

膜構造物の雪処理に関する研究

大塚 清敏*¹ 城 攻*²
本間 義教*¹ 宮川 保之*¹
増 茂 貞*¹ 岡田 宏*¹

梗 概

札幌において、ドーム状の屋根開閉式膜構造物の屋根雪処理に関する一連の実験、解析を行なった。実験は、多雪地域の膜構造物の雪処理システムの開発をめざし、融雪・滑雪による除雪をすみやかに行なうための設備設計の基礎資料を得る目的で行なった。実験では、ドーム屋根の温風融雪状況、膜材上の滑雪性状の支配因子である雪の静摩擦係数・引張強度について調べた。融雪実験に関し、模型ドームでの融雪能力、融雪効率について考察した。滑雪については、簡単な数値モデルを開発し、実験で得られた滑雪に関する諸量（静摩擦係数、引張強度）の妥当性について評価した。さらに実大ドームでの融雪能力、滑雪状況に関する検討も行ない、札幌で予想される最強降雪に対する雪荷重についての検討も行なった。

1. 研究概要

膜構造物は、従来の建築物にない明るい空間を作り出す。この特長を生かした膜構造物が、数多く建設されている。最近、冬期の運動場の確保のため、多雪地域における膜構造物の需要が増加してきている。膜構造物では、長期積雪による膜材のクリープの発生を防止したり、降雪時の自然照度を保つために、融雪等による屋根雪の除雪を行うのが通常である。しかしながら、雪荷重については、融雪等を行なっても設計上雪荷重の低減は認められないのが現状である。

本研究は、膜構造物の設計雪荷重を低減する雪処理方法を開発することを目的として、次のような一連の実験、解析を行なったものである。

- ①：膜屋根を有する大型模型の温風融雪実験
- ②：膜材上の滑雪の力学的性状に関する実験（静摩擦係数、雪の引張強度）

実験期間は、平成元年12月から2年3月までの4か

月間である。実験は、札幌市西区発寒にある当社札幌機械工場内で実施した。

以下、第2節では、大型模型の融雪実験の方法、結果、考察を、第3節では膜材上の滑雪の力学に関する実験の方法、結果、および考察を与え、第4節では、本研究のまとめを行なった。

2. 大型模型ドームの融雪実験

2.1 はじめに

本実験では、自然積雪時の大型模型の各パネルの融雪・滑雪状況を実測するとともに、融雪設備設計に必要なデータを得ることを目標とした。ここでは、融雪装置運転時の温風吹出し特性、ドーム内温度分布、膜面への熱供給、融雪能力、融雪効率について述べる。

2.2 実験方法

大型模型（本論文では、ドームも大型模型と同義で

* 1 (株)大林組技術研究所 * 2 北海道大学 工学部建築学科 助教授・工博

ある)は、直径 180mの一段開閉式ドームの開閉部分の屋根(直径 110m)を縮尺1/10で模型化したものである。模型の屋根は、12の膜パネルで構成されている。また、模型にはスチームボイラを熱源とする温風融雪装置が組み込まれており、軒部分に12か所の吹出口がある(写真-1、図-2.1(a)、(b))。

計測項目および測定器を表-2.1 に示す。温度(ドーム内、膜内・外表面、外気温で全 159点)・日射量・融雪水量(各パネル毎、全12点)はデータレコーダ

表-2.1 測定項目および測定機器

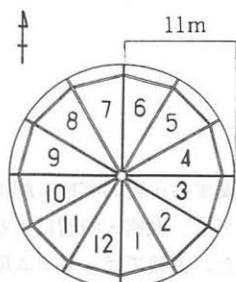
測定項目	測定機器
温度	C-C熱電対(0.5mm)
融雪水量	ロードセル
輻射量	エブリ社製日射計、放射収支計
風向風速	風車型発電式風向風速計
積雪深	手製スケール
雪密度	ビーカ、電子天秤

とパソコンによる自動計測とした。融雪水量は、各パネル毎に軒下に設置した集水装置により重量に換算して測定した。

滑雪量は、屋根下に落下した雪を直接採集して、重量を測定した。

温風の風速(膜下約30cm)は、吹出口近傍では約 2.5 m s^{-1} 、ドーム中央付近では 0.3 m s^{-1} であり、吹出口からドーム中央に向かって滑らかに減衰する分布を示す(図-2.2)。吹出口の大きさは、可変であるが、実験では $0.1\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ とした。この時の換気能力は、約 $17,000\text{ (m}^3\text{ h}^{-1})$ となる。

実験は、期間内に表-2.2 に示した14回実施したが、結果はすべて同様の傾向を示したので、以下に、その一部について結果を紹介する。表-2.2 には、実験時の温風融雪装置のチャンバー内の温度(設定温度)も示してある。



(a) 平面図とパネル番号



(b) 断面図

図-2.1 大型模型

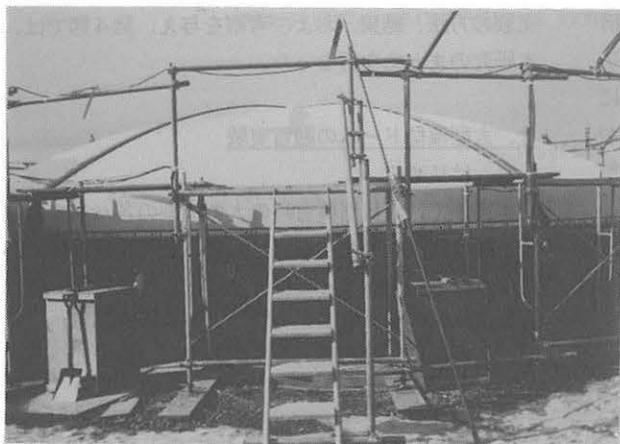


写真-1 大型模型外観

2.3 大型模型実験結果および考察

(1) 大型模型内温度 大型模型内温度は、融雪装置運転開始後約15~20分でほぼ定常に達する。実験開

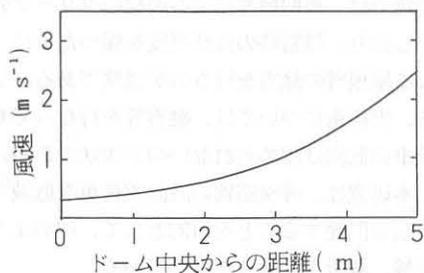


図-2.2 温風風速分布

表-2.2 実験日時、条件 (年は全て1990年)

