

# 積雪融雪モデルを用いた融雪過程と湿雪の圧縮粘性係数の検討

水文気象研究室：吉川圭史

指導教員：熊倉俊郎

## はじめに

積雪利用、雪崩などの防災管理にあたっては冬季における積雪量を把握することが重要である。しかしながら、地震などによる斜面崩壊などが起こった条件下で広域にわたる積雪観測を行うことは極めて困難であり、数値モデルによる積雪挙動の推定が必要である。積雪数値モデルは、欧米や北海道のような乾雪を想定したものが多いが、例えば(山崎(1998)、熊倉ら(2004))が示すように、雪の圧縮粘性係数が、積雪深の推定にあたって大きく影響していることがわかっている。圧縮粘性係数には、乾雪を仮定した実験式はあるが湿雪の実験式はあまりない。一方で北陸地域の雪の特徴は湿雪であり、含水した雪の圧縮粘性係数は極端に小さくなることから、湿雪の圧縮粘性係数を決定することは重要であり、そのためには積雪層内の水収支を正しく算定する必要がある。本研究では、雪面熱収支モデルと、底面融雪量の推定を併用し、積雪層での融雪過程の詳細を検討することにより、各積雪層の水収支を明らかにし、湿雪の圧縮粘性係数の検討を行っていくことを目的としている。

## 概要とデータ

本モデルは気象データを入力とし、積雪、融雪、圧密の3つのモデルを組み合わせた図1に示す積雪融雪圧密モデルを1時間タイムステップで一冬季計算し、積雪深、積雪水量を出力する。

研究方針としては、積雪多層圧密モデルの表面層で雪面熱収支式による融雪を表現するとともに、積雪水量の水収支により底面での融雪を推定することで、積雪水量の面から全積雪での融雪過程を検討する。一方で、雪中熱伝導は、雪温が $0^{\circ}\text{C}$ 以下であると考えれば、融雪量に影響を与えないので省略した。更に、積雪層での含水、融雪水流下過程を考慮することで、断面観測結果とモデルの再現結果を比較することにより湿雪の圧縮粘性係数の検討を行っていく。使用するデータは森林総合研究所十日町試験地で2000年11月から翌

年5月までの一冬季間に測定された気温、風速、降水量、相対湿度、放射収支量、積雪深、積雪重量のデータである。また、同時期に観測された積雪断面観測のデータも使用する。

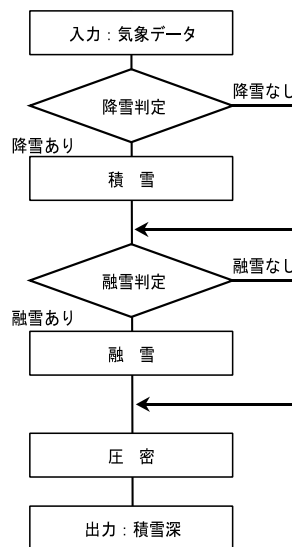


図1：積雪融雪圧密モデル概要図

## 雪面融雪

積雪表面の融雪過程を考察するために、雪面熱収支法を使用した。図2は積雪表面における熱収支の構成要素を模式的に示したもので、矢印はフラックスの向きを表している。積雪層の表面である大気-雪面間では、放射収支  $R_n$ 、顕熱  $Q_s$ 、水蒸気輸送に伴う潜熱  $Q_l$ 、降雨熱  $Q_r$  を考えた。モデル内でのフラックスは上向きを正としている。積雪表面直下からの雪中伝導熱  $Q_u$  は、全層を  $0^{\circ}\text{C}$  以下と仮定し、積雪層内部の融雪量に影響を与えないと考え省略した。

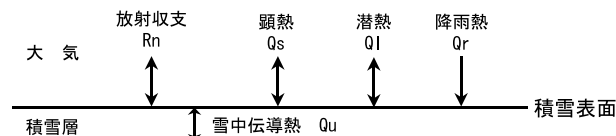


図2：積雪表面の熱収支の模式図

雪面熱収支式は、Lehningら (2002) を参照し、バルク式により顕熱、潜熱を計算し、融雪熱フラックスとした。積雪表面の雪面熱収支式は次式により与えた。

$$Rn + Q_s + Q_l + Q_r + G = M \quad (1)$$

ここで、 $Rn$ は放射収支量、 $Q_s$ 、 $Q_l$ および $Q_r$ はそれぞれ顕熱、潜熱フラックスおよび降雨熱フラックス(大気から雪面方向を正)、 $G$ は雪中伝導熱、 $M$ は雪面での単位時間単位面積当たりの融雪熱量である。

