農業気象 (*J. Agr. Met.*) 44 (2): 91–99, 1988

南九州におけるサツマイモ畑の蒸発散

大 場 和 彦

(九州農業試験場畑作部)

Evapotranspiration from a Sweet Potato Field
in the Southern Part of Kyushu

Kazuhiko OHBA

(Upland Farming Div., Kyushu Natl. Agric. Exp. Stn.,)
Yokoichi, Miyakonojo 885, Japan

1. はじめに

近年、人口の都市集中化現象や生活の質的变化に伴う生活用水や工業用水の増加によって、農業用水の確保に困難が生じ始めている。すでに、水を必要だけ消費する時代は去り、農業用水の安定的な確保によって作物の生産を安定、向上させる時代に入った。この問題解決を目的として、耕地の水・熱収支と作物生産との関係を追求める研究が外国を中心に活発になされている（たとえば、Doorenbos and Kassam, 1979; Hanks and Rasmussen, 1982; Ritchie, 1983; Vaux and Pruitt, 1983）。

水の合理的利用を図るための基礎として、農耕地の蒸発散量を正確に評価することは非常に重要である。しかし、わが国での従来の蒸発散の研究は主として水田でなされたもので (Iwakiri, 1965; 蒸発散研究グループ, 1967; Seo and Yamaguchi, 1968; 桜谷・堀江, 1985), 畑地での長期間の測定例は非常に少ない。このため、畑地における季節的な水の動態解明にはまだ至っていない。

そこで本研究では、南九州の代表的畑作物であるサツマイモを対象として、畑地における熱収支並びに蒸発散の特徴を明らかにするとともに、既存の実蒸発散推定式のサツマイモ畑への適用性について研究した。

2. 実験方法

2.1 圃場の概況

観測は、宮崎県都城市にある九州農業試験場畑作部圃場 (N31° 45', E131° 01') で行った。当圃場は二次シラス層で形成された月野原台地 (約 480 ha) の西側端に位置し、ほぼ平坦な畑地となっている。耕土層は粗粒質火山灰土壌 (クロボク土) である。

観測に供したサツマイモ畑は南北 107m, 東西 65m の広さを有し、その周囲にはサイレージ用トウモロコシ (収穫: 7月下旬), サトイモ, 青刈ダイズ, ラッカセイが栽培されていた。1984年6月1日～6日にかけて、サツマイモ (品種: コガネセンガン) の苗を畦幅 75 cm, 株間 35 cm で栽植した。施肥栽培管理はこの地区の施肥防除基準に従った。生育調査は草丈, 葉面積, 乾物重について、1週間ごとに行った。

2.2 蒸発散の測定方法

熱収支ボーエン比法による蒸発散の測定は、サツマイモ畑のほぼ中央部で行った。蒸発散量は次式から求めた。

$$ET = \frac{R_n - G}{L(1 + \beta)}$$

ここで、 ET は蒸発散量で単位 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ となるが慣習的に mm を用いた。 R_n は純放射量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), G は地中伝導熱量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), β はボーエン比, L は蒸発潜熱 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) である。ボーエン比は、植被上の 10 cm と 60 cm の 2 高度における乾球温度差と湿球温度差並びに中間高度での乾球・湿球温度から求めた。これらの測定には、自作の熱電対通風乾湿計を用いた。純放射量は、放射収

支計(EKO, CN11型)を植被上1.5mの高さに設置して測定した。地中伝導熱量は、直列に接続した3本の熱流素子(EKO, CN9L型)を畦間と株間の地表面下1cmに10cm間隔で埋設して測定した。

本実験では以下の要素についても測定を行った。全短波放射量と反射日射量の測定は2台の日射計(EKO, MS-800型)を植被上1.5mの高さにそれぞれ上向きと下向きに取りつけて行った。葉温は五対からなる熱電対を用いて測定した葉-気温差(気温は植被上35cmで測定)から求めた。

各感部からの信号を、データロガー(YHP3421A)を主体とする小型計測処理システムにより2分間隔で取り

込み、各測定要素の30分平均値から熱収支項を自動的に計算してプリントアウトするようにした(桜谷・岡田, 1984)。

土壌水分張力はテンシオメータ法により、畦間と株間のそれぞれに深さ5cmから10cm間隔で6点について求めた。大型、小型蒸発計蒸発量及び風速は気象観測露場の値を用いた。測定は栽植直後の6月9日から初霜後の10月25日まで行った。

2.3 実蒸発散推定式

簡易な実蒸発散の推定式を得るために、ここでは次の3つの方法について議論した。

① 小型蒸発計

Fig. 1. Daily march of heat balance components, albedo, Bowen ratio, leaf-air temperature difference and environmental factors on selected clear days in 1984.

