

積雪層構造予測数値シミュレーションの開発と利用について

齋藤佳彦、榎本浩之（北見工業大学）

はじめに

積雪層構造の予測は雪崩予知に有効であり、積雪水文過程や気象モデルの計算における地表面の扱いにも重要な情報である。現在、各種気象データ（気温、積雪深、日射、風速、降水量など）を利用した様々な積雪モデル（有名なものでは、スイスの SNOWPACK やフランスの Crocus）が開発されている。本研究では気温や降水量など比較的入手が容易な気象データを用い、なおかつ少ない気象データの使用で計算可能な積雪層構造モデル開発を目指した。

なお、本研究中で用いたデータはアメダスの降水量、気温（モデル計算で使用）、積雪深、北見工業大学で観測を行った積雪断面データ（比較用）である。

1 本モデルのコンセプト

本研究は水津(2002)のモデルを基本に雨雪判定、しもぢらめ化過程、地温の影響など改良を加えて、少ない入力で総合的な出力ができるモデルの開発を目指した。

入力としてアメダスの気温、降水量データ(1時間毎)を利用し、出力データとして、積雪深、積雪水量、雪質を追加した。

そのため、基本となったモデルは乾雪表層雪崩を予測するものであったが、本モデルは流出予測や気象モデルでの利用、過去の事例の検証、再現などが可能であると考えられる。

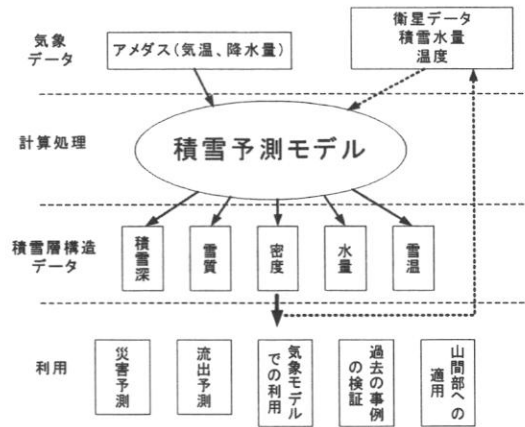


図1 モデルのコンセプト

2 計算の流れ

計算の主な流れを図2に示した。入力は気温、降水量(1時間毎データ)、地形条件(斜度)、主な出力は密度、雪質、各層の厚さ、雪温、積雪の安定度などである。計算過程で積算積雪荷重、粘性係数に関する係数などを求める。

改良として初冬からシミュレートが行えるように気温による雨雪判定、地温の影響を考慮した雪温計算、厳寒地で発生するしもぢらめ化の考慮などを加えた。

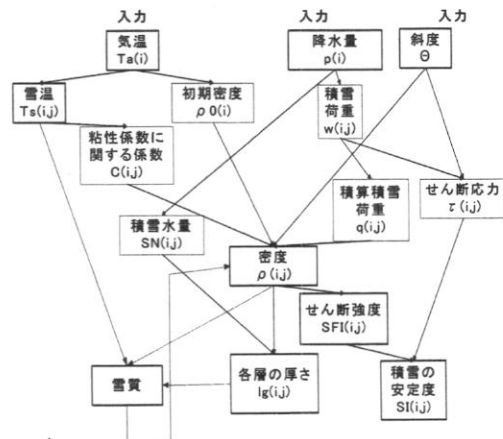


図2 計算の流れ

3 基本となる計算

3.1 密度

モデルでは遠藤(1993)より、各層の密度を以下のように求めた。

$$\rho(t, t_i) = \left\{ \frac{ng}{C} \cdot \cos^2 \theta \cdot Q(t, t_i) + \rho_0^n \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$\rho(t, t_i)$ は t 時間の t_i 層の密度、 g は重力加速度、 θ は斜度、 $Q(t, t_i)$ は層にかかる積算積雪荷重、 ρ_0 はその層の 1 時間前の密度、 C は粘性係数に関する係数、 n は 4 である。

なお、 C は粒径や雪質、温度などに依存するが、Abe(2001)では以下のような式で示した。

$$C = 0.21 \cdot \exp(-0.166 \cdot Ts(t, t_i)) \quad (2)$$

Ts は雪温を示す。

3.2 しもぎらめ化に伴う粘性係数の変化

山崎(1998)より、しもぎらめ化の判定値となる有効温度勾配の時間積算を以下のように求めた。

$$G_t(t + \Delta t, t_i) = G_t(t, t_i) + g_t(t + \Delta t, t_i) \cdot \Delta t$$

(3)

g_t は有効温度勾配、 G_t は有効温度勾配の時間積算である。有効温度勾配は温度勾配と水蒸気の拡散係数、飽和水蒸気密度の温度微分係数などのファクターとの積で表されるが山崎(1998)では近似的に雪温から求めている。

