

# 小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とする水稻作物係数の評価 Crop coefficient for small pan evaporation to estimate evapotranspiration of rice

堀川直紀\*

\*国際農林水産業研究センター（〒305-8686 茨城県つくば市大わし 1-1）

HORIKAWA Naoki\*

\*Japan International Research Center for Agricultural Sciences（1-1 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8686）

## Abstract

Many studies on paddy rice evapotranspiration have been implemented in Japan. Most of the measured evapotranspiration amounts are compiled based on small pan evaporation. That makes it difficult to use the results of study. Small pan evaporation was compared to three reference evapotranspiration indices to obtain crop coefficients. Ratios of small pan evaporation to reference evapotranspiration indices of the Penman method, the modified Penman method and FAO's Penman-Monteith method were 0.98, 0.89 and 1.16, respectively. Crop coefficient for small pan evaporation was converted to that for the modified Penman method and that for FAO's Penman-Monteith method using obtained ratios. The former was about the standard value and the latter is larger than the standard value by about 15%.

**Key words:** crop coefficient, evapotranspiration, pan evaporation, rice, Penman method, paddy, ET ratio

## 要 旨

わが国には水稻蒸発散の試験研究の蓄積があるが、計測された蒸発散量は現在ほとんど観測されなくなった小型蒸発計蒸発量と比較して整理されていることが多く、これらの知見を利用することは困難となっている。日本の気象官署における小型蒸発計の観測蒸発量を現在の気象観測においても得られる Penman 法による計算値、修正 Penman 法による計算値、FAO の Penman-Monteith 法による計算値と比較したところ、夏季における全国平均の比率はそれぞれ、0.98、0.89、1.16 であった。これらの値を用いて小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とする作物係数を、修正 Penman 法と FAO の Penman-Monteith 法を基準蒸発散量とする作物係数に変換したところ、前者は標準値に近似したが、後者は標準値より大きい値を示した。

**キーワード:** 作物係数、蒸発散量、計器蒸発量、水稻、ペンマン法、水田、蒸発散比

## 1. はじめに

気候変動などの自然環境の変化及び社会環境の変化により水需給は厳しくなっており、水需要において大きな割合を占めている灌漑用水を有効に利用することが望まれている。大規模な灌漑地区において灌漑用水の取水量は圃場で農作物に消費される水量を上回っている。灌漑用水の取水量を削減するには圃場での消費水量を把握することが必要である。水田灌漑地区での水需要においては水稻の生育において発生する蒸発散は圃場の消費水量の主要な要素の一つであり、特に東南アジア諸国では浸透量が少ない圃場が多いことから蒸発散量の消費水量に占める割合が高く、蒸発散量の推定は灌漑プロジェクトや水資源プロジェクトの計画段階及び管理段階において重要である。

圃場での蒸発散量の計測には多くの器材や労力を必要とする一方、気象観測値は容易に利用することが可能であることから、気象観測から得られる指標（基準蒸発散量）に作物や生育ステージ毎に異なる係数（作物係数）を乗じて圃場の蒸発散量を推定する方法が広く用いられている。

作物係数は基準蒸発散量によって異なり、基準蒸発散量には、小型蒸発計蒸発量、大型蒸発計蒸発量、Penman 法による計算値、Penman-Monteith 法による計算値、種々の気温法による計算値など多くの種類がある。わが国では水稻の蒸発散について多くの試験研究が行われており、1960 年代以前の多くの試験

研究においては小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量として水稻の作物係数が求められている。しかし、現在は小型蒸発計を用いた観測はほとんど行われておらず、小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量として整理したこれまでの水稻蒸発散量の知見を利用することが難しくなっている。現在は、Penman 法による計算値や Penman-Monteith 法による計算値が基準蒸発散量として広く用いられている。

本研究では、小型蒸発計蒸発量と Penman 法による計算値、修正 Penman 法の計算値及び FAO の Penman-Monteith 法による計算値との関係を示し、小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とした作物係数を他の基準蒸発散量とした作物係数に変換し、それらの標準値と比較する。

## 2. 水稻蒸発散量の計測と推定

### 2.1 蒸発散量の推定と基準蒸発散量

圃場における蒸発散量の計測には多くの労力や費用を要する。このため、気象観測によって容易に得られる値を指標値とし、これに作物や生育ステージによって定まる係数（作物係数）を乗じて水分や病気などのストレスが無いときの圃場の蒸発散量を推定する方法が、灌漑や水資源分野の計画及び管理の段階において古くから用いられてきた。

圃場の蒸発散の推定において用いられる気象観測によって得られる指標値（Reference Evapotranspiration）は、可能蒸発散量、蒸発散位、基準蒸発量、基準蒸発位などの様々な用語があてられているが本報では直訳して基準蒸発散量とする。基準蒸発散量としては、これまで蒸発計蒸発量、Penman 法や Penman-Monteith 法などの複合法による計算値、Thornthwaite 法などの気温法による計算値など多くの方法が提案されている。

