

膜構造物における滑雪現象に関する一考察

苫米地 司*1

山口 英治*2

高倉 政寛*3

概 概

本研究は、膜構造物の屋根雪処理を円滑に行う方法を提示することを目的に行った。始めに屋根上積雪の滑雪状況の屋外観察を行い、その結果を基に低温室内でモデル雪を用いて膜材上の滑雪現象を実験的に検討した。さらに、積雪地域に建設された大規模膜構造物の屋根上積雪状況の現地調査を行い、気象状況との関係について検討した。

その結果、膜面の一部が低温となり雪が膜面に凍着する場合や屋根の頂部に多くの積雪がある場合、これらの部位が固定される状態となり顕著な滑雪現象が見られない。すなわち、円滑に滑雪現象を発生させるためには固定される部位を少なくすることが重要である。現地調査においても、屋根雪の固定される部位が少なくなる膜材をV字状に張った場合には円滑な滑雪現象が見られることが確認できた。

1. はじめに

近年、積雪地域にも透光性に優れた膜材を屋根葺材に用いた大規模構造物が建設されるようになってきている。これらの構造物は、積雪のない明るい大空間を造り出すことが可能なため今後、冬期間の活動施設として需要が高まると考えられる。

積雪地域に膜構造物を建設する場合、屋根上の積雪によってこれらの構造物の大きな特徴である透光性が損なわれることや、雪荷重による膜材のクリープ等の問題が考えられる。これらの問題に対応するため、積雪地域に建設される膜構造物は、融雪+滑雪、または滑雪による雪処理方法によって屋根雪が速やかに滑雪する工夫が施されているのが一般的である¹⁾。しかしながら、屋根上積雪荷重に関しては、積雪地域に膜構造物の実績が少ないことや屋根上積雪の処理システムに関する有効性が十分に把握されていないため、積極的に屋根雪処理をしない構造物と同様の荷重評価を行っているのが現状である。

これまでの屋根雪の滑雪に関する研究をみると、屋根上の雪が全体に移動して滑雪することは希で、屋根の棟やげらばに雪が残る部分的な滑雪が多い²⁾。写真1に示す筆者らの札幌市における観察でも同様の結果が得られている。これらの滑雪現象をみると、棟部の雪は滑雪方向と反対側の屋根雪とつながって滑雪しに

くく、げらば部分の屋根面温度は外気温（マイナス温度）と同程度で大きな凍着強度が作用し滑雪しにくくなっていると考える。すなわち、部分的な滑雪現象は棟部の雪の引張抵抗力や屋根面の温度むらによる凍着強度の差異に大きく影響を受けていると考える。

大規模構造物を対象とした温熱環境に関する研究をみても、屋根面近傍で温度むらが発生している。これらの建物における温度環境は屋内の配置計画等によって温度分布にむらが生じる一方、屋内空間の端部は外気温の影響によって温度が低くなる傾向を示す^{3), 4)}。これらのことから、大規模構造物においても小規模な建物と同様に部分的な滑雪が発生すると考える。従って、大規模構造物の屋根上積雪荷重の評価や雪処理を考える場合、部分的な滑雪状況を十分に把握すること



写真1 屋根上積雪の滑雪状態

*1北海道工業大学 助教授・工博 *2太陽工業（株） 空間設計部・工修 *3北海道工業大学 大学院

が重要と考える。

このような背景から本研究では、部分的な滑雪現象を明らかにすることを目的に低温室内で人工的に作製したモデル雪を用いた滑雪現象に関する実験を行った。さらに、積雪地域に建設されている膜構造物を対象に屋根上積雪状況の現地調査および管理者に対するヒアリング調査を行った。

2. 研究方法

2.1 モデル雪の作製および諸性状の測定方法

モデル雪は、R.L.Sackの研究と同様に低温下で水を圧搾空気で噴霧し、空気中の粉塵を核として形成された氷粒子である⁹⁾。このモデル雪は、図1に示す装置を-20℃に冷却した低温室に設置し、100 ml/minの水量を3～5気圧の圧搾空気によって噴霧して作製した。

1) 粒径の測定方法

モデル雪の粒径は、屋根葺材上に堆積した少量のモデル雪をマクロレンズを装着したカメラによって接写し、そのネガフィルムを用いて万能投影機(×100倍)で最大粒径を1/100mm単位で測定した。

