

フッ素樹脂製膜材の滑雪について（第1報）

北川 澄男 *1

黒木 仁昭 *2

梗 概

恒久建築膜構造物として、ガラス繊維布にフッ素樹脂をコートした複合膜材が諸外国をはじめ、日本でも実用化されるようになった。

しかしながら冬季の積雪に伴い、その雪の滑雪による膜材の表面状態がどのようになるかを報告している研究は少ない。

フッ素樹脂は非粘着性、低摩擦性、耐熱耐寒性など優れた特徴を有しており、このフッ素樹脂コートガラス繊維布複合膜材を利用することによって、屋根雪の処理に有効且つ多大な効果が期待できる。

1. 緒 言

近年に至っては中小規模および大規模で恒久的な膜構造建築物が日本国内においても本格的に普及の兆しがあり、実際、実験棟および商業用ベースとしてかなりの件数が建築されている。

そこに使用される膜材に関してもPVC（塩化ビニール）-ガラス繊維布、PVC-ポリエステル布、PTFE（四フッ化エチレン樹脂）-ガラス繊維布等の複合膜材が開発され、目的、規模、地域（立地条件）によってそれぞれ異なった形で使用されている。

本報告は多降雪・積雪地域における恒久膜建築構造物でのフッ素樹脂製膜材の利用において、四フッ化エチレン樹脂コートガラスクロス（以下 PTFEコートガラスクロスと略記）表面上での滑雪試験、それに基づくPTFEコートガラスクロスの表面状態、主に滑雪による摩擦・キズの発生の有無についての観察を行うことを目的とし、膜構造設計上の雪荷重の問題および雪害対策に効果を発揮するであろう”スベリ”の

観点から、初期段階としてPTFEコートガラスクロス表面上での人工的滑雪試験を行うとともに、実際、冬季のある期間、種々の傾斜勾配を有した試験骨組体を作製し、積雪に伴った膜材の観察を行った。

2. 試験方法

2-1 一定角度によるPTFEコートガラスクロス表面上での滑雪試験

図1、図2のような2種類の傾斜角度 20° 、 45° を有する骨組体を作製し、PTFEコートガラスクロス（以下 単に膜材と略記）を取出、新雪による人工的な滑雪試験を行った。

雪ブロックは膜材との接触面積 1500cm^2 、容積 0.045m^3 の枠を作り、なるべく自然の状態に近いような形態で雪ブロックを作る。雪密度の測定は雪ブロック作製後、内容積 500cm^3 の円筒で雪サンプルを取り、重量を測定し雪密度を算出する。

* 中興化成工業㈱ *1 研究開発部

*2 営業本部

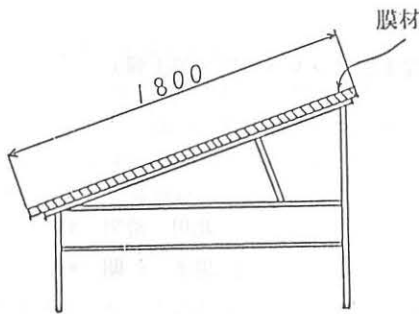


図1 $\theta = 20^\circ$ 、巾=600 mm

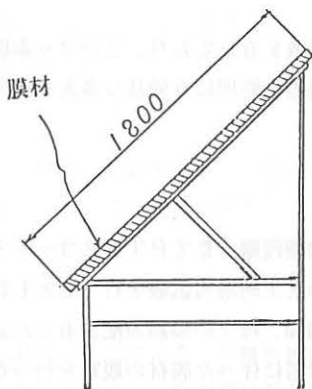


図2 $\theta = 45^\circ$ 、巾=600 mm

表面状態観察用サンプリング時の滑雪回数はそれぞれの傾斜角度で100回とし、膜材表面の観察は電子顕微鏡で行った。また滑雪距離は雪ブロックの接触面積中心から1500 mmの距離である。

2-2 初期滑り角度 (θ) の測定 (雪と膜材表面との静摩擦係数 μ_s の算出)

