

可能蒸発散量算定Hamon式の日本列島への適用について

Appling Hamon's Potential Evapotranspiration Formula to Japanese islands

新潟大学工学部 正員 岡 本 芳 美

1. は じ め に

今から25年前、米国のW. R. Hamonは、可能蒸発量 (Potential Evapotranspiration) 算定のためのいわゆるHamon式をProc. of ASCEに発表した。Hamon式以前に発表された可能蒸発散量算定式の中で我が国において良く知られているのがThornthwaite式である。これは可能蒸発散量 (P. E.) を月単位で算定する式であり、かつ相当複雑なものである。これに対し、Hamon式は、計算しようとする流域についてその位置と計算しようとする日の暦上の日番号、ならびに日平均気温を入力するだけで極めて簡単にP. E.が計算でき、かつ米国においては相当高い精度が得られるとされている式である。そのため、最近富みに盛んになって来た長期流出計算モデルの開発研究において、流域からの日々の蒸発散量の算定方法として、我が国においてもしばしば用いられるようになって来ており、著者もその1人である。

Hamon式は、原著において、 $P. E. = CD^2 P_t$ という形で与えられている。ここで、P. E. はインチ/日の単位、Dは12時間を単位とした太陽高度から決まる理論日日照時間、 P_t はその日の平均気温に対応する大気の単位体積 (m^3) 当りの飽和水蒸気量 (g) である。係数Cは、式全体に 10^{-2} を乗じた時、米国のほぼ全域について0.55という値が得られている。P. E. をミリ/日の単位で計算しようとする時には、Hamon式の係数、すなわち蒸発散係数は、0.14となる。ただし、この場合は、式全体に 10^{-2} を乗じていない。以後、本文では、P. E. の単位としてミリ/日を用いることとし、Hamonが米国で出した0.14という値のメートル法の換算値を基準蒸発散係数と呼ぶものとする。

Hamon式は、1年間の総降水量が総蒸発散量をはるかに上廻り、流域は常に湿った状態にあって、地上に到達する太陽放射エネルギーに対応する蒸発散が起り得るということを前提にして組み立てられた半理論式であるので、我が国の流域は正にその条件に適合し、米国で得られた0.14という値の基準蒸発散係数を用いて日々の蒸発散量を算定しても、実際の蒸発散量との間にそう著しい差が出ることはないとも考えられる。しかし、Hamon式は、あまりにも単純な形をしているため、地表付近の大気と上空大気の交換現象は蒸発散現象の主たる支配要因として認められておらず、蒸発散係数という一括された概念の中で処理されている。たとえば、この様な事柄から、Hamon式の我が国の流域への適用に際しては、Hamonが米国で0.14という値を得たと同様な方法で蒸発散係数を求め、米国と日本の風土の違い、ならびにHamon式の問題点を把あくしておく必要があると考えた次第である。

本研究において、四国の高知県の鏡川鏡ダム流域、九州の鹿児島、宮崎、熊本3県にまたがる川内川鶴田ダム流域、沖縄県の福地川福地ダム流域、同じく新川新川ダム流域の4流域に関して蒸発散係数を求め、Hamon式の日本列島への適用に際しての問題点をさぐることを目的としている。

2. 日本列島に関し蒸発散係数の値を求めるに際しての問題点と対象流域の選択について

Hamon式の係数、すなわち蒸発散係数の値を求めるには、対象流域について相当数のある期間内の総蒸発散量と日平均気温の分布が基礎データとして準備されれば、あとは至極簡単で、暦からその期間内の日々の理論日日照時間Dを求めて2乗し、それにその日の平均気温に対応する大気の飽和水蒸気量 P_t を乗じてその期間内の $D^2 P_t$ の総和を求め、期間内総蒸発散量を商すれば、期間内平均値として蒸発散係数の値の生のデータが得られる。相当数の期間について求めた蒸発散係数の各値を統計処理すれば、その流域の蒸発散係数の値が決定できる。

しかし、普通、任意の期間に関し流域の総蒸発散量を求めることはできず、期間のはじめとおわりを1

水年のはじめとおわりにあわせた場合のみ、ある程度以上の大きさの流域に関しては、総蒸発散量は年降水量と年流出量の差として計算できる。また、この様な計算ができるためには、流域に相当細密に雨量観測網が組まれていることが必要で、試験流域や代表流域を除いた一般流域に関しては、水文観測が比較的充実した建設省監督下の多目的ダムは、その対象として好適である。

