

森林が積雪量に及ぼす影響に関する検討

EFFECT OF FOREST ON SNOW ACUUMULATION

戸塚 岳大¹・風間 聡²・沢本 正樹³

Takehiro TOTSUKA, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO

¹ 学生員 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)

² 正会員 博士(工学) 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)

³ フェロー 工博 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)

Effect of forest on snow is evaluated with a proposed snow model. Wind speed and precipitation intensity and the forest condition (density of the forest and leaf) are acquired with the input data of the snow model. The snow model consists of the snowfall model and snowmelt model. The snowfall process and the amount of the snowcap are evaluated by the snowfall model. The amount of the snowmelt is estimated by the heat balance method in the snowmelt model. These models applied to various conditions (various wind speed, various LAI (Leaf Area Index)), and we can see that low wind speed deposits snow at the front of forest before higher one deposits it at the back of forest.

Key words: LAI(Leaf Area Index), forest, heat balance method,

1. はじめに

積雪は融雪洪水をもたらすなど雪国の生活に負担となる一方で貴重な水資源となる。積雪を水資源として有効に利用するためにも積雪分布特性の把握が必要である。

これまで戸塚ら¹⁾は気象データ、衛星データを用いて東北地方の積雪分布の推定を行ってきた。その中で気象データを用いたモデルにおいて必要なパラメータ（東北地方で一定値）を衛星データと比較することにより求めた。このモデルでは融雪過程を degree-day 法により計算している。Degree-day 法において必要なパラメータ、融雪係数を決めるのに衛星画像と比較した。しかし、東北地方で一定とした融雪係数では衛星データと一致しないところが数地点生じた。戸塚らのモデルは解像度 1.1km × 1.1km, 総画素数は 100 万以上に及んでおり、植生、土地被覆などにも違いがあるにもかかわらず東北地方でパラメータを一定としているために誤差が生じたと考えられる。積雪分布特性は、対象地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²⁾といわれており、本研究では衛星データと一致しない要因として特に森林の存在に着目する。

森林が積雪分布に与える影響は、open area の規模と形状、樹種、立木密度などと多くの気象要因が関係している。太田ら³⁾によると、森林外に対する森林内の各気象要素の相対比は表-1 のようになる。森林が存在すること

表-1. 森林外に対する森林内の

各気象要素相対比の概略値(太田ら³⁾)

	落葉樹林	常緑樹林
全天日射量	0.5~0.8	0.1~0.4
気温	0.8~1.0	
相対湿度	1.0~1.1	
風速	0.1~0.4	

によって強く影響を受ける気象要因は日射と風速であり、気温、相対湿度は上記の2要素と比較して森林が存在することの影響は小さい。林による風速の減少によって林内の降雪量は増加し、日射量の減少によって林内の融雪量は減少するとされている。そこで、森林が存在することにより、降雪量・融雪量に与える影響を評価し、最終的に積雪分布特性にどのような影響を及ぼすのかを評価することを目的とする。同時に、冬季に森林に蓄えられた積雪は融雪期には貴重な水資源となる。積雪が水資源として有効利用されるためにも森林の存在により融雪にどのような影響を及ぼすのか把握することが重要である。これまで、大久保ら⁴⁾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。また、太田ら³⁾は演習林において熱収支法を用いて森林内の融雪量を評価した。橋本ら⁵⁾は同じように熱収支法を用いて落葉樹林が表層融雪量に与える影響を評価している。Suzuki ら⁶⁾は融雪に影響を及ぼす要素について森林密度に関して評価している。しか

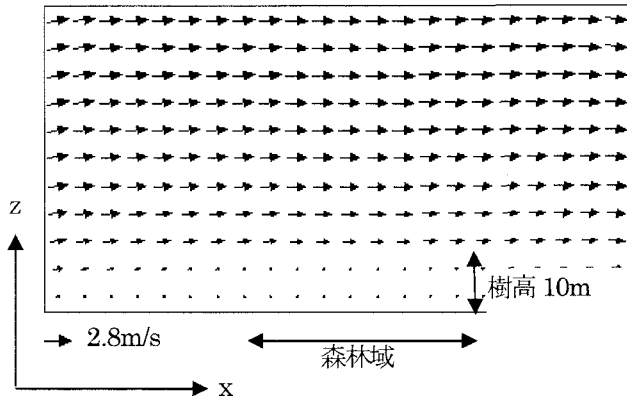


図-1 風速分布(2m/s)

