

気象数値モデルに組み込み可能な積雪圧密融雪モデルの開発と検証

大気水圏ダイナミクス研究室
環境・建設系

田之脇 潤
早川 典生

1. はじめに

雪を有効利用・防災管理するために積雪量を時間的・空間的・定量的に把握する必要がある。積雪の多い地域である山岳部で広域の積雪観測を行うのは困難であるため、モデルによる再現予測が必要である。モデルには、降雪量とその水平分布の予測を行う気象数値モデルと、陸面の積雪状況を表示する積雪圧密モデルがある。この2つのモデル間の熱エネルギーの相互作用を雪面での熱収支を用いて結合することにより、時間的に連続な積雪分布と積雪層の状況を表示することが可能になる。

本研究の目的は、積雪圧密融雪モデルの開発と検証を行うことである。検証方法は、融雪の再現性がよい degree hour 法を用いて圧密モデルの検証を行い、広域でのモデルの検証例は少ないので、圧密モデルが広域でも使用できるか AMeDAS 観測データを用いて検証を行った。その後、圧密モデルが、気象数値モデルと結合するのに必要な熱収支法による融雪を用いて計算できるか検証を行った。

AMeDAS station

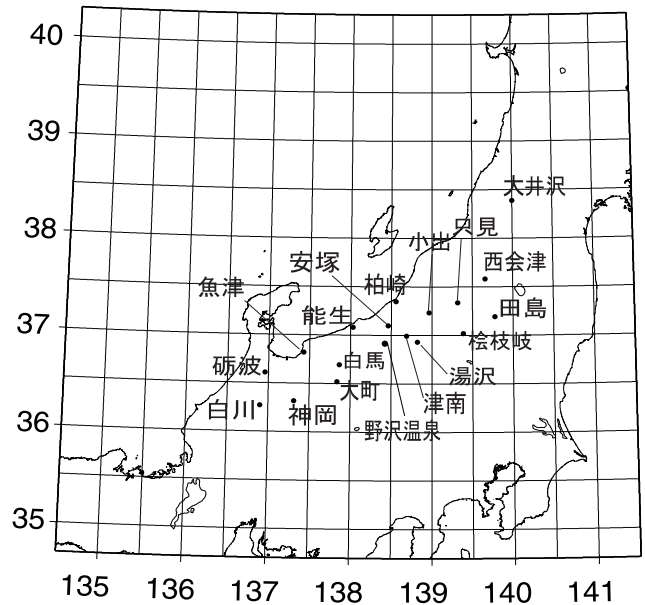


図1 使用した AMeDAS 観測点の位置

2. 使用データ

- ・観測所
森林総合研究所・十日町試験地(2000 - 2001, 冬季)
防災科学技術研究所・長岡雪氷防災研究所(2000 - 2001, 冬季)
AMeDAS 観測データ(1997 - 1998, 冬季)、使用した観測点を図1に示す。
- ・入力データ
気温・風速・降水量・積雪深・相対湿度・放射収支
- ・検証データ
積雪深・積雪水量・積雪層ごとの密度

3. モデル

モデルは、積雪・融雪・圧密の3つのモデルから構成されており、積雪モデルは、降水量・風速・気温から降雪深・密度を求め、融雪モデルは、積雪層から融雪量を引く、圧密モデルは、積雪層の圧密の計算を行う。積雪層は、乾き雪とし、積雪