日付	時 間	膜	設定温度 (°C)
1/10~11	19:45~ 8:45	1重	20 → 40
1/17	19:00~21:50	1重	20
1/19	7:00~12:00	1重	30
1/22	18:46~22:02	1重	40
1/23~24	15:24~ 7:00	1重	40
1/26	9:45~18:17	1重	20→30→40
1/29~30	19:20~ 1:20	1重	40
1/31	9:21~ 9:52	1重	30
2/ 3~ 4	20:20~ 1:20	1重	30
2/12~13	21:16~ 0:32	1重	30
2/17~18	21:50~ 3:52	1重	30
2/26	10:10~14:36	1重	30
2/27~28	20:50~ 9:00	1重	30→ 0→40
3/ 8	9:27~14:51	2重	30

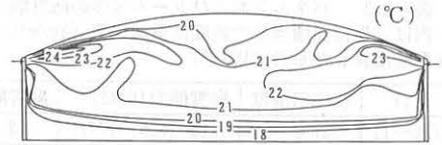


図-2.3 大型模型内温度分布 (1990.2.17)

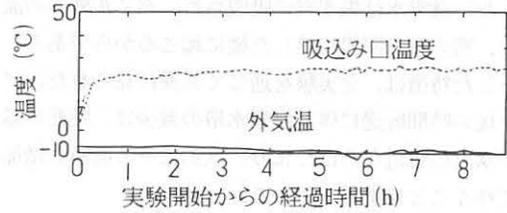


図-2.4 実験中の吸込口の温度、外気温の時間変化

始1時間後の温度分布の1例を図-2.3に示す。融雪に直接かかわる膜面直下の温度は、温風吹出口付近と中央付近とは、約5~10°Cの差がついている。

図-2.4に、1月29日の実験中の吸込口の温度、および外気温の時間変化を示す。吸込口の温度変化は、大型模型内部の温度変化を代表していると思われる。融雪実験開始直後の急激な温度上昇以降も、外気温の減少傾向とは逆に、吸込口の温度がわずかながら上昇し続けているのがわかる。これは、積雪面積の減少に伴うものと思われる。

(2) 融雪・滑雪状況 全実験を通じ、融雪開始後は、積雪はまず各パネルの周辺部から融け始め(膜面が露出し)、中央付近には最後まで雪が残るといった傾向が見られた。これは、温風吹出口がパネル周辺に位置するため周辺部と中央部との間に温度差を生じ(図-2.3)、また、温風の風速も周辺部から中央に向かって減少するため、膜面への熱供給が周辺部でより効果的に行なわれるからである。

滑雪は、積雪面にクラック発生後、一気に滑走・落下してしまうもの(sliding)と、非常に緩慢な速度で滑り、屋根下への落下までには至らないもの(gliding)との2つのタイプが観測された。前者の典型的なものが、1月15日(表-2.2には示していない)、1月31日に観測された。この時滑雪は、積雪後短時間融雪し、その後、融雪装置を停止したまま一晩放置し、翌早朝融雪を再開した直後に起こった。その他の実験では、後者のタイプに属するものが多かった。そのとき

のクラックの発生位置は、ほとんど、パネル下端から1~2mのところであり、そのまま、屋根下に落下してしまうものも数例観測された。

屋根下への落下までには、至らない場合も、明らかに融雪によりクラックの発生が、促進されているようであった。

(3) 融雪能力と供給熱量 膜面への供給熱量と、融雪能力とは、設備設計を行なう上での最も基本的な量である。以下においては、膜面への供給熱量 q は、次式を仮定して融雪水量に換算して計算した。

$$q = -\alpha (T_M - T_{IN}) / L \quad (2-1)$$

- q : 膜面への供給熱量 ($\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$)
- α : 総合熱伝達率 ($\text{kcal m}^{-2}\text{h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- T_M : 膜内表面温度 ($^\circ\text{C}$)
- T_{IN} : 膜下30cmの温度 ($^\circ\text{C}$)
- L : 氷の融解熱 (80cal g^{-1})

ここで、総合熱伝達率の値は、有風時のJurgesの式¹⁾を用いた。

図-2.5に、1月29日のパネル2について、実験中の膜面への供給熱量と融雪水量の時間変化を示す。ここに示してある値は、パネルの面積で積分したものである。融雪水量は、実験開始1~2時間後にピークに達し、以後徐々に減少してゆく傾向を示す。これは、融雪実験初期にはドーム内の温度上昇に時間がかかり

表-2.3 パネル2およびドーム全体の融雪能力 (kg/h/パネル).
 () 内は、単位面積当りの時間荷重減少量 (kg/m²h) および、および、およびそれを熱量換算したもの (W/m²)

月日	吹出口温度	融雪能力(パネル2)	融雪能力(全体)
1/10~11	20℃	13 (1.9、177)	12.5 (1.8、168)
1/29~30	35℃	26 (3.6、353)	24.7 (3.5、326)
2/17~18	30℃	21 (3.0、279)	21.0 (3.0、279)

また、融雪水は先ず雪に吸収され、パネル外への流出は、雪の保水限界に達した後に起こるからである。こうした特徴は、全実験を通じて共通に見られた。ピーク後の時間経過に伴う融雪水量の減少は、膜面の露出が吹出口付近からはじまり、次第にその面積を増加してゆくことに関係している。

融雪水量のピークは、降雪の弱いときには、パネル全体が雪に覆われている間に出現する。その値のいくつかを表-2.3に示す。表には、それらを単位面積・単位時間あたりの雪過重減少量、熱量へ換算した値も併記してある。

(4) 融雪効率 融雪効率も融雪能力と同様に、設備設計のための基本的な量である。融雪効率については、これまで、文献 2) ~11) 等の研究がある。このうち、7)、9)、11) が、大型の模型を用い野外実験で融雪効率を評価している。

時間融雪効率 η 、積算融雪効率 H は、次式で定義され、それぞれ融雪実験開始からの経過時間 t の関数である。

$$\eta(t) = \frac{L \cdot m(t)}{q(t)}, \quad H(t) = \frac{L \cdot M(t)}{Q(t)} \quad (2-1)$$

