

山地河川流域における日蒸発散量推定に関する一考察

A Study on Estimation of Daily Evapotranspiration from Mountainous River Basin

山本好克*

By Yoshikatsu YAMAMOTO

This paper presents on a new method for estimating of daily evapotranspiration from mountainous river basin.

First, the actual daily evapotranspiration is estimated by using the observed daily evaporation at a mountainous site. Then, the Hamon's formula under the daily rainfall conditions is presented, and the parameters of the formula are calibrated by the estimated daily evapotranspiration. Finally, the expression is applied to two mountainous river basins, and a validity of the method for estimating the actual daily evapotranspiration and a practical utilization of the improved expression are discussed.

keywords : evaporation, evapotranspiration, Hamon's expression

1. はじめに

水資源の開発や管理にとっては、河川流域における長期流出機構の解明とモデル化が重要な課題である。長期流出機構では、降水量、流出量と共に流域貯留量変動、蒸発散量が重要な要素となる。前二者については、直接的な観測手法によってかなり精度よく把握することができる。後二者のうち流域貯留量変動については、降雪のほとんどない流域では水収支期間を水文年にとると無視しうほど小さな量であると考えることができる。蒸発散量については、直接的な観測手法は確立されていないが、現状では大別して、現場での測定とモデルによる推定の2つの方法によって把握されている。しかし、いずれにおいても、長期流出モデルなどに必要となる流域レベルでのしかも日単位の蒸発散量の把握に関してはまだ検討すべき多くの問題が残されているように思われる。

本研究は、わが国の水資源の大部分が山地部に依存している実状と観測システムの現状とから、山地河川流域における実用的な日蒸発散量の推定法について、精度の高い長期の水文気象観測が行なわれた建設省土木研究所の神流川試験流域を対象として検討したものである。ここではまず、観測で得られた日蒸発量を用いた日蒸発散量の推定を試みた。次に、推定された日蒸発散量を観測値とみなし、それを基本的な水文気象観測項目のみを用いたモデル式で帰属している。こうして、得られたモデル式によつて推定された日蒸発散

* 正会員 工修 群馬工業高等専門学校助教授 土木工学科

(371 群馬県前橋市鳥羽町 580)

量の再現性また他の山地河川流域への適用性を検討することにより、蒸発計蒸発量を用いた日蒸発散量推定方法の妥当性および回帰モデル式の適用性と有用性について考察している。

2. 神流川試験流域における日蒸発散量の推定

建設省土木研究所は、利根川水系神流川若泉地点上流域373.6 km²を試験流域と定め、31ヶ所の雨量観測所と1ヶ所(若泉地点)の流量観測所を設置し、1946～1960年の13年間の雨量・流量の観測¹⁾を、また、1955年9月～1961年5月の6年間は、若泉地点において蒸発・気温・湿度等の観測²⁾を行なった。ここでは、蒸発計蒸発量を用いた日蒸発散量の推定について検討する。

蒸発散量を現場で直接的または間接的に測定する方法³⁾には、1) 流域水収支法、2) ライシメータ法、3) 土壌水分変化法、4) 熱収支法、5) 水蒸気流動法、などがある。1)以外の方法は測定が繁雑である上、流域1地点での値の代表性などの問題が未解決の現状では、1)による値が最も信頼できるものと考えられる。

2・1 年水文気象量の特徴

神流川試験流域は、広葉樹林と針葉樹林におおわれた降雪のほとんどない秩父古生層帯の山地である。

表-1は、1956～1960年の(流域平均)年降雨量(mm)、年流出量(mm)、年蒸発量(mm)、年平均気温(℃)、および年消失量(=年降雨量-年流出量)(mm)である。

年降雨量は、1000～1700mm、平均1300mmと全国平均1800mmに比べて少ないが、年消失量(年蒸発散量)400mmは全国平均500mmと比べてさほど差はないようである。