しかし、一般の多目的ダムに配置されている雨量観測所は、結氷・降雪期間中は閉鎖され、ダム管理所に設けられるヒータが取り付けられた雨量観測所のみで観測が継続される。そのため、おおむね10月下旬から翌年の4月中旬位までの間は、流域の出口でしか降水量のデータが得られない。また、全雨量計にヒータが取り付けられ観測が中断されることはないとしても、風に乗って舞い下りて来る降雪を雨量計でとらえてこれをこの間の降水量にすることは問題が多い。また、積雪末期にスノー・サーベイを行って積雪総量をとらえたとしても、初雪から根雪になるまでの間の降雪量の把あくに問題が残るから、結論的にいって、結氷や降雪のある多目的ダム流域において年降水量を本研究で必要とする精度で得ることは一般にむずかしく、本研究の対象流域からはずさざるを得なくなるのである。

すなわち、Hamon 式の係数の値を日本列島の流域に関して計算する研究を実施するためには、まず結氷や降雪のない流域、また、たとえあったとしてもその影響のあまり大きくない流域を見つけることが先決ということになる。日本列島では、北海道は結氷・積雪地帯、本州の日本海側と中部山岳地帯は豪積雪地帯、本州の太平洋側でも一寸と高い山は結氷や降雪がある。九州と四国も本州の太平洋側と同様である。結氷や降雪のないのは沖縄諸島位のものである。したがって、相当大きな流域で本研究の対象となり得るのは、沖縄諸島は別にして、九州や四国の平均高度が比較的低い流域ということになり、とりあえず前述の4ダム流域を対象として選択した。今後、結氷と降雪に関する基礎調査を進め、対象流域を増やして行く予定である。

3. 対象流域の概況と得られた結果

今回計算を実施した流域の概況を述べ、計算結果の表を1から4までにかかげる。なお、4対象流域共計算年度を一致させ、昭和52年より56年までの5ケ年間のデータを用いた。

(1) 鏡川鏡ダム流域 鏡川は高知市を貫流して浦戸湾に注ぐ川で、鏡ダム流域は地図上では高知市の丁度真上にある。流域の中心緯度は北緯34度、面積は80.8 km²、標高は約80 mから1,180 mの間に分布している。2ヶ所ある雨量観測所の観測値のテイセン法による平均値をもって流域平均雨量とした。鏡ダム流域は、年雨量が優に3,000 mmを超える多雨地帯である。気温は、鏡ダム地点で観測されたもので、欠測の場合は気象庁高知気象台のデータを用いて補った。なお、日平均気温は、日最低と日最高の平均値である（以後の流域についても同様）。鏡ダム流域は降雪があるが、長期間積雪となって残ることはなく、降雪が総降水量の観測に大きく影響を及ぼすことはないと考えられる。

当地方（高知気象台）の年平均相対湿度は72%、全日射量の年平均日量は14.2 MJ/m²、年間日照時間は2,236時間である。以上のデータは、理科年表昭和58年版による（以後の流域に関しても同様である）。

(2) 川内川鶴田ダム流域 川内川は鹿児島、宮崎、熊本3県にまたがる河川で、鶴田ダムは鹿児島県側に造られており、その流域は地図上では煙草で有名な国分の真上にある。流域の中心緯度は北緯32度、面積が805 km²、標高は約160 mから1,700 mに分布（最高標高は独立峰の韓国岳、次ぎに高い山は約1,200 m）する。流域内にはダム管理下の雨量観測所が16ヶ所あり、それらはほぼ流域に均等にばらまかれているので、流域平均雨量は単純平均法で計算した。気温は流域のほぼ中心の大口市で観測されたもので、欠測の場合はダム地点より下流の宮之城町のデータを用いて補った。鶴田ダム流域は、降雪は

あっても、長期間積雪となつて残ることはなく、総降水量の観測に降雪が大きく影響を及ぼすことはないと考えられる。

当地方（鹿児島気象台）の年平均相対湿度は75%，全天日射量の年平均日量は $13.6\text{ MJ}/\text{m}^2$ ，年間日照時間は2,074時間である。