ここで、

$$M(t) = \int_0^t m(t') dt', \quad Q(t) = \int_0^t q(t') dt'$$

$M(t)$ 、 $Q(t)$ はそれぞれ、融雪実験開始から時間が t だけ経過した時点までの融雪水量と膜面への供給熱量の積算量である。 $m(t)$ 、 $q(t)$ は、単位時間あたりの融雪水量、膜面への供給熱量であり、 L は融解熱である。

滑雪がほとんど観測されなかった実験について、融雪実験終了時(パネル全体の8割が露出する時点)での積算融雪効率 H を表-2.4に示す。融雪効率は、その定義より、時間変化するものなので、評価を行なう時間によって異なった値をとる。

図-2.6 は、1月29日のパネル2と、全パネルで平

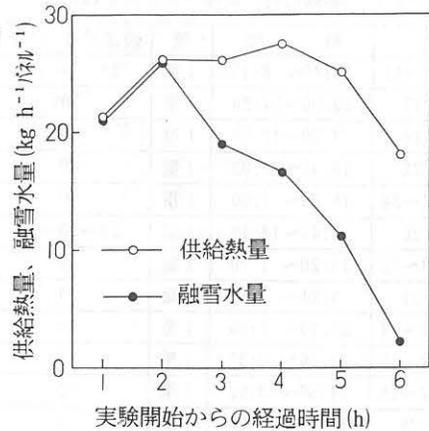


図-2.5 単位時間あたりの供給熱量と融雪水量 (1月29日、パネル2)。供給熱量は、融解熱を用いて水量に換算してある。

表-2.4 融雪効率 H (実験終了時)

日付	時間	融雪効率
1/10~11	19:45~ 8:45	0.50
1/29~30	19:20~ 1:20	0.55
2/17~18	21:50~ 3:52	0.60

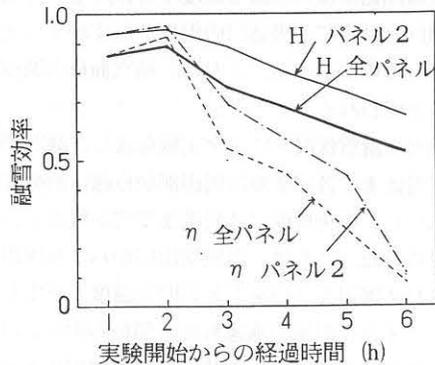


図-2.6 融雪効率の時間変化。

均した融雪効率 η 、 H の時間変化を示す。パネル全面が雪に覆われている実験初期においては、 η 、 H は0.9以上に達するが、融雪水量と同様にピークを過ぎてから単調に減少する。

積算融雪効率が減少するのは、もちろん時間融雪効率の減少によるわけであるが、それは、融雪の進行とともに積雪面積が減少することと関係している。積雪面積の減少とともに融雪効率を減少するのは、大きく

分けて次の2つが重なり合った結果であると考えられる。

原因①：積雪面積の減少の効果。今回の実験のような温風融雪用のダクト配置では、雪が完全に融けてしまって膜面が露出した部分にも、引き続き熱が供給されるからである。

原因②：積雪面積の減少により、本来積雪部分に供給されるべき熱の一部が、露出部から大気中へ逃げていくことによる。つまり、積雪部への熱供給が、全面雪で覆われているときよりも少なくなり、その結果、積雪部での融雪能力が減少することによる。これには、外気温等の気象学的因子が大いに関係してくるものと思われる。

融雪効率の高い融雪設備を設計するためには、融雪効率に影響を与えるこれらの原因をできるだけ回避しなければならない。そのためには、全体の融雪効率の変化に対する、これら2つの作用の大きさの程度を把握する必要がある。

ただし、定性的には図-2.4 で見たように、積雪面積の減少につれてドーム内の温度が上昇する傾向にある限りは、上の②の原因による融雪効率の減少は考えられない。それは次の理由による。

積雪のある間は、膜面に供給される熱の大部分は融雪に使われる。膜露出部の拡大とともにドーム内温度が上昇するということは、露出部単位面積あたり大気中へ放出される熱が、積雪の融解に消費される熱よりも小さいことを意味する。したがって、露出部へ供給される熱量の一部は、ドーム内部を温め、むしろ積雪部の融雪を促進する方に働いていると思われるからである。

積雪面積の減少に伴うドーム内の温度の上昇傾向は、ほとんどの実験において認められた。したがって、今回の実験に限っては、露出部は、積雪部の融雪能力を積極的に減ずる方には働いていなかったものとみられる。

しかし、露出部の存在と融雪効率との関係については、外気温を初めとする気象状況に密接に関係していると思われるので、その定量的な把握には、今後さらに詳しい解析が必要である。

2.4 実験に基づく融雪能力の検討

(1) 融雪能力 表-2.3 で示された融雪能力に対し

て、実際に想定される強降雪時の屋根雪荷重を評価する必要がある。そこで以下に示した2つの降雪の型を仮定し、それらに対する雪荷重を考える。

仮定1 7日降雪強度の200年期待値(174cm)がその期間にわたり一様に降り続くものとする。したがって日降雪強度は、24.8cm/日となる。

仮定2 一般には、7日間一様な強度で降雪が継続するとは考えられない。そこで、期間内で非一様な降雪強度を仮定する。7日間のうち最初の日、日降雪量の200年期待値(78.4cm)で、続く2日間は3日強度(117.7cm)を一日あたりの降雪強度に直したもの(39.2cm)で降るとし、残りの4日間は、7日目に7日強度に達するように一様に降るものとする。つまり、その間の降雪強度は、

$$(174 - 78.4 - 39.2 \times 2) \div 4 = 4.3 \text{ (cm/日)}$$

ここで仮定した降雪シナリオは、最近35年間の札幌における降雪の最大よりも大きい。

上の2つの降雪では、屋根に降り積もった雪が全く融けなかった場合、新雪の密度を 100 kg m^{-3} (比重0.1)とすれば、雪荷重(kg m^{-2})は7日目に 174 kg m^{-2} に達する。融雪を行なう場合の荷重は次のようになる。融雪能力は、表-2.3 にしたがって、温風吹き出し温度 20°C 、 30°C でのドーム全体平均での融雪能力にあたる、 $1.8 \text{ kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ (168 Wm^{-2})、 3.0 kgm^{-2} (279 Wm^{-2})を仮定した。

