水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 16, No. 6(2003) pp. 589-594

Hargreaves 式に基づく月平均蒸発計蒸発量の推定

Estimation of Mean Monthly Pan Evaporation Based on Hargreaves Equation

松井宏之* (宇都宮大学農学部)

MATSUI Hiroyuki

Faculty of Agriculture, Utsunomiya University

The Hargreaves equation can calculate monthly mean evaporation/evapotranspiration using only air temperature with two coefficients. First, it is confirmed that the Hargreaves equation with general coefficients gives better pan evaporation estimates than estimated results for pan evaporation from 143 meteorological stations in Japan and results generated using the Thornthwaite and the Hamon equations. In a further attempt to improve accuracy, two equations are determined to estimate the values of the two coefficients that can be applied throughout Japan with the exception of the Nansei Islands in the subtropical southwest of Japan. It is shown that the Hargreaves equation plus the two new equations gives an improved estimation accuracy with a root mean square error of $0.65\text{mm} \pm 0.26\text{mm}$ (Ave. $\pm$ S.D.)

Key words: Pan evaporation, Hargreaves equation, Long-term variation, Climatic variation

気温のみを入力として月平均蒸発量(月平均蒸発散量)を推定できるハーグリーブス式(Hr式)に着目し、全国143地点における小型蒸発計蒸発量の推定を行った。その結果、同じく温度のみを入力とするソーンスウェイト式、ハモン式と比較して、Hr式の適合性が高いことを示した。さらに、精度の向上を図るため、Hr式に含まれる2つの定数について検討し、南西諸島を除く日本全国に適用できる定数の推定式を導いた。これらの推定式を用いることにより、Hr式がRMSE $0.65\text{mm} \pm 0.26\text{mm}$ (平均 $\pm$ 標準偏差)の精度でわが国の月平均蒸発量を推定できることを示した。

キーワード: 小型蒸発計蒸発量, ハーグリーブス式, 長期変動, 気候変動

I. はじめに

地球温暖化に伴う気候変動が指摘されるなか、将来の水資源動向を探る上で、降水量、蒸発散量あるいは蒸発量の長期変動を把握しておくことはきわめて重要である。降水量は観測密度の違いこそあるものの、長年にわたり観測が継続されているため、長期の変動傾向を把握することは比較的容易であり、多くの報告事例がある。一方、わが国における蒸発量の観測地点は全国で14地点(2002年時点)しかない。そのため、ペンマン式により推定されることが多いが、ペンマン式には気温、湿度、風速、日射量(あるいは日照率)のデータが必須であり、推定可能な地点・年数には限界がある。こうしたことから、蒸発量の長期変動を探るには蓄積のあるデータを用

いた方法が必要とされる。また、山地流域で長期の流出解析を行う際にも、利用可能なデータが限られることから、簡便で精度よく蒸発散量(あるいは蒸発量)を推定できる方法が必要とされることがある。

そこで、データの蓄積がある気温のみを入力として蒸発量を推定するハーグリーブス式に着目し、(1)わが国への適合性およびその有効性、(2)その式に含まれる定数項の値、について検討した。

なお、本稿で用いるハーグリーブス式、ソーンスウェイト式、ハモン式は、いずれも蒸発散量の推定式である。しかし、検証データとして蒸発散量データが得られないことから、データが整備されている小型蒸発計蒸発量の推定式として扱った。小型蒸発計蒸発量は、気候、植生、土壌の条件により実際の蒸発散量と同一ではないが、参考値としては極めて

*宇都宮大学農学部 〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町350

Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Mine-machi 350, Utsunomiya, Tochigi 321-8505, Japan

有用である。

II. ハーグリーヴス式の概要

ハーグリーヴス式 (Hargreaves *et al.*, 1982) は、ライシメータからの蒸発散量の推定を目的として提案され、

$$ET_o = \cdot TF_{\text{mean}} R_s \quad (1)$$

$$= \cdot TF_{\text{mean}} K_T \sqrt{TF_{\text{max}} - TF_{\text{min}}} R_a \quad (2)$$

