

低水流出による減水特性と土壤蒸発散の推定に関する研究

水文気象研究室 須藤 将丸

指導教員 陸 旻皎

1. はじめに

流域内に存在する水、特に地中の流出過程を知る方法として、減水解析がある。減水解析はハイドログラフの減水部を解析することにより、流出過程のモデル化、流出成分の分離、水文パラメータの推定を行える手法であり長期的な低水管理、水資源利用において重要である。減水特性を表現する方法として、分数減水式がある。陸¹⁾は、樹冠蒸発を除いた蒸発散を土壤蒸発散と定義し、季節変動する減水定数を地質など流域特性によって決まる流域固有減水定数と季節性を有する土壤蒸発散に分け、推定する方法を提案した。また、日流量データから減水部を抽出する方法を開発し、効率よく減水解析を行える可能性を示した。高木³⁾は陸¹⁾が提案した方法を用いて減水部を抽出し全国25流域について解析した。また、観測所の緯度から推定された蒸散量を用いて、流域固有減水定数を算定し、流域特性との関係を解析した。

本研究は高木³⁾が算定した流域固有減水定数を用いて全国の流域で減水部ごとの土壤蒸発散を推定した。しかし、推定方法と流域固有定数に問題があるのではと考えた。そこで、推定方法の見直しを行い、流域固有減水定数と土壤蒸発散の再推定を行うことを目的とする。

2. 対象流域と使用したデータ

本研究では高木³⁾が対象とした全国の流域55流域を対象とする。本研究で用いるダム流入量はダム諸量データベースから入手できる1993年1月1日から2021年12月31日までの日データである。また、陸¹⁾が提案した方法を用いて抽出した減水部は140個でありすべての減水部の土壤蒸発散を求め集計する。

手法変更前は代表として美和ダム流域のデータを示す。

3. 解析方法

(1) 分水減水式

分数減水式は式(1)で示される。

$$Q = Q_0 / (1 + b\sqrt{Q_0 t})^2 \quad (1)$$

ここで、 Q は流出高($mm \cdot day$)、 Q_0 は初期流出高($mm \cdot day$)、 b は分数減水定数($(mm \cdot day)^{-1/2}$)、

t は日数(day)である。

(2) 土壤蒸発散を考慮した減水式

分数減水式には、植生の影響が考慮されておらず、流出高と土壤蒸発散を比較し無視できない場合、減水を正しく把握するためには、土壤蒸発散を考慮する必要がある。個々の減水部を検討する場合には、減水期間が相対的に短く、土壤蒸発散の変化が比較的小さくなると仮定した。そのため土壤蒸発散が一定とする

$$\tan^{-1} \sqrt{\frac{Q}{ET}} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{Q_0}{ET}} - b\sqrt{ET}t \quad (2)$$

が得られる。ここで、 Q は河川流出高($mm \cdot day$)、 Q_0 は河川流出高の初期値($mm \cdot day$)、 ET は土壤蒸発散(mm/day)、 b は流域固有減水定数($(mm \cdot d)^{-1/2}$)、 t は日数(day)である。また、 Q_0 は減水部期間の中央のデータに設定する。

(3) 土壤蒸発散の算定方法1

流域固有減水定数 b を高木²⁾が算定した値(美和ダム流域: $b = 0.0071$)を用いて土壤蒸発散 ET を算出する。(2)を変換して。

$$E = \tan^{-1} \sqrt{\frac{Q}{ET}} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{Q_0}{ET}} + b\sqrt{ET}t \quad (3)$$

とする。ここで、 E を式(2)の右辺と左辺の誤差とする。この誤差 E の絶対値を減水部の期間の日ごとに求め平均 \bar{E} を求める。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |E_k|$$

この平均 \bar{E} が最小になるように土壤蒸発散 ET を求め、土壤蒸発散 ET の最適解をエクセルのソルバーを用いて求める。

(4) 結果と考察

年間でみた土壤蒸発散を図-2に示す。制限を設けない場合、ソルバーで求めた土壤蒸発散 ET の最適解には現実的でない値も見受けられた。そこで、近藤ら⁴⁾が計算したポテンシャル蒸発量を上限として定めた。その年間の土壤蒸発散を図-3に示す。制限をかけることで、現実的な値に落ち着いた。各減水部の減