(イ) 人工的雪ブロックによる測定

図3のように平板に膜材を貼りつけ、雪ブロックを作製し、長手方向の一辺を徐々に持ち上げ、雪ブロックが滑り出す瞬間の高さを測定し、初期滑り角度を算出する。

又この初期滑り角度 (θ) をもって雪と膜材との静摩擦係数 μ_s ($\tan \theta$) を算出する。

この時の雪質は新雪であり密度が 0.15 g/cm^3 であった。

試験実施場所は秋田県仙北郡神岡町で行った。

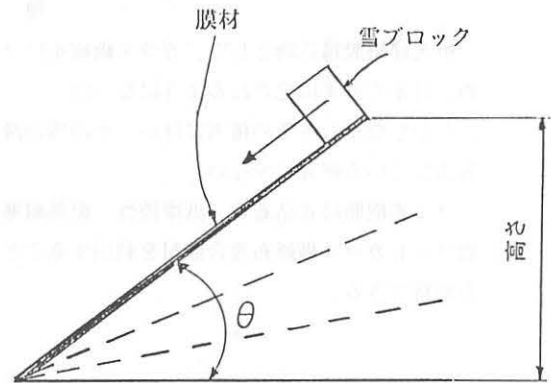


図3 初期角度測定図

(ロ) 自然の積雪に伴う測定

(イ) においては人工的に新雪の雪ブロックを作製し、その時の μ_s の算出を行った。この試験は平板に膜材を貼りつけた後に、自然の降雪に伴い、ある時刻における積雪の滑雪角度から μ_s を算出するものであり、雪密度、気温等の影響についての考察を行うための試験である。

尚、この試験は新潟県上越市で行った。

2-3 各傾斜角度による積雪および滑雪状況観察

傾斜角度 27° （5寸勾配）、 21° （4寸勾配）、 17° （3寸勾配）に設定した骨組体に膜材を貼りつけ、その上に積雪する雪の量、雪密度、各温度を測定するとともに滑雪状況の観察を行った。

雪密度、積雪量は2～3時間間隔で測定し、気温、膜温、雪中温度は10～30分毎に自動測定を行った。

雪の密度は2-1の試験と同様の円筒を使用し、積雪した雪に差し込み、容積 500cm^3 の雪の重量により算出した。

試験体での膜材のサイズは $1\text{m}\times 2\text{m}$ 、厚み 0.8mm のものを使用し、膜面温度は図4のように設置した。尚、この試験は新潟県上越市で行った。

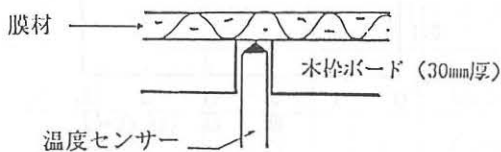


図4 膜温センサー設置図

3. 結果および考察

3-1 滑雪後の膜材の表面状態観察

2-1の試験は滑雪による膜材表面の状態を知る上で重要な試験である。つまり表面写真を観察すると摩耗・キズの発生は何ら確認されず、極端な言い方をすればガラスクロス剥き出しによる液浸透による強度低下等の懸念も考えられない。

各条件としては滑雪角度 20° の場合、雪質：新雪、雪密度： $0.15\text{g}/\text{cm}^3$ 、滑雪重量：約 8kg 、滑雪角度： 45° の場合、雪質：ざらめ雪、雪密度： $0.44\text{g}/\text{cm}^3$ 、滑雪重量：約 25kg であり、滑雪角度、雪質による変化はみられず、初期状態を保ちPTFEの初期の特性を損なうということはない。

写真1は未滑雪膜材の表面写真、写真2は滑雪角度 20° 、滑雪回数100回後の表面写真、写真3は滑雪角度 45° 、滑雪回数100回後の表面写真であり何れも倍率500倍の電子顕微鏡写真である。

