

# 膜構造建築物における制御積雪荷重に関する研究

1 9 9 8 年 3 月

北海道工業大学大学院

山口 英治

## 第1章 序論

1.1 研究の背景	1- 1
1.1.1 膜構造建築物の変遷	1- 1
1.1.2 膜材料の変遷	1- 3
1.1.3 日本における膜構造建築物の建設状況	1- 6
1.2 膜構造建築物の屋根上積雪荷重に関する既往の研究	1- 9
1.3 本研究の目的と意義	1-13
1.4 本論文の構成	1-15
参考文献	1-18

## 第2章 多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する調査

2.1 はじめに	2- 1
2.2 多雪地域における膜構造建築物の建設状況	2- 2
2.3 膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する ヒアリング調査および現地調査	2- 5
2.3.1 屋根上積雪状況に関する調査方法	2- 5
2.3.2 屋根上積雪状況に関する調査結果	2-12
2.4 膜構造建築物の構工法と屋根上積雪荷重	2-24
2.4.1 膜構造建築物の構造特性	2-24
2.4.2 膜構造建築物における構造方式 と屋根上積雪荷重との関わり	2-25
2.5 膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価の現状	2-27
2.5.1 日本における屋根上積雪荷重評価の現状	2-27
2.5.2 ISOおよび諸外国における屋根上積雪荷重評価の現状	2-29
2.5.3 膜構造建築物における審査基準	2-31
2.6 まとめ	2-34
参考文献	2-36

### 第3章 屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性

3.1	はじめに	3- 1
3.2	屋根雪に作用する滑雪抵抗力	3- 2
3.3	膜材料の表面性状	3- 3
3.4	膜材料の静摩擦係数と凍着強度	3- 4
3.4.1	実験方法	3- 4
3.4.2	実験結果	3-11
3.4.3	実験結果のまとめ	3-18
3.5	膜材料の動摩擦係数と粘性抵抗力	3-19
3.5.1	実験方法	3-19
3.5.2	実験結果	3-22
3.5.3	実験結果のまとめ	3-28
3.6	膜材料の表面劣化が滑雪特性に及ぼす影響	3-29
3.6.1	曝露膜材料の滑雪特性	3-29
3.6.2	曝露膜材料の滑雪特性に関する実験結果	3-31
3.6.3	実験結果のまとめ	3-39
3.7	まとめ	3-40
	参考文献	3-42

### 第4章 膜構造建築物における屋根形状と屋根上積雪荷重

4.1	はじめに	4- 1
4.2	膜構造建築物における 屋根形状と滑雪	4- 2
4.3	V字張り屋根形状の滑雪特性	4- 6
4.3.1	V字張り屋根形状を対象とした 屋外観測実験方法	4- 6
4.3.2	V字張り屋根形状を対象とした 屋外観測実験結果	4- 7
4.4	V字張り屋根形状を対象とした 膜構造解析	4-13
4.4.1	膜構造解析方法	4-13
4.4.2	膜構造解析結果	4-19
4.5	まとめ	4-25
	参考文献	4-26

## 第5章 膜構造建築物における制御積雪荷重

5.1 はじめに	5- 1
5.2 膜構造建築物における制御積雪荷重に関する基本的な考え方	5- 2
5.3 膜構造建築物における自然降雪による制御積雪荷重の検証 —札幌コミュニティドームの降雪状況に関する連続観測—	5-10
5.3.1 観測方法	5-10
5.3.2 観測結果	5-13
5.3.3 観測結果のまとめ	5-22
5.4 膜構造建築物の融降雪実験	5-23
5.4.1 実験方法	5-23
5.4.2 実験結果	5-25
5.4.3 実験結果のまとめ	5-28
5.5 膜構造建築物における融降雪の制御方法に関する提案	5-29
5.5.1 実験方法	5-29
5.5.2 実験結果	5-31
5.5.3 融降雪における供給エネルギー量の推定方法	5-35
5.5.4 融降雪における供給エネルギー量の推定値の適用性	5-37
5.5.5 まとめ	5-40
5.6 まとめ	5-41
参考文献	5-44

## 第6章 結 論

6.1 研究の総括	6- 1
6.2 総合的考察と今後の研究課題	6- 6

謝辞	X- 1
----	------

研究発表の目録	X- 2
---------	------

## 第 1 章 序論

1. 1	研究の背景	1- 1
1. 1. 1	膜構造建築物の変遷	1- 2
1. 1. 2	膜材料の変遷	1- 3
1. 1. 3	日本における膜構造建築物の建設状況	1- 6
1. 2	膜構造建築物の屋根上積雪荷重に関する既往の研究	1- 9
1. 3	本研究の目的と意義	1-13
1. 4	本論文の構成	1-15
	参考文献	1-18

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

---

#### 1.1.1 膜構造建築物の変遷

図1-1に、膜構造建築物（本研究では、膜材料の特性を有効に活用した建築物を「膜構造建築物」という。）における変遷の概要を示す。図に示すように膜構造建築物の始まりは、遊牧民や狩猟民族の住居として用いられているテントにある。このテントは、山羊の毛、籐および獣皮などで造られ、遊牧民や狩猟民族の長年の経験と知恵が取り込まれ、移住する地域特有の条件に適応するようになって<sup>1)</sup>。今日の膜構造建築物は、この仮設建築物であるテントに種々の改良が加えられ変遷してきた。変遷の過程をみると、1858年には、イギリスのGodfrey Rhodesが遊牧民のテント構造に改良を加え風などの外力に強いテント構造を考案している<sup>2)・3)</sup>。このテント構造は、軍隊の野営用テントに用いられた。しかし、このテント構造は、今日の膜構造建築物のように膜材料に初期張力を導入して安定した膜構造形態を得る考え方でなく、テントを支持する柱の配置や梁の形状を工夫する考え方であった。今日膜構造建築物の発展に大きな影響を与えたのは、イギリスのFrederic William Lanchesterや西ドイツのFrei Ottoと考える<sup>2)・4)・5)</sup>。

Frederic William Lanchesterは、1917年に気球の原理を応用して柱など支持するものを一切使わずに大型の膜材料を架設する構法を考案した<sup>4)</sup>。いわゆる今日の空気膜構造物である。1946年には、アメリカのK. W. Birdによって本格的な空気膜構造物であるレーダードーム（レドーム）が建設された<sup>4)</sup>。以来、アメリカではシルバードーム（1975年竣工、最大スパン220m、膜伏面積39,020m<sup>2</sup>）などにみられるように大型の空気膜構造が建設されるようになった<sup>6)</sup>。

Frei Ottoは、1950年頃に鞍形曲面に初期張力を導入した新しい膜構造を誕生させた<sup>2)・5)</sup>。この方法により膜構造建築物は、遊牧民テント、軍隊の野営用テントの時代から急激に発展し、カナダ・モントリオール博覧会（1967年竣工、膜伏面積10,000m<sup>2</sup>）の西ドイツ館などにみられるように大型のサスペンション膜構造が建設されるようになった<sup>6)</sup>。

このように膜構造建築物は、遊牧民や狩猟民族の住居に用いられているテントから大きく変遷してきた。膜構造建築物は、これまでの近代建築に比べ自由な屋根曲面を創り出すことができ、グレアを生じさせない柔らかい拡散光を透過させる性状を持っているため、金属材料やガラスなどでは表現し得なかった形態や大空間を創造することができる。また、膜構造建築物は、在来工法のように母屋や野地板など

の屋根下地が不要となり、膜材料そのものが外部、内部仕上げ材も兼ねているため、在来工法に比べて屋根が軽量となる。さらに、膜材料は構造材料的な側面と仕上げ材料的な側面とを持ち合わせている。このようなことから、膜構造建築物は、一般建築物と異なる構造特性や材料特性を持った建築物と言える。

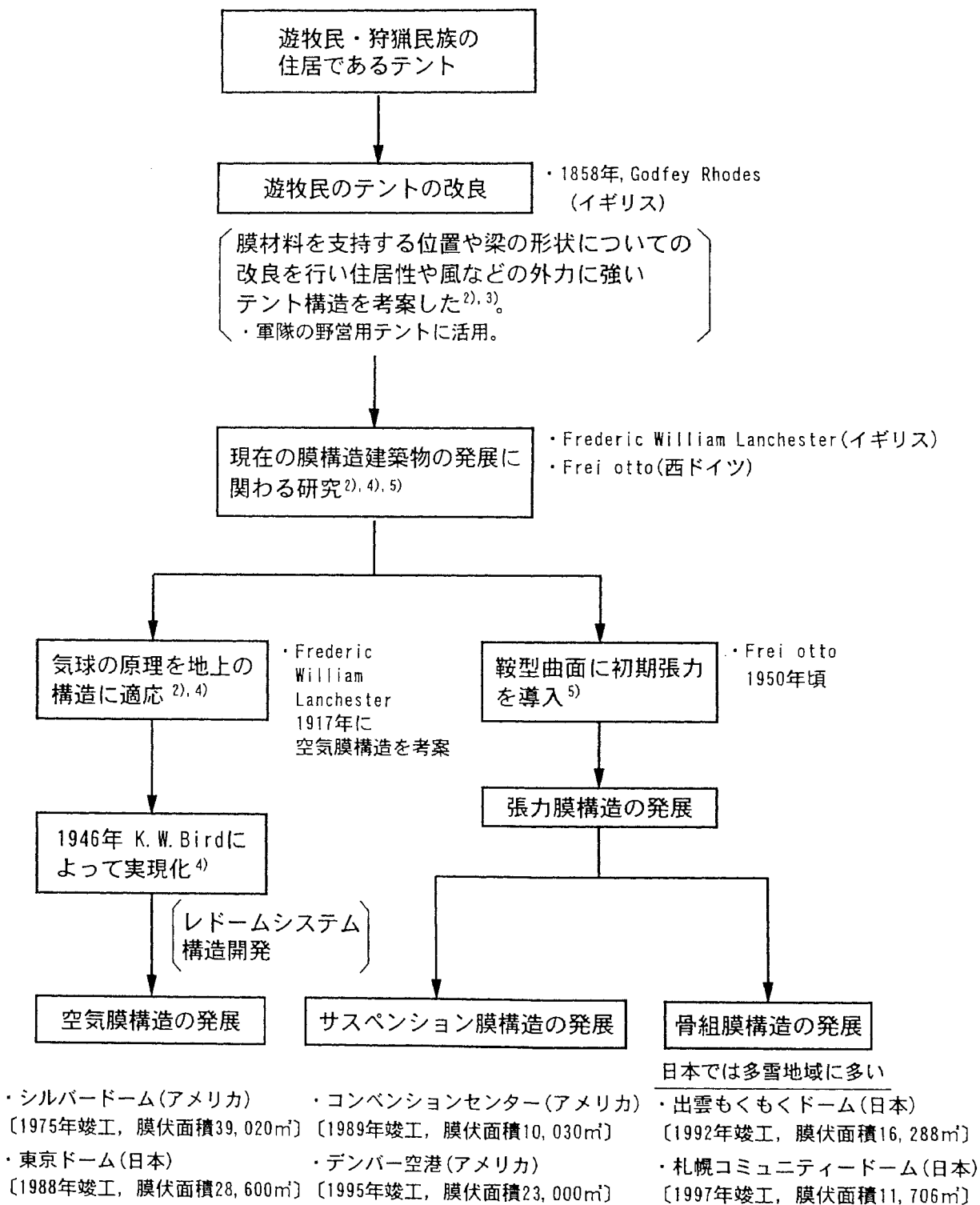


図 1 - 1 膜構造建築物における変遷の概要

### 1. 1. 2 膜材料の変遷

膜構造建築物は、膜材料の変遷に伴い大きく発展してきた。遊牧民などの住居であったテント時代の膜材料は、動物の皮などの素材そのものが用いられていた。その後、規模の大きなテントが指向されるようになる1950年代に入ると繊維織物にコーティング材を塗布した膜材料が用いられるようになってきた。繊維織物をみると、1950年代には絹や麻を始めとする天然繊維が主流であった<sup>2)</sup>。しかし、規模が大きくなるに伴い高強度で高品質な膜材料が要求されるようになり、1960年以降になると高強度で耐候性や加工安定性が良いことなどから合成繊維へと変遷した。さらに、恒久的な膜構造建築物への指向が高まるに伴い、より高強度で防火性に優れたガラス繊維が用いられるようになった<sup>2)</sup>。

コーティング材をみると、1950年代は、天然ゴム、合成ゴムおよびPVC（軟質塩化ビニル）などが用いられていた<sup>2)</sup>。1960年以降は、合成繊維が主流となったため、合成繊維と接着性が良好なPVCが多く用いられている。1970年代になると、四ふっ化エチレン樹脂のような耐候性、防火性および防汚性など高機能を有するコーティング材が開発された<sup>2)</sup>。このコーティング材の開発により膜材料は、耐候性、防火性などが大きく飛躍し、1970年初期には、ガラス繊維に四ふっ化エチレン樹脂を含浸、焼成してコーティングした防火性能が最も高い膜材料が誕生した<sup>2)</sup>。

日本で使用される膜材料は、建設省の認定団体である（社）日本膜構造協会（以下、「膜構造協会」という。）に登録することになっている。膜構造協会では、膜材料の繊維織物およびコーティング材の差異、複合からA種、B種、C種とランクが分かれている<sup>7)</sup>。膜材料A種、B種、C種における登録基準の概要を示すと、以下のようになる。

- (1)膜材料A種：ガラス繊維織物に四ふっ化エチレン樹脂を主成分とする樹脂（四ふっ化エチレン樹脂の含有率が90%以上であるものに限る）をコーティングしたもので、以下の項目に適合するものをいう。
  - 1)ガラス繊維織物の重量が $150\text{g}/\text{m}^2$ 以上であること。ガラス繊維織物の重量は、JIS K 6328に基づき $100\times 100\text{mm}$ の試験片をはかりを用いて量っている。
  - 2)コーティング材の重量が $400\text{g}/\text{m}^2$ 以上 $1,100\text{g}/\text{m}^2$ 以下であること。コーティング材の重量は、JIS K 7052に基づき2g以上の試験片を化学天秤、デジケータ、電気マッフル炉、磁器るつぼを用いて量っている。
  - 3)膜材料の厚さが0.5mm以上であること。膜材料の厚さは、JIS K 6328に基づき側厚計（加圧面直径10mm、加圧荷重80gf）で測っている。



(2)膜材料B種：ガラス繊維織物にPVC樹脂，クロロプレンゴム，その他これに類するものをコーティングしたもので，以下の項目に適合するものをいう。

1)ガラス繊維織物の重量が $150\text{g}/\text{m}^2$ 以上であること。（JIS K 6328による。）

2)コーティング材の重量が $400\text{g}/\text{m}^2$ 以上 $1,100\text{g}/\text{m}^2$ 以下であること。

（JIS K 7052による。）

3)膜材料の厚さが0.5mm以上であること。（JIS K 6328による。）

4)難燃処理を施したものの。

(3)膜材料C種：ポリアミド系，ポリアラミド系，ポリエステル系，ポリビニルアルコール系繊維織物にPVC樹脂，クロロプレンゴムその他これに類するものをコーティングしたもので，以下の項目に適合するものをいう。

1)合成繊維織物の重量が $100\text{g}/\text{m}^2$ 以上であること。（JIS K 6328による。）

2)コーティング材の重量が $400\text{g}/\text{m}^2$ 以上 $1,100\text{g}/\text{m}^2$ 以下であること。

（JIS K 7052による。）

3)膜材料の厚さが0.5mm以上であること。（JIS K 6328による。）

4)日本工業規格 JIS A 1322（建築用薄物材の難燃性試験方法）に規定する防災二級試験に合格するものであること。

日本の恒久膜構造建築物に用いられる膜材料の多くは，膜材料A種を用いている。恒久膜構造建築物に用いられる膜材料A種は，小規模な膜構造建築物から大規模な膜構造建築物まで幅広く採用され，恒久膜構造建築物としては膜材料B種，C種に比べて使用される頻度が極めて多い状況にある<sup>8)</sup>。なお，膜材料C種は，仮設膜構造建築物として多く使用されている。このようなことから，本論文では，膜材料A種を用いた膜構造建築物を対象に研究を行っている。以下，本研究では，この膜材料A種を「膜材料」という。

図1-2 に膜材料の概要図および写真1-1 に膜材料の表面および断面を示す。写真に示すように膜材料は，主として強度を負担するガラス繊維織物と耐候性，防火性，などを高める四ふっ化エチレン樹脂のコーティング層から構成されている。膜材料の厚さは，0.8mm（ガラス繊維織物の厚さ：0.5mm，コーティング層の厚さ： $0.15\text{mm} \times 2 = 0.3\text{mm}$ ）であり，ガラス繊維織物は， $3.0\mu\text{m}$ の $\beta$ ヤーンで織られている。また，膜材料は，ガラス繊維で織られているため，光の拡散性が高く，柔らかい光が透過する特性を持っている。この可視光範囲の透過率は，全天空照度（ $10,000\text{Lx}$ ）において13.0%あり，室内照度で $1,300\text{Lx}$  確保することができる<sup>9)</sup>。

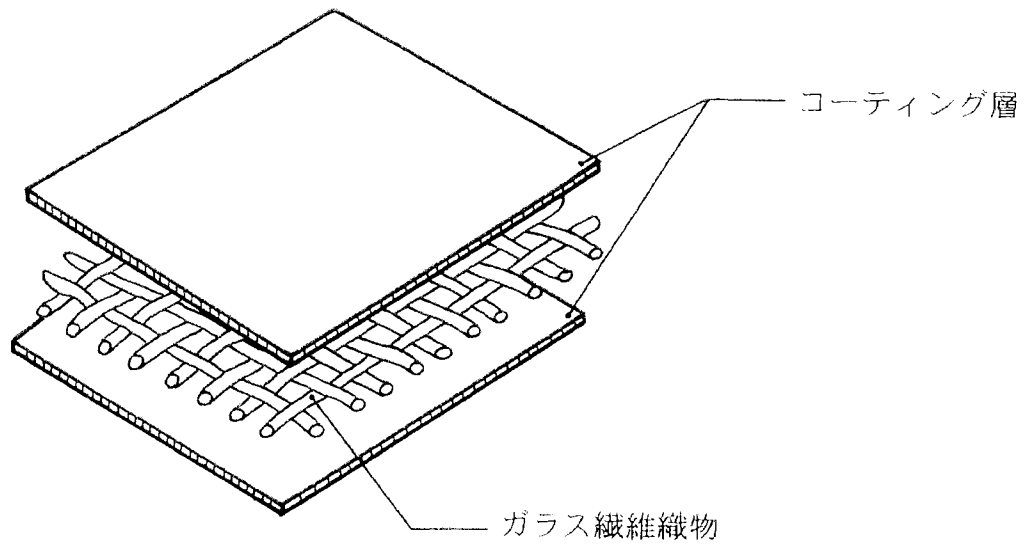


図 1 - 2 膜材料の概要

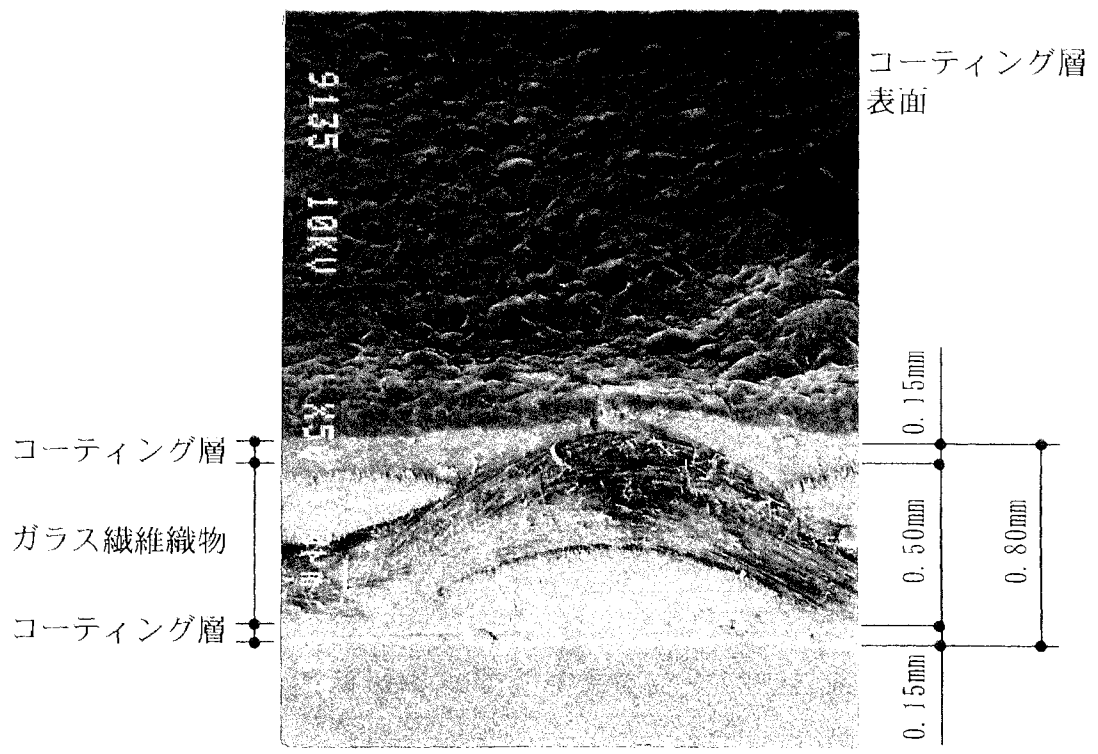


写真 1 - 1 膜材料の表面および断面

### 1.1.3 日本における膜構造建築物の建設状況

日本における膜構造建築の本格的な始まりは、1970年の日本万国博覧会が契機になったと考える。この博覧会は、数多くのサスペンション膜構造や空気膜構造が建設され、デザインの的にも斬新であった<sup>10)</sup>。特に、空気膜構造では、アメリカ館のように膜構造建築の技術的な可能性を試み、低ライズの空気膜構造を実現化している。その後、1975年に沖縄国際海洋博覧会、1981年に神戸ポートアイランド博覧会など多くの博覧会が開催され、カテナリー型張弦梁構造や木造シェル構造と膜材料C種とを組み合わせるなど新しい建築技術が試みられている<sup>10)</sup>。恒久膜構造建築物は、このような仮設膜構造建築物に用いられた技術を基に発展してきた。

図1-3に恒久膜構造建築物の累積建設件数および累積膜伏面積の推移状況を示す。なお、図中に示した累積建設件数および累積膜伏面積は、各膜構造建築物の竣工年を基に整理した。1984～1992年の資料は、日本の膜構造建作品選集・資料編<sup>11)</sup>を参考に整理した。1993～1995年の資料はMEMBRANE STRUCTURES IN JAPAN<sup>12)</sup>、(財)日本建築センター発行のビルディングレター<sup>13)・14)・15)</sup>および太陽工業株式会社、小川テント株式会社のカタログに掲載されている膜構造建築物を参考に整理した。図に示すように日本の恒久膜構造建築物は、1984年静岡県・東伊豆町に建設された日本初の空気膜構造「霊友会弥勒山エアドーム(膜伏面積831m<sup>2</sup>)」に始まる。翌年の1985年には、大阪府・大阪市に建設された日本初の骨組膜構造「インテックスプラザ(膜伏面積3,024m<sup>2</sup>)」が建設され、年々増加する傾向にある。膜構造建築物の累積建設件数は、1988年から急激に増加し、1992年には200件を超えている。同様に累積膜伏面積をみると、1988年から急激に増加し、1993年には330,000m<sup>2</sup>を超えている。1987年には、累積建設件数23件、累積膜伏面積18,615m<sup>2</sup>であったにも関わらず、わずか5年で建設件数が約9倍、膜伏面積が約18倍にも増加し、急激に普及状況してきた。膜伏面積増加が建設件数増加の2倍となる現象は、膜構造建築物1件当たりの規模が大きくなっていることを示している。急激に建設件数が増加し始めた1988年から建設状況について竣工年ごとに整理すると、以下のようになる。

#### 1988年

1988年は、日本最大の規模を誇る「東京ドーム(最大スパン201m、膜伏面積28,600m<sup>2</sup>)」建設されている。さらに、豪雪地帯である北海道・壮瞥町に「洞爺サンパレス大浴場棟(膜伏面積2,783m<sup>2</sup>)」、帯広市に「まいどーむ(膜伏面積1,485m<sup>2</sup>)」が建設されている。豪雪地帯とは、「豪雪地帯対策特別措置法」(昭和37年法律第73号)に基づき指定された地域をいう<sup>16)</sup>。以下、この地域を本研究では、「多雪地帯」という。多雪地帯では、これらの膜構造建築物で3件となる。このように1988年は、東京ドームにみられるように大規模な空気膜構造の建設に対応させ

るためコンピューター応用技術を導入するなど新しい建築技術や建設地域の拡大が図られた。このように1988年は、膜構造建築物の可能性を高め、恒久膜構造物の幕開け的な年と言える。

#### 1989年

1989年は、多雪地域である秋田県・雄和町に「あきたスカイドーム（最大スパン122m, 膜伏面積 12,123.8m<sup>2</sup>）」が建設されている。あきたスカイドームは土のグラウンドを採用しており、多雪地域においてこのような大規模な膜構造建築物は初めての建設である。この膜構造建築物は、冬でも乾いた土のグラウンドで運動したいという多雪地域の人々の要望を実現化している。このように1989年は、多雪地域における膜構造建築物の建設を先鞭づけた年と言える。

