沖縄地域におけるペンマン法による蒸発位の時空間分布

吉永安俊¹・酒井一人²・村上哲也³

Spatiotemporal Distribution of Potential Evaporation by the Penman Method in Okinawa Areas

Anshun Yoshinaga¹, Kazuhito Sakai² and Tetuya Murakami³

Abstract: The evapo-transpiration (ET) observed at Naha, prefectural capital of Okinawa, has commonly been used in scheduling upland-crop irrigation in any area of Okinawa. Estimating the ET endemic to an area of interest and using it in irrigation scheduling may lead to improvement of irrigation efficiency, or beneficial use of marginal water resources in Okinawa. In this context, the present paper deduces prefecture-wide spatiotemporal distribution of Penman-method-based potential evaporation (PE) from the meteorological data available in Okinawa areas, thus drawing monthly-varying iso-PE maps from which local PE-value at a particular location can be figured out. In mapping, the monthly averaged PEs estimated at a total of 18 meteorological stations are referred. However 10 stations out of 18 are devoid of humidity data that are basic needs for PE evaluation. Thus these are imported from the nearest stations to supply the lack. It is demonstrated that use of such imported data insignificantly affects PE-value. It is further recognized that PE-values as well as ET-values obtained from multiplying PE by crop coefficient not only temporally but also spatially vary, thus implying that common use of the ET-value at Naha throughout the prefecture is inappropriate in terms of beneficial use of water resources.

Keywords: Potential evaporation; Evapo-transpiration; Penman method; Irrigation scheduling

1 はじめに

沖縄県における年間水使用量の約70%は上水で、農業用水はわずか20%にすぎない。これは全国的に農業用水の使用割合が約70%であるのとは対照的である。原因として水資源の乏しさと高い畑地面積割合(98%)が考えられる。沖縄県における農業用水の準備率は約50%であり、新たな水源開発の必要性は高い。しかし各地域の水資源の賦存形態を考慮すると水源開発は困難な状況にある。このような状況において蒸発散量の適正な決定は水資源の効率利用および灌漑効率の観点から重要である。現在、沖縄県の畑地灌漑事業の計画蒸発散量として那覇の実測値が用いられている。しかし南北300km、東西800kmの広大な洋上に分布する全域において那覇の値を代用することに問題があるように思える。蒸発散量の実測は多大な費用と時間を要するため土地改良事業計画設計基準(農林水産省、1997)の改訂でペンマン(Penman)法の蒸発位を用いた蒸発散量の推定が可能となった。

このような現状を鑑み本研究は、気象データが得られる沖縄県内の18地点についてペンマン法で蒸発位を求め、それらの時間的・空間的分布を明らかにし、現在の灌漑計画における蒸発散量の問題点を検討する。なお、蒸発位とはペンマン法で求められる水面蒸発量と定義される(農林水産省構造改善局、1997)。

2 蒸発位の算出

¹ 琉球大学農学部教授 Professor, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara-Cho, 903-0213 Japan

² 琉球大学農学部助教授 Associate Professor, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru Nishihara-Cho, 903-0213 Japan

³ 沖縄県農林水産部 Engineer, Department of Agriculture, Forestry and Fishery, Okinawa Prefecture, 1-2-2 Izumizaki, Naha City, 900-8570 Japan

2.1 ペンマン法による計算

わが国におけるペンマン法による蒸発位の計算式およびプログラムは三浦ら(1993a, 1993b)の一連の研究により作成されており、本研究でも蒸発位の計算にそのプログラムを使用した。ただし、日照時間から全天日射量(I)を推定するとき必要な式 $I = Q_a(a + b \cdot n/N)$ における回帰係数 a, b は、沖縄県で全天日射量が観測されている那覇、宮古、石垣、南大東における23年間の全天日射量と日照時間の回帰式から求めたものを用いた。

ペンマン法は気象データ(気温、湿度、風速、日射量(日照時間))の他に緯度、風速計の地上高さおよびアルベドが必要である。アルベドは水面における値0.06を用いた(農林水産省、1997)。

