

簡易式による蒸発散量の推定

小葉竹重機

ESTIMATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION RATE BY THORNTHWAITE OR HAMON EQUATION

By Shigeki KOBATAKE

Synopsis

Estimation of evapotranspiration (ET) rate is an important part in the long term runoff calculation. If there is no data that can be used to calculate the ET rate of that basin, some approximation must be used as the first step. Thornthwaite or Hamon equation is a simple method to estimate the potential ET rate. The relation between actual and potential ET rate is investigated for each district of Japan. Consequently, actual ET rate can be estimated through the simple ET equations using the annual precipitation amount as the parameter.

1. ま え が き

長期流出計算を行なう際に問題となるものに、蒸発散強度としてどのような値を用いるかということがある。過去に流量資料がなく、また周囲にも参考となるような気象要素の観測資料がない場合には、何らかの値を仮定せざるを得ないが、このような時の第一近似をどのようにして求めるかについて若干の考察を行なったものである。Thornthwaite とか Hamon の式¹⁾は蒸発散能を与えるものとして知られているが、本研究では両式から得られる蒸発散能の値と実際の流域での蒸発散強度との関係を考察し、年間の降水量がパラメータとなっていることを示した。以下、実際の流域からの蒸発散量の計算法とその結果、簡易式による各地の蒸発散能の計算結果、両者の比較検討の順に述べていく。

2. 実際の流域からの年間蒸発散量

2.1 対象とした流域

実流域からの蒸発散量の推定には水収支法を用いた。資料には日本河川協会発行の流量年表と雨量年表、中国建設弘済会発行の多目的ダム管理年報を用いた。期間は昭和 53 年から 56 年までの 4 年間を対象とし、資料解析を行なう地点はつぎのような基準で選んだ。

- 1) 雪の影響が大きい北陸および北海道・東北・近畿・中国の各地方の日本海側の流域は除く。
- 2) 観測点の上流にダムを持たない。
- 3) 4 年間のうち 1 年でも流出高が降水量を上回る流域は、計算に用いている雨量の値に流域の代表性がないものとして、解析対象から除く。
- 4) 以上の基準を充たすものを、まず流量年表から選び、続いて建設省直轄管理の多目的ダムの中から、さらに空白地域がある場合には都道府県管理の多目的ダムから選ぶ。



Fig. 1. The location map of discharge stations.

5) それでも空白地域ができる場合には、上流にダムはあっても、ほとんど影響がないと考えられるような小規模のダムのみを有する流量観測所を加える。

以上の基準で選んだ地点の概略の分布を示したものが Fig. 1 であり、観測所名等をまとめたものが Table 1 である。図あるいは表から分かるように、以上のような条件を充たす流域は以外と少なく、北海道では3河川、東北では4河川5地点程度しかない。Table 1 の最後の備考欄に*印をつけた流域は、以上のような条件から若干はずれる流域であり、以下にその内容を記しておく。

網走川の本郷観測所は53年の流量年表には記載されておらず、54年からの3年間の資料で解析した。馬淵川の剣吉観測所の上流には湛水面積 0.16 km²、有効貯水量 204 万 m³ の洪水調節ダムが、阿武隈川白河の上流にはかんがい用の湛水面積 0.33 km²、有効貯水量 330 万 m³ の西郷ダムがある。入間川の菅間観測所は昭和 53 年の資料に一部欠測があるが、その期間の流量には推定値を用いた。千葉県小櫃川の亀山ダムは 55 年以前の値が不明で、56 年の多目的ダム管理年報に 6 年間の平均があるのでそれを用いた。安部川牛妻と豊川布理は 56 年の年表に記載されていないので、3 年間の資料で解析した。また庄内川多治見観測所は 55 年に欠測があるため、これも 3 年間の資料で解析した。高梁川の河本ダムは他流域からの導水があるが、直接流域である西川の流入量のみで解析している。球磨川柳瀬の上流には湛水面積 0.31 km²、有効貯水量 396 万 m³ の発電用ダムがあり、大野川犬飼の上川には湛水面積 0.14 km²、有効貯水量 215 万 m³ のダムと湛水面積 0.17 km²、有効貯水量 291 万 m³ のかんがい用ダムがある。

