

## 大規模構造物における屋根雪の滑雪メカニズムに関する一考察

○高倉 政寛, 伊東 敏幸, 苫米地 司 (北海道工業大学)

### 1 はじめに

近年の積雪寒冷地における大規模構造物の屋根雪処理方法の大部分は、滑雪または融雪+滑雪による方法を採用している。しかしながら、このような方法での雪処理については、基礎的な研究によって、その一部分が明らかにされている段階で、評価方法が確立されていないのが現状である。特に透過性に優れた膜材を屋根葺材に用いる場合は、冬期間における活用方法を考えると、屋根面に雪がないことが望ましく、設計の段階で屋根雪処理の検討を十分に行わなければならない。

このような背景から本研究では、屋根雪の様々な滑雪状態に対応した屋根雪の滑雪制御方法を確立することを目的に、屋根葺材表面温度の推移状況および雪のせん断強度を考慮した滑雪開始条件式を導き、屋根雪の部分落雪について検討した。

### 2 屋根雪の滑雪状態

渡辺らの屋根雪の滑雪に関する研究をみると、屋根雪をモデル化した雪ブロックに想定して棟部分で雪が破断する場合の滑雪条件を検討している<sup>1)</sup>。一方、前田らの研究をみると自然条件下の屋根雪の様々な滑雪状態について観察を行い、外気温や日射等の影響を検討して4通りに大別している<sup>2)</sup>。本研究では、両者の研究を基に屋根雪の滑雪状態の観察を行った。その結果、前田らの研究と同様に写真1に示すような部分落雪が多く屋根に発生していることが明らかとなった。そこで、これらの観察結果を模式化すると図1に示す4通りの傾向に大別できる。

- (1) 外気温が低温で屋根葺材の表面温度が低い場合は、屋根面全体に凍着強度が発生して滑雪しない。
- (2) 外気温が比較的高温であれば、屋根雪は融雪を伴いながら全体的に移動して落雪する。
- (3) 外気温が低温で建物内部の熱が屋根葺材面に伝わる場合は、主に屋根の中心部の凍着強度が低減し、放物線を描く形で部分落雪する。

- (4) (3) と同様の場合で風等の影響によって屋根頂部の雪の堆積が少ない場合や軒から棟までの長さが大きい場合は、けらば等にもみ雪が残る形で部分落雪する。

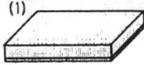
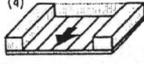
### 3 研究方法

#### 3.1 屋根葺材表面温度の測定

屋根葺材表面温度は、図2に示す試験体を用いて北海道工業大学の屋上に設置して実測を行った。試験体に用いた屋根葺材は、着色亜鉛鉄板の一字葺とした。屋根葺材表面温度は、図に示す部位で1時間おきに測定した。なお試験体は、小屋裏温度を制御するために軒先換気口、妻側換気口および室内天井部に開閉式換気口を



写真1 屋根雪の部分落雪

滑雪状態	主な滑雪抵抗力
(1) 	凍着強度
(2) 	上部雪の引張力 静摩擦抵抗力
(3)  (4) 	上部雪の引張力 雪のせん断力 静摩擦抵抗力

☐ : SNOW

図1 滑雪状態の模式図

設置し、屋根勾配は、雪が堆積しやすい角度である 0.4(22deg) とした<sup>3)</sup>。

### 3.2 雪の引張強度とせん断強度の実験方法

引張強度およびせん断強度実験は、図3に示す実験装置を用いて降雪によって装置内に堆積した雪を対象に行った。雪の引張強度は、A部に雪が破断するまでの荷重を加えて、破断時の荷重Tをロードセルを介して測定した。さらに、破断後にA部の摩擦抵抗力Rを測定した。雪のせん断強度実験は、C部について引張強度と同様の方法で測定した。これらの値を用いて雪の引張とせん断強度  $\sigma = (T-R)/S$  を求めた。Sは断面積を示す。