Notes: α_m represents daily mean value of albedo, R_s daily solar radiation, R_n net radiation, IE latent heat flux, E evapotranspiration, S sensible heat flux and G soil heat flux.

- ② 作物係数を用いる方法
 - ③ Morton の CRAE モデル
- ②, ③による計算方法を付録に示す。

3. 結果及び考察

3.1 熱収支項の日変化

3.1.1 生育時期別の日変化

はじめに蒸発散の特徴を解明する場合の基礎となる熱収支の日変化について調べた。生育初期、最盛期及び後期における晴天日の代表的な日変化が Fig. 1 に示されている。

解析の対象とした 7 月 14 日, 8 月 10 日及び 10 月 14 日の日射量は, それぞれ 27.5 , 24.9 及び $19.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均気温はそれぞれ 27.2 , 27.1 及び 16.1°C であった。また畦間と株間の平均土壌水分張力値 (深さ 5 cm) はそれぞれ 2.08 , 2.25 及び 2.01 であり, 土壌水分に不足はみられなかった。

植被面の放射環境を表すアルベドは, 既往の晴天日における多くの測定例と同様に日中を最低とし, 太陽高度が高くなる朝夕に大きくなる明瞭な日変化を示した。葉面積が最大に達する時期における日中の最小値 0.24 は伊藤・長谷場 (1984) がサツマイモ畑で得た値とよく一致した。純放射量 (R_n) は全短波放射量 (R_s) とは高い相関関係にあり, 日量における R_n と R_s の比率は生育時期が進むにしたがって初期 (7 月 14 日) の 0.61 から最盛期 (8 月 10 日) の 0.58 , 後期 (10 月 14 日) の 0.39 に減少した。

R_n の再配分についてみると, 図示した 7 月 14 日, 8 月 10 日及び 10 月 14 日においてそれぞれ 99.8% , 108.3% , 94.7% が蒸発散として使われ, そのためボーエン比は日中を通じ 0 に近く葉温の上昇も小さかった。8 月 10 日の午後に潜熱が純放射を上回っているのは移流の影響のためと考えられる。また盛夏期である 7 月 14 日と 8 月 10 日の結果では, 作物の「ひるね」現象による蒸発散の日中低下は土壌水分が十分であったためか認められなかった。

一方, 著者 (1985) はポロメータで 20 数種の畑作物個葉の蒸散量を測定し, サツマイモ葉が最も高い値を示すことをみいだした。この結果と考え合わせるとサツマイモ畑からの蒸散は, 土壌水分が十分な条件下ではかなり活発であるといえる。

3.1.2 初霜後の日変化

Fig. 2 は初霜日 (10 月 22 日の早朝) から 1 日経過した 23 日の熱収支項の日変化である。

初霜前の熱収支の日変化 (Fig. 1C) と比較して特徴的なことは, 日中時のアルベドが 0.22 から 0.15 に減少し,

Fig. 2. Diurnal courses of Bowen ratio, albedo and heat balance components at the sweet potato field damaged by first frost on 22 October (23 October, 1984).

さらには蒸発散が約 $1/2$ に低下, 逆に顕熱伝達が約 3 倍に上昇していることである。これは, 霜害により葉の大部分が枯死し, 黒化したためである。このため日中のボーエン比も 10 月 14 日の 0.10 から 1.03 へと上昇した。このような条件下で生じている蒸発散は大部分, 地面蒸発によるものと考えられる。初霜前後の大きな熱収支の変化はリモートセンシングにおける地表面の状態判定の基礎資料として利用できると考えられる。

3.2 蒸発散の季節変化

測定期間中の天候は, 梅雨明け後の晴天少雨と 8 月中旬及び 9 月中旬の曇天によって特徴づけられた。土壌水分張力は, 少雨が継続した場合でも一時的な降雨によって $pF 2.5$ 以下に保たれた。このため測定期間中干ばつの徴候はみられなかった。気温は 9 月中旬から下旬にやや低温であった以外はほぼ平年並に経過した。このような天候のためサツマイモは順調に生育し, 葉面積指数は 8 月初旬に最大値 5.61 を示した (Fig. 3B)。

