

# A種膜材料の表面性状が屋根雪の滑雪特性に与える影響について

山口 英治\*1

伊東 敏幸\*2

苔米地 司\*3

## 梗 概

本研究では、A種膜材固有の滑雪特性を明らかにすることを目的に実験を実施した。実験は、代表的な5種類のA種膜材を対象として静摩擦および動摩擦について滑雪面に介在する水分量を変えた実験を実施した。さらに、この実験結果を用いてA種膜材の表面性状との関係を検討するため、表面粗さおよび撥水性を示す接触角について測定を行った。その結果、A種膜材の滑雪傾向は、他の屋根材料と異なり滑雪面に介在する水分量が少ないほど滑雪に有効的であることが明らかになった。従って、A種膜材は、滑雪面に介在する水分量の影響を受けるため、エネルギーの投入方法やその制御方法について十分に検討する必要がある。

## 1. はじめに

膜構造建築物は、東京ドームなどにみられるように不燃性、耐候・耐久性、防汚性などに優れたA種膜材（四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布）が用いられている。A種膜材は、透過性に優れているため明るい空間を創り出すことが可能である。このため1980年代後半から膜構造建築物の建設が増えつつある<sup>1)</sup>。このような中、積雪地域にも建設が進み、現在も北海道、秋田県および石川県などに膜伏面積12,000～24,000m<sup>2</sup>前後の大規模な膜構造建築物が建設中である。

これらの膜構造建築物は、(社)日本膜構造協会（以下「膜協」という。）に登録されている膜材を使用している。膜協に登録されている膜材は、コーティング材や繊維布の違いによりA、B、Cと3種類に分類されている<sup>2)</sup>。A種膜材は、膜協に数十種類登録されており、各製造メーカーによって繊維の太さ、糸密度、コーティング材の配合物など膜協登録の技術基準値内でやや異なっている。このため同じA種膜材でも表面性状に差が生じ、屋根雪の滑雪特性に影響を与えていると考えられる。

これまでのA種膜材の滑雪特性に関する研究をみると、数種類のA種膜材を対象とした研究は、石井による研究報告のみである<sup>3)</sup>。膜構造建築物が積雪地域に普及し始めている現状を考えると、各A種膜材の滑雪特性を明らかにしておくことが重要と考える。

膜構造建築物は、膜材の優れた光の透過性を確保するため、屋根雪処理を行っている。屋根雪処理をみると、屋内側から膜面に温風を吹きつけるなど熱エネルギーを与えて滑雪させる処理方法が一般的に採用されている<sup>4)</sup>。従って、屋根雪は、融雪による融雪水の影響を受けて滑雪することとなる。

本研究では、A種膜材の滑雪特性を明らかにすることを目的に滑雪面に介在する水分量を変えた実験を実施した。実験は、代表的な5種類のA種膜材を対象として屋根雪の滑雪開始に関わる静摩擦、滑雪持続に関わる動摩擦について行った。さらに、この実験結果を用いて膜材の表面性状との関係を検討するため、表面粗さおよび撥水性を示す接触角について測定を行った。

## 2. 研究方法

### 2.1 静摩擦に関する実験

\*1北海道工業大学 大学院生・工修 \*2北海道工業大学建築工学科 講師・博士（工学） \*3北海道工業大学建築工学科 教授・博士

静摩擦実験は、写真1に示す滑雪装置を用いた。本滑雪装置は、滑動挙動の観察や滑雪角度の測定が容易なことから傾斜平板法を採用した。実験は、試料材上に置いた雪モデルを滑雪させて、その角度をスラントルールで読みとった。実験温度は、凍着強度が緩和された状態を想定して0℃で行った。静摩擦係数 $\mu_s$ は、下式より求めた。

$$\mu_s = W \sin \theta / W \cos \theta = \tan \theta$$

W：雪モデルの重量  $\theta$ ：滑雪角度

雪モデルは、図1に示すように氷板(100×100mm)に人工雪を厚さ10mm附着させて作製した。人工雪は、写真2に示すように氷ブロックを電動カンナで削って作製した。人工雪の密度は、0.25g/cm<sup>3</sup>であった。

滑雪面に介在する水分量の影響を検討するため、雪モデルに霧吹きで0℃の水を吹き付けて含水量を種々に変化させて実験を行った。なお、吹き付けた水分量は、雪モデルの重量を測定して求めた。