顕熱と潜熱は以下のバルク式により表現した。

$$Q_s = c_p \rho_a C (T_a - T_s) \quad (2)$$

$$Q_l = \beta \frac{0.622L}{p_a} \rho_a C (e - e_{sat}) \quad (3)$$

ここで、 $C$ は輸送係数、 $L$ は潜熱値(2256kJ/kg)、 $\beta$ は蒸発効率(雪面上は1)、 $e$ は水蒸気圧、 $e_{sat}$ は飽和水蒸気圧、 $T_a$ および $T_s$ 、 $p_a$ はそれぞれ気温および地表面温度、気圧、 $c_p$ は定圧比熱、 $\rho_a$ は空気密度である。

### 底面融雪

底面融雪量については、積雪初期から末期までを約1か月毎に分割し、観測積雪重量より降雪量および雪面での融雪量を差し引くことにより、一定期間内での底面融雪量を推定した。 $\overline{F_f}$ を降雪水量フラックス、 $\overline{F_s}$ を雪面熱収支モデルでの融雪水量フラックス、 $\overline{F_g}$ を底面融雪水量フラックス、 $W$ を観測された貯留積雪水量とすれば、水収支式により、

$$\overline{F_g} = \frac{\partial W}{\partial t} - \overline{F_f} - \overline{F_s} \quad (4)$$

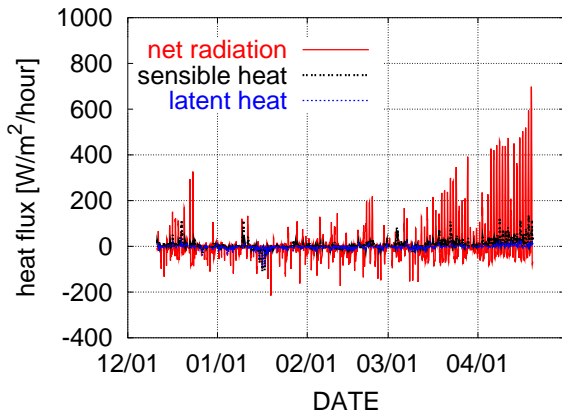


図3：雪面での各熱フラックス

と表される。積雪水量の水収支は、降雪水量、雪面融雪量、積雪内部融解量、底面融雪量によって表現できる。本研究では雪面熱収支法により雪面融雪量が算定できるため、内部融解量が十分に小さいと考えた場合、水収支式(4)により底面融雪量を推定することができる。

### 含水流下

降雨水、融雪水による積雪層の含水、流下に関しては、山崎(1998)にならい、積雪層各層が含み得る最大の含水量を閾値として決定し、これを超過したものを下層へ落していくという手法により表現した。今、 $n$ 層の積雪層があるとして、最上層が $V_n$ の含水量を持っているとき、雪面での融雪水と降雨水 $V_0$ が発生したとする。最上層の含水量は $V_0 + V_n$ となり、その層が含むことができる最大含水量を $V_{lim}$ とすると、含水量が最大含水量を超過した場合、つまり $V_0 + V_n > V_{lim}$ のとき $n$ 層から $n-1$ 層への流下量が $V_0 + V_n - V_{lim}$ となる。そして、下層の含水量は $V_{n-1} + (V_0 + V_n - V_{lim})$ 、 $n$ 層の含水量は $V_{lim}$ と置き換わる。これを上層より順番に行っていくことにより、積雪層の含水と水の流下を表現した。最大含水量は重量含水率の形で、山崎(1998)と十日町試験地での断面観測結果をもとに10%とした。

### 結果と考察

積雪期間において、雪面熱収支法により雪表面融雪熱フラックスを算定し、積雪多層圧密モデルに導入した。図3に雪面熱収支の各熱フラックス成分を示す。ここでいう各熱フラックス成分とは、

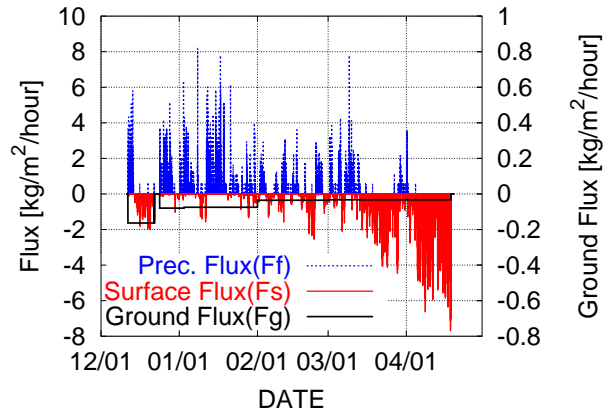


図4： $F_f$ 、 $F_s$ 、 $F_g$ の推移

放射収支、顕熱、潜熱フラックスである。降雨熱フラックスは小さいため図からは省略している。積雪期である1月～3月に熱収支は小さく、融雪期に放射と顕熱による融雪が行われている。

