# 積雪水資源量評価における森林の影響について

INFLUENCE OF THE FOREST FOR EVALUATION OF SNOW WATER EQUIVALENT

## 泉 宏和<sup>1</sup>·風間 聡<sup>2</sup>·沢本 正樹<sup>3</sup>

## Hirokazu IZUMI, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO

1学生会員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
 <sup>2</sup>正会員 博(工) 東北大学大学院 環境科学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)
 <sup>3</sup>フェロー 博(工) 東北大学大学院 工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

The effect of forest on snow was evaluated by snow model. The snow model consists of a snowfall and snowmelt models. The amount of snowfall interrupted by the canopy was evaluated using the snowfall model. The heat balance method was used in the snowmelt model. *LAI* (Leaf Area Index) was used as parameter showing the effect of forest. As results, snow depth calculated by the model was almost corresponding to observed data. Applying this model to evaluate forest effects, dense forest can remain snow longer under the high temperature condition. This says that high *LAI* forest is useful for prevention of snowmelt retention.

Key words: SWE, snow depth, LAI, forest, heat balance method, degree-day method, snowmelt rate factor

## 1. はじめに

冬の間に貯留された積雪は水供給を補う重要な水資源 となり得る一方,近年の地球規模での温暖化による冬の 積雪および春の融雪の変化に伴う水文・水資源への影響 が懸念される.積雪として貯留され,融雪水とともに徐々 に流出していた水が温暖化により雪から雨に変化し,冬 にそのまま流出することが予想され,それに伴い冬の河 川流量が増加すると同時に,融雪期後期の河川流量の減 少が懸念される.そこで,貴重な積雪水資源を高度利用 するとともに,雪崩や吹雪などの雪氷災害を最小限にと どめるためには,日本全体という広域スケールにおいて 積雪・融雪情報の整備が必要である.

これまで戸塚ら<sup>1)</sup>,泉ら<sup>2</sup>は気象データ,衛星データ を用いて日本全域という広域での積雪分布を時系列で推 定および評価してきた.ここで,積雪分布特性は,対象 領域のスケールにより異なるが,緯度,標高,斜面方位, 植生などの様々な影響を受ける.特に積雪の多い山間部 では森林の影響が大きい<sup>3)</sup>といわれている.森林の存在 により,降雪は樹冠において遮断の影響を受け,林内の 融雪量は林床に届く日射量の減少によって支配されてい る.戸塚ら,泉らのモデルでは融雪量を推定する際に degree-day 法を用い,必要な融雪係数を東日本,西日本で 一様として与えたために消雪時期にやや遅れが見られた.

日本は他の地域に比べて、森林面積が比較的広い.森 林における積雪量評価は open area の規模と形状、樹種、 立木密度など多くの要因が関係している. Greene ら<sup>4</sup>は 融雪期を対象とし、森林等の影響を受ける山地流域にお いて斜面, 植生の効果を考慮した雪の輸送過程をモデル 化し、吹き溜まりの形成を再現した.また、Molotch ら<sup>5)</sup> は融雪期を対象として、AVHRR 等から積雪面積情報を作 成し、それを利用して degree-day 法により積雪水量推定 モデルを提案し、面積35,100km<sup>2</sup>の流域に適用してモデル の適用性が高いことを示している. そして、大久保ら 6 は降雨の遮断モデルを基にした降雪遮断モデルにより, 樹冠層で遮断される雪の量, 蒸発量を評価している. こ れらはそれぞれ降雪, 融雪のみに着目しているため, 降 雪---融雪の---連の過程についての解析は行われていない. 戸塚ら 7 は森林が積雪に及ぼす影響を評価した. 葉面積 指数, LAI (Leaf Area Index)を入力パラメータとして、 樹冠 層による降雪遮断、日射の減少を考慮したモデルを構築 した. その戸塚らのモデルは数値計算の段階であり、モ デルの検証をするには至っていない.