ET_o : ハーグリーヴス式による蒸発散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),

TF_{mean} : 月平均気温 ($^{\circ}\text{F}$),

: 経験定数 ($= 0.0075 ^{\circ}\text{F}^{-1}$),

$R_s = k_T \sqrt{TF_{\text{max}} - TF_{\text{min}}} \cdot R_a$: 全日射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),

k_T : 地域定数 ($^{\circ}\text{F}^{-0.5}$),

R_a : 大気外日射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),

$TF_{\text{max}}, TF_{\text{min}}$: 月平均最高 (最低) 気温 ($^{\circ}\text{F}$),

: 蒸発潜熱 ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) (≈ 2.45)

と表される。(2)式を摂氏に換算し(3)式, 換算後の地域定数 $k_{0_{RS}}$ ($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$) を0.17 内陸部では0.16, 臨海部では0.19とされるが, 一般的に0.17が用いられる)としたのが, 一般的なハーグリーヴス式(4)式; Hargreaves *et al.*, 1985) である。

$$ET_o = \cdot (32 + 1.8 T_{\text{mean}}) k_{0_{RS}} \sqrt{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} R_a \quad (3)$$

$$= 0.0023 \cdot (T_{\text{mean}} + 17.8) \sqrt{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} R_a \quad (4)$$

$k_{0_{RS}}$: 地域定数 ($= \sqrt{1.8} \cdot k_T$; $^{\circ}\text{C}^{-0.5}$),

T_{mean} : 月平均気温 ($= 0.5 \times (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})$; $^{\circ}\text{C}$),

$T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$: 月平均最高 (最低) 気温 ($^{\circ}\text{C}$)

ハーグリーヴス式(以下, Hr 式と表す)は気温, 全日射量の項からなるため, マッキンク式 (Mackink, 1957), ジェンセン・ハイズ式 (Jensen *et al.*, 1963) などと同じく, 放射温度法に分類される。Hr 式は日射以外の項を持たないことから, 構成的には Priestley *et al.*, 1972) に近い。

Hr 式の全日射量は日較差を変数とする式により推定されるため, 放射温度法に分類される前出2式と比べて推定精度の低下は否めないが, 気温のみを入力データとしていることから, 適用時期・範囲の拡大が見込める。

ここで, Hr 式(3)式)には経験定数 および地域定数 $k_{0_{RS}}$ の2つのパラメータが含まれる。これらについて, では上述した一般的な値を用いて Hr 式の推定精度を検討し, では任意地点での値を一意

に定めることができるよう地理的条件, 気温依存性などを検討した。

III. ハーグリーヴス式の適合性および有効性

蒸発量の計算は, 1961年~1965年の5年間にかけ全国143地点の気象官署で観測された小型蒸発計蒸発量を検証データとして行った。この際, 地域定数 $k_{0_{RS}}$ は既往の研究と同じく一律に0.17, 経験定数は0.0075とした。そして, 推定結果の評価関数には相関係数 r , 平均2乗平方根誤差 $RMSE$ (Root Mean Square Error, (5)式)を用いた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Obs_i - Est_i)^2} \quad (5)$$

N : データ数,

Obs_i : i 月の観測された月平均蒸発量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),

Est_i : i 月の推定された月平均蒸発量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

また, Hr 式と同じく気温のみを入力とするソーンスウェイト式(6)式; 以下 Tw 式と表す), ハモン式(7)式; 以下 Hm 式と表す)の推定結果と比較することにより, 有効性の検証を試みた。併せて, 蒸発量の一般的な推定法である Penman 式(8)式)による推定値との比較も行った。

ソーンスウェイト式

$$E_{Tw} = 0.533 \cdot D_0 (10T_i/J)^a \quad (6)$$

$$\begin{cases} a = (492390 + 17920J - 77.1J^2 + 0.675J^3) \cdot 10^{-6} \\ J = \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (T_i/5) \right)^{1.514} \end{cases}$$

E_{Tw} : ソーンスウェイト式による蒸発量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),

D_0 : i 月の可照時間 ($12\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ を1とする),

T_i : (一般的な) i 月の月平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)

ハモン式

$$E_{Hm} = 0.14 \cdot D_0^2 p_t$$

E_{Hm} : ハモン式による蒸発量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),

p_t : 月平均気温 T_i に対する飽和絶対湿度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

ペンマン式

$$E_{Pen} = \left(\frac{R_n}{\rho \cdot c_p \cdot (T_a - T_w)} \right) + f(u_2) (e_{sa} - e_a) \quad (8)$$