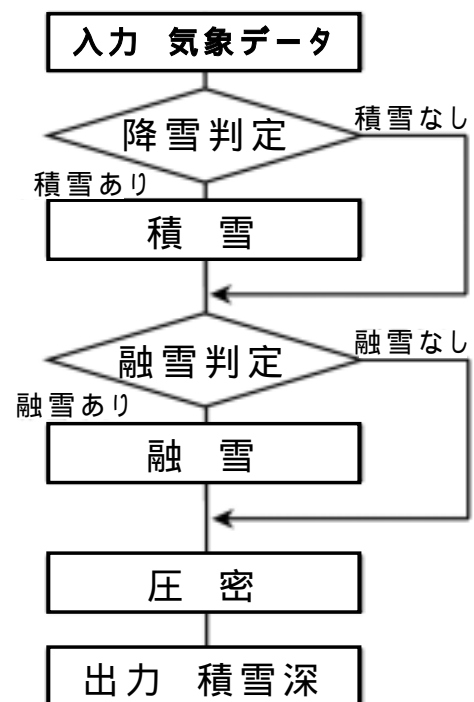


図2 1タイムステップの流れ図

層内の水は考えないものとした。図 2 に 1 タイムステップの流れ図を示す。

3.1 積雪

モデルでは、積雪を層ごとの積雪深と密度で表現している。降雪深は降水量から求めており、降雪か降雨かの判定(降雪降雨判定)は、そのときの気温が 2 以下のとき降雪、 2 を超えるときを降雨とした。新雪密度 ρ_0 [kg/m³] を求めるのに、梶川(1989)¹⁾ の式

$$\rho_0 = 3.6U_m - 0.2T_m + 62 \quad (1)$$

を使用した。ここで、 U_m [m/s] : 降雪時の風速、 T_m [] : 降雪時の気温である。

降雪深 h_0 は、降雪時の降水量 P が、降雪時に増加した積雪層の積雪水量 $C_R \rho_0 h_0$ に等しいと考え、

$$h_0 = P / C_R / \rho_0 \quad (2)$$

により求めた。ここで、 C_R : 降水量計の補正率、 ρ_0 : 新雪密度である。

補正率は、降水量計にシールド(風よけ)がついている場合は、WMO の式

$$C_R = \exp(4.606 - 0.036w + w^{1.75}) \quad (3)$$

を使用し、シールドがついていない場合は大野ら⁴⁾ の式

$$C_R = \frac{1}{1 + mw} \quad (4)$$

を使用した。ここで、 w : 連続降雨時の風速 [m/s]、 m : 雨量計による係数 0.24 である。

3.2 融雪

モデル内の融雪は、1 時間毎の融雪量 M を積雪最上層の積雪水量から引いていくことにより表現した。

・ degree hour 法

degree day 法を時間単位で適用し、以下 degree hour 法と称する。degree hour 法は、

$$M = \begin{cases} 0 & (T < 0) \\ f \times T & (T \geq 0) \end{cases} \quad (5)$$

により融雪量を求める。ここで、 f [mm/ /hr] : degree hour factor、 T [] : 気温である。 f は、

$$f = \frac{\sum M}{\sum T_a} \quad (6)$$

により定義される。ここで、 T_a : 0 以上の気温、 \sum は、積雪がある期間の合計である。

・ 熱収支法

雪面の熱収支による融雪量は、

$$M = \frac{Q}{L_f} \quad (7)$$

により求める。ここで、 M : 融雪量 [kg/s]、 Q : 雪面での熱収支 [W/m²]、 L_f : 融解の潜熱 344,000 [J/kg] である。雪面での熱収支には、図 3 に示す放射収支、顕熱、潜熱、降雨伝達熱を使用した。