蒸発散量は生育初期から最盛期にかけて $1 \sim 8 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$, 生育後期が $1 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ の間で大きく変動している。この変動は日射量の変化によく追従している。葉面積指数の小さい生育初期においても, 晴天日には約 $7 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ の値を示しているが, これは地面が植被で完全に覆われていない時期でも, 土壌が湿潤な場合には土壌面からの蒸発が活発であることを示している。

最大の蒸発散量は 7 月初旬に得られた。この時期は梅

Fig. 3. Seasonal variations in evapotranspiration obtained by Bowen ratio heat balance method, pan evaporation and relevant weather elements during the period from 9 June to 25 October, 1984.

雨明け直後に相当し、葉面積指数が最大となる時期とは対応していない。これは十分な土壤水分に加え、日射が1年のうちで最も強い時期に相当していたこと、大気飽差が大きかったこと及び気孔抵抗が小さいことによるものと考えられる。小型並びに大型蒸発計蒸発量もこの時期にピークを示していることは、このような気象要因が蒸発を促したことを裏づけている。

9月下旬から10月中旬までの蒸発散量はピーク時の約1/2に相当する $4\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ 以下であった。これは、純放射量の減少と葉の活性の低下によるものと考えられる。

6月中旬から10月中旬までの全生育期間の平均蒸発散量は、 $3.67\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ であった。この値はIwakiri (1965) が南九州の水稻で得た値($3.71\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$)に近い。上記のサツマイモの平均値は盛夏期の最大蒸発散量の約1/2に過ぎず、平均値のみからサツマイモ畑の蒸発散量の多少を論ずることは危険である。そこで、生育活動が活発な6月から8月について蒸発散量を1mm幅の階層に分け、各階層ごとの出現率をみた。その結果がFig. 4 (A) に示されている。図の曲線は0~9mmを100とした出現率の積算値である。本結果では、2mmから6mmまではほとんど様な出現率の分布が得られた。また5mm以上の蒸発散量の出現率は44%となっている。

つぎに、各階層の蒸発散強度と日射強度との関係を明らかにするため、日射量を $5\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ごとの階層に分け、各階層での蒸発散の出現率を調べた。生育相の違いはあるが、Fig. 4 (B) に示すように日射量が増大するにつれて、蒸発散量も大きい方へと分布の移動するのがみられる。 $25 < Q \leq 30\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ で1日中快晴とみられる日は $7\sim 8\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ の出現率が最大を占め、 $7\sim 9\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ の出現率は72%に達する。この値は純放射を5~19%越えるものであり、日中の気温上昇と合わせ考えると移流の影響も無視できないことがわかる。

日射量が $20 < Q \leq 25\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ で晴天日の場合 $5\sim 6\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ の蒸発散量の出現率が42%と高い。 $6\sim 7\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ の出現率27%を加えると69%となり、普通の晴天日には約70%の確率で $5\sim 7\text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ の蒸発散量が生じているといえよう。

各月の蒸発散量は6月(ただし、15日間)が 66.5 mm 、7月 155.7 mm 、8月 131.1 mm 、9月 89.1 mm 、10月(25日間) 60.7 mm で、総量は 503.1 mm であった。7、8、9月の各値のなかでは8月、9月が種田(1957)のライシメータで得た値よりかなり小さかった。この違いは、畑地とライシメータの環境条件の差に起因しているように思われる。

3.3 実蒸発散の推定法の検討

わが国では従来から灌水基準策定のため、小型蒸発計蒸発量に蒸発散比を乗じて作物ごとの実蒸発散量を求める方法が広く採用されてきた(農林水産省構造改善局、

Fig. 4. Frequency distributions of daily evapotranspiration for period from 9 June to 31 August (A), and for each range of solar radiation (Q) intensity (B).

Note: The curve in (A) represents cumulative frequency distribution.