以上のように、上流にダムがある場合でもその規模は小さく、解析地点での水収支に与える影響は小さいと考えられる。

Table 1 には用いた雨量観測所も示している。ただし、ダム流域では多目的ダム管理年報に記載されている雨量をそのまま用いたので、とくに雨量観測所名は示していない。また、網走川、常呂川、鳴瀬川の各2地点については、同じ雨量観測所を用いている。中国地方小瀬川については雨量観測所がないので太田川井原雨量観測所の値を用いた。

Table 1. The results of water balance calculations

	river	discharge station	rainfall station	drainage area (km ²)	annual precipitation (mm/year)	annual evapo-transpiration (mm/year)	remarks
Hokkaido	Abashiri	Bihoro	Aioi, Furuume	824.4	864	424 Ave.	*
		Hongo		1120.4		366 (395)	
	Tokoro	Oketo	Oketo, Kamimuka, Rubeshibe	421.7	810	192 Ave.	
		Kitami		1394.2		319 (256)	
	Yuubetsu	Kaisei	Shirataki	1402.5	890	382	
	Average				856	344	
Tohoku	Mabuchi	Kenyoshi	Anetai, Arasawa	1751.1	1272	299	*
	Kitakami	Tase Dam		740.0	1353	370	
	Naruse	Ochiai	Kataijin, Akashi	197.2	1450	378 Ave.	
		Hatayabashi		335.0		392 (385)	
	Abukuma	Shirakawa	Mabune	172.4	1638	311	
	Average				1428	341	
Kanto	Kuji	Yamagata	Tanakura, Daigo	897.8	1367	464	
	Naka	Fujigawa Dam		70.0	1238	592	
	Kokai	Miya	Ubagai, Moka	205.0	1257	360	
	Omoi	Otome	Kusakyu, Sakuhara	760.0	1711	558	
	Kabura	Iwai	Shimonita, Minaminomaki, Obata	555.2	1122	498	
	Ara	Futase Dam		170.0	1093	408	
	Iruma	Sugama	Naguri, Ogawa	712.5	1297	619	
	Obitsu	Kameyama Dam		69.7	1451	471	
	Fuji	Funayamabashi	Kobuchizawa, Masutomi, Asakawa	484.2	1200	372	
	Average				1304	483	
Chubu	Kano	Ohito	Yugashima, Kamiomi	322.0	2858	1005	*
	Abe	Ushizuma	Umegashima, Tamagawa, Ushizuma	287.6	2854	737	
	Tenryu	Inui	Toyooka, Keta	317.0	2716	555	
		Shin-Toyone Dam		136.3	2314	680	
	Toyo	Furi	Furi	248.8	2456	373	
	Shounai	Tajimi	Okawa	367.0	1935	693	
	Ibi	Yokoyama Dam		471.0	3002	1062	
	Suzuka	Takaoka	Kabuto, Nonobori	268.6	1928	947	
	Kushida	Ryogun	Haze	388.9	2158	743	
	Shinguu	Sarugatani Dam		215.2	1819	688	
	Koza	Nanakawa Dam		102.0	3261	710	
	Average				2482	745	
Kinki	Yodo	Shimagahara	Abo, Tamataki	524.9	1437	594	
	Ina	Mushu	Utagaki	235.2	1561	772	
	Hino	Hinogawa Dam		22.4	1490	826	
	Yamato	Ouji	Katsuragi, Ouji	655.2	1300	360	
	Arita	Futagawa Dam		228.8	1764	430	
	Ichi	Ikuno Dam		49.0	1578	333	
	Average				1522	553	
Chugoku	Takahashi	Kawamoto		225.5	1291	255	*
	Numata	Kuranashi Dam		160.0	1283	426	
	Kurose	Nishina Dam		232.0	1586	841	
	Ota	Nakafukawa	Ihara	271.0	1659	446	
	Oze	Ryogokubashi	Ihara	330.0	1659	603	
	Saba	Shimaji	Hori	127.6	2164	504	
	Average				1607	513	