## 2.3 動摩擦に関する実験

動摩擦実験は、図2に示す水平滑雪装置を用いて行った。実験は、図のように試料材上に置いた雪モデルを水平移動させて、雪モデルと試料材との界面に発生する抵抗力をロードセルで測定した。なお、雪モデルおよび実験温度は、静摩擦実験と同様である。

これまでの動摩擦係数に関する研究をみると、動摩擦係数は、滑雪速度に依存し50mm/min以上の速度になると大きな変化がみられない傾向を示している<sup>5)</sup>。このようなことから本実験では、雪モデルの移動速度を60mm/minとした。動摩擦係数 $\mu_k$ は、発生した抵抗力を雪モデルの重量で除した値とした。

滑雪面に介在する水分量の影響を検討するため、静摩擦実験と同様に雪モデルに霧吹きで0℃の水を吹き付けて含水量を種々に変化させて実験を行った。

## 2.4 表面性状の測定

### (1) 表面粗さおよび接触角の測定

表面粗さの測定は、試料材を5cm×5cmの大きさに切除した測定用試験片を用い、触針式粗さ測定装置にて中心線平均粗さRa、十点平均粗さRzについて測定を行った。

接触角の測定は、表面粗さ測定と同様の大きさの試

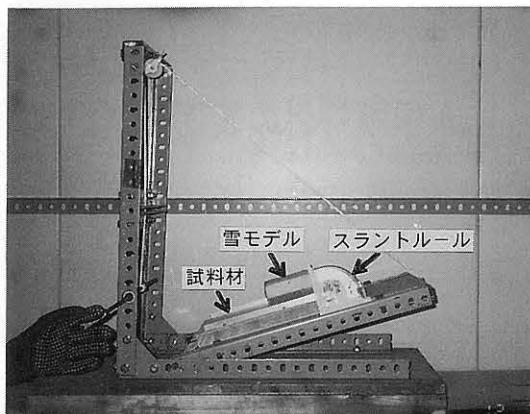


写真1 静摩擦実験に用いた滑雪装置

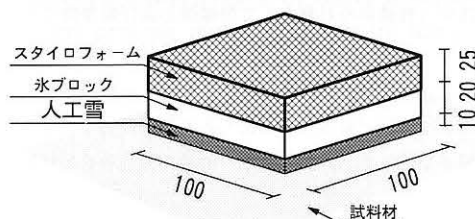


図1 雪モデルの概要

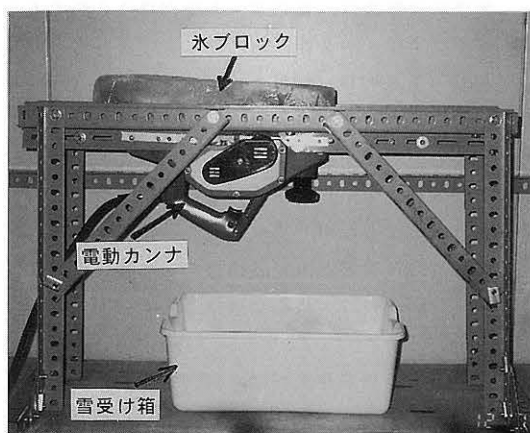


写真2 人工雪作製装置

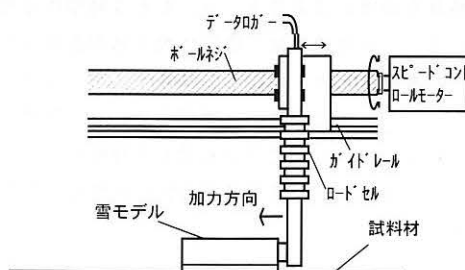


図2 動摩擦実験に用いた水平滑雪装置

験片を用い、自動接触角計にて液滴形状が安定する60秒後に測定した<sup>6)</sup>。測定用の液体には、蒸留水を用いた。

## 2.5 実験シリーズ

表1に静摩擦、動摩擦実験および表面粗さ、接触角測定の実験シリーズを示す。実験は、5種類のA種膜材(新品)と9年間屋外暴露を行ったA種膜材を中心に比較材料(新品)としてフロート板ガラス:FG1、低光沢ポリエステル塗装銅板:P1、光沢ポリエステル塗装銅板:P2、PFAフッ素樹脂銅板:P3を用いて実施した。M1およびM4は、A種膜材の中で最も引張強度が大きく、大規模膜構造建築物に多く用いられている膜材である。膜材の引張強度で比較すると、M1、M4>M2>M3、M5となる。