1982)。しかし、この方法では基準となる小型蒸発計蒸発量が、蒸発計の置かれている周囲の環境によって影響されるという欠点が指摘されていた。そこでこの方法を含めた 2～3 の蒸発散推定法の適用性について検討した。

3.3.1 蒸発散比

蒸発散比(f)を露場の小型蒸発計蒸発量(E)とサツマイモ畑の蒸発散日量(ET)を用いて次式から算出した。

$$f = ET \cdot E^{-1}$$

毎日の f の値が Fig. 5 (A) に示されている。ただし、多量の降水によって蒸発計の測定が不能になった日は除外してある。 f は生育初期(6・7月)の平均値の約 1.2 から生育後期(9・10月)の平均値の約 0.8 と季節的に減少する傾向が認められた。測定開始から初霜までの全生育期間の f の平均値は 0.93 であり、変動係数は 31.9% であった。このような大きな変動は、上述のように小型蒸発計周囲の植被条件や微気象条件によって小型蒸発計蒸発量が影響を受けたことによるものである。小型蒸発計蒸発量に基づいて蒸発散量を精度よく推定するには小型蒸発計蒸発量の補正法の確立が必要のように思われる。Doorenbos and Pruitt (1977) は大型蒸発計蒸発量を周囲の環境条件によって補正する方法を提出している。

3.3.2 作物係数

上述と似た方法として、基準蒸発散にある係数を乗じて実蒸発散を求める方法が世界的に採用されている。この係数を作物係数(K_C)という。しかし、わが国では作物係数の値はほとんど知られていない。

Fig. 5. Seasonal variations of evapotranspiration ratio (f) based on small pan (A), and crop coefficient (K_C) calculated from modified Penman model (B) and from radiation model (C).

Note: $\bar{f}$ and $\bar{K}_C$ represent respectively mean value of f and K_C for the periods from 9 June to 21 October, and CV refers to the coefficient of variation.

基準蒸発散とは、水分欠損がなく、完全に被覆された生育の旺盛な草高 8～15 cm のイネ科草地からの蒸発散量(Doorenbos and Pruitt, 1977)を指し、定義のあいまいな「ポテンシャル蒸発散」にかわるものとして近年用いられるようになった。

基準蒸発散の評価法として、Doorenbos and Pruitt は次の 4 つの方法を提案している。

- ① 改良ペンマン法
- ② 日射法
- ③ 蒸発計法
- ④ Blaney-Criddle 法

このうち、蒸発計法は Class A Pan を基準にしていることと、上述のように周囲の環境による補正を必要とする。このため、小型蒸発計が普及しているわが国の実情にそぐわない。また Blaney-Criddle 法は 1 カ月より短い期間の推定には使えない。このような理由から本報告では改良ペンマン法と日射法を用いて基準蒸発散量を求め、熱収支ボーエン比法による蒸発散量とから作物係数を算出した。

作物係数を算出するのに先立って、基準蒸発散を求め

るため上記2方法が南九州に適用できるかどうかを調べた。これは牧草畑(品種: レッドトップ, 面積: 約1 ha)で行われている蒸発散のルーチン観測結果と上の2方法による推定値との比較によって行った。この比較は牧草の草高が8~20 cmの時期について実施した。また改良ペンマン法と日射法による蒸発散の計算には気象観測露場のデータ(日射, 気温, 風速, 湿度)を使用した。Fig. 6は改良ペンマン法による推定値と牧草地蒸発散の比較を示したものである。

Fig. 6. Comparison of evapotranspiration (AET) from grass field measured by Bowen ratio heat balance method with reference evapotranspiration (RET) calculated from modified Penman model.

図のように基準蒸発散量と熱収支ボーエン比法による蒸発散量は、1:1の直線の周囲に分布し、相関係数が $r=0.95$ とかなりよい一致を示している。この結果から、(A-1)式より求められる基準蒸発散量は南九州へ適用できることがわかった。一方、図に示されていないが、日射法を用いた場合にも推定値と実測値は $r=0.91$ と高い相関関係にあった。(A-2)式の係数(a)として0.72が得られた。この値はDoorenbos and Pruittが得た湿潤気候区の値(0.69)に近い。

Fig.5 (B), (C)は基準蒸発散量として改良ペンマン法と日射法を用いて求めた作物係数の季節変化である。図示したように改良ペンマン法に基づく K_C の変動係数は12.9%であり、季節的変動はほとんどみられなかった。これに対し日射法に基づく K_C のそれは17.5%で改良ペンマン法よりわずかに大きく、生育後期の温度低下とともにわずかに減少する傾向がみられた。

改良ペンマン法による作物係数の季節変化がほとんど認められないということは、葉面からの蒸散が潜在的に考慮されていることを示している。この点をより明瞭に

Fig. 7. Relation between leaf area index and crop coefficient calculated from modified Penman model.