年流出率(=年流出量/年降雨量)は、0.54(1960年)～0.81(1959年)と巾があり、かつ降雨量が多くなると大きな値となっている。このことは、年蒸発散量は、降雨量が多くなると少なくなることを意味している。この傾向は蒸発量にも見られ、一般に考えられている気温よりも降雨量との関係がより大きいようである。

2・2 日蒸発散量の推定

水面蒸発は、日射との関係がよく、蒸発計蒸発量として計測することも容易であるため、蒸発散量算定の基準とされている。すなわち、蒸発散量の決定には、蒸発計蒸発量とライシメータや流域水収支から得られた蒸発散量との比率が適用されている。わが国ではこの比率が0.6～0.7になると考えられているが、表-1の年消失量と年蒸発量との比の値(蒸発散量比率)は、0.34～0.47(平均0.43)と小さな値となっている。

金子⁴⁾は、寒冷地と積雪地以外の各地にはほぼ適用できる蒸発計蒸発量に対する蒸発散量比率の標準値(水田以外)として表-2を与えている。年平均は、0.6～0.7となりわが国で考えられている値と一致している。

表-2 蒸発計蒸発量に対する蒸発散量比率

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12月
.4～.5	.4～.5	.5～.6	.6	.6～.7	.7	.8	.8～.9	.8～.9	.8	.6～.7	.5～.6

ここでは、金子による値を基準(基準蒸発散量比率とよぶ)として、試験流域での蒸発散量比率を求め、この値を用いた日蒸発散量の推定を試みる。

試験流域における各水文年の蒸発散量比率は、次式で求めることができる。

$$f_i = f_o \cdot \frac{f'_i}{\bar{f}} \quad \text{..... (1)、} \quad \text{ただし} \quad f_o = \frac{E_{p.o.}}{E_{v.o.}}, \quad \bar{f} = \frac{1}{m} \sum_i f'_i, \quad i=1 \sim m \text{ (月数)}$$

ここに、 f_i : i 月の蒸発散量比率、 f'_i : i 月の基準蒸発散量比率、 $E_{p.o.}$: 年蒸発散量(年消失量)、 $E_{v.o.}$: 年蒸発計蒸発量、である。

表-3には、水文年ごとに式(1)で求めた蒸発散量比率の最小値と最大値および5年間の平均値を示して

ある。なお、基準蒸発散量比率は上限値を採用した。

表-3 試験流域における蒸発計蒸発量に対する蒸発散量比率

水文年	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
1956		.25	.25	.29	.29	.34	.34	.39	.44	.44	.39	.34	.29	.34
~		∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫
1960		.34	.34	.40	.40	.47	.47	.54	.61	.61	.54	.47	.40	.47
平均		.31	.31	.37	.37	.43	.43	.50	.56	.56	.50	.43	.37	.43

