

## 陸域環境研究センターにおける蒸発散量推定法の検討

Consideration for the Estimation Methods of Evapotranspiration  
at Terrestrial Environment Research Center

藪崎 志穂\*・田瀬 則雄\*\*・萩野谷 成徳\*\*\*

Shiho YABUSAKI\*, Norio TASE\*\* and Shigenori HAGINOYA\*\*\*

### Abstract

To estimate evapotranspiration rate near a trench covered with turf at Terrestrial Environment Research Center (TERC), University of Tsukuba, we used the Penman method. For evaluating the actual evapotranspiration, potential evaporation needs to be corrected by a reduction factor ( $f$ ). In TERC, the reduction factor has been determined by Nakagawa (1984). This value was estimated under the condition that the soil surface was covered with pasture. To investigate whether the reduction factor for pasture can be possible to use for the turf site, we compared the evapotranspiration estimated by Penman method, energy balance/eddy correlation method and energy balance/Bowen ratio (EBBR) method. EBBR was investigation at turf site (Meteorological Research Institute). Since the evapotranspiration estimated by Penman method using the reduction factor for pasture agreed with the evapotranspiration estimated by EBBR, the reduction factor for pasture can be possible to use for the turf site.

### 1 はじめに

土壌水の安定同位体比鉛直プロファイルや土壌水分量の観測結果を利用して求めた地下水涵養量の検証を行う方法の一つとして、蒸発散量の推定値を用いて流出量（涵養量）と比較する方法が挙げられる。降水量は比較的容易に実測することが可能であるが、蒸発散量を実測するには多大な労

力を要し、また特殊な機器を必要とするなど困難を伴う。従って、多くの場合、モデルによって蒸発散量を推定する方法が用いられている。

蒸発散量の推定方法にはソーンスウエイト法 (Thornthwaite, 1948) やペンマン法 (Penman, 1948) などがある。ソーンスウエイト法は月平均気温が既知であれば蒸発散量を求めることができるという簡便さを備えている。しかしなが

---

\* 筑波大学陸域環境研究センター

\*\* 筑波大学生命環境科学研究科

\*\*\* 気象研究所物理気象研究部

ら、この方法は合衆国の実測値に適合するように経験的に求められたものであるため、他の地域へ適用するには注意が必要とされる（市川，1973；樫根，1980，など）。ペンマン法は熱収支法と空気力学的方法を組み合わせた式によって可能蒸発量を推定する方法である。可能蒸発量は「植物で完全に覆われた地表面に十分な水を供給した場合に失われる蒸発散量」と定義されており（樫根，1980），大気側の要求する最大の蒸発散量を示す。従って，実際にはペンマン法によって求めた可能蒸発量よりも少ない蒸発散量しか生じ得ない。可能蒸発量から実際の蒸発散量を導くためには，経験的に求められた係数（ $f$ ）を乗じる必要がある。Penman（1948）は，イギリスのRothamsteadにおいて， $f$ は冬（11～2月）では0.6，春と秋（3～4月および9～10月）では0.7，夏（5～8月）では0.8であり，年平均値は0.75であることを示した。日本では $f$ の年平均値として0.6～0.7の値を用いる場合が多いとされているが（新井，2004），植生などによって異なってくるため，研究地域によって差異が生じる。

ペンマン法により実蒸発散量を推定する際には，同地点で経験的に求められた補正係数 $f$ を用いて計算を行うことが望ましい。Nakagawa

（1984）は筑波大学陸域環境研究センター（以下，TERCとする）において観測を行い $f$ の値を求めている（Table 1）。この研究では牧草で覆われた地表面を対象としている。しかしながら，著者らが実蒸発散量を推定しようと試みる地点（TERCトレンチ）は芝で覆われており，牧草地で経験的に求められた $f$ の値を芝植生の地点に適用できるかどうかを確認することが必要である。本研究では，TERCおよび他の研究所において，ペンマン法，熱収支法およびボーエン比法を用いて蒸発散量を求め，それぞれの値を比較してペンマン法の補正係数 $f$ 値の検討を行った。