Table 1. The results of water balance calculations (continued)

	river	discharge station	rainfall station	drainage area (km ²)	annual precipitation (mm/year)	annual evapo-transpiration (mm/year)	remarks
Shikoku	Minato	Gomei Dam		9.3	1149	694	
	Tsuda	Ookawa Dam		4.0	1205	742	
	Kokuryou	Shikamori Dam		28.5	1790	295	
	Shigenobu	Yamanouchi	Tobe, Kukawa	55.3	1900	378	
			Tobe, Kukawa	67.1	1900	707	
	Hiji	Bouyashiki	Oda, Ose	371.5	2027	836	
		Kanogawa Dam		455.6	1733	460	
Average					1634	587	
Shikoku	Katsuura	Masaki Dam		94.7	2565	464	
	Kagami	Kagami Dam		80.0	3293	884	
	Watari	Taishou	Funato, Oonomi, Taishou	942.0	2985	1515	
		Akita	Tomiyama	145.7	2421	921	
Average					2816	946	
Kyushu	Onga	Kawashima	Ookuma	292.0	2096	436	
		Rikimaru Dam		34.1	2264	643	
	Matsuura	Mutabe	Tonomi	275.0	2241	584	
	Rokkaku	Myokenbashi	Yahazu	95.0	2246	737	
	Yabe	Hyuugami Dam		84.3	2740	732	
	Kikuchi	Bunda	Tatekado, Hiramaki	554.0	2690	1135	
	Kuma	Yanase	Haki, Kureko	521.0	2180	554	*
	Sendai	Yoshimatsu	Shiratori	284.0	3780	1390	
	Ooyodo	Iwase Dam		354.0	2536	600	
		Ayanami Dam		87.0	2726	677	
	Gokase	Miya	Hinokage, Mitate, Kamishikagawa	1044.1	2604	713	
	Oono	Inukai	Namino, Miyato	1239.0	2274	636	*
	Aki	Akigawa Dam		16.5	1626	742	
	Yamakuni	Shinharai	Oharai	464.0	2758	870	
Average					2483	746	

2.2 水収支の計算結果

Table 1 に各地点の4年間の平均年降水量と年蒸発散量を地方別に分けて示した。地方は必ずしも行政的な区分ではなく気候帯を重視し、紀伊半島の東側は中部に、西側は近畿に含め、また、四国については瀬戸内海側と太平洋側で分けた。

各地方の欄の一番下にその地方の平均も示した。網走川、常呂川、鳴瀬川については2つの観測所が同一支川上にあったり、距離がきわめて近いことから、2観測所の平均をとって1観測所のようにみなした上で地方の平均を求めている。Fig. 2 は横軸に年降水量、縦軸に年蒸発散量をとって各観測所の結果を示したもので、Fig. 3 はこれをさらに平均した各地方の値を示したものである。Fig. 3 上で中部地方と九州地方は年降水量、年蒸発散量ともに同一の値となり、全く重なって点がプロットされている。

Fig. 2, Fig. 3 とともに従来より言われている各地方の平均的傾向を示しており、妥当なものと考えられる。ただし、北海道、東北に関してはやはり雪の影響が考えられ、他の地方と同列に論じることは危険かも知れない。