(3) 福地川福地ダム流域 沖縄本島は、熱帯湿潤気候（tropical humid climate）地帯の北西太平洋地域の最北端に位置し、那覇市の年平均気温は22.4度、月平均気温の最低値が1月の16.0度、年平均湿度は77%である。ここで、特記すべきことは、全天日射量の年平均日量は $13.7\text{ MJ}/\text{m}^2$ ，年間日照時間は2,047時間で、これらの値は高知市より相当低く、鹿児島市と同レベルである。沖縄本島の気候には冬がないから、よって結氷や降雪はない。

福地川は本島北部の太平洋に注ぐ川で、福地ダム流域は、山原（やんばる）と呼ばれる低い山波の地形と熱帯ジャングルが特徴であつて、中心緯度は北緯27度、面積は 32.0 km^2 ，標高は約90mから440mの間に分布する。この流域のもう1つの特徴は、貯水池の湛水面積が流域面積の1割近くを占めていることである。流域内の雨量観測所数は4ヶ所、それらのテイセン法による計算値を流域平均雨量とした。気温は福地ダム地点の観測値を用い、欠測の場合は隣りの新川ダム地点のデータで補った。

福地ダム流域は、当初独立流域であつたが、すぐ隣りに計画された新川ダムの完成に伴つて、52年から新川ダム流域の流出量をほぼ全量トンネル導水路で受け入れる様になった。ここで、福地ダム流域に関する計算結果としてかかげた数値は、福地ダム流域単独の分についてである。

福地ダム流域に関する計算結果は、表-3の通りである。ここで、消失量と蒸発散係数の平均値については、53年度の値を除いて行った4ヶ年間の平均値をカッコ内に示す。

(4) 新川新川ダム流域 新川ダム流域は、福地ダム流域に接した細長い形の流域で、概況は福地ダム流域とほぼ同様である。なお、新川ダム流域からの流出量は、洪水時を除いてほぼ全量トンネル導水路で福地ダムの貯水池へ送られている。流域の中心緯度は北緯27度、面積は 7.4 km^2 ，標高は約170mから440mの間に分布する。雨量観測所は4ヶ所あり、それらのテイセン法による平均値をもって流域平均雨量とした。気温は新川ダム地点で観測され、欠測の場合は福地ダム地点のデータを用いて補った。新川ダム流域に関する計算結果を表-4に示す。ここで、消失量と蒸発散係数に関するカッコ内の値は、54年度の値を除いて行った平均値である。

新川ダム流域について特記すべき点が2つある。その第1点は、新川ダム流域は5ヶ年間の年平均雨量が $2,500\text{ mm}$ ，降雨日数が171日と福地ダム流域（ $2,313\text{ mm}$ ，148日）と比較して明らかに多雨であるのに、流出量は福地ダム流域よりも逆に 200 mm も少なくなっており、このため新川ダム流域の消失量は福地ダム流域の約 600 mm を 400 mm も上廻つて約 $1,000\text{ mm}$ と福地ダム流域とは異つた値を示すことである。第2点は、福地ダム流域においても似た様な現象が52年に見られるが、新川ダム流域の53年の消失量が約 260 mm と極端に少ない値を示すことである。

上述の2点については、計算結果の検討の項で解析の対象とされるので指摘のみにとどめる。

4. 各流域について得られた計算結果の検討

本研究では、蒸発散係数を計算する年度を昭和52年から56年までの5ヶ年間にそろえた。これは、天候条件をそろえ、各流域毎のデータを年度別に比較することを可能にするためである。雨量について見ると、昭和54、55年は、いずれの流域についても多雨の年であるといえよう。

各流域について降水量と流出量の差、すなわち消失量を流域からの蒸発散量であると見なすと、蒸発散量は鏡ダム流域で約 700 mm から $1,000\text{ mm}$ の間に分布し、平均値は約 900 mm で、際立って多い年少な

