

確率蒸発量の特徴とその推定式—岡山市を事例として—

Stochastic evaporation in Okayama city and its estimation formula

諸泉利嗣*・宗村広昭*

*岡山大学大学院環境生命科学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1）

MOROIZUMI Toshitsugu* and SOMURA Hiroaki*

*Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University (3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530)

(Received 10 December 2021, Accepted 18 February 2022)

Abstract

In this research, we calculated the annual maximum amount of monthly evaporation in Okayama city each year, which is important when formulating the facility capacity. We also examined its yearly change and the 5, 10, 20, 50, 100-year return period evaporation. In addition, we clarified how the amount of evaporation changes depending on the averaged period and the relationship between averaged days and stochastic evaporation, because the capacities of water conveyance and distribution facilities at the end are greatly affected by the amount of evaporation in a relatively short period of time. We proposed an evaporation rate formula that expresses the relationship between the averaged day and stochastic evaporation rate. As a result, the annual maximum monthly evaporation showed a slight increase in the 54 years from 1961 to 2014, and the evaporation decreased as the averaged day increased. We also proposed stochastic evaporation formulas that express the relationship between the stochastic evaporation and the averaged day, and showed that it is possible to obtain the stochastic evaporation in a relatively short period such as the irrigation interval by using these formulas.

Key words: Penman formula, normal probability distribution, stochastic evaporation, stochastic evaporation formula

要 旨

本研究では、岡山市を例として、施設容量策定の際に重要となる各年の年最大月蒸発量を求め、その経年変化と5, 10, 20, 50, 100年確率蒸発量について検討した。また、末端の送配水施設などの容量は比較的短期間の蒸発量に大きく影響を受けることから、平均化する期間によって蒸発量がどのように変化するかを明らかにし、平均化日数と確率蒸発量の関係を表現した蒸発強度式を提案した。その結果、年最大月蒸発量は1961～2014年の54年間で微増傾向を示すとともに、平均化日数の増加とともに蒸発量は減少した。また、確率蒸発量と平均化日数の関係を表現する確率蒸発強度式を提案し、それらの式を用いれば旬程度や間断日数といった比較的短期間における確率蒸発量を求めることができることを示した。

キーワード: Penman 式, 正規確率分布, 確率蒸発量, 確率蒸発強度式

1. はじめに

畑地灌漑においては、地域条件により適切な営農・水利用形態に対応するために用水計画が立てられている。現行の土地改良事業計画設計基準・計画「農業用水（畑）」の技術書（2015）では、20～30年間のデータを対象に Penman 式により計算された月合計蒸発量をもとにかんがい期間における10年に1回程度の割合で発生する蒸発量を決める。これを基準蒸発量として、必要十分な送配水施設容量を決定することになっている。しかし、より末端の送配水施設などの容量は比較的短期間の蒸発量に大きく影響を受ける。そうした短期間における蒸発量は大きく変動し、確率特性によりそれらを表現する必要がある（三野ら, 1985）。

水工計画策定の基本となる確率水文量のうち降水については、気象庁を中心に長期的なデータが整備されており、長期的変動特性や確率雨量などに関する研究例がある（例えば、近森・永井, 2002; 近森・

永井, 2013 ; 葛葉, 2015). 例えば, 近森・永井 (2002) は岡山地方気象台で観測された 100 年間の日雨量に関して確率日雨量の経年変化などについて検討し, 確率日雨量が経年的に増加していることを示した. 一方, 蒸発散については, 長期的な観測データが少なく, 長期的な変動についての議論もそれほど多くはない. 灌漑計画を立案する際に必要となる確率蒸発量に関する検討も非常に少なく, 日本では三野ら (1985) による最大月別平均蒸発量の 10 年確率値に関する研究がみられる程度である. 近年の気候や気象条件の変動を考えた場合, 蒸発量の長期変動特性を調べることは非常に重要である. また, 畑地用水計画を策定する際に必要となる蒸発量は確率値であることから, 確率蒸発量の経年変化を検討する必要があると考える.