## II 研究方法

### 1. TERCにおける観測，熱収支法およびペンマン法の概要

TERC 圃場では，正味放射計，全天日射計などが設置され，各種観測が実施されている。圃場内は春～秋まではススキ植生で覆われている。一方，蒸発散量の推定を試みる地点はTERC構内に設置されているトレンチ周辺である。トレンチ周辺は，疎らな芝で覆われている（Fig.1）。TERCでは，熱収支法およびペンマン法によって蒸発散量を推定した。

熱収支法では観測圃場に設置されている超音波

Table 1 The reduction factor in the Penman method measured at the Terrestrial Environment Research Center covered with the pasture (Nakagawa, 1984)

	$f$
January	0.3
February	0.3
March	0.3
April	0.4
May	0.7
June	0.7
July	0.8
August	0.8
September	0.8
October	0.7
November	0.6
December	0.4



Fig.1 Surrounding condition near the trench at TERC covered with turf

風速温度計の観測データを用い、次式によってまず顕熱フラックスを求める。

$$H = C_p \cdot \overline{\rho w' T'} \quad (1)$$

ここで、 $H$ は顕熱フラックス ( $\text{W/m}^2$ )、 $C_p$ は空気の定圧比熱 ( $= 1005 \text{ J/kg/K}$ )、 $\rho$ は空気の密度 ( $= 1.275 \text{ kg/m}^3$ )、 $w$ は風速の鉛直成分、 $T$ は気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )であり、 $\bar{w}$ および $\bar{T}$ はそれぞれ風速および気温の平均値、 $w'$ および $T'$ は平均値からの偏差である。 $H$ を求めた後、次式により潜熱フラックスを求める。

$$R_n - H - G = LE \quad (2)$$

ここで、 $R_n$ は正味放射量 ( $\text{W/m}^2$ )、 $G$ は地中熱流量 ( $\text{W/m}^2$ )、 $LE$ は潜熱フラックス ( $\text{W/m}^2$ )である。計算によって求められた $LE$ を蒸発の潜熱 $\lambda$ で割ることにより、蒸発散量が得られる。

ペンマン法は、次式で示される。

$$E_{PE} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - G)}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_A \quad (3)$$

ここで、 $E_{PE}$ は可能蒸発散量 ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ )、 $\Delta$ は気温 $t$ における飽和水蒸気圧曲線の勾配、 $\gamma$ は乾湿計定数、 $E_A$ は空気力学的な効果による蒸発をあらわす項で、次式によって示される。

$$E_A = (e_a^* - e_a) f(u) \quad (4)$$

ここで、 $e_a^*$ は気温 $t$ における飽和水蒸気圧 ( $\text{hPa}$ )、 $e_a$ は水蒸気圧 ( $\text{hPa}$ )、 $f(u)$ は風速の関数であり、(5)式から導かれる。

$$f(u) = 0.26(1 + 0.54u) \quad (5)$$

$u$ は高度2mの平均風速 ( $\text{m/s}$ )である。

(5)式から求められた可能蒸発散量 $E_{PE}$ に補正係数 $f$ を掛けることにより、実蒸発散量 $E$ を求めることができる。

$$E = f E_{PE} \quad (6)$$

本研究では、 $f$ の値は牧草の植生条件で経験的に求められたNakagawa (1984)の値を利用した。

## 2. 気象研究所における観測およびボーエン比法の概要

筑波大学の南約6kmに位置する気象研究所構内の圃場において、2高度間(50cmと180cm)の温度および湿度、地中熱流量、正味放射量および気圧の観測が行われている。これらの観測データを用いて、ボーエン比法により蒸発散の推定を行った。観測を実施している圃場は芝植生となっている(Fig.2)。またボーエン比法観測システムについてもFig.2に示した。

ボーエン比法は、以下の式であらわされる(Bowen, 1926)。

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{C_p(\theta_1 - \theta_2)}{\lambda(q_1 - q_2)} \quad (7)$$

