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*

福島大学共生システム理工学類　藤元　大季
福島大学共生システム理工学類　横尾　善之

1. はじめに

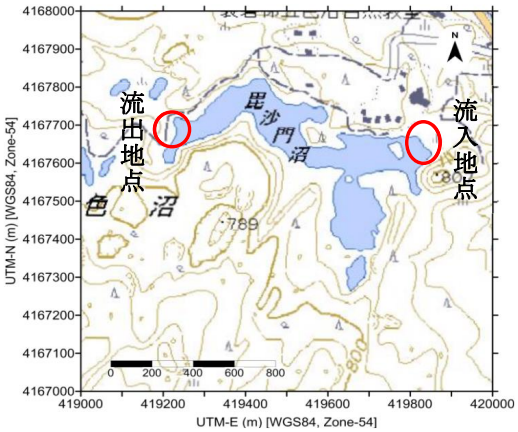
裏磐梯五色沼湖沼群は 1888 年の磐梯山噴火によって，土石流がせき止められたり，噴火の影響でできた窪地に降雨が溜まったりすることによって形成された。今日まで，裏磐梯五色沼は特異な水質によりこれまで様々な研究が行われてきた。たとえば千葉ら（1986）は水質形成要因についての研究し，温泉水などの複数の水質起源が存在することを指摘している。三浦ら（2014）は現地観測から得られた水質データから融雪期におけるトレーサーを発見した。このように水質に関する研究は様々おこなわれている一方で，水の量については研究があまり行われておらずデータが不足している。たとえば，渡辺（2014）によって表流水に関する水収支は明らかになったが，そのほかの流量に関する研究は不足している。そこで，本研究では裏磐梯五色沼湖沼群の毘沙門沼の流量や，各成分量，貯留量を算出することによって毘沙門沼の上流域における水の動態を把握することを目的としている。

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を**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）曲線式を累乗近似より作成した。

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

なお，Q: 流量 (m^3/s), H: 水位 (m), a: 定数 (m^2/s), n: 定数 (無次元)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

次に，求めた流量を日野・長谷部（1985）のフィルター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，まず流量の逓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（2）に代入し数値フィルター$\omega(k)$を求める。$\omega(k)$を(3)式に代入することで各成分量が求められる。

*Estimating rainwater storage and discharge processes of inflow to the Bishamon pond in Fukushima by Daiki Fujimoto and Yoshiyuki Yokoo

$$\omega(k)=c_0\exp\left(-\frac{c_1\,k}{2}\right)\frac{1}{\sqrt{\frac{{c_1}^2}{4}-c_1}}\sinh\left(\sqrt{\frac{{c_1}^2}{4}-c_1k}\right)=0 \tag{2}$$

$$Q`(t)=a\sum\omega(k)Q(t-k) \tag{3}$$

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，式（4）で表す。式（4）の両辺を S で微分することで式（5）を得る。式（5）に水収支式（6）を代入することで式（7）得る。式（7）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で式（8）のように近似できる。逓減部分の流量 Q と流量変化 dQ/dt との関係を式（9）のように表現し，これを積分して式（10）を得る。この式（10）の積分値を求めることで式（11）を得て，流量データから貯留量変動 S-S_0（S_0 は積分定数）を求める。しかし Kirchner (2009)の式（11）は非線形であるが，成分分離では線形の式を用いているので，b に 1 を代入することで理論的不整合がなくなる。式（11）に b=1 を代入すると式（12）となる。

$$Q=f(\mathrm{s}) \tag{4}$$

$$\frac{dQ}{dS}=f`(s)=g(Q) \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=P-ET-Q \tag{6}$$

$$g(Q)=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}S}=\frac{\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t}{\mathrm{d}S/\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t}{P-ET-Q} \tag{7}$$

$$g(Q)=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}S}=\frac{-\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t}{Q} \tag{8}$$

$$-\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}=aQ^b \tag{9}$$

$$\int\mathrm{d}S=\int\frac{\mathrm{d}Q}{g(Q)}=\int\frac{1}{a}Q^{1-b}dQ \tag{10}$$

$$S-S_0=-\frac{1}{a}\frac{1}{2-b}Q^{2-b} \tag{11}$$

$$S-S_0=\frac{1}{a}Q \tag{12}$$

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

年融雪の時期を中心に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その都度水位流量曲線を変更させる必要がある。2012 年の 10 月から実測を行っているが，流入口に関しては 3 つの水位流量曲線が求められた。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～現在までを式（16）に示した。また，水位操作の影響を受けない場所で測定している流出口の水位流量曲線式は式（17）に示した。

$$Q = 1.3084H^{1.6563} \quad (14)$$

$$Q = 7.5177H^{3.0882} \quad (15)$$

$$Q = 4.2947H^{2.6047} \quad (16)$$

$$Q = 9.5272H^{2.4884} \quad (17)$$

ここでQ：流量，H：水位である。

3.2 流量

図-2 に年間の毘沙門沼の流出入量と雨量の経時変化を示す。**図-2** から，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もに大きな変化は確認できない。

