

II-27

積雪の含水率、温度を考慮した融雪モデルの研究

北見工業大学 正員 中尾隆志

北見工業大学 正員 佐渡公明

1. はじめに 積雪地域における融雪出水は利水上重要な水資源となる反面、急激な融雪出水は洪水災害を招く。融雪の量的把握は熱収支法により厳密に行なわれる。著者ら¹⁾は積雪全層は 0°C で一定であると仮定し、雪面における融雪量の推定を試みた。その結果、雪面融雪水の一部は懸垂水として積雪層内に貯留され、さらに積雪層内の融雪水の浸透のため雪面融雪量と地表面到達量ではピーク融雪量に時間的ずれが生じ、地表面到達量は積雪層内の含水率に大きく依存することを指摘した。また、夜間特に快晴時には放射冷却現象による積雪層の温度低下作用により、積雪層内の含水の再凍結、冷却が生ずる。このため、積雪層は 0°C 以下となり、積雪層内の含水率を低下させる。近藤ら²⁾はアメダスデータなどより、雪面における熱収支要素を推定する近似式を求め、積雪の最大含水率を一定とし、最大含水率を越えた融雪水が地表面に到達する融雪量であるとしているが、積雪層内の浸透による融雪水の時間遅れについて言及されていない。一方、Laramieら³⁾は積雪の最大含水率、再凍結・冷却を考慮し、さらに積雪層内の浸透遅れをも考慮した融雪モデルを提案している。しかし、この方法は降水時に積雪の含水率や融雪量に影響をおよぼす雪か雨かの判定を気温のみで行なっている。

本報告は Laramieらの手法をもとに降水量の雪か雨かの判定を降水の温度から判断し、雪面での顕熱伝達率、潜熱伝達率として小島の式を用いた積雪・融雪モデルを示し、次に北見工業大学寒地気象観測システムで得られた昭和63年 3月の融雪量の実測値との比較検討を行なったものである。

2. 積雪・融雪モデル

2.1 雪温、Cold contentを考慮した雪面融雪量 降水の形態が雨であるか雪であるかにより、雪面の熱収支や積雪の含水率に影響を与える。降水がある場合、積雪水量は次式により増加する。

$$\text{Weq} = \text{Weq}' + r \quad \cdots \cdots (1) \quad \text{ここに、Weq: 積雪水量、r: 降水量であり、'} \text{は降水前の値を示す}$$

また、積雪の含水率 W を積雪内の含水量と積雪水量の比として次式のように定義する。

$$W = W_c / \text{Weq} \times 100 \quad \cdots \cdots (2) \quad \text{但し、} W_c: \text{積雪内の含水量}$$

降水が雨の場合、降水後 W_c は雨水の浸透により r だけ増加するが、雪の場合その増加はない。従って、降水後の含水率の変化は雨の場合増加するが、雪の場合低下する。また、雨の時には雨滴が積雪に浸透してまもなく 0°C となるため積雪に次式で表わされる、雨の持ち込む熱量 Q_r が加わる。

$$Q_r = C_w \rho_w r (\theta_r - \theta_s) \quad \cdots \cdots (3) \quad \text{ここに、} C_w, \rho_w: \text{水の比熱、密度、} \theta_r, \theta_s: \text{雨滴の温度、積雪表面温度}$$

次に、雪面での熱収支量 H_t は雪面に対する加熱を正とすると、次式で表わされる。

$$H_t = R_N + L \alpha_E (e_a - e_s) + \alpha_s (\theta_a - \theta_s) + Q_r \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 R_N : 純放射量、 L : 蒸発の潜熱、 α_E, α_s : 潜熱伝達率及び顕熱伝達率、 e_a : 空気中の水蒸気圧、 e_s : 雪面の飽和水蒸気圧、 θ_a, θ_s : 気温、雪面の温度

小島⁴⁾は α_E, α_s として風による強制対流のみを考え、高さ 1m の風速 U の1次式として次式を与えている。

$$\alpha_E = 1 \times 10^{-3} U, \quad \alpha_s = 0.38 U \quad \cdots \cdots (5)$$