し、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から融雪までの一連の過程について森林の影響を評価するにはいたっていない。そこで本研究では森林の存在により、降雪、融雪がどのような影響を受けるのかを評価する。このようにして、森林の影響を評価することにより戸塚らのモデルの分布パラメータを与えることを目標とする。

2. 降雪モデル

(1) 降雪モデル概略

風速の違いや遮断の影響により、無林地帯、落葉樹林帯、常緑樹林帯では降雪過程に大きな違いがある。そこで降雪モデルを作成し、森林の違い(LAI の違い)による降雪の分布の様子を再現する。降雪モデルは降雪落下モデルと樹冠遮断モデルから構成されている。降雪落下モデルでは重力と風速による落下の計算を行い、また、降雪が樹冠層に達した時には樹冠遮断モデルにより遮断の計算を行う。これにより、風速の違いと LAI の違いによる降雪過程の変化を明らかにすることができる。

(2) 風速分布

森林遠方において、地上 10m での風速を与え、(1)式に示す対数分布を推定する。粗度は近藤⁷⁾に従い、 $z_0=1.4 \times 10^{-4}m$ とした。地上 50m での水平方向の風速は一定、また、粗度は樹冠において $z_0=0.3m$ となるように心理遠方から線形的に変化させた。これにより水平方向の風速分布が推定され(2)式に示される連続式を満たすように鉛直方向の風速を推定した。

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

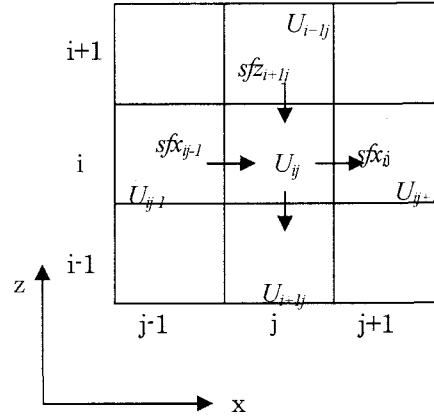


図-2 雪片粒子のメッシュへの流出入

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

κ : カルマン定数 ($=0.4 \pm 0.01$)

u : 水平方向の風速(m/s)

v : 鉛直方向の風速(m/s)

z_0 : 粗度(m)

また、森林域は 50m、樹高は 10m とし、ゼロ面変位は 7m とした。

以上の方法で森林において、地上 10m での風速が 0.0m/s、1.0m/s、2.0m/s とした場合の風速分布を推定した。例として風速 2.0m/s の場合を図-1 に示す。

(3) 降雪落下モデル

次に (2) で推定した風速分布によって降雪粒子が運ばれていく様子を再現する。各メッシュから流出する量と流入する量を計算し、その収支を求めることにより、降雪落下の計算を行う。図-2 に示すように、 (i, j) メッシュから流出する雪片粒子数は式(3)のように表される。

$$\begin{aligned} {}_t sfz_{i,j} &= dz \times u_{i,j} \times {}_t U_{i,j} \\ {}_t sfz_{i,j} &= dx \times (v_{i,j} + w) \times {}_t U_{i,j} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで U_{ij} は雪片粒子濃度、 $u_{i,j}$ 、 $v_{i,j}$ はそれぞれ x、z

方向の風速であり、雪片落下速度 w は式(4)で示される⁸⁾。雪片粒子濃度とは各メッシュの単位体積あたりの雪片粒子数のことを示す。

$$\begin{aligned} w &= \kappa \times d^\varepsilon \\ \kappa &= 100.4 \\ \varepsilon &= 0.279 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 d は雪片の粒径(cm)であり、降雪強度 R に対する中位数として式(5)で示される⁹⁾。

$$d = \rho_0 \frac{1}{r^{-3}} D r^{-3}$$

$$D = 0.144 R^{0.48} \quad (5)$$

$$\rho_0 = 0.0148$$

$$r = 0.326$$

また、(i, j) メッシュからの流出量が隣のメッシュへの流入量となるとすると、dt 秒後の (i, j) メッシュの雪片粒子濃度は式 (6) で示される。

$${}_{t+1}U_{i,j} = \{ {}_tU_{i,j} \times dx dz + dt \times ({}_tsfx_{i,j-1} - {}_tsfx_{i,j} + {}_tsfz_{i,j+1} - {}_tsfz_{i,j}) \} / dx dz \quad (6)$$

u, v : x, z 方向の風速 (m/s)

sfx, sfz : x, z 方向の単位時間当たりの

雪片粒子流入数 (1/s/m)