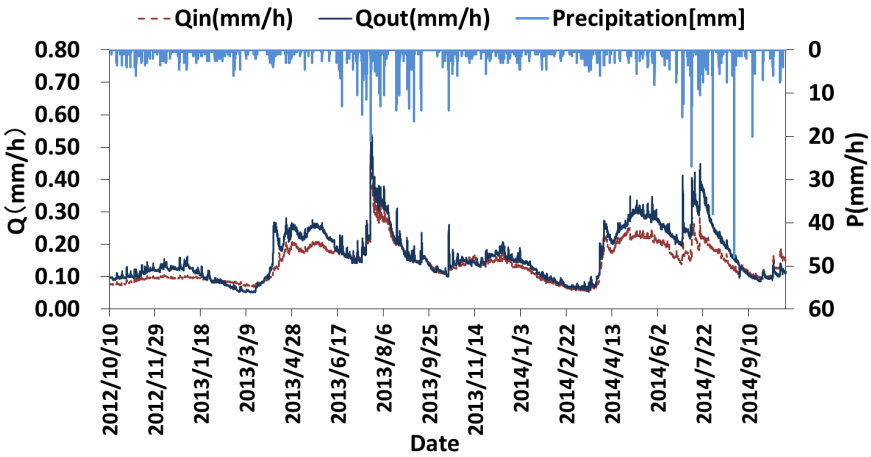
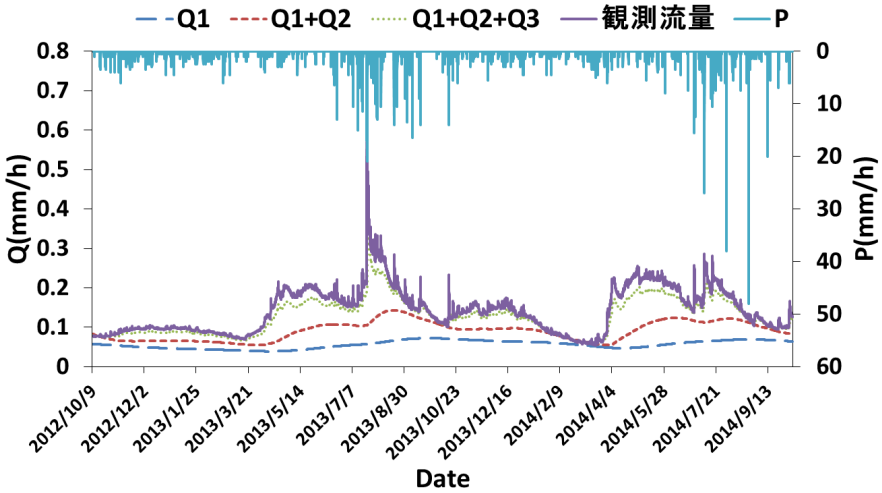


図-2　毘沙門沼の流入量と流出量

3.3 成分分離結果

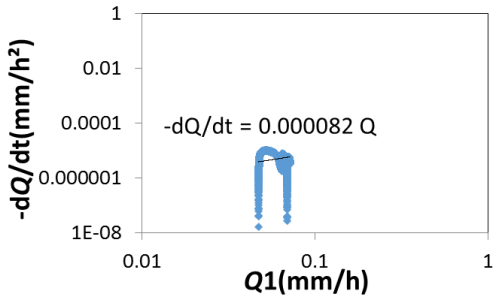
図-3 に毘沙門沼の入入寮流水の成分分離結果を示す。毘沙門沼の流入水は 4 つの成分に分離することができた。この図から，表面流ほど降雨に対して敏感な反応をし，降雨が多い時期ほど表面流の割合が高くなっていることが読み取れる。また，中間流も降雨や融雪に対して反応はしているが，表面流ほど敏感ではなく緩やかな反応を示している。地下水量は安定しており降雨が少ない時期では，表面流や中間流の割合が少ないのに対して地下水量の割合が非常に高いことが分かった。また，地下水量は年間を通してほぼ一定の値を保っていることが分かった。