3.3 圧密

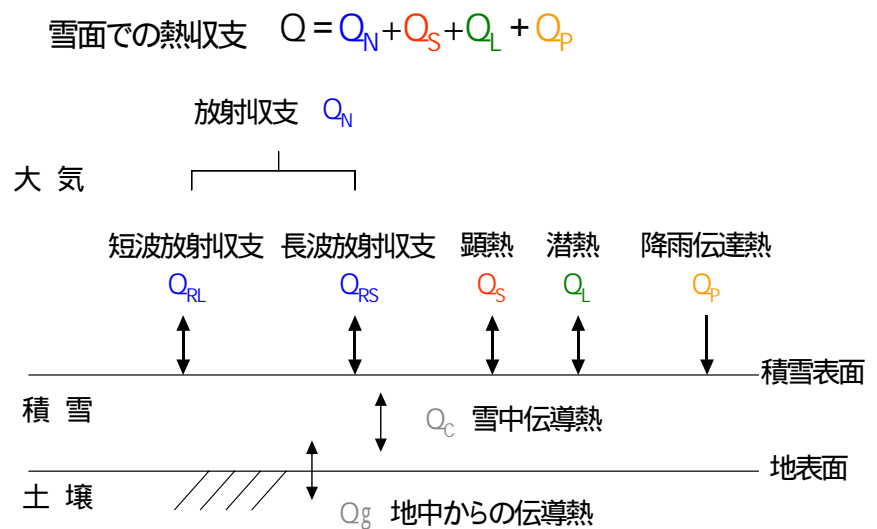


図 3 雪面での熱収支の要素

小島(1957)²⁾は、積雪層の各層の密度の増加や厚さの減少の時間変化と積雪の粘性圧縮を対応させて圧密の挙動を明らかにした。積雪の粘性圧縮は、「鉛直圧方向の応力が歪みの増加速度に比例する」という

$$-\frac{dh}{hdt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (7)$$

で表される。ここで、h：積雪層の厚さ、 η ：圧縮粘性係数である。圧縮粘性係数 [MPa・s]を求めるのに、密度 ρ の関数として篠島(1967)³⁾が、新潟県塩沢での観測結果から求めた

$$\eta = \rho_0 \exp(0.0253 \rho - 0.0958 T) \quad (8)$$

を使用した。ここで、 ρ [kg/m³]：密度、 T [°C]：雪温、 $\rho_0=3.44$ [MPa] (圧縮時)である。

4. 結果

森林総合研究所・十日町試験地のデータを用いて、融雪モデルに degree hour 法を用いた積雪融雪圧密モデルで計算を行った結果を図4に示す。ここで、上段が観測された風速、中段が観測された気温、下段が観測された降水量のハイエトグラフ、積雪深の計算値(破線,青)と観測値(実線,赤)である。積雪深の計算値と観測値の比較でよい一致が得られた。積雪深の計算値と観測値の誤差の大きな原因は、新雪の密度の計算値が実際と合っていない為であることがわかった。

融雪モデルに degree hour 法を用いた積雪融雪圧密モデルが、広域で適用可能であるかの検証を AMeDAS 観測データ(1997 - 1998, 冬季)を用いて行った。計算結果を評価するために積雪深の計算値と観測値の誤差を RMSE(Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2}{n}} \quad (8)$$

により求め、積雪量による違いを考慮し、

$$A = \frac{RMSE}{\text{期間平均積雪深}} \quad (9)$$

で評価した。ここで、 x_i ：観測値、 X_i ：計算値、 n ：データ数である。このAを期間平均風速、期間平均気温、観測点の標高と比較した結果を図5に示す。図5のb)から標高70m以下、c)から期間平均風速2.1m/s以上、d)から期間平均気温5.5°C以上の地点での誤差が大きくなっていることが分かる。この条件に当てはまる柏崎・能生・魚津・砺波の4点での積雪深の誤差は大きくなった。誤差の原因として、新雪密度によるものと、風速が強いため観測点で飛雪等が発生し、降水量と積雪深の観測値の誤差が大きくなるためと考えられる。

融雪モデルに熱収支法を用いた計算結果を図6に示す。ここで、観測された降水量のハイエトグラフ、積雪深の計算値は破線(青)、観測値は実線(赤)である。圧密モデルが、熱収支を用いても積雪深の計算を行えることが分かった。