2) 引張およびせん断強度の測定方法

屋根雪の滑雪現象を支配する要因には、屋根葺材、屋根形状および雪の物性に関わるもの等がある⁹⁾。雪の物性についてみると、引張強度およびせん断強度が滑雪現象に大きく影響を与える。モデル雪におけるこれらの強度を以下の方法で測定した。

モデル雪の引張およびせん断強度は、図2に示す実験装置を用いて測定した。最大引張荷重はA部、最大せん断荷重はC部にモデル雪が破断するまで荷重を加えて、それぞれの破断時の荷重 T_t 、 T_s をロードセルを介して測定した。さらに、破断後にA部およびB部の摩擦抵抗力 R を測定した。これらの値を用いて、モデル雪の引張強度 σ_t およびせん断強度 σ_s を下式で求めた。Sは断面積を示す。

$$\sigma_{t,s} = (T_{t,s} - R) / S$$

2.2 滑雪モデル実験

1) 屋根雪の固定条件および試験体概要

これまでの滑雪現象に関する研究によれば、部分的な滑雪現象は棟部の雪の引張抵抗力や屋根面の温度むらによる凍着強度の差異に大きく影響を受けている⁶⁾。これらの状況をモデル的に以下のような条件に想定し

た。これらの条件に従って、凍着現象や引張抵抗力によって発生する固定部分にモデル雪が移動しないようにワイヤラスを貼り付けて、図3に示すような試験体を作製した。

固定なし: 屋根面に温度むらが発生せず、温度上昇に伴い均一に凍着強度が低減する場合。また、棟部分に雪は堆積せず雪の引張抵抗力は発生していない。

1点固定: 屋根面には温度むらは生じていないが、棟部分に比較的多くの雪が堆積して雪の引張抵抗力が発生している。

2点固定: 屋根面の両端部(けらば)が低温となる温度むらが発生している場合。棟部分に雪は堆積せず雪の引張抵抗力は発生していない。

3点固定: 屋根面の両端部が低温となる温度むらが生じ、棟部分に比較的多くの雪が堆積して雪の引張抵抗力が発生している。

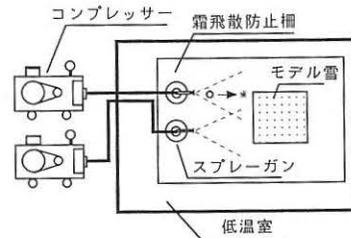


図1 モデル雪作製装置の概要

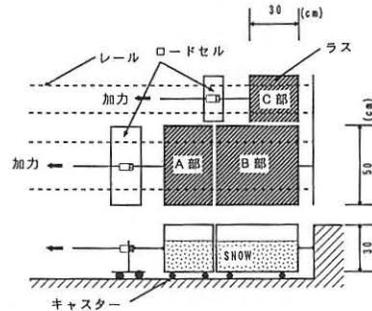


図2 引張およびせん断強度測定装置の概要

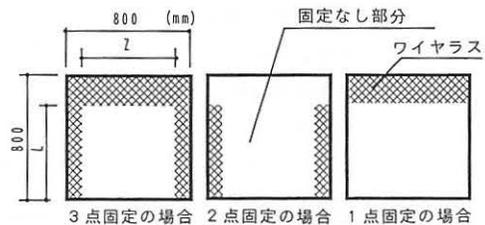


図3 試験体の概要

2) 実験シリーズおよび実験方法

実験は、表1のように膜材の他に比較材料としてフロート板ガラス、着色亜鉛鉄板（以下、試料CODEで示す）について行った。なお、実験勾配は、予備実験で滑雪が円滑に進んだ40(deg)について行った。滑雪実験は、各屋根葺材上にモデル雪を均一に5cm堆積させその表面に滑雪状況を観察するために10cm間隔で格子状のマーキングを行った。その後、-5°Cに設定した低温室内に所定の勾配に設定し、+10°Cまで低温室の温度を上昇させながらモデル雪の移動状況をタイムラプスビデオで観測した。実験中の各材料表面温度は熱伝対によって1分毎に測定した。各材料における動摩擦係数は、水平滑雪装置を用いて10×10×5cmのモデル雪ブロックを10mm/minの速度で移動させて測定した⁷⁾。