表すために、作物係数を葉面積指数の0.5の幅でグルーピングして平均値と標準偏差値を求めてみた(Fig.7)。図のように K_C はほぼ1.18を中心として、葉面積指数0.5以下を除くと1.03から1.45の範囲にあった。このように、葉面積指数に伴う K_C の明瞭な変化は認められないが、とくに蒸発散強度の減少及び気孔抵抗が増大する生育後期に、僅かに K_C の減少する傾向がみられた。一方、葉面積指数の小さい生育初期においても K_C が平均値を示したのは、十分に湿潤な土壌面から盛んに蒸発が行われていたためである。土壌が乾燥しやすい地帯では、葉面積指数の小さい時には K_C も小さい値をとることが知られており、矢野ら(1986)は、砂丘のダイズ畑において、葉面積指数が2.0以下では葉面積指数の増加につれて K_C も増加し、葉面積指数が2.0以上ではほぼ一定となる結果を示している。乾湿状態が繰り返される場合の K_C の値を明らかにするには更にデータの蓄積が必要であるが、本実験のような湿潤条件下では土壌水分補正をしなくても基準蒸発散量に K_C を乗ずることによって実蒸発散の推定ができるように思われる。

3.3.3 MortonのCRAEモデル

Morton(1983)は気候資料から流域内の実蒸発散量を求める方法を提案しており、わが国における耕地蒸発散の推定にも適用されている(大槻ら, 1984)。この方法が畑耕地にも適用できれば、少ない気象要素で蒸発散を推定することができるため、その有用性は高いとみられる。そこでCRAEモデルから求めた蒸発散量とサツマイモ畑の実測蒸発散量とを比較し、その結果をFig.8に示した。

図では葉面積指数が3以下と3以上を区別してプロットしている。両者はよい対応関係にあることがわかる。

Fig. 8. Comparison of actual evapotranspiration calculated from Bowen ratio heat balance method with that estimated from CRAE model.

この結果は気温、湿度、日射量を畑地上の1点で観測することにより、その畑地からの蒸発散量を推定することができることを示しており、簡易な推定法として利用できるものと思われる。ただし、MortonはCRAEモデルが半旬よりも短い期間には適用できないことを指摘している。

4. ま と め

温暖多雨地域の南九州の畑作台地において、サツマイモ畑の熱収支及び蒸発散量の連続観測を挿苗から収穫までの全栽培期間を通して実施し、それらに基づいて畑地蒸発散の推定法等について研究した。以下にその要約を示す。

1. サツマイモ畑のアルベドは移植直後の0.08～0.10から最大葉面積時の0.24に緩やかに増加した。初霜被害を受けた直後のアルベドは0.13と急激に低下した。

2. 純放射量は生育初期から生育最盛期においては、そのほとんどが蒸発散エネルギーとして使われ、日中のボーエン比が0に近い値もしくは負になる値を示した。また純放射量と全短波放射量の比率は、生育初期の0.61から生育後期の0.39に減少した。

3. 熱収支ボーエン比法によるサツマイモ畑の蒸発散量は、天候の不順だった6月に2～4 mm・day⁻¹であったが、天候の回復した7月前半と8月前半は約6 mm・day⁻¹のレベルに維持された。そして9月以降になると再び減少し、2～3 mm・day⁻¹の値を示した。サツマイモの栽培期間中の平均蒸発散量は3.67 mm・day⁻¹で、これは南九州の水稻のそれと同程度であった。盛夏期の晴天日(25<Q≤30 MJ・m⁻²)のうち72%は7～9 mm・day⁻¹の蒸発散が生じていることがわかった。

4. 改良ペンマン法から求めた基準蒸発散量は牧草畑

の蒸発散量とよく一致したことから、改良ペンマン法は南九州に適応できることがわかった。

5. サツマイモの作物係数は、基準蒸発散量に改良ペンマン法を用いた場合、生育期間を通して変動は小さく(12.9%)、日射法を用いた場合は17.5%とやや大きな値を示した。また前者の場合、生育期間の平均作物係数は1.18であった。