各水文年の日蒸発散量は、式(1)の f_i を用いて次式で求めることができる。

$$E_{\text{ポイル}} = f_i \cdot E_{\text{ポイル}} \dots\dots (2)$$

ここに、 $E_{\text{ポイル}}$: i 月 ℓ 日の蒸発散量、 $E_{\text{ポイル}}$: i 月 ℓ 日の蒸発計蒸発量、である。

図-1は、式(2)で求めた日蒸発散量の時系列特性の一

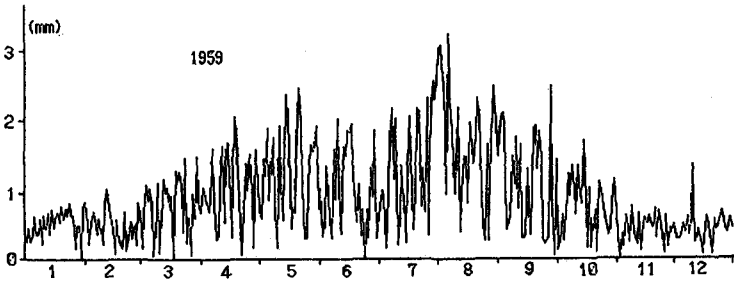


図-1 日蒸発散量推定値

例である。流域水収支法で求められた蒸発散量と観測で得られた蒸発量を用いて推定された日蒸発散量は、かなり信頼できるものと考えられる。

3. Hamon 式の改良による日蒸発散量推定モデル

日蒸発散量は、流域平均年降雨量、年流出量と日蒸発量が与えられれば、2.の方法によって推定できる。しかし現状では、対象流域において前二者はともかく後者はほとんど得られていない。ここでは、式(2)で求められた神流川試験流域の推定値を観測値と仮定し、日蒸発散量を推定するモデルについて検討する。

何らかの気象観測値を用いて蒸発散量を推定するモデル⁵⁾には、1) Thornthwaite 式、2) Hamon 式、3) Penman 式、などがある。Hamon 式は、夏期にはやや過大、冬期にはやや過少の値を与えるといわれる Thornthwaite 式を改変したもので、気温のみの気象観測値を用いて簡単に日蒸発散能が推定できる。Penman 式は、かなり物理的な式であるが、日照時間、気温、湿度、風速などの多くの気象観測値を必要とする。砂田ら⁶⁾は、土壌水分量変化を考慮した補正関数を用いて、通常気象資料のみから林地流域の日蒸発散量を推定する物理性と実用性を備えた拡張 Penman 式を提案しているが、物理現象の不確定性や観測システムの現状では、特に実用性においてまだ不十分であるように思われる。

3・1 Hamon 式の改良

Hamon 式⁷⁾は、植物でおおわれかつ土壌が十分に湿潤である流域からの蒸発散能を推定しようといわれ、次式で示されている。

$$E.P. = C D^2 P_s \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $E.P.$: 日平均蒸発散能(mm/day)、 C : 係数、 D : 日照時間(12hr/dayを1とする)、 P_s : 日平均気温に対する飽和絶対湿度(g/m³)、である。

米国では、係数 C は一定とされ 0.14の値(m単位に換算して)が与えられている。しかし、地理・地形などが異なるわが国においてもこの値が同じであるかどうかは、検討しておく必要がある。

試験流域における各水文年の係数 C 値は、式(3)の $E.P.$ に年蒸発散量(年消失量)を代入して計算してみると、0.054~0.082(平均0.067)となり、米国の値よりもかなり小さい。なお、日照時間 D は前橋市の日出入⁸⁾を、また飽和絶対湿度 P_s は若泉地点の日平均気温を用いて計算した(以後、試験流域では同様である)。

図-2は、式(3)において $C=0.067$ (平均値)として求めた推定値を観測値と比較した一例である。日々の

変動が再現されていないことがわかる。

(a) 降雨量と蒸発散量の関係

2・1では、年降雨量が多い年ほど年蒸発散量や年蒸発量が少ないことが見られた。また図-1の推定値も6・7月の梅雨期に低い値を示している。図-3には、若泉地点の日降雨量、日蒸発量と日平均気温を比較して示してある。やはり降雨量と蒸発量との関係が見られる。

式(3)のE、Pに観測値を代入して計算される日々の係数C値と若泉地点の日降雨量Rとをプロットしてみると、ほぼ指数関数的にRが大きくなるとCが小さくなる関係が見られる。そこで、Hamon式の係数Cを降雨量Rを用いて補正することにする。すなわち、改良Hamon式は次式のように表わされる。

$E_p = \text{EXP}(A_0 + A_1 R^N) D^2 P_i$ 、または、
 $E_p = A \cdot \text{EXP}(A_1 R^N) D^2 P_i$ 、……………(4)
 ここに、 A_0 ； A_1 ； N ：定数、 $A = \text{EXP}(A_0)$ 、である。

