

# 土壌蒸発散と地下水流出の相互作用を考慮した低水解析

長岡技術科学大学大学院 学生会員 ○ 小椋崇弘  
 長岡技術科学大学 正会員 陸 旻皎

## 1. はじめに

令和5年夏季の記録的な高温・寡雨は、新潟県においても農林水産業に深刻な被害をもたらした<sup>1)</sup>。渇水被害を軽減するために水資源管理が欠かせないが、そのためには着目する河川の流況やハイドログラフの減水特性などを知らなければならない。水文観測によって十分長い期間のハイドログラフが得られていれば、減水曲線を規定する定数、すなわち減水定数が得られる。減水定数には季節性があり、その起源は蒸発散に求められる<sup>2)</sup>。しかし、その関係は十分に明らかではない。本研究では、後述する土壌水分欠損量に基づいて新たな減水式を導出し、これを用いて長期間の流域水循環の解析を試みた。この結果について、特に低水・渇水期に着目して減水曲線と蒸発散の関係を考察した。

## 2. 減水式と減水定数

減水式は、地下水流出量 $Q_g$ が地下水貯留量 $S$ に比例するとし、式(1)の水収支式を解くことで得られる。古典的には、降水量 $P$ と蒸発散量 $ET$ をそれぞれゼロとする。 $S$ と $Q_g$ の関係が式(2)になると仮定すれば、式(3)の分数関数減水式が得られる<sup>4)</sup>。式(2)と式(3)の比例定数 $b$ が減水定数である。

$$\frac{dS}{dt} = P - Q_g - ET \quad (1)$$

$$Q_g = (bS)^2 \quad (2)$$

$$Q_g = \frac{Q_0}{(1 + b\sqrt{Q_0 t})^2} \quad (3)$$

$Q_0$ は減水の起点となる流出量、 $t$ は時間である。式(3)に相当する蒸発散の影響を考慮した減水式は陸<sup>2)</sup>によって導出されていて、式(4)となる。

$$\tan^{-1} \sqrt{\frac{Q_g}{ET}} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{Q_0}{ET}} - b\sqrt{ET}t \quad (4)$$

式(3)中の減水定数と式(4)中の減水定数は異なる。前者には蒸発散の影響が含まれており、古典減水定数と

呼ばれている<sup>2)</sup>。後者は蒸発散の影響が除かれており、流域固有減水定数と呼ばれる<sup>2)</sup>。また、式(4)の $ET$ は土壌中の水に起源を持ち、遮断蒸発を含まないことを強調して土壌蒸発散と呼ばれる<sup>3)</sup>。

## 3. 土壌水分欠損量に基づく減水式の導出

地下水流出と土壌水分を関連付けるため、土壌水分欠損量( $SMD$ )を導入する。 $SMD$ は、土柱が飽和に対してどの程度の余裕を持つかを定量化したものであり、式(5)で定義される<sup>5)</sup>。これを示したものが図-1の(A)である。

$$SMD = \int_{z_g}^0 (\theta_s - \theta) dz \quad (5)$$

$z$ は地表面をゼロとしたときの鉛直上向きを正とする座標、 $\theta$ は体積含水率、 $\theta_s$ は飽和体積含水率、 $z_g$ は地下水面の位置である。土柱が飽和しているとき $SMD = 0$ である。土中水に働く重力と毛管力が釣り合うまでの時間が無視でき、式(6)の静水圧平衡が成り立つとする陸<sup>5)</sup>の仮定を導入し、体積含水率と毛管力を式(7)のBrooks-Coreyの式で関連付けることにより、 $SMD$ は $z_g$ の一価関数となる。

$$\Psi + z = z_g \quad (6)$$

$$S_e = \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda & (\Psi < \Psi_b) \\ 1 & (\Psi \geq \Psi_b) \end{cases} \quad (7)$$

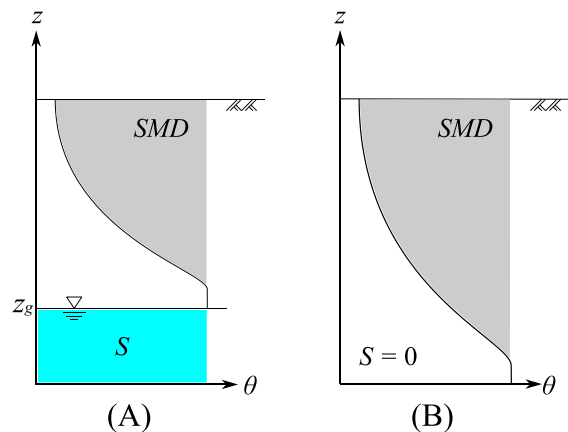


図-1 SMDの定義

$S_e$ は有効飽和度,  $\Psi$ は毛管力,  $\Psi_b$ は空気侵入値,  $\lambda$ は土壌の種類によって定まるパラメータである.