わが国では水稻蒸発散に関する試験研究においてかつては小型蒸発計蒸発量が基準蒸発散量として用いられ、観測された水稻蒸発散量が整理されてきた。小型蒸発計は、内径 20cm 深さ 10cm の金属製容器であり、日本の気象官署においてはこれに約 20mm の水を入れて一日後に残水量を計測しその差から蒸発量を計測していた。小型蒸発計は農業分野の試験研究機関でも広く使われており、農作物の蒸発散量の計測値は小型蒸発計蒸発量と比較されてきた。また、小型蒸発計は農作物の蒸発散の推定の基準だけでなく、流域の蒸発散の推定の基準ともされ、金子（1973）や高瀬（1978）は流域の蒸発散量と小型蒸発計蒸発量の比である係数（蒸発散係数）を整理した。

小型蒸発計蒸発量は局地的な気象の影響を受けやすくその地域の気象を代表していないとの指摘もあり、日本の気象官署では小型蒸発計による観測は 1965 年に中止された。小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量として整理された水稻の蒸発散に関する知識を利用するには、現在の一般的な気象観測で得られる基準蒸発散量と小型蒸発計蒸発量の関係を明確にする必要がある。

Penman 法や Penman-Monteith 法は圃場内での観測値により蒸発散量を計測する方法として利用されることもある（小谷（2015）、蒸発散研究グループ（1967））が、一般には気象露場の観測値による基準蒸発散量として用いられることが多い。Penman 法は畑地灌漑の計画基準において基準蒸発散量（原文での表記は基準蒸発位）として用いられており、これから派生した修正 Penman 法（Modified Penman Method : Doorenbos and Pruitt, 1977）や FAO の Penman-Monteith 法（Allen et al., 1998）は気温法に代わって基準蒸発散量として海外で広く採用されるようになってきている。

本研究では、小型蒸発計蒸発量と比較する基準蒸発散量を、Penman 法による計算値、修正 Penman 法による計算値、FAO の Penman-Monteith 法による計算値とした。なお、Penman（1948）と Penman（1956）では異なる風速関数による計算法を用いているが、本報における Penman 法は前者による計算法とする。

## 2.2 小型蒸発計蒸発量と他の基準蒸発散量

これまで小型蒸発計蒸発量を他の基準蒸発散量などを比較する多くの研究が実施されてきた。一般的な傾向としては小型蒸発計蒸発量の他の基準蒸発散量に対する比は冬季に相対的に増加しており、小型蒸発計は地熱の影響を受けることなどがその原因として指摘されている。伊藤（1968）は、東京で1949年～1953年に行われた小型蒸発計と大型蒸発計による観測値を比較し、大型蒸発計に対する小型蒸発計の比は年平均で1.28であり、10月～12月の月平均値は年平均を上回ることを示した。鈴木・福田（1960）は、Termer法、Blaney and Criddle法、Thornthwaite法と比較し、松井（2003）は、気温のみによる推定法であるThornthwaite法、Hamon法、Hargreaves法と比較した。榎根・小林（1973）は、小型蒸発計とThornthwaiteの方法と比較し、後者は前者の約7割であるが、冬から春にかけてはこの値が小さくなるとした。徐（2001）は長期的にみるとポテンシャル蒸発量と小型蒸発計蒸発量との間は近似的に比例関係にあるとした。

大槻ら（1984）は、Penman法による計算値は、ある広がりを持った地域の平均的な小型蒸発計蒸発量の値にほぼ対応するとした。高瀬・佐藤（1986）は愛媛県の観測地点においてPenman法による計算値と小型蒸発計蒸発量の間には高い相関（月別値相関係数0.976）があり、冬季は小型蒸発計蒸発量の値がPenman式の値より大きくなることを報告し、松井（2003）は全国の気象官署で同様に求めた両者の相関が高いこと（月別値相関係数0.96）を報告した。

気象庁の小型蒸発計による観測が中止された以降に提案された修正Penman法及びFAOのPenman-Monteith法の計算値と小型蒸発計蒸発量を比較した事例は少ないが、矢野・小谷（1986）は小型蒸発計蒸発量と修正Penman法による計算値は高い相関（日別値相関係数0.89）があるとしている。

## 2.3 水稲蒸発散量の計測

圃場の蒸発散量の計測方法には水収支法、熱収支法、空気力学的方法、渦相関法やそれらを組み合わせた方法があり、さらに水収支法は、ポット試験、水田内に有底箱を設置する方法、ライシメータ法、圃場で水収支を取る方法、チェンバー法などがある。このうちわが国では水田に有底箱を設置する方法が発展し多く用いられた。この方法はライシメータ法に含まれることもあるが、水田圃場の一部に箱を埋設して蒸発散量などを計測する方法でマイクロライシメータ法とも呼ばれる方法であり、本報ではこれを有底箱法とする。