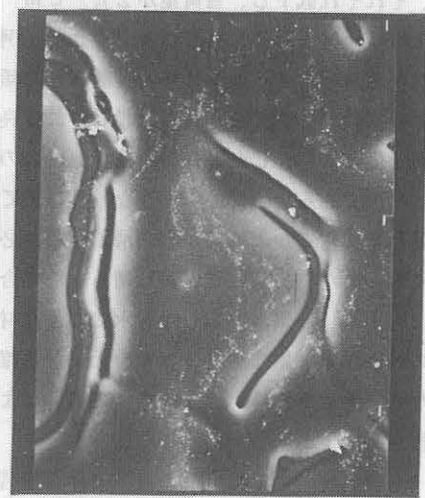


写真1 未滑雪の表面写真

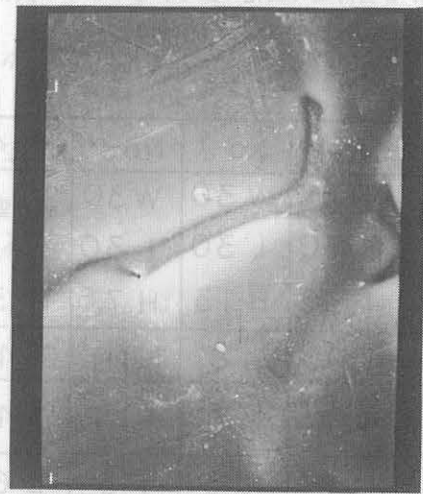


写真2 $\theta = 20^{\circ}$ の滑雪後の表面写真

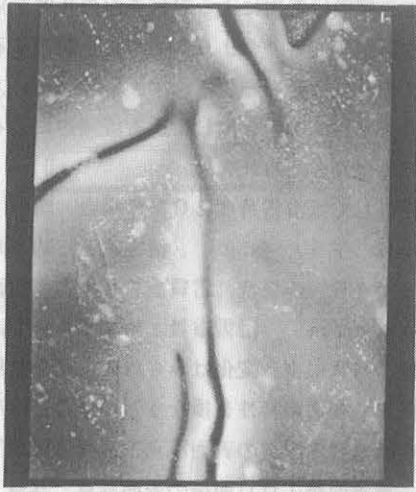


写真3 $\theta = 45^\circ$ の滑雪後の表面写真

3-2 初期滑り角度 (θ) の算出 (μ_s の算出)

2-2-(イ) の試験において密度が 0.15 g/cm^3 である新雪ブロックを作り、膜材表面にかかる雪荷重の変化により、どのように変化するか測定した。

表1 θ と μ_s の関係

	No.1	No.2	No.3	No.4
雪体	W 30	W 30	W 30	バラ雪
寸法	L 30	L 30	L 30	
cm	H 30	H 13	H 7.5	H 3
重量 kg	4.05	1.8	1.01	0.4
面圧 gf/cm^2	4.5	2.0	1.12	0.44
θ ($^\circ$)	11	13	13	26
μ_s	0.194	0.230	0.230	0.488

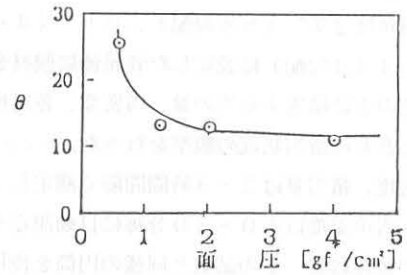


図5 面圧と θ の関係

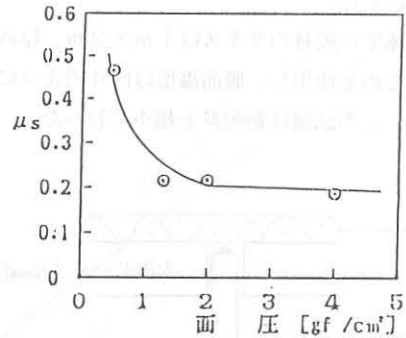


図6 面圧と μ_s の関係

表1および図5、図6にその結果を示した。その結果、秋田県の中央部に位置する仙北郡神岡町の雪質による θ 、 μ_s は人工雪ブロックでは雪荷重が増加するとともに、それぞれ低下し、雪荷重が 2 g/cm^2 以上になるとほぼ一定した値を得ることができた。例として雪荷重が 4.5 g/cm^2 の場合、膜構造の傾斜（あるいは接線傾斜）を 10° 以上に設計すれば良好な自然滑雪を促進する。しかしシェル構造ドームの頂上部はほぼ平面であるためにこのような見解はあてはまらないとして、何らかの外部からの滑雪手段が必要になってくる。また、自然に雪が降り積もった場合、雪の密度、含水率、外気温あるいは含水による膜材表面と雪との表面張力、風の影響と様々な因子が複雑に影響するため、地域的あるいは立地条件の違いによるデータ蓄積が必要である。

2-2-(ロ) においては自然の降雪に伴う積雪において、平板上に膜材を取り付け、冬季のある時刻において初期角度および μ_s を算出する試験である。

この試験は2-2-(イ)とは異なり、自然の状態
で確認したため雪片中の水の表面張力等により若干高
い値になっており、試験実施場所も海岸部であるため
かなりの水分を含んでいるものと判断される。