ここで $\beta$ はボーエン比、 $\theta$ は気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $q$ は水蒸気圧 ( $\text{hPa}$ )であり、下付き文字の1と2は2高度におけるそれぞれの値を示している。潜熱フラックス $LE$ は、次式から導かれる。

$$LE = (R_n - G)(1 + \beta) \quad (8)$$

ボーエン比法では2高度間の水蒸気圧の差が分母となっているため((7)式)、この差が0に近くなるとボーエン比は正常な値から大きく外れた値となってしまう。従ってエラーを導く値を計算から除く必要がある。このデータのチェックは

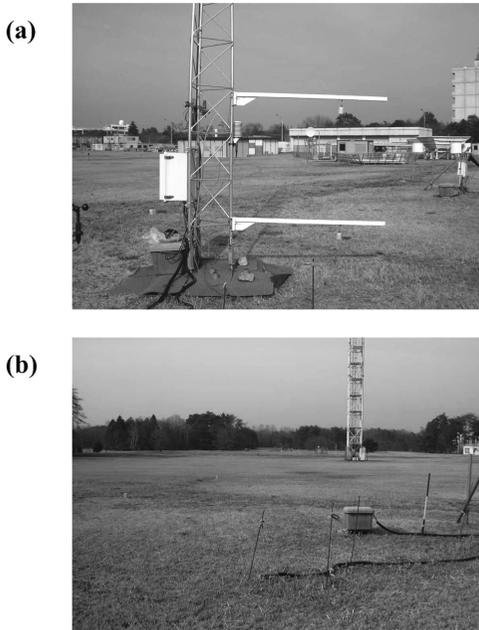


Fig.2 (a) Observation system of energy balance/Bowen ratio (EBBR) method, and (b) condition of the observation site covered with turf in Meteorological Research Institute, Tsukuba

Ohmura (1982) に基づいて実施した。

### III 結果・考察

ペンマン法、熱収支法およびボーエン比法による各推定法の月別データを Fig.3 に、2001 年の年データを Fig.4 に、また数値データを Table 2 に示した。ペンマン法および熱収支法は TERC で、ボーエン比法は気象研究所の構内で観測したデータをもとに計算を実施した。

2001 年のつくば市における総降水量は 1294.7 mm であり (TERC の観測値を利用。欠測期間については、高層気象台のデータで補完した)、この値は 1971 ~ 2000 年の 30 年間の年降水量の平年値 (1235.3 mm) とほぼ一致している (藪崎・田瀬, 2005)。Fig.3 および Fig.4 では、熱収支法による蒸発散量が他の 2 つの推定法の値よりも相対的に多くなっている。これは、観測を行っている場所がススキ植生であるため、比較的丈の短い

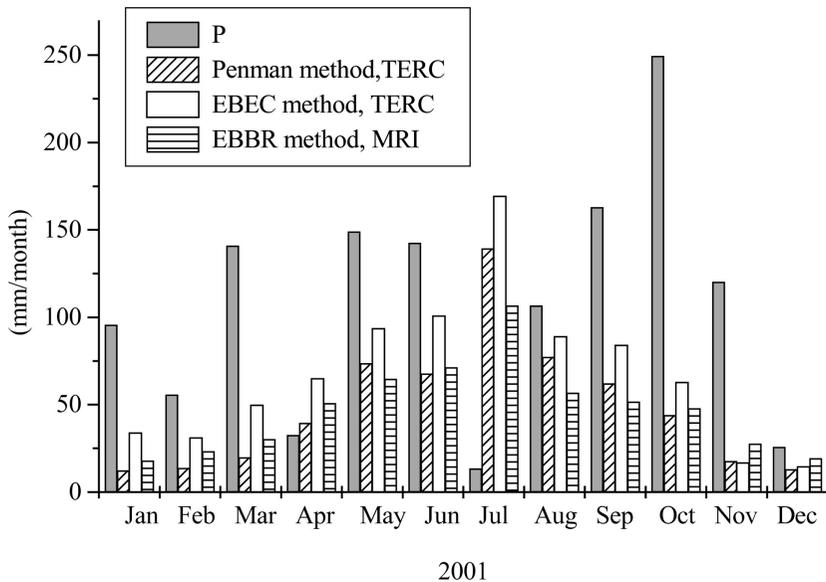


Fig.3 Calculated values of evapotranspiration determined by Penman method, energy balance/eddy correlation (EBEC) method by observation data in TERC and energy balance/Bowen ratio (EBBR) method by observation data in Meteorological Research Institute for every month of 2001 (P is precipitation amount, E is evaporation and ET is evapotranspiration)