6. Mortonモデルによる実蒸発散量とボーエン比法による蒸発散量は半旬平均値でよい対応がみられ、1高度の気象観測データからサツマイモ畑の実蒸発散量の推定ができることがわかった。

謝 辞

本研究の機会と便宜を与えてくださった前畑作部長柚木利文博士、終始懇切な指導助言をいただいた九州大学農学部教授元田雄四郎博士、当部気象災害研究室長桜谷哲夫博士に深甚なる謝意を表すとともに、圃場の設定と管理に協力を惜しまれなかった業務科長小野光幸氏初め業務科の諸氏に厚くお礼申し上げる。

付 実蒸発散の推定式

1. 作物係数を用いる方法

この方法の基本式は一般に次式で与えられる。

$$AET = K_C \cdot RET$$

ここでAETは実蒸発散量、 K_C は作物係数、RETは基準蒸発散量である。RETを求めるために本稿で使用した改良ペンマン法(Doorenbos and Pruitt, 1977)と日射法(Makkink, 1957)はそれぞれ以下のように与えられる。

1) 改良ペンマン法

$$RET = \epsilon \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(U) \cdot (e_s - e_a) \right] \quad (A-1)$$

ここで Δ は飽和水蒸気傾度(mb・℃⁻¹)、 γ は乾湿計定数(mb・℃⁻¹)、 $f(U)$ は風速関数(W・m⁻²・mb⁻¹)、 e_s 、 e_a は基準高度での飽和水蒸気圧(mb)、及び実際の水蒸気圧(mb)で($e_s - e_a$)は飽差(mb)、 ϵ は気候によって決まる経験定数である。 $f(U)$ 及び R_n を求めるに当たってはDoorenbos and Pruitt (1977)が提案した次式を用いた。

$$f(U) = 0.27 + 0.233 U_2$$

$$R_n = (1 - \alpha) R_s - [a(\tau/\tau_0) + b] \times \{c - d\sqrt{e_d}\} \sigma (T_a + 273)^4$$

ここで U_2 は地表面上2m高度での日平均風速(m・s⁻¹)、 α はアルベドで0.25、 τ/τ_0 は日照率、 e_d は水蒸気圧(mb)、 T_a は日平均気温(℃)、 σ はStefan-Boltzman

定数 ($4.8995 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ K}^{-4}$), a , b , c , d は定数でそれぞれ 0.90, 0.10, 0.56, 及び 0.079 である。 ϵ はわが国の気象条件を考慮して 1.0 とした。

2) 日射法

日射法は Makkink (1957) の提案した次式を用いた。

$$RET = a \left(\frac{4}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{L} \right) \quad (\text{A-2})$$

ここで R_s は全短波放射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), a は経験定数である。

2. Morton (1983) の CRAE モデル

広い湿面からの蒸発散 E_{TW} として, Morton (1983) の定義によるポテンシャル蒸発散量を E_{TP} とすれば実蒸発散量 AET は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} AET &= 2E_{TW} - E_{TP} \\ E_{TP} &= R_T - \lambda \cdot f_T (T_P - T) \\ R_{TP} &= E_{TP} + \gamma \cdot p \cdot f_T (T_P - T) \\ E_{TW} &= b_1 + b_2 (1 + \gamma \cdot p / \Delta_p)^{-1} \cdot R_{TP} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-3})$$

ここで R_T は気温での土壌・植物表面での純放射量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), R_{TP} は平衡温度 T_P における土壌・植物表面での純放射量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), f_T は水蒸気輸送係数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mb}^{-1}$), T は最高気温と最低気温の平均値 ($^{\circ}\text{C}$), p は大気圧 (mb), b_1 , b_2 は経験定数で $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ と $1.20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ である。このモデルを利用するにあたっては Morton によって提案された次式を用いて純放射量を求めた。

$$R_T = (1 - \alpha_L) R_s + 0.92 \sigma (T + 273)^4 \times \{1 - (0.71 + 0.007 e_a \cdot p / p_s)(1 + \rho)\}$$