本研究では, 岡山市を例として, 施設容量策定の際に重要となる各年の年最大月蒸発量を求め, その経年変化, 5, 10, 20, 50, 100 年確率蒸発量について検討した. また, 上述したように末端の送配水施設などの容量は比較的短期間の蒸発量に大きく影響を受けることから, 平均化する期間によって蒸発量がどのように変化するかを明らかにし, 平均化日数と確率蒸発量の関係を表現する蒸発強度式を提案した.

2. 研究方法

2.1 解析資料

1961~2014 年 (54 年間) に岡山地方気象台で観測された日平均気温, 日平均相対湿度, 日平均風速, 日合計日照時間を利用した.

日照時間の観測において気象官署の地上気象観測装置では, 1985~1986 年より以前はジョルダン日照計で, それ以降は回転式日照計で測定されている. 機器の変更により, 観測値に不均質性が生じており, 日照時間の場所的, 時間的な差異を取り扱うときは日照時間の測定誤差を取り除く処理をして利用することが望ましいとされている. 本研究では, 気象庁 (2018) の方法を用いてジョルダン日照計の観測値を回転式日照計の値に換算した.

なお, 本研究の対象期間である 1961~2014 年の間に, 岡山市郊外の岡山大学敷地内で気象観測を行っていた岡山地方気象台は 1982 年にそこから 3km 南の岡山市街中心部へ移転している (三浦・大橋, 2017).

2.2 研究手順

本研究の研究手順の概略を以下の①~⑥に示す.

- ① Penman 式により日蒸発量を求め, この日蒸発量から月蒸発量を求める.
- ② 各年において月あたりの蒸発量が最大となる月の蒸発量を各年の年最大月蒸発量とする (Fig.1).
- ③ ②で求めた年最大月蒸発量の月における日蒸発量を大きい方から降順に並べ, t 番目までの平均値を平均化日数 t に対する蒸発量とする (Fig.2). この手法は, 例えば, 灌漑期間中の t 日間移動平均の最大蒸発量を降順に並べた場合に比べて, 半月や旬の蒸発量が過大になる可能性がある. しかし, 本研究では, 末端施設や送配水施設の容量を十分に確保するように計画することが重要であると考え, 本手法を用いた.
- ④ 年最大月蒸発量および平均化日数 t に対する蒸発量を正規確率紙にトーマス・プロットし, 分布の正規性を確認する.
- ⑤ トーマス・プロットしたデータに正規分布を適用し, 確率蒸発量を求める.

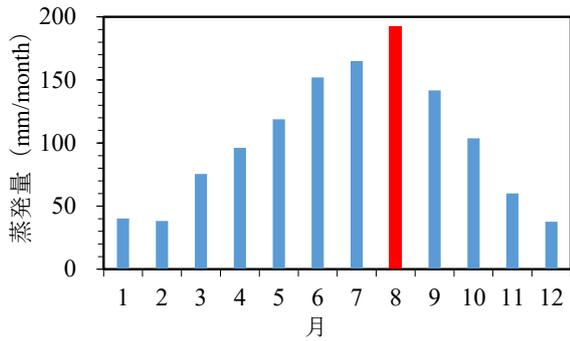


Fig.1 年最大月蒸発量 (例: 2002 年)

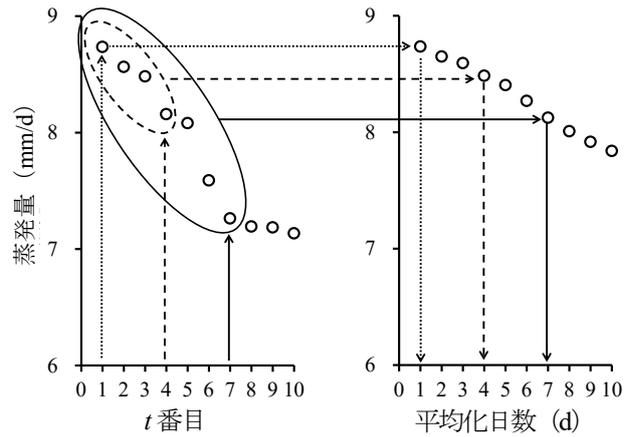


Fig.2 平均化日数に対する蒸発量の求め方

⑥平均化日数と確率蒸発量の関係式を蒸発強度式と定義し、確率年ごとに蒸発強度式中の定数 ($a \sim d$) を求める。

本研究で用いた Penman 式を次式に示す。

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{S}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2)(e_{sa} - e_a) \quad (1)$$