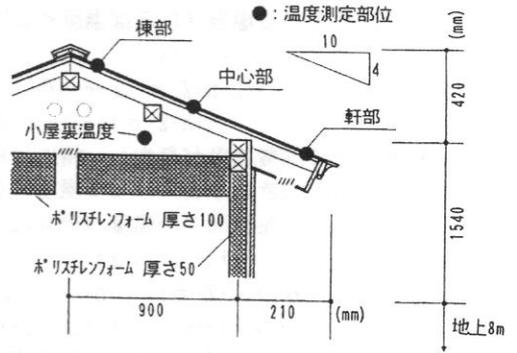


図2 屋根面温度測定用の試験体概要

### 3.3 滑雪開始条件の検討

本研究では既往の屋根雪の滑走運動に関する研究に基づき、滑雪時に働く力学的要因を図4のように整理した<sup>1)</sup>。図中の滑雪力と滑雪抵抗力を関数で表すと、以下ようになる。

$$S = \rho \cdot L \cdot h \cdot Z \cdot \sin \theta \text{ (gf)}$$

$$F_{sf} = L \cdot h \cdot Z \cdot \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta \text{ (gf)}$$

$$F_a = \tau \cdot L \cdot Z \text{ (gf)}$$

$$F_t = h \cdot Z \cdot \sigma_t$$

$$F_s = h \cdot L \cdot \sigma_s$$

ここに、

- $\theta$  : 屋根角度(deg)  $\rho$  : 雪の密度(g/cm<sup>3</sup>)
- Z : 棟の長さ(cm) h : 雪の厚さ(cm)
- $\mu$  : 静摩擦係数 L : 棟から軒までの長さ(cm)
- $\sigma_t$  : 雪の引張強度(g/cm<sup>2</sup>)
- $\sigma_s$  : 雪のせん断強度(g/cm<sup>2</sup>)
- $\tau$  : 単位面積当たりの凍着強度(g/cm<sup>2</sup>)

これらの式を用いて、滑雪開始条件を検討すると次に示すA), B), C), D)となる。

#### A) 屋根雪が凍着しない場合

(屋根葺材温度  $\geq 0^\circ\text{C}$ )

$$S > F_{sf} + F_t$$

$$(\rho \cdot L \cdot h \cdot Z \cdot \sin \theta) > (L \cdot h \cdot Z \cdot \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta) + (h \cdot Z \cdot \sigma_t)$$

#### B) 凍着強度が発生する場合で屋根雪全体が降雪する場合

(屋根葺材温度  $< 0^\circ\text{C}$ )

$$S > F_a + F_{sf} + F_t$$

$$(\rho \cdot L \cdot h \cdot Z \cdot \sin \theta) > (L \cdot Z \cdot \tau) + (L \cdot h \cdot Z \cdot \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta) + (h \cdot Z \cdot \sigma_t)$$

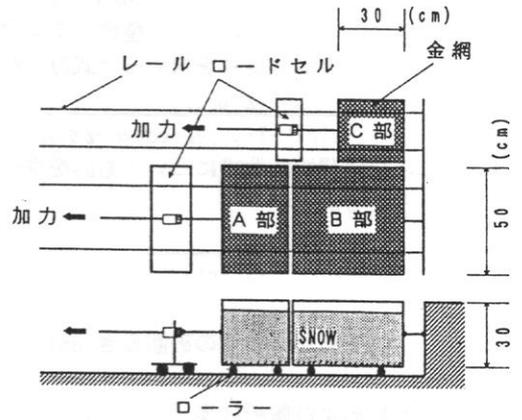


図3 雪の引張およびせん断強度の実験装置概要

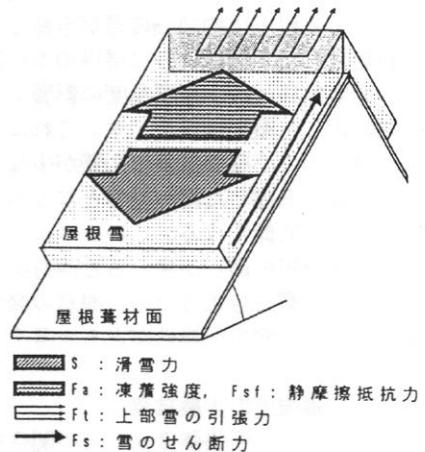


図4 滑雪時に働く力学的要因

C) けらば付近のみで凍着強度が発生して中央部の雪が落雪する場合 (けらば温度 < 0℃)

$$S > F_{sf} + F_t + F_s$$

$$(\rho \cdot L \cdot h \cdot Z \cdot \sin \theta) > (L \cdot h \cdot Z \cdot \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta) + (h \cdot Z \cdot \sigma t) + 2(h \cdot L \cdot \sigma s)$$

D) 屋根面全体で凍着強度が発生し、特にけらば付近の凍着が大きい場合 (けらば温度 < 0℃) (屋根面中心温度が徐々に上昇)

$$S > F_a + F_{sf} + F_t + F_s$$

$$(\rho \cdot L \cdot h \cdot Z \cdot \sin \theta) > (L \cdot Z \cdot \tau) + (L \cdot h \cdot Z \cdot \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta) + (h \cdot Z \cdot \sigma t) + 2(h \cdot L \cdot \sigma s)$$