表-1 鏡川鏡ダム流域計算表

水 文 年	平均気温	降水日数	降 水 量	流 出 量	消 失 量	$\Sigma D^2 P_t$	蒸発散係数
5 2	16.6	112	2986	2288	698	6285	0.11
5 3	16.4	108	2728	1870	858	6194	0.14
5 4	16.8	124	3783	2835	948	6238	0.15
5 5	15.6	142	3330	2306	1024	5930	0.17
5 6	15.4	120	2603	1649	954	5876	0.16
平均/合計	16.2	121	3086	2190	896	6105	0.15

表-2 川内川鶴田ダム流域計算表

水 文 年	平均気温	降水日数	降 水 量	流 失 量	消 失 量	$\Sigma D^2 P_t$	蒸発散係数
5 2	15.2	136	2551	1868	683	5802	0.12
5 3	14.9	121	2167	1402	765	5759	0.13
5 4	15.0	142	3155	2276	879	5686	0.15
5 5	14.6	168	3423	2765	658	5686	0.12
5 6	14.3	141	2057	1521	536	5593	0.13
平均/合計	14.8	142	2671	1966	704	5705	0.13

表-3 福地川福地ダム流域計算表

水 文 年	平均気温	降水日数	降 水 量	流 出 量	消 失 量	$\Sigma D^2 P_t$	蒸発散係数
5 2	21.7	126	1749	976	773	7,707	0.10
5 3	21.1	172	3026	2656	370	7379	0.05
5 4	21.7	162	2481	1943	538	7595	0.07
5 5	21.9	151	2534	1908	626	7835	0.08
5 6	21.2	127	1775	1070	705	7462	0.10
平均/合計	21.5	148	2313	1711	602 (661)	7596	0.08 (0.09)

表-4 新川新川ダム流域計算表

水 文 年	平均気温	降水日数	降 水 量	流 出 量	消 失 量	$\Sigma D^2 P_t$	蒸発散係数
5 2	21.5	149	1878	617	1261	7584	0.17
5 3	20.8	192	3210	2285	925	7244	0.13
5 4	20.4	185	2611	2352	259	6980	0.04
5 5	20.1	177	2849	1547	1302	6900	0.19
5 6	21.1	149	1951	755	1196	7334	0.16
平均/合計	20.8	171	2500	1511	989 (1171)	7208	0.14 (0.16)

備考 ① 日平均気温 = (日最高気温 + 日最低気温) ÷ 2

② 消失量 (蒸発散量) = 降水量 - 流出量

③ 蒸発散係数 = 蒸発散量 ÷ $\Sigma D^2 P_t$

④ 降水量, 流出量, 消失量の単位はmm

い年はない。鶴田ダム流域は約540mmから890mmの間に分布し、平均値は約700mmで、分布の傾向は鏡ダム流域と同様であるが、平均値からの偏差は多くなっている。しかし、これが沖縄本島の福地ダム流域と新川ダム流域になると一寸と様子が違って来る。まず、福地ダム流域について見ると、約370mmから770mmの間に分布し、平均値が約600mmである。そして、最低値は370mmと相当低い値を示している。また、53年を除いた平均値の約660mmは、鶴田ダム流域とほぼ同レベルである。新川ダム流域では、約260mmから1,300mmの間に分布し、平均値は約990mmで、最低値は福地ダム流域よりさらに小さく、この様に小さな値が出たことについては理解に苦しむものである。この54年のデータを除いた平均値は約1,170mmで、福地ダム流域の約1.8倍となり、もしこの様に多量の蒸発散量が比較的降水量の少ない関東地方で起こったなら川は水が殆ど流れないことになる。この様に異常とも思える結果が福地ダム流域と新川ダム流域で出たが基礎データに誤りはないものと思われる。

次に $\Sigma D^2 P_t$ の値について見ると、4流域共、各年度毎に似かよった値を示し、平均気温の高い年はやや大きく、低い年は相応して小さくなって、蒸発散量に見られる大きな値のバラツキはなくなる。緯度が34度と一番高い鏡ダムの流域が平均約6,100で、緯度が低く理論日日照時間がより長い鶴田ダム流域の平均約5700より大きな値を示している。これは、鶴田ダム流域の年平均気温が1.4度も低いためで、Hamon式では気温効果が大いことを示している。福地ダム流域と新川ダム流域が平均約7,600と7,200という高い値を示すのは、緯度の低さと高い平均気温から来ていることで当然のことであるが、それに対応して福地ダム流域では蒸発散量が大きくなっていないのは問題点である。