U_{ij} : 雪片粒子濃度 (1/m³)

R : 降雪強度 (mm/hr)

d : 雪片粒径 (mm)

w : 落下速度 (m/s)

なお、ここでは上空で $R=1.0$ の降雪が 24 時間連続的にあるとして計算した。

(4) 樹冠遮断モデル

樹冠が保持できる冠雪量は降雨の樹体への着水に比べ大きく、冬季でもかなりの量の遮断が起きていると考えられ、水資源として重要な積雪量の的確な評価のためにも降雪の遮断をモデルに取り入れる必要がある。本研究では、大久保ら⁴⁾のモデルを基に先ほどの降雪落下モデルと組み合わせる。

以下に樹冠遮断モデルについて簡単に述べる。

植生部分には葉層 2 層モデルを使用する。これは森林樹冠部について樹冠を水平に上下 2 層にわけ、それぞれにおいて遮断量を計算するモデルである。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(7)のように表現される。

$$P_{fji} = P_{fji} [1 - \exp(-fa_i \delta_i \xi_i \zeta_i)] \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \xi_i = 1 + k_{f1} \frac{S_{fi}}{S_{fR \max i}} & (S_{fi} \leq S_{fR \max i}) \\ \xi_i = 1 + k_{f1} & (S_{fi} \geq S_{fR \max i}) \\ \zeta_i = 1 & (S_{fi} \leq k_{f2} S_{f \max i}) \\ \zeta_i = 1 - \frac{S_{fi} - k_{f2} S_{f \max i}}{(1 - k_{f2}) S_{f \max i}} & (S_{fi} \geq k_{f2} S_{f \max i}) \end{array} \right.$$

ここで a は葉面積密度、 δ は葉層の厚さであり、 f は葉の傾きを表す係数でここでは 0.5 とする。 f が 0.5 とは葉

表-2 計算に用いた森林パラメータ

想定樹種	落葉樹林(冬)	マツ	スギ
LAI	0.1	2.0	5.0
樹高(m)	10	10	10
$S_{fR \max}$ (mm)	0.5	4.8	10.4
$S_{f \max}$ (mm)	1.0	7	12

の傾きが等方的であることを意味している。 P_{fji} , P_{fj} は各葉層に対する遮断量、降雪量であり、 $S_{f \max}$ は最大冠雪量である。降雪量は降雪落下モデルで得られる雪片粒子濃度を降雪高さに変換して用いる。 $S_{fR \max}$ は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である。 k_{f1} は着雪により遮断量が増加する効果を表す係数、 k_{f2} は冠雪量が最大限界に近づくにつれ遮断量(冠雪量の増加量)が減衰する効果を表す係数である。ここでは $LAI < 1$ で $k_{f1}=0.3$, $LAI > 1$ で $k_{f1}=0.05$, $k_{f2}=0.2$ とした。遮断量を計算し、冠雪量が最大冠雪量を超える場合、超えた分が下の層への滴下が生じるものとする。表-2 に大久保ら⁴⁾を参考にした計算に用いたパラメータを示す。パラメータは葉層 1 層、2 層共に同じ値(各量/2)とした。なお、大久保らは近藤ら¹⁰⁾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。

本研究では、表-2 に示すように 3 つの樹種(LAI)について想定し解析した。降雪遮断の影響を考慮することにより、樹種の違い(LAI)によって林内に入ってくる雪の量の違いを明らかにすることができる。

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。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ぜず、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。

3. 融雪過程

(1) 融雪について

森林の上端に入射した日射は樹木により吸収・反射され、下層へ入るにつれて弱くなる。その結果、表-1 に示すように林内に届く全天日射量は落葉樹林においても無視できないほど減少する。この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、樹冠層における日射量の減少を考慮した熱収支解析により融雪量に対する森林の影響を評価する。

