平成19年度

TC研究助成成果報告書

平成20年6月

社団法人雪センター

平成 19 年度 TC 研究助成成果報告書

目 次

冬期路面管理実務者のための短期冬期路面状態予測トレーニングシステムの開発・	····· 1
北海道大学 大学院教授 中辻 隆	
雪山融雪水浸透による大地冷熱採取	5
山形大学 大学院教授 横山 孝男	
レーザー画像の処理による積雪状況測定システムの実用化のための研究	15
新潟大学 名誉教授 小林 俊一	
深夜電力利用型で既存太陽光発電システムにも後付けできる 省エネルギー・低コスト融雪機能システムの構築	1.0
者エイルキー・16コスト融当機能システムの情楽・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 18
メインテナンスフリーな落雪氷事故防止のための冠雪・雪庇の研究	41
技術士事務所 雪氷防災代表 竹内 政夫	
融雪及び全層雪崩・積雪グライドによる土砂の生産・流出に関する研究	67
岩手大学 農学部准教授 井良沢 道也	

冬期路面管理実務者のための 短期冬期路面状態予測トレーニングシステムの開発

北海道大学大学院 教授 中辻 隆

キーワード:冬期路面管理、短期予測、人工知能モデル、カルマンフィルター

1. はじめに

冬期の路面管理において、数時間から半日程度先の路面状態を的確に予測することは、効率的な路面管理方策(薬剤散布等)を実施する上において極めて重要である。しかしながら、短時間先の路面状態は、その間の気象条件や道路・交通条件によって大きな影響を受けるためその予測は極めて困難とされている。現状においては路面管理実務者の勘に依存した予測がなされているため、実務者によるばらつきが大きく信頼性に欠けている。本研究においては、道路管理者が保有する既往の道路、気象データと申請者らが開発した短期予測モデルを組み合わせて、実務者が自律的に予測トレーニングを行うことが出来るシステムの開発を行うことを目的としている。

2. オンライン予測モデル

2.1 オンライン予測モデル

時刻 \mathbf{k} における路面状態 \mathbf{x}_k は、前の時刻での路面状態 \mathbf{x}_{k-1} や気象や道路・交通状況による外的条件の影響 \mathbf{u}_{k-1} を受けていると仮定す

る。これらの関係を一般的に以下の状態方程 式として定義する。

$$\mathbf{x}_{k} = F(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{v}_{k-1}$$
 (1)

ここで \mathbf{v}_k は、この関係式は完全ではなく誤差が ともなうことを表している。次にここでの路温の予 測値など、予測したい路面状態 \mathbf{x}_k と相関性の ある変量 \mathbf{y}_k が利用可能であり、両者の間に観 測方程式が成立していると仮定する。

$$\mathbf{y}_k = G(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + w_k \tag{2}$$

ここでも \mathbf{w}_k は、計測誤差等にともなう観測方程式の不完全さを表している。式(1)と(2)が予め規定されている仮定すると、路温等の予測値 \mathbf{y}_k のもつ情報は図-1のアルゴリズムに従って、路面状態 \mathbf{x}_k の予測に反映される。すなわち、現在の時刻 $\mathbf{k}-1$ における路面状態 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ や次の時刻までの気象や道路・交通状況 \mathbf{u}_{k-1} が既知であるすると、予測値 $\hat{\mathbf{y}}_k$ と実測の値 \mathbf{y}_k を比較し、その誤差に比例して暫定予測値 $\hat{\mathbf{x}}_k$ の補正を行う。この操作を繰り返すことによって、オンラインで路面状態の予測が可能となる。このアルゴリズムはカルマンフィルターと言われている。比例乗数 \mathbf{K}_k をカルマンゲインという。

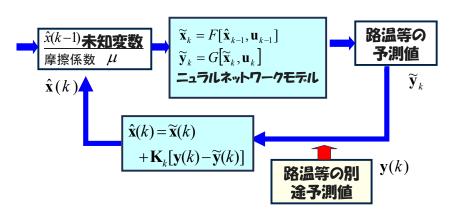
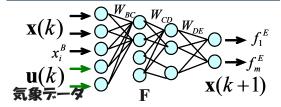


図-1 カルマンフィルターによる路面状態の短期オンライン予測モデル

冬期路面状態の予測に関して、状態方程式(1)中の関数Fや観測方程式(2)中の関数Gを解析的に表現することは不可能に近い。ここでは図-2 に示すように両関数を多層階層型のニューラルネットワークモデルによって表現したニューロ・カルマンフィルターを用いる。カルマンゲイン K_k は誤差 \mathbf{v}_k や \mathbf{w}_k の影響を含んだ形で与えられるがニューラルネットワーク構造に対しても導出可能である。

シナプス荷重の学習は、逆伝搬法によることが一般的であるが、最急勾配法に依拠しているため多峰性の局地問題においては局所解に留意する必要がある。局所解をさけるためにここではGA(遺伝的アルゴリズム)と逆伝搬法を組み合わせ方式を用いた。先ずGAによって初期値を十分調整した後、逆伝搬法による学習を継続するようにした。

状態方程式 $\mathbf{x}(k+1) = F[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)] + \mathbf{v}(k)$



観測方程式 $\mathbf{y}(k) = \mathbf{g}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)] + \mathbf{w}(k)$

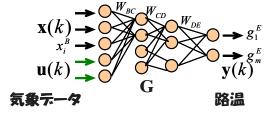


図-2 ニューロ・カルマンフィルター

2.2 予測データ

札幌新道に沿った気象観測地点、発寒西、発寒東、新川東、および北郷の4カ所の気象観測点を対象として(図-3)、6時間後、9時間後、および12時間後の路面状態の予測を試みた。大谷地は気象データがないことから対象

外とした。モデルの同定に当たっては、寒地土 木研究所で観測・集計されたデータを用いた。 路面状態としては、摩擦係数データが利用でき ないので、カメラ画像から判別した路面分類デ ータを、乾燥・湿潤、積雪・シャーベット、凍結 の3つに分類した。状態方程式と観測方程式 の入力変数と出力変数を表-1に示す。

路温だけで路面状態を説明することが困難であることを考慮し、また、実務者が3時間程度の短期予測が可能であるとするアンケート調査結果に基づいて、観測方程式の出力変数として実務者による予測路面分類データを採用することを検討した。本研究では、実務者の予測データがない場合とある場合に分けてモデルの作成を行った。予測データを用いる場合には、3時間先までの予測が行えるものと仮定して3時間後の路面状態データを出力変数として用いた。



図-3 札幌新道沿いの気象観測地点

表-1 短期予測の入力変数と出力変数

	状態方程式	出力変数
	前の時刻路面分類	路面分類
	気 温	気温
入 力	降水量	
変数	薬剤散布経過時間	
	除雪後経過時間	
	交通量*	
出力	次時刻路面分類	路温(5mm 深)
変数		実務者予測路面分類

2.3 数值解析結果

実際のモデルの同定においては、気象観測点ごとに朝型と夜型に分けて、6、9、および12時間先モデルの作成を個別に行った。例えば、朝方の6時間先モデルでは、午前6時、7時、8時、および9時を対象として、各時刻から6時間の間の気象データ等入力変数の集計を行って学習データとした。本解析では、路面状態は二値化数として表されているので、的中率は、教師信号の値が0である場合には出力信号の計算値が0~0.1の範囲にある時を、教師信号の値が1である時には0.9~1.0にある時を正解とした。観測方程式においては、出力信号として路温だけを用いた場合には定量的データであるので決定係数による評価を行った。

表-2 予測モデルの同定結果の評価

		状態方程式	観測方程式
発寒(東向)	予測時間	的中率(%)	決定係数
日中予測	6時間先	92.18	0.81
	9時間先	85.48	0.84
	12時間先	90.37	0.84
	6時間先	90.98	0.75
夜間予測	9時間先	91.13	0.77
	12時間先	85.79	0.79
発寒(西向)	予測時間	的中率(%)	決定係数
	6時間先	91.74	0.69
日中予測	9時間先	85.50	0.65
	12時間先	88.17	0.71
	6時間先	88.62	0.67
夜間予測	9時間先	85.42	0.68
	12時間先	88.50	0.69
新川(東向)	予測時間	的中率(%)	決定係数
	6時間先	88.71	0.85
日中予測	9時間先	86.83	0.92
	12時間先	90.84	0.89
夜間予測	6時間先	88.41	0.82
	9時間先	82.84	0.80
	12時間先	79.41	0.84
北郷(北向)	予測時間	的中率(%)	決定係数
日中予測	6時間先	92.71	0.76
	9時間先	85.16	0.80
	12時間先	87.96	0.79
	6時間先	86.88	0.74
夜間予測	9時間先	87.43	0.72
	12時間先	85.98	0.71

表-2 に各観測地点における状態方程式の 的中率と観測方程式の決定係数R² 値を日中、 夜間における6時間、9時間、12時間先の予 測別に示している。総じて 0.8~0.9 の的中率と 0.7~0.9 程度の決定係数値が得られている。

3つの出力信号の中で最も大きな値となった ニューロンに対応する路面分類が判別されたと して、実測と同じニューロンが選択された割合を 的中率と定義した。各地点、各時間先モデル の的中率を表-3 にまとめた。実務者の3時間 先予測データのある場合(モデル1)とない場合 (モデル2)を比較した。70~85%の的中率となっている。各観測地点、モデル1と2、および日 中と夜間における的中率に有意な差は見られていない。

表-3 予測モデルの同定結果の評価

		モデル1	モデル2
発寒(東向)	予測時間	的中率(%)	的中率(%)
	6時間先	86.3	86.0
日中予測	9時間先	71.5	70.4
	12時間先	80.2	79.4
	6時間先	82.0	81.7
夜間予測	9時間先	78.5	78.5
	12時間先	73.8	73.5
発寒(西向)	予測時間	的中率(%)	的中率(%)
	6時間先	77.6	78.8
日中予測	9時間先	72.8	70.7
	12時間先	76.0	75.4
	6時間先	82.0	82.6
夜間予測	9時間先	77.0	77.6
	12時間先	79.7	80.5
新川(東向)	予測時間	的中率(%)	的中率(%)
	6時間先	82.0	82.0
日中予測	9時間先	73.9	72.3
	12時間先	86.3	84.1
夜間予測	6時間先	86.8	88.0
	9時間先	81.0	80.8
	12時間先	74.3	73.2
北郷(北向)	予測時間	的中率(%)	的中率(%)
日中予測	6時間先	75.5	75.3
	9時間先	72.4	72.1
	12時間先	87.7	87.4
夜間予測	6時間先	84.0	85.5
	9時間先	79.6	79.6
	12時間先	79.1	79.1

3. 実務者トレーニングシステム

対象地点における気象データや路面状態に 関する実測データと2節で開発された予測モデルによる予測データの蓄積を図り、実務者の予測能力をゲーム感覚でトレーニングする簡単なシステムの開発を行った(図・4)。

実務者が対象とする1)予測地点、2) 予測月日、3)予測リード時間を選択する と(図 4-(2))、現在から予測時刻までの気象、 道路、交通条件が、気温や路温予測などは グラフ表示で、薬剤散布や除雪の有無など は表形式で表示される。また、現時点以前 での路面画像データが利用可能である場合 にはその画像データも表示される(図 4-(3)、例示されているものは仮想データ)。利用者はその予測情報に基づいて路面状態の予測を行うようメッセージが出される。ここで開発されたモデルによる予測結果と実測の路面状態も併せて表示されるようになっているので、利用者はゲーム感覚でトレーニングを実施することが出来る。なお、ここではExcelデータとの適合性からVB.NET言語による開発を行っている。

参考文献

中辻隆:車両運動データに基づく冬期路面状態の推 定と予測、土木計画学研究・講演集、Vol.35、2007



(1)トレーニングシステムのメニュー選択



(2)予測地点と予測月日の設定



(3)路面状態画像の表示(仮想データ)

図-4 実務者用トレーニングシステム

雪山融雪水浸透による大地冷熱採取

横山孝男(山形大学大学院理工学研究科)

キーワード:雪山、大地熱交換器、冷熱利用

1. 緒論

本研究は地水圏熱流体の広域で長期で且つ簡便な取扱い確立を求め、大地に形成される積雪や融解、降雨や日照による環境自然エネルギーの利用促進を目指している。先行する帯水層蓄熱や地中蓄熱⁽¹⁾、或いは雪山冷熱利用でも大地温度場形成を取扱った研究を見出すのは難しい。

本邦における大地表層は、第四紀沖積層が多く、未固結で互層となり、砂礫層と雖も粘土層を挟み、融雪水の地下浸透と温度場進展は変化に富む。不飽和浸透そのものについては厳密な半実験式が提案されているものの、温度場伝播に供し得る簡便な流れ場の現象方程式が望まれる。

本研究では、難透水層の浸透疎外が全体に及ぼす影響を考慮するため、任意の大地層序を前提に、総てに重力排水流れを適用して、地下水面までの不飽和流れ場を解析する。その上で熱輸送を、充填層等価一層モデルで解析し構成層毎に独立の透水係数、空隙率、そして非定常飽和度を許容する。解析と将来を睨んで実用規模の実施を想定したシミュレートを行うために、湿り空気の暗渠管内凝縮考慮を含めた融雪浸透水流動・熱輸送についての数値解析コードを構築する。実験では人工雪山の地面下に穴開暗渫管を設け通過する

湿り空気により融雪し、即ち空気を冷却除湿し、空調用に供給する300m²の実験場を設置する。 実験場設置は山形県の畜産振興の1つとして行うもので著者がその方法を提案し指導を担う事となったものである。 更にそれらの基礎実験を行うため室内縮小モデル実験装置を製作する。

Z/ fin GL ZD DD Water table

2. 理論解析

2.1 大地不飽和流動

融雪水や雨水の大地浸透を取扱うには不飽和浸透考慮が不可欠である。ここでは、Corey⁽²⁾の重力排水式を用いる。

$$w = -K_{o} S^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}}, \lambda \cong 2$$
 (5)

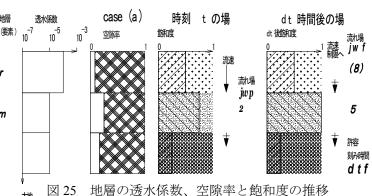
 K_o [m/s]は土質の飽和透水係数、S[ー]は土質の飽和度、w[m]は不飽和流速(ろ速)である。

図 5 埋設暗渠管位置

地表からの融雪浸透量を fin[m/s]とし、地下水面まで大地が均一な飽和透水係数 K_o を持つ場合が基本である。大地はこのまま充分な時間が経てば、fin と K_o に応じた均一な飽和度を形成する。これを使って一般的な不飽和水の質量保存則は平易に求められる。

2-2 不均一場における流れ場の拘束条件と前進差分法における刻み時間

(a) 例えば m層が粘土でその上の r層が砂層 の場合、m 層の飽和度 S が高くても式(5)から $|w_m| < |w_r|$ となる場合、要素[m]への流入が優るので、飽和度 S は次第に高くなり、最大値 Q 1 へと向う。[m]についてのこの飽和度 1 に至る流れ場状態を [m]で S が 1



になった瞬間、[r]では $|w_r|=K_{0m}$ と言う拘束を受ける。この結果 [r]では式(5)による w_r ではなくなる。現時刻 t で要素[m]の流れ場計算に使う刻み時間 dtn は $s_m \rightarrow 1.0$ となるまで(その時間を dtf)である。

(q) 元々 $|w_m| < |w_q|$ であるが何らかの理由で[q]が $s_q=1$ に達し、その上にあたる[m]が、現時点では拘束されていないものの、 $|w_m| < |w_r|$ のためこの刻み時間で拘束を受ける場合がある。この状況下の流れ場をjwf=15とする。この場合の刻み時間は将来の飽和度 as_m が

$$as_m < \left(K_{oq} / K_{om}\right)^{1/(2/\lambda + 3)}$$

である範囲である。これを dth とする。

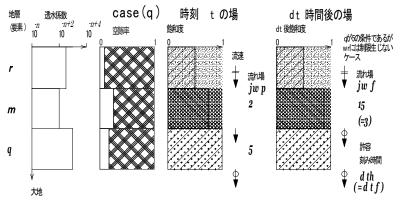


図 40 流れパターン (q)

これら流れパターンは基本で7種、それぞれが更に子、孫パターンを持つ。例えば、飽和要素が連続して上下方向につながる場合には、最下部の重力排水流速が、連なる総ての鉛直流速を律することになる。実際には、この様な場合飽和ポテンシャルが生じるであろうが、ここでは考えない。

流れ場計算に可能な刻み時間は、現在の流れ場をベースに次の dt ステップで起こり得る流れ場事象により 各要素即ち層毎に異なる。総ての要素を見渡して、最も小さい刻み時間を擁する要素が全体を律する。