ここで α_L はアルベド, p/p_s は標準海拔高度での大気圧比, ρ は雲量の関数である。

引用文献

- Doorenbos, J. and Kassam, A. H., 1979: Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*, FAO, Rome, Italy.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977: Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24*, FAO, Rome, Italy.
- Hanks, R. J. and Rasmussen, V. P., 1982: Predicting crop production as related to plant water stress. *Adv. Agron.*, **35**, 193-215.
- 伊藤代次郎, 長谷場徹也, 1984: 種々の耕地のアルベドと放射収支. *農業気象*, **40**, 29-35.
- Iwakiri, S., 1965: On the evapotranspiration from paddy field in southern part of Kyushu. *J. Agr. Met.*, **21**, 15-21.
- 蒸発散研究グループ, 1967: 水田の蒸発散. *農業気象*, **22**, 13-21.
- Makkink, G. F., 1957: Ekzamenen de formulo de Penman. *Neth. J. Agric. Sci.*, **5**, 290-305.
- Morton, F. I., 1983: Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *J. Hydrol.*, **66**, 1-76.
- 農林水産省構造改善局編, 1982: 土地改良事業計画設計基準, 計画・畑地かんがい. 1-143, 農業土木学会.
- 大場和彦, 1985: 主要畑作物の蒸散量および気孔抵抗について. *九州の農業気象*, **21**, 33-36.
- 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔, 1984: 実蒸発散量推定に関する研究(II) 水収支法と補完関係式による流域蒸発散量の比較. *農土論集*, **112**, 17-23.
- Ritchie, Joe T., 1983: Efficient water use in crop production: Discussion on the generality of relations between biomass production and evapotranspiration. In *H. M. Taylor, W. R. Jordan and T. R. Sinclair (Editors), Limitations Efficient Water Use in Crop Production*, Am. Soc. Agron., Madison, WI, 29-44.
- 桜谷哲夫, 岡田益己, 1984: 蒸発散の測定法(V). *農業気象*, **40**, 403-405.
- 桜谷哲夫, 堀江 武, 1985: 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. *農業気象*, **41**, 45-55.
- Seo, T. and Yamaguchi, N., 1968: A note on the evapotranspiration from a paddy field. *Berichte des Ohara Inst. Okayama Univ.*, **14**, 133-144.
- 種田行男, 1959: 蒸通発量に関する実験的研究(IV). *農業土木研究*, **27**, 1-6.
- Vaux, H. J. Jr. and Pruitt, W. O., 1983: Crop-water production functions. In *D. Hillel (Editor), Advance in Irrigation*, vol. 2, Academic press, N-Y, 61-97.
- 矢野友久, 小谷佳人, 1986: 砂丘地における大豆の蒸発散量について. *農土論集*, **126**, 25-30.

Summary

Diurnal and seasonal changes in evapotranspiration (ET) of sweet potato and the crop coefficient (ET/reference ET) were studied during the period from the transplanting time to the time when crop development terminated following first hoar frost, at a location in the southern part of Kyushu. The ET was measured using the Bowen ratio heat balance method. ET from a grass field was also measured with the same method to check the applicability of the modified Penman model (Doorenbos and Pruitt, 1977) for estimating reference ET to the southern part of Kyushu. The results obtained through the observations and data analysis can be summarized as follows.

1) Reference ET calculated from the modified Penman model agreed with the measured one at the grass field, showing that the modified Penman model is applicable to the southern part of Kyushu without turning the coefficients in Eq. A-1.

2) The daily mean of albedo in the sweet potato field increased curvilinearly with the growth of sweet potato, varying from about 0.08 of the transplanting time to 0.24 of the stage at the maximum leaf area index. These threshold values agreed well with the ones obtained by Ito et al. (1984). After the sweet potato field was damaged by the first hoar frost on 22 October, the albedo decreased drastically to about 0.13 on the next day.

3) The daily values of evapotranspiration measured for the growing period were in a range from 1mm to 9mm with the average of 3.67mm, agreeing well with average evapotranspiration (ET=3.71mm) for a paddy field measured with a lysimeter in the same district (Iwakiri, 1965). The daily ET on clear days ($25 < Q \leq 30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) fell into a range from 7mm to 9mm for 3/4 of these days.

4) The daily crop coefficients of sweet potato calculated from the measured ET and the reference ET showed smaller variation than those based on the radiation model (Eq. A-2). The mean value of the crop coefficient obtained on the basis of the modified Penman model was 1.18 (Fig. 5).

5) There was good agreement between the actual ET measured at the sweet potato field using the Bowen ratio heat balance method and ET calculated from Morton model (Fig. 8). This agreement implies that the Morton model is applicable to the estimate of actual evapotranspiration from sweet potato field with the meteorological data collected at one level above the canopy.