2.3 屋上積雪状況の調査対象とした膜構造物の概要

屋上積雪状況の調査は、図4に示す青森市屋内グラウンド（以下、「サンドーム」で示す）を対象に行った。サンドームのアリーナ部分はスパン65m、最大高さ24.2m、桁行長さ102m（膜部長さ84m）の円筒状である。屋根雪処理に関しては、室内の4ヶ所から膜面へ約50°Cの温風を吹き付け、融雪しながら滑雪させる方法を取っている¹⁾。なお、膜材はV字形に張られている。建設地の青森市における最大積雪深は209cmである。対象とした膜構造物の屋根上積雪状況の調査および管理者へのヒアリングは1994年1月に行った。同時に、調査時の気象資料を収集し、気象状況と調査結果とを対比した。

3. 実験結果

3.1 モデル雪の諸性状

図5にモデル雪の粒径分布を示す。図中には、小島の札幌における観測結果を合わせて示してある⁸⁾。図

のようにモデル雪の粒径は、札幌の雪に比較してやや大きな粒径分布となり、粒径0.6~0.8mmに最も多く分布している。

雪の諸性状の中で、屋根雪の滑雪現象に大きく影響を与える要因として引張強度とせん断強度とがある。本実験に用いたモデル雪の引張強度とせん断強度とをみると以下ようになる。図6に雪密度と引張強度との関係を示す。図中には、筆者および本間らの自然雪を対象とした値と本実験で用いたモデル雪の値とを合

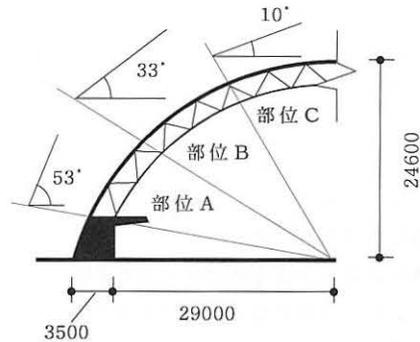


図4 調査対象とした青森市屋内グラウンドの概要

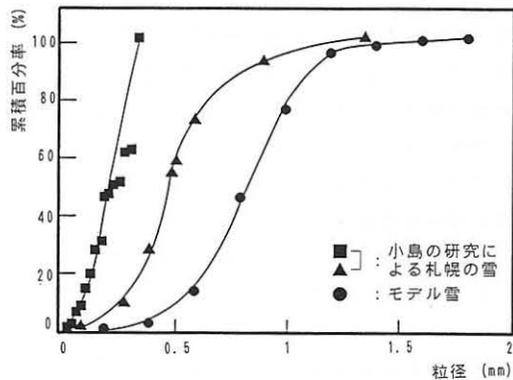


図5 モデル雪の粒径分布

表1 実験シリーズ

材料 CODE	材料名	動摩擦 係数	勾配 (deg)	固定方法			
				0点	1点	2点	3点
M	膜材 (4フッ化エチレンコーティングガラス繊維布)	●	40	●	●	●	●
P	着色亜鉛鉄板 (ポリエステル樹脂光沢)	●	40	●	●	●	●
FG	フロート板ガラス (材料厚5mm)	●	40	●	●	●	●

わせて示している^{6, 10)}。図のように、モデル雪の引張強度は自然雪における密度と引張強度との相関曲線上にほぼ位置している。図7に雪の密度とせん断強度との関係を示す。図のように、モデル雪のせん断強度は自然雪における密度とせん断強度との相関曲線近傍に位置しているが、自然雪よりもやや大きな値を示す。これらの結果をみると、滑雪実験に用いた密度0.26g/cm³程度のモデル雪の力学的性状は、同程度の密度の自然雪に近似していると考えられる。ただし、密度0.26g/cm³のモデル雪は、日本雪氷学会の雪質分類に従えば真冬の積雪層の大部分を占めるしまり雪(0.25~0.5g/cm³)に相当し、降雪直後の新雪密度(0.05~0.15)よりも大きな値となる¹⁰⁾。従って、モデル雪を用いた実験結果は降雪から何日か経った状態を示していると考えなければならない。

