

## 研究課題 積雪寒冷地の水循環の解明とモデリング

研究代表者 石田享平（北海道開発土木研究所 環境水工部 部長）

研究分担者 渡邊康玄（北海道開発土木研究所 環境水工部河川研究室室長 前環境研究室室長）

中津川誠（北海道開発土木研究所 環境水工部環境研究室室長 前環境研究室副室長）

石川信敬（北海道大学低温科学研究所 雪氷気象研究グループ 助教授）

兒玉裕二（北海道大学低温科学研究所 雪氷気象研究グループ 助手）

石井吉之（北海道大学低温科学研究所 雪氷循環研究グループ 助手）

研究期間 平成 13 年 4 月 1 日～平成 14 年 3 月 31 日

## 1. 研究目的

治水・利水・環境に配慮した適正な水管理にとっては水循環の的確な把握が不可欠である。とくに積雪寒冷地では、水資源として重要な降積雪や融雪流出の推定・予測が水循環の中で大きな役割を担っている。また、直接計測の困難な蒸発散量の推定も重要な課題である。

実務的には融雪量や蒸発散量については、ブラックボックス的手法で推定されてきたが、最近の各種気象・水文情報の集積と観測体制の整備により、物理的メカニズムを明確化した手法によって推定精度の向上が可能となりつつある。とくに積雪寒冷地においては、積雪の有無によって水・熱フラックスが大きく変化するため、降水、積雪、融雪、蒸発散といった一連の水文現象を包括的かつ定量的に推定していく必要がある。

## 2. 研究内容

積雪寒冷地における水循環過程の中で重要な役割を果たす雪については、降雪から積雪→融雪→流出に至るプロセスをモデル化する必要がある。このように、雪の変化プロセスや植生の効果を踏まえ、蒸発散など森林域の一連の水量を推算したモデルを提案した。また、推定結果については、水収支的観点から妥当性を検証した。

本研究では、札幌市南部にある豊平川上流部の定山溪ダム流域（104km<sup>2</sup>）および豊平峡ダム流域（134km<sup>2</sup>）の2流域を検討対象とした。データとしては、ダム管理所地点で計測されている降水量、風速、日射量、日照時間、湿度、気温、積雪深を用い、解析対象年は1996年～2000年まで計5カ年とした。

蒸発散量は地被や植被の状態によって動的に変化する。そこで、より高い精度で熱フラックスを推定するために、地表面（積雪面）と植被層各々の代表温度を近藤ら<sup>1)</sup>によって提案されている2層モデルに基づき求めた。これにより、地表面蒸発、樹体からの蒸散、遮断蒸発を推算した。基礎式を表-1に示す。なお、モデルパラメータの中で重要なアルベドは気温によってパラメタライズ<sup>2)</sup>し、森林の効果を表す葉面積指数 LAI は石井ら<sup>3)</sup>による LAI 月別値を用いた。このほか、バルク輸送係数、蒸発効率は水収支法との整合性を考慮し、土壌面、積雪面、植被層それぞれの値を設定した。とくに積雪面のパラメータについては北大低温研で示した知見<sup>4)</sup>を参考にした。

表-1 モデルの基礎式

## 2層モデルの基礎式

$$\begin{aligned} \text{積雪面;} & f_r R \downarrow + (1 - f_r) \sigma T_v^4 - Q_G + Q_R \\ & = \varepsilon \sigma T_g^4 + H_g + \ell E_g \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{植被層;} & (1 - f_r) (R \downarrow + \varepsilon \sigma T_g^4) \\ & = 2(1 - f_r) \sigma T_v^4 + H_v + \ell (E_v + I) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{降水による遮断蒸発に伴う潜熱フラックス} \\ \Omega^* \times Pr < 86400 I_{POT} \times (\tau_p / 24) + S_{MAX} \text{ のとき} \\ \text{降水強度小;} & I = \ell \left( \frac{\Omega^* \times Pr}{86400} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Omega^* \times Pr \geq 86400 I_{POT} \times (\tau_p / 24) + S_{MAX} \text{ のとき} \\ \text{降水強度大;} & I = \ell \left( E_v \times (\tau_p / 24) + \frac{S}{86400} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$f_r$ : 放射に対する植被層の透過率

$R \downarrow$ : 下向き正味放射量 (W/m<sup>2</sup>)

$Q_G$ : 土壌もしくは積雪に供給される熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$Q_R$ : 降雨によって供給される熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$H_g, H_v$ : 各々地表面(積雪面)および植被層からの顕熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$\ell E_g, \ell E_v$ : 各々地表面(積雪面)および植被層からの潜熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$\ell I$ : 植被層からの遮断蒸発に伴う潜熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)

$T_g, T_v$ : 各々地表面(積雪面)および植被層の代表温度 (°C)

$\varepsilon$ : 射出率 (地表面 = 1.00、積雪面 = 0.97)

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann 定数 (= 5.67 × 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>)

$Pr$ : 降水量 (mm/d)

$\tau_p$ : 降水継続時間 (h)

$S$ : 樹体表面の保水量 (mm)

$S_{MAX}$ : 最大保水容量 (= 2.0 mm)

$\Omega^*$ : 降水が樹体にぶつかる確率

$\Omega$ : 樹冠の閉鎖率 (= 0.9)

$I_{POT}$ : 遮断蒸発能 (mm/s)、 $I = 0$  として2層モデルで計算

### 3. 研究成果

最初に水収支を明らかにするため、降水量、流出量といった水文諸量を推算する。標高による降水量の違いを考慮し、標高とダム管理所における降雨量もしくは降雪量(降雪深)の線形回帰式によって任意メッシュ(約1km四方)の降水量を推定できるような方法を提案した。降雨量については図-1のようにティーセン法と流域平均値について比較したが、空間的分布を考慮した推定ができたと言える<sup>2)</sup>。