2-3 大地の比熱

層毎に空隙率が異なりかつ空隙を満たす液体の飽和度が時々刻々変化するならば、単位体積当りの見掛け熱容量 $(c,\rho)_e$ が変化する。現時刻での飽和度をS[-]とすれば

$$_{b}(c\rho)_{c} \equiv (1-\varepsilon)(c\rho)_{d} + s\varepsilon(c\rho)_{w}$$
 (15)

dt後の飽和度を as とすれば dt後の熱容量 $_a(c
ho)_e$ は次式となる。

$$_{a}(c\rho)_{e} \equiv (1-\varepsilon)(c\rho)_{d} + as\varepsilon(c\rho)_{w}$$
 (20)
ここで $(c\rho)_{d},(c\rho)_{w}$ [J/(m³K)]は粒子、水 (液体)の単位体積当りの比熱である。

2-4 大地の温度場解析

(a) 不飽和浸透下での温度場伝播

鉛直方向非定常熱輸送方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial \left[(c\rho)_{e} \theta \right]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{e} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial (w\theta)}{\partial z} (c\rho)_{w}$$
 (25)

(b) 埋設穴開き暗渠管での湿り空気凝縮を考慮した脱湿温度変化

発生した凝縮水は次の時間ステップまでに直ちに地層に排水されるとの仮定の元で、流出入する湿り空気に対するエネルギー項は、以下の通りである。

流出エネ ①
$$v_g A \rho_g \left[\theta_a C_{pa} + \overline{x} \left(r_o + \theta_a C_{pw} \right) \right] = v_g A \rho_g h$$
 ② $\pi d \cdot dx \cdot H(\theta_a - \theta)$

流入工ネ ①
$$v_g A \rho_g \left[\theta_a \big|_{x+dx} \cdot C_{\rho a} + \overline{x} \big|_{x+dx} \left(r_o + \theta_a \big|_{x+dx} \cdot C_{\rho w} \right) \right] = v_g A \rho_g h \big|_{x+dx}$$

内部エネ変化率
$$\frac{\partial \left[C_{va}\theta_{a} + \overline{x}(r_{0} + C_{vw}\theta_{a}) + gC_{p\ell}\theta\right]}{\partial t} \frac{\pi}{4} d_{i}^{2} \cdot dx \cdot \rho_{g}$$

ここでg は乾き空気単位質量当りの凝縮水質量[-]、 r_o は蒸発(凝縮)潜熱[J/kg]、 \bar{x} は絶対湿度[-]、h は湿り空気の比エンタルピー[J/kg]である。

 $H[W/(m^2K)]$ を暗渠管熱伝達率とすれば、エネルギー保存式は次の様に求まる。

$$\frac{\partial \left[C_{va}\theta_{a} + \overline{x}(r_{o} + C_{vw}\theta_{a}) + gC_{vi}\theta_{a}\right]}{\partial t} = \frac{H}{4d_{i}\rho_{s}}(\theta_{a} - \theta) - v_{g}\frac{\partial h}{\partial x}, \quad h \equiv C_{pa}\theta_{a} + \overline{x}(r_{o} + C_{pw}\theta_{a}), \quad (40)$$

$$\frac{\overline{x}^{dt}[m] - \overline{x}[m]}{dt} A \cdot dx \rho_g = -v_g A \rho_g \overline{x}[m] + v_g A \rho_g \overline{x}[n]$$

$$\therefore \overline{x}^{dt}[m] = \overline{x}[n] \frac{v_g \cdot dt}{dz} + \overline{x}[m] \left\{ I - \frac{v_g \cdot dt}{dz} \right\} \quad \dots (45)$$

この $\bar{x}^{d}[m]$ を使って、式(40)から仮りのdt後温度 $\theta_{al} \equiv \theta_{a}^{dt}[m]$ を求める。比内部エネルギーuは状態量なので、少くとも次の2ステップで凝縮量を考慮したdt時間後の比内部エネルギー $u^{dt}[m]$ を求める。図 46 に示す様に、

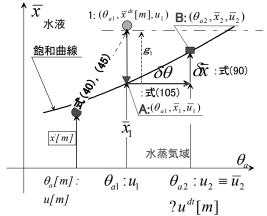


図 46. 凝縮量の算出方法

 $ar{x}^{dt}igg[migg]$ が凝縮を考慮しない dt 後温度 eta_{al} に対する飽和絶対湿度 $ar{x}_{l}\equivar{x}_{s}$ より高い場合、凝縮が生じる(平衡状態を仮定する)。この状態点 $(eta_{al},ar{x}^{dt}igg[migg]$)を状態 1 とする。逆に低い場合にはこの eta_{al} が dt 後の温度で $ar{x}^{dt}igg[migg]$ が絶対湿度となる。

前者の場合には、飽和水蒸気圧線に沿って比内部エネルギーが u_1 から u_2 へと変化し、その変化巾 u_2-u_1 は $Qdt/(Adx \rho_a)-\{u_1-u[m]\}$ に見合う量になるはずである。ここで Q は要素 m への差引流入エネルギーである。 $\therefore u_2-u_1=q_1\equiv Q\frac{dt}{Adx\,\rho}-\left(u_1-u[m]\right) \quad (50)$

 u_1 は以下で表され、既知である。

$$u_{1} \equiv C_{w}\theta_{a1} + \overline{x}_{1}(r_{o} + C_{w}\theta_{a1}) + (\overline{x}^{d}[m] - \overline{x}_{1})C_{v\ell}\theta_{a1}$$
 (55)

$$u_{2} \equiv C_{w}\theta_{a2} + \overline{x}_{2}(r_{o} + C_{w}\theta_{a2}) + (\overline{x}^{d}[m] - \overline{x}_{2})C_{v\ell}\theta_{a2}$$

$$= C_{w}(\theta_{a1} + \delta\theta) + (\overline{x}_{1} + \delta\overline{x})\{r_{o} + C_{w}(\theta_{a1} + \delta\theta)\} + (\overline{x}^{d}[m]^{d} - (\overline{x}_{1} + \delta\overline{x})\}C_{v\ell}(\theta_{a1} + \delta\theta)$$

$$(60)$$

飽和曲線における $\delta\!x$ と $\delta\theta$ に関係がある。例えば温度 θ に対する飽和水蒸気 $p_{\rm s}$ は、Tetens の式 $^{(3)}$ で近似される。

$$p_{s} = 6.11 \cdot 10^{-4} \times 10^{\frac{7.5\theta}{237.3+\theta}} \qquad [MP_{a}]$$
 (65)

これより、飽和水蒸気圧 p_s と露点温度 θ と \bar{x} には、次の関係が生じてくる。

$$\therefore d\overline{x} = f(p, p_s, \theta_s) d\theta, f = \frac{0.622p}{(p - p_s)^2} \cdot \frac{2.50}{(237.3 + \theta)^2} \cdot 10^{\frac{7.5\theta}{237.3 + \theta}}$$
(90)

ここで、式(60)-式(55)を求める。

$$u_{2} - u_{1} = C_{va}\delta\theta + \overline{x}_{1}C_{vv}\delta\theta + \delta\overline{x}\left\{r_{o} + C_{vv}\left(\theta_{1} + \delta\theta\right)\right\} + \left\{\overline{x}\left[m\right]^{d} - \left(\overline{x}_{1} + \delta\overline{x}\right)\right\}C_{v}\delta\theta - \delta\overline{x}C_{vd}\theta_{a1}$$
(97)

置換 $\bar{x}_b \equiv \bar{x}^{d}[m] - \bar{x}_l$ を行い式(90)の関係を上式(97)に代入し、式(50)を展開する。

$$C_{va}\delta\theta + \bar{x}_{1}C_{vw}\delta\theta + \delta\theta f \left\{ r_{o} + C_{vw} \left(\theta_{a1} + \delta\theta \right) \right\} + \left(\bar{x}_{b} - \delta\theta f \right) C_{v\ell}\delta\theta - \delta\theta f C_{v\ell}\theta_{a1} - q_{1} = 0$$

$$\delta\theta^{2} \left(f C_{vw} - f C_{v\ell} \right) + \delta\theta \left\{ C_{va} + \bar{x}_{1}C_{vw} + f \left(r_{o} + C_{vw}\theta_{1} - C_{v\ell}\theta_{1} \right) + \bar{x}_{b}C_{v\ell} \right\} - q_{1} = 0$$

$$(100)$$

 $C_{_{w\ell}}\equiv C_{_{v\ell}}-C_{_{vw}}$ と置くことにより最終的に $\delta heta$ の2次方程式に到る。

$$\therefore -C_{w\ell}f \cdot \delta\theta^2 + \left\{C_{va} + \overline{x}_1C_{vw} + f(r_o - C_{w\ell}\theta_1) + \overline{x}_bC_{v\ell}\right\}\delta\theta - q_1 = 0 \therefore a\delta\theta^2 + b\delta\theta + c = 0 \quad (105)$$

この δ θ を式(90)に代入して、 δx を求めれば、状態 2 における dt 後温度

$$\theta_{a2} \equiv \theta_{a1} + \delta\theta$$

絶対湿度

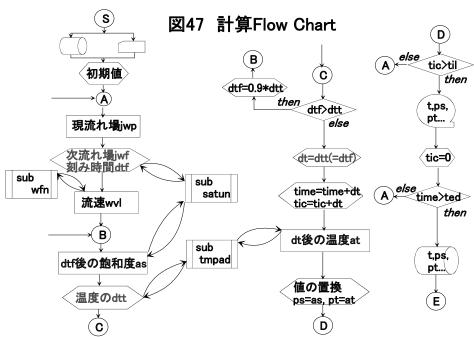
 $\overline{x}_2 \equiv \overline{x}_1 + \delta \overline{x}$ 及び凝縮量 $(\overline{x}^{d}[m] - \overline{x}_2)$ を求めることが出来る。

(C) 解析フローチャート

温度場の刻み時間は dt 後の飽和度 as にも依存す る。従って、飽和度計算を

仮に行いそれによって温度場の刻み時間 dtt を求める。 もし dtt が流れ場の刻み時間より小さいなら dtt を使っ て飽和度を改めて計算し、温度場計算を求める必要が ある。

暗渠管には、1m/s 程度の流速で湿り空気が流れるので、管内の刻み時間 dtv は dtt に比べ桁違いに小さい(10⁴倍)。同じ刻み時間を使うと、どちらかに丸め誤差や桁落ちが生じる。そこで暗渠管の計算は不飽和帯の1 ステップ内で、非定常計算を繰り返し熱力学法則を満たすようにする。計算手順をまとめると図 47 になる。





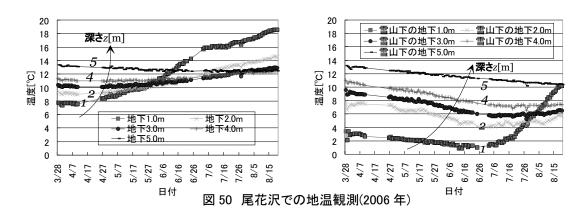
写 49 尾花沢市雪山 '05

3. 予備実験と実験場設置

3.1 尾花沢市雪山における冷域形成

NEDO と尾花沢市との共同実験で、雪山ヤードを設置し、2ヶ所に大地冷熱形成のために5m深調査孔を設けた。写49の様な雪山からの冷熱採取は、ボックスカルバートと融雪熱交による。

実験結果、図 50 の右を見ると、ほぼ 0 $^{\circ}$ Cの融雪水が 7 月初旬(約 100 日後)まで浸透したため 1 $^{\circ}$ m 地温をはじめ、5 $^{\circ}$ m 深まで降下し続けているが、途中からは観測個所の雪が無くなり 1 $^{\circ}$ m 深地温はこの頃から急激に上昇する。バックグランドの地温変化、図 50 左を見ると、融雪水浸透がなければ 4 月初旬から地温は上昇する。



3.2 穴開き暗渠管による大地採熱管埋設

 ϕ 100 の穴開き暗**渠**管(有孔管)を 20m 長に敷き、それをピッチ 350mm で 14 列並に敷き、両端にヘッダーを設け床面積をおよそ $6.5 \text{m} \times 20 \text{m} = 130 \text{m}^2$ の上に砂層を 200mm、そのベースに 300mm で敷いた。写 10 は有孔管配置を示す。写 15 に仕上面を示す。電柱の足元にマンホールがあり、そこに \mathbf{u} 字型下向きパイプを取付け、外気を吸い込む。冷気は牛舎に持ち込まれ、6 頭の乳牛の首筋に、 $20 ^{\circ}$ で計 150 \mathbf{u} 0 で吹き出す様に設計した。写 20 は牛舎内分岐管吹き出しを示す。



写 10 大地熱交換器 この上に盛砂'06



写 20 牛舎内分岐管 19/卯月 '08

写 15 雪山ヤード仕上げ面 19/卯月 '08

3.3 雪山形成

平成19年年明けの冬は寡雪で雪山を形成することは断念せざるを得なかった。一年経った平成20年3月3日に雪山を形成した。写25はその雪山にシートをかけ始める所である。内側から向いエアクッション写30に示す様に細め・太目の二重エアクッションをかけ、外側をシルバーシートで覆った。



写 30 細め・太め空気ACC.JPG



3/弥生'08 写 25 雪山へのシート

シート全体は、錘を吊るしたロープで風に煽られない様に写40に示す形とした。

例年になく早い春の到来の下で、雪山は強い融解に晒され、3ヶ月半経った6月08日の雪山は写45に示すように小さくなった。



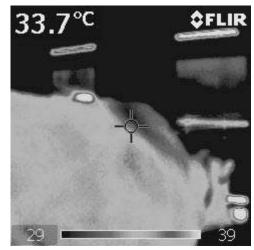
写 45 小さくなった雪山 08/水無月 '08



写 40 シート錘 3/弥生'08

3.4 今後の研究計画

夏を待たずして雪山が消滅しているので、6月9日から冷熱採取試験に取り掛かった。 空気の閉塞は無く、取水冷気はヘッダーで5℃、冷風吹出し口で13度で牛の背筋に供給できた。 写50は吹き出し口からの冷気ににより乳牛の背筋が局部的に温度低下している様子を示している。 今後穴開き暗渠管での空気の流動性、水はけ状況、冷熱採取性能、除湿性能、それにの性能を1-2週間に亘って実験する。



写 50 乳牛背筋の温度降下 12/水無月 '08

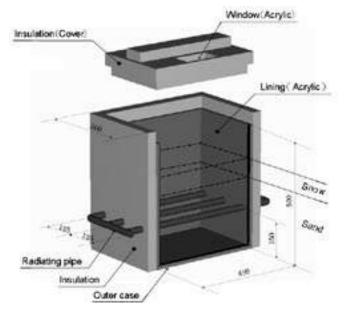


図 51 の 2 次元モデル実験装置

4.縮小モデル実験による穴開き暗渠管での採熱性能 試験

2.4 節の大地浸透域での不飽和流れ・熱伝播、及び穴開き暗渠管内空気の除湿・冷却管まわりの伝熱を確かめるため図51の2次元モデル実験装置を製作した。写55にでき上がった実験装置を示す。今回は予備実験で、伝熱管は穴無しの SGP(8A)管である。表5に実験タイプ別、諸元を示す。図52に模擬大地表面に雪を載せたAtypeの実験における各層温度分布を示す。 放熱管表面温度は実験開始から10~12[℃]で安定している。砂層表面温度は実験開始から0[℃]で安定しており、12時間経過した後徐々に上昇している。これは雪が解けて表面が露出し始めたためである。融雪仕切るのは完全に融解し砂層表面温度が10[℃]に達した時

点とし、実験開始から17時間であった。 砂層の放熱管上温度は実験開始から徐々に下降している。これは表面の雪が解け融雪水が砂に浸透したためである。

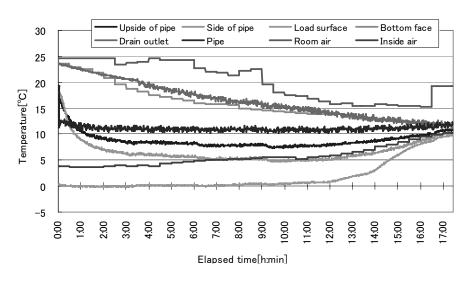


図 52 模擬大地表面冠雪 A type 実験

表5に実験タイプ別、諸元

Snow mass [kg]	3.0		
Snow density [g/ml]	0.44		
Elementum of El	1.42 (A type)		
Flow volume [l/min]	1.66 (B type ,C type)		
Fluid town areture [%]	11.5(A type)		
Fluid temperature [℃]	52.2(B type ,C type)		
Sand mass [kg]	39.8		
Thickness of overburden [mm]	50		
Initial temperature [°C]	4.0~6.0		

5. 一次元シミュレーション結果

5.1 暗渠管深度による冷熱出力差違

雪山はシートをかけた断熱でも融雪は進む。 実績から $fin \equiv 2 \times 10^{-7} \, m/s$ をベースに与えた。 暗渠管冷熱出力 p[W/m]を暗渠管単位長さあたりの周囲への放熱率とする。図 55 に示すように管径は細い ϕ 20mm としてあるため暗渠管での放熱による融雪はその 1/10 程度であるが、出力は埋設深が浅い程高い。浸透流量が粘土層の飽和透水係数、図 65 では 4m深で $1.6 \times 10^{-7} [m/s]$ 、