そこで、本研究では森林の存在を考慮し、戸塚らが構築したモデルをさらに発展させ、降雪一融雪過程の推定精度を評価し、汎用性のあるモデル、すなわち広域に適用可能なモデルの構築を目指す.そして、融雪係数を分布的に与えることで広域での積雪分布推定の精度向上が見込まれる.このようにして、森林の影響を考慮するこ

とにより、融雪期に貯留されている積雪水資源量を把握 することを目的とする.

## 2. 研究対象領域・期間およびデータセット

#### (1) 対象領域·期間

対象領域は宮城県と山形県の県境に位置する山形蔵王 (北緯38°07′東経140°25′)であり,標高600~1600 mである.対象期間は2004年12月~2005年5月である.

## (2) データセット

想定樹種として、落葉林(冬季)、疎林(針広混交林)、 常緑針葉樹を考え、それぞれLAIを0.3、2.0、5.0とした. 加えて草地(樹冠のない場所)における計算も行った. 気象データは、気象庁の山形地方気象台において観測さ れている降水量、気温、大気圧、風速、日射量、積雪深 を用いた.なお、これらのデータは2004年12月~2005 年5月までの1時間ごとのデータである.ただし、降水 量は日平均気温が2℃以下の場合に雪とし<sup>3</sup>、降雪量とし て与えた.また、積雪が多い山間部において森林の影響 を評価するために、気温、降雪量に関して標高依存性を 考慮し、気温については気温減率0.6℃/100mを用い、降 雪に関しては近藤ら<sup>®</sup>にならい式(1)を用いて標高差 1000mで2倍となるように補正した.

$$SF = SF' \times \{1 + 0.001 \times (E_m - E_p)\}$$
(1)

ここで、*SF* は標高補正をした降雪量(mm)、*SF* は AMeDAS の降水量データ(mm)、 $E_m$  は推定を行う地点の 標高(m)、 $E_p$  は観測点の標高(m)、0.001 は補正係数であ り、気温 2℃以下を降雪としている条件下において、暖 地・寒地ともに適用できる<sup>8</sup>.

## (3) 現地観測

山形蔵王ライザワールド(スキー場)の森林内に自動 積雪深計(アレック電子社製)を設置し、2005年4,5月 に積雪深観測を行った.積雪深計の設置位置は、落葉樹 林内で、標高1100mである.計算条件として*LAI*=0.3 と した.

## 3. 解析方法

#### (1) 降雪モデル

降雪が地面に落ちることなく枝葉に捕捉されることを 降雪遮断と言う.本研究で降雪遮断モデルは、戸塚らが 大久保ら<sup>の</sup>のモデルを基にして構築したものである.

降雪遮断モデルは、樹冠層において遮断量、冠雪量を 計算するモデルであり、降雪の遮断は降雨の遮断モデル に着雪の効果を考慮して式(2)のように表現される.ここ で、冠雪量とは樹冠層で遮断されて樹冠に保持されている量のことである.

$$P_{rfl} = P_{rf} \left[ 1 - \exp(-f \cdot LAI \cdot \xi \cdot \varsigma) \right]$$
(2)

$$\xi = 1 + k_{f1} \frac{S_f}{S_{fR\,\text{max}}} \qquad (S_f \le S_{fR\,\text{max}})$$
(3)

$$\begin{cases} \zeta = 1 + k_{f1} & (S_f \ge S_{fR \max}) \\ \zeta = 1 & (S_f \le k_{f2}S_{f\max}) \\ \zeta = 1 - \frac{S_f - k_{f2}S_{f\max}}{(1 - k_{f2})S_{f\max}} & (S_f \ge k_{f2}S_{f\max}) \end{cases}$$
(4)

