

積雪の圧密性を考慮した積雪深変化に関する研究
Study on snow depth change taking account of
consolidation effect of snow

(株)大東設計コンサルタント 正員 〇村 上 龍 一
東京理科大学理工学部 正員 大 西 外 明

1. はじめに

融雪流出量の計算方法および解析結果は今まで幾つか報告されており、融雪流出量と実測流出量との比較検討については、タンクモデル、貯留関数等の流出モデルに組込まれて解析されてきているが、直接的に積雪からの融雪流出量と実測融雪流出量との比較検討はあまり行なわれていない。その理由としては、現地において融雪量を直接的に測定することは困難であり、その結果、現地観測資料はほとんどみられないからだと考えられる。このようなことから、本論文では、実測融雪量に代わるものとして現地観測が行ないやすく、そして、現地観測資料が整理されている実測積雪深変化を用いて、積雪深変化の解析値と実測値とを比較検討することにより、融雪量の重要な要因であると考えられる気温日融雪率を決定することを目的とするものである。それとともに、積雪層内の構成状況の解析も行なう。

2. 積雪の圧密性を考慮した積雪深変化の計算方法

前報の水理講演会において、多雪地帯の積雪深変化を従来の考え方による方法とA・F・D型積雪モデルによる方法とにより実測積雪深との比較検討を行なった。その結果、従来の考え方による雪の比重が1つの場合と比較して、降雪比重と積雪比重の2つを用いたA・F・D型積雪モデルの方がより実測積雪深に近いことが認められたが、積雪の圧密効果を導入していないため、積雪深変化の解析値と実測値の間に十分な一致が認められなかった。また、従来の積雪計算およびA・F・D型積雪モデルでは、初期積雪深が安定した時期(1月初旬頃)から計算すると全体的に実測積雪深に合ってくるが、降雪が始まる時期(12月初旬頃)から計算を開始すると積雪深変化が全体的に小さく出てくる。このような問題を解明するため、今回の研究ではA・F・D型積雪モデルを発展させて、積雪の圧密性を考慮した積雪深変化の計算方法を作成した。以下にこの計算の考え方について述べる。

(1) 計算に必要な条件

計算方法を述べる前に積雪・融雪を構成する計算条件について述べる。

- (a) 積雪が生じる条件: ① 気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ で降雪のみ積雪し、降雨は積雪せず流出する。② 気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ で降雪・降雨ともに積雪となる。計算は、この①, ②の2ケースについてそれぞれ行なうものとする。なおA・F・D型積雪モデルでは、①の考え方により計算を行なった。
- (b) 融雪が生じる条件: ① 気温が 1°C 上昇する毎に生じる融雪量(気温日融雪率 $= 0.7 \sim 8.0 \text{ mm}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)。② 降雨から供給される熱量によって生じる融雪量。融雪が生じる条件は、この①, ②の条件のみと考え、地熱等による融雪は無視するものとする。これらから、積雪変化深は、積雪水量の発生と融雪水量の発生による両者の相互関係から構成されることになる。
- (c) 積雪の圧密条件: ① (a)の①の場合について、降雪比重から積雪比重へ圧密が進行する期間を10日間と仮定し、それ以後は一定比重で圧密が進行すると考える。② (a)の②の場合について、降雪については、(a)と①と同様に圧密されて雪が締め固まってゆくと考え、降雨が積雪となる場合は、かなり比重の高い雪と考え、一定比重で積雪になると仮定する。ここで、①, ②の計算値と実測値の雪溶け日が一致する必要がある、その大きな要因として次の条件が考えられる。
- (d) 雪溶け日が一致する条件: ① 降雪比重により降雪水量を調節する。② 気温による融雪定数により融

雪水量を調節する。ここで、降雨から供給される熱量による融雪水量は変化しないものとする。

(2) 積雪の圧密性を考慮した積雪深変化の計算方法

① 積雪の圧密比重の求め方

積雪の圧密比重は、降雪比重から最終圧密比重まで直線変化すると仮定し、それ以後は一定最終圧密比重で進行するものとする。

$$\rho(L) = \rho_0 + d\rho \times (L-1)$$

$$d\rho = \frac{\rho f - \rho_0}{L f}$$

$\rho(L)$: 積雪圧密比重 ρ_0 : 降雪比重
 ρf : 積雪比重 $L f$: 圧密完了日数 (10 日間)