積雪層内に含水量がある時、積雪の温度 θ_p は 0°C で一定である。 H_t が負の場合、積雪層内の含水量の凍結が生じ、全ての含水量が凍結した後、積雪の冷却が始まり θ_p は 0°C から負の温度へと低下する。本モデルではこの冷却の指標として、次式で表わされるCold contentを用いている。

$$CC = c_i \times \rho_s \times h_s (0 - \theta_p) / (79.7 \rho_w) \quad \cdots \cdots (6)$$

ここに、 CC : Cold content、 c_i : 水の比熱($=0.5$)、 ρ_s : 雪の密度、 h_s : 積雪深、 θ_p : 積雪温度

Cold contentの物理的意味は、積雪温度を $\theta p (\leq 0)$ から 0°C に上昇させるのに必要な熱量と同量の熱量を 0°C の水から奪った時に 0°C の水をどれくらいの深さまで凍結させることができるかを表わしている。

一方、雪面におけるHtが正の場合、Htは最初に積雪温度を上昇させ $\theta p = 0^\circ\text{C}$ すなわち、 $CC=0$ になるまでHtの一部または全てが使われる。その後、残りの正の熱収支量Htにより雪面での融雪が始まる。雪面融雪量はこの残分のHtを融解熱(79.7cal/g)で除する事により求まるが積雪層内には含水量として水の占める部分もあるため、積雪の中で水の占める割合を求めておかなければならない。積雪水量に対する水の占める割合を示す指標として、次式に示すThermal qualityを用いる。

$$Q_t = 1 - \frac{W_c}{W_{eq}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

従って、雪面における融雪量MoはCold contentを0に上昇させた後の残分のHtにより、次式で求められる。

$$M_o = \frac{H_t}{79.7 \times Q_t \times \rho_w} \quad \dots\dots\dots (8)$$

2. 2 新雪による圧密³⁾ 先にも述べたように降水が雪の時、積雪水量が増加するにもかかわらず積雪内の含水量は一定なので新雪後の積雪中の含水率は減少する。また、新雪が降り積もることにより積雪深が増加するが一方、新雪が降り積もる前の積雪は新雪の重みにより圧密沈下する。この圧密量は降水量、新雪が積もる前の積雪深、積雪水量をパラメータとした次式の経験式を用いた。

$$\Delta H = \frac{r \times h_s}{10 \times W_{eq}} \left(\frac{h_s}{25.4} \right)^{0.35} \quad \dots\dots (9) \quad \text{但し、}\Delta H: \text{積雪の圧密沈下量(cm)、} r: \text{降水量(mm)、} \\ W_{eq}: \text{積雪水量(cm)、} h_s: \text{新雪が積もる前の積雪深(cm)}$$

新雪の密度 ρ_{sn} は降雪時の気温による影響を考慮し、これをパラメータとし、次式により求める。

$$\left. \begin{aligned} \rho_{sn} &= 0.05 + (\theta a / 100)^2, & \theta a > 0^\circ\text{F} \\ \rho_{sn} &= 0.05, & \theta a \leq 0^\circ\text{F} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

新雪が空气中を降下してくる速度は雨に比べ非常に遅い。このため新雪の雪温は気温と等しいとして、次式で表わす。

$$\theta_{pn} = \theta a \quad \dots\dots\dots (11) \quad \text{ここに、}\theta_{pn}: \text{新雪の温度}$$

$$\text{新雪の降雪深 } h_{sn} \text{ は } r \text{ と式(10)により、次式で求まる。} \quad h_{sn} = r \rho_w / \rho_{sn} \quad \dots\dots\dots (12)$$

また、新雪のCold contentは、式(11)を式(6)に代入することにより、

$$\left. \begin{aligned} CC_n &= C_i \times \rho_{sn} \times h_{sn} (0 - \theta_{pn}) / (79.7 \rho_w), & \theta_{pn} \leq 0^\circ\text{C} \\ CC_n &= 0.0, & \theta_{pn} > 0^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