を超える場合にはその粘土層で浸透が阻害される。 図 65 では 10 日後までは順調に不飽和浸透するが 20 日では 4m 深粘土層での浸透阻害が発生し地下水面は 3m 深前後まで上昇している。1 ヵ月後には 2m 深まで、41 日後には地表面にまで達し、人工雪山下地表面で溢水が生じることになる。大地熱交を利用する場合には層序を考慮して溢水を生じさせない設計・運用が必要となる。

5.2 冷熱出力を高める方法

図 70 では、空気暗渠管熱伝達率 H を $10W/(m^2K)$ として管径 di を $20\sim100$ mm まで変化させた場合で流入流速を Vg=0.5m/s、湿り空気温を 35°C、相対湿度を 80%(絶対湿度で x=0.029kg/m³)、埋設深を 500mm で与えている。

暗渠管径 di が小さい程、出口温度 θ は低下し、脱湿も進む。しかし di が大なる程、冷熱出力 p[W/m]は大きい。 $di=\phi$ 100mm の場合暗渠管単位長さ当り 25W の冷熱出力で温度は 35℃から 31℃、絶対湿度は 0.028 kg/m^3 が得られる。

図55 暗渠管埋設深度による冷熱出力差異

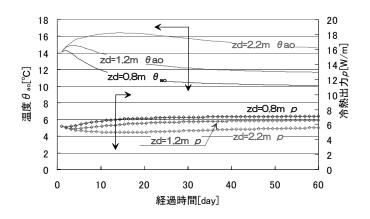


図65 粘土層による浸透阻害と地表からの溢水

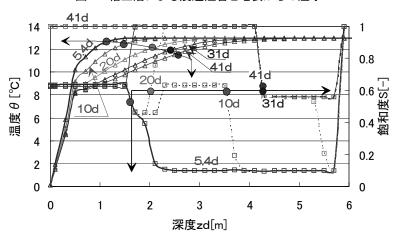
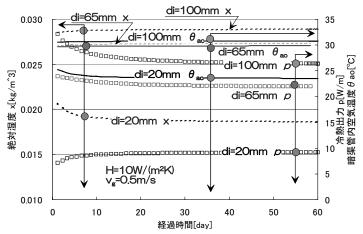


図 70 暗渠管管径による冷熱出力と脱湿



6. 結論

実用に供するため不飽和浸透流れを重力排水で近似し雪山下の穴開暗渫埋設管による雪山融解、吸込み空気の除湿・冷却に関する 1 次元非定常解析コードを構築して、宙水発生を伺わせる解析を可能にし、2 次元の冷熱取得実験を重ねるための縮小モデル実験装置を製作した。 野外実験場は予定規模を半分にしたが提案したコンセプトに沿って設置した。 十分な実験結果を引き出すまでには至らなかったが、解析コードの

確立については以下の結論を見出した。

- (1). 粘土層による閉塞や、層毎の不均一な飽和度形成を含む流れ場が解析可能である。
- (2). 不均質飽和透水係数、空隙率、非定常飽和度分布下での垂直方向大地温度場進展および暗渠管脱湿・冷熱出力解析が可能である。

野外実験場は予定を変更し完成に到ったものの、実験はこれからが本番である。埋設深が浅いほど、暗渠パイプ間温度場の2次元性が顕著になり、ひいては雪山融解で部分的な空洞を生じさせるおそれや8月まで雪山を保つか地下に形成される冷熱塊を利用するかなどはこれからの課題である。

7. 引用文献

- (1). Hamada, Y.,et. Al., Improved underground heat exchanger by using no-dig method for space heating and cooling, Renewable Energy 32(2007), pp.480-495
- (2). Cory, A.T., Mechanics of Heterogeneous Fluids in Porous Media, Water Resources Publications(1977), pp.112-120
- (3). 近藤純正、水環境の気象学、p.26、朝倉書店、1996年9月第3刷

レーザー画像の処理による 積雪状況観測システムの実用化のための研究

新潟大学名誉教授 小林 俊一

キーワード:パターンレーザー、画像処理、積雪深、表面の凹凸、小型化、ネットワーク化

1. はじめに

近年、自動車が増加とともに交通事故も増大し、特に冬季には凍結や除雪によるスリップ事故が 多発している。事故の発生を防止するため、路面状況測定手法が開発されているが、それぞれに長 短所がある状況である。

そこで、我々のグループでは、レーザーを積雪面上に照射し、カメラで撮影した画像をコンピュータで処理することにより、積雪の状況を把握するシステムについて検討を行っている。単に照明で路面を明るくして撮影するだけでなく、レーザー光を用いて画像処理のためのパターンを能動的に作り出し、それを撮影、処理することで積雪深や雪の空隙率などの情報を積極的に取得するシステムを目指した。平成 18 年度までの研究により、基本的な可能性を実証することができたことから、平成 19 年度には、実験用道路において高さ 5m にレーザー、カメラを設置し、より実際に近い体系で連続的な測定を試みた。なお本研究は、富山工業高等専門学校 高田英治准教授、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 佐藤篤司センター長、新潟電気株式会社 丸山社長、石丸民之永氏の共同研究の形で行われた。

2. 検討対象としたシステム

本研究において研究対象としたシステムの概略を Fig.1 に示す。積雪面を見込むレーザーから積雪面に対して斜めにレーザー光を照射し、表面での透過・拡散・反射の様子をカメラで測定する。積雪深の増加によって積雪面上のレーザー光像の位置が変化するので、その変化の様子から積雪深を測定することを試みた。レーザー光としては直線状のパターンのものを用い、積雪面上に線分が投影される仕組みとした。

また、雪の空隙率が多い場合には表面での光の拡散の寄 与が大きくなり、測定されるパターンのばらつきの程度か ら雪質が測定できるのではないかと期待した。

Laser Camera Snow Surface Road Surface

Fig.1 本研究で検討した測定体系

3. 積雪深測定可能性評価のための実験

3.1 実験方法

防災科学技術研究所雪氷防災研究センター内の実験 用道路にシステムを設置し、平成20年1月~3月に かけて連続測定を試みた。Fig.2に実験体系の写真を 示す実験内容に関する昨年度からの変更点としては、



Fig.2 実験体系

- ① 5m の高さにカメラ、レーザーを設置し、測定を行った点
- ② 光フィルタを用いレーザー波長以外の 光がカメラに入り込まないよう試みた点
- ③ レーザーを照射した際の画像と、直後に撮影したレーザーを照射していない時の画像の差分を取ることで、レーザー以外の光の影響をできるだけ排除した点

があげられる。CCD カメラは artray 社の ARTCAM-200SH (有効画素数 1630×1230) を用いた。 レーザーは波長 635nm の半導体レーザーを用いた。レーザーの発振波長近傍の光のみをカメラに 入力するため、光フィルタ (朝日分光製 MZ0660) をカメラハウジングに取り付けて撮影を行った。

3.2 測定結果

(1) 測定可能な時間帯について

光バンドパスフィルタをカメラの前に入れることで、5mの高さに設置しても測定は可能となった。肉眼では薄くしかレーザーが見えない状況でも測定可能であり、夕方から明け方までの道路交通上の危険度が増す時間帯では十分に使用可能であると言うことができる。しかし、昼間の晴天時(全天照度測定 65,000lux 程度)では周囲の光強度が大きすぎ、光フィルタを入れてもほとんど測定はできない状況であった。天気の良い昼間にも測定を行うためには、レーザー強度を大きくするとともに、光フィルタを複数枚用いるなどの検討が必要である。

(2) 積雪深測定結果について

レーザーを照射した状態の画像とレーザーを照射しない状態の画像の差分をとり、輝度値の差に

しきい値を設けて画像を二値化した。二値化後の画像に対して最小自乗法によるフィッティングを施し、画像中のレーザーラインの切片を用いて平均積雪深とした。測定結果の一例として、平成20年1月28日~2月5日における本システムによる測定結果(最小自乗法の結果の切片)と市販積雪深計(新潟電機、SDM)による測定結果を比較し、Fig.3に示す。ただし、本システムによる測定結果は、午後7時から午前7時までの間の結果のみ表示した。ほぼ全期間に渡り、測定結果の傾向が一致していることが分かる。

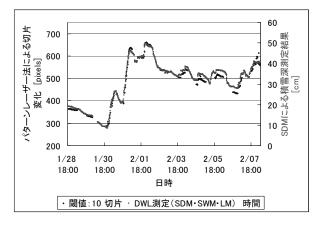


Fig.3 積雪深の測定結果

(3) 雪質測定の可能性について

雪が空気を多く含む場合には雪面上のレーザーラインが太く測定され、雪が硬く圧縮されている場合はレーザーラインが細く測定される。この現象を利用して、雪のやわらかさを測定することを検討した。二値化後の画像上のピクセル位置を(i,j)と表し、同じi の場所にレーザーを表す点が n_i 個あるとする。この n_i 個の点のy 座標の平均値を y_i とし、次のような σ の値を計算した。ここで、 n_x は画像の横幅(pixels)を表す。新雪の状態では σ が大きく、圧雪状態になると σ が小さくなるものと期待した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \overline{y}_i)}$$
 (1)

測定結果を Fig.4 に示す。ここではレーザー照射時の画素値がレーザー非照射時の画素値よりも 10

以上大きい点についてのみ、(1)の σ の計算対象とした。Fig.4 では別に測定した時間降雪強度 (cm/h) と比較して示した。結果を見ると、1/30 以降は時間降雪量が大きい時間帯に σ の値が大きくなっており、新雪状態で σ が大きくなったものと考えられる。しかしながら、1/28 には雪が降っていないにもかかわらず σ の値が大きくなっており、予想と反した結果となっていることが分かる。この原因としては、撮影ごとのカメラの測定結果のばらつきが大きかったことが考えられる。

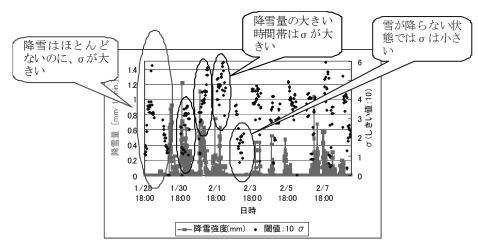


Fig.4 時間降雪量と(1)式から計算された σ の推移の比較

(4) 凹凸測定の可能性について

測定した画像を二値化した後、ハフ変換を施すことで2つの線分を自動抽出することを試みた。 その結果の一例を Fig.5 に示す。深さ、幅を変えて可能性を検討したところ、現在の単純なアルゴ リズムでも、深さが 1cm より大きくかつ幅が 2.5cm より大きいくぼみは検出できた。今後はさら にアルゴリズムを改良し、より浅く、また狭いくぼみも検出できるようにすることが必要である。

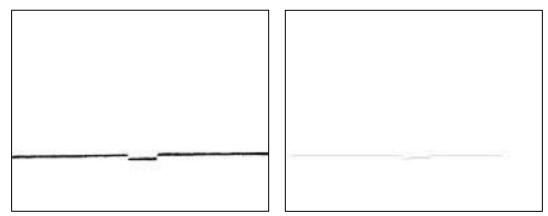


Fig.5 凹凸の自動抽出例(左:測定結果の二値化画像、右:線分抽出結果)

5. まとめと今後の課題

実際に使用する場合と同等の高さ(高さ 5m)に設置しても、平均積雪深が精度よく測定できることが示された。また、雪質測定については測定結果のばらつきが大きかったため、①レーザーの強度を大きくする、②光フィルタの性能を向上させ周囲の光をカットする、③同じ状態で複数枚の測定を行い平均値を取ることでばらつきを小さくする等の検討が必要である。さらに画像処理による自動凹凸測定についても、高さ 5m からの撮影でも可能であることが示された。今後は、1cm 未満の深さのくぼみを抽出できるように、アルゴリズムの改良を行う予定である。

深夜電力利用型で既存太陽光発電システムにも後付けできる 省エネルギー・低コスト融雪機能システムの構築

北海道大学大学院 工学研究科教授 長野克則

キーワード:屋根融雪、太陽光発電システム、融雪制御、省エネルギー、深夜電力、低コスト

1. 研究の背景

積雪地帯では、毎年百人以上の尊い人命が屋根雪に関連する事故のため失われている. 最近 でいえば、平成 17 年~18 年の冬期の大雪により 130 名以上の死者がでているが、その 88%が 屋根の雪おろしによる事故である。さらにおろした雪の処理による事故も生じている。これら の事故において特徴的に問題なのは、特に65歳以上の高齢者の死亡事故の割合が全体の64%と 非常に大きいことである。これは、過疎化や核家族化による老人世帯の増加による社会的な要 因も大きい。すなわち、おそらくは子供の頃から毎年行っている、いわば"慣れた"雪下ろし 作業が加齢により俊敏性や体力の衰えを自覚しないで起こる事故とも言える。また、家族や近 所と共同で行ってきた雪下ろし作業が、単独で行われるようになったことにより滑落や埋没の 発見が遅れることに依ることも大きい。ただし、北海道では近年、住宅の積雪荷重を予想した 構造設計が行われると共に、都市部では無落雪屋根と呼ばれるM型の屋根が普及してきている ことから、屋根から雪をおろす作業はあまり見かけない。このような住宅では、積雪は春まで 屋根に載せたままにしておき、融雪を待つことが一般的である。しかしながら、高齢者が居住 している古い住宅では未だ雪下ろしをしているのを見かけることがある。また、屋根から落雪 して堆積した雪を除去する作業は一般的であり、その際に事故に巻き込まれる事例もある。し たがって、安全・安心を第一優先にするのであれば、屋根雪の処理のためにはある程度のエネ ルギー消費はやむを得ないといえる。新築ばかりではなく、特に既存住宅にも設置できる長寿 命で信頼性が高く屋根を傷めず設置でき、また省エネルギーな屋根融雪装置が求められている.

一方、積雪地帯においては、太陽光発電システムの普及率は全国平均に比べ低いという問題もある。日本は住宅用の太陽光発電システムの普及率は 1.1%強と目に見える数値となっており、これは世界一の値である。ただし、北海道、青森、秋田、山形の積雪地では、日本全国の4分の1以下ぐらいしか普及していない。これは、やはり住民が、雪が降るとか寒いとか、冬

は暗いとかそういうような理由で、元から太陽電池に興味がないか、または、興味があるものの太陽電池を屋根に設置しても期待できる発電量が低いのではないかと思いこみ、そして、一方では設置したいが屋根形状が無落雪屋根の陸屋根形状であり、設置を諦めることによるといえる。ただし、このような積雪地域でも、1キロワットの発電容量(kWp)あたりの年間発電量は、900kWh/kWp 前後であり、全国平均の1000 kWh/kWp 程度と比べて、10%減ぐらいであることが、新エネルギー財団(NEF)による数万件のデータから明らかになっている。

したがって、融雪機能をもつ屋根材一体型の太陽電池モジュールで屋根を葺くなどすれば、 屋根に上り雪下ろしをする必要もなく、また、別途で屋根融雪用のヒーターとか温水パイプを 設置するなどの必要もない。また、屋根融雪用の電力は、自ら発電した電力で賄える。さらに 夏期の余剰発電分は電力会社に売電できるので、正にゼロエミッションとなる。ここで特に注 目すべきは、ガラスの太陽電池モジュールで屋根を葺くことにより、たとえ融雪・滑雪を繰り 返しても屋根材としてペンキなどの塗り替えの必要もなくノーメンテナンスで長寿命の屋根と なり、メンテナンスコストのかからない家となる。正に一石三丁のシステムといえる。このよ うに、積雪地域のニーズに即した、既存屋根にも設置可能な融雪機能を有する屋根材一体型の 太陽電池モジュールと発電・融雪制御システムを組み合わせた商品が開発されて、通常の太陽 光発電システムとそれほど変わらないリーズナブルな価格で市場に投入されれば、大きな需要 が見込めると共に、雪国で暮らす 2000 万人以上の人々の安心や安全、環境を守ることに繋がる。 融雪機能を有する太陽光発電システムについては、既に十年ほど前から石川県工業試験場など 中規模以上の施設に実証試験的に導入されてきたが、住宅規模で設置されて、きちんと評価・ 検証された例は見当たらない、また、従来の実証試験の導入地域は、石川県など比較的温暖な 積雪地であり、北海道のような寒冷な積雪地に適用されて評価された例もない。

2. 本研究の目的

本研究の目的は、一般の住宅用太陽光発電システムを対象に、「深夜電力利用型で既存システムにも後付けできる省エネルギーで低コストな融雪機能システムの構築」を目指すものである。 ここで目指す融雪システムは、温暖で積雪地である北陸地方だけではなく、寒冷で積雪地であ る北海道の住宅の屋根に設置された太陽光発電システムでも十分に機能するものである。今回は、札幌市内に建つ一般住宅の屋根に設置された発電容量が約3kWの屋根材一体型の太陽光発電システムを対象に融雪機能を付加させて実使用下で実証試験を行い、その試験データから安全、安心、機能、経済性から最適な融滑雪制御システムを提案することを目的としている。

3. 過去の研究事例の整理

3. 1 石川県工業試験場の実験棟の例

写真3-1は、石川県工業試験場の屋根の写真である。本システムは、実建物に取り付けられた世界初の融雪機能付き太陽光発電システムとなる。平成10年度から運用が開始された。総発電容量は200kWp(10kWp×20系統)である。そのうち10kWp×6系統が融雪機能を持ち、屋根全体の積雪を制御している。