土柱の不飽和領域に水の出入りがあるとき, 式 (8) が成り立つ<sup>5)</sup>.

$$\frac{dSMD}{dt} = -P + ET + Q_s + Q_g \quad (8)$$

$Q_s$ は表面流出である. 図-1の(B)に示すように,  $SMD$ が増大して $S = 0$ となったとき $Q_g = 0$ になると仮定する. このときの $SMD$ を $SMD_d$ と定義する.  $SMD_d$ は定数である.  $S = 0$ , すなわち $SMD = SMD_d$ であっても不飽和帯には土壌水分が存在するので, 直ちに $ET = 0$ にはならない.  $SMD_d$ を導入したことによって,  $S$ と $SMD$ の間に式(9)の関係が成り立つ. また, 式(9)と式(2)から式(10)が得られる.

$$SMD_d = S + SMD \quad (9)$$

$$Q_g = b^2(SMD_d - SMD)^2 \quad (10)$$

$SMD = 0$ のときが $Q_g$ の上限であり, 式(11)となる.

$$Q_{g,max} = (bSMD_d)^2 \quad (11)$$

式(11)を用いると式(10)は式(12)となる.

$$Q_g = Q_{g,max} \left(1 - \frac{SMD}{SMD_d}\right)^2 \quad (12)$$

式(12)が $SMD$ に基づく減水式である. 式(8)と式(9)から明らかなように,  $ET$ ,  $Q_s$ ,  $Q_g$ は $SMD$ の増減によって互いに影響しあう. 特に減水期間に着目すれば,  $ET$ と $Q_g$ が $SMD$ を介して相互作用する.

#### 4. 長期間の流域水循環の解析

式(5), 式(8), 式(12)に基づき, 流域水循環の長期解析を行って,  $ET$ ,  $Q_s$ ,  $Q_g$ の振る舞いを調べた. 対象流域は岡山県岡山市の竜ノ口山森林理水試験地の北谷(以下, 竜ノ口山)とした. 実験流域を対象とした理由は, 流域面積が小さく, 土壌・地質・植生などの条件が複雑でないこと, 長期間の水文観測がなされ, その間の森林動態の記録が存在することによる. 竜ノ口山には北谷と南谷があるが, 対象期間中に観測された最小の流出高が南谷よりも北谷の方が小さく,  $SMD_d$ に近い $SMD$ が得られると考え, 北谷のみを対象とした. 水文データとして, 1980年1月1日から2010年12月31日までの流出高の観測データ<sup>6)7)8)9)</sup>を用いることとし, 陸<sup>2)3)</sup>の方法で流域固有減水定数を求めた. 水循環の解析を行う期間は, 2001年1月1日から2010年12月31日とした. この期間の気象データとして岡

山地方気象台の AMeDAS データ(降水量, 気温, 日照時間)を入手し, これを入力データとした. ただし, 土壌水分状態の初期値依存性を考慮して助走計算を行うため, 1998年1月1日から2000年12月31日までの気象データも入手し, 解析開始時点の $SMD$ と $z_g$ を得た.  $Q_s$ の計算には式(13)を用いた<sup>5)</sup>.

$$Q_s = \max(0, P - SMD - ET - Q_g) \quad (13)$$

$ET$ の計算は, 裸地面蒸発 $E_g$ と蒸散制約<sup>10)</sup>による蒸散の最大値 $T_{r,max}$ のいずれか小さいほうになると考え, 式(14)を用いた.  $E_g$ の計算には式(15)を用いた<sup>5)10)</sup>.