(a) 吹き出し温度 20°C の場合の雪荷重 仮定1では、融雪能力が降雪による雪荷重の増加($1.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)以上であり、7日間にわたり屋根雪は完全に除去される。仮定2では図-2.8のように、降雪開始から

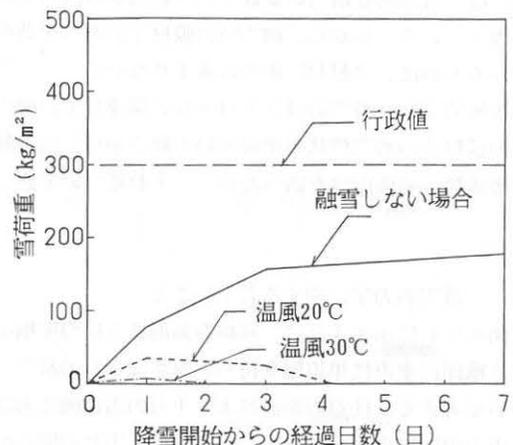


図-2.7 強降雪(仮定2)に対する雪荷重変化

一日経過時点で 35.2kgm^{-2} 、3日経過時点で 26.8kgm^{-2} であり、4日目には完全に除雪される。

(b) 吹き出し温度 35°C の場合の雪荷重 仮定1では、融雪能力が降雪による雪荷重増加を上回り、屋根雪は7日間を通じて完全に除去されてるシナリオ2では、7日間のうち降雪強度が最大の初日の日降雪量が融雪能力を上回るのので、わずかな残留雪荷重(6.2kgm^{-2})があるが、二日目以降は完全に除雪される。

このことから、今回の実験での融雪能力は、札幌において考えられる最強降雪に対し十分な融雪能力であり、ほぼ完全に除雪し得るものと思われる。

実大ドームでの融雪能力については、次のように考えられる。ドーム内部の温度状態を、大型模型のそれと相似であるように空調を設定すれば、強制対流に関する相似性により、模型との相似比が1:10であるような実大ドームでは、風速は模型の3倍程度となる。膜面付近での熱伝達率は、Jurgesの式¹⁾により風速の増加関数であるので、実大ドームでは、膜面への熱供給はより効率的になるとと思われる。したがって、実大ドームでも雪荷重は、今回の実験における大型模型の雪荷重程度に押えることが可能であろう。

3 滑雪の力学に関する実験

3.1 はじめに

滑雪は、融雪とならんで屋根雪の除雪過程の一つである。したがって、滑雪の適切なコントロールによって屋根雪除去の効率をいっそう高めることができる可能性がある。膜構造物の滑雪を扱った研究としては今日まで文献12)～15)に示したものがあり、13)、14)は、人為的な滑雪の促進という観点から滑雪を取り扱っている。しかし、融雪時の膜材上の滑雪を調べているものは、文献14)の他はあまりない。

本研究では、滑雪のコントロールと関連して、融雪時の膜材上の滑雪性状の把握という観点から、雪の静摩擦係数、引張強度を調べたので、それについて述べる。

3.2 滑雪の力学に関する若干のこと

図-3.1に示すように、曲線断面形状を持つ屋根の雪(紙面に垂直に単位幅を持ち、厚さは D)の滑雪について考える。任意の断面 S より下方の雪に働く力は、重力の屋根に沿った成分 F_G 、屋根と雪との滑り抵抗力 F_R (=摩擦力と凍着力との和)、断面 S を

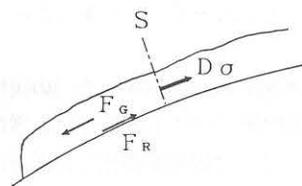


図-3.1 滑雪に関する諸力

通じて上方の雪との間に働く内部応力 $D\sigma$ である¹⁶⁾。 F_G 、 F_R は面に沿って積分した値である。以下では、簡単のため滑り抵抗力を単に静摩擦力と称する。滑雪が起こらないうちは、 F_G 、 F_R 、 $D\sigma$ の3力は釣り合っている。積雪量が増えて F_G が大きくなったり、何らかの原因で摩擦力 F_R が減じたりすると、内部応力は断面 S より下方の雪を支えることができず滑雪が起こる。滑雪発生直前には F_R 、 $D\sigma$ はそれぞれ最大静止摩擦力 F_{R*} 、引張破壊強度 $D\sigma_*$ に達しているものと思われる。したがって、破壊直前の力の釣合式は、

$$G = D\sigma_* + F_{R*} \quad (3.1)$$

となる。最大静止摩擦力、面圧 P と静摩擦係数 μ は、 $F_{R*} = \mu P$ の関係にあるので、静摩擦係数と破壊強度が滑雪の性状を決める基本因子ということになる。これら二つの量を調べることでより膜屋根上の滑雪の性状を予測することが可能となる。

3.3 静摩擦係数に関する実験

(1) 実験方法 静摩擦係数は、上面に四ふっ化エチレンコーティングガラス繊維布を葺いたベニヤ製小型模型(幅 $1.5\text{m} \times$ 長さ $3.0\text{m} \times$ 高さ 0.9m)上に積雪させ、模型上部のレバブロックでワイヤーを介して模型の片側を吊り上げて傾斜、滑雪させることによって調べた(図-3.2)。小型模型の内部は、 50mm のスタイロホームで断熱するとともに、6代のヒータ($600\text{W}/\text{台}$)が設置してあり(図-3.2)、融雪時に相当する摩擦係数も調べることができるようになっている。

小型模型の傾斜は $0 \sim 40^{\circ}$ の範囲で変化させ、滑雪発生時の傾斜角を記録し、それから静摩擦係数を求めた。積雪は、自然積雪によるものを原則としたが、実験期間中は降雪の機会に恵まれず、降雪のないとき