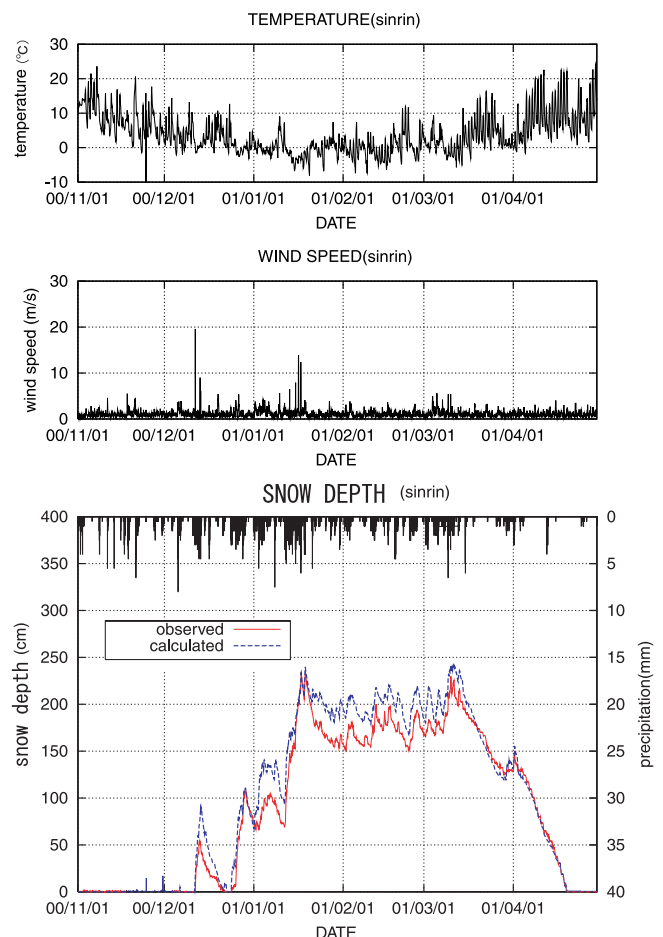
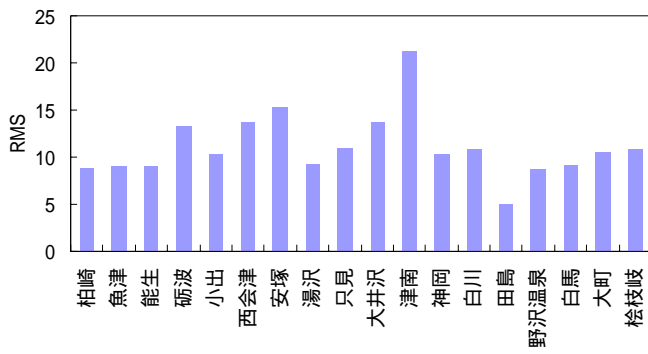
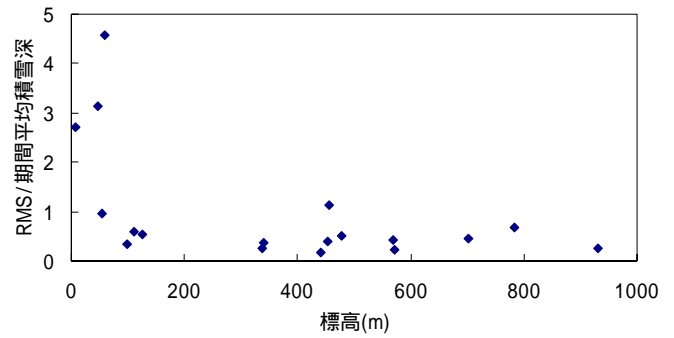


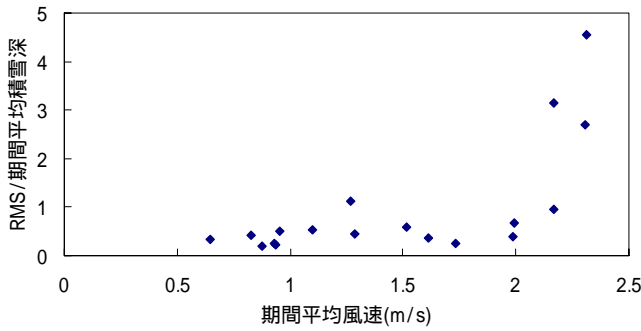
図4 十日町試験地での計算結果(degree hour 法) 融雪モデルに degree hour 法を用いたモデルの計算結果。上段が観測された風速、中段が観測された気温、下段が観測された降水量のハイエトグラフ、積雪深の計算値(破線,青)と観測値(実線,赤)。