と求まる。

新雪が降り積もった後の新しい積雪の積雪深 h_s 、積雪水量 W_{eq} 、密度 ρ_s 、Cold content CC は

$$h_s = h_s' - \Delta H + h_{sn} \quad \dots\dots\dots (14), \quad W_{eq} = W_{eq}' + r \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\rho_s = W_{eq} \rho_w / h_s \quad \dots\dots\dots (16), \quad CC = CC' + CC_n \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。但し、式中'は新雪が積もる前の値を示す。

2. 3 融雪水の浸透と地表面到達量³⁾ 雪面での融雪水は時間と共に徐々に積雪層中に浸透し、積雪内の含水率を増加させながら積雪下面に達するが、雪面での融雪水の全てが直ちに地表面に到達するわけではない。融雪水の一部は積雪層内で懸垂水となって積雪層内に貯留される。本報告では積雪内に最大含水量まで懸垂水として保持されるとし、これを越える融雪水が時間と共に重力水として地表面に到達するとしている。

積雪の最大含水量 $MaxW_c$ は積雪の最大含水率 W_{cap} と積雪水量 W_{eq} から次式で求まる。

$$MaxW_c = W_{eq} \times (W_{cap} / 100) \quad \dots\dots\dots (18)$$

積雪の最大含水率は積雪の密度 ρ_s と相関があるとし、密度により次式によって求める。

$$\left. \begin{aligned} W_{cap} &= (0.025 \times \rho_s + 0.030) \times 100, & \rho_s \leq 0.4 \\ W_{cap} &= (0.200 \times \rho_s - 0.040) \times 100, & 0.4 < \rho_s \leq 0.55 \\ W_{cap} &= (0.111 \times \rho_s + 0.131) \times 100, & \rho_s > 0.55 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

上でも述べたように、雪面の融雪水の一部は積雪層中に貯留し、最大含水量を超過した融雪水が時間と共に積雪層内に浸透し、最終的に地表面に到達する。融雪水が単位時間後にどれくらい地表面に到達するかは積雪深と強い相関がある。本報告では1時間後に融雪水が地表面に到達する割合として積雪深をパラメータとし、次式による地表面到達率Pcを用いた。

$$P_c = \frac{21}{0.3937 \times h_s + 21} \times 100 \dots\dots\dots (20)$$

最終的に、地表面に到達する1時間後の融雪量Mgは、積雪層内の含水量の超過分と式(20)を用いて

$$M_g = \frac{P_c (W_c - \text{Max } W_c)}{100} \dots\dots\dots (21)$$

より求められる。

2. 4 融雪量計算のフローチャート 図-1は本報告で用いている融雪モデルのフローチャートを示し

ている。融雪計算を開始する前に、積雪パラメータの初期値すなわち、積雪深 h_s 、積雪密度 ρ_s 、積雪温度 θ_p 、気温 θ_a 、含水率 W を設定する必要がある。 h_s 、 ρ_s から積雪水量 W_{eq} が求まり、式(6)よりCCが求まる。雪面での顕熱輸送量、潜熱輸送量を支配する雪面温度 θ_s は θ_p と θ_a の平均値を用いて次式により計算した。

$$\left. \begin{aligned} \theta_s &= (\theta_p + \theta_a)/2, & (\theta_p + \theta_a)/2 \leq 0^\circ\text{C} \\ \theta_s &= 0, & (\theta_p + \theta_a)/2 > 0^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \dots\dots (22)$$

また、積雪の最大含水率 W_{cap} 、Thermal qualityは式(19)、(7)から求められる。

気象データでは雪面の熱収支計算に必要となる純放射量、露点温度、気温、風速、降水量が入力される。次に、降水量がある場合、その降水が雨か雪かの判定がなされる。この判定は降水の温度が乾湿球計の湿球温度に等しいとし、次式により降水の温度 θ_r を求め $\theta_r \leq 0$ の時雪とし、 $\theta_r > 0$ の時雨であると判定した。

$$e_{sat}(\theta_r) - KcP(\theta_a - \theta_r) = e_a \dots\dots (23)$$

但し、 θ_r :降水の温度、 $e_{sat}(\theta_a)$: θ_r に於ける飽和水蒸気圧、 Kc :乾湿球定数($=0.5/755$)、 P :気圧