9年間屋外暴露を行ったA種膜材は、1987年～1996年において北海道・札幌市にある北海道工業大学構内で写真3に示す滑雪実験を行った膜材である。なお、融雪・滑雪実験を行った期間は、1987、1988年および1990、1991年の4冬期間である<sup>7), 8)</sup>。他の期間は、試験体を10°、20°、25°、30°と角度を変え無暖房状態で設置していた。

## 3. 研究結果

### 3.1 静摩擦に関する実験結果

膜材は、繊維織物のため繊維方向として縦糸と横糸に分けて材料性能の評価が行われている。繊維の織り方をみると、縦糸方向と横糸方向では糸密度が異なっているため、両者の表面粗さは異なっていると考えられる。これまでの膜材の滑雪特性に関する研究をみると、縦糸方向と横糸方向とを対比した研究は行われていない。このようなことから本実験では、膜材の縦糸方向と横糸方向とについて実験を行った。

図3、図4、図5に、M1、M1-9、M4の滑雪界面の含水量を徐々に増加させた場合の静摩擦係数の変化状況を示す。図のように、各A種膜材の静摩擦係数は、含水量が増加するに伴い増加する傾向を示す。さらに、縦糸方向と横糸方向との傾向を比較すると、ほぼ同様の傾向を示す。従って、A種膜材は、繊維織物であるが繊維方向による滑雪抵抗力の差異は少ないと考えられる。

膜材は、滑雪方向として横糸方向が主に用いられていることから、横糸方向におけるA種膜材の含水量の

増加と静摩擦係数との関係について示すと、図6となる。図のように膜材の静摩擦係数は、黒塗りのM1、M2、M3と白塗りのM4、M5の2つの傾向に分けることができる。図中黒塗りの静摩擦係数 $\mu_s$ は、 $\mu_s=0.23\sim0.30$

表1 実験シリーズ

●: 実験例, —: 実験例なし

| 試料<br>No. | 実験<br>および<br>測定<br>試料名 | 静<br>摩<br>擦<br>実<br>験 | 動<br>摩<br>擦<br>実<br>験 | 表<br>面<br>粗<br>さ<br>測<br>定 |    | 接<br>触<br>角<br>測<br>定 |
|-----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----|-----------------------|
|           |                        |                       |                       | Ra                         | Rz |                       |
| M1        | 膜材 1                   | ●                     | ●                     | ●                          | ●  | ●                     |
| M1-9      | M1の9年屋外暴露材             | ●                     | ●                     | ●                          | ●  | ●                     |
| M2        | 膜材 2                   | ●                     | ●                     | ●                          | ●  | ●                     |
| M3        | 膜材 3                   | ●                     | ●                     | ●                          | ●  | ●                     |
| M4        | 膜材 4                   | ●                     | ●                     | ●                          | ●  | ●                     |
| M5        | 膜材 5                   | ●                     | ●                     | ●                          | ●  | ●                     |
| FG1       | フロート板ガラス               | ●                     | —                     | ●                          | ●  | ●                     |
| P1        | 低光沢ポリエステル銅板            | —                     | ●                     | ●                          | ●  | ●                     |
| P2        | 光沢ポリエステル銅板             | ●                     | —                     | ●                          | ●  | ●                     |
| P3        | PFAフッ素樹脂銅板             | ●                     | —                     | ●                          | ●  | ●                     |

注): M1-9は、表面を蒸留水を用いて柔らかい布で汚れを拭き取って実験を行った。



写真3 滑雪実験の状況

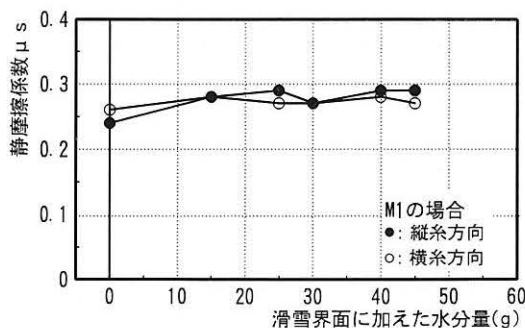


図3 M1における滑雪界面の含水量と静摩擦係数との関係

の値を示し、図中白塗りの静摩擦係数  $\mu_s$  は、 $\mu_s = 0.13 \sim 0.21$  の値を示す。このように同じA種膜材でも静摩擦係数の値が異なる傾向を示す。この現象は、A種膜材の表面粗さが各々異なっているため、各A種膜材固有の表面粗さ特性によるものと考えられる。