3.2 滑雪モデル実験結果

1) 屋根葺材の表面性状と滑雪状況との関係

膜材(M材)の固定なしにおける滑雪開始からの時間と移動距離との関係を図8に示す。なお、図中には比較のためにフロート板ガラス(FG材)、着色亜鉛鉄板(P材)を合わせて示してある。図のように滑雪開始直後の移動距離は、いずれの材料においても緩やかな増加傾向を示す。しかし、滑雪開始4分以後になると移動距離の増加が大きくなり、M材およびP材は一気に滑雪が終了する。これに対し、FG材は移動距離が大きくなるが緩やかな挙動を示しながら滑雪する。滑雪終了までに要する時間をM材に対する比率でみると、P材で1.24、FG材で1.74となり、屋根葺材の差異が見られる。なお、滑雪終了時の材料裏面温度は、いずれの材料においても0~+2℃であった。

渡辺らの研究によれば、屋根雪の滑雪状況は屋根葺材の表面性状に支配される¹¹⁾。ここで、屋根葺材の表面性状を表す表面粗さ、接触角および動摩擦係数と滑雪終了までの速度との関係をみると図9となる。なお、表面粗さおよび接触角は、筆者らのこれまでの研究によって得られた測定値とした¹²⁾。図のように、滑雪速度と接触角との関係をみると、接触角の増加に伴い滑雪速度が増加する傾向を示す。滑雪後の屋根葺材表面を観察すると、M材およびP材では水滴状に水が付着し、FG材では膜状に水が付着している。この付着した水滴および水膜が滑雪速度に大きく影響を与えていると考えられる。接触角は水との親和性を示し、その

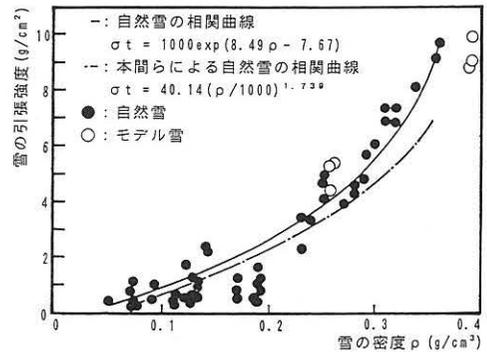


図6 雪の密度と引張強度との関係

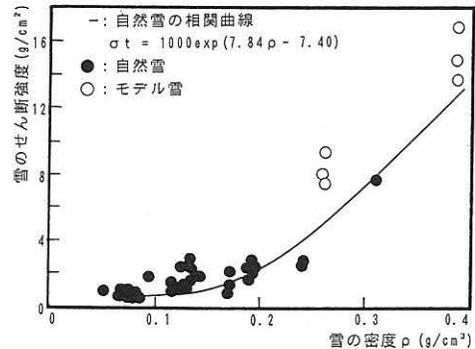


図7 雪の密度とせん断強度との関係

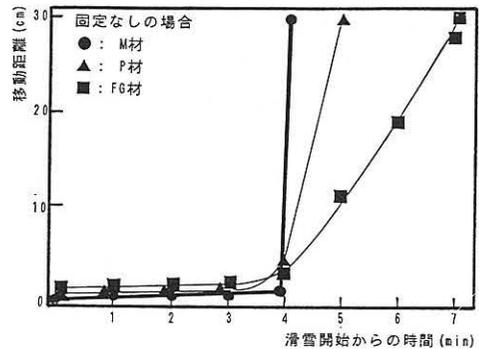


図8 滑雪開始からの時間と移動距離との関係

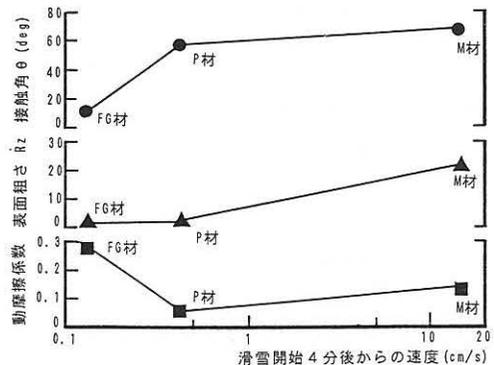


図9 屋根葺材の表面性状と滑雪速度との関係

値が大きい程水との親和性が小さく撥水性が大きくなる。従って、接触角の小さいFG材は水との親和性が大きいいため、膜状に付着した水の粘性抵抗力を受けて滑雪速度が遅くなっている。これに対し、接触角の大きいM材およびP材では屋根葺材表面で水が水滴状になろうとする力で互いに分離しやすくなり滑雪速度が遅くなっている。