3. 簡易式による蒸発散能

蒸発散能を与える簡易式としてはつぎの二つのものがよく用いられる。

1) Thornthwaite の式

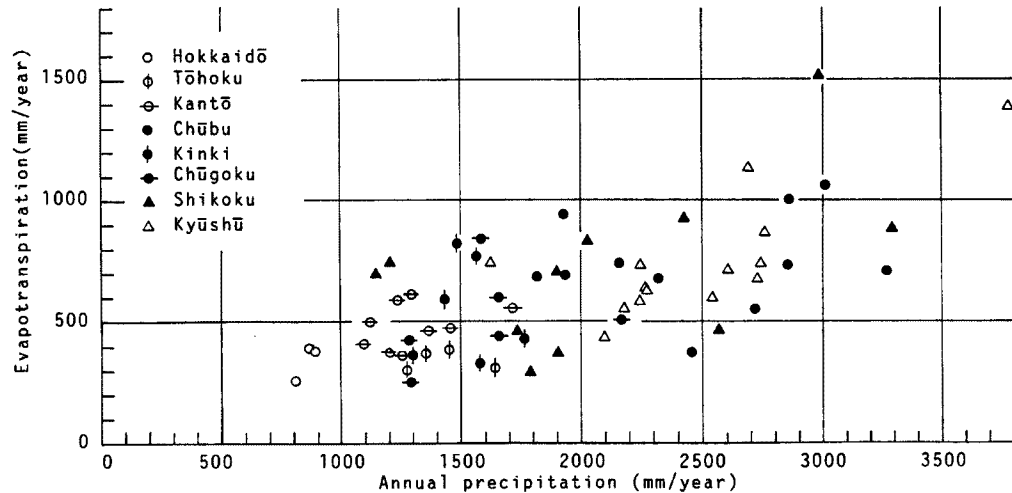


Fig. 2. The relation between annual precipitation and evapotranspiration at the stations.

$$\left. \begin{aligned} E_p &= 0.533 D_0 (10 t_f / J)^a \\ a &= 0.000000675 J^3 - 0.0000771 J^2 + 0.01792 J + 0.49293 \\ J &= \sum_{j=1}^{12} (t_j / 5)^{1.514} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 E_p : j 月の日平均蒸発散能 (mm/day), D_0 : 日照時間 (12 hours/day を 1 とする), t_j : j 月の月平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)

2) Hamon の式

$$E_p = 0.14 D_0^2 p_t \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 E_p : 日平均蒸発散能 (mm/day), D_0 : 式 (1) と同じ, p_t : 日平均気温に対する飽和絶対湿度 (mg/m^3)

以上の 2 式による蒸発散能を根室、仙台、熊谷、名古屋、大阪、広島、松山、高知、佐賀、宮崎、大分の各都市について計算した。緯度によって異なる D_0 の値と、 p_t の値は土木学会水理公式集 46 年度版の表から求めた。Fig. 4 はこの結果を月別の変化で示したものである。Thornthwaite の式は気温 0°C から 26.5°C の間で定義されるもので²⁾、 0°C では蒸発散能は 0 となる。

Thornthwaite と Hamon による値を比較してみると、いずれの都市でも同じ傾向を示し、Hamon の値が冬期には大、夏期には小の値となる。ただし、その差はそれほど大きくなく、いずれの式で計算しても良いようである。

このようにして求めた月別の日平均蒸発散能に日数を乗じて年間の蒸発散能を求めたものが、Table 2 である。月ごとの変化では若干の違いがあった Thornthwaite の値と Hamon の値も年間の総量にすると、根室、仙台を除けば全く同じ値となることがわかる。また、各都市間での差を見てみると、同じく根室、仙台を除けば他の各都市の年間蒸発散能は大体 800 mm 前後であり大きな差がないことがわかる。

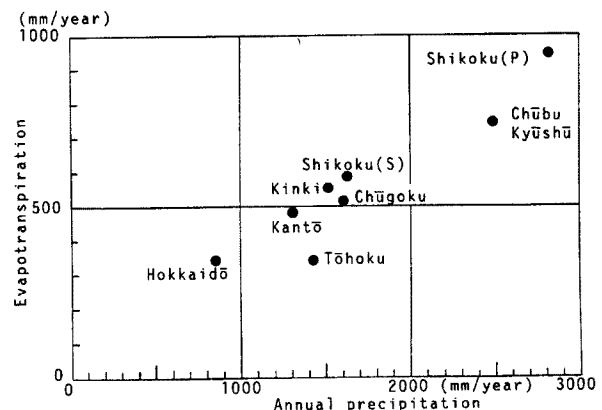


Fig. 3. The relation between the mean annual precipitation and evapotranspiration in the each district of Japan.