LAI: 葉面積指数f: 葉の傾きを表す係数(=0.5) $<math>P_{rf}: 樹冠層における遮断量(mm)$  $P_{rf}: 樹冠層に入ってくる降雪量(mm)$  $<math>S_{f}: 冠雪量. 初期値は最初の降雪量 <math>P_{rf}(mm)$  $S_{fmax}: 最大冠雪量(mm)$  $S_{fmax}: 葉の凹凸が冠雪でほぼ覆われて滑らかになった$ ときの冠雪量(mm) $<math>k_{fI}: 着雪により遮断量が増加する効果を表す係数$  $<math>k_{fI}=0.3$  (LAI<1)  $k_{fI}=0.05$  (LAI<1)  $k_{fI}=0.05$  (LAI>1)  $k_{f2}: 冠雪量が最大限界に近づくにつれ遮断量が$  $減衰する効果を表す係数 <math>k_{f2}=0.2$ また,最大冠雪量  $S_{fmax}$  および  $S_{Rmax}$  は大久保ら<sup>6</sup>が

また, 取入池雪重 S<sub>fmax</sub> わよい S<sub>fkmax</sub> は入八床ら か 求めたパラメータを基に多項近似した式(5),(6)を用いる. なお, 大久保らは近藤ら<sup>9</sup>の遮断蒸発に関する着水量の 実験等からパラメータを求めている.

$$S_{f \max i} = -0.37 LAI^2 + 4.27 LAI - 0.046$$
(5)

$$S_{fR\max i} = -0.13LAI^2 + 2.77LAI - 0.22 \tag{6}$$

遮断量を計算し、冠雪量が最大冠雪量を超える場合林 床へ滴下が生じるものとする.

降雪量が空間的に均一であっても風がある場合には、 地形の凹凸の影響を受けて風の分布に不均一が生じ、 その結果堆積の分布も不均一となる.実際には、地形 の凹凸により地表面付近の風が強いところでは堆積が 生じず、弱いところで堆積が起こる.しかし本研究で は地形は均一であると考えているため、風による巻上 げや、樹幹への再付着については無視している.

#### (2) 融雪モデル

林床に届く日射量の減少によって林内の融雪量は支配 されている.そこで、日射量の減少を考慮した熱収支解 析により積雪面と樹冠層における融雪量を求める.

#### a)積雪面における熱収支

式(7)に積雪表層に起きる熱収支の式を示す.

$$Q = Rn + H + lE \tag{7}$$

ここで, Q は融雪熱量, Rn は純放射量, H は顕熱交換量, IE は潜熱交換量である.各要素の正負は,熱量が積雪表 層に向かう場合が正である.ここでは,雨による伝達熱 は無視する.また, Rn は式(8)で表される.

$$Rn = (1 - ref)I_0 + (Ld - Lu)$$
(8)

ここで, ref はアルベドであり, 式 (9)<sup>10</sup>により推定した.

$$ref_0 = ref_{MAX}$$

$$ref_n = (ref_{n-1} - ref_{MIN}) \times \exp(-1/k) + ref_{MIN}$$
(9)

ここで、 $ref_n$  は降雪後 n 日のアルベドであり、 $ref_{MIN}$  はア ルベドの最小値 (=0.4)、 $ref_{MAX}$ はアルベドの最大値であり 気温により決まる.また、新積雪が生じたときは、 $ref_0 = ref_{MAX}$ とする.

さらに, H, IE は式(10), (11)に示すバルク法から求めた.

$$H = c_P \rho C_H U (T_0 - Ta) \tag{10}$$

$$lE = \iota\rho\beta C_H U[q_{SAT}(1-rh) + \Delta(T_0 - Ta)]$$
(11)

ここで,  $c_p$  は定圧比熱,  $\rho$  は空気密度 ( $kgm^3$ ), U は風速, l は水の気化の潜熱,  $q_{SAT}$  は飽和比湿,  $C_H$  はバルク輸送係数,  $\beta$  は蒸発効率, m は相対湿度ある.