石川県工業試験場実験棟(南面)



写真3-1 石川県工業試験場実験棟の 融雪機能付太陽光発電システム

3.2 伊藤組木材(株)での実証実験の例

2003 年、2004 年の 2 年間にわたって、経済産業省の地域コンソーシアム事業で行った研究開発事例である。コンソーシアムは、伊藤組(株)、伊藤組木材(株)、ミサワホーム北海道(株)、オムロン(株)、北海道大学(長野)、北海道工業大学(苫米地)、北海道立北方建築総合研究所

の体制で実施された。開発内容は、一辺が約40cm のタイル状の屋根材一体型のガラスの太陽電池モジュールの開発、太陽電池側にも直流電流を流せる双方向パワーコンディショナー、モジュールに電流を流して発熱させ積雪を制御する方法の開発などであった。写真3-2に実証実験施設を示す。結論としては、

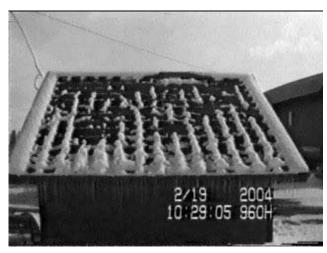


写真3-2 融雪機能付き屋根材一体型 太陽電池モジュールの実証試験

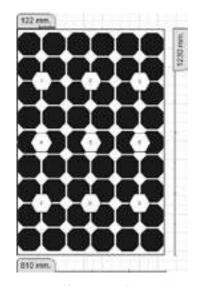
融雪には種々の問題点があってなかなか上手く積雪を制御できなかったことである。例えば、 屋根融雪により、小さなフレームの凹凸に雪が残り積雪が滑り落ちない、軒 に雪が残ってし まう、そして軒先全体に大きな氷柱が形成されることなど、いろいろな課題があった。

4. 一般の太陽電池モジュールの発熱実験

ここでは、予備実験として、まず一般的な市販の太陽電池モジュールを用いて通電を行い発 熱させて、昇温速度と定常状態に達するまでに要する時間、および定常状態でのモジュール表 面の温度分布から発熱の均一性について検討した。

4. 1 実験概要

実験には、シャープ製のガラス封入型単結晶シリコン太陽電池モジュールを用いた。図4-1に使用したモジュールの外観を示す。大きさは H1230×W810 であり、5 インチの単結晶シリコン太陽電池セルが、縦9列、横6列、計54枚が強化ガラスとテフロンシートの間に封入されている。



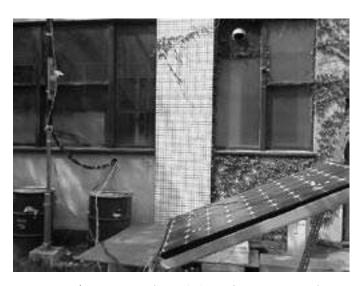
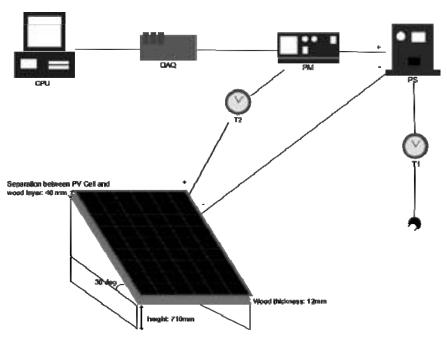


図 4-1 使用した太陽電池モジュール 写真 4-1 太陽電池モジュールを 30° に設置 と温度測定点

で、ほぼ真西に向かって設置された。

実験場所は北海道大学工学部環境工学科実験棟の南側で行われた。この場所は、3階の実験棟建物と、2階の実験棟建物が櫛形に配置されているキャビティ空間であり、市街地に比べて風は弱いといえる。



CPU: Computer for storing measured data

DAQ: Data acquisition device, DE500 Measuring Station Yokowaga

PV: Photovoltaic Cell, Mitsubishi MR001

PM: Digital Power Meter, DT210 Yokowaga

PS: Digital current/voltage power source, G605 Takasago Ltd.

T1: Disconnection timer (used to connect the power source to the AC outlet during night hours to power up the PV)

T2: Disconnection timer (used to disconnect the power source from the PV cell during day hours)

図4-2 発熱実験装置系統図

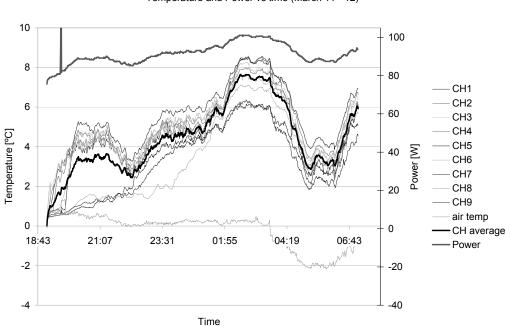
4. 2 実験結果

実験は 2008 年 3 月 11 日から 12 日の夜間の日射が無く発電が行われない時間帯に行った。この期間の外気温度は-1 \circ ± 1 \circ \circ で推移していた。この間の加熱量は 80 \circ \circ \circ \circ 00 \circ \circ

4.2.1 表面温度の時間変化

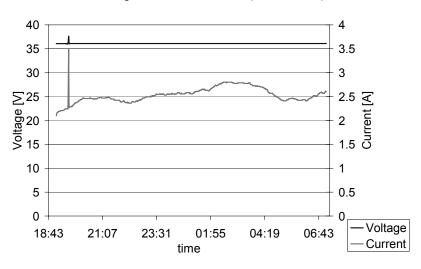
図4-3に発熱開始からモジュール表面温度の温度変化の時間推移を示す。図から、加熱開

始直後からモジュール表面の温度が上昇するが、定常状態に達するまでには約10分を要することがわかった。無駄な発熱を抑える観点からいえば、ON-OFF制御でもガラスの熱容量があるため頻繁なハンチングが起こる心配はないといえる。



Temperature and Power vs time (March 11 - 12)

図4-3 モジュール表面温度、および外気温度、消費電力の時間推移



Voltage and Current vs time (March 11-12)

図4-4 印加電圧、電流、消費電力の時間推移

4. 2. 2 加熱時のモジュール表面の温度分布

図4-5は、加熱開始から8時間半後、モジュール表面温度が十分に定常に達したあとの温度分布である。このときの外気温度は0.3℃であった。図から、電極付近の温度が高く、また電極から遠いモジュール下の左右の温度が低いのがわかる。温度分布は最高8.5℃から最低6.1℃まで分布しており、温度差は最大で2.4℃あった。ここで、裏面温度分布は表面温度より平均で僅か0.2℃程度高いだけであったので省略する。したがって、裏面に温度センサーを貼り付けて表面温度を1℃から4℃に保つためには、裏面温度もほほ、1℃~4℃程度を維持するように制御すればよいことがわかる。

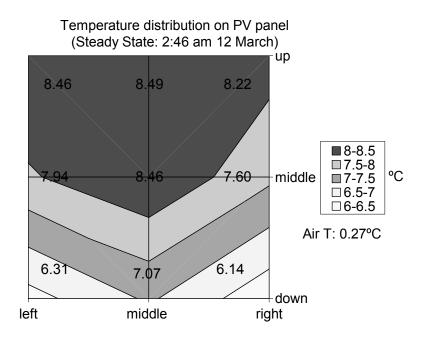


図4-5 定常状態に達した加熱開始から100分後のモジュール表面の温度分布

4.3 発熱実験のまとめ

- (1) 定常状態に達するまでには加熱開始から約10分を要する。
- (2) 加熱時の温度分布は最大で2.4℃程度生ずる。加熱開始時の温度差は非常に大きい。
- (3) 裏面平均温度は表面平均温度よりも平均で 0.2 $^{\circ}$ 程度高い。このことから、裏面に設置した温度センサーで発熱制御させる場合には、裏面温度が 1 $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ になるように制御するのがよい。

5. 実証試験

5. 1 実証試験太陽光発電システムの概要

(1)屋根形状と太陽電池モジュール

実証試験の対象は、札幌市内に建つ一般住宅の屋根に設置された発電容量が 2.94 kWp の屋根 材一体型の太陽光発電システムである。図 5-1 にその住宅の西立面図と南立面図を、図 5-2 に屋根の南面に設置した太陽電池モジュールの平面図を示す。示す。また、写真 5-1 に屋根に設置してある太陽電池モジュールの様子を示す。表 5-1 には太陽電池モジュールの仕様を示した。本太陽電池モジュールの取り付け時の大きさは、 $1600\times 1600\times 1$

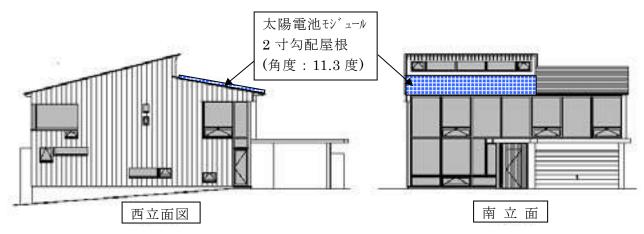


図5-1 太陽電池モジュールが設置された住宅の西立面図、および南立面図

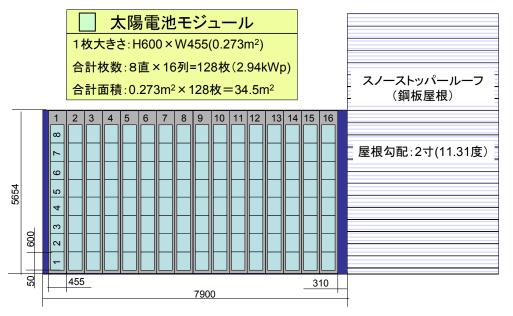


図5-2 南屋根面の平面図 (太陽電池モジュールとスノーストッパールーフ)



写真5-1 南屋根面上の太陽電池モジュール(左側)とスノーストッパールーフ(右側)

表5-1 使用した屋根一体型太陽電池モジュールの仕様

- 組み込み時の1枚の大きさ:H600×W455×D26
- 1枚の重量:3kg
- ・ 使用セル:5インチ多結晶シリコンセル
- 封入方法:強化ガラス・テフロンシート内にEVA樹脂による真空ラミネート封入、アルミニウムフレーム後付
- 封入セル枚数:4段×3列=12枚
- 公称最大出力:27W
- 開放最大電圧: 7.2V
- 公称最大動作電圧:5.94V
- 公称最大電流:4.55A

本住宅の南側屋根の勾配は2寸(約11.3度)であり、緩い勾配となっている。一般にトタン屋根の場合には、傾斜角度が30°以上あれば、屋根面に降った雪は、ある程度堆積したあと気温が高くなれば自重で自然落雪するといわれている。しかしながら、表面が親水性の高いガラスで氷の付着力が高く、かつ板厚2mm程度のアルミニウムのフレームがガラス面から高くなって取り付けられている場合には30°程度の勾配の屋根でも自然落雪しない結果が、我々が11年前に建設したローエネルギー実験住宅の屋根に設置した太陽電池モジュール面の積雪を観察した結果からわかっている。したがって、今回のような傾斜角度11.3°でガラス表面と積雪界面を加熱した場合、滑雪するか、または滑雪しないのか、という把握も今回の実証試験の検証の一つである。

(2) 太陽光発電システムの電気系統と融雪実験装置の概要

図 5 - 3 の上側に示すように、この住宅この太陽光発電システムは電力会社での許可を受けて、発電した電力はパワーコンディショナーを介して交流に変換されて、宅内で使用されるか、 余剰電力は電力会社側に逆潮流 (売電) されるようになっている。その場合の電力は交流 200V (3 線式) である。

一方、図5-3の下部分は、今回、新たに設置した融雪用電力供給システム系統である。今回用いた融雪用電力供給装置は MSK 社製の AC100V 使用の融雪電源 (AC-DC 変換器) である。

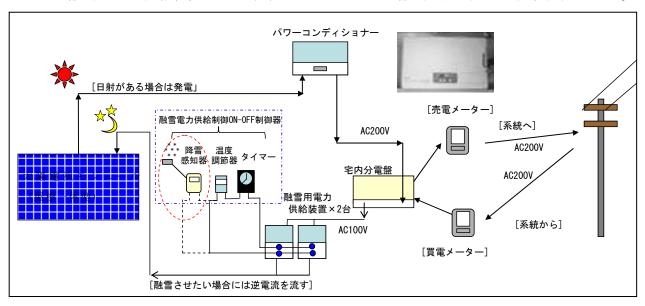


図5-3 太陽光発電システムの融雪機能実証試験系統図

表5-2に仕様を、写真5-2に外観を示す。現時点で、一般でも入手できる太陽光発電システム用の融雪電源は本機種のみである。本装置が供給する直流電源の電圧は 140V、電流は「強」モードで 4A であるので、融雪出力は 640W 程度となる。これを2台(計 1.28kW 分)設置した。ただし、消費電力は、交流から直流の変換効率が 80%程度ということなので、おおよそ 1.6kW となる。この場合、太陽電池モジュールの単位面積当たりの平均発熱量は 1.28 kW/34.5 m^2 =37.1 W/ m^2 となる。ただし、 $1m^2$ あたり 37W 程度の発熱では、気温が低い場合にはガラスと積雪界面が 0 ∞ 以上に保てないことも考えられる。したがって、本融雪用電力供給装置では、表 5-2 中に説明してあるように、受け持ちのエリアを $1\sim 4$ 分割して、それぞれのゾーンを 30 分~4 時間毎に順番に加熱するよう、切り替えられるようになっている。今回は、受け持ちエリアを 2 分割して、30 分毎に発熱を切り替える条件で融雪運転をした。この場合、ゾーン毎の発熱量は仕様書通りの発熱が得られるとすると、37.1 W/ m^2 × $(1/3)^{-1}$ =111 W/ m^2 となる。ただし、各々のゾーンは 30 分毎に発熱と停止を繰り返すので、加熱終了後から次の加熱開始までに融解した界面が再凍結することも予想される。したがって、本方式は気温がそれほど低くはならないが多雪な地域、すなわち東北以南、および上信越地方では有効であると考える。今回、この方式が北海道のような寒冷積雪地でも有効であるかどうかも実験から検証できる。

表 5-2 融雪用電源の仕様

- 製造会社: MSK社製
- 型式:OMR-2AT
- 本体大きさ:H300×W210×D120
- 融雪用定格入力電圧: AC100V
- 融雪用定格出力電圧: DC140V
- AC-DC変換効率:80%以上
- 出力切り替えスイッチ:強(DC4A),弱(DC3A),切
- 外部制御:無電圧接点入力により、入・切制御可能
- 融雪動作回路分割数の選択:1回路、2回路、 3回路、4回路のいずれか
- 融雪動作周期の選択:30分毎、1時間毎、2時間毎、 3時間毎、4時間毎のいずれか



写真 5-2 壁に取り付けられた 融雪電源 (OMR-2AT×2 台)

さて、今回の実証試験では、夜間の低廉な深夜電力(本電力契約の場合、深夜電力時間帯は、 夜10時から翌朝の8時までの10時間となる)を用いて屋根雪の制御を試みる。また、過度の 通電を防止することも考えた。そこで、融雪の制御は、まずは、次の2つの制御要素を試みた。

- (1) 時間:タイマーを用いて、夜8時から翌朝8時までの10時間だけの運転
- (2)過熱防止:モジュール裏面に温度センサーを取り付け、温度調節器により、モジュール裏面温度が4℃以上になった場合、通電をストップする

ただし、上記の2要素の制御では、モジュール面に積雪がない場合にでも通電を行うことになり、無駄である。そこで、次のステップとしては、上記の2要素に加え、降雪があった場合にのみ融雪運転を稼働させるために、下記の降雪感知器を組み合わせて試験する予定である。

(3) 降雪感知器:降雪センサー+制御ボックス、制御ボックスには、遅延タイマーも入っており、降雪感知終了後も数分から数時間にわたり ON 信号を出すように調節できる。

5.2 実証試験結果

融雪実験は2008年2月9日から行なった。2008年2月9日から2月20日までの融雪実験期間の、外気温、太陽電池モジュール裏面温度、および融雪電源消費電力量、冠雪率の時間変化を図5-4に示す。

(1) 太陽電池モジュール表面の人為的露出による初期条件の設定、実験のリスタート

2月9日の夜から 10日の朝まで 10 時間加熱を行なったが滑雪は全く見られなかった。そこで、融雪実験を初期条件から開始するために、写真 5-3-1 [1]に示す様に 2月 10日の 12時から 13 時にかけて人為的に屋根の雪を一度全て落としてから、その夜から実験を再開した。ただし、2月 10日から 11日昼過ぎまでは、晴天だったため融雪のための加熱は行わなかった。