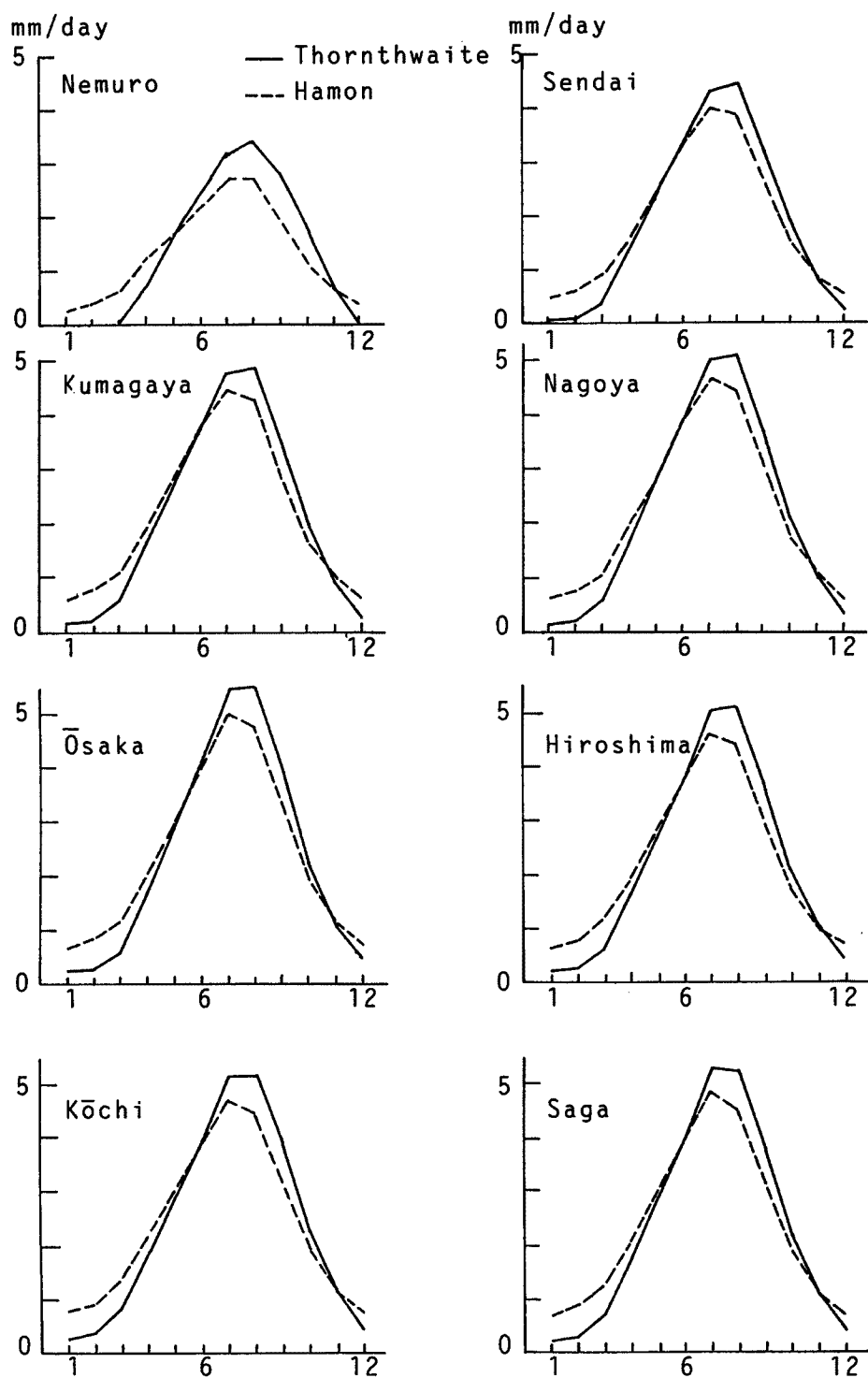


Fig. 4. The potential evapotranspiration rate at the Cities which represent the districts.

4. 実際の蒸発散量と簡易式による蒸発散能との関係

4.1 実際の蒸発散量と蒸発散能との比較

Fig. 5 は横軸に水収支法で求めた Table 1 の各地方の平均値を、縦軸に Table 2 に示したその地方を代表する都市の蒸発散能をとって示したもので○印は Thornthwaite, X 印は Hamon による結果である。前述のように北海道、東北を除けば他の地方では蒸発散能の値にそれほど差がないために、Fig. 5 の上ではこれらの地方の点はほぼ横軸に平行に並ぶことになる。したがって、このままでは式 (1), (2) による蒸発散能の値はなんら実際の蒸発散量と相関を持たないことになってしまう。

蒸発散能の定義は「密に地表面を覆った緑草地に十分な水を供給した場合に失われる蒸発散量」²⁾ であるから、降水量は「十分」でなければならず、また式 (1), (2) の定数の値そのものも日本では若干異なってくると考えられる。たとえば、Fig. 5 の中で四国の太平洋側では蒸発散能よりも実際の蒸発散量の方が大きいという結果になっている。これらのことから逆に、定数の若干の変更と、年降水量を何らかのかたちで取り込めば蒸発散能から実際の蒸発散量を推定することも可能であると考えられる。

4.2 蒸発散能から実蒸発散量を推定する方法