ただし、バルク輸送係数と蒸発効率は近藤<sup>10)</sup> に従い、  $C_{H}=0.002, \beta=1.05$  とした.また、風速は式(12)を満たすように対数分布として与えた.

$$U = \frac{u^*}{k} \ln \frac{(z-d)}{z_0}$$
(12)

ここで、kはカルマン定数 (= 0.4)  $u^*$  は摩擦速度、 $z_0$ は 粗度、dはゼロ面変位である。粗度  $z_0$ は近藤<sup>10</sup> に従い、 積雪面において  $z_0$ =0.005、森林において  $z_0$ =1.0、都市域 において  $z_0$ =3.0 とし、ゼロ面変位 dは 7m とした。

#### b)樹冠層における熱収支

LAI の低い落葉樹林でも、日射は林外の 50~80%程度 に低下して、融雪量に影響を与えている.森林内の高さz に伝達される日射量 I(z) は式(13)で表すことができる.

$$I(z) = I_0 \times \exp(-f \times LAI) \tag{13}$$

ここで、f は葉の傾きを表す係数 (=0.5)、また、長波放 射についても同様に式(14)により樹冠の影響を考慮した.

$$L(z) = La \times \exp(-1.66 \times LAI) \tag{14}$$

ここで, *L*(*z*) は高さ*z*における下向き長波放射, *La* は樹 冠上面に届く長波放射量である. なお,本研究では樹高 を 10m として解析を行った.

#### (3) 積雪深推定モデル

積雪深は,風間<sup>11)</sup>にならい降雪モデルと雪の圧密過程 を考慮し推定する.このモデルは推定した積雪水量,気 温を用いて積雪深を時間単位で推定するものである. 積雪深 D は,前日の積雪深 D'と降雪深 Dn から式(15) のように求められる.

$$D = D' - dD + Dn \qquad Dn = SF \cdot \rho_w / \rho_s \tag{15}$$

ここで、 のは降雪の新雪密度であり、式(16)のように与えた.

$$\begin{cases} \rho_s = 0.04 & (T < -2.0) \\ \rho_s = 0.0667 + 0.0133T & (-2.0 \le T < 1.0) & (16) \\ \rho_s = 0.08 & (T \ge 1.0) \end{cases}$$

降雪後は、雪自身の重さで圧密が起こる.この時の圧縮 高さ dD は降雪量 SF と降雪前の積雪密度 *p*<sub>D</sub>、積雪深 D から式(17)のように示す.

$$dD = \beta_N SF\left(\frac{D}{10}\right)^{0.40} \frac{\rho_w}{\rho_D}$$
(17)

ここで、新雪圧縮係数  $\beta_N=0.001$ 、  $\rho_w$  は水の密度である.  $\rho_D$  は前日の積雪密度  $\rho_D$  で与えられ、積雪前の積雪水量 SWE と積雪深 D から式(18)のように示す.

$$\rho_D = \rho_w \frac{SWE}{D} + \beta \left( \rho_{\max} - \rho'_D \right) \tag{18}$$

終局密度 ρ<sub>max</sub>=0.55(g/cm<sup>3</sup>), βは圧密速度であり気温 T に よって式(19)のように与えた.

$$\begin{cases} \beta = 0.0005 & (T < 1.0) \\ \beta = 0.0005T & (T \ge 1.0) \end{cases}$$
(19)

## 4. 結果と考察

## (1) 積雪水量

図-1 に標高 800m における気象データ(気温,降雪量) モデルによる計算結果(冠雪量,アルベド,積雪水量) を示す.また,図-2,3に標高 1100m,1400mにおける 積雪水量の推定結果を示す.

