積雪・融雪を含む森林域の水文過程のモデル化

（株）福田水文センター　正会員　○口澤　寿
（独）北海道開発土木研究所　正会員　中津川　誠

１．はじめに

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。本報告では、近藤ら[1)]によって提案されている2層モデルを積雪寒冷地のダム流域に適用し、森林植被の影響を考慮した積雪・融雪と蒸発散の再現を試みた。

とくに、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、雪の変化プロセスを踏まえ、森林域の一連の水文量を推算したモデルを提案した。また、これらによって推定した結果については、水収支的観点から妥当性を検証した。

２．検討対象流域の概要

北海道開発局のダム管理所においては各種観測を毎正時に実施している。これらは大気・地表面間の熱フラックスの推定に生かすことができる。本報告では、札幌市南部にある豊平川上流部の定山渓ダム流域（104km^2）および豊平峡ダム流域（134km^2）の2流域である。解析にはダム管理所地点で計測されているデータ（降水量、風速、日射量、日照時間、湿度、気温、積雪深）を用いた。解析対象年度は1996年～2000年まで計5カ年とした。また、定山渓ダム流域内の流木処理施設における冬期微気象観測結果も参考とした。

３．流域降水量の推定

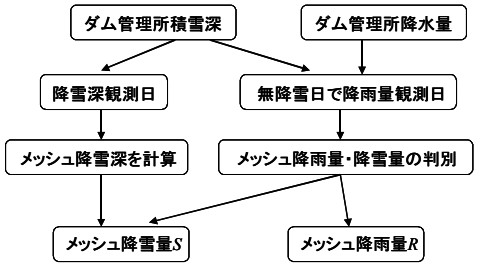

図-1 流域降水量推定のフローチャート

最初に降水量､流出量といった水文諸量を明らかにする。作業の手順を図-1に示す。降水量が地形の影響を受けることはよく指摘されている。とくに標高の高低が降雨、降雪に与える影響が大きいと考えられる。本報告では手法を省略するが、ダム管理所における降雨量と降雪量(降雪深)より、任意メッシュ(約 1km 四方)の推定を行った。降雨量については図-2 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[2)]。

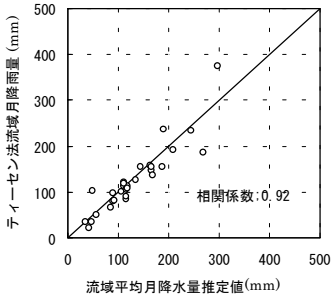

図-2 定山渓ダムにおける流域平均雨量の再現（1996 年～2000 年）

４．2層モデルによる推定手法の概略

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(土壌もしくは積雪面)と植被層各々の熱収支を近藤ら[1)]によって提案されている2層モデルによって定式化する。地表面の積雪の有無が判定できるため、その違いに応じて熱フラックスと蒸発散量が計算できることとなる。なお、2層モデルによる熱収支[2)]は次式である。

$$\text{地表面；}\ f_V R\downarrow+(1-f_V)\sigma T_V{}^4-Q_G+Q_R = \varepsilon\sigma T_g{}^4+H_g+\ell E_g \quad (1)$$

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

ここで、f_vは放射に対する植被層の透過率、$R\downarrow$は下向きの正味放射量(W/m^2)、はQ_Gは土壌もしくは積雪に供給される熱フラックス(W/m^2)、Q_Rは降雨によって供給される熱フラックス(W/m^2)。H_g、H_vは各々地表面(土壌もしくは積雪面)および植被層からの顕熱フラックス(W/m^2)、ℓE_g、ℓE_vは各々地表面(土壌もしくは積雪面)および植被層からの潜熱フラックス(W/m^2)、ℓIは植被層からの遮断蒸発に伴う潜熱フラックス(W/m^2)、T_g、T_vは各々地表面(土壌もしくは積雪面)および植被層の代表温度(K または℃)、εは射出率(地表面=1.00、積雪面=0.97)、σは Stefan-Boltzmann 定数(=5.67×10^{-8}W/m^2/K^4)である。それぞれの顕熱・潜熱フラックスはバルク法より求められる。なお、降水による遮断蒸発潜熱は次式とする。

$$\text{降水強度小；}\ \ell I=\ell\left(\frac{\Omega^*\times Pr}{86400}\right) \quad (3)$$

キーワード　2層モデル、降水、融雪、遮断蒸発、蒸発散
連絡先　〒001-0024　北海道札幌市北区北24条西15丁目2－5　㈱福田水文センター　TEL 011-736-2371

$$\text{降水強度大；}\ \ell I = \ell\left(E_v \times (\tau_p/24) + \frac{S}{86400}\right) \qquad (4)$$