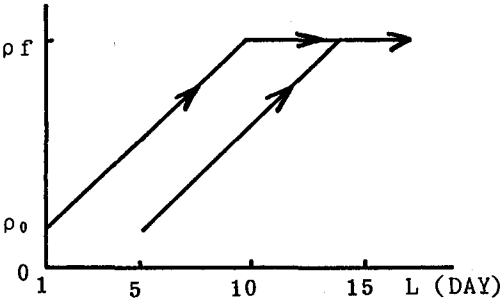


図-1 積雪の圧密比重曲線

② 積雪深と積雪水量の圧密過程の考え方

降雪がある場合、降雪深から積雪深に至るまでの圧密過程を図-2に示し、それに対応する積雪水量の日の変化を図-3に示す。

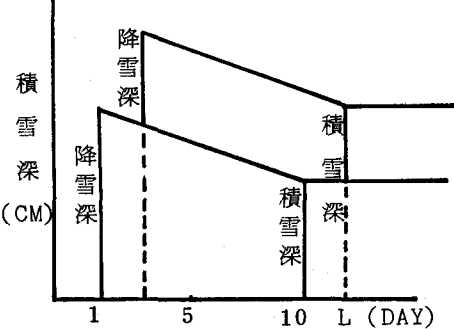


図-2 積雪深圧密過程図

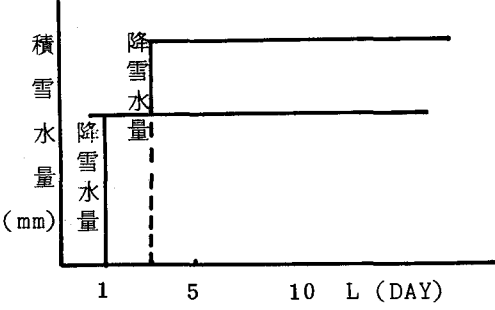


図-3 積雪水量変化図

③ 各層毎の積雪深および積雪水量の計算方法

各層毎の積雪水量および積雪深の計算方法について以下に示す。図-4は、各層毎の積雪深変化図を示し、図-5は各層毎の積雪水量の変化図を示している。また、図-6は計算例として4日目の圧密過程を例にとり上げて、積雪層断面の積雪深と融雪の考え方を示したものであり、図-7は図-6と同様に積雪水量と融雪水量の考え方を示す。

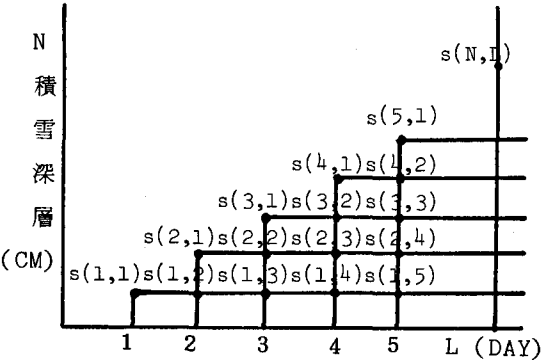


図-4 各層毎の積雪深変化図

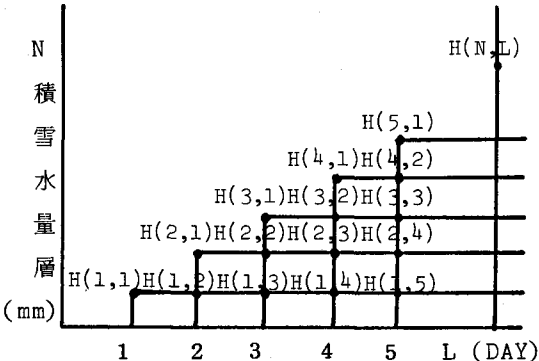


図-5 各層毎の積雪水量変化図

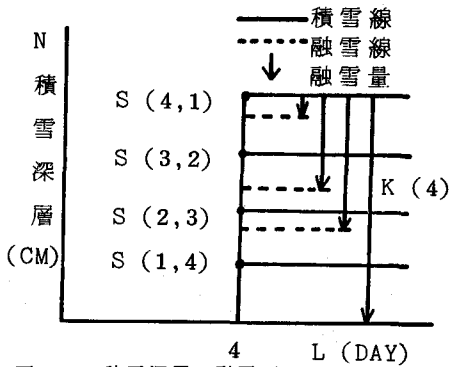


図-6 積雪深層-融雪図

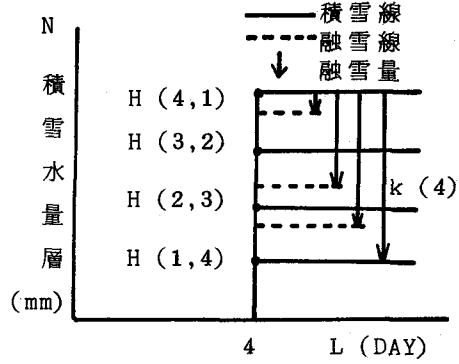


図-7 積雪水量-融雪水量図

$$k = k_1 + k_2, \quad k_1 = t \times k_t, \quad k_2 = r t / 80$$

ここで、上図の記号は次のようである。

L: 計算期間, N: 積雪層番号

H(N, L): 各層毎の積雪水量 (mm)