標高800mにおいて、気温が上昇してくる4月以降では ほとんど降雪が見られなかった.また、1日の降雪量が 15mm以上になると、冠雪量が急激に上昇し、また、積 雪面におけるアルベドも上昇していることが図-1から 読み取れる.さらに、冠雪が生じてから、その冠雪が蒸 発あるいは融解により消失するまでの時間が短いことも 分かる.これは、日射量が熱収支の中で支配的であり、 日射量が大きいときには気温も高くなり、モデル上で計 算される葉面温度も上昇し、冠雪は短時間で融け切って しまうためであると考えられる.そして、これらの推定 結果を検証するデータはないが、気象条件に対するモデ ルの応答は概ね妥当である.また、図-2ではLAIが5.0 のとき、図-3ではLAIが2.0、5.0のときに5月下旬まで に消雪していなく積雪として貯留されていることが分か る.











## (2) 森林内外の積雪量

#### a)積雪量と標高の関係

図-1~図-3 に示すように融雪期における積雪量の変動は樹種,標高の違いから異なってくると考えられる. そこで,2005年5月16,27日に山形蔵王において行った 観測結果を図-4に示す.対象樹種は常緑針葉樹であり, 概ねLAIは5.0程度である.

草地において残雪が確認できたのは標高 1000m 程度で あるのに対し,林内では標高 600m 付近まで雪が残ってい ることが分かる.このことからも林内の融雪量は林床に 届く日射量の減少に支配されていることが分かる.また, 標高 1500m 以上では草地,林内での残雪量にあまり差が 見られなかった.この理由として,林内外ともに気温が 低く,また,樹木の分布状況からも気温,日射による融 雪への影響にあまり差がなかったためと考えられる.

#### b)モデルによる解析結果

図-5~図-8にLAIが0.3, 2.0, 5.0 および草地における積雪水量と標高の関係を示す. プロットデータは毎時の24時間分である. 図-5は2005年4月1日, 図-6は4月17日, 図-7は4月29日, 図-8は5月12日の解析結果である.

図-5 は融雪が始まる時期であり、LAI、草地での標高 と積雪水量の関係は降雪期と同様の傾向が見られ、草地、 LAIが0.3, 2.0, 5.0の順に積雪水量が小さくなっている. この結果は,降雪遮断が最も支配的に起こっているため であり、林床に届く日射量の減少はあまり影響していな い. 図-6 は融雪が徐々に大きくなっている時期であり, 草地とLAIが0.3での積雪水量の大きさに逆転が見られ, このことは日射量が影響していると言える.また,標高 800m 付近で図-5 までの降雪期における関係と全く逆の 関係が見られ, LAI が 5.0, 2.0, 0.3, 草地の順に積雪水量 が小さくなっていることが分かる. さらに、草地におい ては800m以下で積雪水量は0となった. 図-7では,降 雪期のパターンが完全に逆転する地点が 1100m まで上昇 し,800m 地点ではLAI が 5.0 のとき以外は完全に消雪し ている. 図-8 では融雪がかなり進行しており, 全ての標 高において降雪期と全く逆の関係になっている. つまり, 林床に届く日射量の減少の影響がかなり支配的な状態で あると言える.

#### (3) 積雪深の検証

#### a)森林内

図-9 に 2004.12~2005.5 の積雪深の推定結果および 2005.4.10~2005.5.31 の自動積雪深計の観測データを示す. 計算条件は標高 1100m とし、また、積雪深計を設置した 森林は落葉林であり、L4I = 0.3 とした. なお、積雪深の 推定結果は、3 章の解析方法で示した降雪および融雪モデ ルを用いて推定した積雪水量を積雪深推定モデルに入力 することで算出した. 図-9 において、検証に用いた観測 値は融雪が開始している時期のデータであり、降雪期に おけるデータは多雪の影響で取得できず、モデルの検証



図-9 積雪深の検証 [森林内(1100m),都市域(153m)]

までは至っていない.しかし,積雪として貯留されている水資源量の把握という観点に着目すれば,融雪期のみの比較で十分である.また,相関係数 $R^2$ =0.98, *RMSE*=10.7cmと非常に高い値を示した.融雪期における推定精度として十分であると言える.

