

水稻水利用効率の地域・年度間比較

第1報 気象および植物体要因を組み入れた群落蒸散量の推定

足立文彦・小葉田 亨・有本雅幸・今木 正

(島根大学農学部)

1994年12月20日受理

要 旨 : 圃場条件下での蒸散量の連続測定は極めて困難である。そこで、気象要因と定期的に測定したいいくつかの植物体側要因の測定値を用いて、水稻の蒸散量を正確に予測することを試みた。水稻品種日本晴を水田栽培し、イネの全生育期間について小型ライシメーターを用いて蒸散量 (T)、蒸発散量 ($E_T = T + E$, E : 水面蒸発量) を測定した。同時に、気象要因から算出する Penman 法、さらに群落構造を加味した Van Bavel 法、気象要因、群落構造、気孔伝導度 (g_s) を加味した Penman-Monteith 法を用いて推定蒸発散量 (E_c) を計算し、 E_T (実測値) と比較した。その結果、3 種の方法の中で Penman-Monteith 法が実測値とのずれが一番少なかった。ただし、この方法には植被抵抗 (r_c) の計算に、上位葉の g_s 測定値のみを用いるという問題があった。そのため、さらに Penman-Monteith 法の r_c を直達日射受光率によって重みづけて適用する方法を試みた。この方法で E_T を求めると、実測値との適合性がさらに高まった。さらに、 T は E_T と葉面積指数 (LAI) を変数とする式によって精度よく推定できた。その結果、Penman-Monteith 法を用いた上述の修正 E_c 値から推定 E を除いて求めた T の推定値は、実測値と極めてよく一致した。

以上から、イネの全生育期間にわたる群落蒸散量は連続して蒸散量を実測しなくとも、Penman-Monteith 法に、直達日射受光率から求めた修正 r_c と LAI で推定した T/E_T 比を組み合わせることで、十分精度よく推定できることが明らかとなった。

キーワード : イネ, 気孔伝導度, 植被抵抗, 蒸散量, 蒸発散量, Penman-Monteith 法, 葉面積指数.

Comparison of Water Use Efficiency of Paddy Rice (*Oryza sativa* L.) among Locations and Interannual Variation in Humid Areas

1. Reliability of estimated canopy transpiration rate from meteorological and physiological data of the crop : Fumihiko ADACHI, Tohru KOBATA, Masayuki ARIMOTO and Tadashi IMAKI (Faculty of Agriculture, Shimane University, Matsue 690, Japan)

Abstract : The transpiration rate is affected not only by meteorological but also by physiological and structural factors of the crop. Our objectives were to develop a method of estimating the transpiration rate (T) of paddy rice (*Oryza sativa* L.) using meteorological and physical data of the crop without continuous direct measurement of T in the field. We measured following parameters at the Experimental Farm of Shimane University, Matsue : net radiation, relative humidity, air temperature and wind speed during the whole growing season, diurnal changes of stomatal conductance (g_s) of fully expanded leaves near the canopy surface on several dominant growth stages, and plant height, leaf area index (LAI) of paddy field rice at 2-week intervals. Evapotranspiration (E_T) and the evaporation rate from soil surface (E) were measured with a microlysimeter during the rice planting season. When three methods to calculate estimated evapotranspiration rate (E_c) (the Penman, Van Bavel and Penman-Monteith methods) were applied, the fitness of regression between E_c from the Penman-Monteith method and E_T was highest. The fitness was improved further when canopy resistance was corrected by the ratio of irradiated to total leaf area calculated empirically from LAI . T was good assumed from the product of E_T and T/E_T which is calculated from the empirical equation¹⁴⁾ as a function of LAI . We concluded that the transpiration rate of paddy rice can be more strictly estimated from E_c by the Penman-Monteith method with minor modification that canopy resistance is corrected by illuminated leaf area and soil evaporation is assumed by LAI . This method is available for comparison of transpiration rate where continuous measurements of transpiration rate for long intervals is very difficult.

Key words : Canopy resistance, Evapotranspiration, Leaf area index, Penman-Monteith method, Rice, Stomatal conductance, Transpiration.