水稲の蒸発散量は明治時代のポット試験から始まったが、ポットのような小面積の蒸発散は周辺の環境を受けやすい。水田群落内における蒸発散を再現するために有底箱を圃場に埋設しての計測が行われるようになった（狩野・松尾，1934）。有底箱法は、水稲を植えた有底箱と稲を植えない有底箱（株間蒸発計）を用いて蒸散量と蒸発量の両方を計測できるという利点があり、この方法で計測された蒸発と蒸散の生育に伴う変化は葉面積指数を指標として整理された（Uchijima, 1961）。1960年代ころまでは有底箱法により多くの水稲蒸発散量の計測が行われた。その後、熱収支ボーエン比法や空気力学的方法（傾度法）による計測が行われ、1990年代からは渦相関法も適用されるようになってきた。

これらの試験研究結果は、農林省振興局（1957）、金子（1957）、中川（1966）、農林水産技術会議（1982）などによってとりまとめられた。金子（1957）は、水田圃場と環境が異なるポット試験を除き、小型蒸発計蒸発量の計測値がある15地区33試験について小型蒸発計蒸発量に対する無降雨日の蒸発散量の比を整理し、中川（1966）は、同様に19地区延べ63試験について小型蒸発計蒸発量に対する蒸発散量の計測値の比を整理して灌漑通期における全国の平均値約1.3を得た。なお、これらの比は用水路の最大流量の算定に重要な無降雨継続時に生じる蒸発散の最大値を通常の観測で得られる小型蒸発計蒸発量（降

雨日を含む) から求めるための値であり、気象条件を一致させて比較する作物係数より大きな値を示すと考えられる。

土地改良事業の進展に伴い水田の浸透量の重要性が増加し、浸透量と蒸発散量を合わせた減水深に関する試験研究に重点が移り、水稻の蒸発散量を量的に把握する試験研究は次第に行われなくなった。この時期が気象官署での小型蒸発計による観測が中止された時期に近いこともあり、多くの水稻蒸発散量の計測事例が小型蒸発計蒸発量によって整理された結果となった。計画設計基準においても昭和 29 年の初版(農林省農地局, 1954)では水田の用水量推定における蒸発散量の試験研究の結果が小型蒸発計蒸発量を指標として示されており、平成 5 年制定版以降においても蒸発散に関する参考資料として小型蒸発計蒸発量を指標とした値(中川, 1966)が引用されている。

## 2.4 作物係数

Doorenbos and Pruitt (1977) は、修正 Penman 法による計算値を基準蒸発散量とする作物係数を取りまとめ、湿潤アジアの微風の雨期作の水稻作物係数の標準値として、初期 1.10, 中期 1.05, 終期 0.95 としている。この標準値を生育期平均すると約 1.05 となる。日本においては、桜谷・堀江(1985)が修正 Penman 法の計算値を基準蒸発散量とした作物係数を生育期について算出し、8 事例の平均値として 1.05 を得ている。Allen et al. (1998) は FAO の Penman-Monteith 法による計算値を基準蒸発散量とする作物係数を取りまとめ、半湿潤で風が弱い場合の水稻作物係数の標準値として、初期 1.05, 中期 1.20, 終期 0.60~0.90 としている。この標準値を生育期平均すると約 1.12 である。

日本では多くの水稻の蒸発散の試験研究が行われてきた。しかしながら、試験方法(ポットによる試験、圃場における有底箱による試験など)や計測対象日(降雨日を除く、降雨日を含む)などの計測方法が異なり、また、計測値と基準蒸発散量との比較方法もそれぞれ異なる。計測方法と比較方法の確認が可能で小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とした作物係数が算定されていると考えられる試験研究のうち、ポット試験を除いた 8 地区 38 事例を Table 1 に示す。全事例を平均すると小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とする作物係数は 1.13 である。この値は修正 Penman 法による計算値を基準蒸発散量とする作物係数の標準値より大きく、FAO の Penman-Monteith 法による計算値を基準蒸発散量とする作物係数の標準値とほぼ一致しているが、異なる基準蒸発散量の作物係数標準値と比較するには基準蒸発散量の違いを考慮する必要がある。