#### 1990年

1990年は、建設件数が56件と最も多い。これらの膜構造建築物をみると、膜伏面積1,000m<sup>2</sup>未満が39件で全体の70%程度、1,000m<sup>2</sup>以上が17件で全体の30%程度となる。この現状を考えると、1990年は、東京ドームやあきたスカイドームなどの建設実績が得られたものの、膜構造建築物の歴史が浅く建設実績が少ないため1,000m<sup>2</sup>以上の建設に対する信頼性が得られなかったためと考える。

#### 1991年

1991年は、建設件数が51件である。これらの膜構造建築物を前述と同様に膜伏面積ごとに分類すると、1,000m<sup>2</sup>未満が21件で全体の41%程度、1,000m<sup>2</sup>以上が30件で全体の59%程度となる。この現状を考えると、1991年は、これまでの膜構造建築物の建設実績から小規模ばかりでなく、中規模や大規模の膜構造建築物に対しても建設を試みようとする考え方に移行したと考える。

#### 1992年

1992年は、建設件数が25件と少ない状況であるが、膜伏面積ごとに分類すると、1,000m<sup>2</sup>未満が14件で全体の56%程度、1,000m<sup>2</sup>以上が11件で全体の44%程度となる。このように1992年になると、1,000m<sup>2</sup>以上でやや減少するが、小規模から中規模、大規模と幅広く膜構造建築物の建設が行われるようになったと考える。

#### 1993年以降

1993年以降になると、1993年の日本サッカーリーグ開幕に伴いサッカー場や陸上競技場、レジャー施設と大規模な膜構造建築物が建設されている。この現状は、膜材料の光の透過性および軽快で自由な曲面を創り出せるなどの特性、膜材料の加工および膜施工の技術が高く評価されたためと考える。1993年には、宮崎県・宮崎市に日本最大の開閉式骨組膜構造「オーシャンドーム（膜伏面積20,291m<sup>2</sup>）」が建設されている。

多雪地域における膜構造建築物の建設状況をみると、図に示すように、多雪地域に初めて恒久膜構造建築物が建設されたのは、1985年である（岩手県・江刺市「いわてキャンパル工場」）。その後、膜伏面積が急激に増加している。多雪地域における膜伏面積状況をみると、多雪地域に初めて建設された1985年には、膜伏面積がわずか  $2,160\text{m}^2$  であったが、1989年に建設されたあきたスカイドームを契機に1991年には、累積膜伏面積が約30倍の  $64,389\text{m}^2$ （累積建設件数20件）となり急激な増加を示している。各年における膜構造建築物全体の累積膜伏面積に対する多雪地域に建設された膜構造建築物の累積膜伏面積の比率をみると、1989年で21.1%，1990年で19.3%，1991年で23.8%，1992年24.1%，1993年で22.0%，1994年で21.7%，1995年で20.0%となり、日本で建設される膜構造建築物の約20%程度と言える。

多雪地域では、「町・村おこし」や「雪に強いまちづくり」が積極的に進められている<sup>17)</sup>。これらの市町村では、冬でも雪の少ない地域と同じ様な生活指向が根強く、開放的な大空間で冬でもスポーツなどを楽しむことを望んでいる。こうした要望に答えたのが「あきたスカイドーム」であり、大規模な膜構造建築物であったと言える。こうした傾向は、さらに強まりをみせている<sup>17)</sup>。

以上の状況をみると、日本の膜構造建築物は建設実績の積み重ねにより、その技術的な信頼性が認められ、小規模および中規模、大規模へと幅広く普及していると言える。さらに、多雪地域における膜構造建築物の建設件数も増え、その普及地域も拡大していると言える。

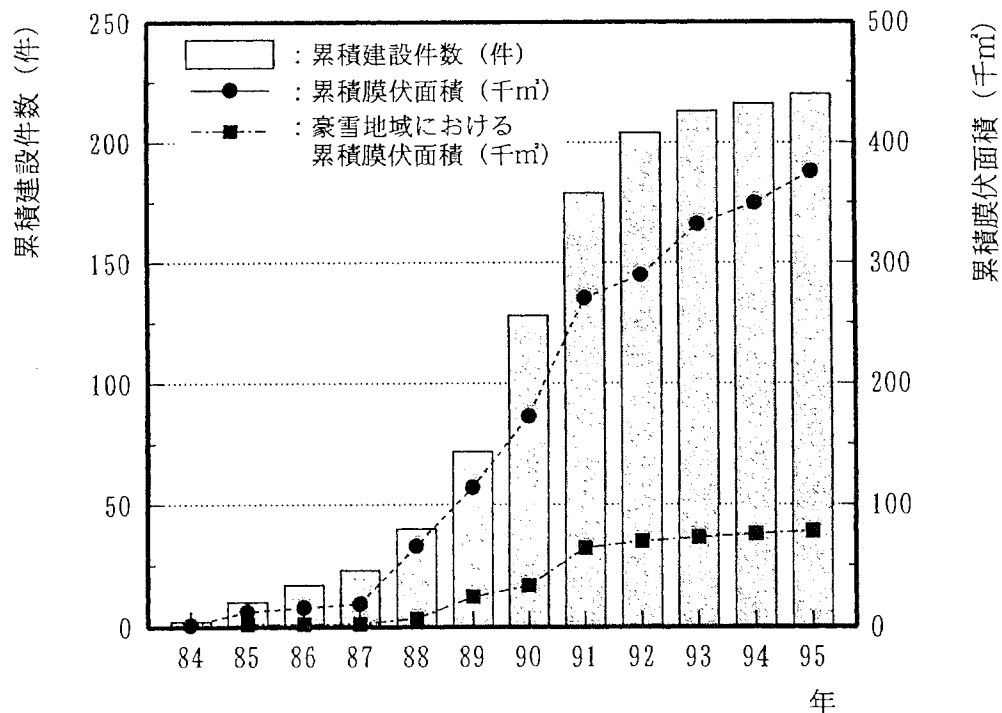


図1-3 恒久膜構造建築物の累積建設件数および累積膜伏面積の推移状況

## 1.2 膜構造建築物の屋根上積雪荷重に関する既往の研究

本研究の位置付けを明確にするために既往の研究を概観し、日本における膜構造建築物の屋根雪処理および屋根上積雪状況に関する研究の現状を整理すると、図1-4となる。図に示すように、膜構造建築物の屋根雪処理に関する研究の始まりは、1984年に行われた空気膜構造における屋根雪の融雪処理に関する研究である。この融雪処理に関する研究の目的は、膜材料の特徴である可視光範囲の透過性状を有効に活用することや過大な屋根上積雪荷重を室内の空気圧（内圧）だけで支え形態を維持するため、屋根面にできるだけ雪を積もらせないという基本的な考えがあったためである。このようなことから、1984～1986年まで空気膜構造の融雪処理に関する研究が中心に進められてきた<sup>1<sup>8)</sup>～2<sup>5)</sup></sup>。すなわち、膜構造建築物を対象とした屋根雪処理に関する研究は、膜材料の材料特性および空気膜構造の構造特性に端を発していると言える。これらの研究は、膜構造建築物の構造形態の主流が空気膜構造から骨組構造へと変遷するに伴い融雪処理から融雪と滑雪処理を組み合わせた屋根雪処理（以下、この屋根雪処理を「融滑雪処理」という。）へと推移してきた。

膜構造建築物の先進国であるアメリカやカナダにおける屋根上積雪荷重に関する研究の状況をみると以下のようなになる。これらの国における屋根上積雪荷重に関する研究のほとんどは、一般建築物を対象にした屋上積雪性状に関する研究が主流である<sup>2<sup>6)</sup>～2<sup>9)</sup></sup>。これらの研究結果をみると、H. J. Thorburn ほかおよび D. A. Taylor ほかは、屋外調査結果を基に屋上積雪形状を明らかにし、屋根形状の違いによる積雪分布の偏りを指摘している<sup>2<sup>6)</sup>～2<sup>8)</sup></sup>。また、P. A. Irwin ほかは、大スパン構造物における屋根上積雪荷重を風洞実験やコンピューターシミュレーションで評価することを試みている<sup>2<sup>9)</sup></sup>。膜構造建築物に関する研究発表が多く行われるIASS国際会議における屋根雪処理および屋根上積雪荷重に関する研究状況をみると、1990年には「あきたスカイドーム」を対象に実施した屋根雪処理方法や過大な屋根上積雪荷重に対する膜構造解析について黒川ほか<sup>3<sup>0)</sup></sup>、秋山ほか<sup>3<sup>1)</sup></sup>が報告している。1992年には、空気膜構造において屋根面に雪が局部的に積もり、その屋根上積雪荷重によって曲面がへこむ現象（以下、この現象を「ボンディング現象」という。）についてカナダのG. Dalziel et al.<sup>3<sup>2)</sup></sup>が報告している。なお、膜構造建築物に加わる外力に関する研究は、風荷重に関するものが多い。また、工学的に雪を扱う国際会議であるSNOW ENGINEERINGでは、1992年に本格的に膜構造建築物の屋根上積雪荷重に関わる研究が行われ、大塚ほか<sup>3<sup>3)</sup></sup>は、屋根雪の融滑雪処理に関する屋外実験を行い、融滑雪処理方法の有効性について報告している。1996年には、実大膜構造建築物を対象とした融滑雪処理に関する研究が苦米地ほか<sup>3<sup>4)</sup></sup>によっても報告されて

いる。このように、諸外国における膜構造建築物を対象とした屋根雪処理や屋根上積雪荷重に関する研究例は極めて少なく、国際会議における屋根雪処理および屋根上積雪荷重に関する研究例のほとんどは日本国内で実施された研究である。この背景には、諸外国が日本に比べて降雪量が少ないため、膜材料を用いた屋根の設計に対し外力として作用する屋根上積雪荷重の影響が少ないためと考える<sup>35)</sup>。このようなことから、膜構造建築物における屋根雪処理および屋根上積雪荷重の問題は、日本特有の問題と言えるであろう。このことは、屋根雪処理および屋根上積雪荷重に関する問題が国際的に論じられるようになった時期と日本において多雪地域である秋田県に始めて大規模な膜構造建築物として「あきたスカイドーム」が建設された時期と同じであることが裏付けている。

ここで、日本における膜構造建築物の屋根雪処理に関する研究を「融雪処理」および「融滑雪処理」に分けて整理すると以下のようなになる。

### 融雪処理

1970年、日本万国博覧会では、低ライズの大規模な空気膜構造（アメリカ館）を世界で初めて実現した。このような建設実績を踏まえて1984年、日本初の恒久膜構造物が空気膜構造として静岡県に誕生した。しかし、多雪地域に建設する場合、膜材料の特性である光の透過性や空気膜構造の過大な屋根上積雪荷重に対する内圧の供給を考えると、屋根面にできるだけ雪を積もらせないことが望ましい。空気膜構造の融雪処理に関する研究結果の一例をみると、森野ほかは、降雪と同時に融雪を開始し、屋根面に雪を積もらせないで融雪処理する場合と構造強度の範囲内に積もらせてから融雪処理する場合とではエネルギーの供給量が大きく異なり、後者の方法が有効であると指摘している<sup>20)</sup>。西ほかは、屋根雪の融雪状況を連続的に観察し、膜材料と屋根雪との界面に発生する空洞の形成が融雪の進行を著しく阻害すると指摘している<sup>25)</sup>。このように空気膜構造における融雪処理に関する研究は、融雪に要するエネルギーの供給量を定量的に捉えているが、エネルギーの供給に関する制御方法や省エネルギー化を考慮した効率の良い融雪処理方法など実用化に向けての検討が不足している状況にある。

### 融滑雪処理

多雪地域に建設されている膜構造建築物の構造方式は、骨組膜構造が主流で、屋根勾配が大きく屋根雪が滑雪しやすい形状を有しており<sup>11)~15)</sup>、屋根雪の滑雪現象がみられる。このようなことから苦米地、石井ほか、筆者ほかおよび大塚ほかは、膜材料の滑雪性状に関する研究を実施している<sup>36)~39)</sup>。これらの研究結果をみる

と、苔米地は、屋外モデル実験において屋根雪の滑雪現象に影響を与えている要因は凍着強度であると指摘している<sup>36)</sup>。石井ほかは、屋外実験から構法上の問題も取り上げ、膜材料の留め付け金具や押えケーブルなどの突起物が屋根雪の滑雪に影響を与えると指摘している<sup>37)</sup>。筆者ほかは、室内モデル実験で膜材料が他の屋根葺材に比べて滑雪性に優れていることを指摘している<sup>38)</sup>。筆者ほか、大塚ほかおよび本間ほかは、これらの研究結果を発展させ、膜構造建築物における屋根雪処理方法として融滑雪処理が有効であることを明らかにしている<sup>39)~41)</sup>。特に、これらの研究では、屋根雪の界面を融雪して水の飽和層をつくり、この飽和層を凍らせた後に融滑雪処理することで、雪の状態に比べ少ないエネルギー量で滑雪することを明らかにしている。

一方、これまでの屋根葺材と雪氷との滑雪性状に関する研究の代表として、前田、上野ほか、渡辺ほかおよび遠藤ほかの研究が上げられる<sup>42)~47)</sup>。これらの研究の多くは、屋根葺材として一般の建築物に使用されている金属材料を対象にしている。これらの研究をみると、屋根葺材と雪氷との界面に働く静摩擦、凍着強度、動摩擦および粘性などの滑雪抵抗に関する検討が行われている。これらの研究は、実験方法が近似しているため、膜材料に関する研究と比較がしやすく重要な基礎資料となる。

このように、膜構造建築物を対象とした屋根雪に関する研究状況をみると、研究の主眼が膜材料の材料特性を生かすための屋根雪処理にあり、膜構造建築物における屋根上積雪荷重の評価方法を論ずる資料を得るまでに至っていない現状にある。



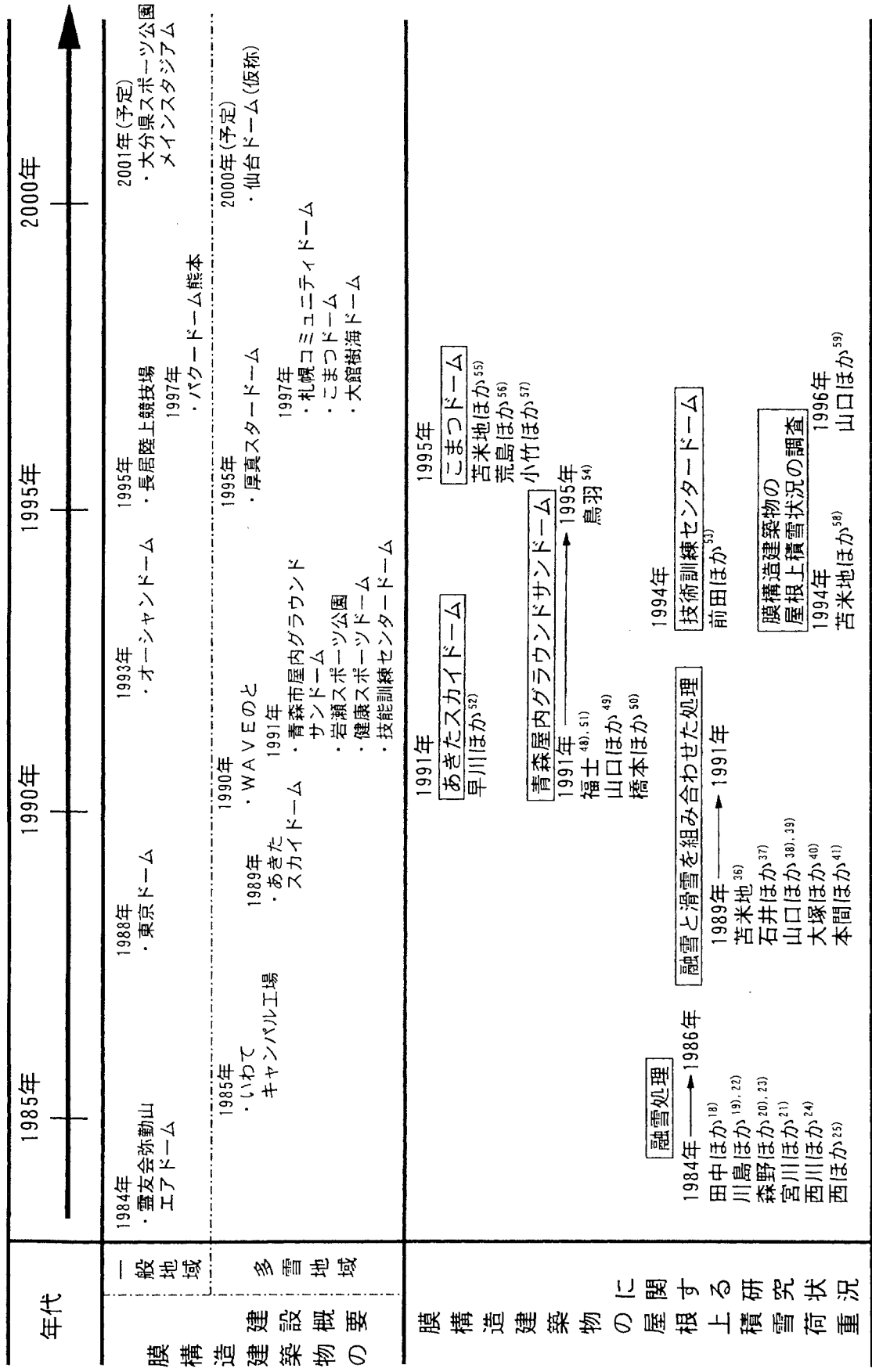


図1-4 日本における膜構造建築物の屋根上積雪荷重に関する研究の流れ

## 1.3 本研究の目的と意義

---

### 1.3.1 研究の目的

日本の膜構造建築物は、膜構造解析手法や施工技術などの進歩により博覧会などの仮設建築物から恒久建築物として移行してきた。恒久建築物としての膜構造建築物は、1988年を契機に大規模から小規模に至るまで急激に増加し、その建設地域も広域化し、多雪地域である北海道、東北および北陸地方にも建設されている。多雪地域に建設された膜構造建築物は、膜材料の光の透過性を確保するため、屋根面に雪が残らないように自然滑雪、融滑雪および融雪など何れかの方法で常に屋根雪処理を行っている。

このような状況においても、膜構造建築物における屋根上積雪荷重は、一般建築物と同一の扱いで評価されている。すなわち、特殊な例（建築基準法第38条に基づき個別に建設大臣認定を受け、設計用屋根上積雪荷重の低減が認められた場合）を除き建設予定地の地上積雪深が1mであれば、この積雪によって発生する積雪荷重が屋根面に作用するという考え方で膜屋根および膜屋根を支持する主架構や二次部材などの設計が行われている。1993年に改訂された日本建築学会荷重指針では、信頼性のある融雪装置等が取り付けられている場合に限り雪荷重の低減が認められる制御積雪荷重の考え方が取り入れられている<sup>60)</sup>。しかし、この指針においても制御積雪荷重を構造設計に十分に反映できるまでに至っておらず「信頼性」という言葉を付け加えるに止まっている。この原因は、膜構造建築物を対象とした屋根雪に関する研究状況が膜材料の材料特性を生かすための屋根雪処理に主眼がおかれていることや多雪地域における膜構造建築物そのものの歴史が浅いことなどにあり、膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価を論ずる資料を得るまでに至っていない。

このような現状の中で、膜構造建築物におけるデザイン思想の第一義である「明るい空間の創造」に対し、構造設計では屋根面に雪があることを前提としており、両者は相反した設計思想となっている。このようなことから本研究では、多雪地域における膜構造建築物の設計に合理性を与えるために、以下の点を明らかにしている。本研究の目的もここにある。

- (1)多雪地域に建設された膜構造建築物の屋根上積雪状況について調査を実施し、屋根雪処理方法別に屋根雪の滑雪状況を検討している。これらの結果と屋根勾配、膜材料の張り方および気象条件との関わり合いを検討し、これらを指標に用いて屋根雪の滑雪現象が発生する条件を明らかにしている。

(2)膜構造建築物の形態的特徴である屋根勾配を有効に活用し、屋根雪の滑雪処理方法を確立するために滑雪に関わる膜材料特性を明らかにしている。さらに、経年後における膜材料の表面状態を検討し、滑雪現象による膜材料表面の滑雪摩耗の影響を明らかにしている。

(3)膜構造建築物における膜材料の張り方（構法）と屋根上積雪荷重との関わりについて大型の試験体を用いた屋外モデル実験および膜構造解析を行い、膜材料の張り方が屋根上積雪荷重に与える影響を明らかにしている。

(4)上記(1)から(3)の検討結果を基に、膜構造建築物における制御積雪荷重の評価方法を提案し、その妥当性について実在している膜構造建築物を対象とした屋根雪の滑雪現象に関する連続観測を行い、その観測結果を基に検証している。

### 1.3.2 研究の意義

膜構造建築物の屋根上積雪荷重に関する既往の研究との比較からみた本研究のオリジナリティは、以下の通りである。研究の意義もここにある。

(1)多雪地域に膜構造建築物を建設する場合、個別の建築物に対応するための屋根上積雪荷重の評価および屋根雪処理に関する実験的研究は実施されている<sup>34)・48)~57)</sup>。しかし、その後の追跡調査が全く実施されていないため、その後の膜構造建築物の設計に反映されておらず、系統立てた膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価の考え方をまとめるまでに至っていない。このことから、本研究では多雪地域である北海道、東北および北陸地方に建設されている大規模な膜構造建築物を対象とした屋根上積雪状況に関する実態調査を実施し、その状況を明らかにしている。さらに、この調査結果を基に、膜構造建築物における屋根雪の滑雪現象の発生条件を明らかにしている。

(2)膜構造建築物の屋根雪処理は、空気膜構造を対象とした融雪処理を中心に行われてきた<sup>18)~25)</sup>。この屋根雪処理状況をみると、膜構造建築物は、勾配を持った屋根形状を有しているため、融雪と同時に滑雪現象が発生する。このことから、本研究では膜構造建築物における屋根雪処理として滑雪処理が有効であることを提案している。この滑雪処理を行うためには、膜材料における雪の滑雪特性を明らかにする必要がある。本研究では、従来から滑雪特性を明らかにするために用いられている摩擦抵抗に加え、新たに粘性抵抗力を取り入れて膜材料固有の滑雪特性を明らかにしている。

(3)膜構造建築物における膜材料の張り方には種々の方法があり，その方法は特徴的である。本研究では，これらの膜材料の張り方と滑雪現象との関わりを検討し，滑雪現象を誘発しやすい膜材料の張り方（構法）を提案している。さらに，膜材料の張り方が屋根上積雪荷重の評価に与える影響を大型の試験体を用いた屋外モデル実験および膜構造解析で明らかにしている。

(4)本研究では，「荷重の継続期間」という新しい考え方を提案し，合理的な制御積雪荷重評価を提案している。荷重の継続期間とは，屋根面に雪が積もり始めてから滑雪現象が発生するまでに要する期間を示す。これまでの膜構造建築物を対象とした屋根雪処理および屋根上積雪荷重に関する研究方法は，モデル実験が全てであった。このようなことから，実在している膜構造建築物を対象に屋根雪の自然滑雪状況を連続的に観測し，この観測結果と気象条件との関わりを明らかにし，荷重の継続期間を取り入れた自然滑雪による制御積雪荷重評価の妥当性を検証している。さらに，融滑雪による制御積雪荷重については，屋根勾配，温度条件，雪質を考慮したエネルギー量の供給方法について室内および屋外モデル実験を行い，合理的な制御方法を提案している。

#### 1.4 本論文の構成

---

本論文は，図1-5 に示すように全編6章で構成され，各章の内容は以下の通りである。

第1章は，「序論」である。本章では，本研究の背景となる膜構造建築物における合理的な屋根上積雪荷重評価の重要性を明確化し，本研究の目的，意義および本論文の構成について述べている。

第2章は，「多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する調査」である。本章では，多雪地域における膜構造建築物の建設状況の整理および多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況の実態調査を行い，その現状を明らかにしている。これらの結果を基に，屋根の諸条件，屋内条件および気象条件との関わり合いを検討し，屋根雪の滑雪現象が発生する条件を明らかにしている。さらに，膜構造建築物の構工法および屋根上積雪荷重の低減に関わる現状の国内外における種々の規定について整理している。