人口、産業拡大にともなう水需要の増加、水質の悪化、農地の拡大などにより、農業生産においても水利用の効率化が求められている¹⁵⁾。水消費と作物の生産量とを直接結び付けるものとして水利用効率が挙げられる¹⁾。水利用効率は灌がい計画の他に、物質生産との関係を利用した生産モデルにも応用され

ている²¹⁾。しかし、作物体からの水消費の長期にわたる測定は非常に困難であり、このことが圃場条件下における水利用と物質生産との関係を探る研究が立ち遅れた背景として指摘されている¹⁸⁾。

従来、群落からの蒸散量を測定するには大型ライシメーター法が用いられるが、この方法は特殊で大

規模な装置を必要とし、移動性が無いために限られた地点のみの測定値しか得られない。この様な条件の制約のために Class-A パン蒸発計に代表される蒸発計値あるいは気象要因から計算される可能蒸発散量を蒸散量の代用に用いることが多い。しかし、これらの方法では経験的な係数によって測定値から蒸散量を推定しており、この経験的な係数の変化要因は未知であるため、実際の蒸散量の推定に用いるには多くの問題がある¹¹⁾。

一方、圃場において植物体の茎部にセンサーを装着することで蒸散量を連続的に測定できる茎熱収支法は¹³⁾、木本植物での測定においては良好な結果をもたらすが、イネなどの禾本科植物にはセンサーを葉鞘に挟むなど技術上困難な問題がある。このような理由から、特別な設備や連続測定の必要がない、作物の生育、生理状態をよく反映した蒸散速度の推定が正確な水利用を考える上で不可欠である。

そこで本報告では、気象要因を用いて蒸発散量を推定する方法に群落条件や気孔開閉の要素を加味して水稻の群落蒸散量を推定し、マイクロライシメーターによる実測値と比較することで、どの様な方法が最も蒸散量推定に適しているかを明らかにしようとした。

材料と方法

1. 栽培概要

1992年に松江市にある島根大学農学部の水田(北緯 35°27'3", 東経 133°42'9", 標高 17 m 以下)で実験を行った。供試品種は日本晴を用いた。周囲を水稻圃場で囲まれた 8.2×22.0 m の水田を 3 等分して 3 反復とした。

施肥は、基肥に N を 4 g m⁻²、P₂O₅、K₂O を 13 g m⁻²、追肥として N を分けつ期、幼穂形成期、穂ぞろい期に 3 g m⁻² 与えた。移植は一株 2 本植えて 5 月 13 日に行った。栽植密度は 26.7 株 m⁻² で移植した。なお収量は 628 g m⁻² でこの圃場での平年的な生育をしていたとみなされた。

2. 群落蒸散量 (T) の測定

群落蒸散量 (T, mm) は蒸発散量 (E_T, mm) から水面蒸発量 (E, mm) を差し引き求めることができる。そこで、水稻群落からの約 5 日毎の E_T と E を求め T を測定した。

E_T は水田の各反復内に小型ライシメーター (幅 425×長さ 615×深さ 360 mm のポリプロピレン製コンテナ) を群落内部 3 m に一つずつ設置し、圃場

の栽植様式に従ってコンテナ内に 6 株を植え付けた。E_T の測定にはコンテナ側面にアクリル製定規 (長さ 350 mm) を水平面に対して 10° の角度で固定し、測定期間の水面の移動距離を測定し水深に換算した。なお、ライシメーターの施肥は水田の施肥量を栽植密度で割り、6 株当たり相当量の水田と同時期に与えた。また、E_T の測定と併行させて水面(土壌面)からの E の測定を行った。各反復の群落下の土壌面に小型水面蒸発計 (幅 100×長さ 200×深さ 100 mm のアクリル製容器) を一つずつ配置し、E_T 測定期間の E を小型電子秤 (Mettler 社製, PE-11) で 0.1 g の精度まで計測し重量法により算出した。

3. 蒸発散量の推定

実験圃場に隣接した地点で、気温、相対湿度 (神栄製湿度センサー RHD-J122 型)、風速 (いすゞ製作所製三杯風力計)、日射量 (英弘精機製ネオ日射計 MS-42 型)、水田上 1.5 m における純放射量 (英弘精機製放射収支計 CN-11 型) を連続測定し記録した。また、各生育時期の群落の LAI を把握するために、各反復内から平均的な 6 個体を抜き取り、林電工製自動葉面積計 AAM-7 型により葉面積を測定した。これらの測定値から Penman 法^{2,12)}、Van Bavel 法²²⁾、Penman-Monteith 法¹⁰⁾ を用いて推定蒸発散量 (E_c, mm) を算出した。