(2) 森林外での熱収支

以下に積雪表層における熱収支の式を示す。

$$Q = Rn + H + IE \quad (8)$$

ここで、 Q は融雪熱量、 Rn は式(9)で表される正味放射量、 H は顕熱交換量、 IE は潜熱交換量である。各要素の正負は、熱慮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。

$$Rn = (1 - \text{ref})I_0 + (Ld - Lu) \quad (9)$$

ここで ref はアルベドであり、積雪面において 0.7 とした。 I_0 は全天日射量、 Ld は大気放射量、 Lu は地球放射量であり、それぞれ経験式(10)～(12)により求めた。

$$I_0 = J_0 \left(\frac{\bar{d}}{d} \right)^2 \cos \zeta (0.3 + 0.7 \times 10^{-0.55(1+0.04e_H) \sec \zeta}) \quad (10)$$

ここで J_0 は太陽定数 (1367 W/m^2)、 $\bar{d}$ と d は太陽・地球間距離の年平均値と瞬間値、 ζ は太陽の天頂角、 e_H は地上で測定される平均水蒸気圧である。

$$Ld = \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e_H}) \quad (11)$$

ここで、 $a=0.605$ 、 $b=0.048$ とした⁸⁾。

$$Lu = \varepsilon \sigma T_0^4 \quad (12)$$

ここで、 T_a は気温、 T_0 は表面温度である。ここで気温は 2°C と仮定し、積雪面の表面温度は融雪時に一般に用いられる 0°C とした。 ε は射出率であるが、長波長領域ではほぼ黒体となるため、 $\varepsilon=1$ とした¹¹⁾。

また、 H 、 IE の計算には、バルク法を用いた。

(3) 森林内(樹冠層)の熱収支

落葉樹林の場合でも、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⁶⁾。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。

$$I(z) = I_0 \exp[-F \int_0^z a(z) dz] \quad (13)$$

ここで、 h は樹高であり、 $a(z)$ は葉面積密度である。長波放射の場合も同様である。また、樹冠層においては樹冠の下向き長波放射を考慮し、(12)式の葉面の表面温度は簡単のために葉面が雪に覆われると仮定し、 0°C とした。これらを用いて樹冠の各層、林床において熱収支解析を行うことにより、森林内での融雪量を求めることができる。熱収支式のその他の項目については林外の場合と同様である。