M1-9の静摩擦係数の傾向をみると、水分量の増加に伴い増加する傾向を示すが、M1よりも常に小さな値を示す。特に、水分量0gのときの静摩擦係数は、M1の半分の値を示す。M1-9は、9年間にわたり屋外暴露実験を行っていたため、風や積雪荷重などの影響を受け、初期状態に比べ表面状態に変化が生じたためと考えられる。M1-9の表面状態を観察するため、電子顕微鏡で膜材の表面を撮影した。写真4に示すように、M1-9の表面は、傷もなく劣化している状態はみられなかった。これまでの強制滑雪実験によるA種膜材の摩耗試験結果をみると、本実験結果と同様に膜材の表面劣化は確認されていない<sup>(9), (10)</sup>。このように、表面状態に変化がみられないが、上述の静摩擦実験結果で異なる傾向を示すことから、何らかの影響を受け少しずつ表面状態が変化していると考えられる。従って、滑雪性を評価するためには、膜材の表面粗さを検討することが重要と考える。

図7に比較材料における滑雪界面の水分量を徐々に変化させた場合の静摩擦係数の変化状況を示す。なお、図中には、M1, M4の実験結果を加えている。図のように、比較材料は、FG1:含水量0g, P2:含水量20g, P3:含水量10gで静摩擦係数の最大値を示し、その後、水分量が増加するに伴って減少する傾向を示す。このように、膜材と比較材料の静摩擦係数の傾向は、滑雪面に介在する水分量で異なることが明らかとなった。

ここで、雪モデルの滑雪面の界面状況をみると、含水量が40gを超えると雪の溶け方が促進され、余剰の水分量が観察された。粘性流体の法則によると、2つ

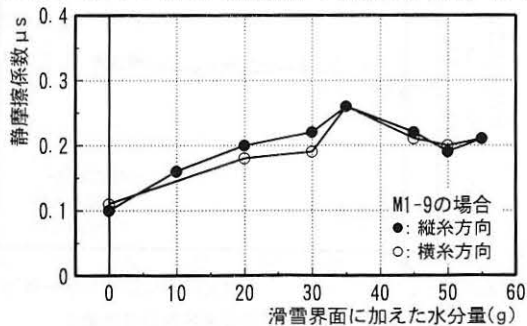


図4 M1-9における滑雪界面の含水量と静摩擦係数との関係

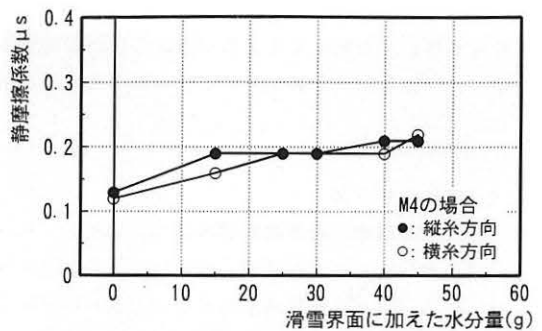


図5 M4における滑雪界面の含水量と静摩擦係数との関係

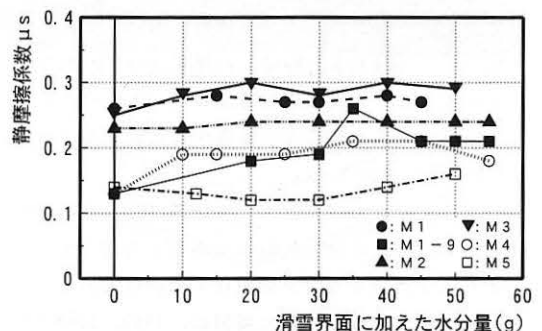


図6 横糸方向におけるA種膜材の滑雪界面の含水量と静摩擦係数との関係

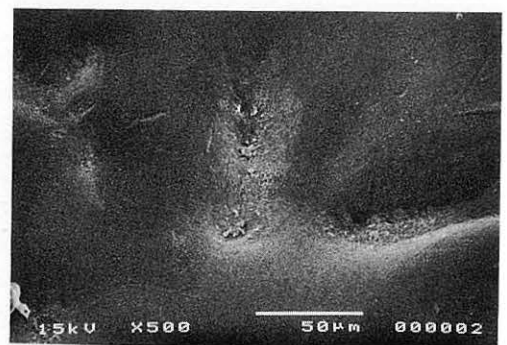


写真4 M1-9の表面状態 (倍率: 500倍)