滑雪速度と表面粗さとの関係を見ると、表面粗さが大きくなるに伴い滑雪速度が大きくなる傾向を示す。渡辺らの研究によれば、表面粗さが大きくなるに伴い滑雪抵抗力が大きくなり、滑雪しにくくなる。本研究においても、移動開始直後は表面粗さの小さいFG材の移動距離が大きく、表面粗さの大きいM材の移動距離が小さい傾向を示す。しかし、屋根葺材とモデル雪との間に十分に水が介在する状態になると、図8に示したようにM材は一気に移動距離を増し、落雪する。従って、屋根葺材の表面粗さは、滑雪開始後の挙動や推移に関係していると考えられる。また、一般に動摩擦係数が小さくなるに伴い滑雪速度が大きくなる。本実験結果においても同様の傾向が見られる。これらの結果を見ると、固定部分のない場合における膜材の滑雪は、滑雪開始直後は表面粗さが大きいいため緩慢な傾向を示す。しかしながら、膜材表面に水が介在する状態では、接触角の大きい膜材は澆水作用によって水の粘性抵抗力が小さくなり一気に滑雪すると考えられる。

2) 滑雪過程における変形状況

膜材（M材）の3点固定、勾配40degにおける滑雪の推移状況を写真2に示す。写真のように、固定されていない下方に顕著な変形が見られ、下方端部が巻だれ状に変形している。さらに、中央部にはクラックが発生している。一方、M材の固定部がない場合には、裏面温度が0～+2℃になるとモデル雪全体が徐々に移動し始め、その後一気に移動して滑雪が終了する。

本研究では、膜材を中心に3種類の屋根葺材について滑雪状況に関する検討を行った。その結果、最も顕著に部分的な滑雪現象が発生したものは、フロート板ガラス（FG材）であった。ここで、FG材の勾配40degを1例にタイムラプスビデオの画像を基に滑雪状況を模式的に整理すると図10となる。

図のように、上部のみを固定した1点固定の場合は固定されていない部分全体が下方に移動する。その後、固定部と固定していない部分との間に直線状のクラックが発生し、一気に移動して滑雪が終了する。両端部

を固定した2点固定の場合は、中央部全体が下方に移動しながら変形し、下方端部および固定部と固定していない部分との境界に縦方向のクラックが発生する。その後、下方端部の巻だれ部分から部分的な滑雪現象が見られる。両端および上部を固定した3点固定の場合は、固定されていない部分の下方に顕著な変形が見られ、中央部には複数のクラックが発生する。その後、クラックに添った放物線状の滑雪が見られる。このように、固定条件の差異によって滑雪状況が大きく異なっている。

顕著な変形が始まる材料の裏面温度をみると、いずれの固定条件においても0℃前後である。しかし、落雪の発生する裏面温度をみると固定なしの場合が0～+2℃で最も低く、1点固定で+3℃前後、2および3点固定で+6℃前後となり、固定数が多くなるに伴



写真2 滑雪モデル実験の一例

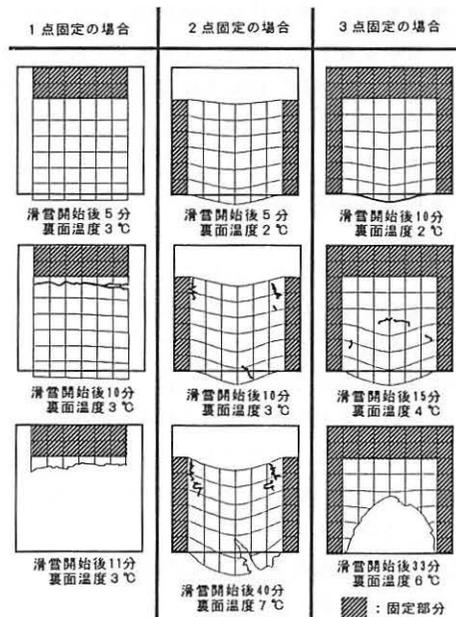


図10 滑雪状態の模式図

い滑雪終了時の裏面温度が上昇する傾向を示す。同様に、滑雪終了までに要する時間も固定数が多くなるに伴い長くなる。なお、これらの傾向は、M材の場合においても同様である。しかしながら、2および3点固定の場合になると、滑雪の推移が他の材料に比べて緩慢な傾向を示す。これらの結果をみると、膜材（M材）の場合は、他の材料に比べて固定条件に滑雪現象が支配されやすいと考えられる。