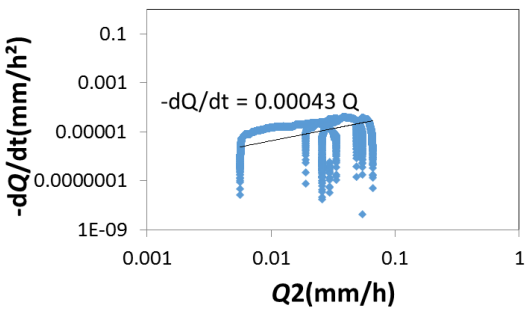
図−3　成分分離結果

3.4 各成分の流量と流量減少量の関係

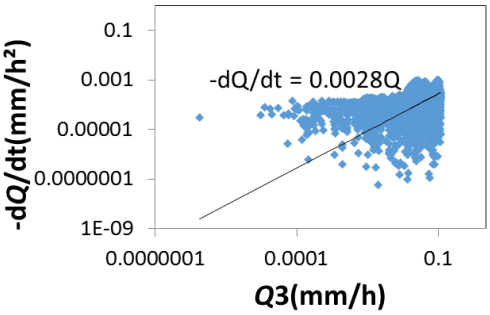
成分分離した各流出成分における Kirchner (2009)の条件に従って，流量と流量減少量の関係を**図−4〜7** に示した。この図から各流出成分のうち，表面に近い成分ほど-dQ/dt が大きな値を示していることが確認できる。



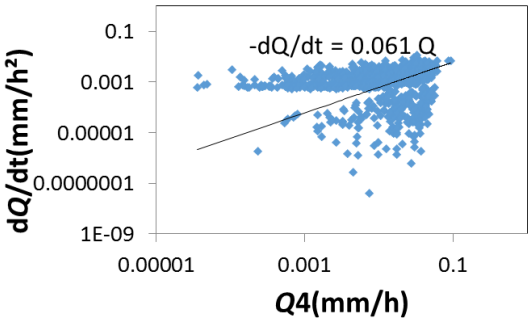
図−4　$Q1$ の流量と流量減少量



図−5　$Q2$ の流量と流量減少量



図−6　*Q*3 の流量と流量減少量

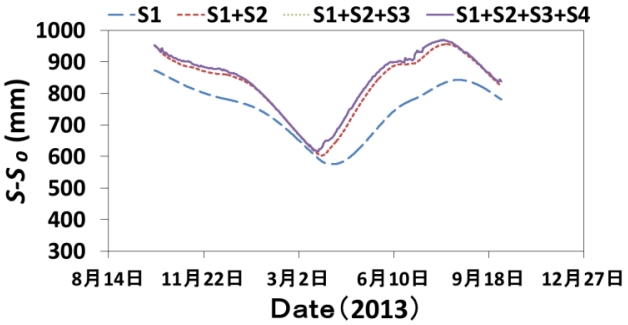


図−7　*Q*4 の流量と流量減少量

3.5 貯留量

図-8 に毘沙門沼の貯留量を示す。貯留量のピークは降水が多くなる夏季で，その時期から徐々に減少し始め，降雪を境に急激な減少を示し，融雪の始まりとともに急激に増量していることが分かった。

全成分合計の貯留量は平均で 840 mm となり，そのうち地下水流出成分（*Q*1）の平均貯留量（*S*1）は 747 mm で，全体の約 9 割を占めることから，地下水流出成分の貯留量の重要性が確認できる。遅い中間流（*Q*2）の平均貯留量は 80 mm であり，その増減から土壌からの流出成分の貯留量である可能性が示唆される。全貯留量はこの 2 つの貯留量で説明できるため，本流域では地中流の成分が主要な成分であると言える。一方，地表に近い成分ほど貯留量が少ないことが読み取れ，*Q*3 および *Q*4 の貯留量が無視できる量である。



図−8　毘沙門沼の貯留量

4. まとめ

本研究は，裏磐梯毘沙門沼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・流出過程の推定に初めて取り組んだ。日野・長谷部（1985）のフィルター分離法によって流入表流水データをその逓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)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，逓減率が小さい 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。この結果は，比較的新しい噴火によって形成された同流域では雨水が浸透しやすく，地中を流れて流出する成分が多いことを示している。その逆に，降雨に対する応答が早い 2 成分は流量増加時のハイドロ

グラフの形成するものの，滞留時間は短く，流域スケールの貯留量への寄与率は低いことがわかる。今後は，流域内の雨水の滞留時間の推定に取り組み，雨水の貯留・流出過程の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）科学研究費補助金（基盤 B，22360192）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.

千葉茂・朝倉誠司・松本仁志 (1986), 裏磐梯五色沼の水質とその成因について, 福島大学教育学部論集理科報告, 38, pp.19-29.

日野幹雄・長谷部正彦 (1985), FORTRAN と BASIC による　水文流出解析, 森北出版, pp.84-93.

三浦淳・渡辺泰世・横尾善之・藪崎志穂 (2014), 裏磐梯毘沙門沼融雪期の流入表流水量と水質の関係, 東北地域災害科学研究, 第 50 巻, pp.254-250.

渡辺泰世 (2014), 裏磐梯毘沙門沼における表流水量観測と水収支に関する研究，福島大学大学院共生システム理工学研究科修士論文，24 pp.