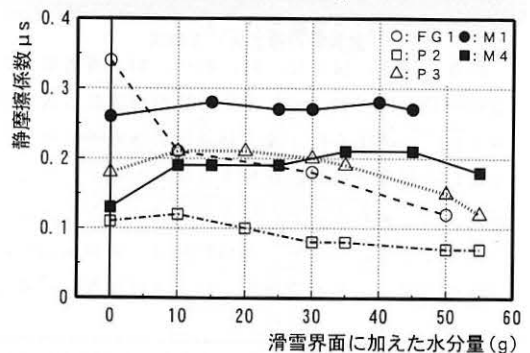


図7 比較材料における滑雪界面の含水量と静摩擦係数との関係

の平板間に水膜が介在する場合、水膜の厚さが大きくなるほど平板を接線移動させるために必要な力は小さくなる<sup>11)</sup>。従って、一様な水膜が介在する場合、屋根雪の滑雪は材料表面の粗さ成分を超える水膜に影響を受けると考えられる。すなわち、材料表面の粗さ成分を埋めつくすまでに至らない水分量では、含水量の増加に伴い静摩擦係数が増加し、それ以上の水分量になると、静摩擦係数は減少すると考えられる。このことから判断すると、表面が平滑な比較材料は、表面が粗い膜材とは逆に水分量が0 gや少ない場合に滑雪しづらく、水分量が増加するほど滑雪しやすい材料と考えられる。

### 3.2 動摩擦に関する実験結果

動摩擦実験も静摩擦実験と同様に縦糸方向と横糸方向とを比較検討するため、両者について実験を実施した。

図8、図9、図10に、M1、M1-9、M4の滑雪界面の水分量を徐々に増加させた場合の動摩擦係数の変化状況を示す。図のように、動摩擦係数は、M1：含水量30 g、M1-9：含水量40 g、M4：含水量45 gまで含水量の増加に伴い増加して、その後、減少する傾向を示す。縦糸方向と横糸方向との傾向を比較すると、ほぼ同様の傾向を示した。この傾向は、静摩擦係数と同様の実験結果となった。

図11に、横糸方向におけるA種膜材の含水量の増加と静摩擦係数との関係について示す。なお、図中には、比較材料P1の実験結果を加えている。図のように動摩擦係数は、黒塗りのM1、M2、M3と白塗りのM4、M5の2つの傾向に分けることができる。図中黒塗りの動摩擦係数は、 $\mu_k=0.23\sim0.46$ の値を示し、図中白塗りの静摩擦係数は、 $\mu_s=0.09\sim0.29$ の値を示す。このように同じA種膜材でも動摩擦係数の値が異なる傾向を示した。この現象は、静摩擦係数の実験結果と同様にA種膜材の表面粗さが各々異なっているため、その影響と考えられる。

M1-9の動摩擦係数の傾向をみると、含水量40 gまで水分量の増加に伴い増加する傾向を示し、その後、減少する傾向を示す。このように動摩擦係数も静摩擦係数と同様に、M1に比べ常に小さな値を示した。