(b) 回帰によるパラメータの決定

解析対象水文気象資料は試験流域の代表であると考え、式(4)を用いて5年間の観測値に回帰させ、最適なパラメータ A_0 、 A_1 を求めた。なお、わが国の4・5月の春の雨、6・7月の梅雨、8月末～10月の台風といった降雨量の特徴を考慮し、1～3月、4～5月、6～7月、8～10月、11～12月にデータを分割した場合と水文年(1～12月)とした場合のそれぞれについて得られたパラメータ値は、表-4のようになる。最適N値はいずれの場合も0.1となる。ただし、以後は季節別パラメータを用いて検討する。

図-4は、推定値と観測値との比較の一例である。推定値は激しい日々の変動

をよく再現しており、時系列的にも良好な結果となっている。また、5年間の観測値と推定値の相対誤差8.8%、絶対誤差0.42mm/dayと数値的にも良好な適合性を示している。

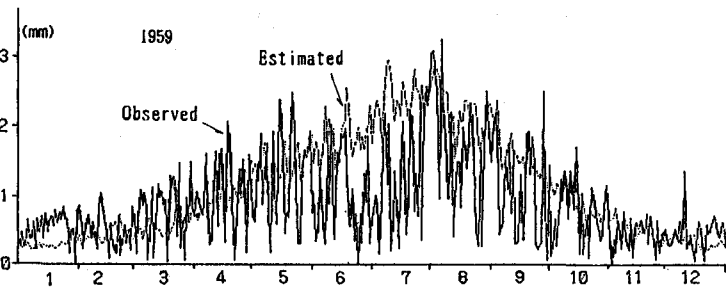


図-2 Hamon 式(C=0.067)による推定値

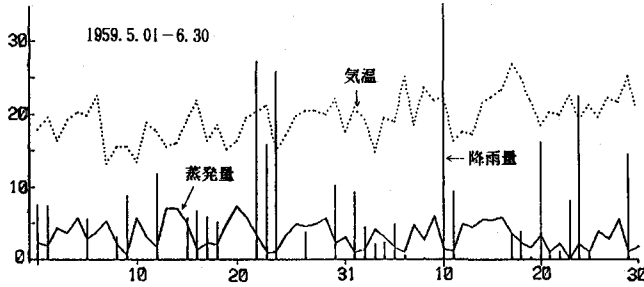


図-3 日降雨量、日蒸発量および日平均気温

表-4 最適パラメータ値

係数\月	1～3	4～5	6～7	8～10	11～12	1～12
A_0	-1.928	-2.258	-2.771	-2.621	-2.228	-2.673
A_1	-1.071	-1.050	-0.822	-0.728	-0.739	-0.843
A	0.145	0.105	0.063	0.073	0.108	0.069

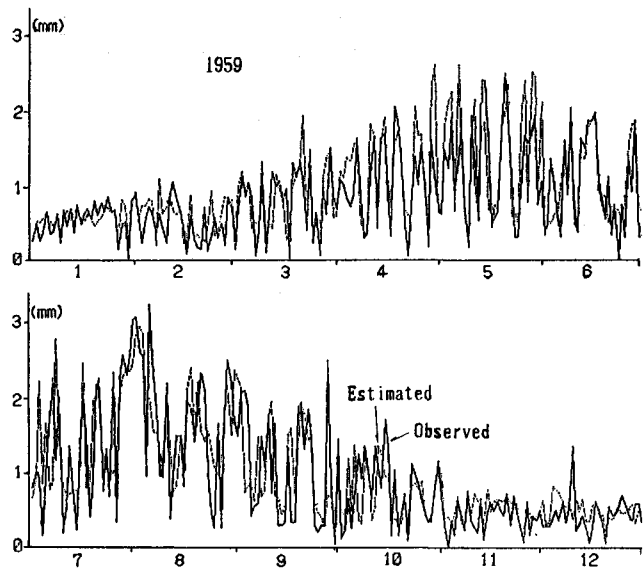


図-4 日蒸発散量の推定値と観測値の比較

3・2 改良モデルの特性

信頼性の高い長期間の観測資料を解析して得られた改良Hamon 式(4)は、降雪がほとんどない他の山地河川流域へそのまま適用できるものと考えられるが、対象流域の水文気象量の特性がパラメータに反映されれば、より精度の高い推定値を得ることができよう。