作物係数についてはその値とともに水稻の生育に対する推移についてもこれまで検討が行われてき

Table 1 水稻蒸発散量計測事例

都道府県	観測方法	年	試験数	期間平均作物係数	文献
京都府	有底箱法	1932	1	1.27	狩野・松尾(1934)
青森県	有底箱法	1953~1956	12	0.97~1.40	羽生・小野(1960)
福岡県	有底箱法	1950~1954	5	1.10~1.33	佐藤・船橋(1954), 佐藤(1960)
佐賀県	有底箱法	1954~1955	2	0.95, 1.05	藤川・永石(1955), 永石(1959)
佐賀県	有底箱法	1955	1	1.33	永石(1959)
埼玉県	熱収支ボーエン比法・傾度法	1965	1	0.81	蒸発散研究グループ(1967)
宮崎県	有底箱法	1960~1963	6	0.96~1.05	Iwakiri(1965)
宮城県	有底箱法	1959~1968	10	0.97~1.28	Miyamoto and Chiba(1971), Miyamoto(1973)

たところである。中川（1966）は日本での試験研究事例を集積し、100日間灌漑するとして小型蒸発計蒸発量に対する蒸発散量の比は20日毎に、1.00, 1.25, 1.45, 1.5, 1.55と次第に増加するとした。この比は正確には作物係数ではないが、小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とする作物係数も同様に生育に伴い増加すると考えられる。FAOのPenman-Monteith法による計算値を基準蒸発散量とする作物係数の標準値も終期には減少するが初期から中期には増加するとしている。これらに対し、修正Penman法を基準蒸発散量とする作物係数の標準値は生育に従って次第に減少するとしている。永井ら（2005）も生育に従い作物係数は減少するとし、桜谷・堀江（1985）は生育期を通してほぼ一定であるとし、いずれも生育初期に増加しないとしている。生育に対する作物係数の推移に関する異なる知見が、本質的に異なるものか、見かけ上異なっているのかを明らかにするには、基準蒸発散量関係の季節変化を比較する必要がある。

### 3. 方法

1961年から1965年までの日本国内の気象官署151観測地点において、観測統計値からPenman法による計算値、修正Penman法による計算値、FAOのPenman-Monteith法による計算値を算出し、これら3つの基準蒸発散量に対する小型蒸発計蒸発量の観測値の比を求める。求められた比を検討するとともに、小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量として求められた水稻の作物係数にこれら比を乗じて、Penman法による計算値、修正Penman法による計算値、FAOのPenman-Monteith法による計算値を基準蒸発散量に対する作物係数に変換し、それぞれの作物係数の標準値と比較する。なお、気象官署の観測統計値は気象庁の「地上気象観測統計値」を用いた。

Penman法（Penman, 1948）による計算値 $ET_p$ （mm d<sup>-1</sup>）は式（1）、修正Penman法（Doorenbos and Pruitt, 1977）による計算値 $ET_{MP}$ （mm d<sup>-1</sup>）は式（2）、FAOのPenman-Monteith法（Allen et al., 1998）による計算値 $ET_{P-M}$ （mm d<sup>-1</sup>）は式（3）により求める。

$$ET_p = \left[ \frac{\Delta}{\gamma + \Delta} \frac{R_n - R_g}{l} + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} (0.262 + 0.141u_2)(e_s - e_a) \right] \quad (1)$$

$$ET_{MP} = a \left[ \frac{\Delta}{\gamma + \Delta} \frac{R_n - R_g}{l} + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} (0.27 + 0.233u_2)(e_s - e_a) \right] \quad (2)$$

$$ET_{P-M} = \frac{0.408\Delta(R_n - R_g) + \gamma \frac{900}{T}(e_s - e_a)u_2}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

ここで、 $R_n$ ：純放射量（MJm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>）、 $R_g$ ：地熱フラックス（MJm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>）、 $e_s$ ：飽和水蒸気圧（kPa）、 $e_a$ 水蒸気圧（kPa）、 $\Delta$ 温度飽和蒸気圧曲線の勾配（kPaK<sup>-1</sup>）、 $\gamma$ ：乾湿計定数（kPaK<sup>-1</sup>）、 $T$ ：気温（K）、 $u_2$ ：高さ2m地点の風速（ms<sup>-1</sup>）である。

$a$ は、修正Penman法において昼夜の風速などの違いを修正する係数（adjustment factor）であり、1を与えることとする。地熱フラックス $R_g$ は基準蒸発散量を日単位で算出することから0と見なすこととした。式（1）、式（2）、式（3）の右辺の変数のうち観測値でない変数は基本的にAllen et al.（1998）が示した方法で観測値から求める。すなわち、純放射量 $R_n$ は式（4）、飽和水蒸気圧 $e_s$ は式（5）、温度飽和蒸気圧曲線の勾配 $\Delta$ は式（6）、乾湿計定数 $\gamma$ は式（7）、高さ2m地点の風速 $u_2$ は式（8）から求める。

$$R_n = 0.77R_{sd} - \sigma \left( \frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) \left( 0.34 - 0.14\sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_{sd}}{R_{sd0}} - 0.35 \right) \quad (4)$$