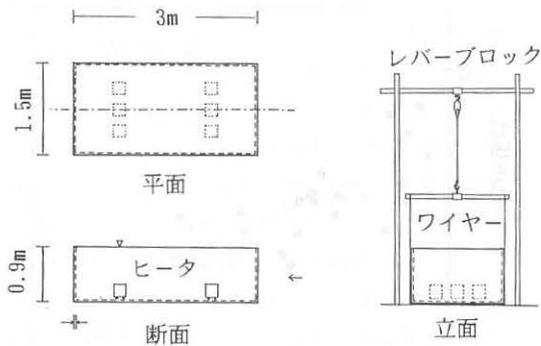


図-3.2 小型模型仕様

には変質の少ないと思われる地上積雪をふるい(SUS、#10) にかけて人工的に積雪させた。人工積雪の積雪深は、5、10、15、20cmの4段階とした。

(2) 実験条件 実験は、融雪を行なう膜構造物上の積雪に対して想定される、屋根面付近の雪質に対応する実験条件で行なう必要がある。そのため、次のような実験条件を設定した。()内は実験条件の略称である。

- ケース1：積雪後、融雪も何も行なわずに傾斜・滑雪させる。(融雪なし)
- ケース2：積雪後、加熱して融雪を行ない積雪層底部に融雪水を十分に含む層が形成されて後に傾斜・滑雪させる。(融雪あり)
- ケース3：積雪後、加熱して融雪水を含む層を形成させた後、いったん加熱を停止し、融雪水層を凍結させる。その後再び加熱して、凍結層と膜との間に水の層を形成させ、その状態で傾斜・滑雪させる。(再融雪)

実験結果は、3.5節で述べる。

3.4 雪の引張破壊強度に関する実験

(1) 実験方法 引張強度の実験には図-3.3 に示した試験体を用いて、以下の手順で行なった。

- ①アクリル製の枠A、B(つまりA、Bには、ふたも底もない)を開口部(断面積S)を突き合わせて水平台上におき、内部に雪を積もらせる。
- ②試験体Bを固定し、試験体Aを引っ張り破断時の引張力をロードセルCを介してペンレコーダで読み取る。このとき得られる力Fは、雪の引張強度を σ_s 、試

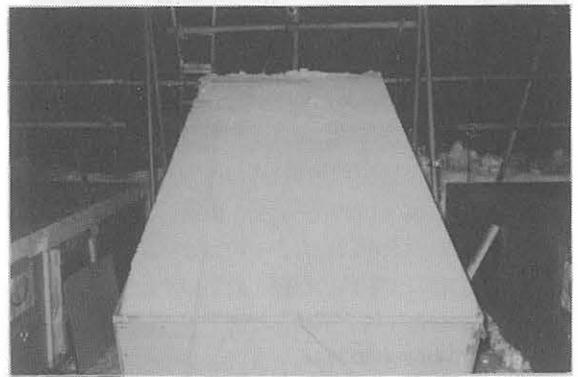


写真-2 静摩擦係数実験状況

験体Aの水平台に対する最大静摩擦力を R^A_s とすると

$$F = \sigma_s S + R^A_s \quad (3-2)$$

である。

③次に試験体Bを引っ張り滑走開始時の摩擦力 R^B_s を測定する。

ここで、 $R^A_s = R^B_s$ を仮定すれば、引張強度は、

$$\sigma_s = (F - R^B_s) / S \quad (3-3)$$

として求まる。

なお、試験雪としては、アクリルの枠内に自然積雪したものを用いるのが最良であるが、実験期間中は降雪の機会が少なかったため、地上の積雪の変質の少ない雪をふるい(SUS、#12)にかけて積もらせる方法をとった。

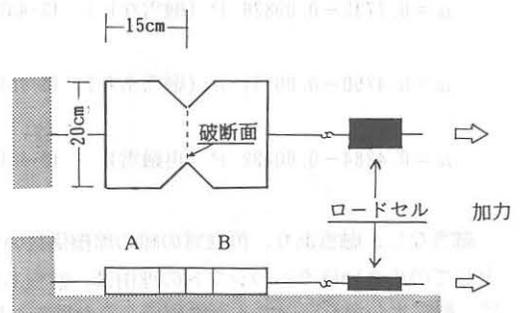


図-3.3 引張強度実験装置



写真-3 引張強度実験状況

3.5 実験結果

(1) 静摩擦係数 前述の3つの実験ケース（融雪なし、融雪あり、再融雪）について静摩擦係数と面圧との関係を図-3.4 に示す。静摩擦係数には雪の密度、結晶片の形状、膜面と雪との間の焼結・凍着の有無等数多くの因子が関わっているが、面圧と静摩擦係数との関係がもっとも明瞭であった。

図はある程度のばらつきを示すものの、明らかに面圧の増加とともに、摩擦係数は減少する傾向を示している。これは、面圧の増加により雪片がより丸みを帯びた形状となったり、あるいは、圧力の作用で雪片の融解が進んだりするためと思われる。実験条件別には、融雪なし、融雪あり、再融雪の順に静摩擦係数は小さくなっている。これらの違いを定量的に見るために、便宜的に摩擦係数を面圧の線形関数として次のように最小2乗回帰を行なった。

$$\mu = 0.7732 - 0.00826 P \quad (\text{融雪なし}) \quad (3-4a)$$

$$\mu = 0.4750 - 0.00531 P \quad (\text{融雪あり}) \quad (3-4b)$$

$$\mu = 0.4284 - 0.00432 P \quad (\text{再融雪}) \quad (3-4c)$$

融雪なし、融雪あり、再融雪の順の摩擦係数の全体としての小さいほうへのシフトの理由は、融雪ありでは、融雪水が滑りに対する潤滑層のような役割を果たして、融雪なしよりも滑りやすくなり、再融雪の場合では、凍結層と膜面との間に水の層が形成されるので、水の潤滑作用がより大きくなるためである。