S(N, L): 各層毎の積雪深 (cm)

SS(L): 層断面を合計した積雪深 (cm)

$\Sigma H(L)$: 層断面を合計した積雪水量 (mm)

k(L): 融雪水量 (mm)

k_1 : 気温による融雪水量 (mm)

k_2 : 降雨による融雪水量 (mm)

k_t : 気温日融雪率, t : 気温 (°C), r : 降雨量 (mm)

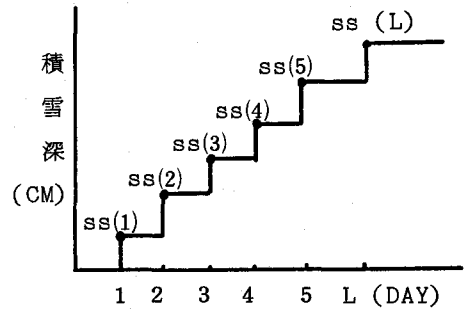


図-8 層断面の合計積雪深

(イ) 各層毎の積雪水量の計算方法

図-7に示されるように、計算期間として4日目を例にとり上げて各層毎の積雪水量の計算方法を以下に示す。

(i) $k(4) < H(4, 1)$ の場合

$$\Sigma H(4) = H(1, 4) + H(2, 3) + H(3, 2) - (k(4) - H(4, 1))$$

(ii) $k(4) < H(4, 1) + H(3, 2)$ の場合

$$\Sigma H(4) = H(1, 4) + H(2, 3) - (k(4) - H(3, 2) - H(4, 1))$$

(iii) $k(4) < H(4, 1) + H(3, 2) + H(2, 3)$ の場合

$$\Sigma H(4) = H(1, 4) - (k(4) - H(2, 3) - H(3, 2) - H(4, 1))$$

(iv) $H(4, 1) + H(3, 2) + H(2, 3) + H(1, 4) < k(4)$ の場合

$$\Sigma H(4) = 0$$

(ロ) 各層毎の積雪深の計算方法

(イ)で計算された積雪水量を圧密比重から積雪深に換算する計算であり、以下にその方法を示す。(図-6参照)

(i) $K(4) < S(4, 1)$ の場合

$$S S(4) = S(1, 4) + S(2, 3) + S(3, 2) + \frac{H(4, 1) - k(4)}{\rho(1) \times 10}$$

(ii) $K(4) < S(4, 1) + S(3, 2)$ の場合

$$S S(4) = S(1, 4) + S(2, 3) + \frac{H(4, 1) + H(3, 2) - k(4)}{\rho(2) \times 10}$$

(iii) $K(4) < S(4, 1) + S(2, 3)$ の場合

$$SS(4) = S(1, 4) + \frac{H(4, 1) + H(3, 2) + H(2, 3) - k(4)}{\rho(3) \times 10}$$

(iv) $S(4, 1) + S(3, 2) + S(2, 3) + S(1, 4) < k(4)$ の場合

$$SS(4) = 0$$

計算方法として、計算期間4日目を例にとり上げて述べてきたが、上述の考え方にしたがって、積雪・融雪期間までの計算を行なっていく。この考え方は、(a)の①の条件で述べた気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ で降雪のみ積雪となる場合であり、(a)の②の条件では、上述の考え方に新たに降雨比重が付け加わる。

3. 解析結果と考察

計算に用いた資料は、前報の水溝で用いた奥只見ダム流域の水文観測資料を使用した。対象とした計算期間は、1977年～1981年の4ケ年について積雪深変化の計算を行なった。計算ケースとしては、前述したように次の2ケースの考え方について4年間の計算を行なった。

① Case1：気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ で降雪のみ積雪し、降雨は流出する。

② Case2：気温 $t < 0^{\circ}\text{C}$ で降雪・降雨ともに積雪となる。

これらの計算結果から気温による融雪定数が融雪期にどのような影響を与えるかを明らかにし、積雪深変化を実測値と比較検討することにより気温日融雪率の値を試算することにより定めた。