降水が雨と判定されると降水量の分だけ、積雪の含水量 W_c 、積雪水量 W_{eq} を増加させ、新たな含水率 W が再計算され、式(3)により雨の持ち込む熱量も計算される。降水が雪の場合、式(10)～(13)より新雪のパラメータの決定がなされた後、式(9)、式(14)～(17)、式(19)より新雪が降り積もった後の新たなパラメータ(h_s 、 W_{eq} 、 W 、 ρ_s 、 CC 、 W_{cap})が求められる。降雪時には積雪表面に新雪が時々刻々と降り積もっていくため、積雪表面の全熱収支量 H_t は0であると仮定しており、従って雪面融雪量 M_o も0

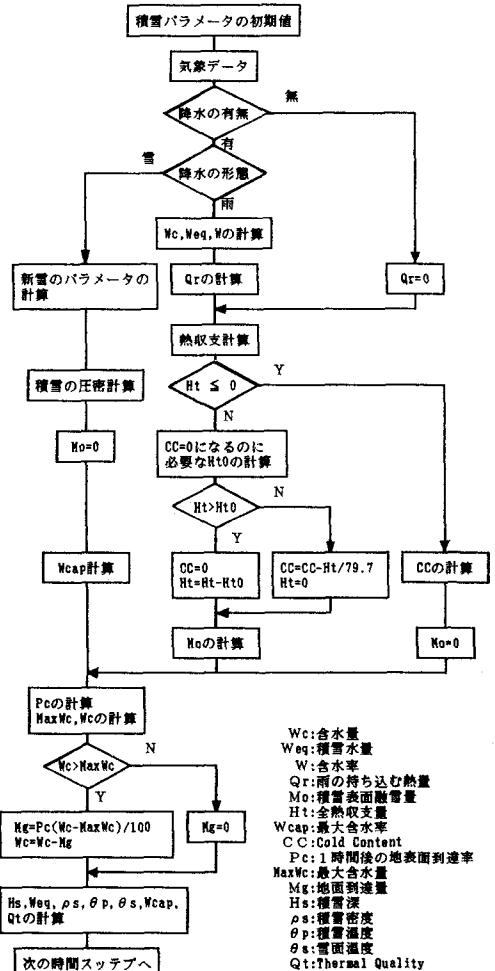


図-1 融雪量計算のフローチャート

となる。降雪時以外には式(4)により雪面での熱収支量が計算される。

さて、 H_t が負の場合、雪面での融雪は生じず、 $M_a=0$ となる。この時、積雪層内に含水があると含水の凍結が生ずる。積雪層内の含水量が0または全て凍結した後、負の H_t は積雪温度を 0°C から負の温度へと積雪の冷却が開始され、Cold contentが増加する。一方、 H_t が正の場合、最初に熱量はCold contentを小さくするのに費やされ、Cold contentが0になった後、雪面融雪が始まる。

雪面での融雪が生じてなくても、積雪内の含水量 W_c が最大含水量 $\text{Max}W_c$ を超過する時、地表面に融雪水は到達する。従って、式(19)の最大含水率から $\text{Max}W_c$ が計算され、1時間後の地表面到達率を式(20)により求め、地表面到達量 M_g が式(21)で計算される。

最後に、次の時間ステップの積雪パラメータとして、 $h_s, W_{eq}, \rho_s, \theta p, \theta s, W_{cap}, Q_t$ が求められる。

3. 本モデルの適用 これまで述べた積雪・融雪モデルの適用例として、北見工業大学寒地気象観測システムで得られたデータを用いた融雪量の計算値と、同時に測定された融雪量の実測値との比較検討を行なう。

3.1 北見における昭和63年融雪量 図-2は寒地気象観測システムで得られた昭和62年11月～63年4月までの一冬間の積雪深の変化を示したものである。初降雪は11月6日であり、12月2日に大雪で積雪が23.5cmまで増しているが、その後12月13日までは融雪のため、積雪深が徐々に減少しているものの、以後は降雪による積雪深の増加がみられる。最大積雪深は3月4日の52cmであり、その後融雪により、急激な積雪深の減少がみられる。本気象観測システムでは地表面上に $90\times 90\text{cm}$ のスノーライ