E_{Pen} : ペンマン式による蒸発量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),

: 飽和水蒸気圧曲線の勾配 ($\text{hPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$),

: 乾湿計定数 ($\text{hPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$),

R_n : 純放射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),

u_2 : 地上高さ2mの風速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

$f(u_2)$: 風速関数 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) ($= 0.26 \times (1 + 0.537 \cdot u_2)$),

e_a : 水蒸気圧 (hPa), e_{sa} : 飽和水蒸気圧 (hPa)

表 - 1 推定式の比較

Table 1 Comparison of pan evaporation equations

	Penman eq.	Thornthwaite eq.	Hamon eq.	Hargreaves eq.
Correlation coefficient(r)	0.96 ± 0.04	0.77 ± 0.15 [16]	0.79 ± 0.13 [1]	0.86 ± 0.11 [126]
RMSE(mm)	0.58 ± 0.23	1.38 ± 0.32 [4]	1.22 ± 0.32 [6]	0.83 ± 0.43 [133]
Ave. $\pm$ S.D.				

The brackets show the number of best fit among the three equations out of 143 station data.

○ Evaporation Δ Pen eq — TW eq -- Hm eq — Hr eq

図 - 1 推定式による蒸発量(宇都宮)

Fig. 1 Estimated evaporation at Utsunomiya by four pan evaporation equations

推定結果の一例を図 - 1 に、全国143地点の推定結果のまとめを表 - 1 に示す。図 - 1 から、Tw 式、Hm 式の推定値が8月をピークとして単調な増加・減少を繰り返すのに対して、Hr 式の推定値は小型蒸発計蒸発量の変動に連動する傾向が認められる。この傾向はほとんどの地点において共通して見られる。また表 - 1 は、相関係数を基準にすると Hr 式による推定が143地点中126地点、同じく RMSE では133地点において最良となることを示し、Hr 式が他の2式(Tw 式、Hm 式)より優位であることが確認できる。

これらの結果は、Hr 式が比較的高い適合性および有効性をもつことを示しており、これは日射量を推定する項の存在によるところが大きいと考えられる。

しかし一方で、Hr 式とペンマン式による推定値を比べると、変動に対する応答が鈍いことは明らかであり、温度のみを入力とする推定式の限界を示唆していると考えられる。

IV. ハーグリーブス式の定数の検討

1. 地域定数 k_{RS}

Ⅲ. では地域定数 k_{0RS} を一律に0.17としたが、Hargreaves *et al.* (1985), Allen *et al.* (1998) が述べているように、地域定数は地理的条件を反映するも

図 - 2 全国の地域定数

Fig. 2 Distribution of regional coefficient throughout Japan

のであり、一律に固定されるものではない。そこで、蒸発量の実測値を目的変数、(3)式右辺の地域定数を除いた項を説明変数、定数項を0として、最小自乗法により各気象官署の地域定数 k_{1RS} を求めた。求められた k_{1RS} の0.17に対する比 ($0.17/k_{1RS}$) の全国分布を図 - 2 に示す。図 - 2 から、臨海部・島嶼部では比が1.0を下回る(蒸発量は過小評価される)官署が多く、内陸部では周辺の臨海部・島嶼部より大きい値を示す傾向があることがわかる。しかし、こうして求められた地域定数は各気象官署固有の値であり、周辺に気象官署がない地域での蒸発量推定には供することができない。この問題に対処するためには、推定精度は低下しても、地域定数は一律の値あるいは何らかの式により一意に定められることが望まれる。前述したように地域定数は内陸部・臨海部といった地理的条件との関係が窺われることから、海岸からの距離を変数とした回帰式を導くことが適当と考えられる。

そこで、Hr 式を構成する全天日射量の推定式

(a) Relationship between regional coefficients and distance from coast

(b) Histogram of regional coefficient

図 - 4 地域定数

Fig. 4 Regional coefficients

$$R_s = k2_{RS} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (9)$$

$k2_{RS}$: 地域定数

を対象として、地域定数の検討を行った。具体的には1986年～2000年の15年間に67地点の気象官署で観測された月別全日射量を検証データとし、地域定数 $k2_{RS}$ を求めた。こうして求められた結果の一例を図 - 3 に、そのまとめを表 - 2 に示す。表 - 2 から多くの地点で全日射量が良好に推定されていることが分かる。しかしその一方で、決定係数が0.5を下回る地点も4地点（名瀬、宮古島、那覇、南大東島）ある。この4地点は南西諸島に位置しているこ