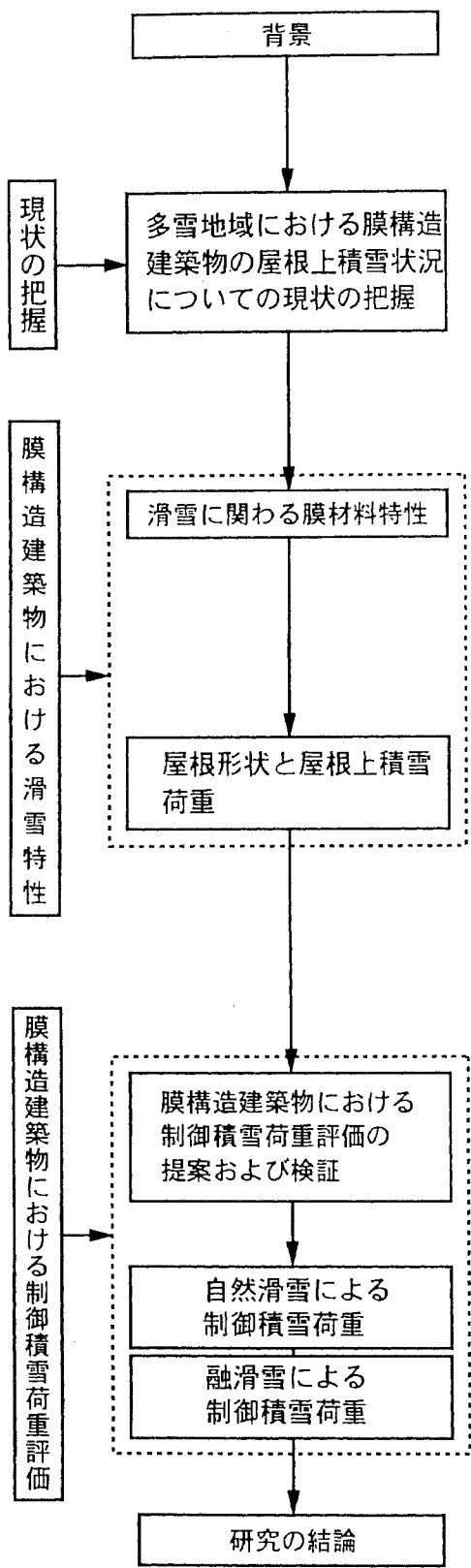
第3章は，「屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性」である。本章では，膜構造建築物の形態的特徴である屋根勾配を活用した屋根雪の滑雪処理方法を確立するため，滑雪に関わる膜材料特性を明らかにしている。実験は，種々の滑雪抵抗力の中から

屋根雪と膜材料との界面に直接関わる静摩擦抵抗力、凍着抵抗力、動摩擦抵抗力、粘性抵抗力を取り上げ、これらの滑雪抵抗力を用いて膜材料の滑雪性状に関する室内モデル実験を行っている。さらに、滑雪による経年後の膜材料の表面状態を明らかにするため、経年後の膜材料を対象とした滑雪性状に関する実験、表面性状に関する測定、表面観察および多雪地域に実在している膜構造建築物を対象とした膜材料表面に関する実態調査を行っている。これらの結果を基に、滑雪に関わる膜材料特性および経年後の滑雪摩耗に関する評価を行っている。

第4章は、「膜構造建築物における屋根形状と屋根上積雪荷重」である。屋根雪に作用する滑雪抵抗力は、屋根雪と膜材料との界面に直接関わる滑雪抵抗力の他に膜材料の張り方（構法）に関わる上部積雪との引張抵抗力、側部雪とのせん断抵抗力がある。本章では、膜材料の張り方に関わる引張抵抗力およびせん断抵抗力を取り上げ、膜材料の張り方の差異による屋根雪の滑雪現象の評価を行っている。さらに、この結果を基に、滑雪処理に有効な膜材料の張り方を提案し、この膜材料の張り方を対象とした屋根雪の滑雪特性について大型の試験体を用いた屋外モデル実験および膜構造解析を行い、膜材料の張り方が屋根上積雪荷重の評価に与える影響を明らかにしている。これらの結果を基に、滑雪処理に有効な膜材料の張り方を含めた屋根形状の設計支援資料を提示している。

第5章は、「膜構造建築物における制御積雪荷重」である。本章では、前章までに得られた結果を基に膜構造建築物における制御積雪荷重の評価方法を提案している。膜構造建築物は、積極的に屋根勾配を活用した滑雪処理を行っているため、長時間屋根面に雪が残らない状況にある。この現状を踏まえて、荷重の継続期間における最大積雪深を設計用屋根上積雪深として採用することを提案している。この提案の有効性を検討するため、実在している膜構造建築物を対象に屋根雪の自然滑雪状況、気象条件について連続的な観測を行っている。自然滑雪による制御積雪荷重では、この観測結果を基に荷重の継続期間を捉える指標を明らかにし、荷重の継続期間を取り入れた制御積雪荷重評価の妥当性を検証している。融滑雪による制御積雪荷重では、屋根勾配、温度条件、雪質を考慮したエネルギー量の供給方法に関する室内および屋外モデル実験を行い、この実験結果を基に合理的な制御方法を提案している。

第6章は、「結論」である。本章では、本研究で得られた多雪地域における膜構造建築物の合理的な屋根上積雪荷重の評価方法に関する考え方を総括して述べている。



第1章「序論」

研究の背景および目的  
本論文の構成，本研究の特徴

第2章「多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する調査」

多雪地域に実在している膜構造建築物の屋根上積雪状況を調査し，この結果と屋根の諸条件，屋内条件および気象条件との関わり合いを検討している

第3章「屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性」

膜構造建築物の形態的特徴である屋根勾配を活用し，屋根雪の滑雪処理方法を確立するために滑雪に関わる膜材料特性を検討している

第4章「膜構造建築物における屋根形状と屋根上積雪荷重」

膜構造建築物における屋根形状と屋根上積雪荷重との関わり合いについて実験および膜構造解析を行い，屋根形状が屋根上積雪荷重の評価に与えるに影響について検討している

第5章「膜構造建築物における制御積雪荷重」

前章までの結果を基に，膜構造建築物における制御積雪荷重の評価方法を提案し，その妥当性を検証している

第6章「結論」

研究のまとめ，今後の課題

図1-5 本論文の構成

## 第1章の参考文献

- 1) Torvald Faegre (磯野義人訳) : 天幕, エス・ピー・エス出版, 1985. 3
- 2) (社) 日本膜構造協会 : 膜構造—その現状と展望—, 1991. 3
- 3) Godfrey Rhodes : TENTS AND TENT-LIFE, 1858
- 4) R. N. デント (佐々木幹夫ほか訳) : 空気膜構造, 鹿島出版, 1975. 1
- 5) 石井一夫ほか : 建築膜構造の設計, 工業調査会, 1970. 6
- 6) 石井一夫 : 膜構造と大架構空間, 新建築, 第72巻6号, pp.193-198, 1997. 6
- 7) 建設省住宅局建築指導課 : 膜構造建築物技術基準・同解説, (社) 日本膜構造協会, 1991. 3
- 8) 石井一夫編 : 日本の膜構造・作品選集, SPS 出版, 1993. 2
- 9) 太陽工業(株) : 技術資料, 1995. 5
- 10) 新建築社 : 膜構造デザインの系譜, 1990. 9
- 11) 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
- 12) Kazuo Ishii : MEMBRANE STRUCTURES IN JAPAN, SPS PUBLISHING COMPANY, 1995. 1
- 13) (財) 日本建築センター : ビルディングレター, 1993. 8
- 14) (財) 日本建築センター : ビルディングレター, 1994. 9
- 15) (財) 日本建築センター : ビルディングレター, 1995. 9
- 16) 国土庁地方振興局編 : 豪雪地帯の現状と対策, 1991. 8
- 17) (社) 雪センター : 雪国ふるさと自慢, 1997. 2
- 18) 田中義章ほか : 空気膜構造建物モデルを用いた融雪に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 785-786, 1984. 10
- 19) 川島 実ほか : 空気膜構造(エアサポートドーム)融雪実験 第1報 小型実験ドームによる融雪実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 787-788, 1984. 10
- 20) 森野仁夫ほか : 空気膜構造(エアサポートドーム)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, pp. 789-790, 1984. 10
- 21) 宮川保之ほか : 空気膜構造棟に関する実験・研究(その8 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, pp. 629-630, 1985. 10
- 22) 川島 実ほか : 空気膜構造(エアサポートドーム)融雪実験 第3報 融雪シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 913-914, 1985. 10
- 23) 森野仁夫ほか : 空気膜構造(エアサポートドーム)融雪実験 第4報 融雪に要する熱量の定量化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 915-916, 1985. 10
- 24) 西川 薫ほか : 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, pp. 893-894, 1986. 8
- 25) 西 安信ほか : 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, pp. 895-896, 1986. 8
- 26) Thorburn H. J. and Schriever W. R. : Recent failures point out importance of snow load on roofs, National Builder, Vol. V, No. 5, pp. 18-21, 1959. 5
- 27) Taylor D. A. : A survey of snow load on roof of arena-type buildings in Canada, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 85-96, 1978. 3
- 28) Taylor D. A. and Schriever W. R. : Unbalanced snow distributions for the design of arch-shaped roofs in Canada, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 6, No. 7, pp. 651-656, 1980. 12
- 29) P. A. Irwin and S. L. Gamble : Predicting Snow Load on the Toronto Skydome, First International Conference on Snow Engineering, Santa Barbara, California, pp. 118-127, 1988. 7
- 30) Kurokawa Y. et al. : Akita skydome in Japan Part-1 general function, structural design and construction, International Association for Shell and Spatial Structures, Symposium Spatial Structures, IASS International Congress, pp. 331-340, 1990. 9
- 31) Akiyama S. et al. : Akita skydome in Japan Part-2 analyses and tests for structural design, International Association for Shell and Spatial Structures, Symposium Spatial Structures, IASS International Congress, pp. 341-350, 1990. 9
- 32) G. Dalziet et al. : The Effects of Snow Load on Cylindrical Air-Supported Structures, Innovative Large Span Structures Vol. 1, IASS International Congress, pp. 768-777, 1992. 7

- 33) K. Otuka et al. : Removal of Snow from Membrane Structures, Second International Conference on Snow Engineering, pp.263-274,1992. 6
- 34) T.Tomabechi et al. : Snow Sliding on Membrane roof, Summary Papers of 3rd International Conference on Snow Engineering, pp.109-110,1996. 5
- 35) 苫米地司 : 諸外国の雪荷重規定, 日本雪工学会誌, Vol. 8, No. 1, pp.53-57, 1992. 1
- 36) 苫米地司 : 膜構造物の屋根雪の滑落雪性状について, 日本雪氷学会講演予講集, p. 50, 1989. 10号, pp. 46-49, 1996. 7
- 37) 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
- 38) 山口英治ほか : 膜材を用いた屋根の屋根雪滑落雪性状について, 日本建築学会大会講演梗概集, pp. 121-122, 1990. 10
- 39) 山口英治ほか : 膜構造物の雪処理に関する研究, 寒地技術シンポジウム'90講演論文集, pp. 295-300, 1990. 12
- 40) 大塚清敏ほか : 膜構造物の雪処理に関する研究, 膜構造研究論文集'90, No. 4, pp. 55-68, 1990. 12
- 41) 本間義教ほか : 膜構造物の雪処理に関する研究 その7 融雪・強制落雪効率, 日本建築学会学術講演梗概集, PP. 119-120, 1991. 9
- 42) 前田博司 : 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, pp. 199~204, 1979. 9
- 43) 前田博司ほか : 屋根の雪荷重に関する基礎的研究, 日本建築学会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP. 559~560, 昭和50年10月
- 44) 上野 学ほか : 雪氷に対する屋根鋼板の特性評価, 日本雪氷学会誌, 雪氷, 49巻, 3号, PP. 131-137, 1987. 9
- 45) 渡辺正朋ほか : 屋根葺材と屋根雪の摩擦に関する研究 (その1) 主要な屋根葺材と氷ブロックの静摩擦, 日本雪工学会誌, 第3号, pp. 1-11, 1987. 6
- 46) 渡辺正朋ほか : 屋根葺材と屋根雪の摩擦に関する研究 (その2) 屋根葺材に対する雪氷の滑走速度および動摩擦, 日本雪工学会誌, 第9号, pp. 4-15, 1988. 12
- 47) 遠藤八十一ほか : 屋根雪の滑落条件と飛距離, 寒地技術シンポジウム'88講演論文集, PP. 220-225, 1988. 11
- 48) 福士昭治ほか : 膜構造建築物の屋根雪処理に関する実験的研究 (その1), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 109-110, 1991. 9
- 49) 山口英治ほか : 膜構造建築物の屋根雪処理に関する実験的研究 (その2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 111-112, 1991. 9
- 50) 橋本茂樹ほか : 膜構造建築物の屋根雪処理に関する実験的研究 (その3), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 113-114, 1991. 9
- 51) 福士昭治ほか : 膜構造建築物の屋根雪処理に関する実験的研究 (その4), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 231-232, 1992. 8
- 52) 早川 真ほか : 膜屋根用の落雪制御システムの開発概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1035-1036, 1991. 9
- 53) 前田博司ほか : ドーム型膜構造建築物における積雪性状の観測, 第12回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 17-22, 1996. 1
- 54) 鳥羽 厚 : 青森市屋内グラウンド「サンドーム」, 日本雪工学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 30-35, 1995. 10
- 55) 苫米地司ほか : 開閉機構を持つ膜屋根構造物の開発 その2 雪荷重の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 767-768, 1995. 8
- 56) 荒島裕重ほか : 膜屋根の雪処理に関する屋外実験について, 日本雪氷学会, 北海道の雪氷, 第15
- 57) 小竹達也ほか : 膜屋根構造物の屋根上積雪荷重評価について, 膜構造研究論文集'95, No. 9, pp. 79-86, 1995. 12
- 58) 苫米地司ほか : 制御積雪荷重に関する一考察, 第13回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 13-14, 1996. 11
- 59) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司 : 膜構造建築物における屋根上積雪荷重の評価に関する基礎的研究 屋根上積雪荷重の低減に効果的な屋根形状の提案, 日本雪工学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 4-16, 1997. 10
- 60) (社)日本建築学会編 : 建築物荷重指針・同解説, pp. 197-200. 1993



## 第2章 多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する調査

2.1	はじめに	2-1
2.2	多雪地域における膜構造建築物の建設状況	2-2
2.3	膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する ヒアリング調査および現地調査	2-5
2.3.1	屋根上積雪状況に関する調査方法	2-5
2.3.2	屋根上積雪状況に関する調査結果	2-12
2.4	膜構造建築物の構工法と屋根上積雪荷重	2-24
2.4.1	膜構造建築物の構造特性	2-24
2.4.2	膜構造建築物における構造方式 と屋根上積雪荷重との関わり	2-25
2.5	膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価の現状	2-27
2.5.1	日本における屋根上積雪荷重評価の現状	2-27
2.5.2	ISOおよび諸外国における屋根上積雪荷重評価の現状	2-29
2.5.3	膜構造建築物における審査基準	2-31
2.6	まとめ	2-34
	参考文献	2-36

## 第2章 多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する調査

### 2.1 はじめに

---

多雪地域における膜構造建築物の建設は1980年代後半から始まり、現在では大規模な膜構造建築物の施工事例も増えつつある。1997年には、北海道・札幌市に「札幌コミュニティドーム（最大スパン132m）」、秋田県・大館市に「大館樹海ドーム（最大スパン175m）」、石川県・小松市に「こまつドーム（最大スパン160m）」と相次いで建設され、各地域の象徴的な建築物となっている<sup>1)</sup>。このような膜構造建築物が今後も計画されており、1998年には兵庫県・日高町に「(仮称)但馬ドーム（最大スパン150m）」、2000年には宮城県・仙台市に「(仮称)仙台ドーム（最大スパン150m）」と建設が予定されている<sup>1)</sup>。

膜構造建築物に用いられる膜材料は、第1章に示したように柔らかい拡散光を透過させる性状を持っているため明るい空間を創り出すことができる。この膜材料の特性である光の透過性状は、わずかな積雪でも損なわれるため、多雪地域に膜構造建築物を設計する場合、屋根雪処理によって長時間屋根面に雪を積もらせない工夫を常に行っている。しかし、膜構造建築物の設計の多くは、積極的に屋根雪処理を行わない建築物と同一の荷重評価で行っているのが一般的である。この原因は、屋根雪処理方法に関する有効性が十分に把握されていないためである。

このような背景から本章では、膜構造建築物における屋根上積雪荷重を合理的に評価するための資料を得ることを目的に、多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する実態調査を実施した。これらの結果を基に、膜構造建築物における構工法と屋根雪処理との関わりについて検討を行い、膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価の現状を明らかにした。

## 2.2 多雪地域における膜構造建築物の建設状況

図2-1 に、多雪地域における膜構造建築物の建設分布状況を示す。なお、図中には、1985～1997年の主な実績を示している<sup>1)～6)</sup>。図に示すように、膜構造建築物は、北海道、東北および北陸地方と幅広く建設されている状況がみられる。各県の建設状況をみると、多雪地域に建設された膜構造建築物の56.3%にあたる18件が北海道、青森県および秋田県に建設されている。このように多雪地域の中でも、気温が低く、雪に閉ざされる期間が長い北海道および東北地方に膜構造建築物の件数が多い。この状況を膜構造建築物の累積建設件数および累積膜伏面積でみると、図2-2 となる。なお、図中に示したそれぞれの値は、第1章1.1.3 で用いた同一の資料から整理した。図に示すように多雪地域の膜構造建築物は、1985年岩手県・江刺市に建設された「いわてキャンパル工場（膜伏面積2,160m<sup>2</sup>）」に始まる。その後、1988年北海道・壮瞥町に「洞爺サンパレス大浴場棟（膜伏面積2,783m<sup>2</sup>）」、帯広市に「まいどーむ（膜伏面積1,485m<sup>2</sup>）」が建設され、1989年には膜伏面積10,000m<sup>2</sup>を超える「あきたスカイドーム」が建設され、多雪地域における本格的な膜構造建築物の時代を迎えた。これ以降、多雪地域における膜構造建築物の建設件数も大きく増え、1992年には累積件数で24件となっている。累積膜伏面積をみると、1988年ではわずか6,424m<sup>2</sup>であったのに対し、4年後の1992年には約10倍の69,869m<sup>2</sup>の膜伏面積までに増加している。その後も建設件数および膜伏面積は、増加傾向を示している。

多雪地域における膜構造建築物の特徴をみると、建設件数に対して膜伏面積が大きい傾向がある。このことは、図2-1 に示すように近年建設された膜構造建築物をみても、こまつドーム、札幌コミュニティドーム、大館樹海ドームなどのようにスパン100m以上の大規模な膜構造建築物が多いことにも裏付けられる。今後の計画をみても、但馬ドーム、仙台ドームと、この傾向が続く。この状況をみると、多雪地域において求められる膜構造建築物は、大規模であるところに特徴がある。これらの膜構造建築物の構造方式をみると、初期にはサスペンション膜構造が用いられていたが、大規模になるにともない全てが骨組膜構造となっている。さらに、一般地域で用いられている空気膜構造は一例もない。これらの点が多雪地域における構造的な特徴である。



図 2 - 1 多雪地域における膜構造建築物の建設分布図

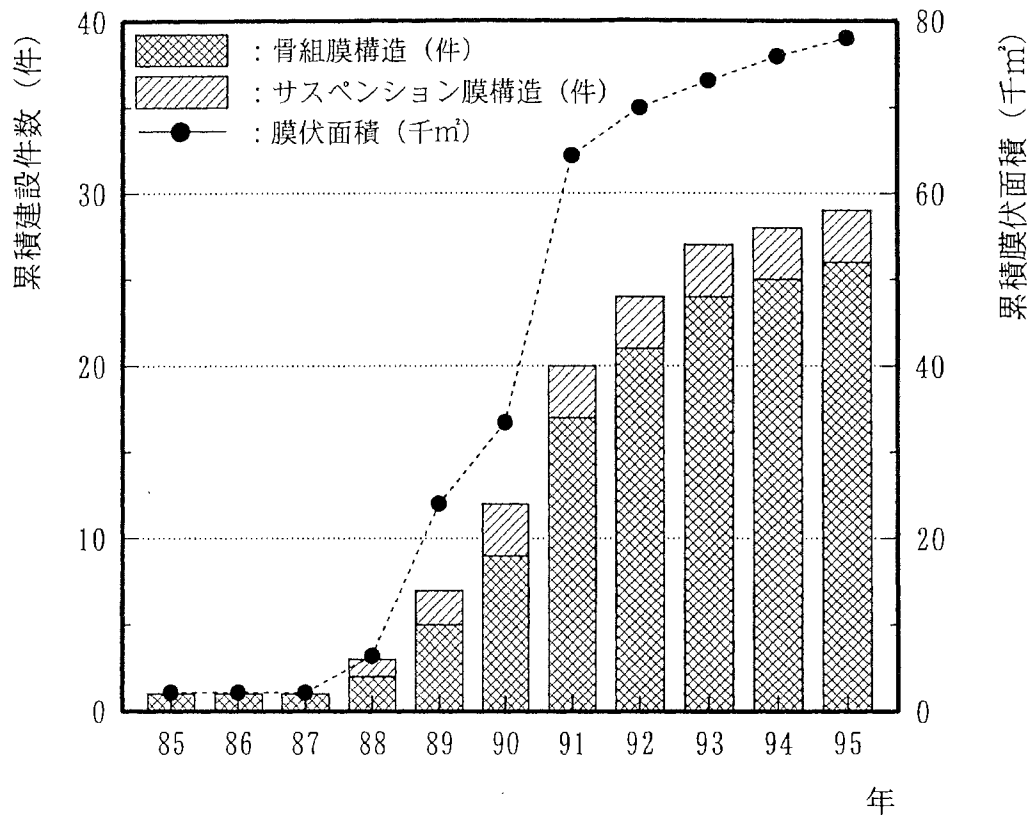


図 2 - 2 膜構造建築物の累積建設件数および累積膜伏面積

## 2.3 膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する ヒアリング調査および現地調査

### 2.3.1 屋根上積雪状況に関する調査方法

本節では、膜構造建築物の合理的な屋根上積雪荷重の評価を行うための資料を得ることを目的に、多雪地域に建設された膜構造建築物の屋根上積雪状況について現地管理者、建築物所在地の建築指導課を対象としたヒアリング調査および冬期間の現地調査を行った。

図2-3 に、調査対象とした膜構造建築物の分布図、表2-1(1/5～5/5) に調査対象とした膜構造建築物の概要を示す。本調査は、図および表に示すように北海道、東北および北陸地方に建設された膜構造建築物（9件）の現地管理者および建築物所在地の建築指導課を対象にヒアリング調査を行った。調査項目は、以下に示す。なお、表中の屋根形状に関する項目には、膜材料の張り方について記載している。以下、膜材料をV字状に張った場合には「V字張り屋根形状」（調査整理番号No. 1, 2, 7, 8, 9 の膜構造建築物）、平面的に張った場合には「平張り屋根形状」（調査整理番号No. 3, 4, 5, 6の膜構造建築物）という。

#### 主な調査項目

(1) 建築物概要	-----	現地管理者を対象
(2) 設計用屋根上積雪荷重	-----	建築物所在地の建築指導課を対象
(3) 屋根上積雪状況	-----	現地管理者を対象
(4) 屋根雪処理方法	-----	現地管理者を対象
(5) 屋根雪の滑雪状況	-----	現地管理者を対象
(6) 屋根雪の滑雪後の状況	-----	現地管理者を対象
(7) 屋根雪に関わる冬期間の不具合	-----	現地管理者を対象
(8) 室内温度など室内環境に関わること	----	現地管理者を対象

#### 冬期間の現地調査を行った膜構造建築物

- (1) 北海道・札幌市「農試公園屋内広場ツインキャップ」
  - (2) 北海道・厚真町「厚真スタードーム」
  - (3) 青森県・青森市「青森市屋内グラウンドサンドーム」
  - (4) 秋田県・雄和町「あきたスカイドーム」
  - (5) 長野県・野沢温泉村「野沢温泉村総合アリーナ」
  - (6) 石川県・能都町「WAVEのと」
- 以上6件

なお、現地調査時の気象条件については、最寄りの気象官署の観測値を用いた。各項目の不十分な点は、「日本の膜構造作品集」および既往の研究論文で補った<sup>7)</sup>。

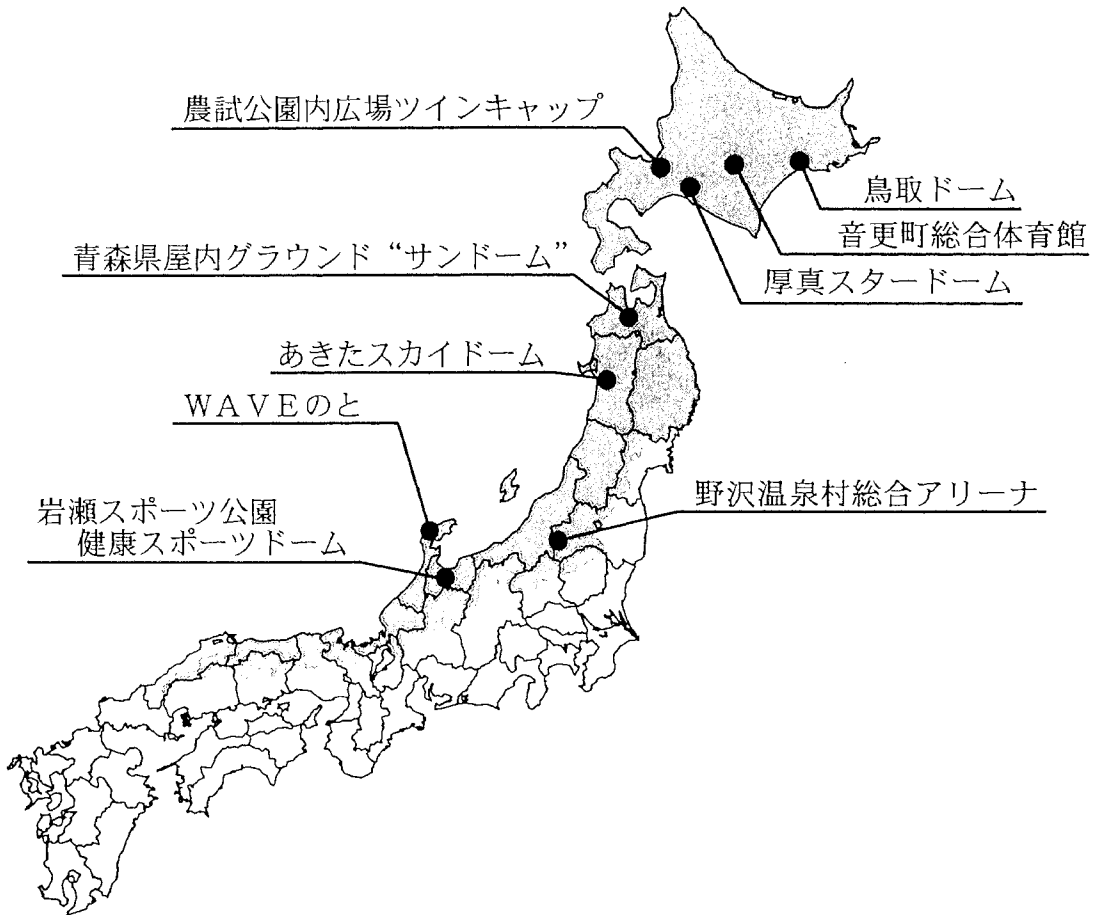




図 2 - 3 調査対象とした膜構造建築物の分布図

表2-1 調査対象とした膜構造建築物の概要 (1/5)