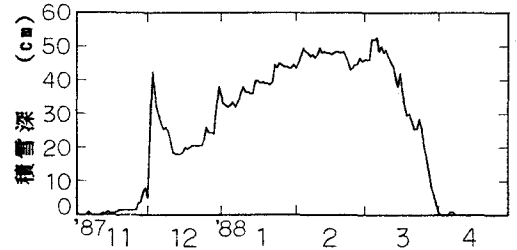


図-2 S62-63年一冬間の北見の積雪深変化

シメーターを2台設置し、塩化ビニールパイプで地下室に導かれた融雪水をそれぞれ0.5mm、1.0mmの転倒枡で計測し、地表面融雪量を実測している。スノーライシメータに到達する融雪水の集水面積を受け皿の面積に一致させるため、3月9日に受け皿の周りを積雪層を乱さないよう掘り起こし、ビニールで受け皿上の $90\times 90\text{cm}$ の積雪柱に囲いをした後、周りの積雪を埋め戻した。なお、0.5mm用のスノーライシメータの設置位置は観測小屋に近く、観測小屋からの輻射熱の影響で融雪の進行が早く今回の解析からは除外した。融雪が最盛期となる3月17日～29日までは毎日、10、12、15時の3回、雪面付近の密度測定、雪尺による積雪深測定も行なっている。

3.2 本モデルによる計算値と実測値との比較

本モデルを用いた融雪量計算は積雪パラメータの初期値として積雪密度、積雪温度、気温、含水率が必要であるが、融雪が進行中のため積雪温度が 0°C で含水率が最大含水率と推定され、積雪密度も測定されている3月17日12時を計算開始時刻とした。また、寒地気象観測システムで積雪深を測定している超音波積雪深計の位置とスノーライシメータの位置が離れているので積雪深の初期値はスノーライシメータ近くの雪尺による積雪深も利用し、両者の平均値(30cm)とした。

図-3は本解析期間中の降水量、気温、露点温度、純放射量、風速の時間変化を示している。観測期間中、降水は全て、降水の温度が負となり、雪と判断した。

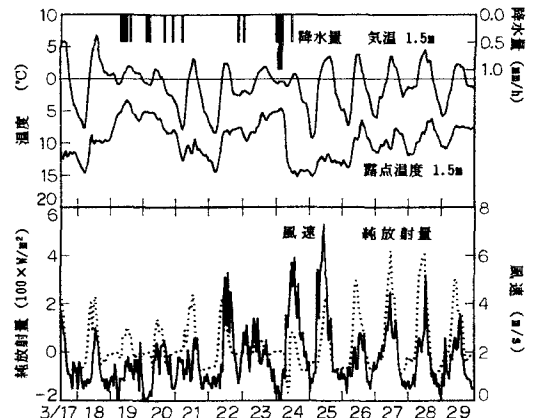


図-3 気象要素の時間変化

なお、計算に当たり、気温は高さ1.5m、風速は 5.89mの値をそのまま用いており、高さ1mに対する高度変換は行っていない。

図-4はCold content、雪面・積雪温度、気温、最大含水量、積雪の含水量の計算結果を示している。夜間、積雪の温度低下が生じ、それに伴って Cold contentが増加している。特に、3月23、24日は昼間、気温が正にもかかわらず、わずかにCold contentを減少させるだけで、積雪層内は凍結したままで、終日表面融雪は生じない。3月19、20、22、25日はCC=0で含水量が増加している。3月27、28、29日に含水量がピークとなる正午頃、最大含水量もわずかに増加し、以後減少している。この理由として、表面での融雪水が式(20)の地表面到達率 P_c に従って浸透し、積雪層内の含水量が上昇し、積雪密度が増加したため、最大含水率が大きくなるからである。一方、最大含水量が低下するのは表面融雪量よりも浸透量が上まって積雪密度が減少するからであり、含水量が最大含水量と等しくなった以降は降水による密度変化が無い限り最大含水量は一定となる。