2.2 気象データ

気象台・測候所およびアメダス地点の気象データは気象庁のwebページ、電子閲覧室からダウンロードしたものを利用した。沖縄県において、ペンマン法の蒸発位を算出するのに必要な気象データが揃う観測点は8地点(気象台・測候所)にすぎない(図1参照)。そこで本研究では湿度データが欠ける10個所のアメダス地点において隣接観測地点の湿度データを代用し蒸発位を求め、その是非を検討した。なお、アメダス地点におけるペンマン法の蒸発位の計算には表1に示す地点の湿度データを代用した。表2にはそれぞれの観測地点の緯度および風速計の地上高さを示した。

表 1: 湿度データ代用地点

アメダス地点	代用地点
伊是名、奥、金武	名護
渡嘉敷、糸数	那覇
伊良部	宮古
多良間、伊原間	石垣
大原、波照間	石垣

図 1: 気象台・測候所およびアメダス地点の位置

表 2: 気象観地点の緯度および風速計高さ

気象台・測候所			アメダス		
地点名	緯度 (度)	風速計高 (m)	地点名	緯度 (度)	風速計高 (m)
名 護	26.59	25.6	伊是名	26.93	20.4
那 覇	26.20	20.6	奥	26.83	6.5
久米島	26.34	25.6	金 武	26.45	8.4
宮 古	24.79	13.6	糸 数	26.15	10.4
石 垣	24.33	22.2	渡嘉敷	26.21	6.5
西 表	24.39	13.1	伊良部	24.83	10.4
与那国	24.46	14.4	多良間	24.67	14.0
南大東	25.83	12.9	伊原間	24.50	6.5
			大 原	24.26	8.1
			波照間	24.06	6.5

2.3 蒸発位の分布図の作成

蒸発位の等分布線図は沖縄本島地域と宮古・石垣地域が距離的に遠いため 2 つに分けて作成した。

等蒸発位点は隣接地点を結ぶ直線上で比例配分により求めた。しかし隣接地点のない海上は目測である。

なお、蒸発位は日単位で求めた 23 年間 (1980-2002 年) の月平均値である。

3 結果および考察

3.1 全天日射量推定式の回帰係数

日照時間から全天日射量(I)を推定する式として(1)式がよく用いられる(大槻, 1984)。

$$I = Q_0(a + b \cdot n/N) \quad (1)$$

ここで、 Q_0 は大気圏外日射量であり、 n は日照時間、 N は日照時間である。

三浦ら (1993a, 1993b) はペンマンが求めた値、 $a=0.18$ 、 $b=0.55$ を使用しているが、本研究では那覇、宮古、石垣、南大東の 4 地点における 22 年間 (1980-2001 年) のデータに基づいた回帰係数の平均値 $a=0.21$ 、 $b=0.53$ を用いた。

なお、これらの値は大槻ら (1984) が求めた全国 153 地点の平均値より若干大きい。

表3に沖縄4 地点およびそれらの平均値とペンマン (Penman, 1947)、大槻ら(1984)の係数を示した。

表 3: 回帰係数

係数	那覇	宮古	石垣	南大東	平均	ペンマン	大槻
a	0.20	0.21	0.21	0.22	0.21	0.18	0.19
b	0.52	0.55	0.53	0.52	0.53	0.55	0.51

3.2 アメダス地点における湿度データ代用の影響

ここでは湿度データがないアメダス地点の蒸発位を隣接する観測地点の湿度データを用いて求めることは是非を検討する。

図2 は那覇の湿度データを用いたときの蒸発位と約 50km 離れた名護の湿度データを代用したときの蒸発位の関係である。両者はほぼ 1:1 に対応し、0.99 の高い相関係数が得られた。

同様に、図4 には石垣の湿度を用いた場合の蒸発位と約 120km 離れた宮古の湿度を代用した場合の蒸発位の関係を、図6 には石垣の湿度と約 110km 離れた与那国の湿度を代用した場合の蒸発位の関係を示した。いずれもほぼ 1:1 に対応し、高い相関が得られた。

図3, 5, 7 にはそれぞれの地点における湿度データと代用湿度データを使用したときの月別蒸発位を示した。いずれの地点においても両者の差は月平均 0.03-0.15mm・d⁻¹ の範囲にあり小さい。