このような考えから、まず定数についてはいずれかの地方の蒸発散能が実際の蒸発散量に等しくなるように係数(蒸発散能に対する実蒸発散量の比は蒸発比と定義されている)を乗じて両者を一致させる。つぎに他の地方については、この基準に選んだ地方の年降水量に対する懸案地方の年降水量の比を求め、これにさきほどの基準地方の蒸発比を乗じて、これを懸案地方の補正係数としてみた。

Table 3 は以上の手順に従って基準地方として中国地方を選び、各地方の補正係数を計算したものである。ここでは Hamon の値に対する補正係数とし、その値は Table 3 の (f) 欄に示されている。また表の最後の欄には、この補正係数を Hamon 式による蒸発散能に乗じて求めた各地方の実蒸発散量の推定値を示した。Fig. 6 はこの推定蒸発散量と Table 1 の各地方の実蒸発散量との関係をプロットしたもので、Fig. 5 に比較すると北海道を除けばほぼ線形的な関係が認められるようになる。したがって大雑把であるが、上記の考え方で蒸発散能から実蒸発散量を推定することは可能であると思われる。

ただし北海道については実際の蒸発散量がどの程度になるのかさらに検討を要することと、年降水量のみを説明変数とすることの限界も検討する必要があると思われる。

4.3 月別の蒸発散強度の推定

Table 2. The amount of potential evapotranspiration at Cities which represent each district

	Thornthwaite (mm/year)	Hamon (mm/year)
Nemuro	513	482
Sendai	697	689
Kumagaya	780	778
Nagoya	814	813
Oosaka	875	873
Hiroshima	809	807
Matsuyama	835	832
Kochi	866	860
Saga	857	853
Miyazaki	877	872
Ooita	827	822