(1) Penman 法の計算

$$E_c = (\epsilon R_n + SD_p \cdot f(u)) / (\epsilon + 1) \dots\dots\dots (1)$$

ここで ϵ は気温での飽和水蒸気圧曲線の勾配と乾湿計定数の比、 R_n は水深換算した純放射量 (mm)、 SD_p は飽差 (g m⁻³) を水蒸気圧 (hPa) に換算した値、そして $f(u)$ は風速の関数であり、次式により求めた²⁾。

$$f(u) = 0.27(1 + U_2/100)$$

ここで U_2 は、地上 2 m での風速 (kmd⁻¹) である。

(2) Van Bavel 法の計算

$$E_c = (\epsilon R_n + SD/r_a) / (\epsilon + 1) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 SD は飽差 (g m⁻³)、 r_a は葉面境界層抵抗 (dkm⁻¹) で次式により求めた。

$$r_a = [\ln(z-d)/z_0]^2 / 0.168U \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 U は風速計地上高 (z , m) での風速 (kmd⁻¹)、 d は零面修正量 (m)、 z_0 は粗度長 (m) である。また、イネにおける空気力学的パラメーター (d , z_0) を植物群落高 (H , cm) を用いて以下の式で計算した²⁰⁾。

$$d = 1.04 H^{0.92} / 100$$

$$z_0 = 0.025 H^{1.32} / 100$$

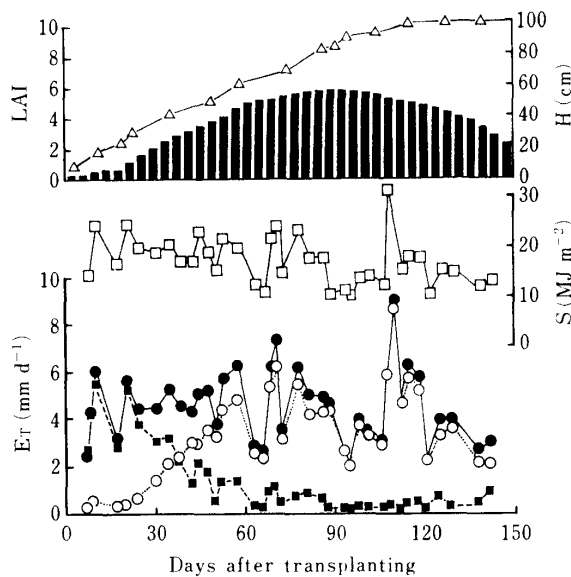


Fig. 1. Seasonal changes of evapotranspiration (E_T , ●), soil surface evaporation (E , ■) and transpiration (T , ○) with a microlysimeter in the Experimental Farm of Shimane University at 1992 rice (cv. Nipponbare) growing season. Solar radiation (S , □), plant height (H , △) and leaf area index (LAI , Black bar) during the season are also indicated.

(3) Penman-Monteith 法の計算

$$E_c = (\epsilon R_n + SD/r_a) / (\epsilon + 1 + r_c/r_a) \dots \dots \dots (4)$$

ここでは、 r_c は植被抵抗 (dkm^{-1}) で次式によって求めた¹⁶⁾。

$$r_c = r_L / LAI$$

r_L は葉抵抗であり、次の式で表される。

$$r_L = r_s / 2$$

$$r_s = 1 / g_s$$

ここで、 r_s は気孔抵抗、 g_s は気孔伝導度 (kmd^{-1}) である。なお、 g_s は全生育期間を通じて各生育時期の晴れた日の日変化を約5回、十分に受光している最上位完全展開葉について定常型ポロメーター (Li-Cor 社製, LI-1600) を用いて各反復につき3回測定し日平均値を求めた。

4. 直達日射受光率

作物群落の葉面が直接太陽にさらされている日向部の比率を求めた。作物の葉が放射の完全吸収体であるとしたときの直達日射は、群落上面から下方に向けての積算葉面積指数 (F) の関数として次のように表すことができる⁹⁾。

$$I_d(F) = I_{d0} \exp(-k_d F) \dots \dots \dots (5)$$

ここで $I_d(F)$ は群落上面からの積算葉面積指数が F の面の直達日射強度、 I_{d0} は群落上の日射強度、 k_d

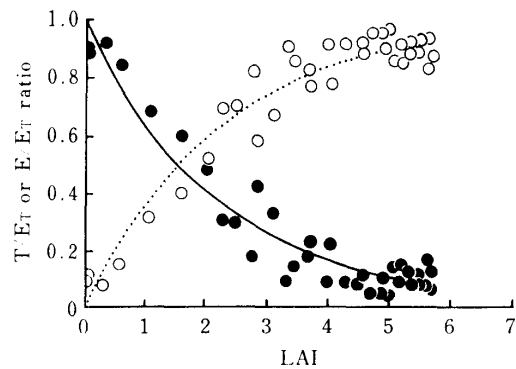


Fig. 2. Relationship between E/E_T or T/E_T and LAI during the whole rice growing season under the paddy field condition.