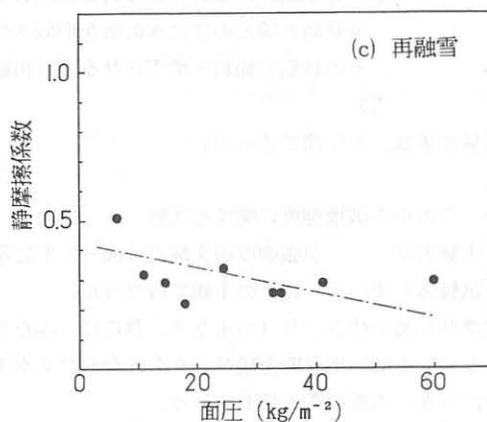
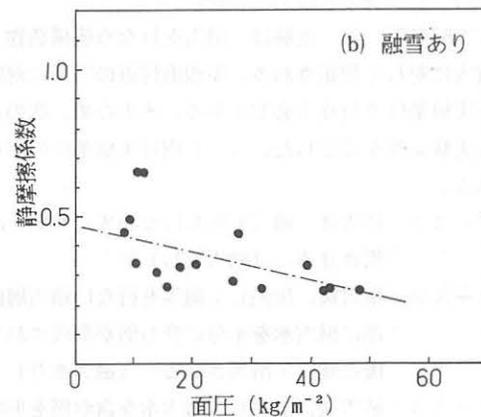
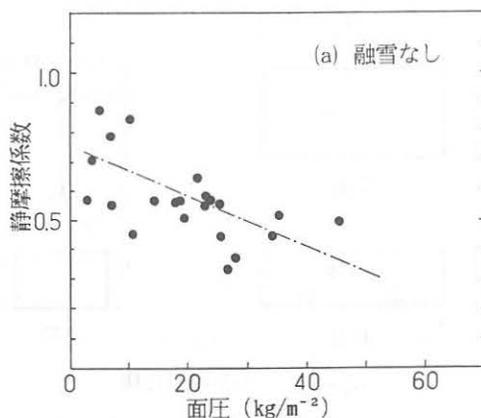


図-3.4 静摩擦係数と面圧の関係

また、 $\partial \mu / \partial P$ の大きさもこの順に小さくなるのがわかる。膜面付近の雪は、融雪ありの場合はシャーベット状であり、再融雪ではざら目状の水の下に融雪水の層が形成されている状態になっている。したがって、融雪なし、融雪あり、再融雪の順に雪の変質の度合いが大きくなり、変質自体がその順にある種の飽和状態に近づき、面圧の変化が摩擦係数の変化におよぼす影響が相対的に小さくなっていくためと思われる。

面圧以外の他の影響因子との相関関係については、静摩擦係数と外気温、雪の密度との関係も調べたが、外気温と静摩擦係数との間にはプラス温度では滑りやすいということ以外は、明瞭な関係は得られなかった。また、密度との関係についても、低密度の雪は同じ面圧でも相対的に滑りにくいという傾向が見られたが、面圧と静摩擦係数との関係ほどは定量化できる傾向は得られなかった。

(2) 引張強度に関する実験 引張強度は、雪の粒子形状、密度、粒子相互の付着の程度等によって決まるが、これらの因子は、積雪時からの経過時間やその間の気象状況によって複雑に変化する。そのため引張強度測定時点での雪の属性（密度、雪温等）の関数として表現するのは難しい。そこで、本研究では、従来の方法に従い引張強度と雪密度との関係を調べた。

結果を図-3.5に示す。雪の引張強度 σ_s (kg/m^2)を密度 ρ_s (kg/m^3)の指数関数として最小2乗回帰すると次のようになる。

$$\sigma_s = 401.4 (\rho_s / 1000)^{1.739} \quad (3-5)$$

図には、これまで数多くなされた雪の引張試験の結果を Meller (1975) ¹⁷⁾ がまとめたものもあわせて示してある。ただし、データのばらつきが大きいので、影で示してある。われわれの引張強度は、Meller が示したものの下限値よりもやや小さいところに集中している。この違いは以下のように考えられる。

従来雪の破壊強度は、雪崩の力学や、雪底の形成機構との関連において調べられたものが多いため、変質を受け、密度が比較的大きい雪が主な解析対象となっている。こうした雪は、一般には強度の増加（硬化）が進んでいると思われる。一方、今回の実験では、降雪直後、あるいはそれに準じた雪の強度であるので全体に小さい値を示しているのであろう。実際、融雪装置を使用することによって、長時間屋根に雪は残さないという我々の方針からすれば、今回の実験で得られた引張強度のほうが、膜屋根上の滑雪性状を把握する上でより適切であると思われる。

3.4 滑雪に関する考察

実験で得られた滑雪に関する基本量（静摩擦係数、引張破壊強度）の妥当性を評価し、実大ドームでの滑雪性状を予測するため、簡単な屋根雪滑雪モデルを開発した。ここでは、その結果について述べる。

(1) 屋根雪滑雪モデル 本モデルは、大型模型ドームの12枚のパネル膜屋根を図-3.6に示したようにモデル化（円筒シェルを切り出したもの、屋根端部の勾配=30°）し、その上の積雪層の力の釣合式、雪の