比較材料P1の動摩擦係数の傾向をみると、静摩擦係数の実験結果と同様に膜材と傾向が異なり水分量10 gで最大値を示し、その後、減少する傾向を示す。従っ

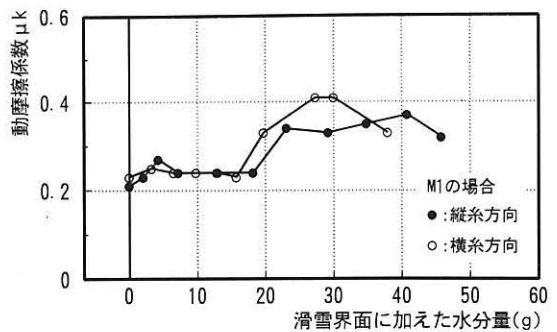


図8 M1における滑雪界面の含水量と動摩擦係数との関係

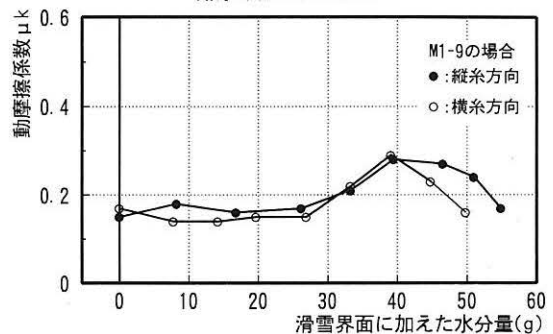


図9 M1-9における滑雪界面の含水量と動摩擦係数との関係

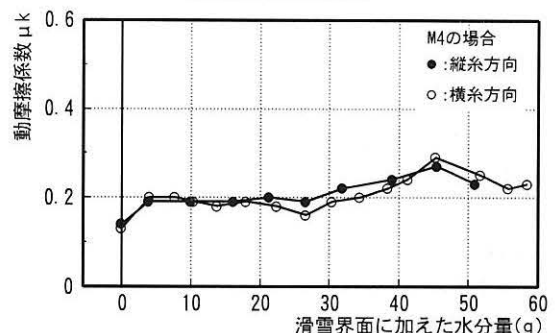


図10 M4における滑雪界面の含水量と動摩擦係数との関係

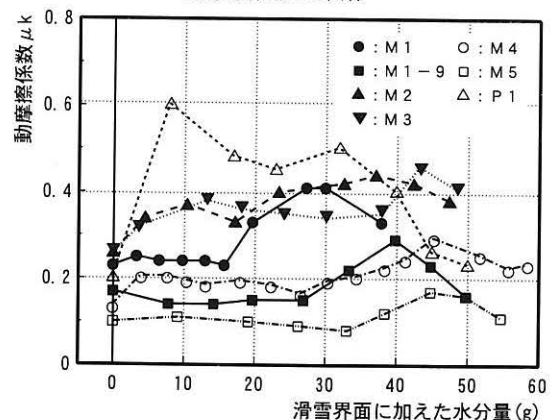


図11 横糸方向におけるA種膜材の滑雪界面の含水量と動摩擦係数との関係

て、膜材は、他の屋根材料と表面性状が異なり、滑雪面に介在する水分量で滑雪性を左右されるため、水分量の与え方を十分に検討する必要がある。

### 3.3 表面性状

#### (1) 表面粗さおよび接触角の測定結果

図12に、中心線平均粗さRaと静摩擦係数 $\mu_s$ との関係を示す。なお、図中の静摩擦係数は、加えた水分量が0gのときの値である。図のように膜材と比較材料は、2つの傾向に分けることができるが、膜材はパラツキが大きく明瞭な傾向がみられない。ここで、膜材と比較材料との表面粗さ特性を比較すると、膜材は、表面粗さが縦糸方向と横糸方向で異なるが、比較材料は、方向性に左右されず一方向で捉えることができる。従って、膜材の場合、屋根雪は、縦糸方向と横糸方向との「表面粗さの影響」を受けて滑雪していると考えられる。

図13に、上述の「表面粗さの影響」を検討するため、A種膜材における中心線平均粗さRaと静摩擦係数 $\mu_s$ および動摩擦係数 $\mu_k$ との関係を示す。図のように膜材は、M1、M2、M3とM4、M5、M1-9との2つに分けて考えることができる。なお、図中には、各グループの縦糸方向と横糸方向とのパラツキ範囲を示している。各A種膜材の縦糸方向と横糸方向の「粗さの差」は、M1:  $2.20\mu\text{m}$ 、M2:  $1.81\mu\text{m}$ 、M3:  $2.23\mu\text{m}$  となり、M1、M2、M3よりも摩擦係数が小さいM4、M5、M1-9は、M4:  $1.04\mu\text{m}$ 、M5:  $1.27\mu\text{m}$ 、M1-9:  $1.38\mu\text{m}$  となる。このように、縦糸方向と横糸方向の「粗さの差」が少ないほど摩擦係数も小さくなる。すなわち、「粗さの差」の大小が屋根雪の滑雪に大きな影響を与えていると考えられる。従って、「粗さの差」を滑雪特性の評価に用いることが有効的であると考えられる。