ここで、 E_p : Penman 式による可能蒸発量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、 Δ : 飽和水蒸気圧曲線の勾配 ($\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)、 γ : 乾湿計定数 ($=0.66 \text{ hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)、 S : 純放射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、 u_2 : 地上高さ 2m の風速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、 l : 水の蒸発潜熱 (MJ kg^{-1})、 $f(u_2)$: 風速関数 ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) [$=0.26 \times (1+0.54u_2)$]、 e_{sa} : 飽和水蒸気圧 (hPa)、 e_a : 水蒸気圧 (hPa) である。具体的な計算は、三浦・奥野 (1993) および土地改良事業計画設計基準「農業用水 (畑)」(2015) に従って行った。

3. 結果と考察

3.1 年最大月蒸発量の経年変化

各年で蒸発量が最大となる月の年最大月蒸発量の経年変化を Fig.3 に示す。決定係数は 0.1059 と低い

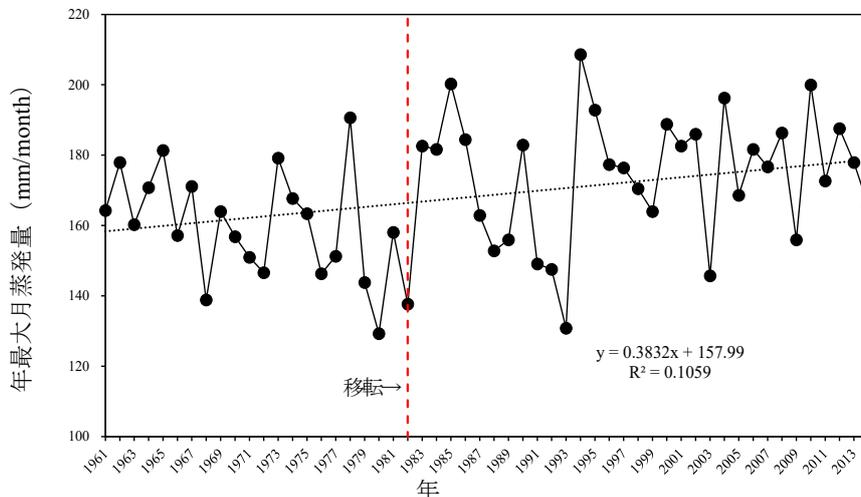


Fig.3 各年における年最大月蒸発量の経年変化

ものの回帰直線の傾きは 0.3832 となり、1961～2014 年の 54 年間で蒸発量は僅かではあるが増加傾向を示した。しかし、1982 年の観測所移転前後で比較すると移転前までの期間では減少傾向が見られ、移転後は増加傾向となったことから移転によってデータの断裂が生じている可能性が示唆された。このように長期的な変動傾向を解析する際には気象観測露場の移転に伴う観測データの連続性に十分注意を払う必要がある。