水曲線を見ても制限を設け土壤蒸発散 ET が大幅に減少した場合に以外は実測値に十分沿っている。制限を設けることによって生じた誤差平均 \bar{E} の変化を図-4に示す。制限がかかった減水部の誤差平均 \bar{E} はやはりおおくなる。また、減水部の初日の流量が大きいほど誤差も大きく生じることがグラフからわかる。

各月ごとの土壤蒸発散 ET 平均とポテンシャル蒸発量のグラフを図-5に示す。ポテンシャル蒸発量と同様に土壤蒸発散 ET 平均のグラフは夏季にかけて上昇し冬季にかけて減少する特徴がみられ、近藤らの示した蒸発量のパターンと酷似している。

推定した土壤蒸発散はポテンシャル蒸発量を超えるものが多く原因として、実測値が急激に変化するとそれに大きく影響される推定方法であったこと、高木³⁾らの求めた流域固有減水定数にも問題があるのではと考えられる。そこで、手法を変え減水定数と土壤蒸発散を同時に推定する手法に変更した。

(5) 土壤蒸発散の算定方法 2

本研究の後半では、陸りらが考案した。個々の流域ではなく、減水曲線の前半と後半の水量が合うか示す指標を使用する。

(2)を変換して。

$$HVDist(ET, b) = \frac{\sqrt{(V_1^{obs} - V_1^{cal})^2 + (V_2^{obs} - V_2^{cal})^2}}{V_1^{obs} + V_2^{obs}} \quad (4)$$

とする。ここで、 V は減水曲線を積分して得られる水量、下付きの添え字 1, 2 はそれぞれ前半と後半、上付き添え字 obs と cal はそれぞれ実測流量と計算流量からの値を示す。固有減水定数 b 、土壤蒸発散 ET の推定は

$$THVDist = \sum_{R=0}^{N_R} HVDist_R(ET, b) \quad (5)$$

が最小になる最適解を求める。ここで、 R は減水曲線の番号、 N_R は減水曲線の本数である。

本研究では2段階の最適化を行う。まず、固有減水定数 b が既知として、その b に対して $HVDist_R(ET, b)$ が最小となる ET の最適解 $ET^*(b)$ を

$$ET^*(b) = \underset{ET}{\operatorname{argmin}} HVDist_R(ET, b) \quad R = 1, 2, \dots, N_R \quad (6)$$

で ET を0からポテンシャル蒸発量の範囲でさがす。

argmin は最小化で得られる最適解を示す。最適化を行う際に、実測流量と固有減水定数 b を用いて計算し

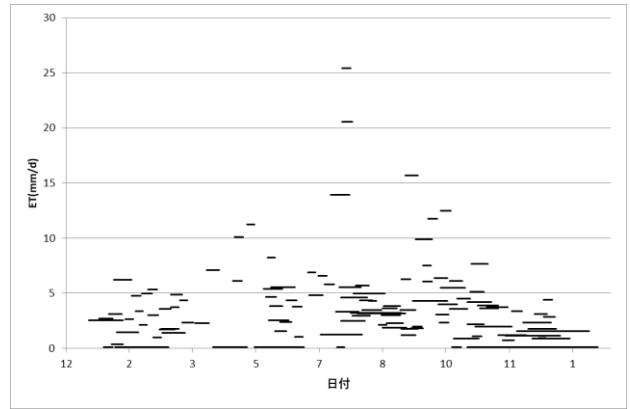


図-1 年間でみた土壤蒸発散

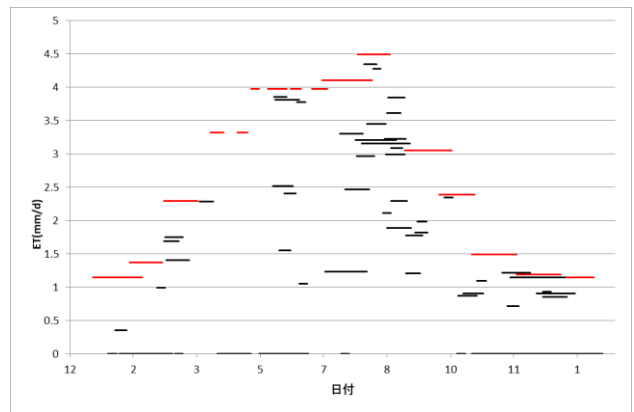


図-2 年間でみた土壤蒸発散(制限あり)