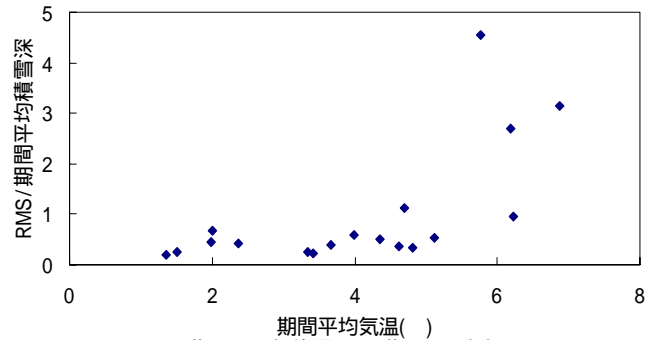
a) 各観測点における積雪深の計算値と観測値の誤差(RMSE)



b) RMSE/期間平均積雪深と標高



c) RMSE/期間平均積雪深と期間平均風速



d) RMSE/期間平均積雪深と期間平均気温

図5 各観測点における積雪深の計算値と観測値のRMSEによる評価。a)各観測点の積雪深の計算値と観測値のRMSE、b)RMSE/期間平均積雪深と標高の関係、c) RMSE/期間平均積雪深と期間平均風速の関係、d) RMSE/期間平均積雪深と期間平均気温の関係。ここで、期間平均は降雪の観測された月から消雪した月までの期間の平均値。

5. 結論

- 融雪モデルに degree hour 法を用いた積雪融雪圧密モデルによる、十日町試験地の観測データを用いた計算で、積雪深の計算値と観測値のよい一致が得られる事を確認した。
- 上記モデルは、AMeDAS 観測データ(1997 - 1998)の場合、期間平均風速 2.1[m/s]、期間平均気温 5.5[]以下、観測点の標高 70[m]以上の範囲なら、広域での計算ができることを確認した。
- 圧密モデルが、熱収支を用いても積雪深の計算を行えることを確認した。

参考文献

- 梶川正弘, “新雪の密度と降雪粒子の結晶形との関係”, 雪氷, 51 巻, 3 号, 178-183, 1989.
- 小島賢治, “積雪層の粘性圧縮”, 低温科学, 物理編, 16, 167-196, 1957.
- 前野紀一, 黒田登志雄, “雪氷の構造と物性”, 基礎雪氷学講座第 1 巻, 前野紀一, 福田正巳(編), 古今書院, 168-169, 1986.
- 大野宏之, 横山宏太郎, 小南靖弘, 井上聡, 高見晋一, Thomas Wiesinger, “北陸地方における降水量計の固体降水捕捉率”, 雪氷, 60 巻, 3 号, 225-231, 1998.

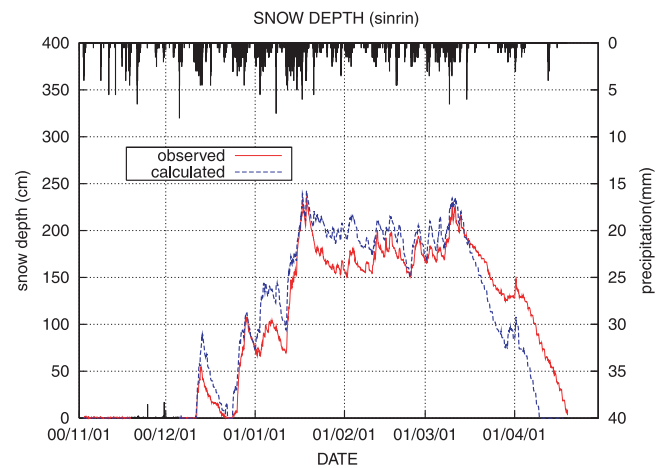


図6 十日町試験地での計算結果(熱収支法)

融雪モデルに熱収支法を用いたモデルの計算結果。観測された降水量のハイエトグラフ、積雪深の計算値(破線,青)と観測値(実線,赤)。