(2) 2月11日夜~2月20日まで

2月 11 日夜から 20 日まで、タイマー(夜 10 時から朝 8 時まで 0N)と温度調節器(太陽電池モジュール裏面温度が 1 \mathbb{C} で 0N、4 \mathbb{C} で 0FF)を用いて、毎日夜間 10 時間だけ通電し発熱させて加温を行った。写真 3-5-1 [3]にあるように、2月 11日の 17 時頃から 12日の午前 1時頃までうっすらと降雪があった。降水量換算では 0.5mm 程度である。この間の外気温度は 0 \mathbb{C}

~-1℃と比較的高かった。写真から、発熱による融雪は効果的に働いており、12 日午前 1 時の画像からは、降雪があったのにも関わらず表面の 1/3 が露出しているのがわかる。

しかし、写真3-5-2[9]にあるように、12日の2時頃から早朝にかけて強い降雪があり、 通電しているにも関わらず積雪となり、朝8時を迎え通電はストップした。その後、毎夜、通 電、融雪を行っているにも関わらず、屋根面の雪は堆積したままで、18日までは一切、露出す ることも、滑雪することもなかった。

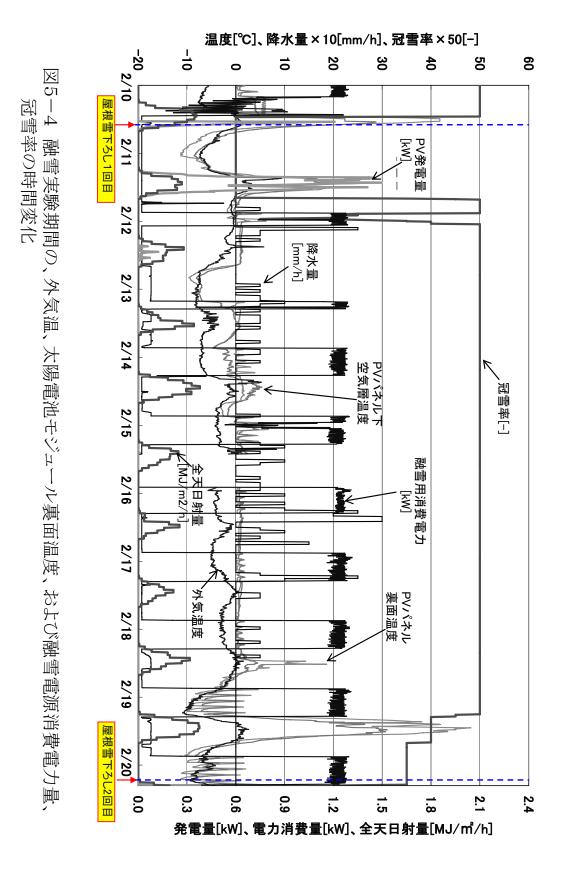
ただし、2月 18 日午後以降から降雪がなく、また 19 日の日中のように外気温度がプラスになり、強い日射がある場合には、設置してあるモジュール群の上側から一部露出し始めてた。 19 日の日中には丁度、モジュール裏面に設置した温度センサーの部位まで露出したため、裏面温度が 40℃まで上昇しているのがわかる。最終的には上部の大部分が露出して、冠雪率は 0.7 程度まで低減した。これより、積雪がなくなり、一部でも表面が露出していれば、日中の日射により融雪が大いに進み、冠雪率の低下が急激に進むことがわかる。ただし、今回はモジュール面の積雪の滑雪は全く起こらなかった。また、19 日の夜間には気温が-8℃まで低下したため、夜間の加熱があっても冠雪率の減少は見られなかった。

(3) 軒先の氷柱の形成

毎夜、融雪運転を行っているにも関わらず全面融雪、ないしは滑雪・落雪が生じないために、 融解水が軒先から連続的にしたたり落ちる。このとき、気温は氷点下であるので、軒先にはび っしりと氷柱が形成される。そして、それは日を追う毎に成長するという問題が生じた。

写真5-4-1~3に、2008年2月16日13:30における屋根一体型太陽電池モジュール表面への積雪状態、および軒先に形成された氷柱の状態を示す。軒先の積雪地用の樋(樋本体の上に滑雪した雪が巻き込まない様に雨だれ受け上の一部に曲面状の鉄板の覆いが被っている)の上から横一列全面にわたって鮫の歯の様な氷柱が形成されているのがわかる。長いものでは50cm以上あった。下部に人が通ることがある場所であれば、非常に危険である。このことから、融雪・滑雪を一気に起こさせなければ、氷柱が形成されて大変危険な状態に陥ることが本実証実験からも改めて認識させられた。また、2月20日に再度屋根上に登り、積雪状態を観察し結果、軒先の金属部分や先端部のモジュールガラス面に氷となった雪が凍り付いて付着しており、

これがダムの様に上部の雪を塞き止めていた。氷着力はかなり強く軒先の金属部分を加熱しない限り、自然落下は期待できない。一方、写真 5-4-1 からわかるように、太陽電池モジュール設置の右側のスノーストッパールーフ上に堆積した雪と、太陽電池モジュール上の雪が、図 5-5 に模示すように一体となっており、ある程度解けた状態での滑雪は全く期待できない。





[1] 2008.2.10 14:24 表面人為的露出から開始



[2] 2008.2.11 16:26 表面露出維持



[3] 2008.2.11 17:01 表面に薄い積雪



[4] 2008.2.11 18:30 表面に薄い積雪が続く



[5] 2008.2.11 22:48 融雪開始後 48 分, 2/3 露出



[6] 2008.2.11 23:19 全体的に露出



[7] 2008.2.12 00:48 1/3 だけ露出



[8] 2008.2.12 01:05 1/3 だけ露出は変わらず

写真 5-3-1 2008.2.10~2008.2.12 の太陽電池モジュール面の状態変化



[9] 2008.2.12 02:01 降雪激しく全面冠雪



[11] 2008.2.12 07:00 全面冠雪状態



[13] 2008.2.19 08:01 上部の 15%程度露出



[15] 2008.2.20 07:42 上部の 30%程度露出



[10] 2008.2.12 04:01 全面冠雪状態



[12] 2008.2.13 10:00 全面冠雪状態が続く



[14] 2008.2.19 17:00 上部の 30%程度露出



[16] 2008.2.20 07:58 屋根面人為的除雪開始

写真 5-3-2 2008.2.12~2008.2.20 の太陽電池モジュール表面の状態変化



写真5-4-1 屋根一体型太陽電池モジュール表面への積雪状態

(2008.2.16 13:30) (夜間の通電により融解水がしたたり落ちると、軒先の積雪地用の 樋の先に横一列に鮫の歯の様な氷柱を形成。また、モジュール上の積雪がスノースト ッパー部上の深い積雪と一体となっており、一層滑雪を阻害しているのがわかる)



写真5-4-2 軒先の状態 (氷柱が樋の先から成長、樋上にも積雪があるのがわかる) (2008.2.16 13:30)



写真 5-4-3 室内から見た軒先の氷柱 (鮫の歯の様にびっしりと氷柱が成長している) (2008.2.16 13:30)

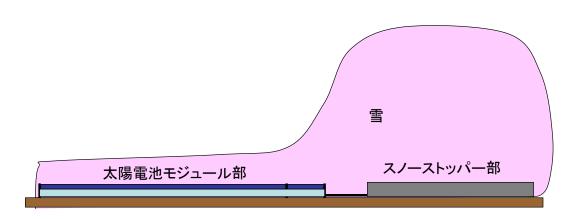


図5-5 屋根面上の積雪状態の模式図

6. まとめ

本実験から以下のことがわかった。

- (1) 加熱開始から十分に温度が上昇して定常状態に達するまでの時間は約 10 分を要する。したがって、30 分程度で加熱部位を切り替えて使用するのはあまり望ましくないことといえる。また、加熱開始の立ち上がり時にはモジュール上下の温度差が大いので、できるだけ連続加熱が望ましいこともわかった。
- (2) 融雪、滑雪はできるだけハイパワーで一気に融かして滑り落とすのが理想であると考える。また、できるだけ気温が高く、そして日射のアシストも受けられる日中の加温が望ましいといえる。しかし、連続して印加できる電力は 1m² あたり 130W 程度が限界である。またハイパワーにすればするほど、電気料金に占める基本料金の割合が大きくなる。また、昼間の1kWh あたり 25 円程度の電力を用いて融雪を連続的に行うのはコスト的にはかなり高くなる。
- (3) 結局のところ、日中でも低廉な電力を使用できる融雪電力を用いる融雪システムが一番望ましい形態ではないかと考える。ただし、既存システムに後付する場合は、別途、融雪電力契約用の電気メーターを取り付けるなどの電気工事も発生する。また、融雪電力は接続可能機器が AC200V 入力に限られるが、今回用いた機種の入力電圧は AC100V であるため、元来、融雪電力の使用はできない。今後 AC200V 入力の融雪電源の開発が待たれる。
- (5) したがって、現時点ではよりハイパワーでとにかく、滑雪、または融雪しきるまで連続的に加熱する方法が安全上からは一番で確実な融雪方法であるといえる。
- (6) 加熱して滑雪を期待する場合には、発熱密度に加えて、当然ながら屋根勾配が一番重要なファクターとなる。また、軒先の施工方法に気を配り、必要に応じて軒先部分だけに別なヒーターを入れておくなどの処置が必要となるであろう。同時に、滑雪がスムーズに行く様にモジュールのガラス面とフレーム面の段差をできるだけ小さいものを使用することは大変重要である。加えて、今回の様な雪が吹き溜まるスノーストッパー屋根と滑雪・融雪を期待する屋根を混在させるのは、全く望ましくないことも実証された。
- (7) 今後は、まずは、入力電圧が AC200V とした融雪電源、段差のないモジュール、軒先の収ま りの工夫、適用可地域や屋根勾配、形状を明確にする取り組みが必要である。

メインテナンスフリーな落雪氷事故防止のための冠雪・雪庇の研究

技術士事務所 雪氷防災 代表 竹内 政夫

キーワード: 冠雪、雪庇、落石氷事故防止工法、クリープ、グライド

研究目的

道路や鉄道のアーチやトラス橋梁等の上弦材、覆道の出入り口およびトンネ ル坑口、道路情報板等、ビル・家屋の屋根等から雪庇や冠雪が落下し通行車両 等に損傷を与える落雪事故が発生している。これら構造物からの落雪は車両の 損傷に止まらず交通事故を誘発し、衝撃の大きさから重大な人身事故を引き起 こす可能性もあり対策が必要である。例えば、橋梁ではヒーテング工法や塗装 等による滑落促進工法等の対策が行われてきた。雪を融かす前者は、信頼性は 高いが部分的に熱むらによるツララの発生が報告されている。後者は撥水性や 親水性を高めて危険の無いように少量で滑落させることを唱っているが、疎水 性や親水性の機能による滑落促進には水の存在が欠かせないため凍結した場合 の問題は解決されていない、そのため、施工後も年数回の人力による除雪が行 われているケースが多い。また、ヒーテングはランニングコストを必要とし、 塗装工法は4、5年毎に塗り替えが必要とされている。このようにこれまでの 工法では、メイナンスが必要な割には、十分な効果を果たせていないように思 われる。これからの落雪対策には出来るだけメインテナンスを要しない工法に する必要がある。この研究では、メインテナンスフリーな落雪防止工法開発を 可能にするために必要な諸条件について実験的に検討し、野外模型実験によっ て検証した。ここで述べる、メインテナンスフリーな落雪氷事故防止対策の条 件とは、人力作業や人工のエネルギーは使用しないで、1)危険な雪氷を形成 させない、或いは2)落下させないことである。

研究項目

以下の4項目について実験を行った。4項目目は雪センターTC ワーキングで適切な雪崩柵の柵高が議論されていることと、現地から雪崩柵の雪庇防止のために柵高を高くしたいという要望が多くなっていることから、当初は計画していなかったが、現地観測を行った。

I. 冠雪から成長する雪庇の観察と冠雪・雪庇の落下

構造物上では冠雪から雪庇ができ大きくなる。落雪は偏荷重によって底面から剥離または滑りによって起こる。比較的狭い部材を対象にした冠雪・雪庇の実験を行い、剥離によって落雪するまでを観察した。

Ⅱ. 冠雪からの雪庇成長抑止と落下防止実験

I と同様に狭い部材を対象にした冠雪の△(三角)格子フェンスによる落 雪防止実験を行いその効果を検証した。

Ⅲ. 平屋根にできる雪庇防止実験

住宅の平屋根からの雪庇防止のために柵高30cmの格子フェンスで実験し、雪庇の形成と落下防止に効果があることを確認した。

IV. 雪崩柵の柵高と雪庇

雪崩柵を巻き垂れる雪庇の崩落が危険とされてきた。筆者はこれまでの雪 庇の観察から、丈夫で崩落し難い雪庇も多いことも観察している。丈夫で崩 落の危険がない雪庇と崩落する雪庇とを観察しその要因を調べた。

第 I 章 冠雪から成長する雪庇の観察と冠雪・雪庇の落下

1. 落下する雪-冠雪と雪庇-

構造物から落下して被害を与える雪は、冠雪あるいは冠雪から発生する雪庇やツララである。一般に雪庇というと、山岳の稜線の風下側に張り出した着雪と沈降の繰り返しで成長する雪庇を指すが、ここでは物体に積もった冠雪の沈降によって水平方向にはみ出す雪庇を含める。この雪庇は冠雪を大きくし偏過重をもたらし、バランスを失うことによる冠雪の滑落や雪庇破断等、落雪事故の大きな要因の一つになっている。冠雪と雪庇は一体になっているので区別はし難いが2,3の事例を紹介する。

1-1 冠雪

冠雪は、物体の上に降雪が降り積もったものである。冠雪は時間が経つと自重で圧密沈降(クリープ)し、写真1のように頂部はつぶれてキノコの傘のように物体からはみ出す。はみ出した部分が雪庇である。降雪が継続し冠雪が大きくなるとますます雪庇が張り出し、冠雪の断面積はそれを支える物体の数倍になる。この形が冠にみえることから冠雪という。冠雪とそれを支える物体との間には低温下では降雪直後など付着力は働かない場合もあるが、濡れ雪では水の表面張力が、その水が凍結すると凍着力としだいに強い付着力になる。一般に、重力方向には冠雪を支える物体があるので、そのままでは落下しないが勾配のあるアーチやトラス等橋梁の上弦材、道路標識や交通信号などでは滑り落ちることや融け水が再凍結してできたツララが落下することがある。



写真1 電柱上の冠雪

写真2は道路標識の冠雪であるが、標識面を覆う雪は冠雪からはみ出し重力で下に引っ張られて伸びた雪庇である。これらの例のように冠雪と雪庇は一体になっていることが多い。



写真2 道路標識板の冠雪(230号中山峠)

1-2 雪庇

上で述べたように冠雪と雪庇は一体化している例が多いが、それらの中でも 雪庇が比較的明確な例を紹介する。写真3はアーチ橋の橋門構に積もった冠雪 から張り出した雪庇であるが、写真向かって右の一部を残して破断し落雪した 跡である。このような橋梁からの落雪は雪の底面が氷板化することが多く、大 きな塊のまま落下するので極めて危険である。写真3のように底面から張り出すのはグライドも働いていることを示している。



写真3 橋門構から張り出した雪庇と破断面

2. 冠雪から発生する雪庇の発達と落雪 (一野外実験一)

冠雪を大きくするのは雪庇であることから、雪庇の発生・発達から落下までの過程の実験観察を札幌市西区で行った。2007-2008年の札幌の気象は降雪量が平年に比べて67%と極端に少なかった、特に12月1日から1月15日までの間は平年に比べて45%と少なかったが、1月15日~2月中は平年並みのまとまった降雪があった。3月にはいると記録的な寡雪の年となり、冬期間を通しての降雪量の合計では423cmで平年の630cmの67%であった。実験は1月17日からの降雪と平年と比べるとやや少ないものの何度かのまとまった2月の降雪で行われた。

2-1 冠雪からの雪庇成長過程の観察

冠雪および雪庇の発生から発達し落雪するまでの過程を時系列的に観察することによって発生機構・要因と落雪条件を明らかにする。特に、雪庇の発生・発達の主たる要因となるクリープに着目して成長過程を明らかにするのを目的に実験観測を行った。

2-3 実験方法

冠雪、雪庇の観測のために、写真4のように、長さ1.8mで幅24cm、36cmの2枚の板材を水平に設置して観測した。ここでの報告は主として幅36cm板の結果について述べる。

2-4 冠雪および雪庇の成長

写真 4 は実験状況を示すが、写真の左端が 3 6 c m板で右端が 2 4 c m板である。塩ビパイプの冠雪実験を併せて行っているが、この報告では述べない。ここでは平成 2 0 年 1 月 1 7 日から始まった冠雪を、時間を追って雪庇の発生発達から冠雪の落下までの観察結果について述べる。この実験で板の中心部に後で雪庇対策実験に使用した 4 x 4 c m の太さ 3 m の格子フェンス(ステンレスのメッシュ)を張ってメッシュの間から雪がはみ出して雪庇に成長するか否かをも併せて観察した。



写真4 実験状況 (2008年1月17日 午前)



写真5 幅36cm板上の冠雪(1月17日 夜)