$$e_s = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27(T-273)}{T-35.7}\right) \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left( 0.6108 \exp\left(\frac{17.27(T-273)}{T-35.7}\right) \right)}{(T-35.7)^2} \quad (6)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} p \quad (7)$$

$$u_2 = u \frac{4.87}{\ln(67.8h-5.42)} \quad (8)$$

ここで、 $\sigma$  : ステファンボルツマン係数 ( $4.903 \times 10^{-9} \text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),  $T_{\max}, T_{\min}$  : 日最高気温及び日最低気温 (K),  $R_{sd}, R_{sd0}$  : 全天日射量及び晴天時全天日射量 ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),  $p$  : 現地気圧 (kPa),  $u$  : 風速 ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $h$  : 風速計の地上からの高さ (m) である。

晴天時全天日射量  $R_{sd0}$  は式 (9), 大気上端日射量  $R_{SE}$  は式 (10) から求める。また、観測地点において全天日射量が観測されていない場合は、全天日射量  $R_{sd}$  を式 (11) から求める。

$$R_{sd0} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_{SE} \quad (9)$$

$$R_{SE} = \frac{118.08}{\pi(d/\bar{d})^2} (\omega_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_0) \quad (10)$$

$$R_{sd} = 0.25 + 0.5(n/N) R_{SE} \quad (11)$$

ここで、 $z$  : 観測地点の標高 (m),  $R_{s0}$  : 太陽定数,  $\omega_0$  : 日没日出の時角 (rad),  $\delta$  : 太陽の赤緯 (rad),  $\phi$  : 緯度 (rad),  $d/\bar{d}$  : 太陽地球間の平均距離に対する瞬間値の比,  $n/N$  : 日照率である。

## 4. 結果と考察

### 4.1 基準蒸発散量の比較

151 観測地点において 1961 年から 1965 年まで小型蒸発計蒸発量 ( $ET_{\text{pan}}$ ) の Penman 法による計算値 ( $ET_p$ ), 修正 Penman 法による計算値 ( $ET_{\text{MP}}$ ), FAO の Penman-Monteith 法による計算値 ( $ET_{\text{P-M}}$ ) に対する比を求め、地域毎に平均して **Table 2** に示す。地域区分は気象庁の予報区分を参考にして設定した。また、通年 (1 月~12 月) を対象とする値とともに、主な試験研究における水稻の生育期間である夏季 (5 月~10 月) を対象とする値を併せて示した。

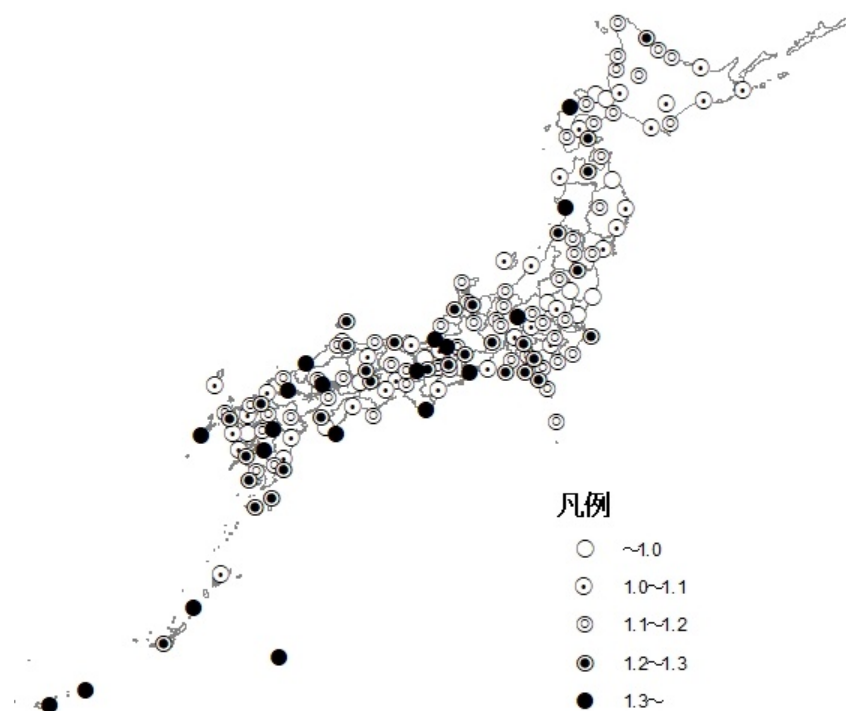
全国平均値では小型蒸発計蒸発量の Penman 法による計算値に対する比は通年で 1.00, 夏季で 0.98 であり、同じく修正 Penman 法による計算値に対する比は通年で 0.88, 夏季で 0.89, 同じく FAO の Penman-Monteith 法による計算値に対する比は通年で 1.20, 夏季で 1.16 である。既往研究で指摘されている通り Penman 法による計算値は小型蒸発計蒸発量の代替となりうると思われる。

