

裏磐梯毘沙門沼の集水域における降雨流出機構に関する研究

菅原 悅 (福島大学・共生システム理工学類)
横尾善之 (福島大学・共生システム理工学類)

1. はじめに

裏磐梯五色沼湖沼群は1888年の磐梯山噴火によって、川に土石流が降りせき止められたり、噴火の影響でできた窪地に降雨が溜まったりすることによって形成された。そのため、裏磐梯五色沼は特異な水質によりこれまで様々な研究が行われてきた。裏磐梯毘沙門沼では水質に関する研究は多いが、流出機構に関する研究は少ない。水量に関して渡辺・横尾(2013)が水収支式を用いた裏磐梯五色沼湖沼群の毘沙門沼の地下水水量の推定の研究を行い、藤元・横尾(2015)では毘沙門沼の流量や各成分量、平均滞留時間、千葉・横尾(2015)の貯留量推定方法にならい貯留量推定を行った。千葉・横尾(2015)の手法では水収支式にある未知数の蒸発散量を考慮するため流量の過減部の夜間無降雨の時間を流量とし貯留量の推定を行ったが、毘沙門沼では季節ごとによって流量のピークの時間が違うため正確な貯留量の推定ができていない。そこで本研究ではそれらを考慮した貯留量の推定を行うとともに毘沙門沼の流动体を把握することを目的とする。

2. 方法

本研究は毘沙門沼の流入地点および流出地点において、毎月の表流水量を電磁流速計によって現地観測するとともに、自記水位計(応用地質、S&DL mini 5 m レンジ)を設置して水位の連続観測を行った。毘沙門沼の流入地点と流出地点は図1に示す。また、観測データから算出した流量と水位を用いて水位流量($H-Q$)曲線式を累乗近似と指數近似により作成した。

$$Q=aH^n \quad (1)$$

$$Q=ae^{nH} \quad (2)$$

ここで Q : 流量[m³/s], H : 水位[m], a , n はパラメータ, e は自然対数の底である。求めた水位流量($H-Q$)曲線式に毎時の計測した水位を代入することにより毎時の流量を算出した。

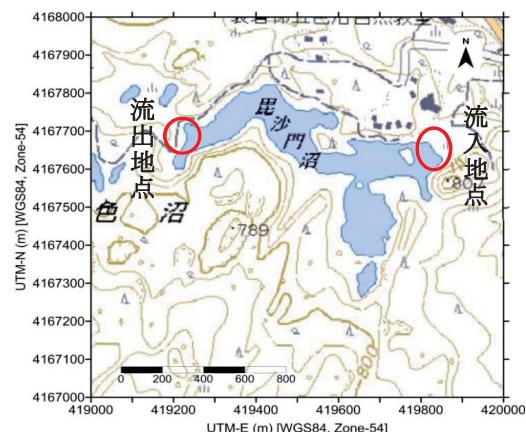


図1 毘沙門沼の地図と流入地点、流出地点

次に、求めた流量を日野・長谷部 (1985)のフィルタ一分離法を用いることで成分分離し、各成分量を求めた。成分分離では、まず流量の遅減部分をいくつかに分け、その傾きの逆数である T_c を求める。この T_c を式(3)に代入し数値フィルター $\omega(k)$ を求める。 $Q(k)$ を(4)式に代入することで各成分量が求められる。

$$\omega(k)=\begin{cases} c_0 \exp\left(-\frac{c_1 k}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{\frac{c_1^2}{4}-c_1}} \sinh\left(\sqrt{\frac{c_1^2}{4}-c_1} k\right) & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$Q'(t)=a \sum \omega(k) Q(t-k) \quad (4)$$

さらに、分離した各流量に Kirchner (2009)の手法を適用することで貯留量を算出した。Kirchner (2009)の手法では、まず流量 Q が貯留量 S の関数とし、(5)式で表す。式(5)の両辺を S で微分することで(6)を得る。式(6)に水収支式(7)を代入することで式(8)を得る。式(8)は降水量 P と蒸発散量 ET が Q より十分小さいという条件下式(9)のように近似できる。遅減部分の流量 Q の変化 dQ/dt を式(10)のように表現し、これを積分して式(11)を得る。この式(11)の積分計算を実施することで式(12)を得て、流量の各成分に関する貯留量 $S-S_0$ (S_0 は積分定数)を求める。ここで、(12)式は非線形である一方、成分分離で採用した日野・長谷部 (1985)のフィルタ一分離法は貯留量 S と流量 Q は線形の関係にあることを仮定しているため論理的不整合が生じる。この問題は千葉・横尾 (2015)にならない、両者が線形関係になるように、 b を1に変更した式(13)を用いて雨水貯留量を推定した。