調査整理番号No. 1の膜構造建築物の名称：岩瀬スポーツ公園健康スポーツドーム	
	<p>【建築場所】 富山県・富山市</p> <p>【主用途】 スポーツ施設</p> <p>【膜伏面積】 2,448.3m<sup>2</sup></p> <p>【最高高さ】 GL+30.9m</p> <p>【軒高】 GL+8.6m</p> <p>【最大スパン】 64.2m</p> <p>【屋根部の構造】</p> <p>1) 屋根構造：骨組，一重膜構造</p> <p>2) 屋根形状：錘形型， V字張り屋根形状</p> <p>【設計用屋根上積雪荷重S.L.】</p> <p>S.L. = SD × ρ × α</p> <p>1) 設計用屋根上積雪深：SD=150cm</p> <p>2) 雪の単位重量：ρ = 3kg/m<sup>2</sup>/cm</p> <p>3) 長期として扱う場合に定めた 乗すべき数値：α = 0.25<sup>7)</sup></p>


注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。

調査整理番号No. 2の膜構造建築物の名称：野沢温泉村総合アリーナ	
	<p>【建築場所】 長野県・野沢温泉村</p> <p>【主用途】 温水プール</p> <p>【膜伏面積】 2,000m<sup>2</sup></p> <p>【最高高さ】 GL+18m</p> <p>【軒高】 GL+8.4m</p> <p>【最大スパン】 50m</p> <p>【屋根部の構造】</p> <p>1) 屋根構造：骨組，一重膜構造</p> <p>2) 屋根形状：円弧アーチ型， V字張り屋根形状</p> <p>【設計用屋根上積雪荷重S.L.】</p> <p>S.L. = SD × ρ × α</p> <p>1) 設計用屋根上積雪深：SD=300cm</p> <p>2) 雪の単位重量：ρ = 3kg/m<sup>2</sup>/cm</p> <p>3) 長期として扱う場合に定めた 乗すべき数値：α = 1.0</p>

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。α=1.0は、乗すべき数値なしを示す。



表2-1 調査対象とした膜構造建築物の概要 (2/5)

調査整理番号No. 3の膜構造建築物の名称：農試公園屋内広場ツインキャップ	
	<p>【建築場所】 北海道・札幌市</p> <p>【主用途】 スポーツ場上屋</p> <p>【膜伏面積】 475.1m<sup>2</sup></p> <p>【最高高さ】 GL+24m</p> <p>【軒高】 GL+4.8m</p> <p>【最大スパン】 25m</p> <p>【屋根部の構造】</p> <p>1) 屋根構造：骨組、一重膜構造</p> <p>2) 屋根形状：円形型 平張り屋根形状</p> <p>【設計用屋根上積雪荷重S. L.】</p> <p>S. L. = SD × ρ × α</p> <p>1) 設計用屋根上積雪深：SD=100cm</p> <p>2) 雪の単位重量：ρ = 3kg/m<sup>2</sup>/cm</p> <p>3) 長期として扱う場合に定めた 乗すべき数値：α = 0.7</p>

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。

調査整理番号No. 4の膜構造建築物の名称：鳥取ドーム	
	<p>【建築場所】 北海道・釧路市</p> <p>【主用途】 体育館</p> <p>【膜伏面積】 1,710m<sup>2</sup></p> <p>【最高高さ】 GL+18.9m</p> <p>【軒高】 GL+4.6m</p> <p>【最大スパン】 67.3m</p> <p>【屋根部の構造】</p> <p>1) 屋根構造：骨組、一重膜構造</p> <p>2) 屋根形状：四角錐型 平張り屋根形状</p> <p>【設計用屋根上積雪荷重S. L.】</p> <p>S. L. = SD × ρ × α</p> <p>1) 設計用屋根上積雪深：SD=60cm</p> <p>2) 雪の単位重量：ρ = 2kg/m<sup>2</sup>/cm</p> <p>3) 長期として扱う場合に定めた 乗すべき数値：α = 1.0</p>

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。α = 1.0は、乗すべき数値なしを示す。

表2-1 調査対象とした膜構造建築物の概要 (3/5)

調査整理番号No. 5の膜構造建築物の名称：厚真スタードーム



- 【建築場所】 北海道・厚真町
- 【主用途】 スポーツセンター
- 【膜伏面積】  $2,110\text{m}^2$
- 【最高高さ】  $\text{GL}+17.3\text{m}$
- 【軒高】  $\text{GL}+6.9\text{m}$
- 【最大スパン】  $54.7\text{m}$
- 【屋根部の構造】
  - 1) 屋根構造：骨組，一重膜構造
  - 2) 屋根形状：寄棟型  
平張り屋根形状
- 【設計用屋根上積雪荷重S. L.】  
 $S. L. = SD \times \rho \times \alpha$ 
  - 1) 設計用屋根上積雪深： $SD=50\text{cm}$
  - 2) 雪の単位重量： $\rho=2\text{kg/m}^2/\text{cm}$
  - 3) 長期として扱う場合に定めた  
乗すべき数値： $\alpha=1.0$

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1996年調査)。 $\alpha=1.0$ は、乗すべき数値なしを示す。

調査整理番号No. 6の膜構造建築物の名所：音更町総合体育館サンドームおとふけ




- 【建築場所】 北海道・音更町
- 【主用途】 体育館
- 【膜伏面積】  $2,000\text{m}^2$
- 【最高高さ】  $\text{GL}+23.5\text{m}$
- 【軒高】  $\text{GL}+12\text{m}$
- 【最大スパン】  $60\text{m}$
- 【屋根部の構造】
  - 1) 屋根構造：骨組，二重膜構造
  - 2) 屋根形状：円形型  
平張り屋根形状
- 【設計用屋根上積雪荷重S. L.】  
 $S. L. = SD \times \rho \times \alpha$ 
  - 1) 設計用屋根上積雪深： $SD=100\text{cm}$
  - 2) 雪の単位重量： $\rho=3\text{kg/m}^2/\text{cm}$
  - 3) 長期として扱う場合に定めた  
乗すべき数値： $\alpha=0.7$

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。 $\alpha=1.0$ は、乗すべき数値なしを示す。

表2-1 調査対象とした膜構造建築物の概要 (4/5)

調査整理番号No. 7の膜構造建築物の名称：あきたスカイドーム	
	<p>【建築場所】 秋田県・雄和町</p> <p>【主用途】 屋内グラウンド</p> <p>【膜伏面積】 12,123.8m<sup>2</sup></p> <p>【最高高さ】 GL+32.2m</p> <p>【軒高】 GL+4.9m</p> <p>【最大スパン】 122m</p> <p>【屋根部の構造】</p> <p>1) 屋根構造：骨組，一重膜構造</p> <p>2) 屋根形状：球面シェル型， V字張り屋根形状</p> <p>【設計用屋根上積雪荷重S.L.】</p> <p>S.L. = SD × ρ × α</p> <p>1) 設計用屋根上積雪深：SD=150cm</p> <p>2) 雪の単位重量：ρ = 3kg/m<sup>2</sup>/cm</p> <p>3) 長期として扱う場合に定めた 乗すべき数値：α = 0.7<sup>R)</sup></p>

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。

調査整理番号No. 8の膜構造建築物の名所：青森市屋内グラウンドサンドーム	
	<p>【建築場所】 青森県・青森市</p> <p>【主用途】 屋内グラウンド</p> <p>【膜伏面積】 5,254m<sup>2</sup></p> <p>【最高高さ】 GL+24.6m</p> <p>【軒高】 GL+5.2m</p> <p>【最大スパン】 65m</p> <p>【屋根部の構造】</p> <p>1) 屋根構造：骨組，一重膜構造</p> <p>2) 屋根形状：円弧アーチ型， V字張り屋根形状</p> <p>【設計用屋根上積雪荷重S.L.】</p> <p>S.L. = SD × ρ × α</p> <p>1) 設計用屋根上積雪深：SD=150cm</p> <p>2) 雪の単位重量：ρ = 3kg/m<sup>2</sup>/cm</p> <p>3) 長期として扱う場合に定めた 乗すべき数値：α = 0.8</p>

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)～3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。

表2-1 調査対象とした膜構造建築物の概要 (5/5)

調査整理番号No. 7の膜構造建築物の名所：WAVEのと



【建築場所】	石川県・能登町
【主用途】	屋内テニスコート
【膜伏面積】	3,398.6m <sup>2</sup>
【最高高さ】	GL+25m
【軒高】	GL+7.5m
【最大スパン】	84m
【屋根部の構造】	
1) 屋根構造	骨組、一重膜構造
2) 屋根形状	切妻型、 V字張り屋根形状
【設計用屋根上積雪荷重S.L.】	
	$S.L. = SD \times \rho \times \alpha$
1) 設計用屋根上積雪深	SD=150cm
2) 雪の単位重量	$\rho = 3\text{kg/m}^2/\text{cm}$
3) 長期として扱う場合に定めた 乗すべき数値	$\alpha = 0.7$

注記) 設計用屋根上積雪荷重の1)~3)は、建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995年調査)。

### 2.3.2 屋根上積雪状況に関する調査結果

本調査結果を整理すると、表2-2(1/2, 2/2)となる。各膜構造建築物における屋根雪処理方法をみると、調査整理番号No.1の岩瀬スポーツ公園健康スポーツドームのみ自然滑雪処理を採用している。他の調査整理番号No.2～9の膜構造建築物は、室内暖房および室内側から膜面（以下、室内側の膜面を「膜材料裏面」という。）に温風を吹きつけるなど何らかの熱エネルギーを与えて屋根雪を融滑雪させる処理方法を採用している。これら9件の膜構造建築物について屋根雪処理方法別に整理すると、以下のようになる。

#### 2.3.2.1 自然滑雪処理

##### (1) 岩瀬スポーツ公園健康スポーツドーム

調査整理番号No.1の「岩瀬スポーツ公園健康スポーツドーム」は、屋根勾配40°以上の急勾配であると同時に建設地富山市における1,2月の平均気温を日本気候表でみると+2.0℃程度であることから極めて屋根雪が滑雪しやすい条件となっている。1995年10月の現地管理者を対象としたヒアリング調査においても、降雪直後に滑雪が発生して屋根面に雪が残らないとのことであった。なお、この膜構造建築物は、建築基準法施行令第86条4項の規定に基づき建設地における膜屋根の滑雪実験を行い、設計用屋根上積雪荷重に乗すべき数値として0.25を設定している<sup>7)</sup>。従って、富山市における一般建築物の設計用屋根上積雪荷重が $150\text{cm} \times 3.0\text{kg/m}^2/\text{cm} \times 0.7 = 315\text{kg/m}^2$ であるのに対し、 $150\text{cm} \times 3.0\text{kg/m}^2/\text{cm} \times 0.25 = 112.5\text{kg/m}^2$ と約1/3の荷重で設計が行われている。

本ドームのように、屋根勾配40°以上の急勾配であると同時に建設地富山市における冬期の平均気温がプラス温度である場合には、降雪直後に滑雪現象が顕著に発生することが明らかとなった。このことから、屋根勾配や外気温など膜構造建築物における滑雪発生条件が明らかとなれば、日本建築学会荷重指針に示されている制御積雪荷重を滑雪現象に基づいて設定することが可能と考える。

#### 2.3.2.2 室内暖房による融滑雪処理

##### (1) 野沢温泉村総合アリーナ

調査整理番号No.2の「野沢温泉村総合アリーナ」は、用途が温水プールとなっており、室内暖房のみで他に融雪装置を施していない。室内に送風される温風の吹き出し温度は、+30.0℃程度である。1993年2月2～4日の現地調査時は、施工中で

室内暖房が稼働していない状態であったため、屋根雪の自然滑雪を対象とした調査を行った。2月2日の滑雪状況をみると、写真2-1に示すように屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の部位で自然滑雪現象がみられたが、屋根頂部付近に若干の雪が残る状況であった。この残雪は、時間の経過に伴い低速度の屋根雪移動がみられ、1～2日程度で屋根面から全てなくなる状況が観察された。他の日も前述と同様に、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の部位で自然滑雪現象がみられた。なお、滑雪時における外気温は、 $-2.0\sim+1.0^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。残雪の深さは、最も深い部位で50cm程度であった。

室内暖房が稼働している状態での現地管理者を対象としたヒアリング調査では、室内暖房および温水プールの影響を受けて膜材料裏面の近傍温度が上昇するため、自然滑雪現象が発生しにくい屋根頂部付近の雪も、融滑雪および融雪現象が円滑に発生して屋根面に雪が残らないとのことであった。また、本アリーナの屋根形状は膜材料をV字状に張っているため、各V字ごとに屋根雪が分割され滑雪現象が発生している。この現象は、V字の両脇峰部が屋根雪の連続性を分割しているためと考える。なお、V字の深さは最も深い部分で1.9mである。

本アリーナのように、円弧アーチ型の屋根形状では屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の部位で自然滑雪現象が発生することが明らかとなった。また、屋根雪の滑雪状況をみると、各V字ごとに滑雪現象が発生していることから、膜材料の張り方が滑雪現象に影響していると考えられる。

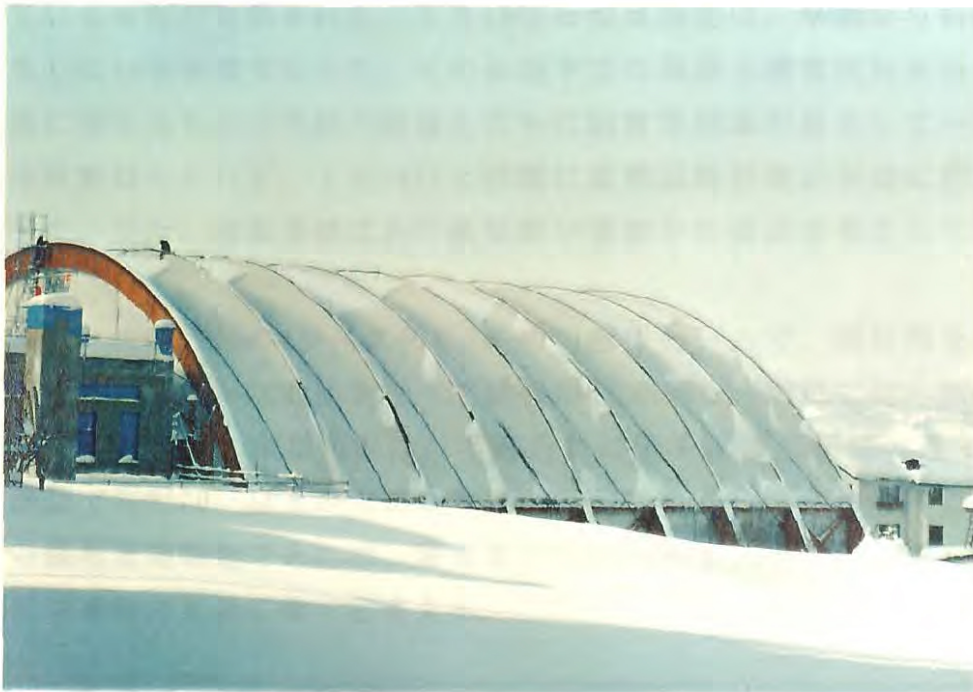


写真2-1 野沢温泉村総合アリーナの屋根上積雪状況

## 2.3.2.3 膜材料の裏面に温風を吹き付けた融滑雪処理

### (1) 農試公園屋内広場ツインキャップ

調査整理番号No.3の「農試公園屋内広場ツインキャップ」は、温風を膜裾部から膜材料裏面に送風して屋根雪を融滑雪および融雪処理する方法を採用している。温風の吹き出し温度は、+30.0～+35.0℃程度である。現地管理者を対象としたヒアリング調査および現地調査は、1995年12月～1997年2月の冬期間に行った。本調査の1995年12月～1996年3月は、北海道札幌市で50年ぶりの豪雪年であった。1995年12月12日には1日の降雪の深さの合計値（以下、「日降雪深」という。）が51cm（日最高気温+1.2℃，日平均気温-1.2℃），13日には日降雪深23cm（日最高気温+0.3℃，平均気温-1.4℃）となり，12月の累積降雪量が観測史上第1位で記録的な大雪となった。この両日を対象とした現地管理者を対象としたヒアリング調査では，一日中屋根面に雪が残っている状況はみられず，温風送風装置が有効に作用して融滑雪現象が発生しているとのことであった。

1996年1月の現地調査は，1月10日（日最高気温+2.6℃，日平均気温-0.6℃）および1月16日（日最高気温+2.1℃，日平均気温-1.5℃）に行った。両日の降雪状況をみると，1月10日の場合，降雪が前々日に18cm，前日に41cmの降雪が観測されている。1月16日の場合，前日に降雪がなく当日に25cmの降雪が観測されている。写真2-2に，1月10日の屋根上積雪状況を示す。写真のように，屋根面には残雪がみられず，前述のヒアリング調査結果と同様に温風送風装置による屋根雪処理が有効に作用している状況が観察された。1月16日の現地調査は，早朝から断続的に降雪現象が発生している状況で行った。この状況下での屋根上積雪状況をみると，一時的に屋根面に積もるものの時間の経過とともに融滑雪現象が発生して一日中屋根面に雪が残る状態はみられず，1月10日と同様に温風送風装置が有効に作用している状況であった。また，屋根頂部にある換気塔が雪割りの役目を果たしている状況であった。

本屋内広場は，直径約25m，ライズ約5.5mの円形型ドームで，膜材料を球面に沿って張っているため滑らかな曲面を持った屋根形状である。頂部には，雪割りの役目を果たす換気塔がある。屋根勾配は，写真2-2に示すように頂部付近で勾配10°程度，他の部位で勾配20°以上の大きな勾配となっている。すなわち，このような規模，形状の膜構造建築物であれば，降雪量が51cmもある大雪に対しても融雪装置を用いた屋根雪処理が有効に働くと考える。

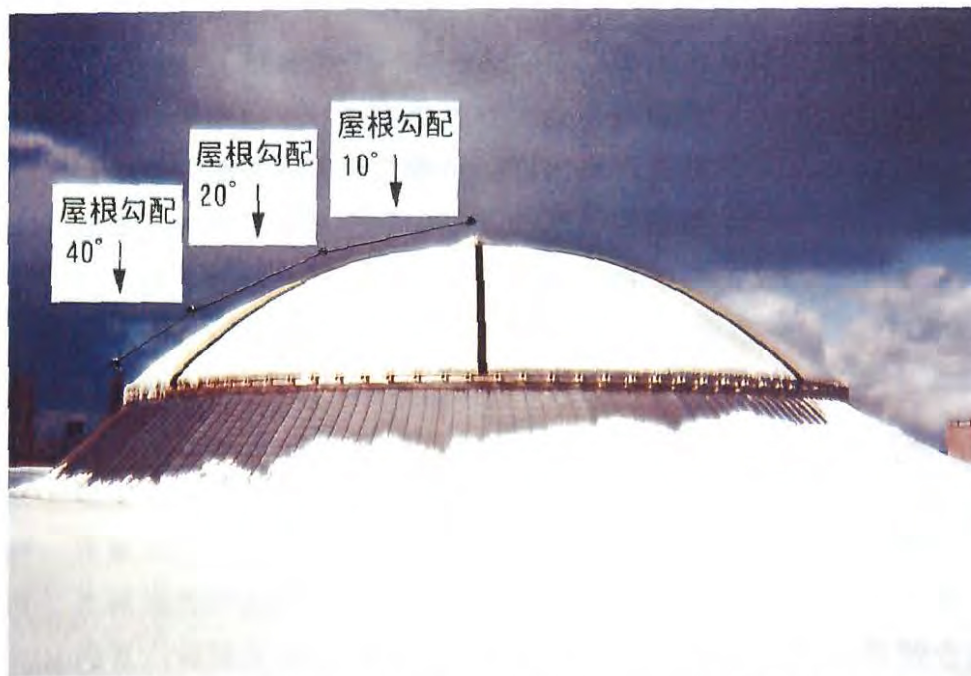


写真 2 - 2 農試公園屋内広場ツインキャップの屋根上積雪状況

## (2) 鳥取ドーム

調査整理番号No. 4の「鳥取ドーム」は、表2-2(1/2)に示すように、多雪地域の中でも設計用屋根上積雪荷重が  $60\text{cm} \times 2.0\text{kg/m}^2/\text{cm} = 120\text{kg/m}^2$  と比較的小さい。建設地鉦路市における冬期間の日降雪が10cm以上の発生頻度（1974年～1990年までの17年間における各年の12月～3月）をみても3日程度である<sup>10)</sup>。このように鉦路市は、多雪地域に指定されているが積雪量が極めて少ない地域である。本ドームは、室内暖房による暖かい空気を換気システムを用いて膜材料裏面に送風して屋根雪を融滑雪および融雪処理する方法を採用している。

1995年10月の現地管理者を対象としたヒアリング調査では、竣工後6年経過するが屋根面に雪が積もる状況がほとんどみられず、雪が積もった場合でも日射や換気システムが有効に作用して融滑雪や融雪現象が発生するため、屋根面に雪が残らないとのことであった。



### (3) 厚真スタードーム

調査整理番号No.5の「厚真スタードーム」は、前述の鳥取ドームと同様に多雪地帯の中でも積雪量が少ない地域に建設され、設計用屋根上積雪荷重については最も小さい。本ドームは、膜材料裏面に暖かい室内空気を膜裾部から送風して屋根雪を融滑雪および融雪処理する方法を採用している。送風温度は、+30.0℃程度である。

現地管理者を対象としたヒアリング調査および現地調査は、1996年2月9日（日 最高気温-1.7℃、日平均気温-6.3℃）に行った。この前後の降雪状況をみると、2月8日に4cmの降雪、2月9日に2cmの降雪が観測されている。なお、2月9日の地上積雪深は、70cmであった。

本ドームの屋根上積雪状況をみると、送風装置による屋根雪処理が有効に作用しているため、屋根面に雪が残っていない状況であった。しかし、写真2-3に示すように、滑雪した屋根雪が膜裾部に溜まり1m程度堆積している状況であった。膜裾部に多くの屋根雪が堆積すると、側圧として屋根面（膜材料）に影響を及ぼすことも十分に考えられるため、滑雪後の雪処理を考慮した建築計画が必要と考える。

現地管理者を対象としたヒアリング調査では、現地調査と同様に屋根雪処理が有効に作用して融滑雪や融雪現象が発生するため、屋根面に雪が残らないとのことであった。膜裾部の屋根雪の堆積状況については、いずれの日も現地調査時とほぼ同様の状況とのことであった。



写真2-3 滑雪した屋根雪が膜裾部に溜まった状況

#### (4) 音更町総合体育館

調査整理番号No.6の「音更町総合体育館」は、屋根構造が二重膜構造となっており外膜と内膜との間（180mm）に温風を膜裾部から送風して屋根雪を融滑雪および融雪処理する方法を採用している。本体育館は、二重膜構造と温風を併用しているため、結露の防止にも効果的な屋根構造となっている。温風の吹きだし温度は、+50.0℃程度である。現地管理者を対象としたヒアリング調査では、温風送風装置による屋根雪処理が有効に作用して融滑雪や融雪現象が発生するため、屋根面に雪が残る現象がみられないとのことであった。しかし、滑雪した屋根雪が、本体育館の周辺に堆積して除雪が必要とのことであった。なお、屋根頂部に換気塔が設置されているため、この換気塔が雪割りの役目を果たし滑雪効果を上げていると考える。

#### (5) 青森市屋内グラウンドサンドーム

調査整理番号No.7の「青森市屋内グラウンドサンドーム」は、温風を屋根頂部および膜裾部から膜材料裏面に送風して屋根雪を融雪処理する方法を採用している。温風の吹き出し温度は、+50.0～+60.0℃程度である。図2-4に1993年12月～1994年3月における冬期間の降雪状況、図2-5に1993年12月～1994年3月における冬期間の外気温状況を示す。両図のように、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以上で日平均気温が-4.0℃前後の場合が多く、強い吹雪が発生する状況下であった。