3.2 平均化日数と蒸発量

Fig.4 に平均化日数 t と t 日平均蒸発量との関係を示す。全期間 (**Fig.4(a)**) では、平均化日数 1 日では 7.79 mm/d であるのに対し、平均化日数 31 日では 5.52mm/d と 2.27 mm/d 減少した。また、標準偏差に関して 10 日以降は 0.63 mm/d でほぼ一定となった。移転前の期間 (**Fig.4(b)**) では、平均化日数 1 日では 7.16 mm/d であるのに対し、平均化日数 31 日では 5.17 mm/d と 1.99 mm/d の減少となった。標準偏差は、平均化日数 1 日の 0.41 mm/d から平均化日数 31 日の 0.51 mm/d と平均化日数が増すにつれて徐々に増加する傾向が見られた。移転後の期間 (**Fig.4(c)**) では、平均化日数 1 日では 8.16 mm/d であるのに対し、平均化日数 31 日では 5.76 mm/d と 2.40 mm/d 減少した。標準偏差の大きさは 0.65 mm/d から 7～14 日付近で 0.52 mm/d まで一度減少し、再び増加する傾向となった。

いずれの期間においても平均化日数が増すにつれ蒸発量が減少する傾向となり、降水強度と降水継続時間の関係に似た傾向を示した。

3.3 確率蒸発量

Fig.5 に 1961～2014 年の全期間と気象台移転前後の年最大月蒸発量を正規確率紙にトーマス・プロットした結果を示す。プロットしたデータがほぼ直線上に並んでいることから正規分布であると判断できる。各プロット上に描いた正規分布の直線の勾配は、相対的に移転後の方が小さくなっている。これは、蒸発量が大きいほど確率蒸発量が増加する傾向にあることを示す。また、全期間のプロットは移転前と移転後の間に位置する結果となった。

移転前後の年最大月蒸発量において有意な差が見られるかどうか両側 t 検定を行ったところ有意水準 1% で有意差がみられる結果となった。

Table 1 にトーマス・プロットを当てはめた結果得られた年最大月蒸発量の 5, 10, 20, 50, 100 年確率値を示す。いずれの確率年においても確率蒸発量は移転前に比べて移転後に 10% 程度増加した。また、1961～2014 年の全期間の確率蒸発量は移転前と移転後の中間的な値となった。