初期の冠雪の側面は写真 5 のように、ほぼ垂直で頂部で丸みを帯びた形になった。 1 8 日夜から 1 9 日にかけての降雪で写真 6 のように格子フェンスを大きく超えた冠雪から写真 7 のように特に東側(左)で雪庇が張り出し大きくなる。 1 7 日までの降雪の上に積もった 1 8 日からの降雪が雪庇となって張り出

している。

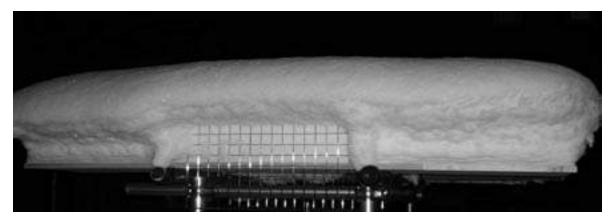


写真6 雪庇ができ始めた東側からの冠雪(1月19日36板) 積雪13cm



写真7 雪庇の発生、東側(左)の張り出し大きい(1月19日)

積雪が重力によって沈降するときに水平方向に張り出すのが雪庇であるが、 写真の場合は西側と比べて東側へ大きく張り出している。北西風が多いことの 影響も考えられる。しかし、後で述べる別の実験では片方に偏せず両側に雪庇 が張り出している。風向風速の影響については今後の課題とする。



写真8 雪庇の垂れ下がり(1月23日)

写真7で張り出した雪庇は、降雪が無く、写真8のように垂れ下がった。その後24日から26日にかけて約25cmの降雪あり、その雪が写真9のよう新たな雪庇になった。最初の雪庇は落下することなく殆ど消失している。





写真9 2段目の雪庇と最初の雪庇の消失(左は1月31日、右は2月5日)

正面からみると写真10のように、1段目の雪庇の上に2段目の雪庇が被さっているのが分かる。格子フェンスの影響で中央部は雪庇の発達は小さくなっている。

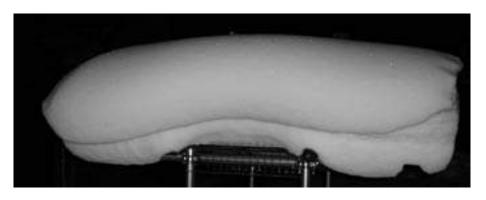


写真10 正面からみた冠雪(1月30日)

以上のように、雪庇は冠雪がバランスを失って傾いた方向に発達し、大雪の度 に新たな雪庇が発生しているのが分かった。最初の雪庇は破断しないで縮小し て消えている。

2-5 雪庇の落雪・消失

写真3でグライドによって大きくなった雪庇が破断した例を述べたが、クリープによって成長する雪庇の実験では、雪庇が破断して落雪するのは観察されていない。雪庇は表面から小さい破片となって落下したか、或いは昇華・蒸発の熱の作用で小さくなって消えたようである。熱作用の大きい融雪期には雪庇表面から最中の皮のような小さなフレイク状の破片になって消耗したのが観察されている。雪庇の落雪・消失については冬期閉鎖中の公園施設の平屋根で観察された雪庇の落雪について述べる。



写真11 冬期閉鎖の平屋根雪(公園施設)にできた雪庇(3/2)

写真11は北西風の影響で南東側に張り出した雪庇である。雪庇は安定して破断することなく融雪期に入った。融雪期にはいると南東向きの雪庇の表面に



写真12 雪庇にできた多数の小さいツララ (3/4)

無数の小さいツララができ日射の強い昼には落下しているのが観られた。



写真13 雪庇の落雪と消耗 (3/18)

屋根の外にはみ出した雪庇は日射が強くなると、スカスカなので密度は小さいがと考えられるが小さい塊や破片となって落下した。このようにはみ出しが大きければ塊になって落下する。山の稜線の風によってあるいはグライドによって大きくはみ出す場合は別であるが、水平屋根のようなクリープによってできる雪庇は、考えていたより、安定しているようである。

2-6 冠雪・雪庇の落雪

実験では雪庇が破断して落雪することは観察されなかったが、雪庇を含めて冠雪全体が一体になって底面から剥離あるいは滑落によって落雪した。



写真12 底面からの剥離(24 c m板、1/27)

写真12は落雪直前に底面が剥離しめくりあがっているところである。はみ出た雪庇が大きくなるとともに偏荷重も大きくなるために、写真のような剥離や滑落によって落雪する。偏荷重は幅の狭い部材の方が大きくなりやすいので剥離も早く発生した(写真は24cm幅の板)。36cm幅の板では剥離ではなく、2月9日の気温が+2.3℃に上がった昼に滑落によって落雪した。



写真13 落雪直前(2/9)

写真13は落雪直前の状態で、このようにバランスが悪くなりさらに融雪によって凍着力が0になって付着力が極端に低下し落雪したものである。



写真14 落雪した冠雪の真っ平滑なスベリ面

落雪した冠雪のすべり面(上向き)が平面であることが滑落したことを表している。

3. まとめ(I章の)

クリープによって発生する雪庇の幾つかを実験的に観察し、その結果を以下のようにまとめた。ここでは、グライドや風の作用の大きい雪庇は議論の対象としない。

- 1) 雪庇は冠雪のクリープ (グライド) や大量に積もった雪が偏荷重によってバランスを崩すことによって発生する
- 2) 雪庇は大雪の度に発生し幾重にも重なる
- 3) 水平板や平屋根から発生した雪庇は安定して容易には破断しない
- 4) 部材からはみ出す雪庇は密度が小さく (0.07~0.09)、時間経過にとも なって縮小消耗する
- 5) 雪庇の縮小は熱的な作用で表面から起こる
- 6) 融雪期の強い日射によって雪庇内部は融解し空隙が大きくなる
- 7) 雪庇は融雪期に表面から小さい破片、小さいツララとなって崩落した
- 8) 冠雪の落雪は、狭い部材では底面から剥離によって発生し、広いと融解によって底面から滑落する
- 9) 底面からの剥離や滑落は大きな塊としての落雪になるので危険である

Ⅱ. 冠雪からの雪庇成長抑止と落雪防止実験

I章の雪庇観察から、圧密過程を経ない密度の小さい(0.07~0.09g/m3)、雪庇の巻き垂れ部分は破断しても空中で細かく砕けるため落下しても危険は小さいと考えられる。もし、このような雪庇のように密度の小さい雪を少しずつ落下させることができれば冠雪が大きくなるのを防ぐことが出来る。また合わせて、橋梁の橋門構のように幅の広い部材の落雪防止に効果のあった格子フェンスを橋梁やその他の狭い鉄鋼部材に応用できるかを確認するために、落雪促進による雪庇成長抑止と落雪防止実験を行った。落雪防止のために最も重要なのは、表面からではなく底面からの剥離や滑りを防ぐことであると考えて以下の実験を行った。

1. 実験方法

部材上の冠雪を減少させ、滑落・剥離させないために、長さ180 cm、幅36 cm、24 cm、12 cm03つの部材に頂角がそれぞれ 80° 、 60° 、 50° 0三角格子フェンス(以下△格子フェンスという)のカバーを取り付けた。頂角が落下二度のような影響を及ぼすかを見るために、頂角を少し変えてある。 \triangle フェンスカバー設置部分は110 cm、残りはカバーのない部分として、フェンスの効果を比較できるようにした。実験状況を写真15 cmす。



写真 2-1 左から、部材幅: 24 cm (60°)、12 cm (50°)、36 cm (80°)、(内は頂角)、 \triangle フェンスでカバーした部分は手前(2月16日)

部材の幅についても、部材の狭い方が剥離しやすいことが分かったことから、 3種類にして違いを観察した。

2. 冠雪の成長と△格子フェンスの冠雪減少効果



写真 2-2 実験部材上の冠雪状況 (2月20日)

2月16-17日に 20cm 強の降雪があり写真 2-1 のように冠雪したが、その後 20 日までは気温は低く降雪はないまま経過した。冠雪は写真 2-2 のように \triangle 格子フェンスの側面の一部は既に露出して無く、 \triangle 格子フェンスの頂部に残っている程度になっている。 2 月 2 2 日には写真 2-3 のように、幅 1 2 c m板の冠雪は日中の最高気温+2.7°の気温で融解してしまっている。その後も降雪は 3 0 c m超を含み 2 , 3 度あったが、いずれも、 \triangle 格子フェンスの上の冠雪は大きな塊になって落雪することもなく消滅した。前章で述べたように、雪庇が熱的に消滅するように \triangle 格子フェンスの上の冠雪も消滅したものと考えられる。少なくても雪の上に目視できるような穴が開くような大きな塊の落雪痕跡は観られなかった。

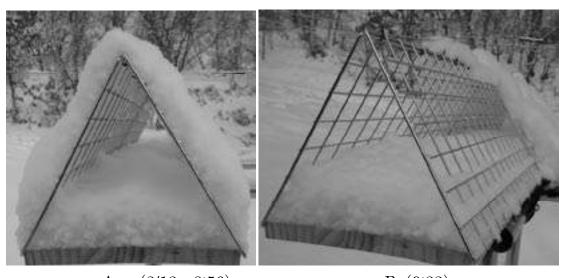


写真 2-3 早期に消滅する△格子フェンス上の雪(2月22日)

2-1. △格子フェンスの上の冠雪

△格子フェンスは格子間隔が大きいので容易には雪が載らないように思われるが、写真 2-4 A のように雪片状に降る雪は乾雪でも湿雪でも、降雪の何割かは格子の上にも積もる。格子の上に積もった雪は格子との間の付着力が小さい

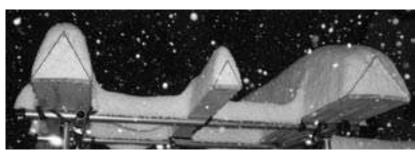
ので風が吹くと B のように簡単に吹き払われる。このことだけでも△格子フェンスは部材に積もる冠雪量を減少させていることが分かる。



A (2/12, 8:56)

B (9:22)

写真 2-4 格子の上の冠雪は A から30分もしない間に手前半分は吹き落とされている。後ろは部材上の冠雪との間の結合力が働いて残っている



A(2/23)



B(2/28)

写真 2-5 冠雪と雪庇の成長(2月28日)

2, 3回のまとまった降雪によって冠雪は大きくなり、28日には12cm板

の△フェンスからは垂れ下がった雪庇もみられる。この写真からも雪庇は狭い 部材ほど発達することが分かる。



A (12cm 板) B (36cm 板) 写真 2-6 △格子フェンス上の冠雪・雪庇(2月29日 朝)

頂角 50° と最も鋭角にしてある $12 \mathrm{cm}$ 板の \triangle 格子フェンス上の雪庇がフェンス表面から剥離しているのが観られた(写真 2- $6\mathrm{A}$)。頂角が小さく幅が狭いため偏荷重による外向きの力が最も大きく、さらに内部の雪との間はフェンスで隔てられているために結合力が0に近い。このために、狭い部材ほど大きくなる雪庇の偏荷重に引っ張られて剥がれたものと考えられる。幅の広い B は頂角も大きく、この段階でも最終的にも幅 $36\mathrm{cm}$ 板の \triangle 格子フェンスには雪庇が形成されていない。 A の雪庇はこの日の日中最高気温が $+6^\circ$ を超えて写真 2-7 で示すように落下したが、 B のフェンスの上の冠雪は頂部に少しであるが残っている。尚、フェンスを外れた部材上の冠雪は $12\mathrm{cm}$ 板を除いて残っている。24 や $36\mathrm{cm}$ 板では写真 2-80 のように冠雪から大きいツララが伸びている。



写真 2-7 融解による冠雪の消耗・消滅 (2月29日 夜)



写真 2-8 24 c m板上の冠雪から伸びたツララ (2月29日夜)

格子上の冠雪は写真 2-9 のように小さくなり二日後の 3 月 7 日には消滅したが 部材上の冠雪は 3 月 9 日まで残り一塊となって滑落した。写真 2-10 は落雪直前の 36 c m板上の冠雪である。



写真 2-9 26 c m板上の冠雪とツララ (3月5日)



写真 2-10 落雪直前の36cm板上の冠雪(3月8日)

3. 格子フェンスの落雪防止効果

橋梁等の部材からの落雪防止において重要なのは、冠雪しないようにすることであるが、全天候で可能にするためには熱ムラのないようにヒーテングする以外は非常に難しい。次に考えられるのは、次の2点、特に2. が重要であると考えられる

0

- 1. 冠雪を少なくする
- 2. 部材の底面から落雪を防ぐ
- 1. については前節で述べたように、フェンス表面に積もった密度の小さい雪の風による吹き払いや熱的な消失が観られ、冠雪は△格子フェンスのない部分と比べて著しく小さくなった。これは日当たりの良い橋梁などではさらに効果的になると考えられる。
- 2. の落雪防止については、△格子フェンスは底面からの滑りを防ぐのは明らかである。剥離に冠しては、頂角50°と実験では最も鋭角であった△フェンス上の冠雪が剥離しているのが観られた。剥離はフェンス上の密度の小さい雪で落雪しても大きな危険は無いと考えられるが、頂角と剥離の関係は検討課題である。

4. まとめ(Ⅱ章の)

△格子フェンスによる雪庇成長防止と落雪防止実験の結果をまとめる。

- 1. 格子間隔の大きい△格子フェンスであるが降雪の何割かが載る
- 2. △フェンスに載った雪とフェンスとの繋がりは殆ど無く、新雪の段階では風で吹き払われることもあった
- 3. 頂角50°の△格子フェンスに載った雪は剥離し落下するのが観られた
- 4. 頂角50°の△格子フェンスを除くと塊での落雪は観られなかった
- 5. △格子フェンスは狭く小さい部材からの落雪防止に有効である
- 6. 頂角と剥離に関係は今後の検討課題である

その他、格子フェンスを使った、幅10cmの水平桁を想定した雪庇の成長と落雪方向の制御の実験や標識の裏側の支えに載る雪の落雪防止実験も行った。前者については改めて報告したい。後者についてはデータ不足で報告に足る結果までは得られていないが、今後の興味のある課題である。

Ⅲ. 平屋根にできる雪庇防止実験

住宅にできる雪庇による事故も少なくない。格子フェンスの雪庇防止効果を 屋根雪に応用してみた。雪庇が張り出し駐車場に落雪する危険があったため、 毎年人力で除去してきた屋根を対象に実験・観察した。

1. 実験方法

これまでの実験で使用したのと同じステンレスのメッシュを格子フェンスとして、約10 m幅の屋根の半分5 mに、30 c mの高さに設置した。

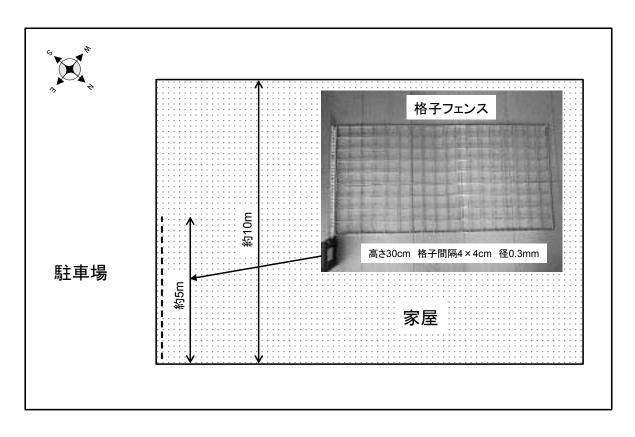


図 3-1 格子フェンス設置平面図

2. 観察結果

2-1 今冬期の札幌の気象と屋根雪の状況

図 1 に札幌の降雪量と積雪深の経過を示す。今冬期は 12 月から 1 月中旬まで雪が少なかったため、屋根雪の雪庇の発達はみられなかった。1 月下旬以降は、1月24日~26日、2月12日~16日などでまとまった降雪があった。全体的には、今冬期の降雪量は 423cm と平年の 630cm を大きく下回ったため、屋根雪の雪庇が庇を越えて垂れ下がるほどの大きな発達はなかった。今冬期において屋根雪が発達した 2008 年 1 月 22 日から 2 月 22 日までの観察結果を写真 3-1

に示す。1月 27日及び 2月 16日 \sim 17日で屋根雪の雪庇が発達している様子がわかる。



図 1 札幌の降雪量と積雪深(2007年12月~2008年3月)



写真 3-1 雪庇状況 (1月22日~2月22日)

2-2 屋根に設置した格子フェンスの効果

降雪が少なかった今冬期の中で、屋根雪の雪庇が最も発達した 2 月 16 日~17 日の事例から格子フェンスの効果をみた。雪は2 月 16 日までに2 月 12 日に11 cm、13 日に10 cm、14 日に2 cm、15 日に10 cm、16 日に21 cm とまとまって降った。

写真 3-2 は 2 月 16 日の雪庇の状況である。写真左は格子フェンスの無い区間だが、雪庇が水平方向に張り出し、庇に垂れ下がっている。写真右は格子フェンスのある区間だが、フェンスの高さを超えた部分で雪庇が水平方向に張り出している。雪庇の形状から、風の影響により形成されたものと考えられる。