ここで、D)の式を屋根中心部の凍着強度  $\tau$  について整理すると式1)となる。

$$\tau < (\rho \cdot h \cdot \sin \theta) - (h \cdot \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta) - (h/L \cdot \sigma t) - 2(h/Z \cdot \sigma s) \quad \dots 1)$$

同様にC)の式をL について整理して条件を満たす最小の雪氷体長さを求めると式2)となる。

$$L_v = \frac{(Z \cdot \sigma t)}{(\rho \cdot Z \cdot \sin \theta - Z \cdot \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta - 2\sigma s)} \quad \dots 2)$$

A)の滑雪開始条件式についても  $L_v$  を求めると式3)となる。

$$L_v = \frac{\sigma t}{(\rho \cdot \sin \theta - \rho \cdot \mu \cdot \cos \theta)} \quad \dots 3)$$

ここに、

$L_v$ : 棟からの雪の破断長さ (cm)

#### 4 実験および解析結果

##### 4.1 屋根葺材表面温度の測定結果

1994年2/13~2/14における屋根葺材表面温度の推移状況を図5に示す。なおこの期間は、降雪によって屋根上に約20cmの雪が堆積しているのが観察された。図のように屋根の中心部や棟部分の温度推移は、小屋裏温度の影響によって比較的安定した温度推移を示す。これに対して、屋根の軒先等の小屋裏温度の影響が少ない部分は、外気温に追従した温度推移となり他の部位よりも2~3℃低くなる。このように、各測定部位で温度分布の違いが生じると凍着強度の発生に大きく影響を与えるため、凍着の発生しない部位で部分落雪の可能性があると考えられる。

##### 4.2 雪の引張強度の実験結果

雪の密度と雪の引張強度  $\sigma t$  との関係を図6に示す。図中には本間らの研究によって得られた回帰式を合わせて示してある<sup>4)</sup>。図のように、