表2 滑雪試験結果

時刻	2.20	2.27	3.2	3.7
	16:50	11:00	13:00	11:00
積雪量 cm	9.5	18.5	47.5	12.5
ρ g/cm ³	0.270	0.180	0.104	0.320
面圧 gf/cm ²	2.565	3.24	4.89	4.00
θ (°)	30.54	26.10	21.31	18.26
μ_s	0.59	0.49	0.39	0.33
気温℃	1.7	0.8	2.1	4.5
膜温℃	1.7	2.1	1.5	3.8
雪温℃	1.8	0.6	1.1	0.2

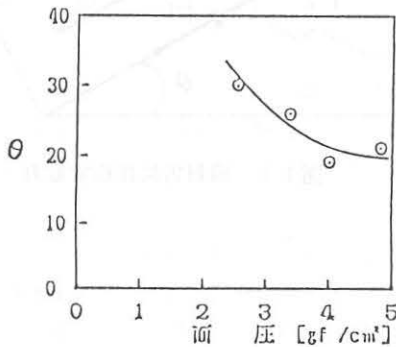


図7 面圧と θ の関係

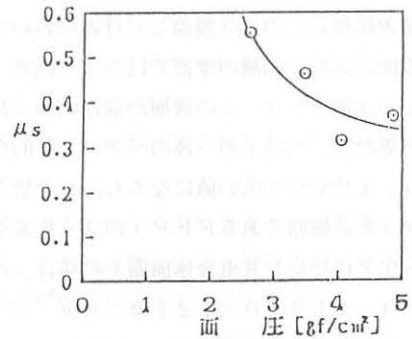


図8 面圧と μ_s の関係

表2、図7、図8にそれぞれのデータを掲載した。
又、気温および膜温と静摩擦係数 μ_s の関係を図9
に示した。その結果、気温の1℃を境にし特異な現象
が表れている。つまり1℃付近までは雪片の水の表面
張力により μ_s は高くなっているが、それ以上の温度
になると水の量が多くなり一種の潤滑効果の役割を果
たしているものと判断される。

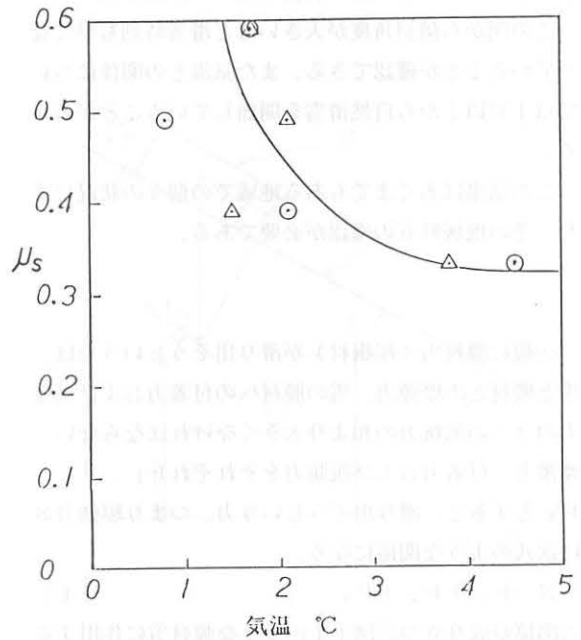


図9 気温と μ_s の関係

動摩擦係数 μ_k の値は膜温 2°C 付近においては雪と膜材表面は固層-固層の摩擦ではなく、固層-液層-固層という形をとり、この液層が前述の如く潤滑的な役割を果たし、雪粒子が一種のベアリング的な役目をし、 μ_s よりかなり低い値になるものと予想される。同じフッ素系樹脂である FEP（四フッ化エチレン・六フッ化プロピレン共重合体樹脂）の場合、 μ_k は雪密度 $0.118 \sim 0.121 \text{ g/cm}^3$ 、含水率 5.2% 、滑り速度 8 cm/sec で $\mu_k = 0.12 \sim 0.13$ という値が確認されている。

更に 2-2-(イ)、(ロ) を比較すると、人工的に雪ブロックを作製した結果と自然堆積した場合とはかなり異なっており、2-2-(ロ) の試験は雪片の膜材表面への雪の付着力の度合いを表している。