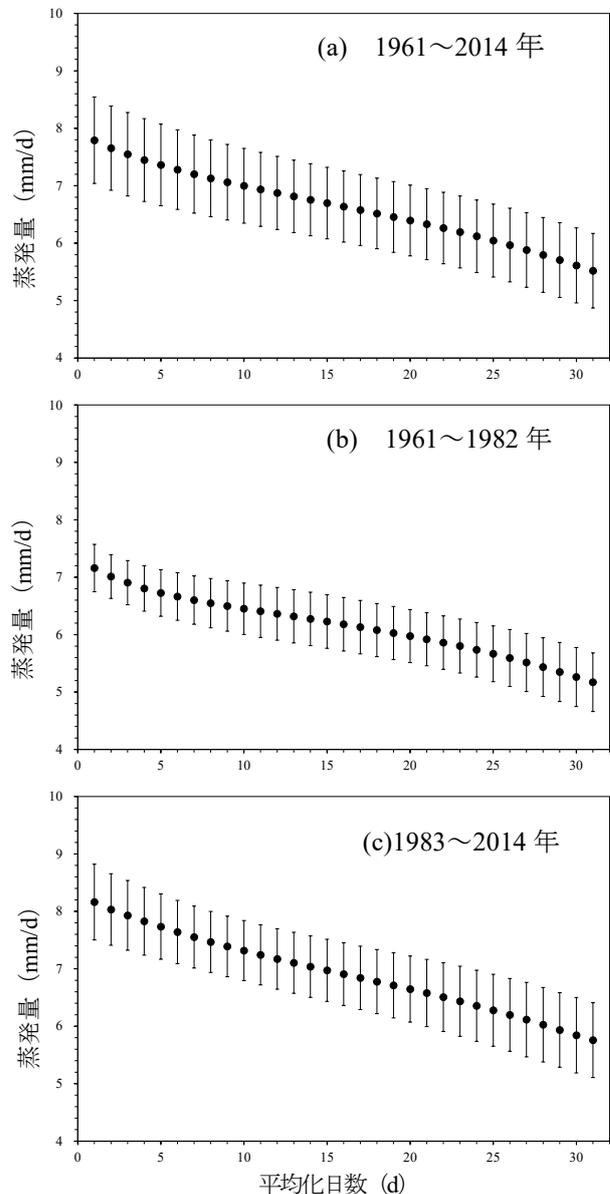


Fig.4 平均化日数と蒸発量の関係

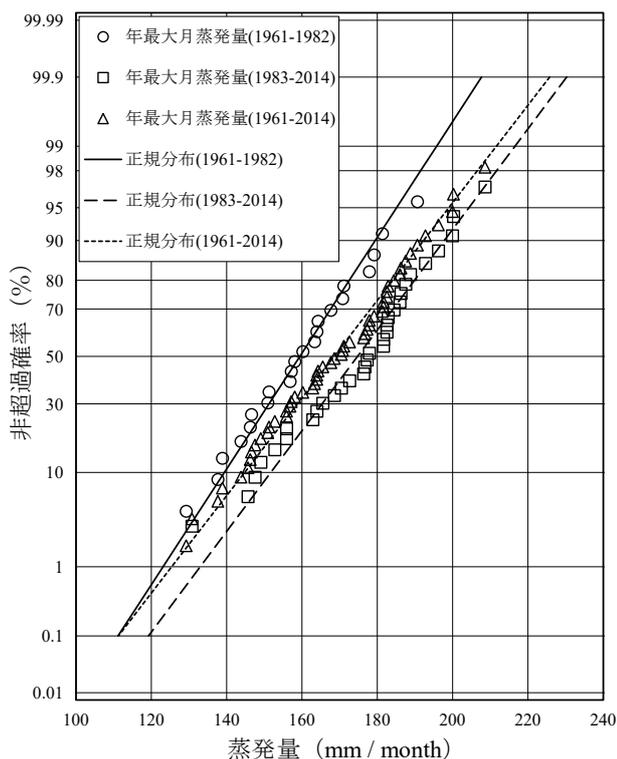


Fig.5 各年における年最大月蒸発量の分布

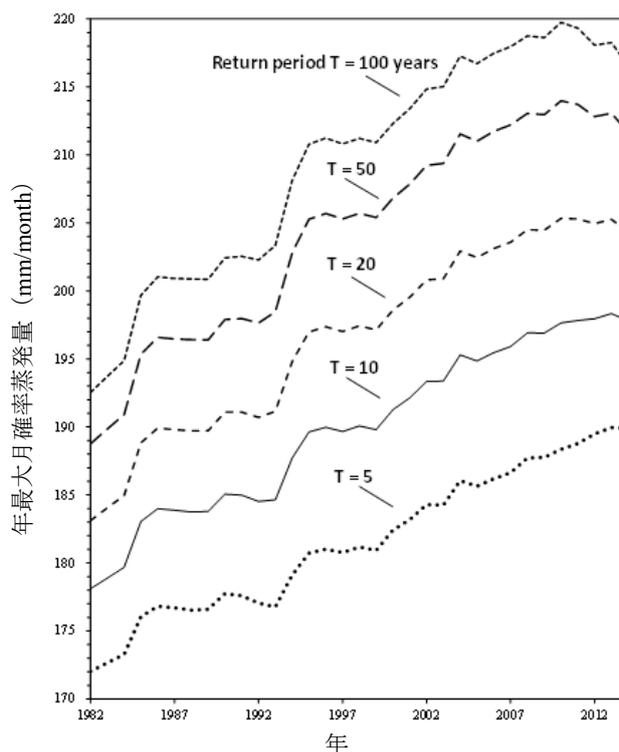


Fig.6 年最大月確率蒸発量の経年変化

Table 1 各年における年最大月確率蒸発量 (mm/month)

期間	確率年				
	5	10	20	50	100
1961-1982 (移転前)	172.6	179.4	185.1	191.5	195.6
1983-2014 (移転後)	189.9	197.8	204.3	211.7	216.6
1961-2014 (全期間)	184.1	192.3	199.0	206.6	211.6