最初に図-9に従来の方法による積雪深変化とA・F・D型積雪モデルによる積雪深変化を示す。この計算で用いた雪の比重，気温日融雪率は次のようである。

(i) 従来の方法による積雪深変化

○ 雪の比重 = 0.45

○ 気温日融雪率 = $5.0 \text{ mm}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$

(ii) A・F・D型積雪モデルによる積雪深変化

○ 降雪比重 = 0.05

○ 積雪比重 = 0.45

○ 気温日融雪率 = $5.0 \text{ mm}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$

次に、積雪の圧密性を考慮した積雪深変化について計算した結果を図-10 (case1, 1978年)、図-11 (case2, 1978年)、図-12 (case1, 1979年)、図-13 (case2, 1979年) に示す。そして、1977年～1981年の4年間の計算結果から得られた雪の比重，気温日融雪率を表-1にまとめて表わす。

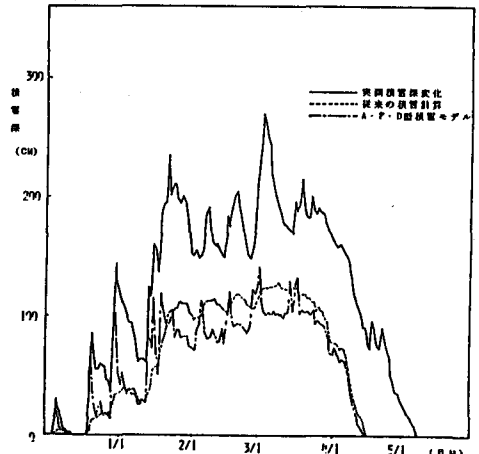


図-9 従来の方法とA・F・D型積雪モデルによる積雪深変化図 (1978年12月～1979年6月)

表-1 1977年～1981年の計算定数一覧表

計算対象年	計算定数	case 1			case 2		
		降雪比重	積雪比重	気温日融雪率	降雪比重	積雪比重	降雨比重
1977年12月～1978年6月		0.075	0.5	4.5	0.05	0.5	0.75
1978年12月～1979年6月		0.075	0.5	4.5	0.05	0.5	0.75
1979年12月～1980年6月		0.075	0.5	5.5	0.05	0.5	0.75
1980年12月～1981年6月		0.075	0.5	5.5	0.05	0.5	0.75

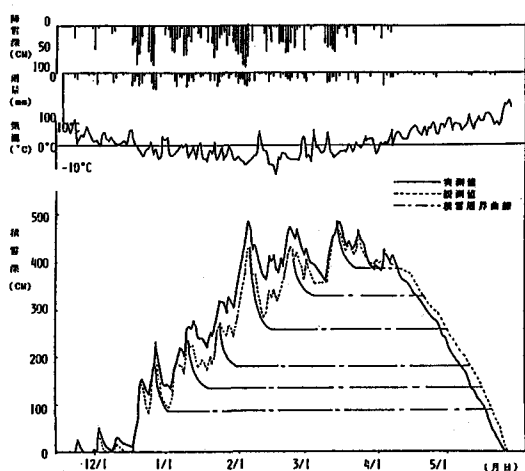


図-10 積雪深変化図 (case1,
1977年12月~1978年6月)

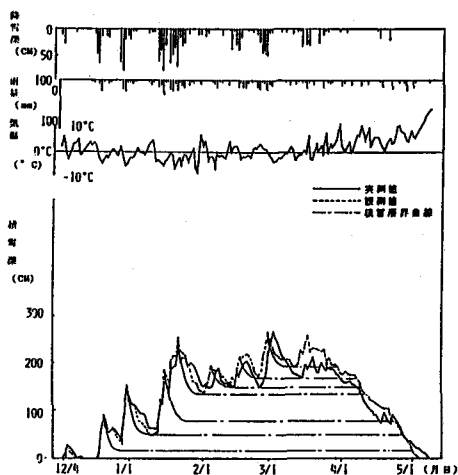


図-12 積雪深変化図 (case1,
1978年12月~1979年6月)