151 観測地点のそれぞれにおいて小型蒸発計蒸発量と Penman 法による計算値の月別値 (延べ月数最大 60) の相関係数を求めた。相関係数の最小値は 0.62, 最大値は 0.99 で平均は 0.94 である。同様に求めた小型蒸発計蒸発量と修正 Penman 法による計算値との相関係数の最小値は 0.63, 最大値は 0.99, 平均は 0.94 であり、小型蒸発計蒸発量と FAO の Penman-Monteith 法による計算値の相関係数の最小値は 0.58, 最大値は 0.99 で平均は 0.94 であった。3 つの基準蒸発散量にかかる相関係数の値がほぼ一致していることから、一次変換を行えば修正 Penman 法による計算値及び FAO の Penman-Monteith 法による計算値は Penman 法の計算値と同様の精度で小型蒸発計蒸発量の代替値となることが可能と考えられる。

**Table 2** 小型蒸発計蒸発量の他の基準蒸発散量に対する比（地域毎）

	通年（1月～12月）			夏季（5月～10月）		
	$ET_{pan}/ET_P$	$ET_{pan}/ET_{MP}$	$ET_{pan}/ET_{P-M}$	$ET_{pan}/ET_P$	$ET_{pan}/ET_{MP}$	$ET_{pan}/ET_{P-M}$
北海道	0.97	0.84	1.19	0.92	0.83	1.13
東北太平洋側	0.95	0.84	1.14	0.92	0.84	1.09
東北日本海側	1.00	0.89	1.22	1.00	0.91	1.18
北陸	0.97	0.86	1.16	1.00	0.91	1.17
関東甲信	1.00	0.88	1.21	0.96	0.88	1.14
東海	1.03	0.90	1.24	1.01	0.92	1.18
近畿	0.97	0.86	1.18	0.98	0.89	1.16
山陰	0.99	0.88	1.18	1.02	0.93	1.19
山陽	1.02	0.93	1.21	1.02	0.95	1.18
四国	0.98	0.86	1.17	0.98	0.89	1.14
九州北部	1.01	0.90	1.21	1.01	0.92	1.18
九州南部	1.02	0.90	1.21	1.04	0.94	1.20
奄美	1.02	0.90	1.19	1.04	0.94	1.21
沖縄	1.17	1.02	1.37	1.18	1.06	1.38
全国	1.00	0.88	1.20	0.98	0.89	1.16

$ET_{pan}/ET_P$ ：小型蒸発計蒸発量の Penman 法による計算値に対する比  
 $ET_{pan}/ET_{MP}$ ：小型蒸発計蒸発量の修正 Penman 法による計算値に対する比  
 $ET_{pan}/ET_{P-M}$ ：小型蒸発計蒸発量の Penman-Monteith 法による計算値に対する比



**Fig.1** 小型蒸発計蒸発量の FAO の Penman-Monteith 法による計算値に対する比（観測地点毎）

地域毎の小型蒸発計蒸発量の3つの基準蒸発散量に対する比を見ると、いずれも沖縄地域平均が全国平均より高い。水稻蒸発散の試験研究がほとんど実施されてなかった沖縄地域を除けば、比の平均値について地域間には大きな差は見られない。観測地点毎の比の分布状況を確認するために、例として小型蒸発計蒸発量のFAOのPenman-Monteith法の計算値に対する比(夏季)をFig.1に示す。近接した地点においても比が大きく異なっている。全国を対象とした標準偏差が0.11に対し、各地域を対象とした標準偏差は0.07~0.12(観測地点数が2の奄美地域を除く)と大きく異らず地域内のばらつきが大きいことから、既に指摘されている通り小型蒸発計蒸発量は局所的な影響を受けやすいと考えられる。小型蒸発計蒸発量は観測地点の観測値などをそのまま用いるより地域平均や全国平均を扱うことが適当と考えられる。

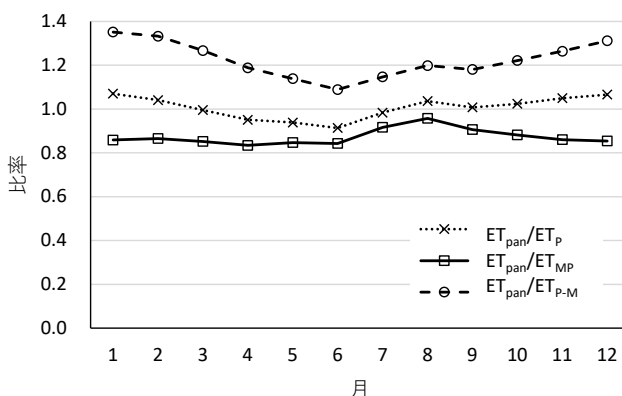


Fig.2 小型蒸発計蒸発量の他の基準蒸発散量に対する比(月毎)