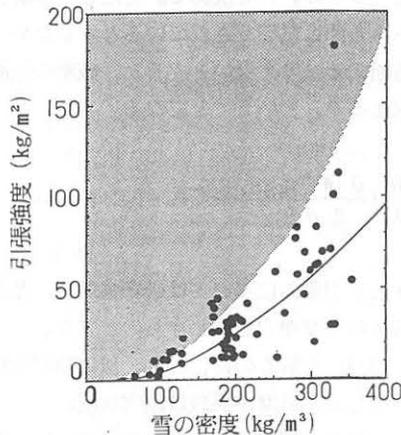


図-3.5 引張強度と雪密度の関係、図中の曲線は、指数関数による最小2乗回帰曲線、影をつけた部分は、Meller (1975)による。

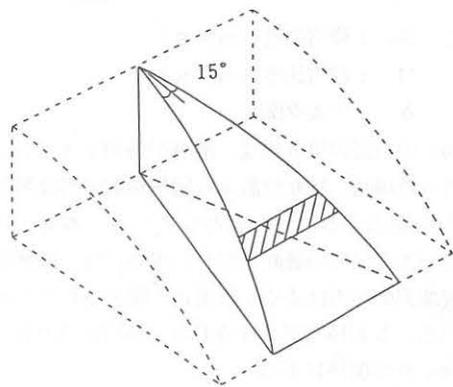


図-3.6 パネルのモデル化

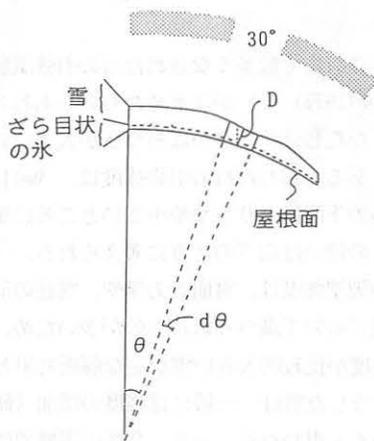


図-3.7 パネル断面と積雪層

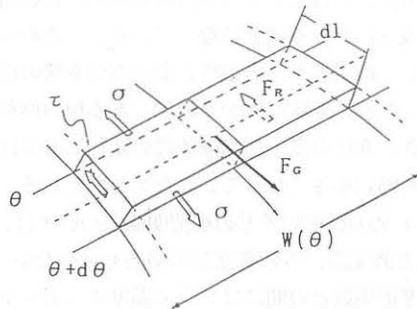


図-3.8 積雪層にはたらく諸力. 各記号の意味は、表-3.1 参照.

質量収支式を解いて、屋根雪の破断の位置、および、滑雪による雪荷重の時間変化を計算する仕様になっている。

膜面上の積雪層は、雪の層とざら目状の水結層（これは存在する場合のみ）とからなるとし（図-3.7）、積雪層の屋根頂部からの角距離 θ にある幅 $d\theta$ の部分には図-3.8 に示した諸力が働くものと仮定する。なお、モデルでは雪の諸属性は、パネルの等高線方向には一様であるとする。

降雪や、融雪・滑雪による単位面積あたりの屋根雪の質量の時間変化は、雪の密度を一定であると仮定すれば、積雪層の厚さ D の変化として次のようにかける。

$$\frac{\partial D}{\partial t} = S_F - M - D_s \delta(t - t_{s1,de}) \quad (3-6)$$

ここで、 S_F : 降雪強度 (m/s)

M : 融雪速度 (m/s)

δ : デルタ関数

式(3-6)の右辺の第3項は、滑雪が時刻 $t = t_{s1,de}$ に起こった場合、破断位置より屋根端部の雪は瞬時に屋根から除去されることを表わしている。本モデルでは、このように雪の破断が生じた場合には、破断面から屋根端部側の雪は速やかに滑走、除去されるものとしている。なお積雪層の厚さ D は、積雪深 h とは、 $D = h \cos \theta$ の関係にある。

積雪層の力の釣合式は次のようになる。

$$0 = \frac{\partial (W D \sigma)}{R \partial \theta} + 2D \tau \frac{\partial 1}{R \partial \theta} + W(F_G - F_R) \quad (3-7)$$

ここで、各記号の意味は表-3.1 に与えてある。

このモデルでは雪荷重 (=面圧) P (kg/m^2) は、次のようになる。

$$P = D \rho g \cos \theta \quad (3-8)$$

積雪層の破断の位置は、屋根端部 ($\theta = 30^\circ$) から頂部に向けて(3-7)を積分し、滑雪の条件(3-1)を満足する位置 ($\theta = \theta_*$) を決める。ただし、本解析では、隣接パネル間は雪切りされているとするため、パネル間の剪断力 τ は考えないとすると、破断の位置は次式から求まる θ_* ということになる。

$$0 = \int_{\theta_*}^{30^\circ} \left\{ \frac{\partial (W D \sigma_*)}{R \partial \theta} + W(F_G - F_{R*}) \right\} R d\theta \quad (3-9)$$

添え字の*は、引張力については破壊強度を、摩擦については最大静止摩擦力を表わすものとする。

(3-6)、(3-8)を解くのに、 S_F 、 M は時間変化する外力として与え、静摩擦係数は融雪状況に応じて(3-4a, b, c)の関係を、破壊強度については(3-5)の関係をを用いた。

(2) 大型模型ドームの滑雪状況 融雪実験中、大型模型において滑雪や、雪の破断によるクラックの出

表-3.1

$F_G = D \rho g \sin \theta$ (重力)
 $F_R = \mu D \rho g \cos \theta$ (屋根面との間の静摩擦力)
 $D\sigma = (D_s - D_i) \sigma_s + D_i \sigma_i$
 $D\tau = (D_s - D_i) \tau_s + D_i \tau_i$
 $D\rho = (D_s - D_i) \rho_s + D_i \rho_i$
 (添え字 s、i は、それぞれ、雪、氷結層に
 関する量であることを表わしている)
 R: パネル屋根の曲率半径
 W: 角距離 θ でのパネルの横幅

R: パネル屋根の曲率半径
 W: 角距離 θ でのパネルの横幅
 D: 積雪層の厚さ ($D = D_s + D_i$)
 σ : θ 方向の内部張力 (kgm^{-2})
 τ : 隣のパネルの雪との間の剪断力 (kgm^{-2})
 μ : 静摩擦係数 g : 重力加速度
 ρ_s 、 ρ_i : 雪、氷結層の密度 (kgm^{-3})
 θ : 図-3.8 参照

現が観測された。ここでは、1990年 1月31日、2月12日の2実験について実際と計算との比較を行なう。計算は、実験開始時の各パネルの積雪深分布(観測値)から出発し、その間の降雪 S_F および融雪 M を実験から得られたものを与え、実験開始1時間後の滑雪、クラック出現状況を求めたものである。

結果を図-3.9に示す。2月12日(図-3.9(a))に対しては、静摩擦係数は融雪ありの場合の関係式を与えてある(式3-4b)。滑雪やクラックの発生は、6パネルで観測されたが、計算では11パネルになっている。これは、実際の模型ドームのパネルは、パラソル様の形状をもつのに対し、モデルは円筒シェルを切り取ったものなので、屋根下端付近の実質的な勾配がモデルのほうが若干大きいためであること、および、実際には積雪深はパネルの等高線方向にも不均一であるのに、モデルでは一様を仮定していることによるのであろう。しかし、雪の破断の位置は、実験と計算とはかなりよく一致しているといえる。1月31日の場合(図-3.9(b))、実験開始時に積雪下層に厚さ約8~10mmの氷結層が形成されており、融雪装置の運転開始後10分以内にすべてのパネルで滑雪が生じ、屋根雪は完全に除雪された。氷結層の引張強度を 300kgm^{-2} (この値は、当社技術研究所の低温実験室において、人工雪を用いて得た。)と仮定し、静摩擦係数には(式3-4c)を用いて計算した結果、実際の滑雪と極めて近い状況が再現できた。