近森・永井 (2002) は、ある年から過去 50 年または 33 年遡った期間内の年最大雨量データを用いて確率日雨量の経年変化を連続的に示した。この方法を本研究の年最大月確率蒸発量に適用した結果を Fig.6 に示す。いずれの確率蒸発量も年々増加する傾向を示した。

3.4 平均化日数と確率蒸発量

一例として、平均化日数 $t=1, 5, 10$ 日の場合の蒸発量を正規確率紙にトーマス・プロットした結果を Fig.7 に示す。いずれの平均化日数に対してもプロットしたデータがほぼ直線上に並んでいることから、平均化日数に対応した蒸発量も年最大月蒸発量と同様に正規分布であることが分かった。その他の平均化日数においても同様の結果が得られた。

Fig.8 に平均化日数と 5, 10, 20, 50, 100 年確率蒸発量の関係を示す。いずれの確率年においても平均化日数の増加とともに確率蒸発量は減少する傾向を示した。また、ある平均化日数に対する確率蒸発量は確率年の増加とともに大きくなっている。

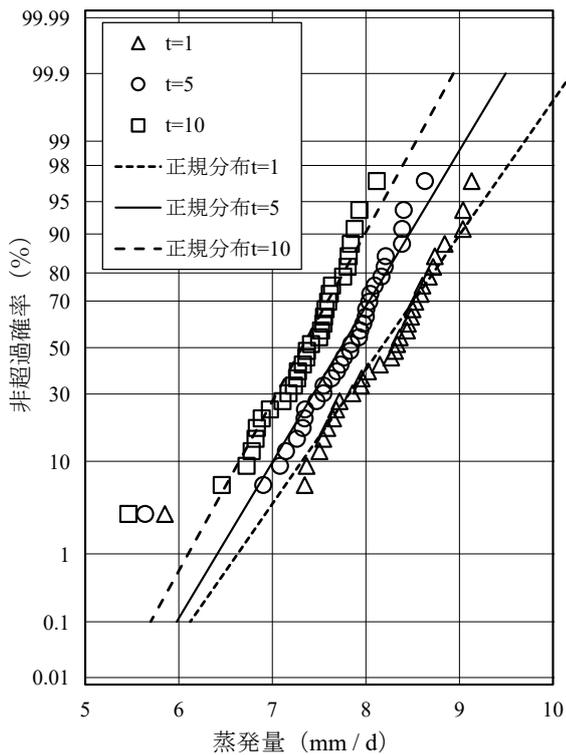


Fig.7 平均化日数 t に対する蒸発量の分布

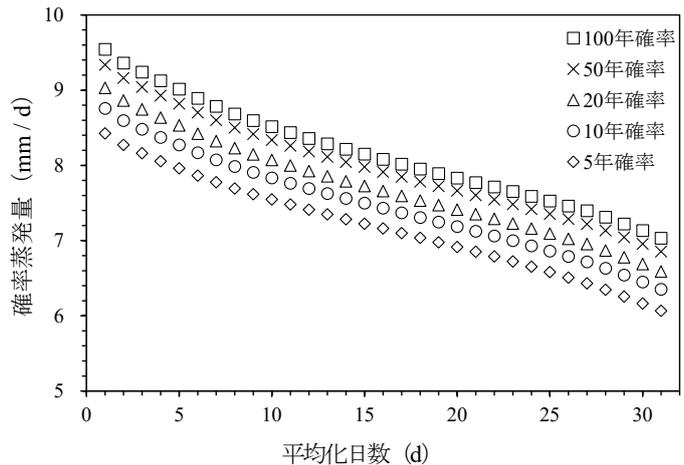


Fig.8 平均化日数と確率蒸発量の関係

3.5 確率蒸発強度式

蒸発量が平均化日数の増加によって減少することに着目し、降雨強度と降雨継続時間の関係に確率蒸発量と平均化日数の関係を当てはめることを考える。本研究では次の3つの式に適用した。

$$E_t = \frac{a}{t+b} \quad (2)$$

$$E_t = \frac{a}{t^b + c} \quad (3)$$

$$E_t = \frac{aT^d}{(t+b)^c} \quad (4)$$

ここで、 E_t : 確率蒸発強度 (mm/d), t : 平均化日数, T : 確率年, a, b, c, d : フィッティング・パラメーターである。これらの式は、降雨強度式に対応させた場合、式(2)はタルボット型、式(3)は君島型(またはクリーブランド式)と呼ばれ、また式(4)は確率年を含む形式である(荒川・寶, 2005)。