また、式(2)で求めた C をしもぎらめ化が進んでいない雪の粘性係数に関する係数 C_{ndh} とし、しもぎらめ化を考慮して C を以下のように表す。

$$C = C_{ndh} \quad (G_t < G_{t0})$$

$$C = C_{ndh} \cdot \frac{(f_v - 1)G_t + G_{tv} - f_v G_{t0}}{G_{tv} - G_{t0}}$$

$$(G_{t0} \leq G_t < G_{tv})$$

$$C = C_{ndh} f_v$$

$$(G_{tv} \leq G_t)$$

(4)

G_{t0} はしもぎらめ化し始めた雪の G_t (こしもぎらめ)、 G_{tv} はしもぎらめ化した雪の G_t (しもぎらめ)、 $f_v = 10$ とする。

3.3 雪質の判定

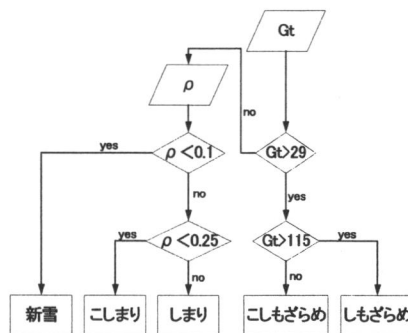


図3 雪質の判定

ρ を雪の密度、 G_t を有効温度勾配の時間積算とする。

図3に雪質の判定方法を示した。

雪質判定としては、まず最初に有効温度勾配の時間積算 G_t でしもぎらめ化の判定を行う。ここで、しもぎらめ化していると判定したら、しもぎらめ化の進行具合によりこしもぎらめ雪かしもぎらめ雪とという雪質判定となる。

しもぎらめ化していなかったら、式(1)で求められた雪の密度 ρ より、新雪、こしまり雪、しまり雪に分類する。

現段階のモデルの雪質の判定では、ざらめ雪、氷板、クラストなどは表現していない。

3.4 その他の計算

・ 雨雪判定

雨雪判定は、入力データが気温と降水量と限られているため、気温に境界値を与えて降雪時の気温によって判定した。

・ 地温の影響

地温の影響についての計算方法は積雪層に2つ層を余分に設け、一つの層は雪の層と同じように計算し、もう一つの層は0℃として計算した。積雪のあるときには地表面の温度がほぼ0℃になることを利用した。

4 モデルの検証

4.1 入力と出力

図4に入力データであるアメダス北見地点の2002年11月11日から2003年4月1日の気温と降水量を示した。このシーズンのデータは、北見の降雪の典型である真冬は少なく、春先に大雪が降るというパターンであった。

また、このデータを入力して行ったモデル計算の結果を図5に示した。積雪深についてみてみると、積雪の圧密過程を表現している

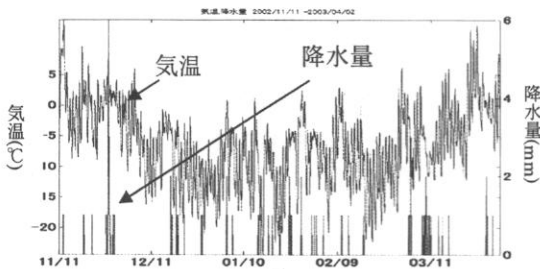


図4 入力データ(アメダス北見地点)
2002/11/11~2003/4/1 期間の降水量、気温データ。縦軸は気温と降水量、横軸は日付を示す。

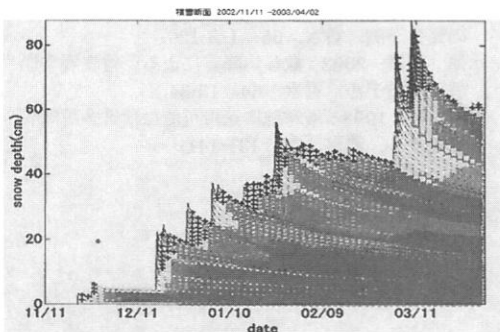


図5 モデルによる出力結果
図4のデータを入力し、モデルに計算させた結果である。縦軸は積雪深、横軸は日付を示す。

のが良くわかる。また、このシーズンの春先に大雪というパターンも表現できている。

4.2 積雪深の比較

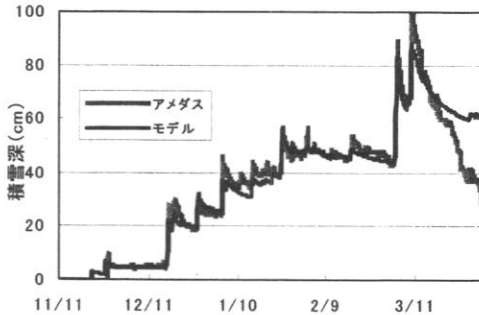


図6 アメダスとモデルの積雪深比較(北見)
2002~2003シーズンの積雪深の比較を示した。縦軸は積雪深、横軸は日付を示す

図6に2002~2003シーズンのアメダスとモデルの積雪深の比較を示した。

比較してみると、よい対応をしていることがわかる。

しかし、よく見てみると、降雪直後の積雪深があまり合っていない。これは、降雪直後の雪の密度の計算に原因があると考えられる。降雪直後の雪の密度(初期密度)は、風速、湿度、気温などに大きな影響を受けるが、モデルでは初期密度の計算を気温だけで行っている。そのため、特に風速が大きい時などは、アメダスの積雪深と大幅にはずれてしまう。