このような結果は、アメダス地点の多くが気象データが揃う観測地点の近傍に位置することや海洋気象の影響を受け湿度の地域差が小さいためと思われる。

したがって隣接観測点の湿度データを代用しても蒸発位に及ぼす影響は小さく、実用上問題ないと思われる。

図 2: 那覇において名護の湿度を代用した場合の蒸発位の関係(2002 年)

図 3: 那覇において名護の湿度を代用した場合の月蒸発位(2002 年)

図 4: 石垣において宮古の湿度を代用した場合の蒸発位の関係(2002 年)

図 7: 石垣において与那国の湿度を代用した場合の月蒸発位(2002)

図 5: 石垣において宮古の湿度を代用した場合の月蒸発位(2002 年)

図 6: 石垣において与那国の湿度を代用した場合の蒸発位の関係(2002)

3.3 月平均蒸発位

表4 にペンマン法で求めた 18 地点における 23 年間(1980-2002 年)の月平均蒸発位を掲げた。0.2mm・d⁻¹ 間隔で等蒸発位線を引いたのが図8 および図9 である。両図から明らかなように蒸発位は地域的に差があり、また気象要因の季節変動とともに変化する。

那覇と糸数地点の間には山がなくわずか 9km の距離であるが、4-9 月と 10-3 月では蒸発位の大きさが逆転する地域の特徴がみられる。また宮古・石垣地域でも宮古と伊良部が海を隔てた 12km の距離であるが、蒸発位の月推移に特徴がみられる。

図10, 11 は沖縄本島地域および宮古・石垣地域の月平均蒸発位の推移を示したものである。各月の蒸発位は地域により異なるが、その推移はいずれの地域も 7 月をピークとする山なりの分布を呈する。

このように蒸発位の時空間的分布変動が大きく、従来、沖縄県全域で畑地灌漑事業の計画蒸発散量として那覇の値を代用してきたことには問題があると思われる。灌漑効率および水資源の有効利用の観点から蒸発散量の時空間的分布を考慮する必要がある。

表 4: 各地の月別蒸発位(mm)

地区名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
伊是名	2.62	2.93	3.43	4.16	4.57	5.15	6.52	6.14	5.42	4.41	3.40	2.75
奥	2.11	2.43	3.03	3.76	4.20	4.80	5.76	5.34	4.63	3.64	2.74	2.17
名護	2.34	2.64	3.19	3.89	4.50	5.26	6.46	5.89	5.10	4.05	3.02	2.42
金武	2.53	2.84	3.38	4.05	4.50	4.96	6.31	6.00	5.32	4.34	3.28	2.64
那覇	2.80	3.06	3.56	4.22	4.82	5.54	6.68	6.20	5.42	4.48	3.50	2.90
糸数	3.06	3.25	3.62	4.05	4.38	4.44	5.78	5.61	5.27	4.63	3.79	3.20
渡嘉敷	2.89	3.13	3.53	4.03	4.35	4.56	5.94	5.79	5.25	4.37	3.48	2.96
久米島	2.56	2.84	3.35	4.12	4.63	5.44	6.57	6.15	5.28	4.26	3.26	2.68
伊良部	2.84	3.13	3.68	4.28	4.46	5.13	5.99	5.90	5.41	4.60	3.63	3.07
宮古	2.81	3.04	3.58	4.29	4.76	5.82	6.61	6.11	5.36	4.48	3.57	3.05
多良間	2.91	3.17	3.78	4.40	4.77	5.53	6.41	6.18	5.59	4.67	3.69	3.11
伊原間	2.87	3.11	3.66	4.28	4.62	5.45	6.39	6.19	5.46	4.46	3.60	3.00
石垣	2.84	3.08	3.75	4.50	5.06	6.27	7.17	6.59	5.65	4.51	3.56	2.96
大原	2.77	3.07	3.66	4.21	4.60	5.33	6.26	5.96	5.35	4.54	3.54	2.92
西表	2.60	2.84	3.43	4.13	4.62	5.75	6.32	5.73	4.90	4.07	3.16	2.72
波照間	3.22	3.46	4.08	4.64	4.95	5.87	6.62	6.38	5.76	4.95	3.97	3.37
与那国	3.15	3.33	3.79	4.44	4.97	6.00	6.98	6.36	5.65	4.83	3.92	3.38
南大東	2.81	3.16	3.80	4.44	4.99	5.89	6.81	6.27	5.71	4.36	3.44	2.80