ET<sub>pan</sub>/ET<sub>P</sub>: 小型蒸発計蒸発量のPenman法による計算値に対する比  
 ET<sub>pan</sub>/ET<sub>MP</sub>: 小型蒸発計蒸発量の修正Penman法による計算値に対する比  
 ET<sub>pan</sub>/ET<sub>P-M</sub>: 小型蒸発計蒸発量のPenman-Monteith法による計算値に対する比

小型蒸発計蒸発量の他の基準蒸発散量に対する比の季節傾向を把握するために月毎の値の全国平均をFig.2に示す。小型蒸発計蒸発量のPenman法の計算値に対する比とFAOのPenman-Monteith法に対する比とも全国平均では冬季に大きく夏季に小さい。一般的に小型蒸発計蒸発量は冬季には地熱の影響を受けることなどにより他の基準蒸発散量より値が大きくなると考えられており、Penman法の計算値との比が冬季に大きくなることは高瀬・佐藤(1986)が指摘している。ただし、北陸、山陰などの地域では夏季の比が通年の比より大きく(Table 2)、これはこれらの地域の傾向が全国平均と異なり夏季の比の方が冬季の比より大きいことを示している。概して、北や太平洋側の地域では冬季の比が夏季の比より大きく、南や日本海側の地域では夏季の比が冬季の比より大きい。小型蒸発計蒸発量の修正Penman法に対する比の地域平均も同じ傾向にあるが、夏季の比が冬季の比より大きい地域がほかの2つの基準蒸発散量における場合より多いため、全国平均をとると夏季と冬季で比に大きな差は無い。

夏季においては小型蒸発計蒸発量の3つの基準蒸発散量に対する全国平均の比は同じ傾向を示している。特に、いずれの比も6月、7月、8月と増加しており、この傾向は全国平均だけではなく各地域平均において共通してみられる。

#### 4.2 作物係数の変換

8地区38事例における小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とする作物係数の生育期の平均値は1.13である。これに、夏季における小型蒸発計蒸発量の修正Penman法に対する比0.89を乗じると、これらの試験において修正Penman法を基準蒸発散量とする作物係数の平均値は1.01となり、修正Penman法における水稻の作物係数の標準値(生育期)の1.05より約5%小さい値となった。同様にこれらの試験結果をFAOのPenman-Monteith法を基準蒸発散量とする作物係数に変換すると平均値は1.31となり、FAOのPenman-Monteith法における水稻の作物係数の標準値(生育期)の1.12より約15%大きい値となっ



た。本報で検討した水稻蒸発散の試験研究の地点数は8と少ないため、これらが一般的な傾向かはさらに試験研究の計測事例を収集し検討する必要がある。なお、小型蒸発計蒸発量のPenman法の計算値に対する比率はほぼ1であるので、小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量として得られた作物係数はそのままPenman法を基準蒸発散量とする作物係数と見なすことができる。

生育に伴い作物係数は、修正Penman法が基準蒸発散量では一定もしくは減少するとされているのに対し、小型蒸発計蒸発量が基準蒸発散量では増加するとされている。生育期間中に小型蒸発計蒸発量の修正Penman法の計算値に対する比が減少していればこれは矛盾しない。しかし、Fig.2に示した通りこの比は8月から10月にかけては減少しているが、6月から8月にかけては増加しており、小型蒸発計蒸発量と修正Penman法を基準蒸発散量としたときの作物係数の生育に伴う増減の傾向の違いは、2つの基準蒸発散量の関係からだけでは説明することはできないと考えられる。

## 5. おわりに

現在ほとんど観測されていない小型蒸発計蒸発量と現在の気象観測値で得られる基準蒸発散量の関係を求め、わが国の水稻蒸発散量の試験研究の蓄積を利用可能な形に変換することを試みて、次の3点を示した。

- 1) 全国の観測地点の夏季（5月～10月）において、小型蒸発計蒸発量は期間平均（1961～1965年）及び観測地点（最大151地点）平均すると、Penman法、修正Penman法、FAOのPenman-Monteith法の計算値のそれぞれ0.98倍、0.89倍、1.16倍であった。
- 2) 日本における試験研究によって得られた小型蒸発計蒸発量を基準蒸発散量とする水稻の作物係数（生育期）の平均値を上記の比で修正Penman法とFAOのPenman-Monteith法を基準蒸発散量とする作物係数に変換するとそれぞれ、1.01、1.31となった。前者は標準値より約5%小さい値であり、後者は標準値より約15%大きい値である。
- 3) 水稻の生育に対する作物係数の変化は基準蒸発散量によって異なるが、基準蒸発散量間の関係からだけではこの違いは説明できなかった。