ここで、Pr は降水量(mm/d)、τ_p は降水継続時間(h)、S は樹体表面の保水量(mm)、Ω^*は降水が樹体にぶつかる確率である。樹体が十分濡れない少降水日には、式(3)を用い、強い降水があり、樹体が十分濡れた場合には、式(4)を用いる。降水強度は近藤ら[1]と同様に $86400 I_{POT} \times (\tau_p/24) + S_{MAX}$ と $\Omega^* \times Pr$ の値の比較を行う。ここで、I_{POT} は遮断蒸発能と呼ばれるもので、I=0、β=1 として求めた植生蒸発散量 E_V を I_{POT}(mm/s)とする。S_{MAX}は最大保水量(=2.0mm)である。なお、降雪も降雨と同様に遮断蒸発を考えることとした[3]。また、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[2]し、森林の効果を表す葉面積指数 LAI は石井ら[4]による LAI 月別値を用いた。このほか、バルク輸送係数、蒸発効率は文献値[1]に基づき、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。

５．2 層モデルによる積雪・蒸発散量の検証

次に 2 層モデルによる蒸発散量の推定結果を表-1、図-3 に示す。これまで、水収支法などとの比較により、定山渓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[2]。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）地被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渓ダム流域で 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渓ダム流域では植被層蒸散量 147mm、遮断蒸発量 281mm、地表面蒸発散量 75mm で全蒸発散量 503mm となった。また、豊平峡ダム流域では植被層蒸散量 179mm、遮断蒸発量 285mm、地表面蒸発散量 109mm 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-3 より当該流域では、蒸散潜熱よりも遮断蒸発に伴う潜熱が顕著である。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%に達していて、近藤ら[1]の示す見解(30～50%)よりやや大きい傾向で算出された。また、降雪遮断蒸発量は両ダム共に 5 カ年流域平均値で 130mm 程度となり、中井ら[5]と同様な値(80～140mm)となった。

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、これは雪質によって変化するとして、定山渓ダム流域内の流木処理施設における観測に基づき、積雪密度を積算温度の関数[2]として与えた。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-4 に示す。図-4 より標高の高い地点においても積雪変化は概ね妥当に再現されている。

表-1　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）

定山渓ダム流域	降雨量	降雪水量	流出量	水収支法蒸発散量
	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
	147	281	75	503
豊平峡ダム流域	降雨量	降雪水量	流出量	水収支法蒸発散量
	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
	179	285	109	572

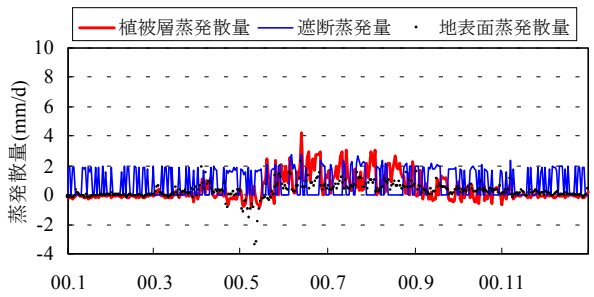

図-3 豊平峡ダム流域における蒸発散量の推定結果(2000)

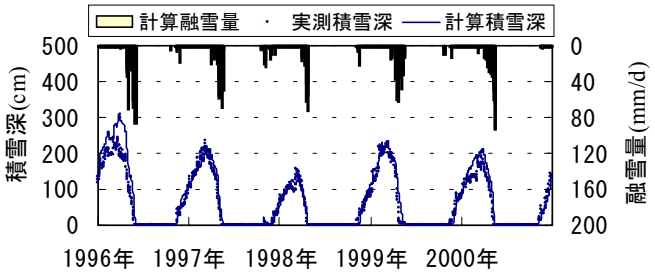

図-4 積雪深・融雪量の計算結果
(豊平峡ダム流域内大二股地点;標高760m;1996.1～2000.12)

６．まとめ

積雪寒冷地の森林ダム流域で 2 層モデルによる降水量、積雪量、融雪量、蒸発散量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することを試みた。今回の手法を発展させることで、流域水管理の実務や水循環の評価にも活用できると考えられる。

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；熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散量の推定, 開発土木研究所月報, (投稿中).
3) 近藤純正, 中園信, 渡辺力, 桑形恒男, 1992；日本の水文気象(3)-森林における蒸発散量-, 水文・水資源学会誌, pp. 8-18.
4) 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.
5) 中井裕一郎, 坂本知己, 寺嶋智巳, 北村兼三, 1996；トドマツ林における降雪の遮断蒸発量(II)熱収支モデルによる推定と水収支的観測との比較, 日本林学会誌, No 78, pp. 15-19.