現地管理者を対象としたヒアリング調査および現地調査は、1994年1月20日（日最高気温-1.3℃、日平均気温-3.8℃）、1月21日（日最高気温+1.1℃、日平均気温-3.0℃）に行った。この前後の降雪状況をみると、1月19日に32cmの降雪、1月20日に32cmの降雪、1月21日に0cmの降雪が観測されている。なお、調査を行った両日とも温風送風装置が稼働している状態であった。図2-6に示すように屋根雪の滑雪現象は、4つの部位に分けて整理することができる。屋根勾配40°以上の部位では、降雪直後に滑雪現象が発生している。その後、屋根勾配20°以上の部位、屋根勾配10°以上の部位と円滑に滑雪現象が発生し、これらの部位では長時間屋根面に雪が堆積しない状況であった。屋根勾配10°未満の部位では、写真2-4に示すように部分的な残雪がみられるが、時間の経過に伴い低速度の滑雪および融雪が発生して一日中屋根面に雪が残る状況はみられなかった。

現地管理者を対象としたヒアリング調査では、屋根勾配40°以上の部位の場合、温風送風装置が稼働していない状態でも降雪直後に滑雪現象が発生し、雪が堆積することはないとのことであった。屋根勾配10°以上の部位にいおても温風送風装置稼働後、1時間程度で滑雪現象が発生するとのことであった。屋根勾配10°未満の

部位では、現地調査と同様に部分的な残雪がみられるが温風送風装置が有効に作用して一日中屋根面に雪が残る状況はみられないとのことであった。なお、温風送風装置稼働している状態の膜材料裏面の近傍温度は、 $+20.0^{\circ}\text{C}$ 程度とのことであった。本屋内グラウンドの屋根形状は、野沢温泉村総合アリーナと同様に膜材料をV字状に張っているため、各V字ごとに屋根雪が分割され滑雪が発生している。V字の深さは、最も深い部分で0.9mである。

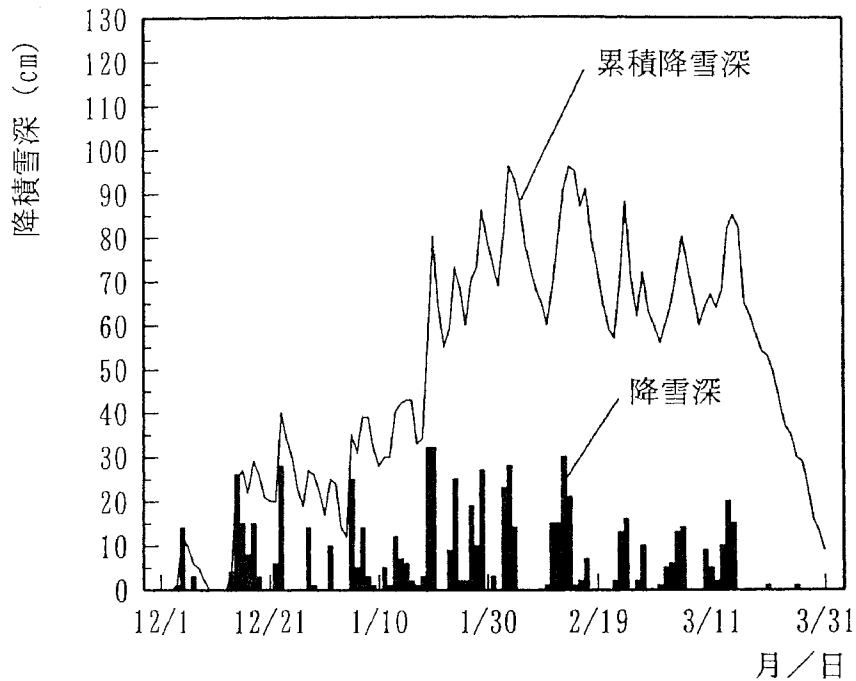


図 2 - 4 冬期間の降雪状況 (1993年12月～1994年3月)

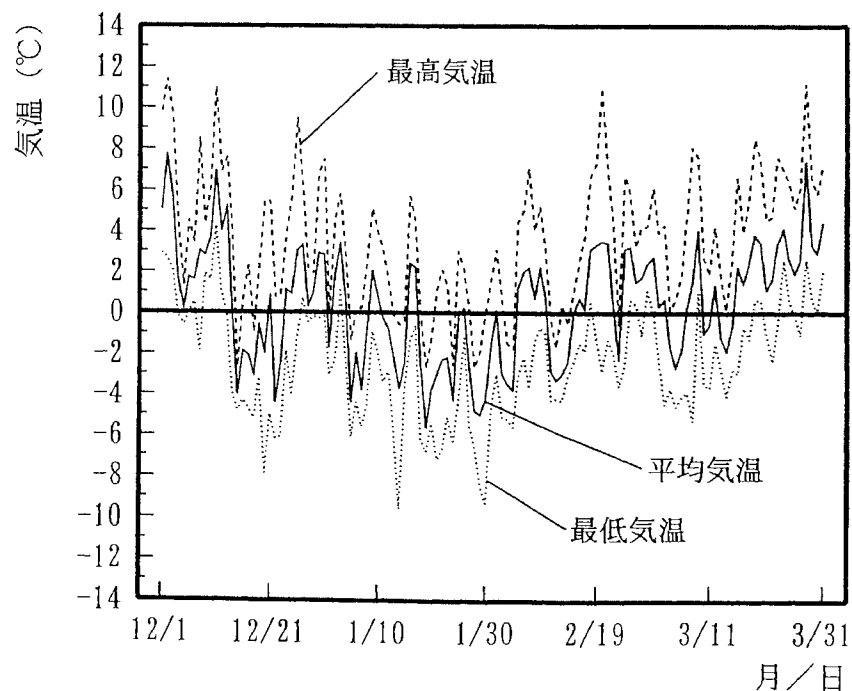


図 2 - 5 冬期間の外気温状況 (1993年12月～1994年3月)

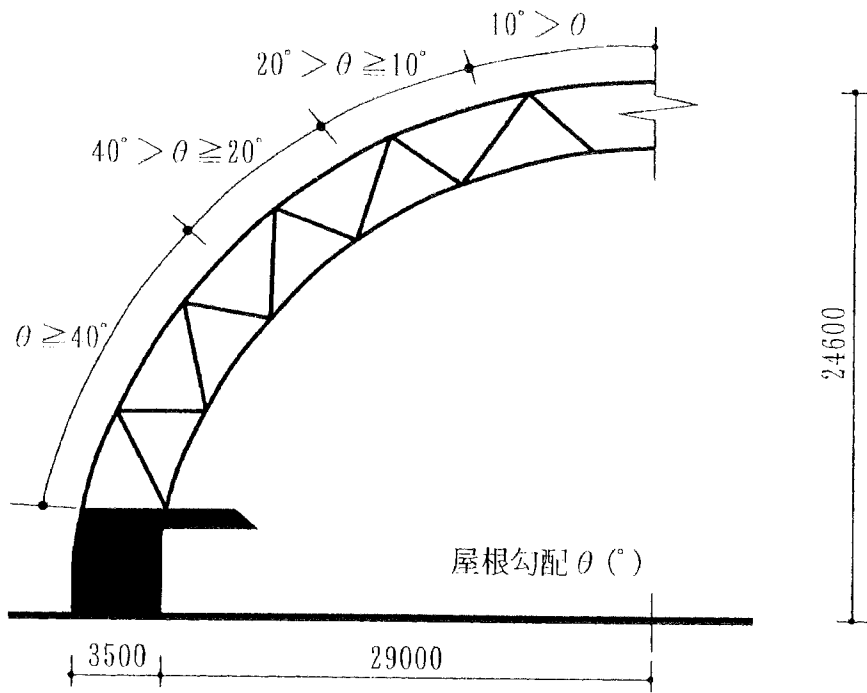


図 2 - 6 屋根雪の滑雪現象の発生部位



写真 2 - 4 部分的な残雪

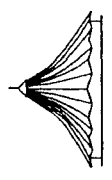
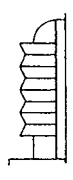
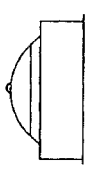
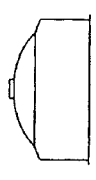
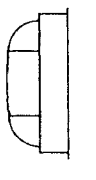
## (6) 秋田スカイドーム，WAVEのと

調査整理番号No. 8の「秋田スカイドームは」，長辺方向のアーチ材である鋼管をダクトとして兼用させ，この鋼管に取り付けた多数の小口径吹き出し口から温風を送風し，膜材料裏面全体を均一に暖めて屋根雪を融滑雪および融雪処理する方法を採用している。温風の吹き出し温度は，+25.0～+30.0℃程度である。調査整理番号No. 9の「WAVEのと」は，膜材料裏面に温風を膜裾部から送風して屋根雪を融滑雪および融雪処理する方法を採用している。温風の吹きだし温度は，+40.0℃程度である。なお，WAVEのとは，散水銃によって滑雪現象を助長する装置が備え付けられている。

「秋田スカイドーム」の場合，現地管理者を対象としたヒアリング調査では，屋根雪の滑雪処理後を考慮して軒下に堆積スペースを設けたが，このスペースを超える場合があるとのことであった。「WAVEのと」の場合，現地調査では，膜裾下部にある軒先が金属材料で仕上げられているため，多量の降雪現象が発生した時，この部分に積もった雪が滑雪現象の妨げとなっている状況が観察された。現地管理者を対象としたヒアリング調査では，金属屋根部に積もった雪は散水銃で処理するとのことであった。なお，温風送風装置が稼働している状態の膜材料裏面の近傍温度は，設備設計上で+20.0～+23.0℃である<sup>11)</sup>。

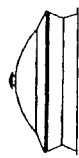
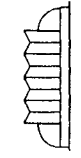
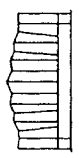
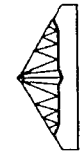
両者の屋根上積雪状況に関する現地調査での共通点をみると，温風送風装置が稼働していない状態に降雪現象が発生し屋根面に積もった場合でも，青森市屋内グラウンドサンドームと同様に温風送風装置を稼働後，1時間程度で融滑雪および融雪現象が発生して一日中屋根面に雪が残っていない状況であった。また，両者の膜構造建築物の屋根形状は，野沢温泉村総合アリーナおよび青森市屋内グラウンドサンドームと同様に膜材料をV字状に張っているため，各V字ごとに屋根雪が分割され滑雪現象が発生している。V字の深さは，最も深い部分で「秋田スカイドーム」が0.8m，「WAVEのと」が2.2mである。

表 2-2 調査結果のまとめ(1/2)

調査整理 番号 No.	膜構造建築物の 名称	膜構造建築物の 概要	調査年	調査方法	屋根雪 処理方法	設計用屋根上積雪荷重			屋根上積雪状況に関する 調査結果の概要
						SD	$\rho$	$\alpha$	
1	岩瀬スボーツ公園 健康スボーツA 富山県・富山市 1992年竣工	膜伏面積：2,448.3m <sup>2</sup> 最高高さ：GL+30.9m 軒高：GL+8.5m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：鐘形型、 V字張り屋根形状 	1995年 10月	現地管理者 にヒアリング 調査	自然降雪 処理	150 cm	3	0.25 文献(7)	屋根勾配40°以上の急勾配であるため、降雪直 後に滑雪現象が発生して屋根面に雪が残らない とのことであった。 滑雪処理後を考慮し、周囲に融雪池を設けてい る。
2	野沢温泉村総合 アリーナ 長野県・ 野沢温泉村 1993年竣工	膜伏面積：2,000m <sup>2</sup> 最高高さ：GL+18m 軒高：GL+4.8m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：円弧張り、 V字張り屋根形状 	1992年 2月	現地調査	室内暖房を 利用した 融雪雪、 融雪処理	300 cm	3	1.0	無暖房時の場合：屋根雪は、屋根勾配20°以上 の部位で滑雪現象がみられたが、屋根頂部付近 に若干の雪が残る状況であった。この残雪部位 においても、時間の経過に伴い低速度の屋根雪 の移動がみられ2日程度で屋根面から雪が全て なくなる状況であった。 暖房時の場合：室内暖房および温水プールの影 響を受けて膜材料裏面近傍の温度が上昇するた め、自然滑雪現象が発生しにくい屋根頂部付近 の雪も融雪雪や融雪現象が容易に発生し、屋根 面に雪が残らないとのことであった。
3	農試公園屋内広場 ツリキヤツギ 北海道・札幌市 1993年竣工	膜伏面積：475.1m <sup>2</sup> 最高高さ：GL+24m 軒高：GL+5.3m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：円形型 平張り屋根形状 	1995年 12月～ 1997年 2月の 冬期間	現地調査 および 現地管理者 にヒアリング 調査	温風送風 装置による 融雪雪、 融雪処理	100 cm	3	0.7	屋根面の雪は、温風送風装置による屋根雪処理 が有効に作用して融雪雪や融雪現象が発生する ため、降雪が51cmもある大雪に対してても一日中 屋根頂部の残る状況はみられない。 屋根頂部の換気塔が雪割りの役目を果たしてい る状況であった。
4	鳥取ドーム 北海道・釧路市 1989年竣工	膜伏面積：1,710m <sup>2</sup> 最高高さ：GL+18.9m 軒高：GL+4.6m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：四角錐型 平張り屋根形状 	1995年 10月	現地管理者 にヒアリング 調査	温風送風 装置による 融雪雪、 融雪処理	60 cm	2	1.0	積雪量が極めて少なく、屋根面に雪が積もる状 況がほとんどみられず、雪が積もった場合でも 日射や温風送風装置が有効に作用して屋根面に 雪が残らないとのことであった。 屋根頂部の換気塔が雪割りの役目を果たして いる。
5	厚真スボーツA 北海道・厚真町 1995年竣工	膜伏面積：2,110m <sup>2</sup> 最高高さ：GL+17.3m 軒高：GL+6.9m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：寄棟型 平張り屋根形状 	1996年 2月	現地調査 および 現地管理者 にヒアリング 調査	温風送風 装置による 融雪雪、 融雪処理	50 cm	2	1.0	屋根面の雪は、温風送風装置による屋根雪処理 が有効に作用して融雪雪現象が発生するため、 屋根面に雪が残らない状況であった。

(1) 設計用屋根上積雪荷重S.L. (長期)  
 1) S.L.=SD× $\rho$ × $\alpha$  (SD:積雪深cm,  $\rho$ :雪の単位重量kg/m<sup>3</sup>/cm,  $\alpha$ :特定行政庁が多雪地域において取用として扱う場合に定めた乗すべき数値。(表中1.0は、乗すべき数値なしを示す。))  
 2) 設計用屋根上積雪荷重の各項目は、各建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995,1996年調査)。  
 (2) 屋根勾配による低減係数の採用(文献(7))  
 1) 「健康スポーツドーム」は、建築基準法施行令第86条第4項の規定に基づき膜屋根の滑雪実験の結果、屋根上積雪荷重に乘すべき数値として0.25を採用している。

表 2-2 調査結果のまとめ (2/2)

調査整理番号 No.	膜構造建築物の名称	膜構造建築物の概要	調査年	調査方法	屋根雪処理方法	設計用屋根上積雪荷重		屋根上積雪状況に関する調査結果の概要
						SD	$\alpha$	
6	菅更町総合体育館 サド-4おとふけ 北橋道・菅更町 1991年竣工	<p>膜伏面積：2,000<sup>2</sup> 最高高さ：GL+23.5m 軒高：GL+12m 構造形式：骨組、二重膜構造 屋根形状：円形型、 平張り屋根形状</p> 	1995年 10月	現地管理者 にヒアリング 調査	温風送風 装置による 融雪処理	3	0.7	屋根面の雪は、温風送風装置による屋根雪処理が有効に作用して融雪や融雪現象が発生しないため、屋根面に雪が残る状況がみられないことであった。降雪した屋根雪が、この建築物周辺に堆積して除雪が必要とのことであった。屋根頂部の換気塔が雪割りの役目を果たしてると考える。
7	青森市屋内 カサノドサド-4 青森県・青森市 1991年竣工	<p>膜伏面積：5,254<sup>2</sup> 最高高さ：GL+24.6m 軒高：GL+5.2m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：円弧アーチ型、 V字張り屋根形状</p> 	1994年 1月 1995年 10月 ヒアリング 調査のみ	現地調査、 現地管理者 にヒアリング 調査および 調査および 連続ヒア リング 観測	温風送風 装置による 融雪処理 (文献?)	3	0.8	屋根面の雪は、温風送風装置による屋根雪処理が有効に作用して一日中屋根面に雪が残る状況はみられない。屋根勾配40°以上の部位では、降雪直後に滑雪現象が発生する。
8	あきたサド-4 秋田県・雄和町 1989年竣工	<p>膜伏面積：12,123.8<sup>2</sup> 最高高さ：GL+32.2m 軒高：GL+4.9m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：球面シェル型、 V字張り屋根形状</p> 	1994年 1月 1995年 10月 ヒアリング 調査のみ	現地調査 および 現地管理者 にヒアリング 調査	温風送風 装置による 融雪処理 融雪処理	3	0.7 文献(8)	屋根面の雪は、温風送風装置による屋根雪処理が有効に作用して融雪や融雪現象が発生するため、屋根面に雪が残らない状況であった。滑雪処理後を考慮し、軒下に堆雪スペースを設けたが、これを起える場合がある。
9	WAVEのと 石川県・能登町 1990年竣工	<p>膜伏面積：3,398.6<sup>2</sup> 最高高さ：GL+25m 軒高：GL+7.5m 構造形式：骨組、一重膜構造 屋根形状：切妻型、 V字張り屋根形状</p> 	1992年 2月 1995年 10月 ヒアリング 調査のみ	現地調査、 現地管理者 にヒアリング 調査および 連続ヒア リング 観測	温風送風 装置による 融雪処理 融雪処理 散水銃に よる滑雪 補助装置付	3	0.7	屋根面の雪は、温風送風装置による屋根雪処理が有効に作用して融雪現象が発生し、屋根面に雪が残らない状況であった。屋根頂部が雪切り板状になっており、屋根頂部の雪を分割してている状況であった。軒先付近が金属板で仕上げられており、多量の降雪があった場合には、この部分が屋根雪の滑雪の妨げとなる場合がある。

(1) 設計用屋根上積雪荷重 $S.L.$  (単位)  
 $S.L. = SD \times \rho \times \alpha$  (SD: 積雪深cm,  $\rho$ : 雪の単位重量 $kg/m^2/cm$ ,  $\alpha$ : 特定行政庁が多雪地域において期間として扱う場合に定めた乗すべき数値。(表中1.0は、乗すべき数値なしを示す。))  
(2) 設計用屋根上積雪荷重の各項目は、各建築物所在地の建築指導課へのヒアリング調査による(1995.1996年調査)。  
(2) 屋根勾配による低減係数の採用(文献?)  
(1) 「青森市屋内グラウンド」は、建築基準法施行令第86条により屋根勾配40°以上の部分のみ屋根上積雪荷重に乗すべき数値として0.5を採用している。

## (7) まとめ

膜材料裏面に温風を吹き付けた融滑雪処理を行っている膜構造建築物における屋根上積雪状況をまとめると、以下ようになる。

1) 膜材料裏面に温風を吹き付けた融滑雪処理を行っている6件の膜構造建築物における屋根上積雪状況をみると、いずれの場合も融雪装置が有効に作用し、融滑雪現象が発生することを明らかにした。屋根面における積雪期間をみても、降雪後、数時間以内で滑雪現象が発生している。特に、50年ぶりの豪雪が発生した場合においても、融滑雪処理の有効性を確認することができた。

2) 温風の吹き付け温度は、建物の規模や吹き付け方法によって異なるが本調査では、 $+25.0^{\circ}\text{C}$ ～ $+60.0^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。この温度範囲で融滑雪現象が発生していることから、膜材料裏面に温風を吹き付けた融滑雪処理を行う場合の資料になり得ると考える。

3) 温風が作用していない場合でも屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上であれば、自然滑雪現象が発生することを明らかにした。温風が有効に作用する場合には、屋根勾配 $10^{\circ}$ 程度でも融滑雪現象が発生することを明らかにした。これらの屋根勾配は、屋根雪を滑雪処理を行う場合の資料になり得ると考える。

4) 膜構造建築物における屋根雪の滑雪は、膜材料の張り方を含めた屋根形状の影響を受けている。平張り屋根形状では、屋根頂部に換気塔がある場合、この換気塔が雪割りの役目を果たし滑雪現象を誘発している。V字張り屋根形状では、連続する屋根雪をV字の峰部分で分割し各V字ごとに滑雪現象が発生している。このことから、V字張り屋根形状は、滑雪現象を誘発する上で特に効果的な屋根形状と考える。

これらの調査結果は、多雪地域に建設される膜構造建築物の屋根勾配や膜材料の張り方を含めた屋根形状を検討する場合の資料になると考える。



## 2.4 膜構造建築物の構工法と屋根上積雪荷重

---

### 2.4.1 膜構造建築物の構造特性

膜構造建築物に用いられる膜材料は、柔らかい拡散光を透過させる性状、軽量性、施工性などの利点を有しており、大空間を形成する屋根葺材として有効と考える。

膜構造建築物は、張力のみを負担する膜材料によって形成されており、常に張力が入っている状態を維持しなければならない。膜材料は、等張力曲面状態が最も良いが、構造計画およびデザイン上、等張力状態以外の曲面が要求される場合がある。この場合、膜面だけで等張力曲面状態を得ることができないため、V字張り屋根形状のようにケーブル材などを使い形態を造る場合がある。このように膜構造建築物は、膜面に張力を与えて初めて構造全体が安定するため、一般の建築物と異なった構造特性を持つ部分が多い建築物である<sup>12)</sup>。

膜構造建築物の設計は、応力変形解析により過度な応力集中や変形に対し十分な考察を行い安全性の確認をする必要がある。特に、変形時においては、膜面内部の二次部材などと接触すると膜面に破損が生じる場合もあるため、膜面の変形を考慮した構造計画が必要である。また、外力による荷重が作用した時には、膜張力が減ずる場合もあるので、その部分に対しても全体的な応力バランスを考察しなければならない。さらには、屋根上積雪荷重におけるクリープによる経年後の膜面の初期張力低下に対する再張力導入についても考慮する必要がある。

膜構造建築物は、膜材料自体が意匠的な外装および内装の仕上げ材となるため、一般建築物のように屋根材料の下部に野地板、断熱材、天井板などの下地材が必要ない建築物である。さらに、膜材料は、厚さが0.8mmと薄く熱抵抗も $0.0053\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{°C}/\text{kcal}$ と小さく<sup>13)</sup>熱が伝わりやすいため、融雪装置などによる熱エネルギーを与えた屋根雪処理方法に効果的と考える。但し、熱が伝わりやすい分、エネルギーの与え方によって屋根雪の融雪状況、滑雪に要するエネルギー量など大きく変わると考えられるため、エネルギー量の供給方法について検討する必要がある。なお、エネルギー量の供給方法については、第5章で検討している。

## 2.4.2 膜構造建築物における構造方式と屋根上積雪荷重との関わり

### (1) 骨組膜構造

骨組膜構造は、屋根上積雪荷重などの外力を主として骨組によって抵抗させ、膜部分は骨組を支持構造としている構造方式<sup>12)</sup>で、膜材料をパネルとして取り扱い膜パネルを組み合わせながら膜屋根を形成する特徴がある。骨組膜構造の場合、膜パネルのサグ比を比較的小さくおさえるのが基本的な考え方である。膜パネルの支持間隔が狭い場合には、初期サグが極めて小さい平面的な張り方（平張り屋根形状）が可能である。しかし、大規模な膜構造建築物になるほど、膜パネルの支持間隔をできるだけ広く確保する工夫やデザイン的な要求などからケーブル材を併用してV字張り屋根形状にする骨組膜構造が多くみられる。

この骨組膜構造は、設計荷重に対する膜材料の許容膜応力で骨組間隔が計画できるため、多雪地域の場合、支配的な設計荷重となる屋根上積雪荷重に対し構造計画しやすい方式と考える。また、骨組膜構造は、膜材料の光の透過性を有効に活用するため、積極的に屋根雪を滑雪処理する屋根勾配の設定など屋根雪処理に有効な屋根形状を計画しやすい方式と考える。このようなことから、図2-2に示すように多雪地域に建設された膜構造建築物は、骨組膜構造が圧倒的に多いと考える。

### (2) サスペンション膜構造

サスペンション膜構造は、膜材料自体を主材料として用い基本形状を吊り構造とした構造方式<sup>12)</sup>で、連続した大きな膜面が特徴である。サスペンション膜構造の場合、膜材料自体が積極的に空間構成をなすため、膜材料を支持する支柱やケーブル材などの組み合わせによって様々な形態が考えられる。

多雪地域の場合には、膜裾部や谷部などに雪によるポンドイング現象が発生する可能性があるため、十分な構造計画が必要となる<sup>14)</sup>。

### (3) 空気膜構造

空気膜構造は、外気圧よりやや高い気圧を膜内に与えることによって自立し、積雪荷重などの外力に抵抗し形態を保持する構造方式である。従って、空気が支柱の代わりとなるため、規模が大きくなるほど大空間への利点は大きいと考える。