次に2層モデルによる蒸発散量の推定結果を表-2、図-2に示す。これまで、水収支法などとの比較により、ダム流域の蒸発散量はほぼ可能蒸発散量に近く450mm~550mmという見解が示されてきた<sup>2)</sup>。つまり、森林域での実蒸発散量は可能蒸発散量に近い値を示し、蒸発散に必要な水分が(植生を含む)地帯に十分に供給されていることが推測できる。水収支法による5カ年平均蒸発散量は定山溪ダム流域で505mm、豊平峡ダム流域で516mmであった。次に2層モデルによる実蒸発散量について検証する。5カ年流域平均値で定山溪ダム流域では植被層蒸散量156mm、遮断蒸散量282mm、地表面蒸発散量67mmで全蒸発散量505mmとなった。また、豊平峡ダム流域では植被層蒸散量188mm、遮断蒸散量286mm、地表面蒸発散量98mmで全蒸発散量572mmとなった。この結果、総量では水収支法と同様な蒸発散量が推定されたことになる。図-2より当該流域では、蒸散潜熱よりも遮断蒸発が顕著である。また、地表面温度の方が気温より低い冬期には凝結が起きやすくなっている。ダム流域では降水による遮断蒸発量は全蒸発散量の50~56%に達して、近藤ら<sup>1)</sup>の示す見解(30~50%)よりやや大きく算出された。

積雪深は、降雪があった場合の累加される一方、融雪量と地表面蒸発散量を差し引いて求める。積雪水量を積雪深に変換するため、積雪密度は雪質によって変化すると、積算温度の関数として与えた。以上の2層モデルを基本とした融雪モデルで再現した結果を図-3に示す。この結果、積雪変化は概ね妥当に再現されていることがわかる。

### 4. 今後の課題

積雪寒冷地の森林ダム流域で2層モデルによる降水、積雪、融雪、蒸発散といった一連の水文現象を、同じ水・熱フラックスのもとで包括的に推定した。今回の手法を発展させるために、バルク輸送係数等のパラメータや積雪・融雪の過程(積雪密度の変化、融雪水の積雪浸透)、降雪遮断蒸発をより明確化することを今後の課題とする。

### 参考文献

- 1) 近藤純正,1994;水環境の気象学, 朝倉書店.
- 2) 口澤寿,中津川誠,2002;森林域の水・熱フラックスを考慮した積雪と蒸発散の推定, 平成13年度土木学会北海道支部論文報告集, 58, pp.358-361.
- 3) 石井孝, 梨本真, 下垣久, 1999, 衛星データによる葉面積指数 LAI の推定, 水文・水資源学会誌, pp.210-220.
- 4) 小島賢治, 石川信敬, 本山秀明, 山田芳則, 1985, 積雪の蒸発散量, 低温科学, 物理篇, 44, pp.49-62.
- 5) 石川信敬, 小島賢治, 本山秀明, 1985, 熱収支法及び単純な気象要素による表面融雪量の予測について, 低温科学, 物理篇, 44, pp.63-75.

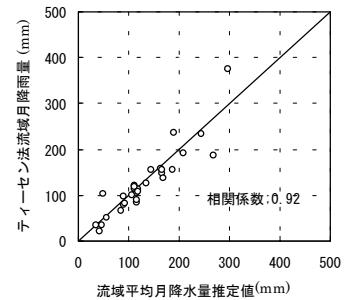


図-1 定山溪ダムにおける流域平均雨量の再現(1996年~2000年)

表-2 流域水収支と2層モデルの計算結果(1996-2000までの5カ年平均値)

	降雨量	降雪水量	流出量	水収支法蒸発散量
定山溪ダム流域	811	1263	1569	505
	植被層蒸散量	遮断蒸発量	地表面蒸発散量	2層モデル法総蒸発散量
	156	282	67	505
豊平峡ダム流域	1043	1077	1604	516
	植被層蒸散量	遮断蒸発量	地表面蒸発散量	2層モデル法総蒸発散量
	188	286	98	572

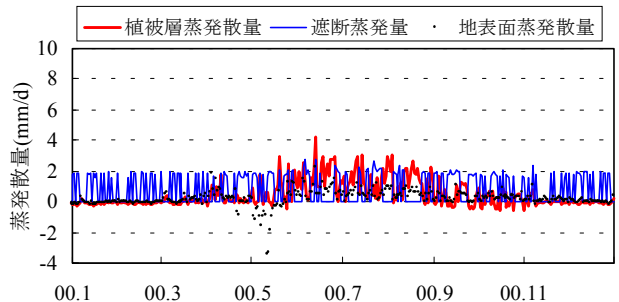


図-2 豊平峡ダム流域における蒸発散量の推定結果(2000)

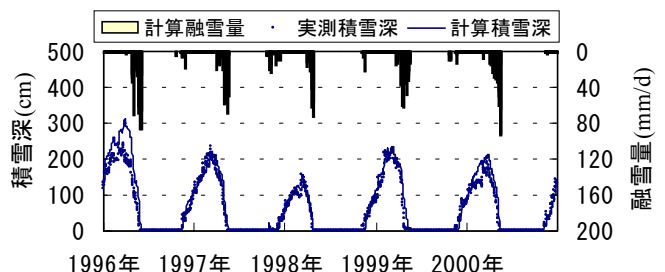


図-3 豊平峡ダムにおける積雪深・融雪量の計算結果(大二股地点; 標高760m; 1996.1~2000.12)