4. 調査結果および考察

サンドームの現地調査を実施した1994年寒候期の降積雪状況を図11に、外気温の状況を図12に示す。図のように、1月中旬から断続的な降雪が続き最大積雪深96cmとなっている。日降雪深10cm以上の日を見ると、日平均風速4m/s以上で平均気温が-4℃前後の場合が多く、強い吹雪が発生する状況下であった。現地調査は、暖房されている状況の中で1月20日～21日の2日間行った。この前後の気象条件は以下の通りであった。

- 1月19日：降雪深32cm，平均気温-5.6℃，
平均風速6.6m/s
- 1月20日：降雪深32cm，平均気温-3.8℃，
平均風速5.1m/s
- 1月21日：降雪深0cm，平均気温-3.0℃，
平均風速2.4m/s

屋根面を図4に示すように3つの部位に分けて滑雪状況を整理すると、平均屋根勾配が50°程度となる部位Aでは雪が堆積すると同時に滑雪現象が発生している。平均屋根勾配が30°程度となる部位Bでは、部位Aに比べて滑雪現象の発生がやや遅くなるが長時間膜面に雪が堆積することはない。平均屋根勾配が10°程度となる部位Cでは、写真3に示すように部分的な残雪がみられる。

管理者へのヒアリングにおいても、無暖房時に降雪があった場合でも平均屋根勾配が50°程度となる部位Aでは雪が堆積することがないとのことであった。部位BおよびCにおいても暖房開始後、1時間程度で降雪して部分的に若干の残雪がみられるとのことであった。この構造物では、室内の4ヶ所から膜面へ約50℃の温風を吹き付け、融雪しながら滑雪させる方法を取っている。この方法が有効に作用しているとのことであった。また、膜面近傍の温度は暖房時で20℃程度であろうとのことであった。

本調査で対象とした膜構造物は、膜材がV字状で連

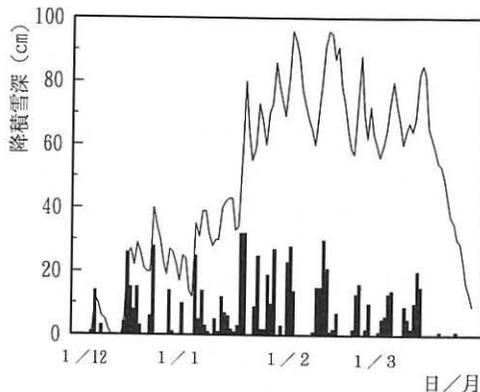


図11 寒候期の降積雪状況（青森市）

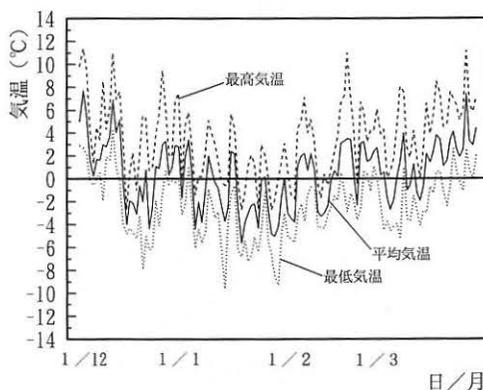


図12 寒候期の外気温状況（青森市）



写真3 膜構造物における部分的な残雪現象
(屋内より撮影)

続的に張られており各V字状部分での滑雪処理を行う形態となっている。この形態は、V字状の山の部分で屋根雪のつながりを絶つことから滑雪モデル実験の1点固定に対応していると考えられる。滑雪モデル実験

では、2および3点固定の場合は、滑雪しにくい傾向を示した。従って、大規模膜構造物の円滑な滑雪処理を考える場合、膜材との摩擦抵抗のみを考慮した固定なし、屋根頂部の雪の堆積+摩擦抵抗を考慮した1点固定の場合で滑雪処理を行うことが施設利用の面においても望ましいと考えられる。また、これらの固定条件は、膜材の張り方に大きな影響を受ける。従って、滑雪を積極的に行うためには、膜材の張り方に関する検討も重要な項目の1つと考えられる。

5. まとめ

本研究では、屋外観察結果に基づいて部分的な滑雪現象の発生要因となる棟部の雪の引張抵抗力および屋根面の温度むらによる凍着強度をモデル化し、モデル雪を用いた滑雪実験を行った。また、積雪地域に建設された膜構造物を対象に屋根上積雪状況の調査を行った。その結果、以下のような結果が得られた。