現行の設計基準では10年に1回程度は発生する蒸発量を基準にすることから、ここでは10年確率蒸発量に対して平均化日数との関係を求めた。その結果を Table 2 に示す。RMSE は式(3)の場合が 0.049 mm/d と3つの式の中では最小となり、式(4)の場合が 0.077mm/d と最大となったが、いずれの式においても RMSE は非常に小さく十分な精度で平均化日数から10年確率蒸発量を推定できることが分かった。したがって、これらの式を用いれば、旬程度や間断日数といった比較的短期間を平均期間に取った確率蒸発量を求めることができ、末端施設や送配施設の容量決定の際の基礎的資料とすることができる。と考える。

Table 2 蒸発強度式の定数と RMSE (2 乗平均平方根誤差)

蒸発強度式	定数				RMSE (mm/d)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
式(2)	817.62	91.38	-	-	0.059
式(3)	473.76	0.85	51.94	-	0.049
式(4)	23.01	22.32	0.33	0.04	0.077

4. まとめ

本研究では、灌漑計画における末端施設や送配施設の容量決定の際の基礎資料に資することを目的として、岡山地方気象台のデータを対象に年最大月蒸発量の経年変化とそれに基づく確率蒸発量について検討した。以下に結果をまとめる。

- ・年最大月蒸発量は 1961～2014 年の 54 年間で微増傾向を示したが、1982 年の観測所移転前後で比較すると移転前までの期間では減少傾向、移転後は増加傾向となったことから移転によってデータの断裂が生じている可能性が示唆された。
- ・平均化日数の増加とともに蒸発量は減少する傾向となり、降水強度と降水継続時間の関係と同様の傾向を示した。
- ・確率蒸発量と平均化日数の関係を表現する確率蒸発強度式を提案した。これらの式を用いれば、旬程度や間断日数といった比較的短期間を平均期間に取った確率蒸発量を求めることができ、末端施設や送配施設の容量決定の際の基礎的資料とすることができる。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、データ整理では岡山大学環境理工学部の勝治 誠氏 (2018 年卒) にご協力をいただいた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 荒川英誠・宝馨 (2005) : 全国における確率降雨強度式の現状と作成方法に関する一考察, 水工学論文集, 49, pp.19-24.
- 近森秀高・永井明博 (2002) : 岡山における日降雨特性の経年変化, 水文・水資源学会誌, Vol.15, No.5, pp.513-521.
- 近森秀高・永井明博 (2013) : 日本全国における日雨量の地域頻度解析, 農業農村工学会論文集, 287, pp.55-67.
- 気象庁 (2018) : 気象観測統計の解説, 133p.
- 葛葉泰久 (2015) : 既往最大値の再現期間を考慮した日降水量確率分布の推定, 水文・水資源学会誌, Vol.28, No.2, pp.59-71.
- 三野 徹・大槻恭一・丸山利輔 (1985) : 畑地用水計画のための基準蒸発量について, 畑地農業, 315, pp.2-9.
- 三浦健志・奥野林太郎 (1993) : ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細, 農土論集, 164, pp.157-163.
- 三浦 悠・大橋唯太 (2017) : 岡山地方気象台の露場移転が観測される気温に及ぼす影響について, *Naturalistae*, 21, pp.7-15.
- 農林水産省農村振興局 (2015) : 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水 (畑)」, 公益社団法人農業農村工学会, 400p.
- 田中丸治哉, 大槻恭一, 近森秀高, 諸泉利嗣 (2016) : 地域環境水文学 (地域環境工学), 朝倉書店, 210p.