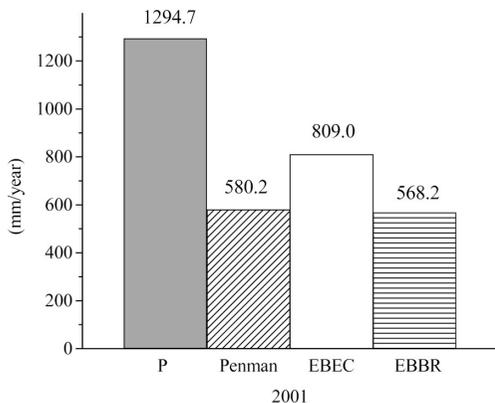


Fig.4 Comparison of the evapotranspiration among Penman method, energy balance/eddy correlation (EBEC) method and energy balance/Bowen ratio (EBBR) method of 2001

牧草や芝の植生条件に対してススキ植生条件の方が蒸散量は多く発生していることに起因している

と考えられる。熱収支法とペンマン法およびボーエン比法による推定値との差が、特に春から秋にかけて大きくなっていることから、上述のことが示唆される (Fig.3)。

一方、ペンマン法とボーエン比法による蒸発散量値はほぼ同じ値となっている。ボーエン比法の観測は芝植生の条件下で行っており、この値とペンマン法によって求めた値がほぼ一致しているということから、Nakagawa (1984) によって示された牧草地におけるペンマン法の補正係数  $f$  を芝植生に代用することが可能であると考えられる。年蒸発量は、ペンマン法では 580.2 mm、ボーエン比法では 568.0 mm であり (Fig.4)、この値は Nakagawa (1984) によって求められた年蒸発散量 (580.7 mm : 1980 年, 533.3 mm : 1981 年) とほぼ一致した。また降水量に対する蒸発散量の割合はいずれの場合も約 44% と同様の値を示して

Table 2 Calculated values of evapotranspiration determined by Penman method, energy balance/eddy correlation (EBEC) method by observation data in TERC and energy balance/Bowen ratio (EBBR) method by observation data in Meteorological Research Institute

Year	Month	Rainfall amount			Evaporation				
		observed at			Penman method		EBEC method	EBBR method	
		TERC <sup>*1</sup>	AO <sup>*2</sup>	GB <sup>*3</sup>	potential evaporation	evaporation	evapotranspiration	evapotranspiration	
		$P_{OTERC}$ (mm)	$P_{OAO}$ (mm)	$P_{CAL}$ (mm)	$E_p$ (mm)	$f^*$	$E_{PEN}$ (mm)	$E_{EBEC}$ (mm)	$E_{EBBR}$ (mm)
2001	1	95.6	102.0	117.0	41.2	0.3	12.4	33.7	17.9
	2	55.7	17.0	39.0	45.8	0.3	13.7	30.9	23.3
	3	140.9	119.5	118.0	66.1	0.3	19.8	49.6	30.3
	4	32.5	30.5	36.0	98.7	0.4	39.5	64.8	50.8
	5	149.1	165.0	186.0	105.2	0.7	73.7	93.5	64.7
	6	142.5	133.0	151.0	96.7	0.7	67.7	100.7	71.3
	7	13.5	18.0	13.0	174.2	0.8	139.3	169.2	106.6
	8	106.6	80.0	88.0	96.6	0.8	77.3	88.8	56.8
	9	162.9	166.5	106.0	77.7	0.8	62.1	83.9	51.7
	10	249.5	271.5	268.0	62.9	0.7	44.0	62.7	47.9
	11	120.2	92.0	84.0	29.4	0.6	17.6	16.7	27.6
	12	25.7	25.5	24.0	32.6	0.4	13.0	14.5	19.3
	Sum	1294.7	1220.5	1230.0	927.1		580.2	809.0	568.2