$$\bullet : E/E_T = \exp(-0.45LAI) \quad r^2 = 0.972^{***}$$

$$\circ : T/E_T = 1 - \exp(-0.45LAI) \quad r^2 = 0.972^{***}$$

The regression curves were fitted by the Simplex method.

***Statistically significant at 0.1% level.

は直達日射に対する吸光係数である。この式から、積算葉面積指数が F の深さの葉層の直達日射に照射されている葉面積の割合 (R) は次の式で与えられる。

$$R = \exp(-k_d F)$$

k_d は作物が方位に関してランダムに分布する場合は葉身傾斜角と太陽高度に依存する変数として扱うことができるので、Isobe⁶⁾ の計算値から求めた。全葉層の直達日射受光率 (R_d) は、前式を LAI まで積分し LAI で除した加重平均値であり以下の様に表される。

$$R_d = \int_0^{LAI} \exp(-k_d \cdot F) dF / LAI \dots \dots \dots (6)$$

結 果

1. E_T , E , T の生育時期に伴う変化

生育にともなう E_T , E , T の経日変化を示した (第1図)。 E_T はおもに日射量 (S) の変化にともなって変化し、生育期間の日平均蒸発散量は 4.24 mmd^{-1} であった。 E は LAI の小さい生育初期には気象要因によって E_T と同じく大きく変動しているが、生育が進み植被に覆われるにつれて値が減少し、幼穂形成期以降の植被発達後には、 E は E_T の約5%程度になった。 T は、 E とは反対に LAI が増大を始める移植30日後頃から増加し、 LAI が4を超えると T の E_T に占める割合は95%程度となった。

植被の発達と E_T , E , T との関係を知るために、 E/E_T 比と LAI との関係求めた (第2図)。そ

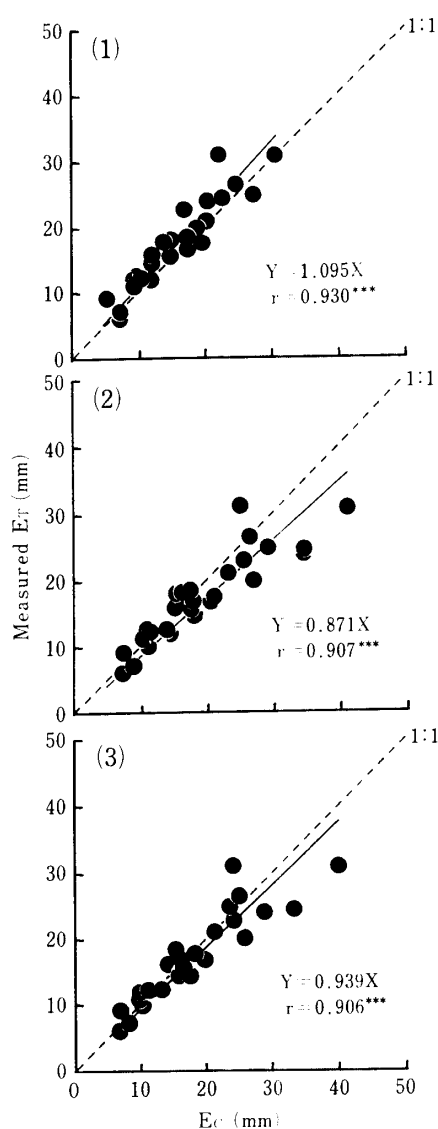


Fig. 3. Relationships between measured E_T with a microlysimeter and (1) E_c calculated from the Penman, (2) the Van Bavel or (3) the Penman-Monteith method. Solid line and broken line indicate approximation and 1:1 line, respectively.