写真 3-2 屋根雪の雪庇状況、右フェンス設置、左未設置 (2008 年 2 月 16 日 12:30)

写真 は17日の 16 時頃の雪庇の状況を示す。格子フェンスがある区間ではフェンスの外側の雪が落ちている一方で、フェンスのない区間は雪庇が屋根の庇に張り付いたままである。これは、フェンスのない区間の雪庇は屋根上に積もった雪がクリープすると共に、水平方向に張り出して発達しており、水平方向の雪の結合が強いのに対し、フェンスを設置した区間の雪庇は、フェンスによって屋根上の雪の水平方向へ張り出しが抑止され、フェンスより高い積雪が張り出してフェンス外側に垂れ下がって形成しており、水平方向の雪の結合が弱く、積雪がクリープすると共にフェンスの高さを越えた部分の雪の結合が破断し、フェンスの外側の雪が落ちたと考えられる。



写真 3-3 屋根雪の雪庇状況、フェンス区間(右)ではフェンスより高い部分が破断(2008年2月17日16:00)

- 3. まとめと考察
- 1) 格子フェンスによって雪庇の規模は小さくなる
- 2) 格子フェンスの高さを超えた風の影響を受けた雪庇がフェンスの高さから破断した。雪庇が底面から剥離や滑りで落雪したのでないことと密度の小さい部分の落雪であることから、想定の範囲で、車にダメージを与えるものではなかったが、人間には危険であったとも考えられる。細いフェンスによって沈降した雪が切断されたものとも考えられる。
- 3) フェンスの高さ

実験以前から想定していたことであるが、フェンスで切断されるような 雪庇もフェンスの高さを屋根雪の深さ並みにすることで防止できる。逆 に I、II 章で述べたように雪庇そのものは強いので、フェンスをもっと 低くするという考えもある。今後の検討事項である。

IV. 雪崩柵の柵高と雪庇

雪崩予防柵(以下、雪崩柵)の柵高については、一昨年来雪センターTCワーキングに於いて議論されてきた。一つは全層雪崩対策には積雪深より低い柵のほうが雪の引張支持力が期待でき、柵下からの全層雪崩の発生を防ぐという考え方で、二つ目は柵高が低いと雪庇ができて崩落の危険があるという意見であった。特に、後者は現場技術者から現行の設計容量より柵高を高いものにしたいという要望となっている。非常に重要な事項であることからこの研究助成の中で取り上げた。

1. 柵高と雪庇

- 1-1 雪庇は柵高が低いからできるというのは正しいか?
- 1) 積雪深に近い柵高の雪庇

極端であるが筆者が提案している積雪深より低い柵は雪に埋もれるので、まったく雪庇はできない。写真 4-1 の例でも、柵と柵の間の雪が柵より低くなっており、まだ積雪深より柵高の方が高い。雪庇はできているが柵に接していて大きく垂れはみ出すような形にはなっていない。このような雪庇は第1章 2-5で述べたように堅固で破断することは殆ど無いように考えられる。



写真 4-1 積雪深の大きい雪崩柵の雪庇

2) 積雪深より明らかに高い柵の雪庇

写真 4-2 では、柵間の積雪を観ると明らかに柵高は積雪深より高いことがわかる。積雪深と比べて高くその差が大きい高い雪崩柵にできる雪庇は、写真 4-2 のように柵の上に大きく被さった雪庇になる。この雪庇は脆く崩落する危険がある。



写真 4-2 柵高が積雪深より高すぎる場合の雪庇

以上は、筆者の仮説であるが、それを裏づけるために雪崩柵の雪庇の調査を している。調査したのは、宗谷地方の一般国道 275 号天北峠の雪崩柵である。 柵の上段と下段で雪庇の形状に明らかな違いを見せていることに注目して調査 した。

2. 天北峠の雪庇例

写真 4-3 は切土に設置された上下 2 段の雪崩柵である。上下ともに雪庇があるが、上段の方が大きい。また、上段は一つ一つセパレートしているが、下段



写真 4-3 上段と下段で形の異なる雪庇(2月27日)

は切れ目なく連結している。上段の雪庇は3月8日に最初の崩落があり、最終的には上段の雪庇の全部が崩落したが、下段の雪庇は最後まで崩落していない。



写真 4-4 上段の雪庇の崩落 (3月8日)

3. 雪崩柵周りの積雪

雪庇がどうして形や大きさが異なり崩落したりしないかを知るために、積雪深を測定した。

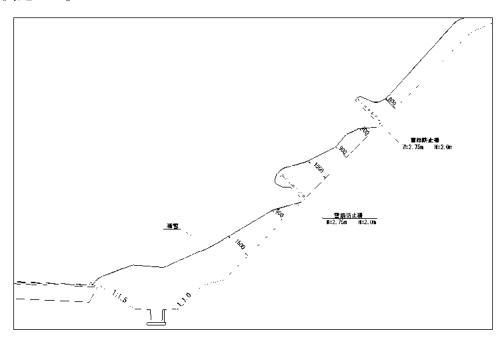


図 4-1 雪崩柵周りの積雪断面

3-1 積雪深の少ない上段は冠雪

予想したように、積雪断面から上段は積雪が下段と比べて少ないことが分る。特に上段の柵周りの雪をみると、傾斜は登り勾配になっている。雪庇はクリープによってできるが、重力に反してクリープで雪が登ることはありえない。上段の雪庇と見えるのは柵の頂部に雪が載った冠雪であることが分っ

た。冠雪は背面の雪との繋がりが弱いので崩落しやすい。

3-2 下段は雪庇

下段の雪はクリープで柵に被さった雪庇である。柵間にはみ出した雪を観ると、写真 4-5 のように、クリープの特徴である上部ほど多いことからもクリープによってできたことが分かる。また、クリープでできた雪庇は背面と強く結びついているため堅固で破断することはない。ちなみに、この雪庇のように密度の高い雪の引張強度は大きく、10 トン/m2 を超える。



写真 4-5 柵間をクリープによってはみ出した雪

4. Ⅳ章のまとめ

- 1. 雪崩柵を覆う雪には、雪庇と冠雪の2種類がある
- 2. 冠雪は柵高が積雪深と比べて高過ぎる場合にでき崩落しやすい
- 3. 雪庇は積雪深との差が大きくない場合に柵を超えてクリープしてでき、 堅固で背面の雪と強く繋がるため、めったに崩落することは無い。
- 4. 雪庇は柵高が低いからできるというのは間違いである
- 5. 全層雪崩を対象とする雪崩柵は20~30cmの高さで足りる

あとがき

身の回りの雪庇や冠雪を観察し、雪の性質特にクリープが重要な働きをしているのを感じている。このクリープをコントロールして冠雪の落下を防ぐ方法として、△格子フェンスを実験し今後につながるような結果を得た。屋根雪防止については想定外の現象を得て研究意欲を刺激されている。雪崩予防柵の雪庇については、定量的には多少データ不足であるが、一定の方向はつかめたと考えている。雪崩柵の柵高の決め方の議論が、現行の設計要領の改訂を視野に入れたものになることを期待している。

融雪及び全層雪崩・積雪グライドによる土砂の生産・流出に関する研究

岩手大学農学部共生環境課程・准教授 井良沢道也

弘前大学農学生命科学部地域環境工学科・教授 桧垣大助

(独) 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター・研究員 上石勳

キーワード: 融雪、全層雪崩、積雪グライド、土砂生産、土砂流出

1. はじめに

積雪地域では1999年5月に発生した秋田県八幡平澄川の大規模地すべりをはじめとして、融雪による地すべり・崩壊・土石流が発生している。しかし、現行の土砂災害の警戒避難基準雨量の設定において融雪現象はその予測が困難なため検討の対象外となっている。山地流域の面積は広大であるため、アメダスや国交省など既存の気象観測データセットを活かして融雪量の推定を行い、土砂の生産・流出現象を推測する手法を検討する必要がある。一方、全層雪崩・積雪グライドによる土砂の生産・流出現象についても事例を調査し、検討を行う。

著者らは気象観測記録の乏しい山地流域において、融雪水量の予測手法の確立を目指すべく、現 地計測をできるだけ少なくし比較的入手しやすい既存気象観測データセットを用いて、精度の高い 融雪量を把握する手法の検討を行っている(栗原ら 2007)。本研究では、精度の高い融雪量を把握 でき、さらに天気予報(1週間先)の気象予測情報を組み合わせることで、融雪による土砂災害の 予測等が可能となる手法を確立していきたい。このため、(1)中越地震により被災した新潟県旧山 古志村及び岩手県八幡平地すべり地において融雪水量の推定を行う。こうした手法により求めた融 雪水量と地すべり地や斜面の移動量、地下水位との対応関係を分析し、融雪に起因した土砂災害の 発生予測の検討を行う。一方、1999年4月21日未明には岩木山で大規模な全層雪崩が発生し、蔵 助沢を3kmにわたって多量の土砂を巻き込んで流下した。砂防堰堤群がなければ人家周辺まで到 達していた可能性がある。(2)全層雪崩により裸地が出現したが、その後の植生回復過程を追跡調 査する。一方、中越地震により被災した新潟県旧山古志村の山地流域においても、地震後に全層雪 崩や積雪グライドなどによる斜面崩壊も進行している。積雪寒冷地ではこうした全層雪崩や積雪グ ライドなどによる山侵食・崩壊へ与える影響は大きい。こうして生産された土砂は直接土砂災害を 引き起こしたり、渓床に蓄積されることで不安土砂となる。このため、(3)全層雪崩・積雪グライ ト"に起因する山地斜面の侵食・崩壊現象の実態を把握する。このように、積雪寒冷地で多く発生し ている融雪や雪崩などに着目して研究を行った。

2. 新潟県旧山古志村芋川流域における融雪土砂災害への適用

2004年10月に発生した新潟県中越地震により、旧山古志村を含む芋川流域では崩壊や地すべりなど多くの土砂災害に見舞われた。新潟県は、豪雪地帯として知られ、地震発生以降、融雪に起因する土砂災害が多発している。

そこで、本研究では融雪期の地すべりや斜面崩壊、河道内に堆積した不安定土砂の流動化を引き起こす融雪水量の適正なる予測手法の検討と、実際に芋川流域周辺で発生した融雪による土砂災害の発生事例、全11事例から融雪による土砂災害の予知予測へ向けた総合的な考察を行う。

対象地は新潟県芋川流域を研究対象地とした(図-1)。流域面積は 38.4km², 流路長は 17.2km である。

流域周辺の地質は砂岩・泥岩などから成る新第三紀鮮新世であり、シルト・砂・礫などから成る第四紀更新世の魚沼層により構成されている。

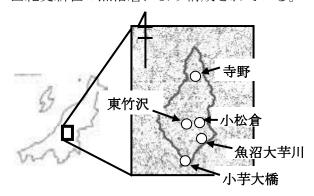


図-1 観測地点図

2.1 観測地点と解析期間、融雪水量推定手法

観測地点と解析期間については次のとおりである。芋川流域内の小松倉(土木研究所・岩手大学), 寺野・東竹沢・小芋大橋(湯沢砂防事務所),魚沼大芋川(雪氷防災研究センター)において 2005 年と 2006 年に観測された気象・水文要素を用いた。解析期間は 2005 年と 2006 年 1~5 月の積雪期 ~融雪期までである。

融雪水量推定手法は熱収支法、簡易熱収支法、Degree-day 法の3手法を用いた。

①熱収支法(図-2)

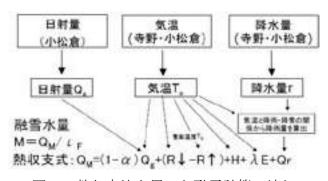


図-2 熱収支法を用いた融雪計算の流れ

ここで、 Q_M : 融雪熱量 (W/m^2)、 α : 雪面のアルベド、 Q_g : 全天日射量 (W/m^2)、 $R \uparrow$: 赤外放射 (W/m^2)、 $R \downarrow$: 大気放射 (W/m^2)、H: 顕熱輸送量 (W/m^2)、 λE : 潜熱輸送量 (W/m^2)、 Q_r : 降雨による輸送熱 (W/m^2)、M: 融雪量 (M)、M: 融雪量 (M)、M: かの融解潜熱 (M) を示す。

②簡易熱収支法

熱収支式の顕熱 H, 潜熱 λE を任意地点の係数 K_{SL} (mm day $^{-1}$ $^{\circ}$ C) を用いて簡略化した手法である。 小松倉地点の K_{SI} は 3.02 と決定された。

③Degree-day 法

日平均気温に融雪係数 $k (mm \ day^{-1} \ ^{\circ}C)$ を乗じて、日融雪水量を推定する。小松倉地点の k は経験的に 4.0 と決定された。

2.2 結果と考察

2.2.1 融雪水量推定手法の適合性の検討

小松倉地点に設置した融雪水量の実測値(ライシメータ実測値)と推定値の適合性を検討する。

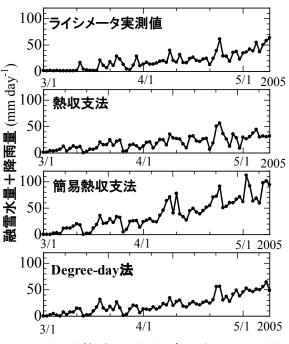


図-3 融雪計算結果 (小松倉地点, 2005年)

検討の結果,各推定手法ともに実測値との適合性は高かった(図-3,表-1)。2006 年も同様の結果が得られた。

2005年 2006年 ME ME r r 熱収支法 0.89 -0.1 0.72 3.3 簡易熱収支法 0.89 10.8 0.80 11.4 Degree-day 法 0.94 1.4 0.67 4.5

表-1 各手法の実測値との適合性

(r:相関係数, ME:平均誤差)

2.2.2 融雪災害の事例解析

① 2005.4/23 夜半 東竹沢地区での崩落

降雨によって融雪が進む中,芋川流域内の東竹沢地すべり頭部滑落崖に崩落が発生した。発生規模は、長さ130m,幅約100m,概算発生土砂量は、32,000m³と想定される。

崩落発生当時の融雪状況と気象状況を検証する。

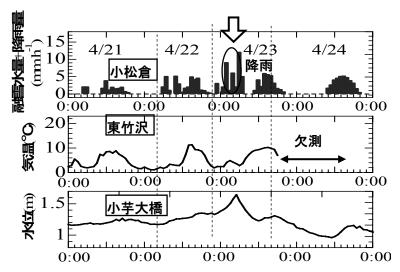


図-4 災害発生時の融雪・気象状況(2005.4/21~4/24)

図-4より以下の特徴が挙げられる。

- ・ 当時、融雪最盛期で、毎日 20~40mm の融雪が発生していた。
- ・ 融雪水量と降雨の和は, 4/22 では 50.3mm, 4/23 では 56.2mm であり, 2005 年で最も多くの水量 が地表面に達した。
- 4/23 日未明の降雨は5~15mm hour⁻¹の強い雨で、延べ40mmの降雨を記録した。
- ・ 4/22 日中の融雪と 4/23 日未明の降雨によって、連続して地表面に水量が供給されていた。
- ・ 22 日の融雪と 23 日未明の降雨によって、水位は 24 時間で 50cm 近く急激に上昇した。

② 2006.5/6 小千谷市十二平での地すべり

芋川流域の中流に位置する,小千谷市十二平地区で地すべりが発生した。発生規模は長さ 10m,幅 10m,厚さ 1m,概算土砂量は 100m³であった。

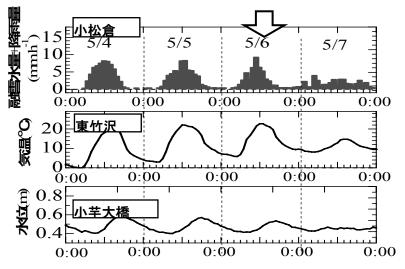


図-5 災害発生時の融雪・気象状況(2006.5/4~5/7)

図-5より以下の特徴が挙げられる。

- ・ 当時、融雪末期で日中の気温は20℃を超え、毎日50mmを超える融雪が発生していた。
- ・ 当時、積雪深は 60cm 程しかなかったことから、表面で発生した融雪水量は 0~1 時間ほどで地

表面に到達したと推測される。

- ・ 5/5 の 5 時から毎時間, 融雪水量が連続して地表面に供給され, 6 日の 24 時までで延べ 113mm の融雪水量が地表面に供給された。
- ・ 夜間でも少量の融雪水量が発生していた。
- ・ 当時,降雨は記録されていなかったため,融雪水量を主たる誘因で地すべりが発生した。