多雪地域の場合、空気膜構造は、過大な屋根上積雪荷重に対して常に安定した形態を保持するため、構造体の安定性の確保、ポンドイング現象の防止などを考慮し、て屋根上積雪荷重に自重を加えたものより大きい内圧を与えなければならない<sup>15)</sup>。大規模な空気膜構造を建設する場合、現在では、東京ドームにみられるように低ラ

イズのケーブル補強空気膜構造が採用されている。この構造における屋根雪の処理方法を考えると、低ライズのため必然的に融雪処理となる。

#### (4) まとめ

多雪地域における膜構造建築物の構造方式をみると、大規模な空気膜構造は、低ライズのために円滑な滑雪現象が期待できず融雪処理に頼らざるを得ない。従って、多雪地域に膜構造建築物を建設する場合、支配的となる屋根上積雪荷重を骨組およびケーブル材を用いて膜材料の許容膜応力に合わせて支持できることや屋根勾配を利用した滑雪処理で光の透過性の確保およびランニングコストの低減が期待できる骨組膜構造やサスペンション膜構造を採用することが有効と考える。さらに、両者を比較すると、サスペンション膜構造は、前述に示したように構造上、膜裾部や谷部などに雪が溜まりやすくポンディング現象が発生する可能性がある。このようなことから多雪地域では、骨組膜構造が最も適した構造方式と言える。

多雪地域に建設された膜構造建築物は、骨組膜構造でV字張り屋根形状の事例が多くみられる。滑雪現象に対するV字張り屋根形状の効果をみると、連続する屋根雪を分割し、各V字ごとに円滑に滑雪現象が発生している。従って、V字張り屋根形状は、屋根雪処理に効果的と考える。また、各V字ごとにおける屋根雪の滑雪までの現象をみると、先ず、峰部の雪が谷部へ集まるように堆積し、その後、滑雪現象が発生している。このようにV字張り屋根形状の場合、谷部の単位面積当たりの積雪重量が増加するため、より滑雪しやすくなっていると考えられる。

このように膜構造建築物は、屋根雪処理が有効に作用しているにも関わらず、積極的に屋根雪処理を行わない建築物と同一の屋根上積雪荷重の設定となっている場合が多い。これは、膜構造建築物における滑雪条件が明らかにされていないため、屋根雪処理に関する信頼性を得るまでに至っていないことが原因と考える。従って、膜構造建築物における屋根上積雪状況の現状を踏まえ合理的な屋根上積雪荷重の評価を行うためには、屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性を明らかにすることが重要と考える。さらに、膜構造建築物固有の特徴であるV字張り屋根形状が、屋根雪の滑雪処理に有効と考えられるため、屋根上積雪荷重を考慮した桁行方向のスパン（主架構の間隔）や初期サグの設定方法の検討も重要と考える。

## 2.5 膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価の現状

---

膜構造建築物は、2.2節で示したように積極的に屋根雪処理を行っているにもかかわらず、積極的に屋根雪処理を行わない建築物と同一の荷重評価で設計行われている。多雪地域における膜構造建築物の設計荷重の条件として屋根上積雪荷重の設定を低くすることができれば、現状よりも自由度の高い大空間構造の設計が可能になると考える。このようなことから、屋根上雪荷重の低減に関わる国内外の種々の規定についての整理および膜構造建築物の審査基準について整理した。

### 2.5.1 日本における屋根上積雪荷重評価の現状

#### (1) 建築基準法

建築基準法では、建築基準法第20条および建築基準法施行令（以下、「令」という。）第86条に屋根上積雪荷重の評価が規定され、屋根上積雪荷重の低減に関わる規定は、以下のようになっている。なお、屋根上積雪荷重 $S$ の基本算定式は、 $S = SD \times \rho$ （ $SD$ ：垂直最深積雪量， $\rho$ ：雪の単位重量）である。

1) 令第86条第4項：『屋根上積雪荷重は、屋根に雪止めがある場合を除き、その屋根勾配が30度をこえ60度以下の場合においては、その勾配に応じて第1項の屋根上積雪荷重に「勾配30度をこえ40度以下の場合は0.75」，「勾配40度をこえ50度以下の場合は0.5」，「勾配50度をこえ60度以下の場合は0.25」（特定行政庁が屋根葺材，雪の滑雪性状などを考慮して規則でこれと異なる数値を定めた場合においては，その定めた数値）を乗じた数値とし、その勾配が60度をこえる場合においては、これを採用しないことができる。』

2) 令第86条第5項：『第2項ただし書の規定によって特定行政庁が指定する多雪区域における常時荷重としての屋根上積雪荷重および風荷重又は地震力と同時に採用する場合における屋根上積雪荷重は、第4項の規定によって計算した数値のそれぞれ70%および35%に相当する数値とすることができる。』

3) 令第86条第7項：『雪おろしを行う習慣のある地方においては、その地方における垂直最深積雪量が1mこえる場合においても、屋根上積雪荷重は、雪おろしの状況に応じて垂直最深積雪量を1mまで減らして計算することができる。』

4) 令第86条第8項：『7項の規定により垂直最深積雪量を減らして屋根上積雪荷重を計算した建築物については、その出入口，主要な居室又はその他の見やすい場所に、その軽減の状況その他必要な事項を表示しなければならない。』

建築基準法では、令第86条第4項のように特定行政庁の許可を得られれば屋根上積雪荷重をさらに低減することが可能となっている。しかし、現状では、この許可

を得られるだけの屋根葺材や屋根雪の滑雪性状などに関する技術的な資料が十分に整っていないため、一般には第4項に規定されている勾配低減(0.75, 0.5, 0.25)が用いられているに過ぎない。

## (2) 日本建築学会建築物荷重指針

日本建築学会建築物荷重指針・同解説では、屋根上積雪荷重を制御する考え方が取り入れられ、この制御する場合の荷重を「制御積雪荷重」としている<sup>16)</sup>。制御積雪荷重の算定式は、以下のようになる。

$$S = S_{07} \times \mu' + S_i - S_c$$

ここに、 $S$  : 屋根上積雪荷重の制御を行う場合の設計用屋根上積雪荷重

$S_{07}$  : 屋根上積雪荷重の制御を行う場合の地上積雪荷重

$\mu'$  : 屋根上積雪荷重の制御を行う場合の屋根形状係数

$S_i$  : 豪雪開始時に屋根上に存在する分の積雪重量

$S_c$  : 装置などにより豪雪時にも確実に排雪されることが保証される分の積雪重量

$S_{07}$  は、下式より求める。

$$S_{07} = d_{07} \times R \times P \times C_e$$

ここに、 $d_{07}$  : 屋根上積雪荷重の制御を行う場合の基本地上積雪深

(地上積雪の観測資料に基づいて推定された年最大7日増分積雪深の再現期間100年に対する値)

$R$  : 再現期間換算係数

1) 再現期間100の場合  $R = 1$

2) 建築物の用途などにより100年とは異なる設計用再現期間  $r$  年の場合

$$0.7\text{m} \geq d_{07} : R = 0.40 \times 0.13 \times \ln(r)$$

$$0.7\text{m} < d_{07} : R = 0.22 \times 0.17 \times \ln(r)$$

$P$  : 積雪の単位重量

$$P = 73 \times (\sqrt{d_{07} \times R}) + 240$$

$C_e$  : 環境係数

制御積雪荷重は、『滑雪又は融雪装置等の性能に応じて原則として調査，実験により定める』と明記されている<sup>16)</sup>。しかし，現状では，前述の建築基準法と同様に滑雪現象や融雪装置などに対する信頼性を評価できる技術的な資料が十分に整っていないため，制御積雪荷重を容易に適用することは難しいとされている。

## 2.5.2 ISOおよび諸外国における屋根上積雪荷重評価の現状

### (1) ISO（国際標準化機構）

ISOにおける屋根上積雪荷重 $S$ の算定式<sup>17), 18)</sup>は，以下のようになる。

$$S = S_b + S_d + S_s$$

ここに， $S_b$ ：基本的な積雪荷重

$S_d$ ：吹きだまりによる積雪荷重

$S_s$ ：滑落（移動）による積雪荷重

$S_b$ ,  $S_d$ ,  $S_s$ は，下式より求める。

$$S_b = S_o \times C_e \times C_t \times \mu_m \times \mu_\beta$$

$$S_d = S_o \times (1 - C_e) \times C_t \times \mu_m \times (\mu_\beta \times \mu_d)$$

$$S_s = S_o \times C_t \times \mu_m \times (\mu_\beta \times \mu_s)$$

ここに， $S_o$ ：地上積雪荷重

$C_e$ ：風による係数

$C_t$ ：温度係数

$\mu_m$ ：屋根葺材による係数

$\mu_\beta$ ：屋根勾配係数

$\mu_d$ ：吹きだまり係数

$\mu_s$ ：滑落（移動）による係数

ISOにおける勾配屋根の屋根上積雪荷重の算定は，建築基準法と同様に屋根勾配に応じて設定された屋根勾配係数 $\mu_\beta$ を積雪荷重 $S_b$ ,  $S_d$ ,  $S_s$ にそれぞれ乗じて低減されている。また，屋根雪の融雪現象に影響を及ぼす小屋裏の温度状況についても考慮され，温度の増加に伴い積雪荷重が低減されている。さらに，屋根葺材についても考慮されている。

## (2) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

アメリカにおける陸屋根の屋根上積雪荷重 $P_f$ の算定式<sup>19)</sup>は、以下のようになる。なお、勾配屋根においては、陸屋根の屋根上積雪荷重 $P_f$ に屋根勾配に応じて設定された屋根勾配係数 $C_s$ を乗じて算定される。

陸屋根の場合 :  $P_f = 0.7 \times C_e \times C_t \times I \times P_g$

勾配屋根の場合 :  $P_s = P_f \times C_s$

ここに、 $C_e$  : 風による係数

$C_t$  : 温度係数

$I$  : 重要度係数 (建築物が破壊した時の影響を考慮した係数)

$P_g$  : 地上積雪荷重

アメリカにおける勾配屋根の屋根上積雪荷重 $P_s$ の算定は、屋根面に障害物のない滑りやすい屋根とその他の屋根とに分け、それぞれの条件に応じて設定された屋根勾配係数 $C_s$ を屋根上積雪荷重 $P_f$ に乗じている。また、ISOと同様に屋根雪の融雪現象に影響を及ぼす小屋裏の温度状況についても考慮され、無暖房の場合と暖房されている場合との2つに分けて温度係数を屋根上積雪荷重 $P_f$ に乗じている。

## (3) National Building Code of Canada

カナダにおける屋根上積雪荷重 $S$ の算定式<sup>20)</sup>は、以下のようになる。

$$S = S_s \times (C_b \times C_w \times C_s \times C_a) + S_r$$

ここに、 $S_s$  : 地上積雪荷重

$C_b$  : 屋根形状係数

$C_w$  : 風による係数

$C_s$  : 屋根勾配係数

$C_a$  : 積雪の偏分布係数

$S_r$  : 春先の降雨による付加重量

カナダにおいてもアメリカと同様に、屋根面に障害物のない滑りやすい屋根とその他の屋根とに分け、それぞれの条件に応じて設定された屋根勾配係数を屋根上積雪荷重に乗じている。特殊な場合として、融雪装置を用いて定期的に排雪する場合には屋根上積雪荷重が低減されることがある。但し、融雪装置を採用する場合には、エネルギーの確保など十分な検討が必要とされている。

#### (4) 日本とISO および諸外国との屋根上積雪荷重評価の比較

これらの屋根上積雪荷重の算定に関する基本的な考えは、共通して地上積雪荷重を基に算定している。しかし、屋根葺材を考慮した屋根勾配係数、温度に関する係数を取り入れるなど係数についての考え方に差異がみられる。この考え方の差異は、地域によって積雪状況や気温など気象条件が大きく異なり、日本では、諸外国に比べて降雪量が多いことが原因と考える<sup>21)</sup>。ISO や諸外国では、屋根面に障害物のない滑りやすい屋根とその他の屋根とに分け、屋根葺材を考慮した屋根勾配係数や温度に関する係数を取り入れられている。日本建築学会荷重指針では、屋根葺材や融雪装置などによる屋根上積雪荷重の制御に関する考え方が明記されているが、屋根上積雪荷重を制御するまでの資料の蓄積が不十分なため、確実に排雪することを保証する調査や実験を個々の物件に対し行わなければならない。特に、日本では、諸外国に比べて屋根上積雪荷重が支配的な設計荷重となるため、屋根上積雪荷重の制御を行う場合、制御方法に関する明確な考え方が重要と考える。

### 2.5.3 膜構造建築物における審査基準

#### (1) 一般認定と評定基準

膜構造建築物は、建設省住宅局建築指導課を中心に建設省の認定団体である（社）日本膜構造協会（以下、「膜構造協会」という。）に昭和59年2月膜構造建築物研究委員会が設置され、仮設建築物でない膜構造建築物の技術的な研究が行われた<sup>22)</sup>。この技術的な研究成果から得られた特定膜構造建築物技術基準（以下、「技術基準」という。）を基に昭和62年11月16日には、建築基準法第38条の規定により膜構造協会に対して一般認定が認められた<sup>22)</sup>。この一般認定により膜構造建築物は、技術基準で定めた用途、規模の範囲内であれば図2-10に示すように膜構造協会で設計審査を受けた後、建築確認申請を行うことが可能となった<sup>22)</sup>。しかし、技術基準の範囲外となる膜構造建築物は、建築基準法第38条（特殊の材料又は構法）に基づき建設大臣の認定が必要となり、設計審査は（財）日本建築センターで昭和48年から構造および防災の両面から検討されている<sup>23)</sup>。技術基準による膜構造建築物の規模の制限を整理すると、以下のようになる<sup>22)</sup>。

- 1) 膜構造建築物の構造方式が骨組膜構造の場合には、膜構造部分の各階の水平投影面積の合計が500m<sup>2</sup>を超え5,000m<sup>2</sup>以下とする。但し、開閉する部分の水平投影面積の合計は、3,000m<sup>2</sup>以下とする



- 2) 膜構造建築物の構造方式がサスペンション膜構造の場合には，膜構造部分の各階の水平投影面積の合計が $3,000\text{m}^2$  以下とする。但し，開閉する部分の水平投影面積の合計は， $2,000\text{m}^2$  以下とする
- 3) 膜構造建築物の構造方式が空気膜膜構造の場合には，膜構造部分の各階の水平投影面積の合計が $3,000\text{m}^2$  以下とする。

膜構造部分<sup>22)</sup>とは，膜材料などの部分を有する建築物の部分で，その他の部分と床又は壁もしくは戸（不燃材料で造り，又は覆われたものその他これと同等以上の防火性能を有するものに限る。）で区画されたものをいう。これ以外の場合には，膜材料などの部分を有する建築物全体をいう。但し，膜材料などの部分を有する建築物の部分で，外周部が十分に外気に開放され，膜材料などの部分とその他の膜材料などの部分の水平距離が6 m以上離れている場合にはこの限りではない。

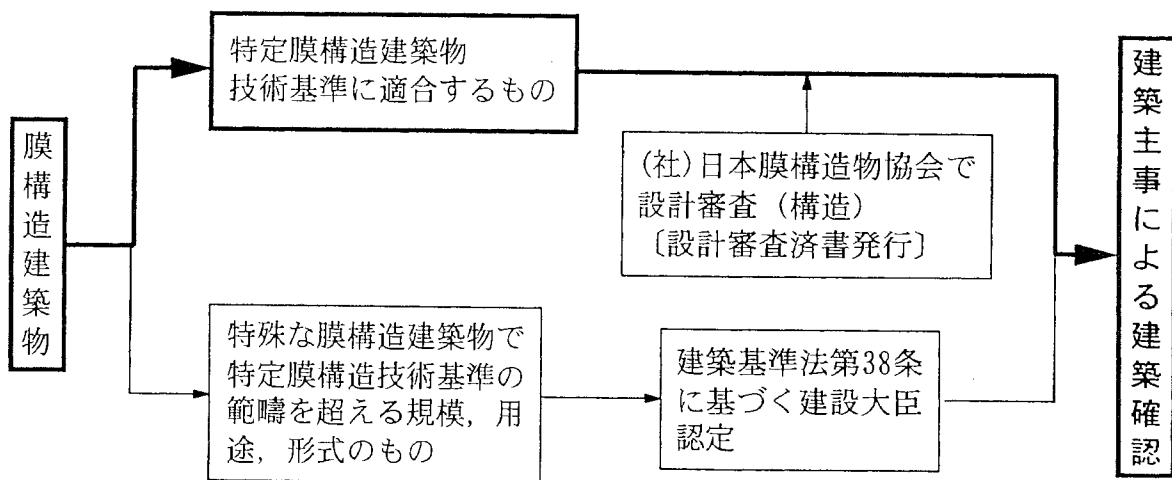


図 2 - 10 膜構造建築物の審査の流れ

## (2) 特定膜構造建築物技術基準における屋根上積雪荷重評価

特定膜構造建築物技術基準に示されている積雪荷重時の組合せ示すと、以下のようになる<sup>22)</sup>。

### 骨組膜構造，サスペンション膜構造

積雪荷重時（長期）： $G + P + S + T_i$

ここに、 $G$ ：固定荷重                       $P$ ：積載荷重  
 $S$ ：屋根上積雪荷重                       $T_i$ ：初期張力

### 空気膜構造

積雪荷重時（長期）： $G + P + S + P_i$

ここに、 $G$ ：固定荷重                       $P$ ：積載荷重  
 $S$ ：屋根上積雪荷重                       $P_i$ ：内圧による応力（空気膜構造）  
内圧の設定： $(S + 20) \text{ kg/m}^2$ を超え $120 \text{ kg/m}^2$ 以下とする

以上のように、特定膜構造建築物技術基準における屋根上積雪荷重評価の現状は、建築基準法施行令83条に準じており、特殊な荷重として骨組膜構造，サスペンション膜構造には「初期張力」，空気膜構造には「内圧」が加えられている<sup>22)</sup>。このように膜構造建築物における積雪荷重時の設計荷重は，初期張力および内圧を除き一般建築物と同一の荷重評価で扱われている。初期張力とは，膜構造建築物を構造計画する時に安定した形態を考慮しながら設定される張力である。膜構造建築物は，初期張力を導入して形態を設定するため膜材料を縮小して膜パネル（膜材料を裁断して屋根形状に合わせて製作したもの）を製作している。初期張力の値は，膜構造建築物の安定した形態の設定や縮小した膜パネルを引張ながら主架構材に施工するため，施工性を考慮して一般に $200 \text{ kg/m}$ 程度とされている。内圧とは，常に外力との圧力差が一定に保たれるように，内部から空気を補充して形態を保持するための気圧である。

## 2.6 まとめ

---

本章では、多雪地域における膜構造建築物の建設状況の整理および多雪地域に建設された9件の膜構造建築物を対象とした屋根上積雪状況に関する実態調査を行い、その現状を明らかにした。さらに、膜構造建築物の構工法および屋根上積雪荷重評価の現状について整理した。これらの結果をまとめると、以下ようになる。

- (1)多雪地域の膜構造建築物をみると、圧倒的に骨組膜構造が多い状況にある。骨組膜構造は、支配的な屋根上積雪荷重を膜材料の許容膜応力に合わせて主架構の間隔を設定できることや滑雪による屋根雪処理に対応した屋根形状の計画がしやすく、他の膜構造方式に比べて雪溜まりによるポンディング現象など雪に関わる不具合が少ないことが採用の理由と言える。
- (2)多雪地域における膜構造建築物の滑雪状況をみると、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の部位で自然滑雪現象が発生し、この現象は降雪直後に顕著に発生することを明らかにした。融雪装置を施している場合には、融雪装置が有効に作用して融滑雪現象が顕著に発生し、この現象は屋根勾配 $10^{\circ}$ 程度でも発生し、自然滑雪が発生する屋根勾配の $1/2$ にまで緩和されている。これらの現象は、1996年に発生した50年ぶりの豪雪においても確認できた。これらの結果は、屋根雪を滑雪処理させる場合の重要な資料になると考える。
- (3)膜構造建築物の特徴であるV字張り屋根形状は、連続する屋根雪を分割して各V字ごとに円滑に滑雪現象が発生しており、滑雪処理に効果的であると考えられる。このV字張り屋根形状を有効に活用して滑雪現象を促進させるためには、V字張り屋根形状における屋根上積雪荷重と初期サグや桁行方向のスパン（主架構の間隔）との関わりについて検討することが重要と考える。
- (4)日本、ISO、アメリカ、カナダにおける屋根上積雪荷重は、地域によって積雪状況や気温など気象条件が異なるが、いずれも共通して地上積雪荷重を基に推定している。これらの屋根上積雪荷重の低減に関する規定では、屋根勾配による屋根上積雪荷重の低減が共通して明記されている。また、カナダおよび日本では、屋根上積雪荷重の制御方法として融雪装置を採用する考え方が取り入れられている。しかし、現状では、融雪装置による屋根雪の融滑雪および融雪現象などに対する信頼性を評価できる技術的な資料が十分に整っていないため、容易に適用することは難しい状況にある。

(5)特定膜構造建築物技術基準における屋根上積雪荷重評価の現状は、建築基準法施行令83条に準じており、特殊な荷重として骨組膜構造，サスペンション膜構造には「初期張力」，空気膜構造には「内圧」が設計荷重に加えられている。現状において膜構造建築物は，積極的に屋根雪処理を行っているが，滑雪や融雪処理による制御積雪荷重は認められていない状況にある。

以上のことから，膜構造建築物における屋根雪の滑雪現象は，屋根勾配，融雪装置および膜材料の張り方（構法）に大きな影響を受けていることを明らかにした。従って，多雪地域における膜構造建築物の現状に即した合理的な屋根上積雪荷重評価を行うためには，屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性や膜材料の張り方を含めた屋根形状について検討することが重要と考える。

## 第2章の参考文献

- 1) 石井一夫：膜構造と大架構空間，新建築，第72巻，6号，pp.193-198，1997.6
- 2) 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
- 3) Kazuo Ishii：MEMBRANE STRUCTURES IN JAPAN，SPS PUBLISHING COMPANY，1995.1
- 4) (財)日本建築センター：ビルディングレター，1993.8
- 5) (財)日本建築センター：ビルディングレター，1994.9
- 6) (財)日本建築センター：ビルディングレター，1995.9
- 7) 石井一夫編：日本の膜構造・作品選集資料編，SPS 出版，1993.2
- 8) 望月伸悟：豪雪寒冷地における膜構造物の計画 2，膜屋根の雪荷重について，日本雪工学会誌，Vol. 7, No. 1, pp. 52-57, 1991. 1
- 9) 鳥羽 厚：青森市屋内グラウンド「サンドーム」，日本雪工学会誌，Vol. 11, No. 4, pp. 30-35, 1995. 10
- 10) 新井覚ほか：屋根上積雪荷重の評価に用いる屋根形状係数に関する一考察，第12回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 13-16, 1996. 1
- 11) (社)日本建築士事務所協会連合会編：実務者のための積雪寒冷地建築技術資料Ⅱ，1984
- 12) (社)日本膜構造協会：膜構造建築物構造設計の手引・計算例集，1989. 5
- 13) 鳥居 壮ほか：膜構造材料，(財)住宅・建築 省エネルギー機構 I B E C，No. 52，pp. 37-41, 1989. 5,
- 14) 中島 肇：大スパン建築物の雪荷重，日本雪工学会誌，Vol. 8, No. 1, pp. 47-52, 1992. 1
- 15) G. Dalzietet al. : The Effects of Snow Load on Cylindrical Air-Suported Structures, Innovative Large Span Structures Vol. 1, IASS International Congress, pp. 768-777, 1992. 7
- 16) (社)日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説，pp. 197-200, 1993. 6
- 17) ISO/DIS 4355: Bases for design of structure-Determination of snow loads on roofs, 1992
- 18) Kristffer Apeland: New Developments in Code Specifications and Standards for Snow Load, Summary Papers of 3rd International Conference on Snow Engineering, pp. 385-402, 1988. 7
- 19) American National Standards Institute: American National Standard-minimum design loads for buildings and other structures, ANSI A 58.1-1982, 1982
- 20) Associate Committee on the National Building Coade, National Research Council of Canada :National Building Code of Canada, NRCC No. 23174, 1985
- 21) 苔米地司：諸外国の雪荷重規定，日本雪工学会誌，Vol. 8, No. 1, pp. 53-57, 1992. 1
- 22) 建設省住宅局建築指導課：膜構造建築物技術基準・同解説，(社)日本膜構造協会，1991. 3
- 23) (財)日本建築センター：日本における膜構造建築リスト，(財)住宅・建築 省エネルギー機構 I B E C，No. 52，pp. 48-50, 1989. 5,

### 第3章 屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性

3.1	はじめに	3- 1
3.2	屋根雪に作用する滑雪抵抗力	3- 2
3.3	膜材料の表面性状	3- 3
3.4	膜材料の静摩擦係数と凍着強度	3- 4
3.4.1	実験方法	3- 4
3.4.2	実験結果	3-11
3.4.3	実験結果のまとめ	3-18
3.5	膜材料の動摩擦係数と粘性抵抗力	3-19
3.5.1	実験方法	3-19
3.5.2	実験結果	3-22
3.5.3	実験結果のまとめ	3-28
3.6	膜材料の表面劣化が滑雪特性に及ぼす影響	3-29
3.6.1	曝露膜材料の滑雪特性	3-29
3.6.2	曝露膜材料の滑雪特性に関する実験結果	3-31
3.6.3	実験結果のまとめ	3-39
3.7	まとめ	3-40
	参考文献	3-42