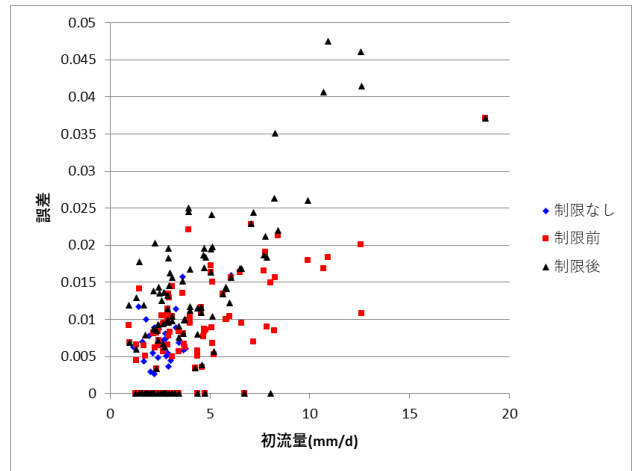


図-3 制限による誤差平均 \bar{E} の変化

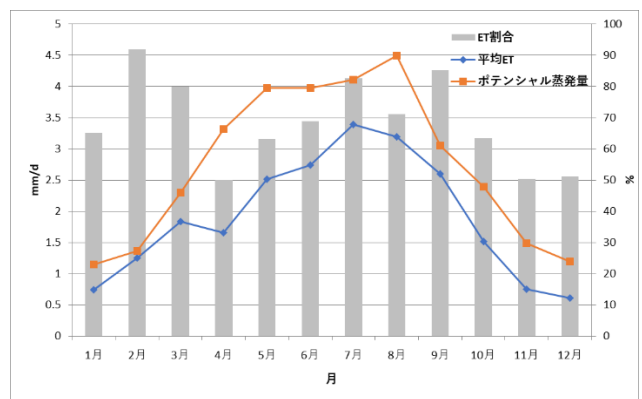


図-4 平均土壤蒸発散 ET 平均とポテンシャル蒸発量

た流域貯水量を二次多項式で近似し、減水曲線の中心の流域貯水量と流量を算出している。同様に固有減水定数 b も

$$b^* = \operatorname{argmin} \sum_{R=0}^{N_R} \text{HVDist}_R(ET_R^*(b), b) \quad (7)$$

の最適解として求める。ここで b は 0 から冬期換算減水定数の 50% の範囲で探す。

(6) 結果と考察

推定した最適土壌蒸発散と雨量の関係図を図-1 に示す。近藤^{4,5)}らから降水量の 25%~45% が土壌蒸発散に当たると言われており、図-1 を見ると近似曲線の傾きから最適土壌蒸発散 ET^* は流量の 17.1% だった。樹冠蒸発は降水量の 15%~20% を足し合わせると範囲内の良い値である。

推定した最適減水定数を高木らと同様に地質ごとに解析し複合地質流域を地質区分の面積割合によって推定できるか検証する。単一地質流域と複合地質流域における地質区分の面積率推定値と推定値の比較を表-1 と図-2 図-3 に示す。単一地質流域において中生代堆積岩類 A 以外は等値線に沿っており須磨区推定できている。複合地質流域は少しばらつきがある。特に等値線から離れている 4 つの点は中生代堆積岩類 A が多く含まれている 2 つ。または、抽出された減水部に問題のあった 2 つでありそれらを除いてみれば等値線に沿っている。

推定した最適減水定数 b 、最適土壌蒸発散 ET^* は両方とも植生を考慮した減水式において良い結果が得られたことから推定方法は間違っていないという結論にいたった。また、今後の展望として抽出方法の見直しにより、減水部となっているデータがそろうことにより更なる値の最適化につながっていくと考えられる。