2.3 まとめ

新潟県旧山古志村芋川流域における融雪土砂災害を対象とした検討の結果、以下の結果 が得られた。

- 1) 日融雪水量は、熱収支法が最も再現性が良く、精度の良い推定が可能であるが、簡易熱収支法 や Degree-day 法でも同程度の精度が得られた。
- 2) Degree-day 法は、水津(2002)により季節、地形、斜面の傾斜・走行や、気温にも依存し、近くの場所でも値が異なるため、標高による依存性がないことが指摘されている。そのため、広域及び任意地点の正確な推定は困難である。
- 3) 気温,降水量,日射量から推定することが出来る簡易熱収支法は,短期予測や任意地点の推定 も可能であることから,適用が望ましい。今回,誤差が 10mm day⁻¹ ほど生じたので,精度向上 にはパラメータ等の検討が望まれる。
- 4) 融雪による土砂災害発生当時,災害発生前日から連続して地表面に融雪や降雨が供給され続けた場合に,土砂災害が発生している場合が多くあった。その値は50~100(mm 2day⁻¹)であった。
- 5) 融雪期の深夜に大量の降雨を記録し、日中の融雪水量に加算され、土砂災害が誘発されたケースが複数事例であった。
- 6) 土砂災害発生当時,前日から連続して地表面に融雪や降雨が供給され続けた場合(累積で100mm 程度)に,土砂災害が発生している場合が多くあった。そのため,2日もしくは3日単位で融雪 水量を累積することが必要である。

3. 岩手県八幡平市赤川地すべり地への適用

3.1 はじめに

春先に、地面に大量に供給される融雪水は、間隙水圧を上昇させ地すべり発生の誘因となりうる。 融雪に起因した地すべりとして、1997年5月11日に発生した澄川地すべりがある。研究対象の八 幡平地すべりにおける土砂移動は、夏季の豪雨ではほとんど発生せず、融雪期から消雪後にかけて 発生する。一方で、新潟県第三紀層地すべりの多くは、積雪初期から土砂移動を開始することが報 告されている。このように、地すべりの移動特性は、地すべりごとに異なるため対象地すべりごと の移動特性の把握が重要である。

地すべりの現行の警戒避難基準の多くは、移動量であるが、土砂移動の誘因となる融雪水量を予測できれば、より安全な警戒が可能となる。つまり、天気予報のようなコンスタントに入手可能な気象情報から融雪水量を予測し、土砂移動の予測を行うことが望ましい。過去、天気予報を用いた融雪水量予測の研究は数例みられるが、高標高地を対象とした事例は乏しい。そこで、八幡平地すべりの移動特性を把握し、天気予報から融雪水量の予測を行うことを目的とした。

3.2 対象地概要

3.2.1 位置,地形,および地質

八幡平地すべりは、岩手県盛岡市の北東約 33 km、岩手県と秋田県の県境に位置している。当地すべり地は、第四紀の新しい火山地帯であり、標高は 900~1600 m である。基盤地質は、新第三紀の凝灰岩と第四紀の溶結凝灰岩で、火山岩類と地すべり堆積物が覆っている。当地すべり地を含む、八幡平赤川流域内の、標高 970 m の H5 地点において、気象要素の観測を行った(図-6)。

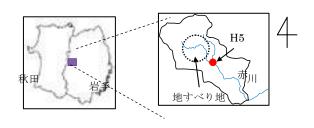


図-6 調査地概要

3.2.2 観測項目および使用データ

H5 地点において、気温、純放射量、および風速などを、また、地すべり地において、地中伸縮計変動量(以下、移動量と略記)、地下水位、およびパイプひずみ変動量(以下、ひずみ変動量と略記)が観測された。

3.3 八幡平地すべりの移動特性

3.3.1 土砂移動関連データの観測結果

図-7 に示したのは、土砂移動関連データの時系列変化である。H5 地点における、降水量と熱収支法で推定した融雪水量も合わせて示す。

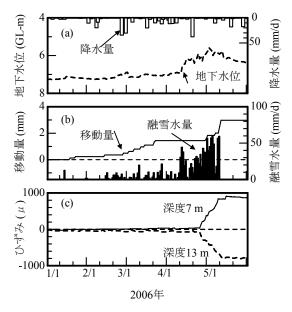


図-7 土砂移動関連データの時系列変化

図-7 から、融雪末期の土砂移動に先立ち、融雪水量増加に伴い、地下水位上昇がみられる。次い

で、ひずみ変動量に変化がみられ、2週間で1.4 mmの土砂移動が発生した。

3.3.2 土砂移動と地下水位の関係

土砂移動の発生に影響を与える基準となる地下水位(以下,基準水位と略記)を設定した。また,ある日の地下水位と基準水位の差を超過水位と定義した。基準水位は,任意の地下水位を仮の基準水位として,単位期間中の移動量の積算値と超過水位の積算値の比較結果から,両者の相関が最も良好な仮の基準水位を最終的な基準水位とした。ここで,単位期間は,5 日をひとまとめにしたものである。一例として,N ブロックの最終的な基準水位 6.2 GL-m のときの,移動量と超過水位の関係を図-8 に示す。

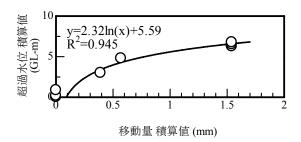


図-8 基準水位の設定 (6.2 GL-m)

当地すべりでは、基準水位を超過したのは、大部分が融雪期から消雪後にかけてであった。梅雨時の豪雨により、一時的な地下水位上昇があり、超過水位が発生しても、融雪期のような地下水位の高レベルでの維持はなく、速やかに地下水位が低下した。以上から、当地すべりで、夏季に土砂移動が発生しないのは、基準水位を超過することが少ないこと、および高レベルでの地下水位の維持がないためであることがわかった。

3.4 融雪水量の予測

翌日の融雪水量は、盛岡地方気象台(標高 155 m) 発表(17 時)の翌日の天気概況および最高・最低気温の予報値より、簡易熱収支法を用いて予測した(図-9)。翌日以降は、日平均気温の予測値から Degree-day 法により予測した。

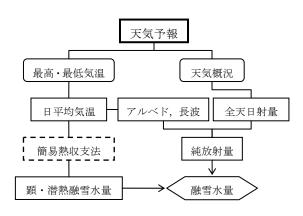


図-9 融雪水量予測フロー

3.5 解析結果

当地すべりで融雪末期の土砂移動発生時には、 $J\cdot N$ ブロックともに超過水位が発生した。また、超過水位が発生する、単位期間内の融雪水量と降雨量の和の閾値が、J ブロックでは 140~mm、N ブロックでは 100~mm とわかった。そこで、超過水位の発生予測を行うことで、土砂移動の発生予

測に代えた。図-10に、融雪水量および超過水位発生の予測結果の一例を示す。

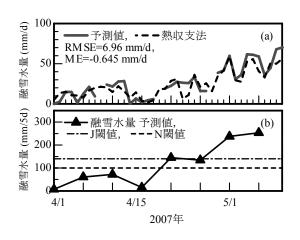


図-10 予測結果の一例

(a:翌日の融雪水量,b:超過水位発生)

図-10 (a) から、融雪水量の予測値は、実測値を用いた熱収支法の推定値と傾向がよく一致した。 RMSE は 7 mm/d 未満であり、予測精度は実用レベルであった。また、同図 (b) より、 $J \cdot N$ ブロックともに、4月20日以降に超過水位発生(土砂移動発生)が予測された。

3.6 まとめ

- 1) 山地の高標高地においても、良好な精度(RMSE=約7 mm/d)で予測することができた。
- 2) 「超過水位と融雪水量」および「超過水位と土砂移動の関係から、土砂移動予測を行った。 今後、土砂移動予測の精度検証、融雪水量予測の実証例の蓄積および分布型モデルへの適用が課 題である。なお、土砂移動関連データは、岩手県盛岡地方振興局に提供いただいた。

4. 全層雪崩・積雪グライドに起因する裸地発生とその後の推移

4.1 概要

1999年4月21日青森県西部にある岩木山(1625m)で発生した大規模全層雪崩は、1975年8月に土石流災害を発生させた蔵助沢に沿って3km流下し、雪崩の浸食によって裸地を形成した。岩木山南面では過去にも大規模な全層雪崩が発生している(三浦,1998; 2000)。最近では、2008年4月12-13日に、1999年4月21日雪崩発生斜面のすぐ西隣で雪崩が発生していることが確認された。ここでは、雪崩によって形成された裸地の植生回復と地形変化(浸食)を明らかにすることによって、大規模雪崩発生がその後の流域の土砂生産に与える影響について検討した。

4.2 研究方法

過去に発生した大規模全層雪崩による裸地発生箇所の地形的特徴を調べた。また、1999 年蔵助沢 雪崩の発生地点に生じた裸地について、2001 年 8-9 月および 2003 年 8-9 月, 2007 年 8 月に裸地範 囲と裸地を横断する測線に沿った植生調査を行った結果を比較して、雪崩発生後 8 年間の裸地での 植生回復と地形変化を調べた。

4.3 結果

4.3.1 大規模雪崩発生地点の特徴

大規模な全層雪崩は 1976, 86, 99 年に図-1 に示す地点、すなわち岩木山~鳥海山の南面で海抜 1100m以上,直線状の縦断形,勾配 25 度以上の斜面で発生していた。発生地点の植生はササ・低木 またはササであった。雪崩発生地点には雪食により裸地が形成されたが、それらはパッチ状の裸地 群または横に広 がる形状をなし、1975 年 8 月土石流災害時の豪雨でできた細長い崩壊地とはまったく異なる(図-11)。

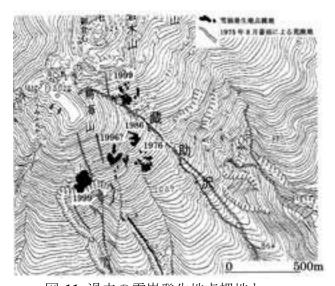


図-11 過去の雪崩発生地点裸地と 1975 年 8 月豪雨による崩壊地の分布

4.3.2 現地モニタリングからみた蔵助沢雪崩発生地点裸地の推移

1999 年 4 月 21 日雪崩の発生地点にできた裸地では、2001 年 8 月には、雪崩発生地点裸地の下部では、図-12 に示すように 9 本のリル・ガリーが形成されていた。

これらは、明らかに裸地形成後に作られ始めたもので、積雪から解放される前後表土の含水比の 高い時期に融雪水で浸食されてできたものである。しかし、裸地縁辺部ではミチノクコザクラ・ム ツノガリヤス・ヒメスゲ等の草本が侵入してきていた。

2001年8月に、雪崩発生地点裸地を横断する延長 60m の測線に沿って植生調査を実施した。そして、2003年および 2007年8月にも同一側線に沿った植生と植被率の調査を実施した。この 3 時期の植被率変化を見たのが、図-13である。測線沿いの植被率は 2001年の 26%から 2003年の 45%,2007年で 65%に増加している。雪崩発生後 8年を経過した段階では、裸地は 2003年にグライドを生じた範囲で拡大した部分もあるが、全体としては植生回復によって縮小しており、下流への崩壊土砂生産源にはなっていない。測線沿いで 2007年も植被率が 50%以下であるコドラートはガリーが通っている箇所である。とくにガリーII,IV, V, IXでは植被率が小さいが、前 3 者は、雪崩発生地点裸地の中で残雪が最も遅くまである所の下方にあるもので、融雪水の流出期間が長いため細粒土砂が流されやすく不安定なため植生が定着しにくいと考えられる。

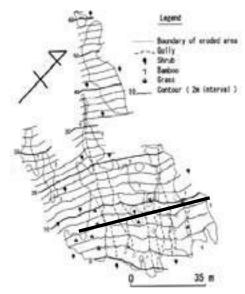


図-12 雪崩発生地点裸地の地形と植生状況(2001年8月)

太線:調査測線

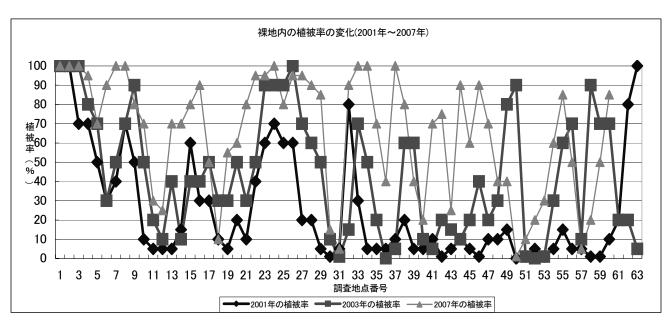


図-13 裸地内の植被率の変化(2001-2007年)

4.4 まとめ

- 1) 大規模な全層雪崩は1976,86,99年に岩木山~鳥海山の南面で海抜1100m以上,直線状の縦断形,勾配25度以上の斜面で発生しており、発生地点には雪食で裸地が形成されている。それらはパッチ状か横幅が広く、豪雨でできた細長い崩壊地とは形態が異なる。
- 2)1999年蔵助沢の雪崩は、海抜1360-1420m付近で全層雪崩として発生、蔵助沢に沿って海抜400m付近まで2.8km流下した。雪崩発生地点には、長さおよそ150m,幅200mの裸地が生じた。この裸地では、雪崩後に融雪水侵食で9本のガリーが形成されたが、2007年までに周辺からの草本の侵入により裸地は急速に回復傾向にあり、ガリーの拡大も起こっていない。しかし、傾斜25度以上の部分では、間歇的にある年に起こる雪のグライドで裸地が部分的に拡大することがある。この間、雪崩

発生地点裸地は下流への崩壊土砂生産源になってはいない。

5. 全層雪崩の発生と土砂生産・流出の分析

5.1 平成 19-20 年 全層雪崩発生状況 現地調査結果

長岡市山古志周辺では12月31日から1月3日にかけての大量降雪時には植生吹付法面で雪崩が多数発生した。また、3~4月にかけては土砂を巻き込んだ全層雪崩が発生していた。土砂の混入程度から、全層雪崩はつぎの①~④に分けることができる。

①法枠や植生吹付け

地震崩壊地でも植生吹付や法枠工によって保護された箇所で全層雪崩が発生していることが多かった。土砂生産は少ないが、植生吹付工では地震前や崩壊地よりも雪崩が発生しやすくなっている。

地震後1年目と2年目に大規模な土砂雪くずれ(土砂と雪を含んだ雪崩)が発生した長岡市濁沢 地区では、復旧工事により法枠工が設置され、今冬は同様の現象発生は見られなかった。







②自然斜面 土砂生産(小~中程度)

地震崩壊地でも比較的土砂生産の少ない全層雪崩も発生していた。もともと崩壊の規模が小さい 箇所だけでなく、地震以後、雨やその後の2~3冬期の全層雪崩により、土砂が比較的短期間に流下 し、新たな土砂生産が行われていない斜面の可能性もある。







③自然斜面 土砂生産 大

土砂生産が今冬も大量に見られた斜面も数多くある。樹木等植生が崩壊地に残り、表土を生産している可能性もある。







5.2 融雪末期の現地調査

災害復旧が行われていない斜面の多くでは、全層雪崩発生箇所では大量に土砂が堆積している箇所も多い。この中には土砂雪くずれが今冬も発生している斜面もある。



5.3 web カメラによる雪崩発生状況観測

雪氷防災研究センターでは震災地域内 4 箇所(山古志トンネル、羽黒トンネル、田代、川口牛ヶ島)に web カメラを設置している。この画像から雪崩発生を読み取った。田代監視カメラでは 12 月から 3 月まで全 5 箇所の全層雪崩を抽出することができた。



5.4 まとめ

中越震災地域の現地調査や監視カメラの映像から、全層雪崩の発生状況を把握し、土砂生産量が明確に異なる種類があることがわかった。今後は、現地調査と航空写真データ等から雪崩発生を継続的に抑え、積雪と土砂生産量等を解析できれば、今後の中越震災地域における防災につながるものと考える。

6. おわりに

なお、本研究を進めるにあたり、国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所、(独) 土木研究所土砂管 理研究グループ、岩手県盛岡地方振興局河川砂防課長高橋憲康氏、岩手出張所主任柴田秀則氏、基礎地 盤コンサルタンツ(株)東北支社内海実氏,奥山ボーリング(株)森屋洋氏、(株)ジオシステムズ水津重雄 氏には大変お世話になりました。また、岩手大学大学院農学研究科 窪寺洋介氏 (現・日本工営(株))、 同 角田皓史氏 (現・パシフィックコンサルタンツ(株)) から多大な協力を賜った。付記して謝意を表 します。

参考文献

- 1) 窪寺洋介:融雪による土砂災害の予知予測手法に関する研究,岩手大学大学院修士論文,pp. 1-194,2008.
- 2) 水津重雄(2002): 広域に適用可能な融雪・積雪水量モデル,日本雪氷学会誌(雪氷),64 巻 6 号,pp. 617-630
- 3) 角田皓史: 融雪に起因する地すべり災害の防止手法に関する研究, 岩手大学大学院修士論文, pp. 1-125, 2008.
- 4) 栗原淳一・山越隆雄・井良沢道也・笹原克夫・高橋正昭・吉田真理夫: 芋川流域における融雪量の簡易な予測手法の適用性の検討,新砂防, Vol. 59, No. 6, pp. 47-54, 2007.
- 5) 岩手県盛岡地方振興局: 平成 18 年度 八幡平地区地すべり調査観測設計業務委託報告書, 130pp, 2007.

平成 19 年度 TC 研究助成成果報告書

2008年6月 発 行

発 行 所 社団法人 雪センター

〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町 1-3-17 日本橋三洋ビル 7 階

TEL: 03(6740)2941 FAX: 03(6740)2942

ホームページ: http://www.yukicenter.or.jp/