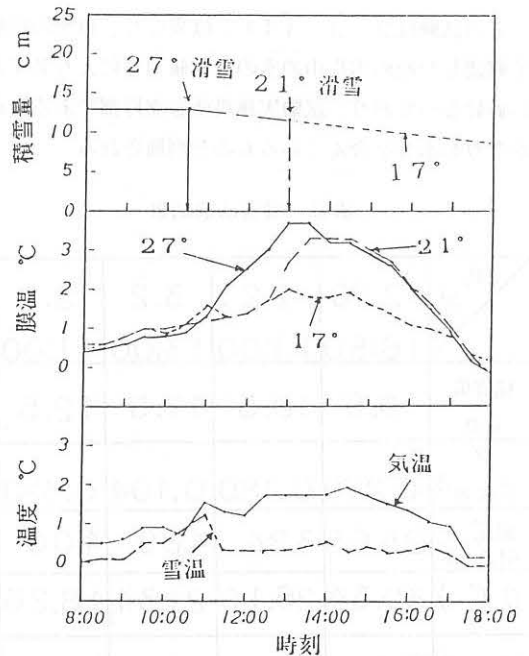


図 10 各温度と積雪の関係

3-3 各傾斜角度における滑雪

図 10 に試験期間のある一日の積雪および滑雪の結果を示した。尚この図の状況は夜のみ降雪があった。

この図から傾斜角度が大きいかほど滑雪時刻も早くなっていることが確認できる。また気温との関係については 1°C 以上から自然滑雪を開始していることがわかる。

この結果はあくまでもある地域での個々の状況により、その地域特有の確認が必要である。

一般に膜材雪（屋根材）が滑り出そうという力は、雪と膜材との摩擦力、雪の膜材への付着力および抗張力の 3 つの抵抗力の和より大きくなければならない。摩擦力、付着力および抗張力をそれぞれ F_1 、 F_2 、 F_3 とすると、滑り出そうという力、つまり駆動力 S は次式のような関係になる。

$$S > F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

の関係が成り立つ。図 11 のような膜材雪に作用するそれぞれの力を分解すると

$$S = L h \rho \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$F_1 = L h \rho \mu_s \cdot \cos \theta \quad (3)$$

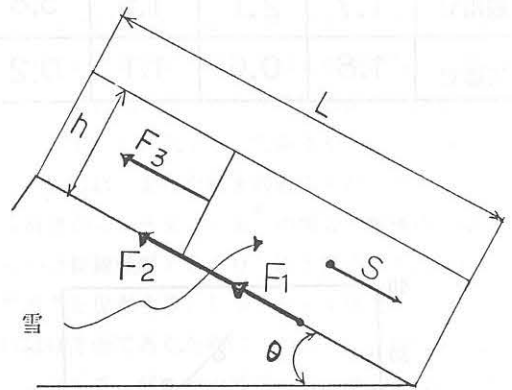


図 11 膜材雪に作用する力

$$F_3 = h \sigma_t \quad (4)$$

となる。ここで

ρ : 密度

μ_s : 静摩擦係数

τ_f : 単位面積当たりの雪の付着力

σ_t : 単位面積当たりの雪の抗張力

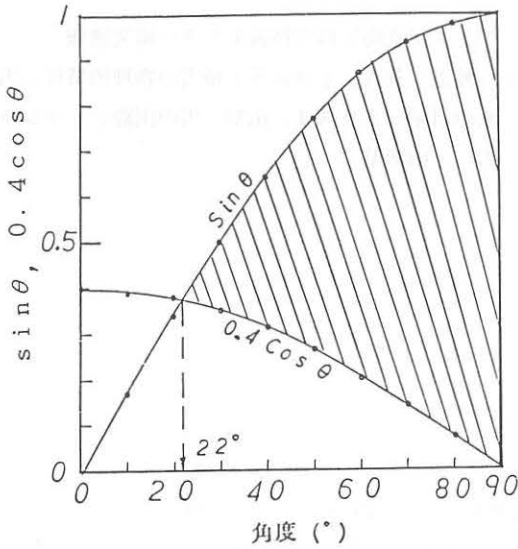


図12 膜材を滑雪させるために必要な勾配

式(2)、(3)、(4)を式(1)に代入すると

$$Lh\rho \cdot \sin\theta > L\tau_r + Lh\rho\mu_s \cdot \cos\theta + h\sigma_t \quad (6)$$