図14に、A種膜材における「中心線平均粗さRaの差」と「静摩擦係数 $\mu_s$  および動摩擦係数 $\mu_k$ 」との関係、図15に、A種膜材における「十点平均粗さRzの差」と「静摩擦係数 $\mu_s$  および動摩擦係数 $\mu_k$ 」との関係を示す。なお、両図の静摩擦係数および動摩擦係数は、加えた水分量が0gのときの縦糸方向と横糸方向との平均値である。両図のように、粗さの差が少なくなるほど摩擦係数は、小さくなる傾向がみられる。さらに、この傾向は2つに分かれ、「粗さの差の範囲」は、M1、M2、M3の場合、Ra:  $1.81\sim 2.23\mu\text{m}$ 、Rz:  $1.90\sim 2.55\mu\text{m}$ 、M4、M5、M1-9の「粗さの差の範囲」は、Ra:  $1.04$

$\sim 1.38\mu\text{m}$ 、Rz:  $1.05\sim 1.85\mu\text{m}$  となる。この粗さの差の範囲を比率で示すと、M4、M5、M1-9は、M1、M2、M3に対し、Ra:  $0.57\sim 0.62$ 、Rz:  $0.55\sim 0.72$  となることから、M4、M5、M1-9は、M1、M2、M3の概ね55~70%の値となる。このように、A種膜材は、粗さの差が少

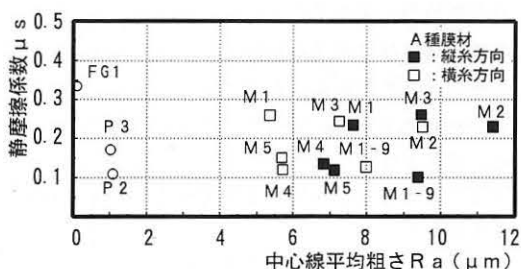


図12 中心線粗さRaと静摩擦係数 $\mu_s$ との関係

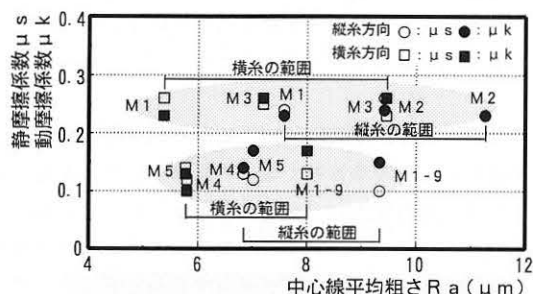


図13 A種膜材における中心線粗さRaと静摩擦係数 $\mu_s$ および動摩擦係数 $\mu_k$ との関係

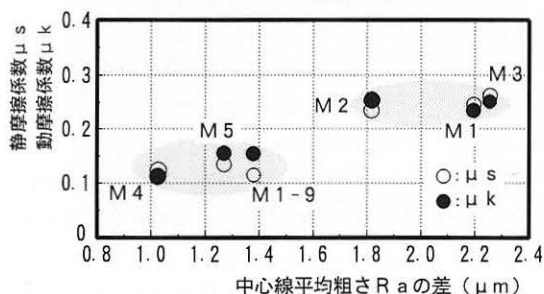


図14 A種膜材における「中心線平均粗さRaの差」と「静摩擦係数 $\mu_s$  および動摩擦係数 $\mu_k$ 」との関係

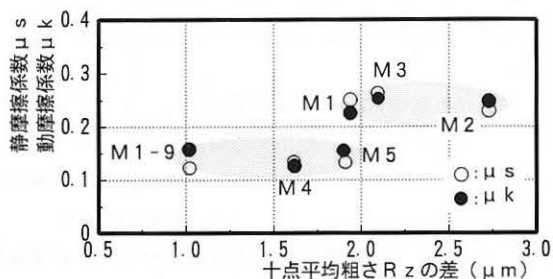


図15 A種膜材における「十点平均粗さRzの差」と「静摩擦係数 $\mu_s$  および動摩擦係数 $\mu_k$ 」との関係

ないほど摩擦係数が小さくなり、粗さの差を指標に用いることで固有の滑雪特性を表現することが可能となった。従って、静摩擦および動摩擦実験の結果は、本測定結果を用いることで説明できると考える。すなわち、A種膜材は、表面粗さの差が小さいほど滑雪性が良いことになる。

