 1965: On the evapotranspiration from paddy field in a southern part of Kyushu. *J. Agr. Met.*, **21**, 15-21.
- 蒸発散研究グループ, 1967A: 水田の放射状態について, 農業気象, **22**, 97-102.
- 蒸発散研究グループ, 1967B: 水田の蒸発散, 農業気象, **22**, 149-157.
- Makkink, G. F., 1957: Ekzamen de formulo de Penman. *Neth. J. Agric. Sci.*, **5**, 290-305.
- 丸山幸夫・桃木信幸・田嶋公一, 1984: 稲の水消費量, 要水量の品種間差異, 日本作物学会紀事, **53**(別1), 78-79.
- 宮本硬一・日野義一, 1979: 気候系数による水田蒸発散量の地域性, 水温の研究, **23**, 35-43.
- 中川慎治, 1982: 蒸発散の概念とその適用性について, 筑波大学水理実験センター報告, **6**, 53-62.
- 中山敬一・中村彰宏, 1982: Priestley-Taylor モデルによる蒸発散位の推定, 農業気象, **37**, 297-302.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J., 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, **100**, 81-92.
- Pruitt, W. O. and Doorenbos, J., 1977: Empirical calibration, a requisite for evapotranspiration formulae based on daily or longer mean climatic data. (Burman, R. D. et al., Techniques for estimating irrigation water requirements. In: *Advances in Irrigation* Vol. 2, ed. D. Hillel, Academic Press, New York, 365 に引用).
- 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, 九州農芸彙報, **6**, 259-364.
- Seo, T. and Yamaguchi, N., 1968: A note on the evapotranspiration from a paddy field. *Berichte. des Ohara Inst. Okayama Univ.*, **14**, 133-144.
- Shih, S. F., Rahi, G. S., Snyder, G. H., Harrison, D. S. and Smajstrla, A. G., 1983: Rice yield, biomass, and leaf area related to evapotranspiration. *TRANSACTIONS of the ASAE*, **26**, 1458-1464.
- Stewart, J. B., 1983: A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating crop evaporation. *Agric. Meteorol.*, **30**, 111-127.
- Sugimoto, K., 1971: Relationship between evapotranspiration and dry matter production of Indica rice. *Tech. Bull. TARC*, **1**, 1-80.
- 杉本勝男, 1973: インド型と日本型水稻の蒸散量と要水量に関する研究, 第1報 蒸散と葉面積, 気象要因との関係, 熱帯農業, **16**, 260-264.
- 杉本勝男, 1975: インド型水稻の蒸発散に関する作物学的研究, 第1報 蒸散と乾物生産の推移の関係, 熱帯農業, **18**, 131-135.
- Tomar, V. S. and O'Toole, J. C., 1979: Evapotranspiration from rice fields. *IRPS*, **34**, 1-15.
- Tomar, V. S. and O'Toole, J. C., 1980A: Measurements of evapotranspiration in rice. In: *Proc. Symp. of the Agrometeorology of the Rice Crop*. WMO and IRRI, 87-93.
- Tomar, V. S. and O'Toole, J. C., 1980B: Water use in lowland rice cultivation in Asia: A review of evapotranspiration. *Agri. Water Management*, **3**, 83-106.
- Uchijima, Z., 1961: On characteristics of heat balance of water layer under paddy plant cover. *Bull. Nat. Inst. Agr. Sci.*, **A8**, 243-265.
- 矢野友久・長 智男・林 泰弘, 1977: 砂丘地における蒸発散について, 一般気象観測資料による蒸発散位の推定一, 鳥取大砂丘研報, **16**, 1-7.

Summary

The problems are whether evapotranspiration (ET) from paddy field would be affected by growth stage and by rice varieties, and whether the radiation method and Priestley-Taylor method for estimating ET would be applicable to paddy field.

ET was measured with microlysimeter (Tomar and O'Toole, 1980A) at the eight test plots (N1-N8) in which cultivar "Nipponbare" (Japonica rice) was grown under eight different cropping seasons, and at the two plots (K5 and R5) in which cultivars "Milyang 23" (Japonica-Indica cross variety) and "IR-36" (Indica rice) were grown under the ordinary cropping season (see Horie and Sakuratani, 1985, Table 1). Three stainless pans (30cm long, 20cm wide and 60cm deep) were installed in the center part of the each plot: the two with the hills of rice plant and the other without crop were used as evapotranspirometer and evaporimeter, respectively. ET and transpiration (T) from each plot were determined, respectively, by averaging the values of ET from the two pans, and

by subtracting the evaporation (E) from the ET . Meteorological data were also collected.

In each cropping season of “Nipponbare” rice, the E at the early growth stage in which the leaf area index (LAI) was small, was comparable to the ET at the maximum LAI stage (Fig. 2A). Thus, there was no appreciable difference in ET between the two stages. This also caused the noticeable increase of total E for entire growing periods in the plots of the earlier cropping seasons such as N1 and N2 in which the initial growth was delayed by lower air temperature (Table 1). The mean value of daily ET ranged between 3.5 and 4.2 mm day⁻¹ for the eight cropping seasons, averaging 4.0 mm day⁻¹.

The ratio of ET to reference ET (ETR) calculated from modified Penman method (Doorenbos and Pruitt, 1977) was fairly constant throughout the main growth period except mid-September to October and averaged 1.05 for all the cropping season (Fig. 2B). The overestimate in the ET in the fall seemed to be owing to the enrichment of ET by advective energy and to the underestimate in the ETR . On the other hand, the ET/ETR for “Milyang 23” and “IR-36” tended to increase slightly around the heading stage (Fig. 4). These varieties also tended to show higher T than “Nipponbare” under the LAI above 2.0 and high radiation conditions (Fig. 5). These results suggested that crop factor such as canopy resistance is somewhat important in controlling ET of Indica type rice, whereas not so important for Japonica rice.

The variation of the daily value of a in the radiation method (Eq. 7) was relatively small throughout the main growth period (Fig. 6). The linear regression technique for all the cropping seasons yielded $a=0.88$, and five-day ET was estimated with high correlation coefficient ($r=0.912$).

The daily value of α in Priestley-Taylor method (Eq. 8) greatly fluctuated over the growing season (Fig. 6). Apparently, this variation of α was attributed to that of daily net radiation caused by long wave radiation exchange at nighttime. Priestley-Taylor method seemed to be less effective in estimating ET of paddy field in Japan when daily values of net radiation are used.