となる。

雪が滑り出すときは日照や暖房効果により付着力が0の場合に滑雪するため、式(6)は次のように変形できる。

$$Lh\rho \cdot \sin\theta > Lh\rho\mu_s \cdot \cos\theta + h\sigma_t \quad (7)$$

となる。 σ_t について密度 ρ の雪の単位面積当たりの抗張力の上限として次の関係式が求められている。

$$\sigma_t = 10 (3.2 \cdot \log \rho + 4.3) \quad (8)$$

式(8)を式(6)に代入し雪が滑り出す初期角度を算出できる。しかし今回の試験においては積雪全体が滑雪し、試験骨組体の構造から抗張力を0と考がえられる。

仮に積雪 $h = 30 \text{ cm}$ 、長さ $L = 200 \text{ cm}$ 、雪の密度 $\rho = 0.1 \text{ g/cm}^3$ 、静摩擦係数 $\mu_s = 0.4$ と仮定した場合、次の関係式を求めることができる。

$$\sin\theta > 0.4 \cos\theta \quad (9)$$

この解を図12に示した。その結果、上記条件においては傾斜角度を少なくとも 22° 以上にしななければならないことが分かる。

また、膜材に積雪した雪がある高さから飛び出し、どの付近まで飛跡するのか、いわゆる飛距離の計算を行った。

今回の試験において図10のときの飛距離を計算する。

今、図13のようなモデルを考え、庇先端での滑雪速度(V_0)を初速度として、放物運動を行うとすれば、その飛距離は次式ようになる。

$$A = \frac{V_{0x} (\sqrt{2gH + (V_0 \sin\theta)^2})}{g} - \frac{V_{0x} (V_0 \sin\theta)}{g} \quad (10)$$

ここで $V_{0x} = V_0 \cos\theta$

$$V_0 = \sqrt{2gD(\tan\theta - \mu_k)}$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

μ_k : 動摩擦係数

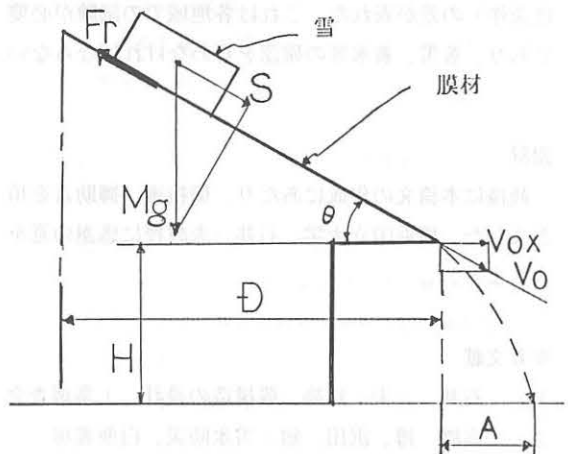


図13 膜材からの雪の飛距離計算式図

図10の27°勾配時について考察すると、

$$D = 1.78 \text{ m}$$

$$\theta = 27^\circ$$

$$H = 1.5 \text{ m}$$

$$\mu_k = 0.12$$

ここで μ_k は雪とFEPとの動摩擦係数をあてはめて計算すると飛距離 $A = 1.4 \text{ m}$ となる。

これは高さ、角度、長さ等が全く小さいためにこの程度の値になるが、大規模な構造物においてはかなりの飛距離が予想され、周辺の安全性を考慮にいれなければならない。

4. 総括

以上のような四フッ化エチレン樹脂コートガラスクロス膜材の雪による界面現象の観察を行った結果、

(1) 雪の滑落後の膜材表面は何ら変化は見られなかった。

(2) 実際の冬季の雪害対策においては膜材表面のフッ素樹脂の特徴である非粘着性、低摩擦性のため、スムーズに自然降雪を促すことができた。

(3) 基本的に今回の試験により初期降雪角度の測定を行ったが、地域的に差がみられ、雪質、環境(立地条件)の差が表れた。これは各地域での試験が必要であり、着雪、着氷等の確認を行わなければならない。

謝辞

最後に本論文の作成にあたり、御指導、御助言を頂きました、横浜国立大学 石井一夫教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石井 一夫: 建築 膜構造の設計、工業調査会
- 2) 高橋 博、沢田 勉: 雪氷防災、白亜書房
- 3) 前田 博司、沢田 和明、1977: 屋根雪に関する基礎的研究(その2)、昭和52年度日本建築学会大会学術梗概集、No. 2184
- 4) 栗山 弘、1984: 湿雪地域における道路・交通標識の着雪防止(機能性含ふフッ素高分子の利

用)、国立防災科学技術センター研究速報

- 5) 渡辺 善八、1985: 積雪の物理的特性、雪氷の科学-1984、山形、雪の国際シンポジウム、山形県