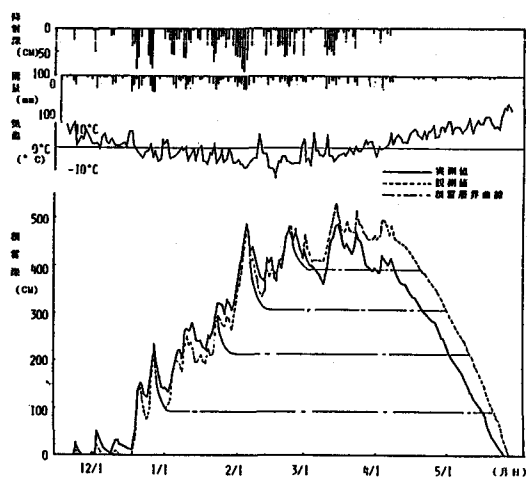


図-11 積雪深変化図 (case2,
1977年12月~1978年6月)

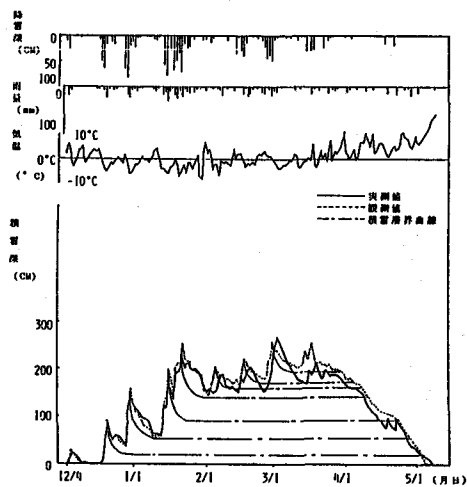


図-13 積雪深変化図 (case2,
1978年12月~1979年6月)

解析結果から得られたことを以下に述べる。

- ① 従来の積雪深変化の計算方法では、実測積雪深と計算値の相関性が鈍いため気温による融雪定数の決定が定めにくい。
- ② 前報で示したA・F・D型積雪モデルでは、case1の場合と考え方は同じであるが、積雪の圧密効果を導入していないため積雪深変化の現象をよく表わせなかった。
- ③ 積雪の圧密性を考慮した積雪深変化では、実測値と計算値が降雪初期からかなり適合性が良いことが確認された。この結果、気温日融雪率の値をほぼ決定することができ、これにより雪溶日の実測値と計算値との一致がなされる。
- ④ 表-1の結果から、case1では、気温日融雪率で $5\text{ mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ であり、case2では気温日融雪率は $6.5\text{ mm}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ である。case1, case2の計算結果より、実際の現象は、気温 0°C 以下では、降雨の一

部は流出，浸透し，残りが積雪又は氷凍するのではないかと考えられる。

⑤ case2 の考え方では、降雨比重の評価が少し難しいことから、現時点では case1 の気温日融雪率を実用的に用いる方がよいと思われる。

⑥ 積雪の圧密性を考慮した積雪深変化を解析するに当り、積雪層内の圧密過程を示す積雪層界曲線を作成した。

4. 結 論

従来の積雪計算方法，A・F・D 型積雪モデルと A・F・D 型積雪モデルに積雪の圧密性を導入した積雪深変化の解析値と実測値との比較検討結果について述べてきた。これらの結果をまとめて述べると次のようである。

- (1) 従来の積雪計算方法および A・F・D 型積雪モデルに比べて積雪の圧密性を考慮した積雪深変化の計算方法は、実測積雪深変化と適合性が非常に良いのが認められた。これより、降雪から積雪・融雪期における積雪深変化を表わす実用性が十分あると思われる。
- (2) 解析結果から、積雪深変化の融雪期において、気温における融雪定数が融雪に及ぼす影響が非常に大きいことが確認された。この気温日融雪率の値は、積雪深変化の圧密性を考慮した積雪深変化の計算方法を用いることにより決定されることが示された。
- (3) 積雪深変化の積雪層構成の状態を示す積雪層界曲線を用いることにより、降雪日から積雪・融雪に至る時間変化を調べることができた。
- (4) 今回の研究では、積雪の圧密期間を 10 日と仮定し、圧密過程を直線変化として計算を行なったが、この計算方法に対し、奥只見ダム流域以外の流域に対しどのような結果になるかを今後検討していく予定である。

最後に、本研究の資料を提供して戴いた電源開発（株）、特に同社土木部長代理岡田剛氏に謝意を表します。また、本研究のデータ作成，作図に当り東京理科大学土木工学科学生笠間順君，小島倫範君の協力を得たことを記します。

参考文献

- 1) 大西外明，村上龍一：リモートセンシングを導入した積雪深と融雪洪水流出解析に関する研究，
第 27 回水理講演会論文集，1983 年
- 2) 電源開発株式会社：奥只見地域，積雪・気象・流量調査資料