\*1: Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba

\*2: Aerological Observatory in Tateno, Tsukuba

\*3: roof top of the Geoscience building, University of Tsukuba

\*4: Meteorological Research Institute in Tateno, Tsukuba

\*5: calculated value from the sampled rainfall water amount in every event

\*6: reduction factor in the Penman method (Nakagawa, 1984)

いる。

最後に、Nakagawa (1984) による  $f$  の値と、熱収支法 (EBEC)、ボーエン比法 (EBBR) およびペンマン法による蒸発散量をそれぞれ比較して求めた  $f$  の値を、Table 3 にまとめた。Nakagawa (1984) の  $f$  値 (牧草) とボーエン比法によって求めた  $f$  値 (芝植生) は、季節的にみると若干の差異が認められるが、年間を通じてみた場合にはほとんど一致していることから、牧草地におけるペンマン法の補正係数  $f$  を芝植生に代用することが可能であるという上述の結論が示唆される。しかしながら、Nakagawa (1984) の  $f$  値 (牧草) と熱収支法によって求めた  $f$  値 (ススキ植生) を比較すると、後者の方が値は大きくなっており、現在の TERC 圃場 (ススキ植生) の蒸発散量をペンマン法によって求める場合、過去に牧草条件下で求められた  $f$  値をそのまま利用するには検討が必要であると考えられる。

Table 3 Calculated values of reduction factor ( $f$ ) determined by energy balance/eddy correlation (EBEC) method by observation data in TERC and energy balance/Bowen ratio (EBBR) method by observation data in Meteorological Research Institute

Site	$f$		
	TERC	TERC (EBEC)	MRI (EBBR)
Vegetation	<i>pasture</i>	<i>eulalia</i>	<i>turf</i>
January	0.3	0.8	0.4
February	0.3	0.7	0.5
March	0.3	0.8	0.5
April	0.4	0.7	0.5
May	0.7	0.9	0.6
June	0.7	1.0	0.7
July	0.8	1.0	0.6
August	0.8	0.9	0.6
September	0.8	1.1	0.7
October	0.7	1.0	0.8
November	0.6	0.6	0.9
December	0.4	0.4	0.6

\*1: reduction factor in the Penman method (Nakagawa, 1984)

## IV まとめ

TERC の牧草植生条件のもとで経験的に求められたペンマン法の補正係数  $f$  の値を、TERC の芝植生に適用することができるかを検討するために、熱収支法およびボーエン比法を用いて蒸発散量を求め、各値の比較を行った。その結果、TERC の芝植生とほぼ同様の植生条件で観測が行われている気象研究所のボーエン比法による蒸発散量と、牧草での  $f$  値を利用して求めた TERC における蒸発散量はほぼ一致した。このことから、TERC の芝植生条件において、牧草条件で求めた  $f$  値を代用した蒸発散量の推定が可能であることが示唆された。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、生命環境科学研究科の小谷亜由美氏には蒸発散推定法に関するご助言を頂きました。また査読者の方々には有意義なご指摘を頂きました。記して御礼申し上げます。

## 文献

- 新井 正 (2004) : 地域分析のための熱・水収支水文学. 古今書院, 309p.
- 市川正巳 (1973) : 水文学の基礎. 古今書院, 309p.
- 榎根 勇 (1980) : 水文学. 大明堂, 272p.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2005) : つくば市における降水の安定同位体比の特徴について. 水文・水資源学会誌, **18**, 590-600.
- Bowen, I. S. (1926): The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, **27**, 779-787.
- Nakagawa, S. (1984): Study on evapotranspiration from pasture. *Environmental Research Center Papers, the University of Tsukuba*, **4**, 1-87.

- Ohmura, A. (1982): Objective criteria for rejecting data for bowen ratio flux calculations. *Journal of Applied Meteorology*, **21**, 595-598.
- Penman, H. L. (1948): National evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A., Mathematical and Physical Sciences*, **193**, 120-145.
- Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, **38**, 55-94.
- (2005年5月31日受付, 2005年7月31日受理)