$$Q=f(S) \quad (5)$$

$$\frac{dQ}{dS}=g(Q) \quad (6)$$

$$\frac{dS}{dt}=P-ET-Q \quad (7)$$

$$g(Q)=\frac{dQ}{dS}=\frac{dQ/dt}{dS/dt}=\frac{dQ/dt}{P-ET-Q} \quad (8)$$

$$g(Q)=\frac{dQ}{dS}=\frac{-dQ/dt}{Q} \quad (9)$$

$$-\frac{dQ}{dt}=aQ^b \quad (10)$$

$$\int dS = \int \frac{dQ}{g(Q)} = \int \frac{1}{a} Q^{1-b} dQ \quad (11)$$

$$S-S_0=-\frac{1}{a} \frac{1}{2-b} Q^{2-b} \quad (12)$$

$$S-S_0=\frac{1}{a} Q \quad (13)$$

なお、対象流域の集水面積は小さく、流入水量データには季節によって異なる日周期変動を内在していたため、毎日の流量がピークを迎える時刻を週毎に特定し、その±6時間 Kirchner (2009)の蒸発散量を無視できる時間に相当するとし、この時間の流量データを用いて雨水貯留量を算出した。

3. 結果

3. 1 水位流量($H-Q$)曲線式

求めた水位流量($H-Q$)曲線式を式(14), (15), (16), (17)にそれぞれ示す。流出口では、毎年融雪の時期になると堰操作を行っており、人工的に水位が操作されているので毎年水位流量曲線を変更させる必要があり、2012年10月から実測を行っているので、流出口に関しては4つの $H-Q$ 曲線が求められた。2012年10月～2013年3月までを式(14), 2013年4月～2014年3月までを式(15), 2014年4月～3月までを式(16), 2015年4月～現在を式(17)に示した。また、流入口の $H-Q$ 曲線式は式(18)に示した。

$$Q=0.0491e^{4.3915H} \quad (14)$$

$$Q=0.0155e^{8.331H} \quad (15)$$

$$Q=0.546e^{5.0947H} \quad (16)$$

$$Q=0.4625H^{0.0654} \quad (17)$$

$$Q=9.5272H^{2.4884} \quad (18)$$

ここで Q ：流量, H ：水位, e ：自然対数の底である。

3. 2 流量について

図2に毘沙門沼の水収支の年間値を示す。図2を見ると、降雪期になると降水量の減少により流入量、流出量どちらも徐々に減少していることが確認できる。また、2月初旬から3月中旬にかけては流入量と流出量の差がほとんどなくなり、融雪期になると積もった雪が溶け出し流量が大きく増加するのが確認できる。夏季になると台風などの影響により集中豪雨が発生し、急激な流量の増加により普段の2倍から3倍にまで増加しているのが確認できる。1年を通してみてみると、融雪期や集中豪雨時以外の時期では流入量流出量とともに大きな変化は確認できなかった。

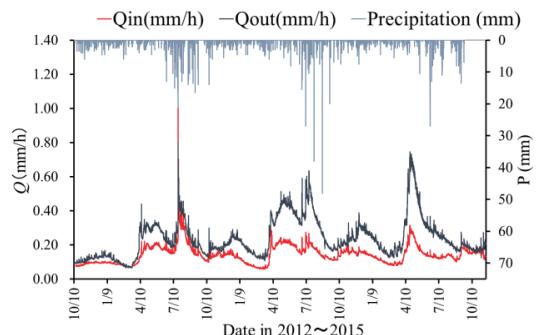


図2 毘沙門沼に流入する表流水の変動

3. 3 成分分離結果

図3に毘沙門沼の成分分離結果を示す。毘沙門沼の流入水は4つの成分に分離することができた。図3を見ると、表面流ほど降雨に対して敏感な反応をし、降雨が多い時期ほど表面流の割合が高くなっていることが読み取れる。また、中間流も降雨や融雪に対して反応はしているが、表面流ほど敏感ではなく緩やかな反応を示している。地下水は安定しており降雨が少ない時期では、表面流や中間流の割合が少ないのでに対して地下水の割合が非常に高いことが分かった。また、地下水は年間を通してほぼ一定の値を保っていることが分かった。