ここで述べた簡単なモデル計算の結果から、われわれの得た静摩擦係数や雪の引張強度の大きさは、降雪後の変質の少ない雪の値として妥当であるといえる。
 (3) 実大ドームの滑雪と雪荷重の予測 次にこのモデルを用いて、強降雪時の実大ドームの雪荷重の予

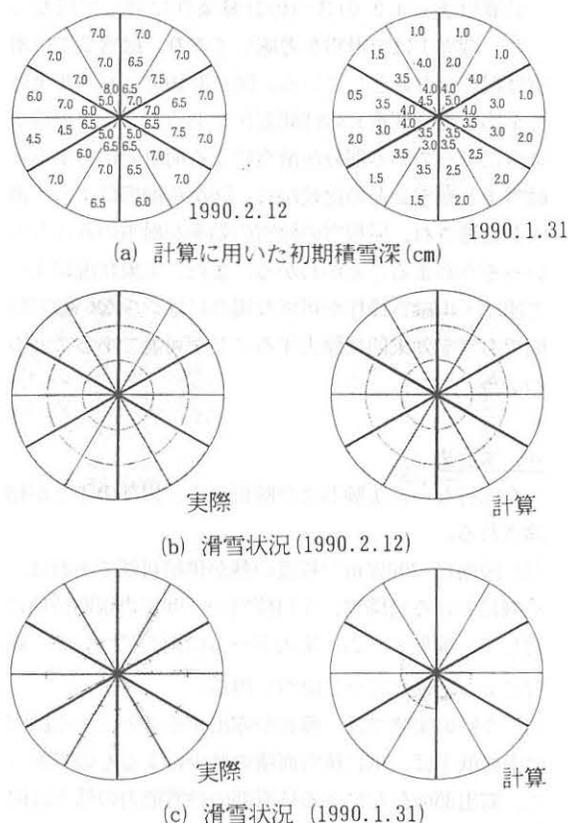


図-3.9 滑雪状況の計算と実際との比較
 ■ 積雪部 □ 膜面露出部

測を行なった結果を示す。実大ドームは、曲率半径100m、形状は図-3.5に示したものと全く相似である。強降雪としては、降雪強度(4cmh^{-1})が終日降り続くものと仮定した。この降雪強度は、札幌における日降雪強度の200年再現期待値($78.4\text{cm日}^{-1} = 3.3\text{cmh}^{-1}$)

- 7) 川島 実他、空気膜構造（エアースポルトドーム）における融雪実験 第1報 小型実験ドームにおける融雪実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学、pp.787~788、昭和59年10月
- 8) 森野仁夫他、空気膜構造（エアースポルトドーム）における融雪実験 第2報 風洞箱による実験 日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学、pp.789~790、昭和59年10月
- 9) 西川 薫他、空気膜構造における融雪実験 その1 基礎実験及び実大実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学、pp.893~pp.894、昭和61年 8月
- 10) 西 安信他、空気膜構造における融雪実験 その2 融雪機構の解明 日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学、pp.895~896、昭和61年 8月
- 11) 増茂貞、他、膜構造物の雪処理に関する研究 その3 大型模型による融雪実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.1201~1202、平成2年10月
- 12) 北川澄男他、フッ素樹脂膜材の滑雪について（第一報）、膜構造研究論文集'87、31-38、昭和62年。
- 13) 島田 洋 サスペンション膜構造の除雪実験 日本雪氷工学会誌、Vol.6 No.3、10-17、Sep.1990
- 14) 田中保雄、他、膜構造物の雪処理に関する研究 その3 小型模型実験による滑雪実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.1199~1200、平成2年10月
- 15) 本間義教、他、膜構造物の雪処理に関する研究 その1 研究概要と雪の引張強度、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.1197~1198、平成2年10月
- 16) Sack, R.L., et al., 1987, Sloped roof snow loads using simulation, J. Struct. Div., ASCE, 113(8), pp1820-1833.
- 17) Mellor, M., 1975, A review of basic snow mechanics, Proc. Int. Symp. on Snow Mechanics, Grindewald, Int. Assoc. Hydrol. Sci. Pub. 114, pp.251-291.

A STUDY ON THE REMOVAL OF SNOW
FROM MEMBRANE STRUCTURES

Kiyotoshi OHTSUKA *1 Osamu JOU *2
Yoshinori HOMMA *1 Yasuyuki MIYAGAWA *1
Takashi MASUMO *1 Hiroshi OKADA *1

SYNOPTICS

In order to develop an effective system for the artificial removal of snow on the retractable membrane roof of large span structures to be constructed in the snow rich regions, a series of field experiments were made at Sapporo City to collect the basic data on the physical properties of roof snow for melting and sliding, which are required for the optimal design of snow melting equipments and for the determination of roof shapes favorable to snow sliding.

In the artificial snow melt experiments, a membrane roofed 1/10 scale model of a real sized dome of 100 meters in radius was introduced to investigate the relationships between the amount of heat supplied to the model roof and the rates of snow melt. As for snow sliding mechanics, static friction coefficients of snow to the roof material, and tensile strengths of fresh snow were investigated, because these two quantities are primarily responsible for snow sliding on the roof surfaces. Furthermore, a simple snow sliding model was developed based on the experimentally derived dependences of friction coefficients and tensile strengths on the physical properties of snow.

The snow melt experiments suggest that heat supply of about 300 Wm^{-2} to the roof are required to prevent snow from accumulating under heavy snow falls with the return period of 200-years at Sapporo City. The values of friction coefficient and tensile strength obtained in the experiments turned out to be consistent as the values for fresh snow on the membrane roof by comparing the observed pattern of snow slide on the roof of model dome with the calculated one by the snow slide model. We will discuss about the application of the analysis made here to the practical design of real sized membrane roofed dome structures.

*1 Technical Research Institute, Obayashi Corporation.

*2 Faculty of Engineering, Hokkaido Univ.