式(4)は降雨量が無い時には、Hamon 式の係数C値をA値とすれば蒸発散量が得られることを意味している。そこで、水文気象量の異なる対象流域のパラメータA値(流域A値)を、試験流域で得られたA値(基準A値)と係数C値(基準C値)を対象流域で得られる係数C値(流域C値)で修正することを試みる。すなわち、次の関係が成立するものとする。

$$\text{流域A値} = \text{基準A値} \cdot \text{流域C値} / \text{基準C値} \quad \cdots \cdots (5)$$

ただし、降雨量に関わる係数A₁、N値は、試験流域で得られた値がそのまま適用できるものとする。

4. 山地河川流域への適用

改良Hamon 式の適用性と蒸発計蒸発量を用いた蒸発散量推定方法の妥当性について、試験流域内の下久保ダム流域および利根川水系渡良瀬川上流に位置する草木ダム流域を対象として検討する。

対象流域において、改良Hamon 式を用いた日蒸発散量推定方法の手順を要約すれば以下のようである。

① 近傍気象台の日出入と観測所の日平均気温(日最低と日最高の平均)を用いて日日照時間D(12hrを1とす)および日飽和絶対湿度P_s(g/m³)を求める。

② ①の諸量、観測所の日降雨量(mm/day)、パラメータ値(表-4)、N=0.1を式(4)に代入する。

対象流域の水文気象特性を反映させたより精度の高い推定値を得るためには、以下の手順となる。

①' ①と同じ。

②' 年蒸発散量(=年降雨量-年流出量)(mm)と①'の諸年間量を式(3)に代入し、流域C値を求める。

③' ②'の値、基準C値(=0.067)と基準A値(表-4)を用いて式(5)より流域A値を求める。

④' ①'の諸量、③'の値、観測所の日降雨量(mm/day)、パラメータA₁値(表-4)、N=0.1を式(4)に代入する。

4・1 各ダム流域および水文気象資料の概要

(a) 下久保ダム流域

下久保ダム流域(面積328.4km²)は、試験流域と同様な植生と地質とから成る降雪がほとんどない山地である。推定期間は1980～1982年の3年間であり、流域平均日降雨量は流域にある3ヶ所の雨量観測所の値をティーセン法で求め、その他の水文気象資料はダムサイトで観測された日データを用いた。日出入は前橋市の値である。

(b) 草木ダム流域

草木ダム流域(面積254km²)は、広葉樹林と針葉樹林におおわれた、第4紀火山岩帯(約14%)と花崗岩から成る山地である。推定期間は1981～1983年の3年間であり、流域平均日降雨量は流域にある6ヶ所の雨量観測所の値をティーセン法で求め、その他の水文気象資料はダムサイトで観測された日データを用いた。日出入はやはり前橋市の値である。なお、最上流部の山岳地帯には降雪があるが、長期間積雪となって残ることはなく、水収支に大きく影響を及ぼすことがないようである。

4・2 日蒸発散量の推定結果と検証

図-5・6は、各ダム流域での日蒸発散量の推定結果(4～10月)の一例である。降雨量に伴う激しい日々の変動が目立ち、特に6・7月の梅雨期は顕著である。

図-7には、各ダム流域において水収支法により得られた年蒸発散量E'、と改良Hamon 式による推定値E_eとを比較して示した。下久保ダム流域の年降雨量と年消失量は試験流域とほぼ同じであるが、年平均気温が2℃ほど低いことから、推定値が水収支法推定値に対しやや過少となっているものの良い一致を示している。

草木ダム流域では、やはり気温が 2°C ほど低いが、降雨量が多く、消失量が少ないことから、推定値が過大となる水文年もあるが、ほぼ満足しうる結果となっている。こうしたことから、改良Hamon式の適用性とその基礎となっている観測値ひいては蒸発計蒸発量を用いた日蒸発散量推定方法の妥当性が検証されたものと考えられる。