### 第3章 屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性

#### 3.1 はじめに

前章で示したように、多雪地域における膜構造建築物は、屋根勾配を有効に活用した自然滑雪や融滑雪による屋根雪処理を行い屋根面に雪が残らない工夫を行っている。膜構造建築物が普及し始めた1985年前後は、空気膜構造を対象とした融雪処理の研究が多く行われ、その成果は東京ドームなどに採用されている<sup>1)~8)</sup>。空気膜構造における屋根雪の処理方法に対する特徴は、東京ドームにみられるように大規模になるに伴い屋根形状が低ライズとなるため、屋根勾配を利用した自然滑雪や融滑雪処理による完全な屋根雪の除去が期待できず、融雪処理に頼らざるを得ないところにある。融雪処理の場合には、屋根雪を全て溶かす熱エネルギー量が必要となるが、融滑雪処理の場合には、屋根雪の滑雪現象を誘発させる熱エネルギー量で十分である。従って、屋根雪処理に費やされるランニングコストを考慮すると、多雪地域における膜構造建築物では、屋根勾配を利用した自然滑雪や融滑雪による滑雪処理を積極的に採用した構造計画や設備計画が合理的と言える。

このような背景から、本章では、図3-1に示すように屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性を明らかにすることを目的に、膜材料の滑雪性状に関する実験を行った。さらに、滑雪による膜材料の表面状態を明らかにするため、経年後の膜材料を対象とした滑雪性状に関する実験、表面性状に関する測定、表面観察および多雪地域に実在している膜構造建築物を対象とした膜材料表面の実態調査を行った。経年後の膜材料は、9冬期間、屋外において滑雪実験に用いた膜材料（以下、「曝露膜材料」という。）を対象とした。

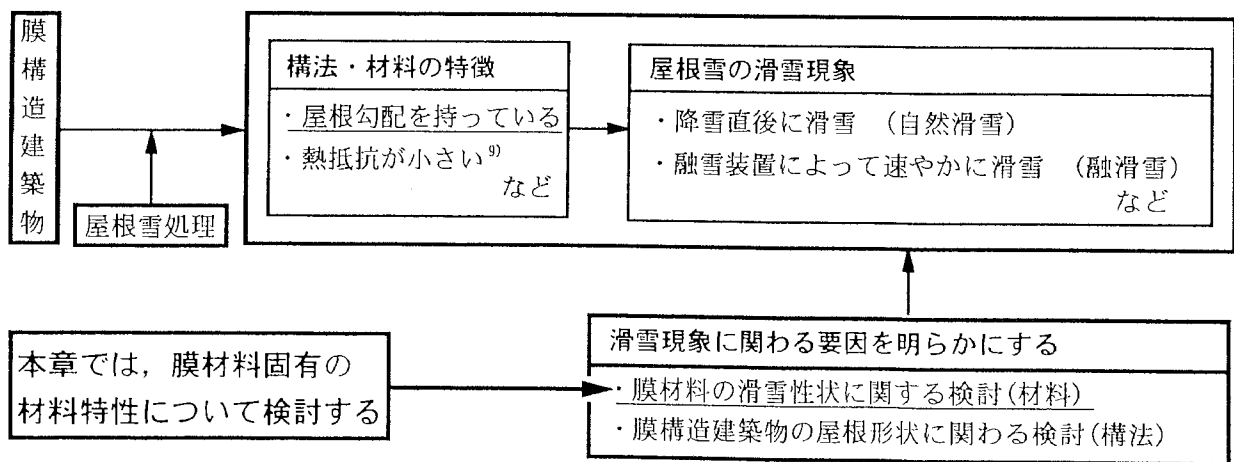


図3-1 本章の検討範囲

### 3.2 屋根雪に作用する滑雪抵抗力

屋根雪に作用する滑雪抵抗力について既往の研究成果を基に整理すると、図3-2となる<sup>10)~15)</sup>。図に示すように、屋根雪に作用する滑雪抵抗力は、静摩擦抵抗力 $F_{sf}$ 、凍着抵抗力 $F_a$ 、動摩擦抵抗力 $F_{kf}$ 、粘性抵抗力 $F_{ch}$ 、上部積雪との引張抵抗力 $F_t$ 、側部積雪とのせん断抵抗力 $F_s$ が作用している。これらの滑雪抵抗力を屋根上積雪の滑雪開始条件と滑雪持続条件とに分け、力の釣り合い式を用いて整理すると、以下のようなになる。

#### (1) 滑雪開始条件

【温度条件  $t \leq 0$  (°C)】

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_a + F_t + F_s$$

【温度条件  $t > 0$  (°C)】

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_t + F_s$$

ここに、 $m$ ：屋根雪の質量  $g$ ：重力加速度  $\theta$ ：屋根勾配

#### (2) 滑雪持続条件

$$m \times g \times \sin \theta > F_{kf} + F_{ch}$$

ここに、 $m$ ：屋根雪の質量  $g$ ：重力加速度  $\theta$ ：屋根勾配

これらの滑雪開始条件および滑雪持続条件における滑雪抵抗力の中で屋根葺材に直接関わる固有の滑雪抵抗力と屋根構法に関わる滑雪抵抗力と分けて考えると、材料特性に関わる抵抗力は、静摩擦抵抗力 $F_{sf}$ 、凍着抵抗力 $F_a$ 、動摩擦抵抗力 $F_{kf}$ 、粘性抵抗力 $F_{ch}$ となり、膜材料の張り方を含めた屋根形状（構法）に関わる抵抗力は、上部積雪との引張抵抗力 $F_t$ 、側部積雪とのせん断抵抗力 $F_s$ となる。このことから膜材料の滑雪性状に関する実験は、膜材料に直接関わる滑雪抵抗力である静摩擦抵抗力 $F_{sf}$ 、凍着抵抗力 $F_a$ 、動摩擦抵抗力 $F_{kf}$ 、粘性抵抗力 $F_{ch}$ について実験を行った。なお、これらの実験から得られる屋根雪と屋根葺材との界面に作用する滑雪抵抗力は、実験条件による種々の影響を受けるため、本研究で示す各滑雪抵抗力の値は、「見かけ」の値である。



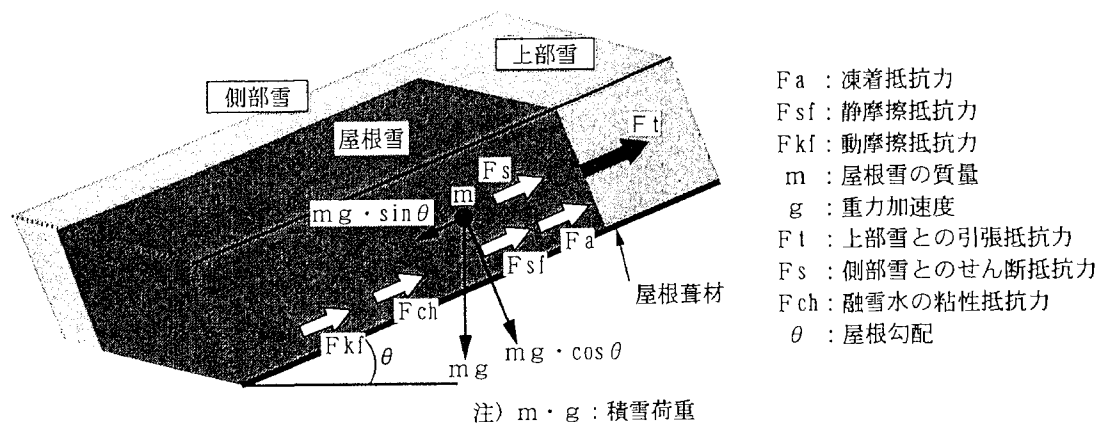


図 3 - 2 屋根雪に作用する滑雪抵抗力

### 3.3 膜材料の表面性状

本論文で対象とした膜材料（膜材料A種）は，（社）日本膜構造協会に登録されており，建築基準法第2条第九号に規定されている不燃認定を取得している膜材料である。この膜材料は，現在，2種類のみである。これらの膜材料を対象に本節では，表面性状に関する測定を行った。

表面性状に関する測定は，膜材料表面の微視的表面形状である表面粗さおよび膜材料表面の撥水性の指標となる液滴の接触角について測定した。表面粗さの測定は，触針式粗さ測定器を用いてJIS B 0601に基づき膜材料の縦糸方向と横糸方向について中心線平均粗さ $R_a$ および10点平均粗さ $R_z$ を測定した。接触角 $\theta$ は，自動接触角測定装置を用いて0.04ccの蒸留水を滴下し，液滴形状が安定する60秒後に測定した。測定結果を示すと以下ようになる。なお， $R_a$ ， $R_z$ および $\theta$ は，3回測定した平均値である。

#### (1) 表面粗さ測定結果

##### 1) 膜材料M1

縦糸方向： $\text{Ra} = 11.5 \mu\text{m}$ ， $\text{Rz} = 46.1 \mu\text{m}$

横糸方向： $\text{Ra} = 10.2 \mu\text{m}$ ， $\text{Rz} = 41.4 \mu\text{m}$

## 2) 膜材料M2

縦糸方向： $\mu\text{m}$  Ra=10.4  $\mu\text{m}$ ,  $\mu\text{m}$  Rz=42.1  $\mu\text{m}$

横糸方向： $\mu\text{m}$  Ra= 9.6  $\mu\text{m}$ ,  $\mu\text{m}$  Rz=38.2  $\mu\text{m}$

## (2) 接触角測定結果

### 1) 膜材料M1

$$\theta = 98.5^\circ$$

### 2) 膜材料M2

$$\theta = 103.5^\circ$$

以上の測定結果から、膜材料M1および膜材料M2は、膜材料の表面性状として大きな差はみられないが、微視的な表面性状の評価をすると、膜材料M1の方が膜材料M2に比べ表面形状の凹凸が粗く撥水性が小さい膜材料と言える。雪氷に対するの金属材料を対象とした摩擦係数に関する既往の研究では、材料表面の粗さが粗い程静摩擦および動摩擦係数が大きいと報告されている<sup>12)</sup>。また、凍着強度に関する既往の研究では、撥水性が大きい程凍着強度が小さくなると報告されている<sup>16)</sup>。従って、膜材料M1は、膜材料M2に比べて滑雪性に関する条件が良くないと考える。このことから、本章における膜材料の滑雪性状に関する実験は、膜材料M1を対象に行った。以下、この膜材料M1のことを「膜材料」という。

## 3.4 膜材料における静摩擦係数と凍着強度

---

### 3.4.1 実験方法

#### 3.4.1.1 静摩擦係数に関する実験方法

静摩擦抵抗力Fsfは、「 $F_{sf} = \mu_s \times m \times g \times \cos \theta$ 」で求められ、 $\mu_s$ が静摩擦係数を表している。滑雪面の温度条件が $t > 0^\circ\text{C}$ の場合、屋根雪は、凍着抵抗力が作用しないため、屋根葺材上で滑雪しようとする力「 $m \times g \times \sin \theta$ 」と釣り合っている状態にある。従って、静摩擦係数 $\mu_s$ は、下式から求めることができる。

$$\mu_s = (m \times g \times \sin \theta) / (m \times g \times \cos \theta) = \tan \theta$$

静摩擦係数に関する実験は、以下に示す室内モデル実験を行った。

### 室内モデル実験 その1

一般に屋根葺材に数日間堆積した屋根雪の最下層の状態は、氷粒状のざらめ雪、クラスト状および氷板など多結晶で氷に近い状態である<sup>10)・12)</sup>。これまでの金属材料を対象とした滑雪性状に関する研究は、雪モデルの最下層が氷に近い状態や氷モデルを用いて行われている<sup>10)・12)・13)・14)</sup>。このことかた、本室内モデル実験（その1）では、氷（以下、「氷モデル」という。）を中心とした滑雪実験（以下、この実験を「静摩擦氷モデル実験」という。）を行い膜材料の基本的な滑雪性状について検討した。

### 室内モデル実験 その2

膜構造建築物は、室内側から膜材料に何らかの熱エネルギーを与えた融滑雪処理を行っている場合が多い。従って、屋根雪の滑雪面は、融雪による融雪水の影響を受けていると考える。このことから屋根雪の滑雪面に介在する水分量を変えた滑雪実験（以下、この実験を「静摩擦雪モデル実験」という。）を行い膜材料の滑雪性状について検討した。

#### (1) 静摩擦氷モデル実験方法

図3-3 に、静摩擦氷モデル実験に用いた滑雪実験装置を示す。滑雪実験装置は、滑動挙動の観察および滑雪時の勾配の測定が容易なことから傾斜平板法を採用した。図に示すように実験装置は、ハンディウインチを巻き上げることにより傾斜台の勾配を変えることができる。なお、実験装置を設置した恒温室の性能は、 $-30.0^{\circ}\text{C} \sim +60.0^{\circ}\text{C}$ の範囲において $0.5^{\circ}\text{C}$ 単位で温度調節が可能である。恒温室の空調機は、送風機にシロココファン、加熱器にニクロムストリップヒーター（ $4\text{kw} \times 2$ 組）、冷却器にプレートフィンクーラーおよび冷凍機に全密閉型単段圧縮冷凍方式（ $1.5\text{kw} \times 4 \times 2$ 組、冷媒 R502）である。

実験に用いた滑雪モデルは、「氷モデル」と雪質の差異を検討するため、ざらめ雪を想定したざらめ状の氷（以下「ざらめモデル」という。）を用いた。氷モデルは、セメント試験用の三連型枠（ $160 \times 136 \times 40\text{mm}$ ）を用いて厚さ $20\text{mm}$ の断熱材に厚さ $20\text{mm}$ の氷板を凍着させて作製した。ざらめモデルは、氷モデルの氷板にざらめ状の氷（粒径 $1 \sim 3\text{mm}$ 程度）を厚さ $5\text{mm}$ 程度凍着させて作製した。

表3-1 に、実験シリーズを示す。実験に用いた屋根葺材は、膜材料の他に比較材料として表面が平滑なポリカーボネイトとフッ素樹脂塗装鋼板（以下、「塗装鋼板」）

という。)を用いた。氷モデルの実験は、膜材料、ポリカーボネイトおよび塗装鋼板を用いて、温度、積雪重量、凍着時間（実験温度環境において屋根葺材に滑雪モデルを所定の時間、凍着させた時間をいう。）を変えて 212種類の条件で行った。ざらめモデルの実験は、膜材料を用いて15種類の条件で行った。

実験は、滑雪モデルを屋根葺材に所定の時間設置させた後、ハンディウインチを巻き上げて滑雪モデルが滑り出した時点で止めた。その傾斜角をスラントルールで読み取った。なお、氷モデルおよびざらめモデルの場合、+2.5℃を除き30分以上実験温度環境に置いた。いずれの実験も同一条件で6回行った。

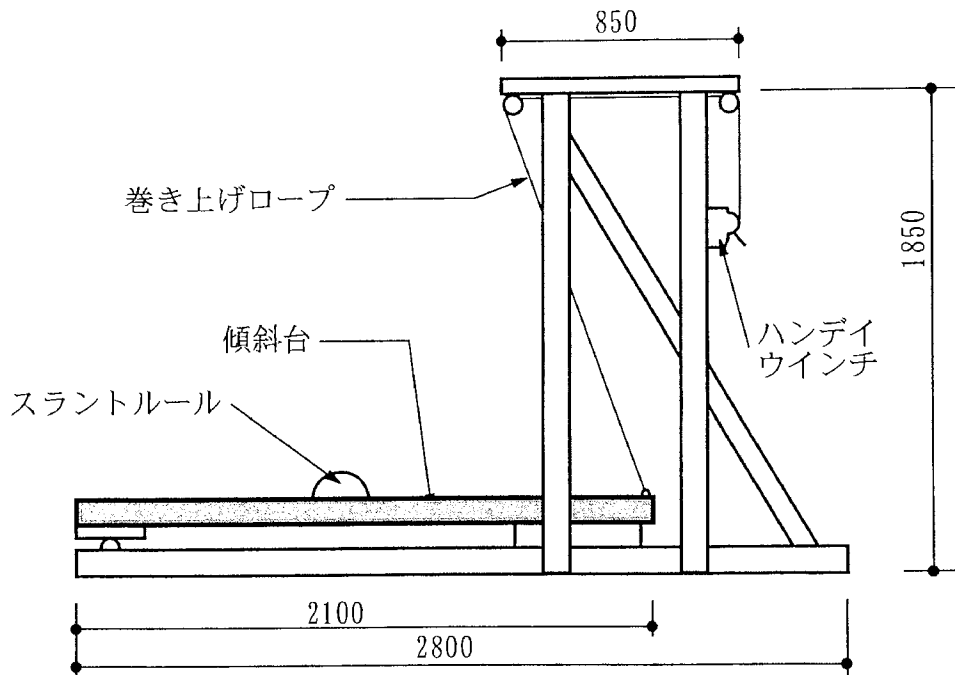


図 3 - 3 滑雪実験装置

表 3 - 1 実験シリーズ

滑雪 モデル	積雪重量 (kg/m <sup>2</sup> )	凍着 時間 (min)	実験温度(°C)					
			-10	-7.5	-5.0	-2.5	0.0	+2.5
氷	20	0	●	●	●	●	●	●
		1	○	○	○	○	○	○
		5	○	○	○	○	○	—
		20	○	○	○	○	○	—
		40	○	○	○	○	○	—
	40	0	●	●	●	●	●	●
		1	●	●	●	●	●	●
		5	●	●	●	●	●	—
		20	●	●	●	●	●	—
		40	●	●	●	●	●	—
		60	▲	—	▲	▲	▲	▲
		300	▲	—	▲	▲	▲	—
		600	—	—	▲	▲	—	—
	960	▲	—	▲	▲	—	—	
	60	0	●	●	●	●	●	●
		1	○	○	○	○	○	○
		5	○	○	○	○	○	—
		20	○	○	○	○	○	—
		40	○	○	○	○	○	—
	80	0	●	●	●	●	●	●
		1	○	○	○	○	○	○
		5	○	○	○	○	○	—
		20	○	○	○	○	○	—
		40	○	○	○	○	○	—
ざらめ	40	5	▲	—	▲	▲	▲	▲
		40	▲	—	▲	▲	▲	▲
		120	▲	—	▲	▲	▲	▲

注) ● : 膜材料, ポリカーボネイト, 塗装鋼板を用いた実験  
 ○ : ポリカーボネイトのみを用いた実験  
 ▲ : 膜材料のみを用いた実験  
 — : 実験例なし

## (2) 静摩擦雪モデル実験方法

静摩擦雪モデル実験は、静摩擦氷モデル実験と同様の実験装置を用いて行った。実験は、滑雪モデルを屋根葺材に所定の時間設置させた後、ハンディウインチを巻き上げて滑雪モデルが滑り出した時点で止めた。その傾斜角をスラントルールで読み取った。滑雪モデルには、厚さ25mmの断熱材に厚さ20mmの氷板（100×100mm）を凍着させたものに人工雪を厚さ10mm付着させて作製したモデル（以下、「雪モデル」という。）を用いた。人工雪は、写真3-1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、 $0.25\text{g}/\text{cm}^3$ であった。実験に用いた屋根葺材は、膜材料の他に比較材料としてフロート板ガラス、光沢ポリエステル鋼板、フッ素樹脂鋼板を用いた。なお、本実験は、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 $0^\circ\text{C}$ の水を吹き付けて水分量を種々に変化させて行った。吹き付けた水分量は、雪モデルの重量を測定して求めた。実験時における恒温室の温度は、 $0^\circ\text{C}$ である。

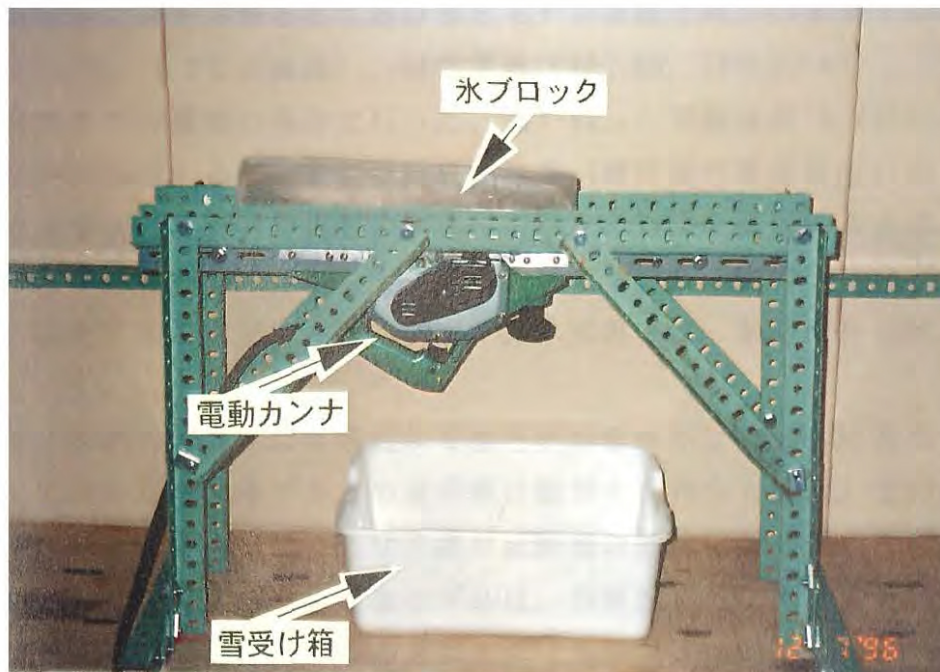


写真3-1 人工雪作製装置

### 3.4.1.2 凍着強度に関する実験方法

凍着抵抗力は、気温がマイナスの時に屋根雪の最下層の雪粒子が屋根葺材に付着することによって発生する滑雪抵抗力である。屋根葺材に作用する凍着抵抗力は、屋根葺材の表面状態や撥水性、雪質、気温などの影響を受け、気温がマイナスの範囲では静摩擦抵抗力に比べ大きな滑雪抵抗力となることが既往の研究で報告されている<sup>10)・16)~18)</sup>。一般に多雪地域に建設される膜構造建築物は、融雪装置などを用いて屋根勾配を利用した屋根雪の滑雪処理を行っている。従って、融雪装置を用いた効率的な滑雪処理を行うためには、膜材料固有の凍着現象を把握することが重要と考える。このようなことから、以下に示す凍着強度に関する室内モデル実験を行った。

図3-4に、凍着強度実験に用いた凍着強度実験装置を示す。図に示すように実験装置は、氷モデルを凍着させるため、凍着面の下部に融雪用パネルヒーターを設置している。このパネルヒーターは、変圧器と接続し任意にエネルギーの供給量を設定できる。なお、パネルヒーターの発熱線は、温度変化に対し一定の抵抗を保つことが可能なマンガニン線を用いた。さらに、凍着強度を測定するため、一定の速度で載荷可能なミハエリス曲げ試験機の載荷装置を用いた。

実験は、膜材料のみを対象として静摩擦氷モデル実験と同一の氷モデルを用いて実験温度（ $-10.0\sim-2.0^{\circ}\text{C}$ の範囲）、積雪重量（40, 80,  $160\text{kg}/\text{m}^2$ ）、凍着時間（3時間）を変えて17種類の条件で行った。図3-5に、実験温度 $-5.0^{\circ}\text{C}$ における氷モデルが膜材料に凍着するまでの膜材料裏面温度（凍着面の裏面温度）の推移状況を示す。図に示すように膜材料裏面の推移状況は、2時間を経過するとほぼ実験温度に近づく状況がみられた。他の温度条件においても、2時間30~40分程度で目標の実験温度に設定することができた。従って、本実験では、氷モデルの凍着時間を3時間と設定した。

実験方法は、傾斜台を水平な状態にして氷モデルを水平な傾斜台に置き、エネルギーを供給して膜材料と氷モデルとの凍着面に融雪水を発生させた。その後、3時間凍着させた。凍着完了後、ミハエリス曲げ試験機の載荷装置を用いて荷重を加えて剥離させた。なお、実験に用いた氷モデルは、静摩擦氷モデル実験と同様に30分以上実験温度環境に置いた。いずれの実験も同一条件で3回実施した。