$$ET = \min(E_g, T_{r,max}) \quad (14)$$

$$E_g = S_0 E_p \quad (15)$$

$S_0$ は地表面の有効飽和度で, 式(6)と式(7)から計算した.  $E_p$ は蒸発能力で, Makkink の式から計算した<sup>5)10)</sup>.  $SMD_d$ は瀬切れが生じた時点の $SMD$ に相当するが, 対象期間中に竜ノ口山で瀬切れが発生した記録がないので,  $Q_g$ の実績値と計算値からRMSEを求め, これが最小になるように試行錯誤的に決定した. なお,  $Q_g$ の実績値とは, 流出高の実績値から減水期間のもののみを取り出したものを指す.  $T_{r,max}$ も実績値は得られていないので, 流出高の実績値と全流出( $Q_s + Q_g$ )の計算値の差分の絶対値が最小になるように試行錯誤的に決定した. 土壌のパラメータは, 表-1に示したものを<sup>10)11)</sup>を用いた. 同定した流域固有減水定数,  $SMD_d$ ,  $T_{r,max}$ を表-2に示す.  $ET$ と $Q_g$ の相互作用について調べるため, 年ごとに流況曲線を描き, 流出高の実績値と計算値を比較した.

表-1 土壌のパラメータ

| パラメータ      | 値          |
|------------|------------|
| $\theta_s$ | 0.5365     |
| $\theta_r$ | 0.0001     |
| $\Psi_b$   | -0.01769 m |
| $\lambda$  | 0.191738   |

表-2 同定した定数

| 定数          | 値                                |
|-------------|----------------------------------|
| 流域固有減水定数    | 0.0450733 (mm d) <sup>-1/2</sup> |
| $SMD_d$     | 0.0490 m                         |
| $T_{r,max}$ | 2.233×10 <sup>4</sup> m/h        |

#### 5. 結果と考察

図-2に、流出高の実績値と計算値から得られた流況曲線を示す。青線が実績流出高、赤線が計算流出高（全流出）である。2005年の結果は、この期間に実績データの欠測があったため、図示したが考察の対象とはしない。図-2から、流況曲線に一般的にみられる、渇水期付近の曲線の終端が急激に下落する現象<sup>12)</sup>を表現することができた。しかし、計算流出高のすべてで曲線が短く、低水流量の基準となる275日（黒い縦線）よりも左側で計算流出高がゼロになっている。式(8)から、土壤蒸発散の影響が強く作用し、 $SMD \geq SMD_d$ である期間が多く発生したものと考えられる。これを確かめるため、計算流出高の流況曲線が最も長い2001年と最も短い2007年に着目し、この2つの年の通年のSMDとETを調べた。これを図-3に示す。2001年は平年よりも多雨、2007年は平年よりも寡雨であったことがわかっている。ETはどちらの年もほとんど違いがみられないが、図-2で実績流出高がゼロになることがなかったことから、ETは蒸散制約による $T_{r,max}$ を考慮してもなお過大であり、実際の土壤蒸発散はさらに小さいと考えられる。SMDは2つの年で大きく異なり、最大値を比較すると2007年は2001年に対しておおよそ2倍である。2007年は $SMD < SMD_d$ となって $Q_g$ が生じた期間が極めて短く、 $SMD = 0$ となって $Q_s$ が生じた期間もほとんどないことがわかる。期間中、竜ノ口山で瀬切れが観測されていないことから、この流域で $SMD \geq SMD_d$ となることは稀であると考えられ、このことから、今回の解析に用いた $SMD_d$ と $T_{r,max}$ の値が妥当なものではなかった可能性が考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、SMDに基づいて新たな減水式を導出し、これを用いて長期間の流域水循環の解析を行った。結果、流況曲線終端部の急激な落ち込みをモデルによって表現することができた。しかし、土壤蒸発散の影響を現実のものよりも大きく見積もりすぎている問題も指摘された。これについて、 $SMD_d$ と $T_{r,max}$ の同定方法を見直すことにより改善できる可能性があり、これを今後の課題としたい。