消失量を蒸発散量と仮定して計算したのが蒸発散係数の値で、鏡ダム流域に関しては0.15、鶴田ダム流域に関しては0.13、福地ダム流域に関しては0.09、新川ダム流域に関しては0.16という平均値が得られた。今、ここで問題になるのは、相隣れる似た様な流域である福地ダム流域と新川ダム流域では全然違った結果が出たことで、その原因はすでに指摘される様に、福地ダム流域における平均約660mmという鶴田ダム流域より小さな蒸発散量の数値と新川ダム流域の平均約1,170mmという4流域中で最大の数値にある。基礎データには疑問点がないので、どうしてこの様に大きな差が両ダム流域の間で出たかを次で検討して見よう。

先にも数値としては示して来たが、再度、表で示したのが表-5の高知市、鹿児島市、那覇市の気候比較表である。各ダム流域におけるこれらの数値も表の数値と似た様な相対関係を示すであろう。この表を用いて、各ダム流域の蒸発散量について再度検討して見たいと思う。

表-5 気 候 表 (年平均値)

	緯 度	気 温	相 対 湿 度	全 天 日 射 量	日 照 時 間	当 該 流 域 名
高 知 市	北緯 34°	16.3℃	72%	14.2MJ/m ²	6.12 hr	鏡ダム流域
鹿 児 島 市	32	17.3	75	13.6	5.68	鶴田ダム流域
那 覇 市	27	22.4	77	13.7	5.61	福地・新川ダム流域

今、新川ダム流域を除外して検討して見ると、気温の高さと理論日日照時間の長さから考えてみれば、福地ダム流域の蒸発散量が一番多くなるはずなのに実際には鶴田ダム流域と同レベルであることは、両流域の全天日射量と日照時間がほぼ同レベルであることから説明がつく。鏡ダム流域は、4流域中で全天日射量と日照時間が最大で、逆に湿度が最小であるから、蒸発散量が最大値になったのは当然のことと説明できる。

次に、新川ダム流域を加えて考えて見ると、新川ダム流域の蒸発散量の多さは、気候比較と一致せず、別に原因を求めざるを得なくなる。新川ダム流域、ならびに周辺の地質は砂岩と変堆積岩(千枚岩)で、

流域の形状は細長く、面積が小さいので、流域からのモレ出しと他流域からのモレ込みのバランスがとれず、モレ出しが過大になって、消失量が大きくなり、その結果が見かけの大きな蒸発散量となつてはねかえて来たという見方も可能になる。

また、観点を変えて、福地ダム流域の湛水面積率は7.8%と他の流域と比べ著しく大きいので、この大水面の存在が流域からの蒸発散を低く押え込んでいる可能性もなきにしもあらずである。

残念ながら、福地ダム流域の蒸発散量の値が低くすぎて、新川ダム流域のその値が高かすぎるという問題に対して著者は、はっきりと理由を述べ結論を出すことが出来ないが、一番可能性のあるのは、新川ダム流域からは過度のモレ出しが起こっているためではなかろうか、と考えている。

最後に、福地ダム流域については53年、新川ダム流域については54年に極端に小さな値の消失量が計算されたことの原因については、著者は言及するものを持たない。基礎データの検討から改めて行つて見たいと思う。

5. 結 論

鏡、鶴田、福地、新川の4ダム流域について昭和52年から56年までの5ケ年間についてHamon式の蒸発散係数の値を求める計算を行った。その結果は、表1～4の最右列に示されている。

Hamon式を日本列島の流域に適用するに際しては、原式のままで行うことは不可で、流域の条件に応じて係数を補正する必要がある、この補正係数についての今後の研究が待たれる。

謝 辞

本研究の実施に当って、基礎データの提供を通じて御協力いただいた鏡ダム管理所・鶴田ダム管理所・福地ダム管理所の方々に本紙をお借りして厚く御礼申し上げる次第であります。

参考文献

- (1) V.T.Chow, Editor-in-chief: "Handbook of Applied Hydrology", McGraw-Hill, 1964, pp.11-23~33.
- (2) W.Russel Hamon, Estimating Potential Evapotranspiration, Jour.of H.D., Proc.of ASCE, May, 1961, pp.107~120.