の結果、この関係は従来の結果¹⁴⁾と同じく、次の指数曲線で極めてよく近似できた ($r^2=0.972$, 0.1%水準で有意)。

$$E/E_T = \exp(-k \cdot \text{LAI}) \dots \dots \dots (7)$$

さらに $T = E_T - E$ であるから、

$$T/E_T = (1 - \exp(-k \cdot \text{LAI})) \dots \dots \dots (8)$$

すなわち、 E_T に占める E の割合は LAI の増大によって指数関数的に低下し、その逆に T の占める割合は増加した。なお、 k は群落吸光係数に相当する。

2. 実蒸発散量と推定蒸発散量との比較

Penman 法, Van Bavel 法, Penman-Monteith 法

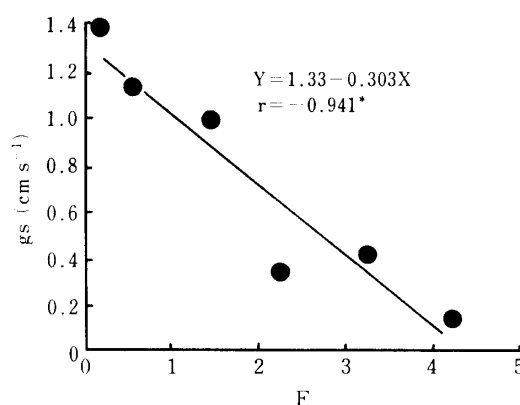


Fig. 4. Relationship between stomatal conductance and accumulated LAI on each depth of a rice canopy at the mid-grain filling stage of rice cv. Nipponbare in 1990. *Significant at 5% level of probability.

による E_c と実測した E_T との関係を全生育期間について求めた (第3図)。その結果、全ての場合で E_T は推定蒸発散量を変数とする一次直線によく近似できた ($r^2=0.823 \sim 0.865$ いずれも相関は 0.1%水準で有意)。ただし、Penman 法の推定値では相関係数は最も高いものの、実測した E_T を全体的に下回っていた。また、Van Bavel 法の推定値は全体的に実測を上回っていた。Penman-Monteith 法は他の方法に比較すると、相関係数では Penman 法に劣るものの、1:1 の直線上に最も近く近似した。

本研究では、Penman-Monteith 法の計算式 (4) に含まれる植被抵抗 (r_c) を、上位葉の個葉の測定値を全群落の葉身に拡大して推定した。従って、この r_c は群落全体の平均的な値を表していないおそれがある。そこで、上層から下層への群落内部の gs の違いを簡単に表す方法を検討し、それに基づいて r_c を再評価した。1990 年に同圃場で慣行栽培した日本晴を用いて、登熟期 (8月21日) に定常型ポロメーターにより群落高の約 10 cm おきに gs を測定し、あわせて層別刈り取り法により各葉層毎の葉面積を測定した。そして、群落上部からの F とその葉層の gs との関係を求めた (第4図)。その結果、 gs は積算葉面積指数の増加にともなって直線的に低下した ($r = -0.944$, 相関は 5%水準で有意)。このことは群落内部の gs がおもに各葉層のおかれた日射環境の変化に応じて低下していることを意味する。すなわち、葉層毎の gs 値は F の関数として表すことができる。各層の gs は次式で表すことができた。

$$gs = gs_u \times R \dots \dots \dots (9)$$

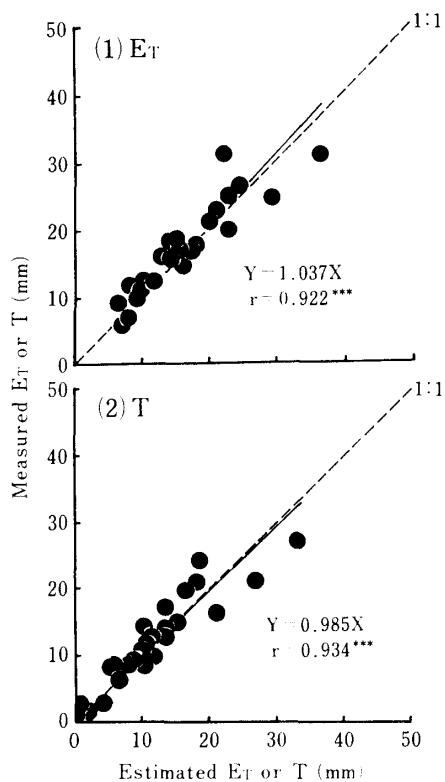


Fig. 5. Relationships between (1) measured E_T and estimated E_T from the Penman-Monteith method by using canopy resistance corrected by illuminated leaf area, (2) measured T and estimated T . The corrected canopy resistance was that leaf resistance at the top of the canopy is expanded to whole leaves by using a factor of ratio of irradiated whole LAI. T was assumed to multiply E_T by T/E_T which is assumed from the empirical equation¹⁴⁾ calculated from LAI in Fig. 2. See text for detail of the equations.