次に前述の方法により底面融雪量を推定した。積雪期間での水収支の推移を図4に示す。左軸プラスにあたる棒グラフが $F_f$ 、マイナスが $F_s$ 、折線が右軸の $F_g$ であり、算定された底面融雪量である。遠藤らが十日町試験地で行った埋設テープによる底面融雪水量の観測結果をもとに根雪初日からの底面での積雪水量減少量の推移を求めると図5のようになる。縦軸は底面での積雪水量減少量、横軸は根雪からの経過日数である。観測は1981年、1984年に2地点で行われており、図中のEBMで表された折線は底面融雪量の推定値である。観測値は観測年と観測場所によってその量は異なるものの、ある大きさの範囲に収まっており、日数が経過するにつれ減少していく傾向にある。推定値はこの範囲に近似し、減少傾向を示す。観測からもわかるように、底面融雪量はその年の気象条件や場所により異なるため、一概に本手法による推定値が再現性の高いものとは言えないがその傾向からは本手法での底面融雪量の推定値が妥当な値を示しているといえる。図6に雪面融雪量と底面融雪量を導入した積雪水量の推移を示す。EBMは本モデルで算定された結果、OBSは観測値である。積雪全期間にわたって観測値と概ね一致し、非常に再現性の高い結果を示していることがわかる。積雪水量に関して水収支がとれたことで、積雪層での含水流下過程など積雪の圧密に大きな影響を及ぼす湿雪の考察へと繋げられるような結果

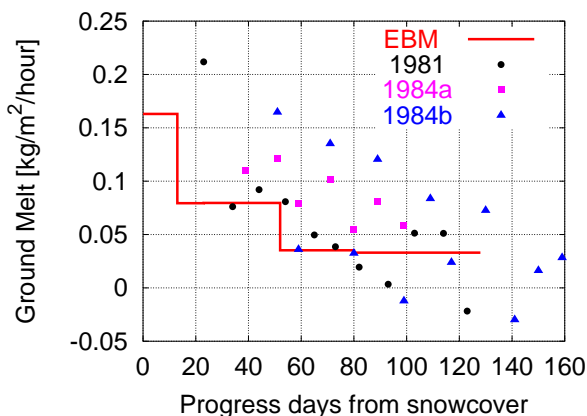


図5：底面融雪量

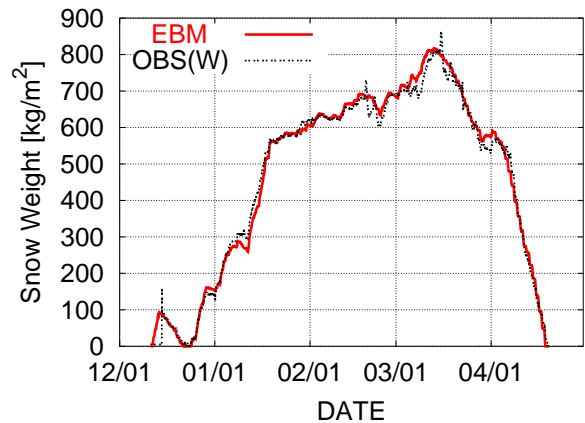


図6：積雪水量の推移

となった。

積雪水量の水収支がとれたことで、積雪深の面から、湿雪の圧縮粘性係数の検討を行った。含水した雪の圧縮粘性係数については大泉ら(2000)により一般化した式により示されており、湿雪の圧縮粘性係数を $\eta_w$ とすれば、

$$\eta_w = \eta_d \cdot e^{-0.092w_{vol}} \quad (5)$$

で表される。ここで $\eta_d$ は乾雪の圧縮粘性係数、 $w_{vol}$ は体積含水率である。前述の手法により含水流下過程を考慮し、式5を用いて圧密を行い、積雪深を算定した結果を図7に示す。EBMが式5を導入した積雪深、OBSが観測値、DRYが乾雪を仮定した積雪深である。乾雪を仮定している場合と比較して、含水流下を考慮したものは全体的に圧密が促進され、積雪深の過大評価が抑えられる形となり積雪層の含水の効果が表れているといえる。しかし、観測値と比較すると過大評価は解消され