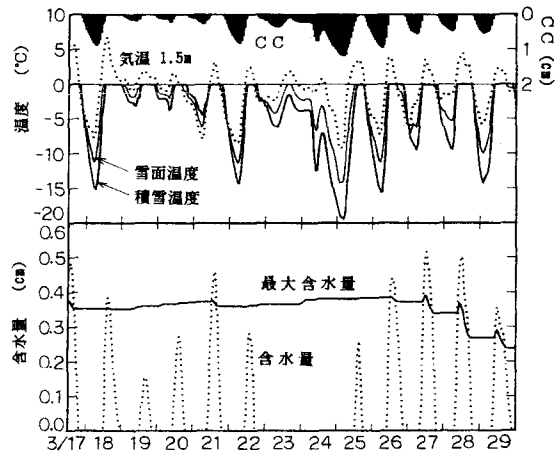


図-4 積雪パラメータの変化

積雪温度、特にCold contentと含水量の関係をさらに詳しく調べるため、3月27日の1時間毎の積雪パラメータの変化を図-5に示す。夜間冷却のため、午前6時まで積雪温度が低下しそれにつれてCold contentが増加している。その後、雪面熱収支量が正となり午前10時にはCold contentが0となり雪面融雪が始まり含水量の増加が生じている。含水量のピークは正午であり以後、熱収支量の正の値が小さくなるにつれ含水量も減少してくるが雪面温度が負となる午後6時には積雪層内の含水の再凍結により含水量が急激に減少している。

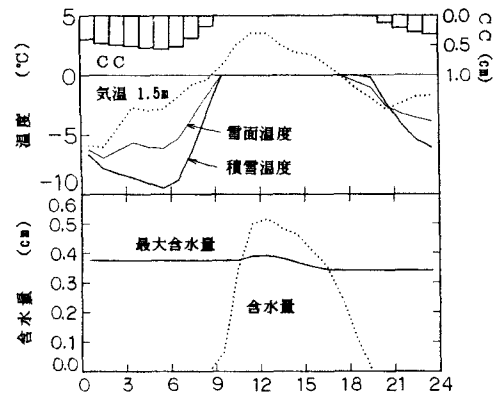


図-5 積雪パラメータの変化 (3月27日)

図-6は本モデルを用いて求めた積雪深の変化と実測値の比較を示したものである。いずれの場合も計算値が実測値を上まわっているが両者はほぼ同様な傾向を示している。特に降水がある時は、先に述べたように全て雪と判定されているので、積雪深の増加がみられる。計算値が実測値を上まわった理由として、実測値の積雪深を超音波積雪深計と雪尺の平均値を用いており、雪尺付近の融雪が雪尺自体の伝導熱により進行し、そのため積雪深が小さめになったことが原因と思われる。

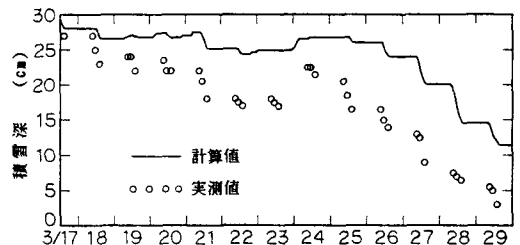


図-6 積雪深の比較

図-7は本モデルによって計算された雪面融雪量 M_0 、地表面到達量 M_g と 1mm用スノーライシメータで測定された実測値 M_{obs} 及び積雪のCold contentを考慮しないで常に雪温が0℃であると仮定した表面融雪量 M' 以上の比較の一例として3月21、27日の融雪量の時間変化を示している。

Cold contentを考慮しているMoはM'に比べ融雪開始の時刻は遅くなっており、積雪層の浸透遅れを考慮したMgはM'、Moに比べ、さらに融雪の出現が遅れ実測値に近づいている。また、PcによりMgのピークは雪面融雪量M'、Moに比べ遅れてピーク融雪が出現しており、表面融雪が0となった後もPcにより融雪がみられ、実測値Mobsと似た傾向を示している。