4. モデル計算結果

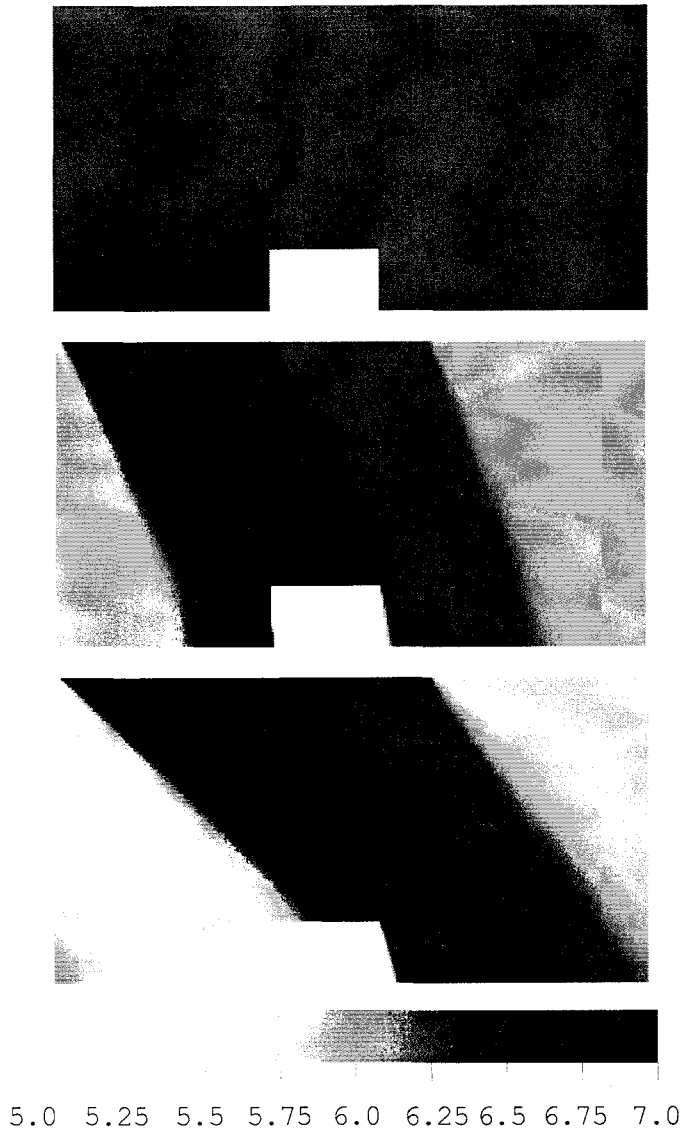


図-3 雪片粒子濃度(LAI 5.0)

(上から風速 0.0m/s 1.0m/s, 2.0m/s)

(1) 雪片粒子濃度について

モデルにより LAI が 0.1, 2.0, 5.0 の場合について 2 の(2)で求めた各風速分布において計算する。モデルにより計算された 1 間経過後の雪片粒子濃度について LAI が 5.0 の場合を図-3 に示す。これより無風の場合は樹冠遮断による影響のみで、降雪粒子濃度が均一であり、風速が 1.0m/s では森林前方、風速 2.0m/s になると森林後方に降雪が集まることがわかる。また、各 LAI において樹冠層において降雪遮断が起きている様子が再現されている。

(2) 樹冠遮断について

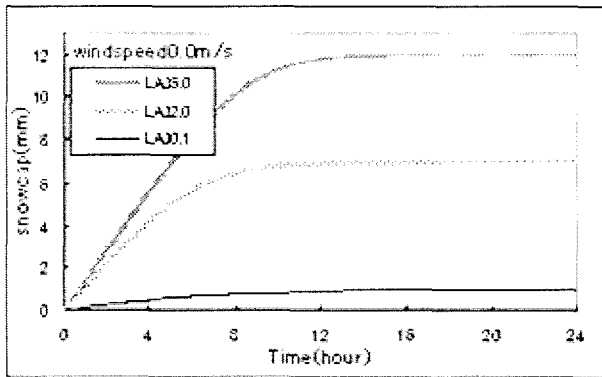


図-4 冠雪量(風速 0.0m/s)

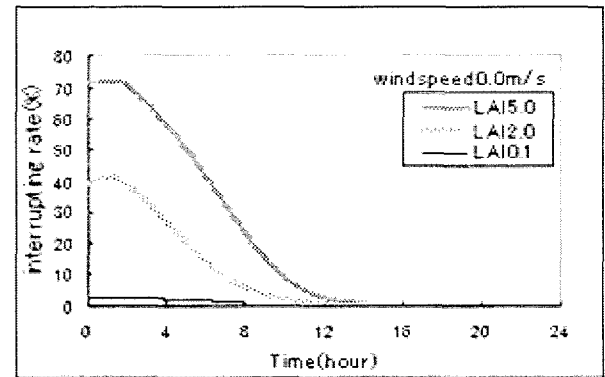


図-5 遮断率(風速 0.0m/s)

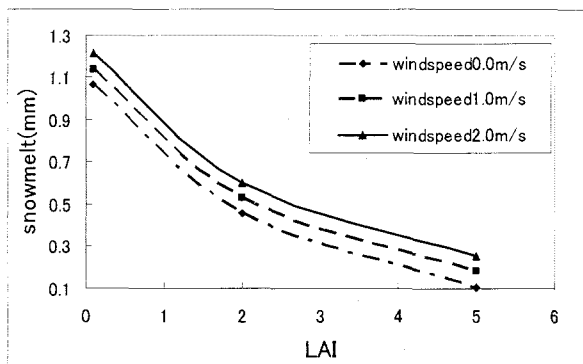


図-6 林内融雪量の比較

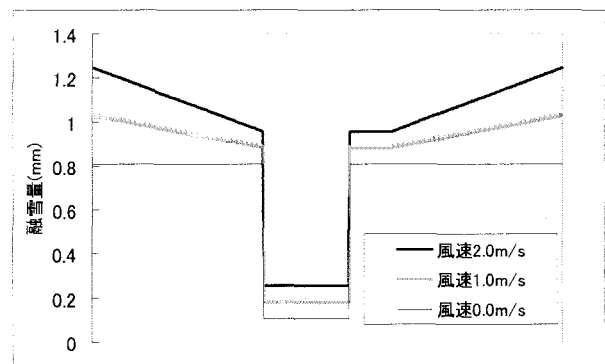


図-7 森林内外の融雪量の比較(LAI5.0)