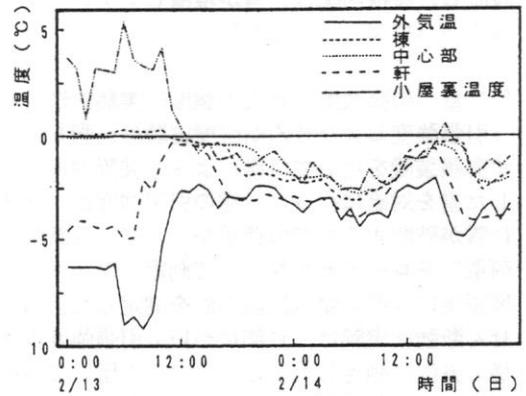


図5 屋根面温度の推移状況

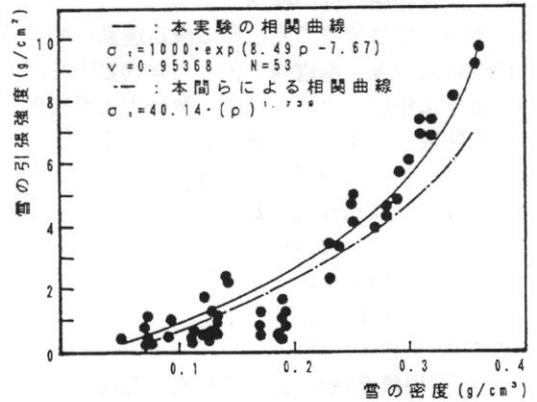


図6 雪の密度と引張強度との関係

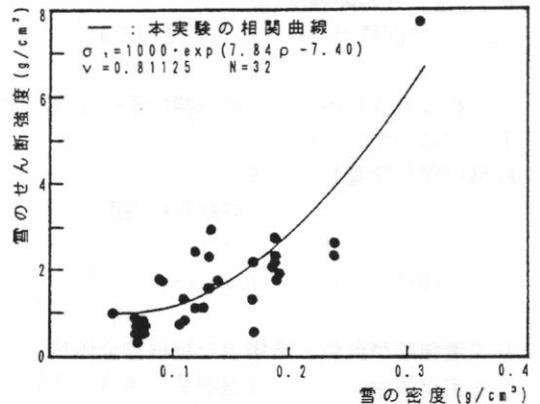


図7 雪の密度とせん断強度との関係

本実験によって得られた回帰式と本間らの回帰式は近似した結果となった。

雪の密度と雪のせん断強度 $\sigma_s$ との関係を図7に示す。図のように、密度が低い場合は引張強度と同様の傾向を示す。

#### 4.3 滑雪開始条件式による滑雪状態の予測

本研究では、着色亜鉛鉄板(P)と積雪寒冷地で注目されている透明天蓋空間の屋根葺材に用いられる膜材(M)の滑雪状態について検討した。静摩擦係数 $\mu$ は、雪ブロックを用いた平板傾斜法による実験値((P) $\mu=0.10$ , (M) $\mu=0.20$ )とした。雪の密度は $0.2(g/cm^3)$ とし、 $F_t$ ,  $F_s$ の算出は本実験で得られた雪の引張強度、せん断強度の相関式を用いた。式1の場合について滑雪開始条件を検討すると以下ようになる。なお、屋根葺材表面温度が低温となるければは凍着強度が発生している場合、滑雪は開始しないと考えて固定とした<sup>5)</sup>。

図8に、P材における屋根の縦横比と滑雪開始角度との関係を示す。図のように、ければ付近に大きな凍着強度が発生していない場合は、比較的緩勾配でも滑雪が開始し、縦横比が増加するに伴い滑雪開始角度が減少する。これは、滑雪力が一定であるのに対し、上部雪の引張力が減少するためである。これに対して、ければ付近に大きな凍着強度が発生している場合は、縦横比の増加に伴い、滑雪開始角度が増加して、滑雪しにくくなる。これは、軒から棟までの長さが増加すると、ければ付近に発生する雪のせん断力増加するためである。なお、M材の場合についても同様の傾向を示し、P材に比べて6deg上昇した曲線を描く。

同様に、式2)における雪の破断長さ $L_y$ と棟の長さ $L$ との関係を図9に示す。図のように、部分落雪によってa部のような大きさの雪が棟付近に残った場合、この部分の滑雪は期待できない。この部分の滑雪を促すためには、棟部分の雪の堆積を小さくし、上部雪の引張力を低減すること、屋根葺材表面温度の温度むらが発生しないようにすることが考えられる。

#### 5 まとめ

屋根葺材の表面温度は、外気温や小屋裏温度等の影響によって温度むらが生じることが明か

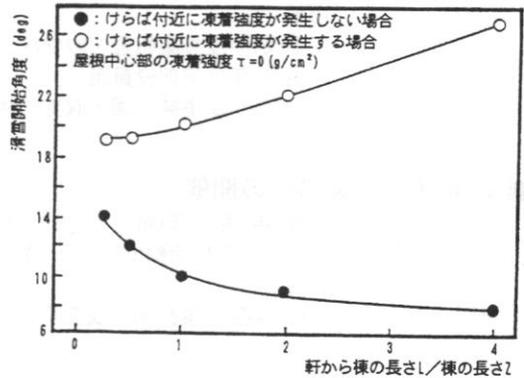


図8 屋根の縦横比 $L/L$ と滑雪開始角度との関係

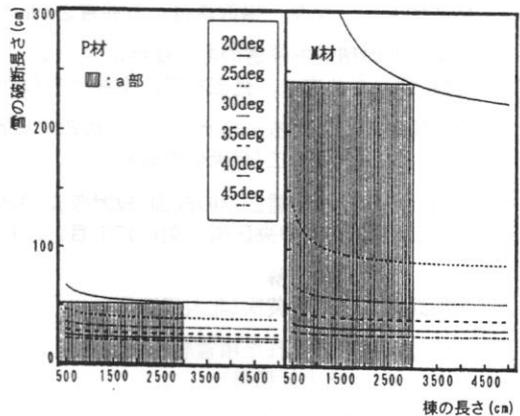


図9 雪の破断長さ と 棟の長さとの関係

となった。このことから、部分落雪の発生の要因の一つとして、温度むらによる凍着強度の発生状況の違いが考えられる。従って、屋根雪の滑雪処理を良好に行うためには、屋根面の温度分布を均一にすることと同時に、屋根頂部の雪の堆積を低減する方法を考えなければならない。

#### 【参考文献】

- 1) 渡辺 正明: 屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究, 東北大学学位論文, pp14~33, 1990. 6
- 2) 前田 博可: 金属屋根における積雪の滑落, 日本雪氷学会誌「雪氷」41巻3号, pp39~44, 1979
- 3) 日本建築学会建築物荷重指針, 同解説, pp207~208, 1993
- 4) 本間 義教他: 膜構造物の雪処理に関する研究, (社) 日本膜構造協会, 膜構造研究論文集 90, No. 4, pp55~68, 1990. 6
- 5) 苫米地 可他: 各種屋根葺材と屋根雪との凍着性状について, 第9回日本雪氷学会大会論文報告集, pp119~122, 1993. 1