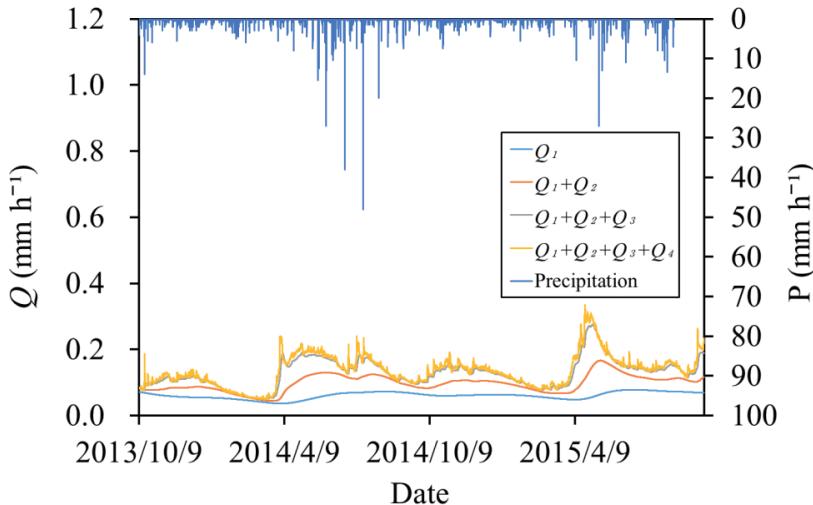


図3 成分分離結果

3. 4 貯留量

図4に毘沙門沼集水域の貯留量を示す。この図から、毘沙門沼集水域の貯留量は地下水に依存していることがわかる。また、地表に近い成分ほど貯留量には影響が少ないことが読み取れ、 Q_4 成分つまり $S_1 + S_2 + S_3 + S_4$ では貯留量にはほとんど影響がない。これらのことから、毘沙門沼の貯留量は透減率の低い、2つの地下成分で説明することができるといえる。また、降水が多い夏季などの時期は若干ではあるが Q_2 、 Q_3 成分の貯留量積算値である $S_1 + S_2$ 、 $S_1 + S_2 + S_3$ に対して貯留量が反応していることが読み取れる。貯

留量のピークは降水が多くなる夏季で 700 mm 程度になる。この時期から貯留量は徐々に減少し始め、降雪を境に急激な減少を示す。融雪の直前に貯留量は最小の 320 mm 程度になり、融

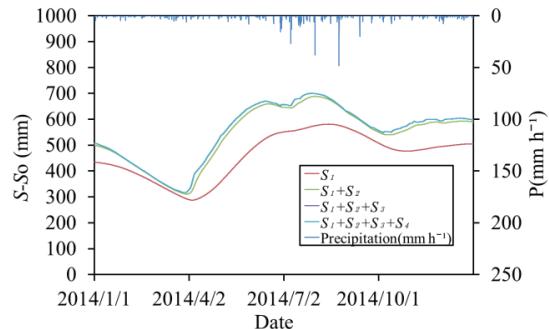


図4 毘沙門沼貯留量

雪の始まりとともに急激に貯留量は増加していることが分かる。年間の貯留量の平均値は 500 mm 程度である。

3. 5 流量の日周期の季節変動を考慮した貯留量の推定

図 5 に流量の日周期の季節変動を考慮した場合の毘沙門沼の貯留量を示す。Kirchner (2009) の夜間無降雨の条件下で貯留量を算出した場合と比較すると変わっていないように見えるが、詳しく見ると若干ではあるが減少していた。全貯留量を比較した図を図 6 に示す。それぞれの成分の流量の平均値で比較をすると Q_1 , Q_2 , Q_3 成分の積算値 S_1 , S_1+S_2 , $S_1+S_2+S_3$ では Kirchner (2009) のものより減少している。貯留量の寄与として高い成分は Q_1 , Q_2 成分の S_1 , S_1+S_2 であるため貯留量が減少したと考えられる。