#### b)都市域

図-9に2004.12~2005.5の山形地方気象台(標高153m) が観測している1時間ごとの積雪深データとモデルによ る推定結果を示す.計算条件は標高153m,風速を推定す る際に都市域の粗度 z<sub>0</sub>=3.0を用いた.

図-9から降雪期, 融雪期の積雪深の変動を非常によく 再現できていることが分かる.相関係数 $R^2$ =0.96, RMSE = 8.6cm である.ただし,積雪安定期において10~15cm 程度過大評価しているが,1シーズンで見るととまずまず の結果である.さらに,入力する気象データさえ揃えば, 他地域の都市域でも適用可能であると考えられる.

## c) degree-day 法

融雪量を推定する手法として熱収支法とは異なり、簡便に推定できるdegree-day 法があり、式(20)で推定される.

$$SM = K \sum T \tag{20}$$

ここで、SM(mm)は融雪量、Kは融雪係数 (mm/day/C) であり、 $\Sigma T$ は0°C以上の日平均気温の積算温度(°C)であ る. 熱収支法を用いた本論文のモデルにより推定した融 雪量 SM,日平均気温 Tから各月ごとに融雪係数を決定 した(表-1).図-10 に融雪量を表-1 のKを用いたもの と、融雪係数K=4.0 で一定として推定した積雪深の検証 を行ったものを示す.都市域(153m)においては、両方と も相関係数 $R^2$ =0.95、RMSEは7.4cm (K:表-1)、6.9cm (K=4.0) であり、熱収支法による推定とあまり変わら ないことが分かった.また同様に森林内(1100m)でも検証 を行ったが、相関係数 $R^2$ =0.61、0.60 とかなり低い値を 示した.この原因として考えられるのは、標高 153m の都 市域では日平均気温が 0°C以下となる日が少なく、逆に標 高 1100m の森林域では 0°C以下となる日が少なく、融雪が 進行しないのためである.



図-10 積雪深の検証 [森林内(1100m),都市域(153m)] 表-1 各月の融雪係数 K (2004-2005)

month	12	1	2	3	4	5
K (1100m)	3.8	0	0	6.3	4.1	3.0
K (153m)	2.3	2.0	2.0	3.7	4.9	4.9

## 5. 温暖化への適用

近年の地球規模の温暖化に伴い、降水形態の変化や、 融雪期の早期化、春季における積雪水資源量の減少など が懸念されている.また、「気候変動に関する政府間パネ ル(IPCC)」第3次評価報告書によると、地球の地上平均 気温は1990年に比べ2100年には1.4~5.8℃上昇する<sup>12)</sup> と予想されており、2050年までには約1~3℃上昇すると 言われている.そこで、標高1100mにおいて気温を1~3℃ 上昇させて解析を行い、その結果を図-11に示す.

融雪開始時期までにおける積雪水量は、上昇気温によって LAI が 0.3 で最大 200mm もの差が見られたが、LAI が大きくなるほど差は見られなくなっていた. このことは、樹種の違いによる融雪量を把握でき、融雪洪水の起こる地域において融雪量を調節する際の指標になり得る.

また、4月上旬~中旬で落葉樹(LAI = 0.3)と常緑針葉樹 (LAI = 5.0)の積雪水量が逆転していることが分かる.その 逆転日から消雪までの期間は気温+1℃で10日間、+2℃で 11日間、+2℃で10日間であった.この落葉樹を常緑針葉 樹と想定した場合、消雪までの期間は気温+1℃で31日間、 +2℃で32日間、+3℃で27日間であった.上昇気温の違 いによる傾向はあまり見られなかったが、落葉樹を常緑 針葉樹に変化させた場合、20日間ほど積雪を水資源とし て確保できる日数が延びることが示せた.このことは、 温暖化による融雪期の早期化対策として LAI のより大き い樹種に植え替えればよいと言える.