また、現在のモデルでは融雪過程を考慮して計算していないため、春先の融雪時期に大きなずれが生じている。融雪過程を加えることは今後の課題である。

4.2 雪質の比較

図7と図8に断面観測とモデルの出力した断面の比較を示した。

断面観測と比べると、しもざらめ化した、またはしもざらめ化しつつある層が多く出ている。これは図7から図8への流れを見てもわかるとおり、しもざらめ化したと早期に判定してしまうということから、判定基準に

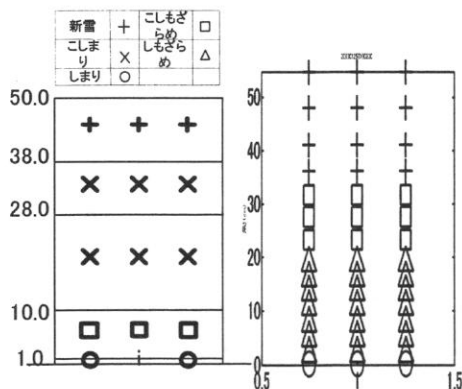


図7 断面観測とモデルの雪質比較(北見 2003/1/25)
2003/1/25の雪質の比較を示した。縦軸は積雪深を示す。左が断面観測、右がモデルである。

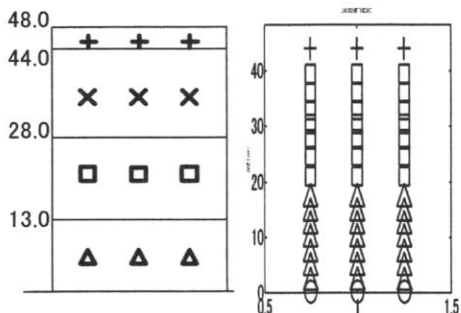


図8 断面観測とモデルの雪質比較(北見 2003/2/5)

問題があると考えられる。

また、観測よりも新雪の割合が大きい。モデルでは新雪、こしまり、しまりの間では、密度の値によって判定している。そのため、実際の観測とは、多少のずれが生じてしまう。

5 まとめ

・アメダスデータを使い、気温と降雪量のみで、積雪層構造を多出力(密度、雪質、積雪深、水量など)によってシミュレートすることができる。また、厳寒地に多く発生するしもぎらめ雪の表現も行える。

・入力に必要なデータが極めて少ないため、データの少ない過去の事例、または遠隔地であっても再現が可能である。

・積雪深はほぼよい一致を見せたが、降雪直後と融雪時期にずれが生じる。降雪直後の積雪深については、初期密度の計算の改良が必

要である。融雪期については、今後、融雪過程も考慮した計算方法の作成が不可欠。

・雪質の判定については、しもぎらめ化を早期に判定してしまう傾向にある。そのため、しもぎらめの判定基準の検討が必要である。

6 今後の課題

今後は衛星データ解析と相互利用して、降水量、気温データのない場所でもシミュレートが行えるようなモデルの開発を行う。衛星データから得た積雪水量、気温から積雪層をシミュレートし、そのデータから衛星データを予測する。これを繰り返して精度を上げるという方法である。

しかし、衛星データは1日のデータ数がアメダスと比べて少ないので、開発の前段階として、1日のデータ数が少ない場合であってもシミュレートが行えるよう現モデルの改良を進める。

また、現在のモデルでは足りなかった融雪過程の計算を加える予定である。

— 謝辞 —

今回、モデルの比較にあたって、断面観測データとして、亀田貴雄助教授、山田直樹氏の観測したデータを利用させていただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- Abe O., 2001: Creep experiments and numerical simulations of very light artificial snowpacks. *Annals of Glaciology*, 32, 39-43.
- 遠藤 八十一, 1993: 降雪強度による乾雪表層雪崩の発生予測. *雪氷*, 55, 113-120.
- 水津 重雄, 2002: 激しい降雪による乾雪表層雪崩危険度モデル. *雪氷*, 64, 15-24.
- 山崎 剛, 1998: 厳寒地に適用可能な積雪多層熱収支モデル. *雪氷*, 60, 131-141.