**謝辞：**本研究で使用した水文データは、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所より提供を受

けたものです。ここに記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 新潟県：高温・渇水に関する情報，<https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/kouhou/drought.html>（閲覧日：2023/10/16）。
- 2) 陸旻皎：減水曲線季節変動と蒸発散の関係について，水文・水資源学会誌，Vol.36，No.2，pp.129-138，2023。
- 3) 陸旻皎：減水曲線から流域固有減水定数と土壤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（印刷中）。
- 4) 高橋裕，安藤義久，伊藤孝，伊藤和央：山地河川の低水流出の減水特性に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.337，pp.75-82，1983。
- 5) 陸旻皎，小椋崇弘，ZIN Thandar Tun，岡滋晃，鬼束俊一，河村直明，山本隆広，込山晃市：土壌水分欠損量による土砂災害リスク評価の試み，水文・水資源学会誌，Vol.36，No.2，pp.118-128，2023。
- 6) 後藤義明，玉井幸治，小南裕志，深山貴文：竜ノ口山森林理水試験地観測報告（1981年1月～2000年12月），森林総合研究所研究報告，Vol.4，No.1，pp.87-133，2005。
- 7) 玉井幸治，後藤義明，小南裕志，深山貴文，細田育広：竜ノ口山森林理水試験地観測報告（2001年1月～2005年12月），森林総合研究所研究報告，Vol.7，No.3，pp.125-138，2008。
- 8) 玉井幸治，後藤義明，小南裕志，深山貴文，細田育広：誤植：竜ノ口山森林理水試験地観測報告（2001年1月～2005年12月），森林総合研究所研究報告，Vol.9，No.3，pp.149-151，2010。
- 9) 細田育広，小南裕志，深山貴文，岡野通明，後藤義明：竜ノ口山森林理水試験地観測報告（2006年1月～2010年12月），森林総合研究所研究報告，No.18，Vol.1，pp.111-128，2019。
- 10) 小椋崇弘，陸旻皎，岡滋晃，鬼束俊一，河村直明：根の分布が森林流域の蒸散量に与える影響，水文・水資源学会誌，Vol.37，No.1，pp.182-197，2024（印刷中）。
- 11) 農研機構：日本土壌インベントリ，<https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/>（閲覧日：2023/10/16）。
- 12) 小椋崇弘，陸旻皎：長期観測データからみた森林動態の水循環に与える影響，水文・水資源学会研究発表会要旨集，Vol.34，2021。