上述のことから、本研究で得られた森林内外での積雪 水量の推定結果は、融雪洪水対策および温暖化対策にお ける積雪水資源確保のための有効な指標になり得る.

## 6. まとめ

本研究では、森林の存在が降雪-融雪過程に及ぼす影響を考慮した上で森林内外における積雪水量、積雪深の 推定を行い、さらに積雪深の検証を行った.その結果から得られた結論を以下に示す.

- ・熱収支法により融雪量を推定した際の森林内および都 市域における積雪深の再現結果は良好であった.
- ・融雪期の草地, LAI=0.3, 2.0, 5.0 における積雪水量の 推移を把握した.
- ・森林内の積雪は入射する日射量が遮断されるため消雪 が遅く、LAIが大きいほど消雪がより遅くなることが現 地観測および数値計算から分かった。
- ・森林の機能を利用し、温暖化に伴う融雪期の早期化対策として、LAIのより大きい樹木に植え替えることで、 春季に積雪として貯留される水資源を確保し得る.

今後は、広域での水資源量評価を行うことを目標とし、 広域に適応可能なモデルにするため、森林域での融雪量 の推定を簡便に行うことのできる手法の確立が研究課題 である.



図-11 積雪水量の推移(+1~3℃, 2005/3/22~5/31)

## 謝辞

本研究を進めるにあたり,地球環境研究総合推進費と (独)森林総合研究所の助成を受けました.また,積雪 深計を設置する際に「(有)中央工測」の小栗保二氏,「ア レック電子(株)」の三木聖彦氏にご協力して頂きました. ここに記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 1) 戸塚岳大・風間聡・朝岡良浩・沢本正樹:積雪モデルと衛星積雪面情報を用いた東北地方の積雪分布と融雪系数の解析,水文・水資源学会誌、vol.17,pp493-502,no5,2004.
- 2)泉宏和・風間聡・戸塚岳大・沢本正樹:全日本の積雪水量、積雪深 全層積雪密度分布推定,水工学論文集、第49巻 (1),pp301-306,2005.
- 3) 塚本良則:森林水文学, p.195, 文永堂出版, 1992.
- 4) Ethan M. Greene, Glen E. Liston, Roger A. Pielke Sr. :Simulation of above treeline snowchift formation using a numerical snow-transport model, *Cold Regions Science and Technology*, 30, pp135-144, 1999.
- 5) N. P. Molotch, S. R. Fassnacht, R. C. Bales, S. R. Helfrich: Estimating the distribution of snow water equivalent and snow extent beneath cloud cover in the Salt-Verde River basin, Arizona, *Hydrological Processes*, 18, pp1595-1611, 2004.
- 6) 大久保玲子・山崎剛:降雪鹿跡の水文気象学的な影響で関するモデル 研究、水文水資源学会誌、vol.13,pp362-370,2000.
- 7) 戸塚岳大・風間聡・沢本正樹:森林が積雪量に及ぼす影響に関する検 討、水工学論文集 第49巻 (1),pp295-300,2005.
- 5) 近藤垣 ・本谷研・松島大:新パケツモデルを用いた流域の土壌水分 量、流出量、積雪水当量、及び河川水温の研究、天気、vol42,pp821-831, 1995.
- 9) 近藤純正・渡辺力・中園信・石井正典:森林における降雨の 遮断蒸発のモデル計算,天気、39(3), pp.159 - 167, 1992.
- 10) 近藤屯王: 水環境の気象学, 朝倉書店, 第6刷, 2000.
- 風間総:広域ごおける積雪全層密度推定に関する研究,水工学論文集 第41巻, pp245-250,1997.
- 12) 総合化学技術会議環境担当議員・内閣府政策統括官(科学政策技術担当):地球組織化研究の最前線, p50, 財務省印刷局, 2003.

(2005.9.30 受付)