- 1) 滑雪終了に至るまでのモデル雪の変形は、固定条件によって大きく異なる。また、固定される部分の数が多くなるに伴い滑雪終了時の材料裏面温度が上昇し、終了までに要する時間も長くなり滑雪しにくくなる。
- 2) 固定される部位がない場合には、屋根葺材の表面特性に対応した滑雪現象が見られる。しかし、固定部分が発生すると屋根葺材による滑雪現象の差異が顕著にみられなくなる。
- 3) 固定部分が発生すると、滑雪抵抗力として屋根葺材と雪との界面に発生する諸抵抗力および上部雪の引張抵抗力の他に雪のせん断抵抗力や巻だれを考慮する必要がある。
- 4) 膜材の滑雪挙動は、フロート板ガラスや着色亜鉛鉄板に比べて、屋根面の温度むらや屋根頂部の雪の堆積状況に影響を受けやすい。従って、膜構造物の滑雪による雪処理を考える場合は、設計の段階でこれらの状況を十分に把握しておく必要がある。
- 5) 膜構造物の滑雪処理を考える場合は、膜材と屋根雪との界面に水が介在するように膜面近傍を20℃以上に保つ温度管理の検討が必要である。
- 6) 屋根雪の固定条件は、膜材の張り方に大きく影響を受ける。従って、滑雪を積極的に促すためには屋根雪の固定部位が発生しない膜材の張り方を検討することが重要である。膜材をV字状に張る方法も一

案であろう。

なお、本研究は能村膜構造技術振興財団研究助成金によって実施したものであります。

【参考文献】

- 1) 石井 一夫編：日本の膜構造・作品集，SPS出版，1993
- 2) 前田 博司：金属板屋根における積雪の滑落，日本雪氷学会誌「雪氷」第41巻3号，pp.39-44，1979.9
- 3) 絵内 正道他：積雪寒冷都市型アトリウム熱環境に関する研究—その1～4，日本建築学会北海道支部研究報告集，pp.317-329，1994.3
- 4) 佐野 武仁他：寒冷地に建つ膜構造物の環境実測（第2報，冬期），膜構造物研究論文集'91，No.5，pp.113-118，1991
- 5) Sack, R.L., et al., : Cold Room Studies for Sliding Snow, First International Conference on Snow Engineering, pp.199-209, 1988
- 6) 苫米地 司他：大規模構造物の滑雪メカニズムにする一考察，北海道の雪氷第13号，pp.54～57，1994.7
- 7) 苫米地 司他：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，pp.119-122，1993.1
- 8) 小島 賢治：顕微鏡による飛雪粒子の観測，低温科学，物理編，Vol.27，74-80，1969
- 9) 本間 義教他：膜構造物の雪処理に関する研究，膜構造物研究論文集'90，No.4，pp.55-68，1990
- 10) 日本雪氷学会：雪氷辞典，pp.215-225，1990
- 11) 渡辺 正朋他：屋根葺材と屋根雪の摩擦に関する研究—その2，日本雪氷学会誌第9号，pp.4-15，1988.12
- 12) 苫米地 司他：屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究，日本雪氷学会誌「雪氷」56巻3号，pp.215-222，1994.9
- 13) 渡辺 正朋：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，pp14-21，1990.6

A STUDY ON SNOW SLIDING ON THE ROOF OF A MEMBRANE STRUCTURE

Tsukasa Tomabechi *¹
Hideharu Yamaguchi *²
Masahiro Takakura *³

SYNOPSIS

The plan of a large structure may have problems related to the snow on the roof in a snowy area. Since most of large structures have slanted roofs, the establishment of a method has long been hoped for by which we can control snow sliding and make the snow slide down smoothly.

In this study we aim at a method of presuming snow sliding on the roof and making the snow slide down smoothly. We observed partial snow slides on a real roof. And then we analysed the results and made an indoor experiments on partial snow sliding by using snow models. We investigated a condition of snow on the roof of a large membrane structure in a snowy area. And then we examined the relation of the results to the weather conditions.

As a result, it became clear that partial snow sliding tends to occur easily either when the temperature of part of the roof is low or when there is much snow drift on the ridge. The roofing material and the shape of the roof have much to do with partial snow sliding.

*1. Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.

*2. Design Division, Taiyo Kogyo Corporation, M. Eng.

*3. Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hokkaido Institute of Technology