図 8: 沖縄県におけるペンマン法による月平均蒸発位(mm)の分布

図 9: 沖縄県におけるペンマン法による月平均蒸発位(mm)の分布

図 10: 沖縄本島地域の月平均蒸発位

図 11: 宮古・石垣地域の月平均蒸発位

3.4 沖縄県各地の蒸発散量

蒸発散量はペンマン法による蒸発位に作物係数を乗じて算出される。したがって作物係数は、実測蒸発散量を同時期のペンマン法の蒸発位で除して求められる値である。表5に山城(1983)が那覇で測定したサトウキビの蒸発散量を用いて求めた作物係数を示した。

表5の値は、夏植は1967-1970年の4年間の平均値であり、春植は1983, 1984年の平均値である。

表 5: サトウキビの作物係数

作型・月	1	2	3	4	5	6
夏 植	0.31	0.42	0.54	0.59	0.77	0.90
春 植				0.26	0.45	0.65
作型・月	7	8	9	10	11	12
夏 植	0.71	0.82	0.84	0.94	0.97	0.94
春 植	0.79	0.86	0.88	0.80	0.77	0.57

ここで表4および表5の値から各地の夏植サトウキビに対する月平均蒸発散量を求め、那覇を基準にその割合で表したのが図12, 13である。

図12では糸数、渡嘉敷の秋冬季および南大東の春夏季を除いて、全ての地点で那覇の蒸発散量より小さく、図13では石垣、与那国、波照間で各月とも那覇の値より大きいことがわかる。

このような那覇の蒸発散量に対する割合の大小は灌漑水量の過不足を意味する。たとえば、那覇より大きい値の地域では作物に水不足が生じ、小さい値の地域では過剰供給が起こる。したがって沖縄全域の灌漑計画に那覇の蒸発散量を用いることには水資源の適正利用および灌漑効率の観点から問題がある。

図 12: 那覇の蒸発散量に対する割合

図 13: 那覇の蒸発散量に対する割合

4 おわりに

沖縄県全域における蒸発散量の推定を容易にするため、ペンマン法による蒸発位を求め、その分布図を作成した。分布図の作成にはペンマン法に必要な気象データが揃う8観測地点と湿度データが欠けるアメダス10地点で求めた蒸発位を用いた。

アメダス地点においては隣接観測点の湿度データを代用して蒸発位を求めた。湿度データ代用が蒸発位に及ぼす影響は小さく、実用上問題ないことが判明した。

蒸発位および蒸発散量は地域的に異なり、沖縄全域で那覇の値を用いることは、水資源の適正利用および灌漑効率の観点から問題であることが明らかになった。

引用文献

- [1] 気象庁電子閲覧室: <http://www.data.kishou.go.jp/>
- [2] 三浦健志・奥野林太郎(1993a): ペンマン式による蒸発散位計算法の詳細, 農土論集, 164, pp.157-163.
- [3] 三浦健志・奥野林太郎(1993b): ペンマン式の計算を容易にするための工夫と提案, 農土論集, 164, pp.165-170.
- [4] 農林水産省構造改善局(1997): 土地改良事業設計基準, 計画「農業用水(畑)」, pp.179-188.
- [5] 大槻恭一・三野徹・丸山利輔(1984): 気象資料から推定したわが国の蒸発散量 - 実蒸発散量推定に関する研究(Ⅲ) -, 農土論集, 112, pp.15-32.
- [6] Penman, H.L (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc., London, A, 193, pp.120-145.
- [7] 山城三郎(1983): 沖縄におけるサトウキビのカンガイ 用水量決定に関係ある2, 3の要素に関する研究, 琉球大学農学部学術報告, 30, pp.397-487.

〔この論文に対する公開の質疑または討議は2004年12月31日まで受付けます。〕