降雪遮断モデルによる計算結果について図-4、図-5に示す。森林内のある地点での冠雪量、遮断率の時間変化をLAIが0.1、2.0、5.0の場合について比較し、例として風速0.0m/sの場合を図-4、図-5に示す。ここで遮断率とは、各層への流入降雪粒子に対し、樹冠層で遮断された割合のことを示す。いずれのLAIにおいても12時間経過すると、遮断率が0に漸近する。これは図-4から分かるように、着雪が最大冠雪量に近づき、それ以上枝葉に捕捉されなくなるためである。このとき、着雪により遮断率は上昇しており、降雪が着雪した枝葉に捕らえられる割合は高くなるが、枝葉がそれ以上とどめておくことができないため、下の層に落ちてしまうことになる。今後は風速の増加により、着雪量が減少することを考慮する必要がある。樹冠遮断モデルにおいては葉層1層2層ともに同じ値を用いている。しかし、樹冠層の形により各層で値は変わってくると考えられるため、今後は樹種とパラメータの関係について考慮する必要がある。

(3) 融雪量について

融雪量は、森林により日射量が減少することを考慮して熱収支法で推定した。そこで、林内のある地点の融雪量をLAIと風速について比較したところ図-6のようになった。これより、融雪量はLAIが0.1の場合に比べLAIが2.0、5.0の場合はそれぞれ約55%、約85%減少することが分かる。また、風速が0.0m/sの場合の融雪量に比べ風速1.0m/sの場合ではLAI=0.1、2.0、5.0においてそ

れぞれ6%、15%、66%、風速2.0m/sの場合ではそれぞれ14%、31%、133%増加することがわかる。また、図-7にLAIが5.0の場合における森林内外の融雪量の分布を示す。これにより、森林の存在により日射量が減少し、融雪量に大きな影響を与えていることがわかる。

(4) 積雪量について

$R=1.0$ の降雪が24時間継続した場合の森林内外の積雪量について各LAI、各風速条件について比較した。ここで積雪量は最下層のメッシュに含まれる雪片粒子数とした。その結果を風速0.0m/s、1.0m/s、2.0m/sの場合をそれぞれ図-8、図-9、図-10に示す。これより、いずれの場合においても、林床での積雪が、ほぼ遮断の影響がないLAIが0.1の場合に比べ、LAIが2.0のときは20%、LAIが5.0のときは37%の減少があった。無風の場合、LAIが大きくなるにつれて森林内に入ってくる降雪は減少する一方で、LAIが大きくなるにつれて融雪量も減少する。積雪量で比較した場合、図-8に示すように林外に比べ林内の積雪量は減少している。このことから無風の場合では、今回の計算条件の下では森林の存在により大きく影響を受けているのは降雪量であることがわかる。また、風速が弱い場合(1.0m/s)は積雪は林地の前面にたまり、ある程度強くなる(2.0m/s)と林地背面に貯まる。一般に防雪林は風上側に存在することが多く、この結果からでは風下側に植えるほうが有効の可能性を示しており興味深い。一方で図-7に示すように林外の融雪量に比

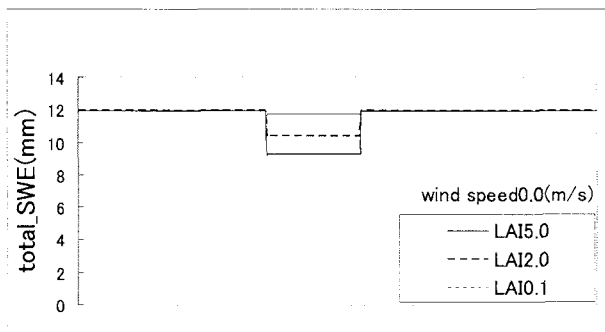


図-8 積雪量分布図(風速 0.0m/s)