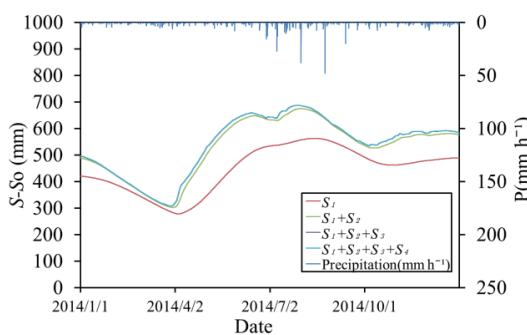


図 5 流量の日周期の季節変動を考慮した毘沙門沼貯留量

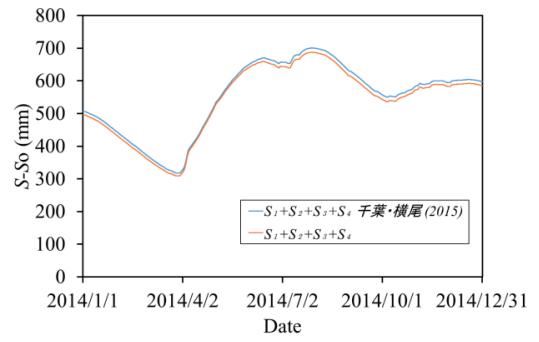


図 6 全貯留量の比較

4.まとめ

裏磐梯毘沙門沼への流入水量の長期モニタリングを行い、集水域内における雨水の貯留・流出過程の推定に取り組んだ。日野・長谷部 (1985)のフィルターフィルタ分離法によって流入表流水データをその透減特性によって分離した結果、集水域内の主要な貯留・流出過程は 4 つあることが判明した。さらに、Kobayashi and Yokoo (2013)および千葉・横尾 (2015)にならい、Kirchner (2009) の手法によって主要な 4 成分それぞれの雨水貯留量を推定した結果、透減率が小さい 2 つの流量成分に関する貯留量で流域内の雨水貯留量変動が説明できることが分かった。また、流量の日周期の季節変動を考慮し、貯留量推定に用いる流量データの時間帯を変化させることにより、藤元・横尾 (2015)よりも正確な貯留量を算出することができたと考えられる。これにより、貯留量の推定結果が若干ながら減少した。これは蒸発散量の影響をより正確に見積もることができたためと考えられるが、定かではない。今後はその原因の追究に取り組み、雨水の貯留・流出過程のさらなる解明に取り組む予定である。

謝辞

本研究は福島大学共生システム理工学研究科プロジェクト研究「遷移途中にある自然環境を自然遺産として良好に保全するための研究モデルの策定-磐梯朝日国立公園の人間-自然環境系（生物多様性の保全）に関する研究-」[文部科学省特別経費（プロジェクト）採択事業]，科学研究費補助金（若手研究 B, 24760388），東北大学災害科学国際研究所「特定プロジェクト研究（B-18）」，国立大学改革強化推進事業「環境放射能の動態と影響を解明する先端研究拠点の整備」の成果である。気象データには気象庁のデータを利用した。ここに謝意を表す。

参考文献

- Kirchner, J. W. (2009) Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward, *Water Resour. Res.*, 45, W02429. DOI: 10.1029/2008WR006912.
- Kobayashi, S. and Yokoo, Y. (2013) Estimating watershed-scale storage changes from hourly discharge data in mountainous humid watersheds: toward a new way of dominant process modeling, *Hydrol. Res. Lett.*, 7, 97-103. DOI: 10.3178/hrl.7.97.
- 千葉宇彦・横尾善之 (2015) 流域スケールの雨水貯留量推定法の理論的修正とその効果, 土木学会論文集 B1(水工学), 71(4), I_289-I_294.
- 日野幹雄・長谷部正彦 (1985) 水文流出解析—FORTRAN と BASIC による, 森北出版, 84-93.
- 福島大学大学院共生システム理工学研究科研究プロジェクト型実践教育推進センター自然共生・再生プロジェクト部・裏磐梯の湖沼環境を考える会議 (2012) 裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査中間報告書・裏磐梯五色沼湖沼群の環境の環境調査報告書, 72p.
- 藤元大季・横尾善之 (2015) 裏磐梯毘沙門沼の上流域における雨水の貯留・流出過程の推定, 東北地域灾害科学研究, 51, 201-206.