ここで、 gs_u は群落最上部の葉層の gs である。群落の平均気孔伝導度 (GS) は各葉層の gs をその層の LAI で重みづけ、全葉層まで加重平均したものとみなされる。従って、式 (6) と式 (9) から、 GS は R_d に最上層の gs を乗じて算出できた (式 (10))。

$$GS = gs_u \times R_d \dots \dots \dots (10)$$

この GS を gs に代えて E_T を推定し実測値と比較した (第5図)。ただし、計算式の k_d 値はイネの生育期間の日平均値を用いて定数として扱った。その結果、この推定値は 1:1 の直線に極めてよく近似し E_T を精度よく推定した ($r^2=0.850$, 相関は 0.1% 水準で有意)。

3. 推定蒸発散量を用いた群落蒸散量の推定

GS を用いた Penman-Monteith 法の推定蒸発散量を式 (8) の E_T の項に代入して T を推定した。そ

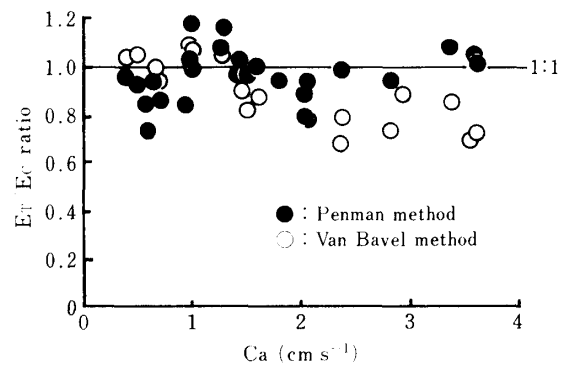


Fig. 6. Relationship between E_T/E_c calculated from the Penman or the Van Bavel method and leaf layer conductance during 1992 rice growing season.

して、この推定値と実測 T とを比較した (第5図)。その結果、推定値は 1:1 の直線上に極めて良く近似した ($r^2=0.872$, 相関は 0.1% 水準で有意)。

考 察

水田では、Penman 法による計算値は実蒸発散と高い相関があることが明らかにされている⁷⁾。しかし、Penman 法による E_c は実蒸発散 (E_T) を下回る傾向があった。この一つの原因としては、Penman 法では風速と飽差を含む項に経験的定数を用いているために、群落表面の空気力学的抵抗である r_a の水稻群落の発達にともなう変化を考慮していないためであることが推定された。そこで、 E_T を E_c で除して実蒸発散と計算値とのずれの程度と、草高から求めた r_a の逆数である葉面境界層伝導度 (C_a) との関係を見た (第6図)。その結果、Penman 法では C_a が増加すると、 E_T/E_c 比は一度低下し再びやや増加する傾向にあった。一方、Van Bavel 法による比は、 C_a の増加につれて低下し、 C_a がおよそ 2 を越えるとその低下程度は著しくなった。このことから、Penman 法については群落の発達にともなう空気力学的抵抗の変化が考慮されないために、また、Van Bavel 法は群落構造の変化を考慮しているものの、作物要因である植被抵抗の影響を加味していないために実測値との差が生じたものと示唆された。ただし、蒸散量が極めて大きい時には、植被抵抗を加味した Penman-Monteith 法でも実測値とのずれが大きい場合があった。このことは、Van Bavel 法の比の変化にもみられるように、 C_a が 2 を越えるような、すなわち、比較的風速の大きな条件下での r_a 計算値と実際との不適合によると示唆された。一定以

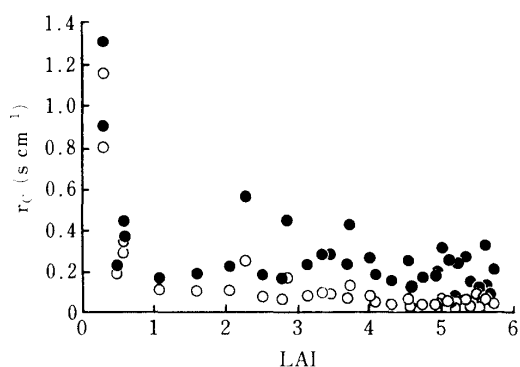


Fig. 7. Relationship between canopy resistance (r_c) and LAI during whole rice growing season. Open circles show the canopy resistance calculated from the measurements of stomatal conductance of rice leaves near the canopy surface, and closed circles show corrected canopy resistance as which leaf resistance near the canopy surface is expanded to whole leaves by using a factor of ratio of irradiated to whole LAI.