参考文献

- 1) 陸旻皎：減水曲線季節変動と蒸発散の関係，水文水資源学会誌，Vol.36，No.2，pp.129-138，2023
- 2) 減水曲線から流域固有減水定数と土壌蒸発散の季節パターンを推定する試み，水文水資源学会誌，Vol.36，No.4，pp.194-204，2023
- 3) 高木岳：低水流出の減水特性とその季節変化に関する研究
- 4) 近藤純正：水文・水資源学会誌 日本水文気象(5)ポテンシャル蒸発量と気候湿度度 pp.450-457, 1997

地質区分	流域固有減水定数 (mm/d) ^{1/2}	換算冬期減水定数 (mm/d) ^{1/2}	流域数	流域固有減水定数 (標準偏差)	換算冬期減水定数 (標準偏差)
第四紀層	0.0063	0.0091	3(6)	0.0022	0.0034
第三紀~第四紀火山岩類			0		
第三紀火山岩類	0.0126	0.0119	5	0.0030	0.0031
三紀堆積岩類A	0.0177	0.0176	5	0.0022	0.0028
中生代火山岩類			0		
中生代堆積岩類A	0.0315	0.0360	3	0.0169	0.0240
古生代中生代堆積岩類B	0.0168	0.0180	1		
深成岩類	0.0088	0.0095	5	0.0013	0.0014
変成岩類A	0.0174	0.0202	1		
変成岩類B			0		

表-1 地質区分ごとの推定平均値

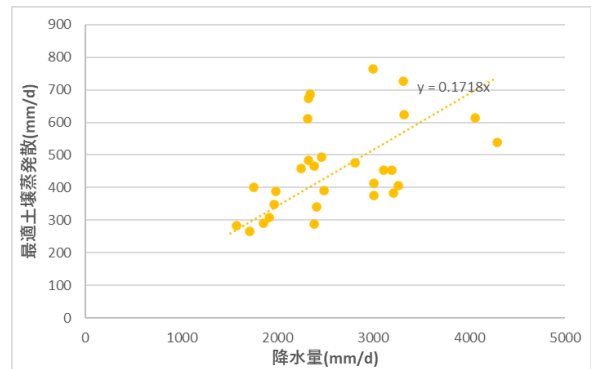


図-5 最適土壌蒸発散と雨量の関係図

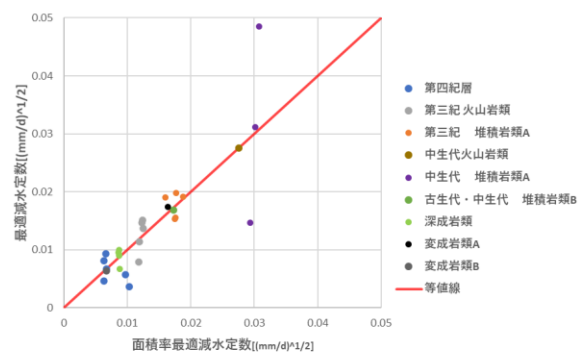


図-6 単一区分流域における面積率推定値と推定値

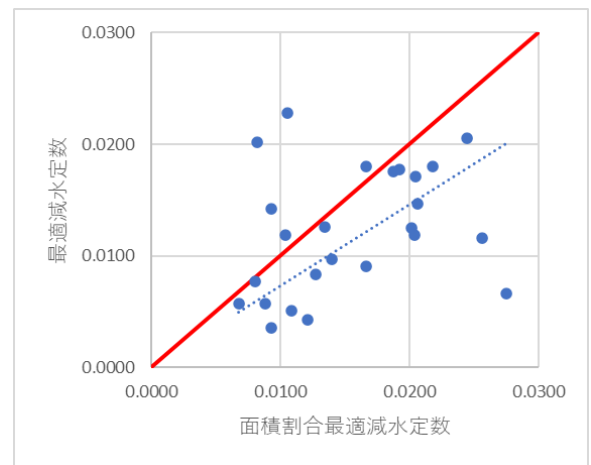


図-7 複合区分流域における面積率推定値と推定値

- 5) 森林における降雨の遮断蒸発のモデル計算