また図-7には、各ダム流域の水文気象特性が反映された修正パラメータA値を用いた推定値と水収支法推定値を比較した場合も示してある。各ダム流域とも精度が向上し、良い一致を示している。

5. おわりに

神流川試験流域で得られた水文気象資料に基づいて山地河川流域における実用的な日蒸発散量推定法について検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 流域水収支法で求められる蒸発散量と観測で得られた日蒸発量を用いた日蒸発散量推定方法が提示された。
- (2) Hamon 式の係数Cに降雨量を導入した実用的な日蒸発散量推定モデル(改良Hamon 式)が提案された。
- (3) (1)の方法で得られた試験流域の推定値(観測値と仮定)に対応する改良Hamon 式の回帰推定値による再現性は、良好であった。
- (4) 上記回帰モデルを2ダム流域に適用して得られた年間蒸発散量と水収支法による推定値を比較したところ満足すべき一致を得、(1)の方法の妥当性と改良Hamon 式の適用性が示された。
- (5) 対象流域の水文気象特性に基づいたパラメータ修正方法が提示され、より精度の高い推定値を得ることを可能にした。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：神流川流域水文観測資料、土木研究所資料 第324号、1968
- 2) 建設省土木研究所：神流川水文気象観測資料、土木研究所資料 第365号、1968
- 3) 中野秀章：森林水文学、共立出版、PP.102~112、1977
- 4) 金子 良：農業水文学、共立出版、P.148、1974
- 5) 前出 3)、PP.113~117
- 6) 砂田憲吾・池淵周一：林地流域における日蒸発散量の推定、土木学会論文集 第387/II-8、1987
- 7) Hamon, W. R. : Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, 1961
- 8) 東京天文台：理科年表、丸善、PP.45、1985

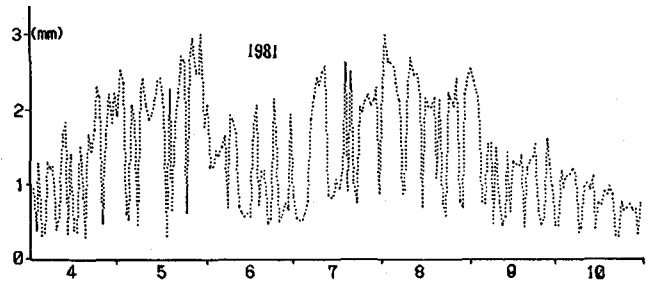


図-5 下久保ダム流域の日蒸発散量推定結果の一例

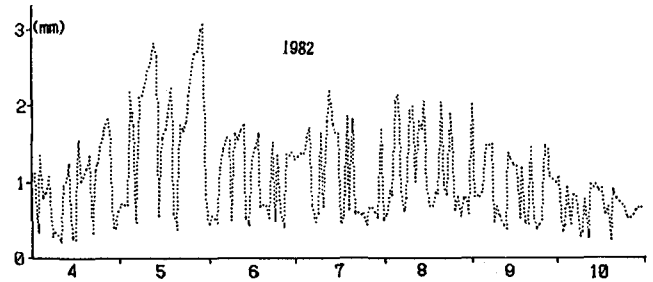


図-6 草木ダム流域の日蒸発散量推定結果の一例

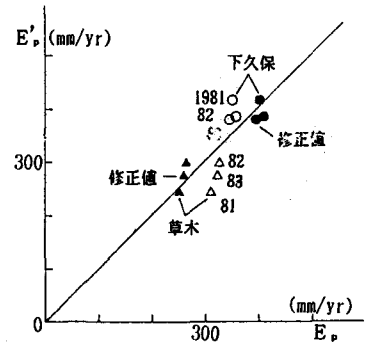


図-7 推定量と蒸発散量の比較