図-8は観測期間中の実測値Mobsと表面融雪量M'及び地表面到達量Mgを日融雪量で比較している。先に述べたように含水量が最大含水量を超過していない3月19、20、22日と終日Cold contentが0とならない23、24日はMgは0である。日融雪量が少ない18～22日にかけてMgよりはむしろM'の方がMobsに近い変化を示している。この理由として、超音波積雪深計による積雪深の変化は3月17日の36cmを最高に3月29日の8.5cmまで比較的積雪深が浅く、スノーライシメータの受け皿に日射の影響が加わり、実測値Mobsの値を高めたことと、表面融雪が少ない時、地温融雪の占める割合が大きく、本モデルのように地温融雪を考慮していない場合、誤差が大きくなるものと思われる。最後に、融雪量の計算値を1mmスノーライシメータの実測値との誤差の絶対値の平均及び絶対誤差の平均、標準偏差を表1に示す。MoとMgはM'より精度がよくほぼ同様の誤差を示しているが、本モデルに地温融雪を考慮することにより、Mgの精度は向上するものと思われる。

4. まとめ 以上、得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 降水の形態が雨か雪かの判定は降水の温度を湿球温度より求めることによって容易に判定でき、本報告の場合全て雪であったが積雪深の変化とよく一致した。
- 2) 積雪の含水量とCold contentの変化過程をシミュレートできた。
- 3) 表面融雪量に地表面到達率を考慮することにより実測値の傾向を表わすことができた。すなわち、地表面到達量のピークは表面融雪量のピークより遅れ、表面融雪が終了した後も表面到達は継続する。
- 4) 本モデルの融雪量(Mo、Mg)はCold contentを考慮しないモデル(M')に比べ精度がよい。Mgの精度をさらに良くするには地温融雪を考慮する必要がある。

今後は低温室内で式(19)、(20)の係数を詳しく調べ、本モデルを改良するとともに地温融雪を考慮したモデルを作成する予定である。

参考文献

- 1) 中尾隆志・佐渡公明：北見工業大学寒地気象観測システムを用いた融雪観測について、土木学会北海道支部論文報告集、第44号、pp.255～260、1988。
- 2) 近藤純正・山崎剛：熱収支法による融雪量の予測、雪氷、第49号、pp.181～191、1987。
- 3) Laramie, R.L. and J.C.Schaeke: Simulation of the Continuous Snowmelt Process, M.I.T. Report No.143, 1972。
- 4) 小島賢治：融雪機構と熱収支、気象研究ノート、Vol.136、pp.1～38、1979。

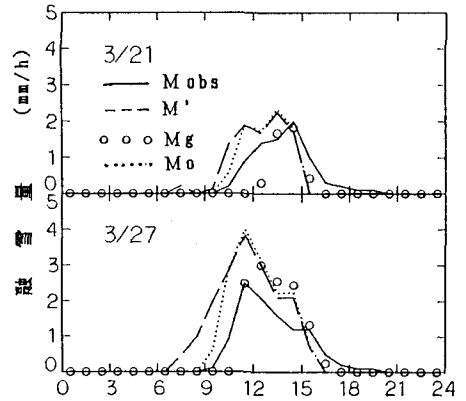


図-7 時間融雪量の比較

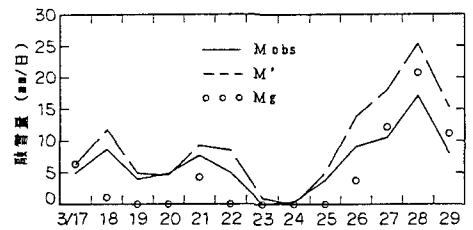


図-8 日融雪量の比較

表 1 融雪量の誤差の平均と標準偏差

	誤差の絶対値の平均 (mm/h)	誤差の平均 (mm/h)	誤差の標準偏差 (mm/h)
M'	0.26	0.13	0.52
Mo	0.17	0.02	0.39
Mg	0.18	-0.08	0.39