図 - 3 地域定数の算出（大阪）

Fig. 3 Determination of regional coefficient at Osaka

表 - 2 地域定数の推定

Table 2 Result of estimation of regional coefficient

Determination coefficient (r^2)	~0.5	~0.6	~0.7	~0.8	~0.9	~1.0
Number of stations	4	0	5	12	25	21

Ave.: 0.86, S.D.: 0.07

とから、南西諸島に対しては(9)式、ひいてはHr式の適用に限界があることを示唆している。これはAllen *et al.* (1998)の指摘、つまり島嶼部では海の影響で日較差が小さいため(9)式の適合性に限界があるという内容と共通しており、本稿では南西諸島（具体的には地点番号47901以降の気象官署）については全日射量および蒸発量推定の対象外とした。なお、この他の島嶼部（例えば、大島、厳原）では先の4地点ほど推定精度が低くなかったため（大島 $r^2 = 0.761$, 厳原 $r^2 = 0.746$ ）ため、対象外とはしなかった。

こうして求められた地域定数 $k2_{RS}$ と海岸からの距離 DC (km) の関係を図 - 4 に示す。この両者の回帰式は

$$k2_{RS} = 0.1612 \cdot DC^{-0.0409} \quad (r^2 = 0.48) \quad (10)$$

と求められた。以降、本稿では地域定数の算出には(10)式、全日射量の推定には(10)式を(9)式に代入したものをを用いた。

また図 - 4 (b) から、一般的なHr式(4)式を小型蒸発計蒸発量の推定に用いると、地域定数 $k0_{RS}$ の値0.17はわが国では若干大きめの値となることが推測された。

2. 経験定数 ϵ

経験定数 ϵ は、(3)式を整理すると

$$\epsilon = \frac{ET_0}{32 + 1.8 \cdot T_{\text{mean}}} \cdot R_s \quad (11)$$

と表され、月毎に算出することができる。

Hr式は全日射量と気温の関数から構成され、既に気温の項が含まれているが、ここでは重ねて経験定数と月平均気温 T_{mean} との関係について検討した。

図 - 5 月平均気温と経験定数 (横浜)

Fig. 5 Monthly mean temperature and empirical coefficient at Yokohama

表 - 3 経験定数の推定

Table 3 Result of estimation of empirical coefficient

Determination coefficient (r^2)	~0.2	~0.4	~0.6	~0.8	~1.0
Number of stations	14	20	51	37	16
Ave.: 0.52, S.D.: 0.22					

表 - 4 経験定数の近似式の定数項と地理的条件の相関

Table 4 Correlation coefficient of constants in the approximation of empirical coefficient and the geographic condition

	a_j	b_j	c_j
Latitude(N°)	0.11	-0.03	-0.18
Altitude(m)	0.05	-0.15	0.22
Distance from coast(km)	-0.02	-0.09	0.07

結果の一例として、横浜における経験定数と月平均気温 T_{mean} の関係を図 - 5 に示す。図 - 5 に見られるように、経験定数は月平均気温 T_{mean} の二次式

$$j = a_j (T_{mean} - b_j)^2 + c_j \quad (12)$$

a_j, b_j, c_j : 定数 (j : 観測地点)

により比較的良好に近似できる。結果的に、全天日射量に掛ける値は月平均気温 T_{mean} の三次式により与えられることとなる。こうして求められた全国(南西諸島を除く)138地点における近似式の決定係数のまとめを表 - 3 に示す。表 - 3 が示すように、地点毎に近似式を求めると比較的良好な結果が得られる。しかし、蒸発量の観測を行っていない地点・地域で推定を行うためには、(12)式の定数が一意に定まることが望ましい。そこで、(12)式の各定数と

図 - 6 月平均気温と経験定数 (全国)

Fig. 6 Monthly mean temperature and empirical coefficient throughout Japan

緯度、標高、海岸からの距離との関係を検討したが、有意な関係は認められなかった(表 - 4)。そのため、全地点の全データ(7630個)を対象として改めて近似曲線を求め(図 - 6)、(13)式を得た。

$$\varepsilon = 0.000015 \cdot (T_{mean} - 20.533333)^2 + 0.008225 \quad (13)$$

($r^2 = 0.28$)