各A種膜材の接触角の測定結果みると、M1:98.5°, M1-9:91.2°, M2:101.7°, M3:100.7°, M4:103.5°, M5:102.4°となり、概ね100°前後の大きな値を示す。撥水性が大きくA種膜材のような材料は、乾き雪が付着することはないと、これまでの研究で報告されている<sup>12)</sup>。本実験結果からもみられるようにA種膜材は、水分量0gのとき最も摩擦係数が小さいため、滑雪性が良い。この現象は、乾き雪の場合、膜材の粗さ成分を埋めつくす前に滑雪するため、屋根雪と膜材との接触面が少ない状態にあると考えられる。従って、膜材の場合、滑雪面に介在する水分量をできるだけ少なく制御することが必要である。

#### 4. まとめ

本研究では、A種膜材固有の滑雪特性を明らかにすることを目的に、滑雪開始に関わる静摩擦および滑雪持続に関わる動摩擦について滑雪面に介在する水分量を変えて実験を実施した。

その結果、A種膜材は、他の屋根材料と比べ滑雪傾向が異なり、滑雪面に介在する水分量が少ないほど滑

雪に有効的であることが明らかとなった。また、A種膜材は、縦糸方向および横糸方向の表面粗さの影響を受け、縦糸方向と横糸方向の表面粗さの差が小さいほど滑雪性が良いことが明らかとなった。

A種膜材の滑雪特性は、滑雪面に介在する水分量に影響を受けることから、エネルギーの投入方法やその制御方法について十分に検討する必要がある。

#### 【参考文献】

- 1) 石井一夫：別冊 日本膜構造作品選集 資料編，エス・ピーエス出版，1993.6
- 2) (社)日本膜構造協会：膜構造建築物技術基準・同解説，建設省住宅局建築指導課，pp.53-56, 1993.3
- 3) 石井一夫：富山県膜構造実験棟屋根の融滑雪・落雪実験報告書Ⅱ，(社)日本膜構造協会，1990.7
- 4) 石井一夫：日本膜構造作品選集，エス・ピーエス出版，1993.6
- 5) 伊東敏幸ほか：劣化した屋根用塗装鋼板の表面性状と滑雪性について，日本雪工学会誌Vol.10 No.2，pp.76-84, 1994.4
- 6) 苔米地司ほか：膜構造物における屋根上積雪荷重の制御に関する研究，(社)日本膜構造協会，膜構造研究論文集'93，pp.71-79, 1993.12
- 7) 苔米地司ほか：膜構造物の屋根雪処理に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第426号，pp.99-105, 1991.8
- 8) 山形敏明ほか：膜材を用いた屋根の滑雪性状について，日本雪氷学会，北海道の雪氷 第10号，pp.36-39, 1991.8
- 10) 北川澄男ほか：フッ素樹脂製膜材の滑雪について(第1報)，(社)日本膜構造協会，膜構造研究論文集'87，pp.31-38, 1987.10
- 11) 生井武文：流れの力学，コロナ社，pp.3-7, 1976.10
- 12) 水野悠紀子ほか：融点以下での着雪に関する実験的研究，低温科，物理篇，第38輯，pp.17-32, 1979

## INFLUENCE OF SURFACE PROPERTY OF PTFE-COATED GLASS FIBER FABRIC (TYPE A) ON SNOW SLIDING

Hideharu Yamaguchi \*1  
Toshiyuki Ito \*2  
Tsukasa Tomabechi \*3

### SYNOPSIS

The purpose of this experimental study is to make the characteristic snow sliding clear, using PTFE-Coated glass fiber fabric (Type A) of the membrane structure. This experiment was examined by controlling an interposition of moisture on the static sliding friction and kinetic sliding friction, using five types of PTFE-Coated glass fiber fabric (Type A) respectively. Farther, using the results of controlling of moisture on the static sliding friction and kinetic sliding friction, study on the relation of the Type-A the surface roughness and the contact angle was done.

As the result, it became clear that PTFE-Coated glass fiber fabric (Type A) is effective of snow sliding when there is less moisture between the surface of the roof and the snow on it, different from other roof materials. And PTFE-Coated glass fiber fabric (Type A) is influenced by the moisture existing between the surface of the roof and the snow on it. Therefore, it is necessary to study fully the ways of giving and controlling of energy on the snow sliding.

\*1 Graduate Student, Hokkaido Institute of Technology, M.Eng.

\*2 Lecturer, Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology, Dr.Eng.

\*3 Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology, Dr.Eng.