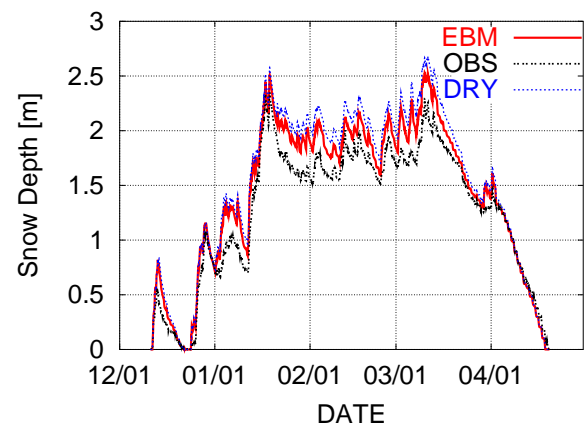


図7：式5による圧縮粘性係数を導入した積雪深

ておらず、湿った雪の変態や圧密は非常に非均一性が高く、北陸地域での積雪を考えた場合、式5がそのまま本事例にあてはまるとも考えにくい。

そこで本研究では体積含水率  $w_{vol}$  にかかる係数である-0.092を操作することにより圧縮粘性係数の値を推定した。図8に積雪深の推移を示す。DRYが乾雪の圧縮粘性係数で圧密を行った場合、EBMが本手法で推定された湿雪の圧縮粘性係数を導入し圧密を行った場合である。その結果、係数を5.6倍したときに、一冬季全体の積雪深の二乗平均平方根誤差は0.072mで最小となり、積雪深計の誤差が約0.05mであることを考えると、その誤差は小さく、積雪期全体の推移としても非常によく一致することがわかった。

また、積雪層での再現性を見るために積雪層密度・含水率の断面観測結果との比較を行った。図9に1月15日、2月15日の積雪層密度と含水率の鉛直分布を示す。DRY、EBMは図8と同じでOBSで示される点が断面観測値である。積雪層密度を比較すると乾雪を仮定した場合に比べ中層から下層にかけて観測値と似た傾向を示し、積雪層の含水率においても再現性の高いものとなった。他の観測日においても概ね同じような傾向が表れており、湿雪の仮定や推定された圧縮粘性係数がうまく積雪層を再現できていることがわかった。しかしながら、他の観測日などで積雪層を詳細に比較すると、積雪期の積雪上層や融雪期の下層付近では局所的な違いが見られ、北陸地域でのより厳密な積雪深算定のためには、積雪層の温度変化や時間経過による新雪の変態や積雪層構造変化、毛管現象による鉛直不均一な水の移動などを表現

する必要があることがわかった。

## 結論

森林総合研究所十日町試験地の気象データ、積雪断面観測データを用いて、積雪融雪圧密モデルの融雪過程に雪面熱収支式を導入することにより、雪面での融雪を表現し、底面融雪量を推定することで積雪層での融雪過程を検討し、積雪層での含水流下過程を考慮した上で、湿雪の圧縮粘性係数の検討を行った。

- 積雪表面に雪面熱収支式を導入し、雪面融雪量を算定した。
- 積雪期間毎の底面融雪量を推定し、雪面と積雪底面での積雪水量の水収支をとり融雪過程を再現した。
- 水収支が再現されたことで積雪層での含水流下過程を表現した。
- 大泉ら(2000)による式5の体積含水率にかかる係数-0.092を5.6倍したときに、一冬季全体の積雪深のRMSEが0.072mとなり、積雪深計の誤差が約0.05mであるため、その誤差は小さく積雪期全体の推移としても観測値と非常によく一致した。
- 積雪層の密度・含水率も乾雪仮定と比較して良い傾向を示し、本手法での融雪過程や湿雪の表現が妥当であることを示した。

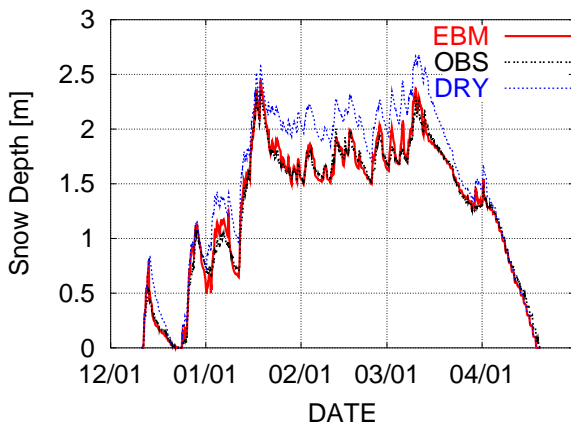


図8：本手法で推定された圧縮粘性係数を導入した積雪深

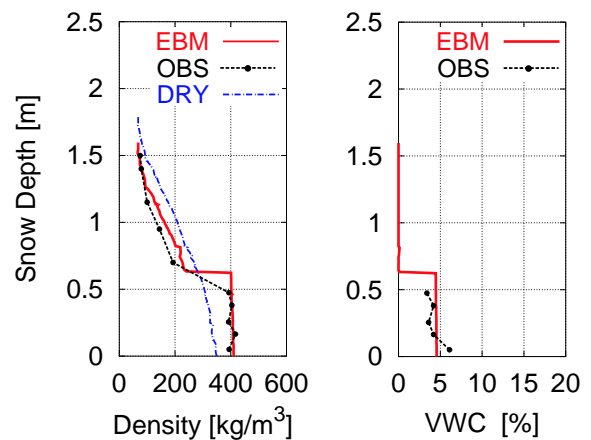


図9：1月15日の積雪層密度及び含水率