(13)式の決定係数 r^2 は0.28と決して良いとは言いが、全国共通の近似式を得るという趣旨からやむを得ないものと考えた。

地域定数と同様に、一般的なHr式との比較では、(13)式で、 a が0.000015 (> 0)、 c が0.008225となることから、わが国においては(13)式の経験定数0.0075が幾分小さめの値であることが推測される。このことと、.1で指摘した一般的な地域定数0.17が若干大きめの値であることを考え合わせると、一般的なHr式では2つの定数が掛け合わされることにより、両者の大小が相殺されているものと推測される。

なお、一般的なHr式の経験定数が定数であるのに対し、(13)式により求められる経験定数は月平均気温 T_{mean} の二次式となっている。これは、観測機器の差異(ライシメータ、蒸発計)が一因になっていると思われるが、比較対照となるライシメータのデータが整備されていないため、本稿では考察を行わなかった。また、大型蒸発計蒸発量に移行する1966年以降への(13)式の適合性についても、小型蒸発計と大型蒸発計の観測データを同質のデータとして扱うことが難しいことから、今後の課題とした。

3. 修正ハーグリーブス式による推定

(10)式、(13)式を(3)式に代入し、Hr式を

$$E_{Hr} = (32 + 1.8 \cdot T_{mean}) k_{2rs} \sqrt{T_{max} - T_{min}} R_a$$

$$= (0.000015 \cdot (T_{mean} - 20.533333)^2 + 0.008225) (14)$$

$$\times (32 + 1.8 T_{mean})$$

図 - 7 修正 Hargreaves 式による蒸発量 (宇都宮)
Fig. 7 Estimated evaporation by general Hargreaves equation and modified one at Utsunomiya

表 - 5 従来式と修正式の比較

Table 5 Comparison between results by the general and modified Hargreaves equations

	Penman	general	modified
Correlation coefficient (r)	0.96 ± 0.04	0.86 ± 0.11	0.89 ± 0.10
RMSE(mm)	0.58 ± 0.22	0.78 ± 0.34	0.65 ± 0.26
Nansei Islands was excluded.			Ave. $\pm$ S.D.

$$\times (0.1612DC^{-0.0409}) \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a$$

E_{Hr} : Hr 式による蒸発量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

として、改めて全国138地点 (南西諸島を除く) の小型蒸発計蒸発量の推定を行った。その計算結果の一例を図 - 7 に、一般的な Hr 式との比較を表 - 5 に示す。相関係数は0.86から0.89, RMSEでは0.78mmから0.65mm, RMSEの標準偏差も0.34から0.26と推定精度が向上している。また、ペンマン式との比較でも、相関係数は依然として差があるものの、RMSEの差は0.07mmとなり、精度の向上が認められる。

以上の結果は、地域定数、経験定数に関する検討、修正が有効であったことを示していると思われる。

V. まとめ

わが国へのハーグリーブス式の適用およびパラメータとなる定数項の検討を行い、以下の結果を得

た。

気温のみを入力して蒸発量を推定するソーンスウェイト式、ハモン式、ハーグリーブス式の3式を比較すると、ハーグリーブス式の適合性が高い。

日較差から全天日射量を推定する式の定数 (地域定数) は、海岸からの距離を変数とする累乗関数で一意に定めることができる。また、南西諸島についてはハーグリーブス式の適用が困難である。

全天日射量と平均気温 T_{mean} の積から蒸発量を求める定数 (経験定数) は、平均気温 T_{mean} の二次式で一意に定めることができる。

導出した定数の推定式を使うことにより、従来のハーグリーブス式より精度よく小型蒸発計蒸発量の推定が可能である。

謝辞: 本研究にあたり、宇都宮大学農学部石田朋靖教授には折にふれ有益な助言を頂いた。ここに記して深謝する。

引用文献

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper, **56**, pp. 60-64.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. (1963): Estimating Evapotranspiration From Solar Radiation. J. Irr. and Drain. Div., ASCE, **89** (IR4), 15-41.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1982): Estimating Potential Evapotranspiration. J. Irr. and Drain. Div., ASCE, **108** (IR3), pp. 225-230.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985): Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Appl. Eng. Agric, **1** (2), pp. 96-99.
- Makkink, G. F. (1957): Ekzameno de la Formulo de Penman. J. Agric. Sci., **5**, 290-305.
- 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**, pp. 81-92.

(受付: 2002年11月12日, 受理: 2003年4月12日)