上の強風下では空気力学的パラメーターの補正が必要となるものと考えられる。

一方、Penman-Monteith法はVan Bavel法に植被の気孔抵抗の影響を加味して実際の蒸発散を推定している。言い換えれば、式(4)の分母に含まれる植被抵抗と葉面境界層抵抗の比(r_c/r_a)の r_c が0の時には、その推定値はVan Bavel値に等しい。そして、実際の蒸発散はVan Bavel値よりも常に小さく、その低下の程度は主として r_c と r_a の相対的な大きさによって決定される¹⁷⁾。 r_c は気孔密度と気孔の開き具合により支配される気孔抵抗を、葉の両面に換算した値をLAIで除することで推定できるとされる。Szeicz et al.¹⁶⁾は、比較的LAIの小さなソルガムにおいて、拡散型ポロメーターの測定値の平均をLAIで補正すると、Penman-Monteith法から求めた平均的な群落抵抗とよく一致したと報告している。本研究でも、定常型ポロメーターの測定値をLAIで除して r_c を求め、Penman-Monteith法で E_T を推定した。そして実測値と比較すると、水稻においても他の推定法に比べてPenman-Monteith法は E_T を偏りなく推定していると見なされた(第3図)。ただLAIが一定以上に大きくなると r_c はあまり変化せず(第7図)、推定値に及ぼす影響は小さかった。

ところで、Monteith¹⁰⁾の一層モデルでは、植被層を一枚の大きな葉とみなして考えている。もし葉全

体が同一の気孔抵抗を持つならば、その抵抗値を直接LAIで割ることで植被全体の r_c を推定しうであろう。しかし、実際の作物群落では生育ステージによって群落構造は異なり、葉層毎に葉身の受光葉面積や気孔反応性は変化すると予測される。その結果、当然、葉層によって気孔抵抗も異なるであろう⁴⁾。ダイズでは群落上層の g_s が個体平均値よりもかなり大きいために、一部の葉の測定値を用いた植被伝導度の推定には誤差があることが指摘されている⁹⁾。従って、植被全体の r_c を推定するには、葉層毎の g_s とLAIの測定が必要となる。しかし、 g_s の群落内での連続的な実測は極めて困難である。そこで本研究では、群落構造による受光状態の変化を考慮することにより群落の平均的な r_c 算出を試みた。LAIから群落の R_d をもとめ、これに g_s を乗じた値を用いて r_c を算出した(式(10))。こうして求めた r_c を用いたPenman-Monteith法による E_T 測定値を実測値と比較したところ、 r_c をポロメーター実測値からそのまま計算して求めた E_T 測定値よりも、この補正測定値はより高い相関をもち、実測値をよく測定していた(第5図)。このことから、 R_d を用いた植被平均 r_c 推定の有効性が示唆され、この手法とPenman-Monteith法との組み合わせにより、水田条件下でのイネの蒸発散量が生理要因を加味して把握できるものと考えられた。

圃場条件下での蒸散量の測定は困難なため、蒸発散量を蒸散量の代用とすることが多い¹⁵⁾。しかし、植被が地表面を覆う以前や蒸発面の状態により、この仮定がそのまま蒸散に適用できるかは疑問視されている。そのため、いくつかの半経験的モデルが畑地での蒸散と土壌面蒸発の分離評価に用いられている^{8,19)}。蒸発散に占める蒸散の割合は本研究でも(8)式でよく表された¹⁴⁾。この関係を用いて蒸散量を推定し実測値と比較したところ、測定値は実測値を精度よく推定していた(第5図)。このことから、(8)式は少ない測定項目で容易にイネの蒸発散量に占める蒸散量を推定できる有効な方法であることが確認された。

一方、Ham et al.³⁾は、ワタ畑での植被と土壌面の熱収支を実測し、LAIが2以上の時ですら、灌がい後には蒸発散量の50%は地面蒸発によることを明らかにし、(8)式のような日射の分配のみで蒸発散から蒸散と土壌面蒸発を分離することは不適切であると結論している。ただし、この研究は畑地で行われており、水田のように常に周辺の土壌面が湿潤