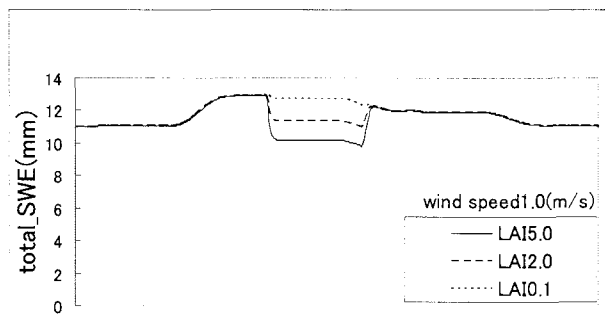


図-9 積雪量分布図(風速 1.0m/s)

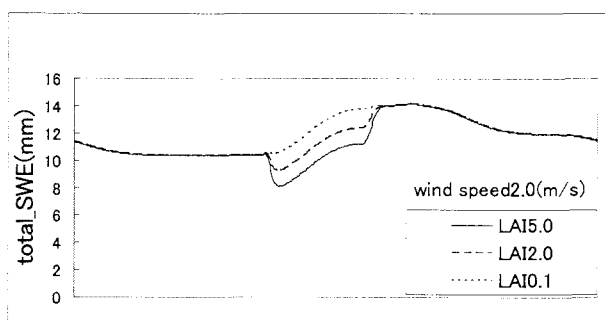


図-10 積雪量分布図(風速 2.0m/s)

べ、林内の融雪量は風速の影響をそれほど受けない。その結果、図-9や図-10に示すように、森林の前方、後方に多くたまる部分が生じることとなる。

実際にこのような現象は冬山の道路などにもよく見られる。今後は林地の形状の影響の評価や実地観測によってより細かな検証を行う予定である。

5. まとめ

森林が積雪に及ぼす影響について数値モデルによって評価した。森林の存在により、風速分布、降雪量分布、融雪量分布が影響を受け、不均一な積雪分布が生じた。特に風速の違いによって吹き溜まりが林地の前面と背面に生じる場合のあることがわかった。今回は降雪強度 $R=1.0$ 、降雪継続時間 24 時間として計算を行った。今後は、降雪強度、降雪継続時間を変えるとともに森林域の

長さを変えて計算し、森林の影響を評価していく。それに伴い林内の気象条件(日射量、気温等)も変化させていく。

今回は融雪過程の計算に熱収支法を用いた。今後、融雪過程の計算に degree-hour 法を用いて今回の結果と比較することにより、森林が degree-hour 法における融雪係数に与える影響を評価することができる。つまりは戸塚らのモデルにおける融雪係数を分布的に議論することができるのではないかと考えられる。

謝辞：本研究は「(独)森林総合研究所」の助成を受けて行われました。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係数の解析, 水文水資源学会誌, vol17, no.5, 2004
- 2) 塚本良則: 森林水文学, 195pp, 文永堂出版, 1992
- 3) 大田岳史, 橋本哲, 石橋秀弘; 表層融雪量に及ぼす森林の影響に関する基礎的検討, 雪氷, 52, No.6 pp289-p296, 1990
- 4) 大久保玲子・山崎剛: 降雪遮断の水文気象学的影响, 水文水資源学会誌, vol.13, pp362-370, 2000
- 5) 橋本哲, 太田岳史, 石橋秀弘; 落葉樹林が表層融雪量に与える影響に関する熱収支的検討, 水文水資源学会誌, vol54, pp131-143, 1992.
- 6) Kazuyoshi Suzuki, Takeshi Ohta, Atsushi Kojima, Tetsu Hashimoto: Variations in snowmelt energy and energy balance characteristics with larch forest density on Mt. Iwate, Japan. 1 Observations and energy balance, Volume 13, 17, pp. 2675-2688, 1999
- 7) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 1994
- 8) 椎名徹・村本健一郎: 降雪粒子の落下速度と落下中の粒径および融解直径の関係, 電子情報通信学会論文誌, vol.J81-D-II, No.6, pp.1108-1114, 1998
- 9) 菊池勝弘・大畑哲夫・東浦将夫: 降雪現象と積雪現象, pp35, 古今書院, 1995
- 10) 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.
- 11) 小野延雄・石川信敬・新井正・若土正暁・青田昌秋, 1994: 雪氷水文現象, pp.17, 古今書院.

(2004.9.30 受付)