海外の水田灌漑地域では有効な水利用の観点から消費水量の主要素である蒸発散量についてその推定とともに異なる作付時期や栽培方法における違いを知ることが重要となっている。わが国では、灌漑方法、栽培方法、作付時期などを変えて水稻蒸発散量を計測した多くの試験研究が実施されている。本報では検討した試験事例が8地区にとどまったが、これまで行われた試験研究結果を集積し検討することにより水利用の有効利用につながる知見が得られると考える。

## 引用文献

- Allen, R., Pereira, L.S., D.Raes, M.Smith (1998) : Crop evaporation : guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No.56
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1977) : Guidelines for predicting crop water requirements (revised), *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No.24
- 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 (3), 111-118
- 藤川武信・永石義隆 (1955) : 干拓地水田の減水深について 第2報 実験研究, *九州農業試験場彙報*, 3 (3), 297-306
- 伊藤昭三 (1968) : 蒸発量観測の現状と将来展望, *電力気象連絡会彙報*, 17 (3, 4), 125-134
- Iwakiri, S. (1965) : On the evapotranspiration from paddy fields in a Southern part of Kyushu, *農業気象*, 21 (1), 17-21
- 蒸発散研究グループ (1967) : 水田の蒸発散, *農業気象*, 22 (4), 149-157

- 金子良 (1957) : 水田用水量の水文学的考察, 農業土木研究, 25 (3), 147-152
- 金子良 (1973) : 農業水文学, 共立出版, 286p
- 狩野徳太郎・松尾欣二 (1934) : 水田の葉水面蒸発量と滲透量, 農業土木研究, 6 (2), 1-8
- 榎根勇・小林守 (1973) : モンスーンアジアの蒸発散量—とくにその気候学的推定法について—, 吉野正敏編著「モンスーンアジアの水資源」55-70
- 松井宏之 (2003) : Hargreaves 式に基づく月平均蒸発計蒸発量の推定, 水文・水資源学会誌, 16 (6), 589-594
- Miyamoto, K. (1973) : Weather effects on water consumption of the paddy field and estimates of evapotranspiration on the basis of new climatic index: The variability of water requirement if the paddy field of Japan (2), 農土論集, 46, 7-13
- Miyamoto, K., Chiba, B. (1971) : The water consumption in a single paddy field and its variability in cold northern Japan: The variability of water requirement on paddy fields of Japan (1), 農土論集, 37, 17-25
- 永井秀幸・山田智康・韓光鉉・小野圭介・宮田明・吉越恆・齋藤誠・原菌芳信 (2005) : アジアフラックス水田サイトにおける実蒸発散量と可能蒸発量を用いた作物係数の算定について, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 18, P-39
- 永石義隆 (1959) : 干拓地水田の減水深について, 農業土木研究, 27 (2), 60-65
- 中川昭一郎 (1966) : 水田用水量調査計画法 (その2), 農土誌, 34 (2), 85-90
- 農林省振興局 (1957) : 水田用水量に関する試験成績 農業土木資料 第8, 156p
- 農林省農地局 (1954) : 土地改良事業計画設計基準第2部計画第1篇カンガイ
- 農林水産技術会議 (1982) : 農業用水量データブック, 261p
- 小谷廣通 (2015) : 水稲田における Penman-Monteith の簡略式による可能蒸発散量と実蒸発散量との関係, 農業農村工学会論文集, 297, I\_73-I\_81
- 大槻恭一・三野徹・丸山利輔 (1984) : 計器蒸発量, 蒸発散位と実蒸発量との関係—実蒸発散量推定に関する研究 (1), 農土論集, 111, 95-103
- Penman, H.L. (1948) : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, A 193
- Penman, H.L. (1956) : Estimation evaporation, *Trans. AGU*, 37 (1), 43-50
- 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 (1), 45-55
- 佐藤正一・船橋義成 (1954) : 暖地水田用水量の実験的研究, 農業気象, 10 (1-2), 4-6
- 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, 九州農業試験場彙報, 6, 259-364
- 鈴木重義・福田仁志 (1960) : 畑かんがいにおける蒸発散量とその地域性, 農業気象, 15 (3), 105-109
- 高瀬恵次・佐藤晃一 (1986) : 水収支法による造成農地蒸発散特性の検討—造成農地の水循環に関する研究 (I), 農土論集, 121, 1-7
- 高瀬恵次・丸山利輔 (1978) : 水収支法による季別流域蒸発散量の推定, 農土論集, 76, 1-6
- Uchijima, Z. (1961) : On characteristics of heat balance of water layer under paddy plant cover, 農業技術研究所報告, A 物理統計, 8, 243-265
- 徐健青 (2001) : ポテンシャル蒸発量からみた東アジアにおける近年の気候変化, 水文・水資源学会誌, 14 (2), 151-170
- 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