で、移流の影響が少ない条件とは異なる。また、水稻では移植後 50 日程度で LAI は 5~6 に達し、地表面を完全に覆う。これらから、式 (8) は水稻群落のように広い面積で灌がい栽培されるような、土壌水分の豊富な作物圃場では問題なく適用することが可能であるが、畑地などの土壌水分が不均一になりやすい条件下での推定には、LAI 以外に土壌水分を考慮したサブモデルを組み込むなどの配慮が必要となると考えられる。

以上から、圃場条件下の水稻の群落蒸発散量は、Penman-Monteith 法を用いることでほぼ正確に推定できること、さらに、 r_c の計算には g_s を R_a によって補正することで適合性がさらに高まることがわかった。また、蒸散量の推定には (8) 式の利用が妥当であると示唆され、Penman-Monteith 法による蒸発散量推定値との組み合わせにより、水稻群落の水消費の正確な把握に使用できるものと考えられる。本モデルは実際上ライシメーター法などの設置、測定ができないような一般的栽培条件下における水稻の水利用を明らかにするための有力なひとつの手法として利用できるとみなせた。ひきつづき、本モデルを用いて水稻品種、栽培条件、地域などの要因が水稻の水利用効率に与える影響を明らかにしたい。

謝辞: 島根県立女子短期大学の勝部朋之氏には曲線のあてはめについて御助言をいただいた。近畿大学農学部の高見晋一教授には論文をとりまとめるにあたり御助言と御校閲を賜った。さらに測定、調査に当たって島根大学農学部作物学研究室の皆さんに多大の協力をしていただいた。以上の方々に感謝する。

引用文献

- de Wit, C.T. 1958. Transpiration and crop yields. Institute of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage. Wageningen, The Netherlands. 1—88.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. FAO, Rome. 24: 1—179.
- Ham, J.M., J.L. Heilman and R.J. Lascano 1991. Soil and canopy energy balances of a row crop at partial cover. *Agron. J.* 83: 744—752.
- Inoue, K., T. Sakuratani and Z. Uchijima 1984. Stomatal resistance of rice leaves as influenced by radiation intensity and air humidity. *J. Agr. Met.* 40: 235—242.
- 井上吉雄・森永慎介・芝山道郎 1993. 土壌水分変動下における作物個体群の水利用の動態とその非破壊計測. 第2報 気孔, 植被コンダクタンスの関係および水利用効率について. 日作紀 62 (別1): 194—195.
- Isobe, S. 1969. Theory of the light distribution and photosynthesis in canopies of randomly dispersed foliage area. *Bull. Nat. Inst. Agr. Sci., Ser. A. No. 16*: 1—25.
- 蒸発散研究グループ 1967. 水田の蒸発散. 農業気象 22: 13—20.
- Kanemasu, E.T., L.R. Stone and W.L. Powers 1976. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. *Agron. J.* 68: 569—572.
- Monsi, M. und T. Saeki 1953. Über den Licht-factor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.* 15: 22—52.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and Environment. *Symp. Soc. Expt. Biol.* 19: 205—234.
- 大場和彦 1988. 南九州におけるサツマイモ畑の蒸発散. 農業気象 44: 91—99.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London, A*, 193: 120—146.
- Sakuratani, T. 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J. Agr. Met.* 37: 9—17.
- 1987. Studies on evapotranspiration from crops (2) Separate estimation on transpiration and evaporation from a soybean field without water shortage. *J. Agr. Met.* 42: 309—317.
- 桜谷哲夫 1987. 畑地の蒸発散と生産力. 農及園 62: 1127—1132.
- Szeicz, G., C.H.M. Van Bavel and S. Takami 1973. Stomatal factor in the water use and dry matter production by sorghum. *Agric. Meteorol.* 12: 361—389.
- 高見晋一 1977. 植物—水関係の環境的側面. SPAC の水の流れに対する数値モデル的アプローチ. 土壤物理 36: 27—33.
- 1992. 生態学的にみた水分ストレスと植物生産. 地球気候変化と植物生産. 平成3年度気象環境研究会, 農環技研. 64—74.
- Tannar, C.B. and E.A. Jury 1976. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agron. J.* 68: 230—243.
- Uchijima, Z. 1976. Microclimate of the rice crop. *Climate and Rice. IRRI*. 115—140.
- Uchijima, Z. and H. Seino 1985. Agronomic evaluation of net primary productivity of natural vegetations. *J. Agr. Met.* 40: 343—352.
- Van Bavel, C.H.M. 1966. Potential evaporation: The combination concept and its experiment. *Water Resour. Res.* 2: 455—467.