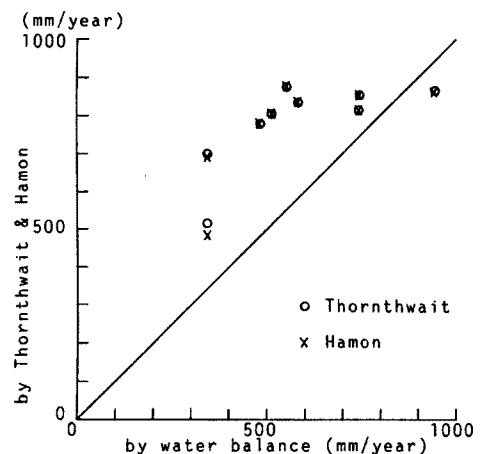
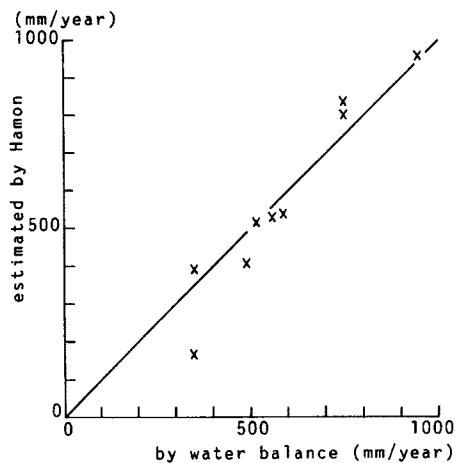
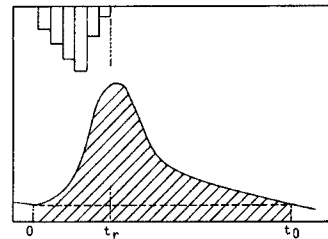


Fig. 5. The relation between the actual evapotranspiration calculated by water balance method and the potential evapotranspiration calculated by Thornthwaite and Hamon equations.

Table 3 Coefficients for the estimations of actual evapotranspiration rate using Hamon's values

district	(a) ET by water balance (mm)	(b) ET by Hamon (mm)	(c) annual precipitation (mm)	(d) (a)/(b) of Chugoku district	(e) (c)/ (b) of Chugoku district	(f) (d) * (e)	(g) (f) * (b) (mm)
Hokkaido	344	482	856		0.533	0.339	163
Tohoku	341	689	1428		0.889	0.565	389
Kanto	483	778	1304		0.811	0.516	401
Chubu	745	813	2482		1.544	0.982	798
Kinki	553	873	1522		0.947	0.602	526
Chugoku	513	807	1607	0.636	1	0.636	513
Shikoku (Seto)	587	832	1634		1.017	0.647	538
Shikoku (Pacific)	946	860	2816		1.752	1.114	958
Kyushu	746	849	2483		1.545	0.983	835

**Fig. 6.** The modified relation between the Hamon's and the actual amounts. (see Table 3)**Fig. 7.** The definition sketch for the calculation of one runoff cycle water balance.

実際の流出計算に当っては月別の蒸発散強度を与える必要があるが、式(1)または式(2)から計算される月別蒸発散能に前節での補正係数をそのまま乗じればよいと考えられる。このようにして得られる月別の蒸発散強度の推定値と、実際の蒸発散強度とを比較してみる。

まず、実際の月別蒸発散強度は一雨降雨の水収支計算で求めた。その概念図を示したものが **Fig. 7** であり、降雨の開始時刻を 0、降雨の終了時刻を t_r 、減水時の流量 Q が降雨の開始時刻の流量 Q_0 に等しくなる時刻を t_0 とする。ここで、流量が等しい時には土中の水分量も等しいと仮定し、蒸発散は降雨終了後から始まるとすれば、この降雨の水収支はつぎの式で表される。

$$\int_0^{t_r} r \cdot dt - \int_0^{t_0} (Q/A) \cdot dt = \int_{t_r}^{t_0} e \cdot dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 r は降雨強度、 (Q/A) は流出高、 e は蒸発散強度である。したがって、この計算を行なうため