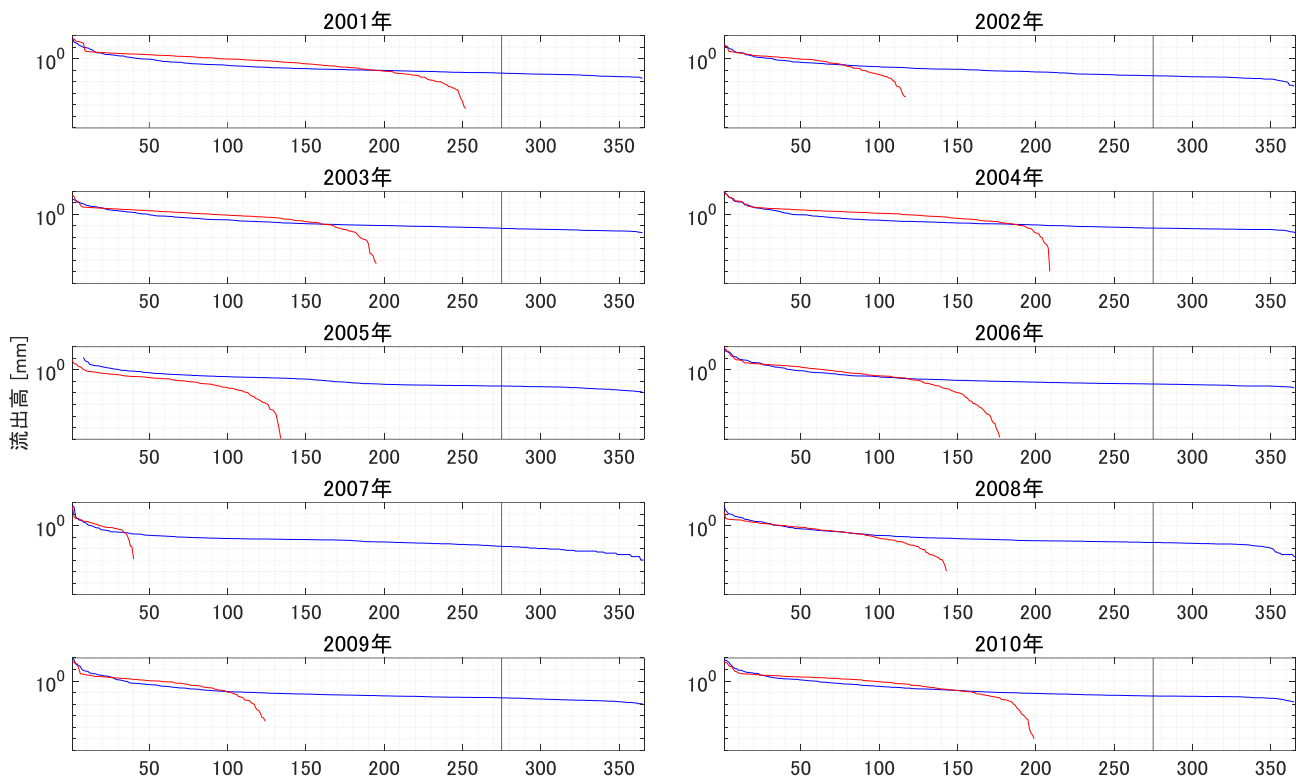
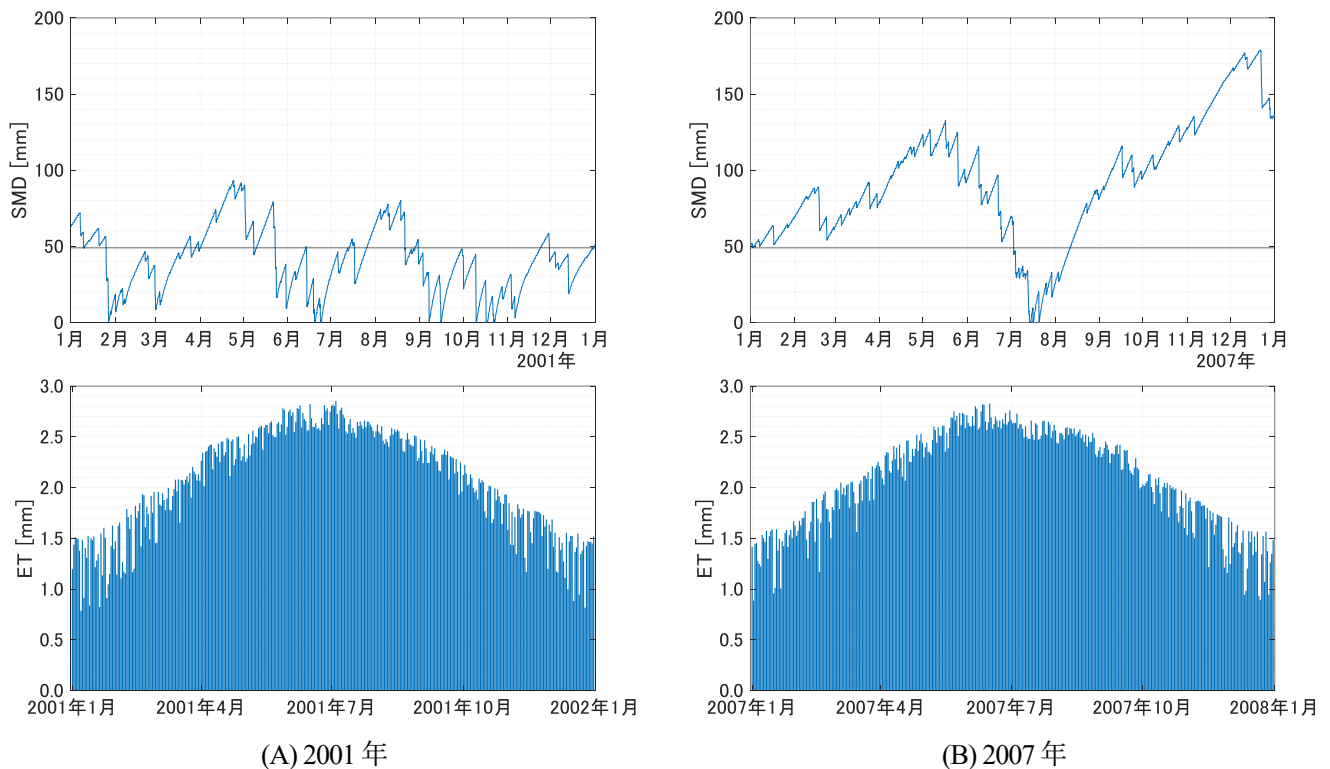


図-2 実績流出高と計算流出高の流況曲線による比較

青線が実績流出高，赤線が計算流出高（全流出）である．横軸は日数である．  
 図中の黒い縦線は低水流量の基準となる 275 日を表す．縦軸は対数軸である．



(A) 2001 年

(B) 2007 年

図-3 2001 年（多雨年）と 2007 年（寡雨年）の SMD と ET

SMD は 1 時間単位，ET は日単位で示してある．SMD 図中の黒い横線は  $SMD_d$  である．