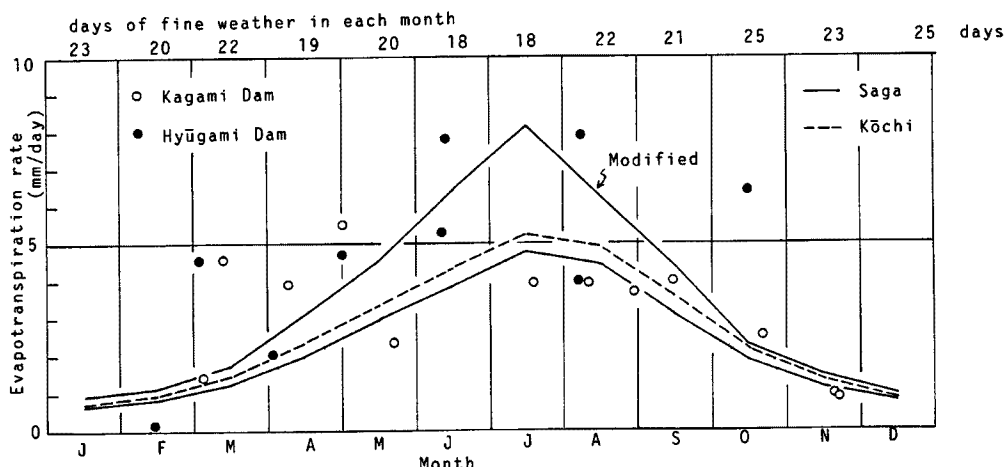


Fig. 8. The monthly evapotranspiration rate. The full and broken lines are estimated rate based on Table 3. The marks of circle are actual rates calculated by one runoff cycle water balances. The upper full line is modified rate based on days of fine weather in each month.

には時間 $t_r \sim t_0$ の途中で他の降雨があってはならない。

この計算はあまり大きな流域では精度が悪いと考えられることから、都道府県管理のダムを対象にして計算を行なった。対象ダムは高知県の鏡ダムと福岡県日向神ダムで、上記のような降雨事例を探して一雨の損失量を計算し、この損失量を $(t_0 - t_r)$ の日数で割って平均蒸発散強度とした。

その結果を示したものが Fig. 8 である。条件を充たすような降雨事例の数が少なく、プロットされた点もばらついて顕著な季節変化は現われてこないが、オーダーとしてこの程度の値であるという参考にはなる。図中の実線（下側）は佐賀の蒸発散能に Table 3 の補正係数を掛けたもの、破線は同様に高知の補正值である。プロットされた点はこれよりも大きいものがあり、これについてはさらに次のような補正が考えられる。すなわち、補正值は年間の総量がほぼ説明できるように定められたものであり、月の平均であることから、実際に蒸発散が起きている時にはもう少し大きな値となってもよい。こうしたことから、各月の日数と佐賀の各月の平均晴天日数との比を前記の補正值に掛けて、新たな補正值を作ったものが、図中の実線（上側）である。これによってある程度大きな値の説明を行なうことができる。

いずれにしても、簡易式から得られる蒸発散能に年降水量を考えた補正を加えれば、ある程度、実蒸発散強度の推定が行なえることが明らかとなった。

5. あとがき

以上、Thornthwaite とか Hamon の式から計算される蒸発散能に年降水量の補正を加えれば、実蒸発散量の推定が行なえることを明らかにしてきた。ただし、実際に長期流出計算時に蒸発散強度を推定する際には、周囲に何らかの蒸発に関する情報がある時代であり、こうした意味ではここでの成果は実用性に意味があるわけではない。簡易式から得られる蒸発散能に年降水量の補正を加えれば、実蒸発散量との相関が高くなるとの、当たり前といえば当たりの指摘に止めておいた方がよいのかも知れない。

参考文献

- 1) 土木学会編：水理公式集，土木学会，1985，p. 145.
- 2) 樫根勇：水の循環，水文学講座 3，共立出版，1973，pp. 88 - 96.