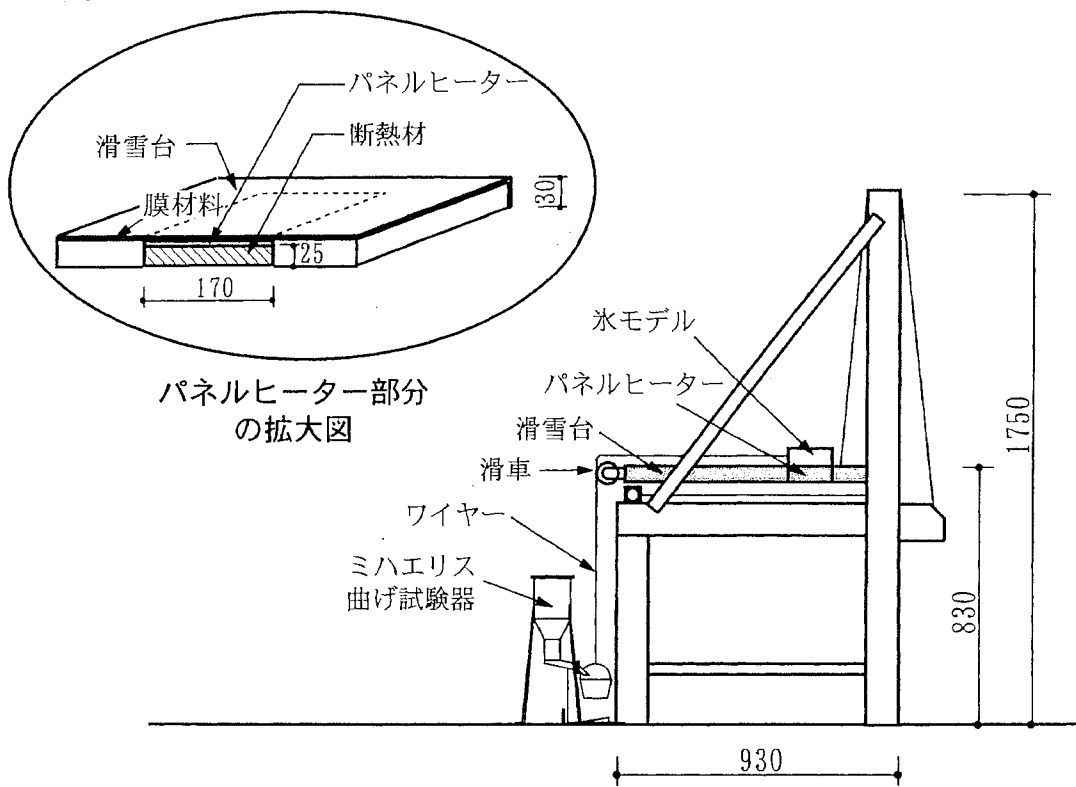


図 3 - 4 凍着強度実験装置

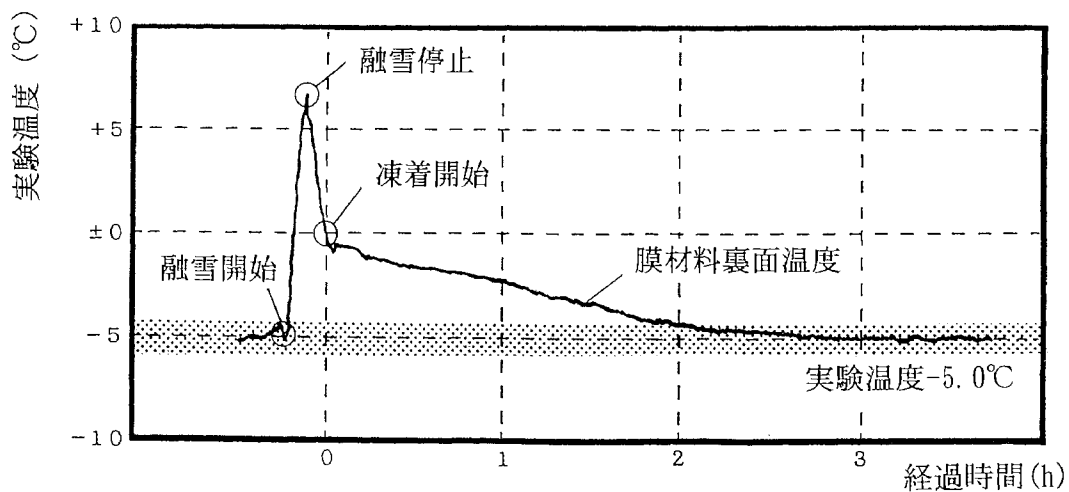


図 3 - 5 氷モデルが膜材料に凍着するまでの膜材料裏面温度の推移状況の一例



### 3.4.2 実験結果

#### 3.4.2.1 静摩擦係数に関する実験結果

##### (1) 静摩擦氷モデル実験結果

図3-6 に、凍着時間5分の場合の実験温度と静摩擦係数との関係を示す。図のように、氷モデルを用いた膜材料の静摩擦係数は、いずれの実験温度においても0.11前後の小さな値となる。さらに、温度がマイナスの範囲では、ポリカーボネイトの1/2程度、塗装鋼板の2/3程度の値となり、他の屋根葺材よりも小さい値を示す。ざらめモデルを用いた膜材料の静摩擦係数は、前述の氷モデルよりも大きな値を示し、温度によっても大きく異なる。ざらめモデルでは、0℃以下で0.2前後の値を示し、温度が+2.5℃になると0.32となり、プラス側の温度で大きくなる傾向を示す。温度がプラスの範囲で増加する傾向は、既往の研究結果でも指摘されている<sup>13)</sup>。+2.5℃で増加する傾向を考えると、0℃以上では、水と共存状態にあり、ざらめモデルの界面に水膜が形成されるため、その水膜の厚さによって静摩擦係数が大きくなっていると考えられる。膜材料における氷モデルとざらめモデルを比べると、氷モデルは、ざらめモデルに比べて界面が比較的均一で空隙率が小さいことから、見かけの接触面積がより小さいため、静摩擦係数が小さいと考える。

図3-7 に、氷モデルを用いた積雪重量40kg/m<sup>2</sup>の場合の凍着時間と静摩擦係数との関係を示す。なお、屋根葺材は膜材料のみである。図に示すように静摩擦係数は、凍着時間の増加に伴い増加する傾向を示す。この増加傾向は、凍着時間1時間までは急激に増加する傾向を示す。その後、緩慢な増加傾向を示し、凍着時間10時間を超えるとほぼ一定の値となる。これらの結果から判断すると、界面が氷板状の場合の静摩擦係数の最大値は、0.3程度の値と考える。

図3-8 に、氷モデルおよびざらめモデルを用いた実験温度-5.0℃の場合の積雪重量と静摩擦係数との関係を示す。なお、屋根葺材は膜材料のみである。図に示すように凍着時間が5分以下の場合には、いずれの積雪重量においても同程度の静摩擦係数となる。しかし、凍着時間が40分を超えると、積雪重量の増加に伴って静摩擦係数が減少する傾向を示す。静摩擦係数が減少する傾向は、積雪重量の増加の影響の他にざらめモデルが膜材料に接する面の雪粒が変態するなどの影響を受けたためと考える。

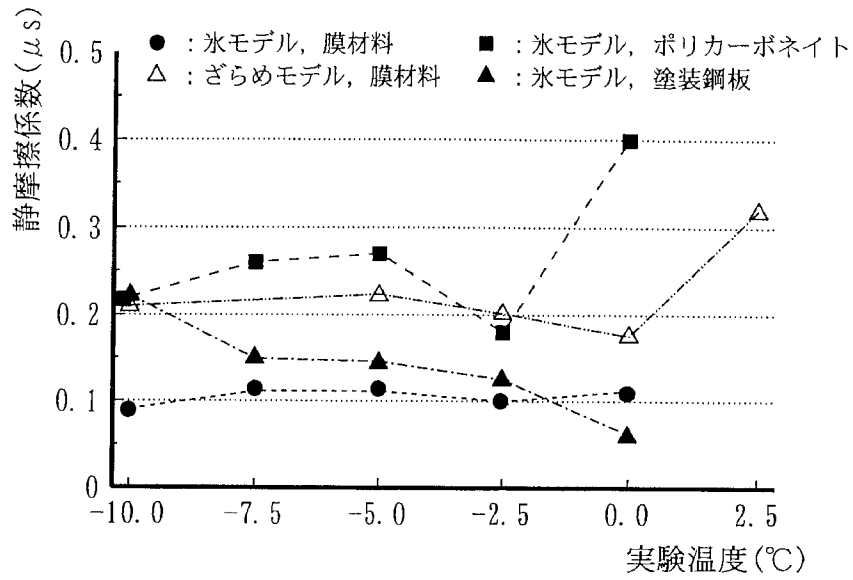


図 3 - 6 実験温度と静摩擦係数との関係

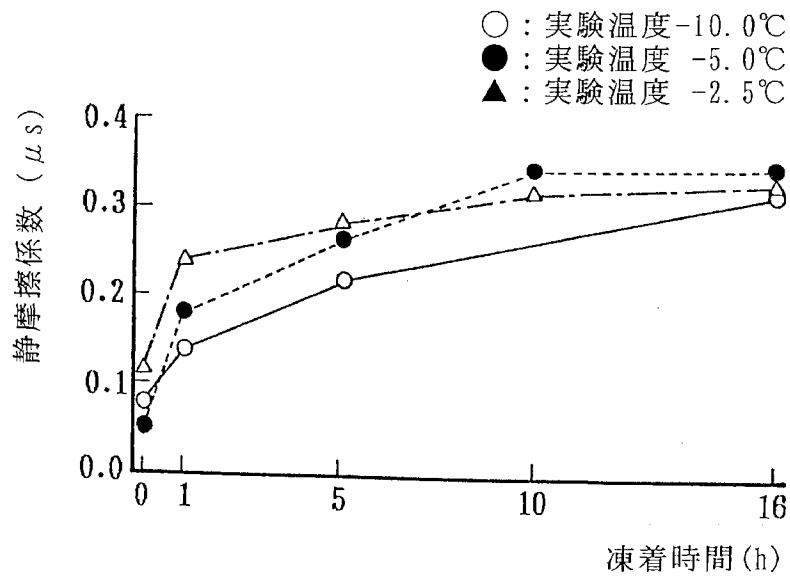


図 3 - 7 凍着時間と静摩擦係数との関係

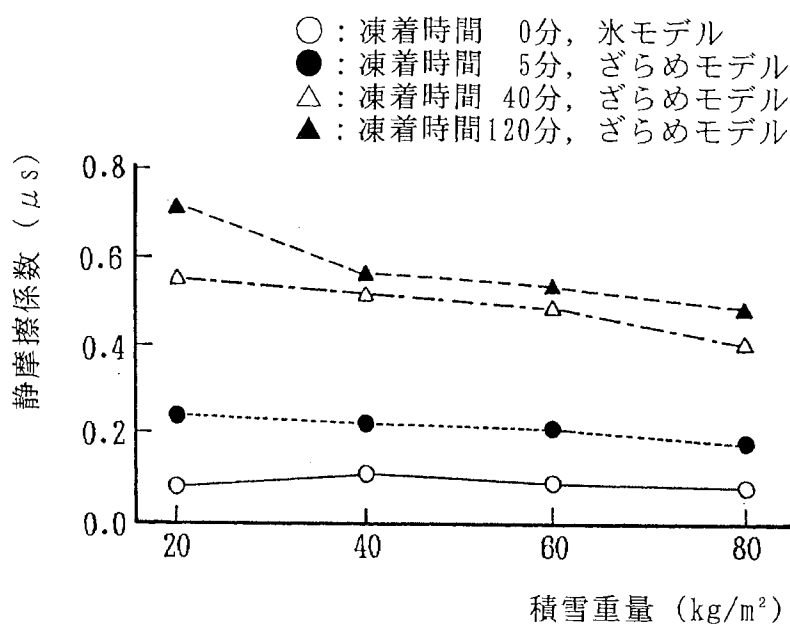


図 3 - 8 積雪重量と静摩擦係数との関係

## (2) 静摩擦雪モデル実験結果

膜材料は、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。これまで膜材料の滑雪性状に関する研究は、繊維方向に分けて行った事例はない。膜構造建築物の場合、膜材料の張り方によっては、様々な屋根形状が可能なことから、例えば縦糸方向と横糸方向との斜め45°方向（以下、「バイアス方向」という。）からの滑雪現象も考えられる。このようなことから、本実験では、膜材料の繊維方向（縦糸、横糸、バイアス方向）を考慮し、滑雪面に介在する水分量を変えた実験を行った。なお、実験時における恒温室の温度は、0℃である。

図3-9に膜材料の滑雪面の水分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。図に示すように静摩擦係数は、横糸、バイアス方向で水分量15g、縦糸方向で水分量25gまで大きくなる傾向を示す。この水分量以上になるとほぼ一定の値となる。この傾向は、雪モデルと膜材料との界面に水分量15gや25gで水の飽和層が形成されたためと考える。各水分量条件における縦糸方向、横糸方向、バイアス方向の静摩擦係数をみると、いずれの条件においても繊維方向による影響は少なく、ほぼ同様の値を示す。従って、膜材料の滑雪現象は、繊維方向の影響をほとん

ど受けないと考える。静摩擦係数の最大値をみると、縦糸方向の値で0.29となる。

ここで、実験に用いた膜材料の表面粗さをみると、縦糸方向、横糸方向、バイアス方法の中心線平均粗Ra、10点平均粗さRzは、以下ようになる。

1) 縦糸方向： $\text{Ra}=11.5\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=46.1\ \mu\text{m}$

2) 横糸方向： $\text{Ra}=10.2\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=41.4\ \mu\text{m}$

3) バイアス方向： $\text{Ra}=13.6\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=47.2\ \mu\text{m}$

なお、表面粗さの測定は、触針式粗さ測定器を用いてJIS B 0601に基づき、Ra、Rzを測定した。Ra、Rzは3回測定した平均値である。これらの表面粗さの測定値をみると、3方向の最大および最小の差は、 $\text{Ra}=3.4\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=5.8\ \mu\text{m}$ となる。従って、3方向による表面粗さの最大および最小の差は、微視的な見方では大きいと言えるが、本実験のように静摩擦係数は、水の飽和層やその層に介在する水膜などの影響を受けるため、この程度の表面粗さの差では大きな影響が生じないと言える。

図3-10に、比較材料における滑雪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、膜材料(M)の縦糸方向の実験結果を加えている。図に示すように、比較材料の静摩擦係数をみると、滑雪面に加えた水分量でそれぞれ傾向が異なる。フロート板ガラス(FG1)の場合には水分量が0g、光沢ポリエステル鋼板(P1)の場合には水分量10g、フッ素樹脂塗装鋼板(P2)の場合には水分量10gで静摩擦係数が最大値を示し、その後、水分量が増加するに伴って減少する傾向を示す。このように膜材料および比較材料の静摩擦係数の傾向は、雪モデルの界面に加えた水分量で異なることが明らかとなった。静摩擦係数が最大値を示した時の雪モデルの界面状態は、水の飽和層が形成された状態と考える。さらに、静摩擦係数の最大値を超えると、雪モデルは、水の飽和層や水膜の厚さの影響を受けていると考える。

粘性流体の法則によると、2つ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>19)</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の影響を受けると考える。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、水の飽和層に達するまで静摩擦係数が増加し、それ以上の水分量になると、その界面の水膜の影響を受けて静摩擦係数が減少すると考える。このようなことから、表面が平滑な比較材料(FG1: $\text{Ra}=0.05\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=0.9\ \mu\text{m}$ 、P1: $\text{Ra}=0.9\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=2.8\ \mu\text{m}$ 、P2: $\text{Ra}=1.0\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=4.9\ \mu\text{m}$ )は、表面が粗い膜材料( $\text{Ra}=11.5\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Rz}=46.1\ \mu\text{m}$ )に比べ材料表面の粗さ成分を水膜で埋めつくしやすいため、雪モデルの界面に水の飽和層を形成する過程が早く、水分量の増加に伴い水膜の厚さの影響を受け静摩擦係数が減少していると考えられる。なお、比較材料の表面粗さの測定

値は、前述の膜材料と同一の方法で測定した値である。

以上のことから判断すると、膜材料は、他の屋根葺材に比べ屋根雪の界面に介在する水分量が少ないほど静摩擦係数が小さい特徴を有している。

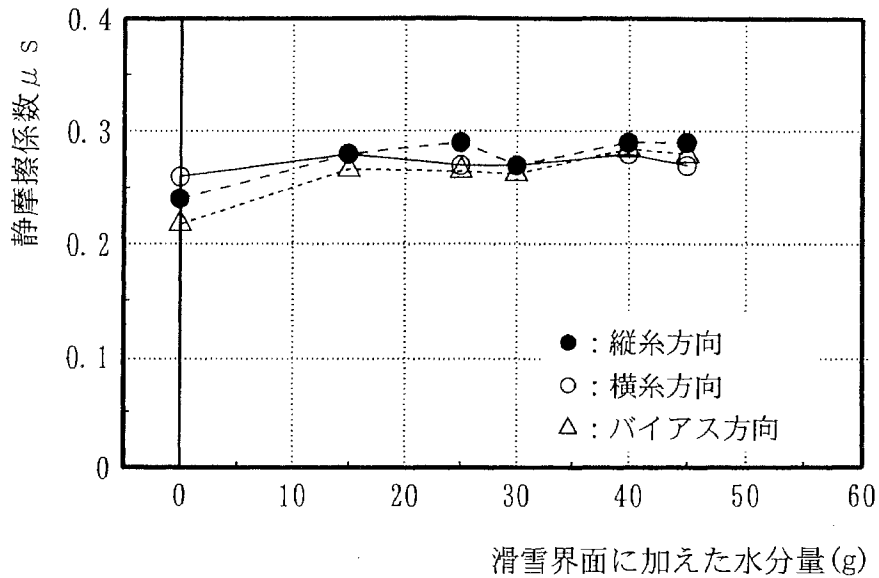


図 3 - 9 滑雪面の水分量を徐々に増加させた場合の静摩擦係数の変化状況

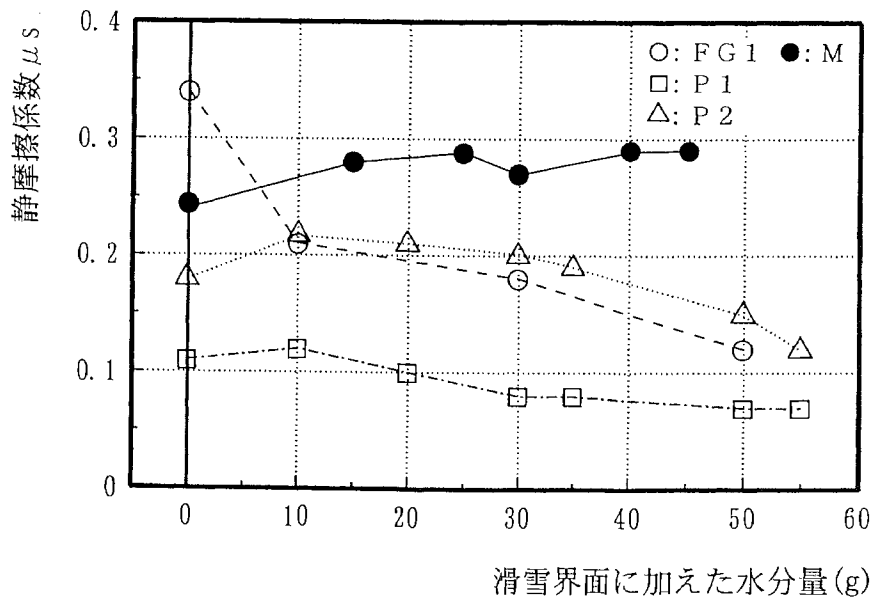


図 3 - 10 比較材料における滑雪面の水分量を徐々に増加させた場合の静摩擦係数の変化状況

### 3.4.2.2 凍着強度に関する実験結果

図3-11に、実験温度と凍着強度との関係を示す。なお、凍着強度 $F_a$ は、下式より求めた。

$$F_a = (W_1 - W_2) / A \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

ここに、 $F_a$ ：凍着強度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )                       $W_1$ ：剥離させた時の重量 (kg)  
 $W_2$ ：氷モデルの積雪重量 (kg)                       $A$ ：凍着面積 ( $\text{m}^2$ )

一般に屋根雪は、時間の経過に伴い屋根面と接する雪の層の粒子が変態して真実の接触面積が大きくなるのが既往の研究成果で指摘されている<sup>20)</sup>。このようなことから、本実験では、常に安定した条件で実験が行えるように氷モデルを用いて氷モデルと膜材料との界面を溶かし凍着面全体に水の飽和層を造り凍着させている。

図に示すように凍着強度は、いずれの積雪重量においても実験温度が高くなるに伴い減少する傾向を示す。この傾向を実験温度 $-10.0 \sim -2.0^\circ\text{C}$ における回帰式で示すと、以下のようなになる。

$$F_a = -2.53 \times T^2 - 66.91 \times T + 418 \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

ここに、 $F_a$ ：凍着強度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )                       $T$ ：実験温度 ( $^\circ\text{C}$ )

各実験温度における凍着強度をみると、実験温度 $-10.0^\circ\text{C}$ で $795 \sim 918 \text{kg}/\text{m}^2$ 、実験温度 $-5.0^\circ\text{C}$ で $617 \sim 714 \text{kg}/\text{m}^2$ 、実験温度 $-2.5^\circ\text{C}$ で $500 \sim 658 \text{kg}/\text{m}^2$ の値を示す。このように凍着強度は、温度条件に大きな影響を受けている。これまでの凍着強度に関する研究成果をみると、フロート板がラスの場合には、実験温度 $-10.0^\circ\text{C}$ で $50,400 \text{kg}/\text{m}^2$ 程度、実験温度 $-5.0^\circ\text{C}$ で $14,000 \text{kg}/\text{m}^2$ 程度、実験温度 $-2.5^\circ\text{C}$ で $2,500 \text{kg}/\text{m}^2$ 程度の値、ポリエステル樹脂溶融亜鉛メッキ鋼板の場合には、実験温度 $-10.0^\circ\text{C}$ で $9,200 \text{kg}/\text{m}^2$ 、実験温度 $-5.0^\circ\text{C}$ で $7,982 \text{kg}/\text{m}^2$ 、実験温度 $-2.5^\circ\text{C}$ で $3,657 \text{kg}/\text{m}^2$ の値を示し、膜材料と比べると極めて大きい<sup>21)</sup>。従って、膜材料は、他の屋根葺材と比べると凍着強度が小さいことから、凍着抵抗力を低減させるための熱エネルギー量が少なく屋根雪を滑雪制御することが可能と考える。各温度条件における凍着強度は、上述の式(3.2)から推定することが可能と考える。さらに、凍着抵抗力と静摩擦抵抗力とを比べると、静摩擦抵抗力は、積雪重量に静摩擦係数を乗じた滑雪抵抗力となるため、温度が低い場合、屋根雪の滑雪は凍着抵抗力が大きく作用すると言える。

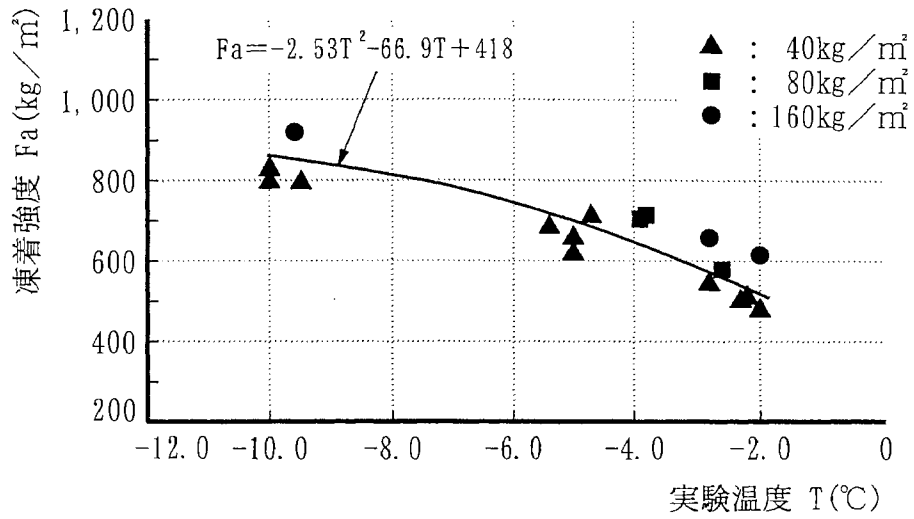


図 3 - 11 実験温度と凍着強度との関係

### 3.4.3 実験結果のまとめ

本節では、膜材料の静摩擦係数と凍着強度に関する実験を行った。これらの実験から得られた結果を整理すると、以下ようになる。

(1)膜材料と雪氷との静摩擦係数は、雪質、積雪重量および温度によって大きく異なることを明らかにした。雪質による差異をみると、滑雪面が氷板状の場合に静摩擦係数が最も小さく滑雪しやすい条件となる。ざらめモデルの場合、実験温度 0℃以下では静摩擦係数は  $\mu_s=0.2$  程度であるが 0℃を超えると、 $\mu_s=0.3$  程度まで大きくなる。この現象は、0℃以上になると水と共存状態にあり、ざらめモデルの界面に水膜が形成されるため、その水膜の影響を受けて静摩擦係数が大きくなっていると考えられる。

(2)膜材料は、滑雪面に介在する水分量が少ない方が静摩擦係数が小さいことを明らかにした。従って、膜材料は、滑雪面において水分量の影響を受けることから、エネルギーの供給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。また、静摩擦係数は、各繊維方向（縦糸方向、横糸方向、バイアス方向）の表面粗さが同一でないにも関わらず、繊維方向による大きな影響を受けないことを明らかにした。この原因は、他の屋根葺材よりも表面が粗いため、水の飽和層やその層に介在する水膜の厚さなどの影響を大きく受けるためと考えられる。

(3)膜材料と雪氷との凍着強度は、温度条件による影響を大きく受けることを明らかにした。この凍着抵抗力は、静摩擦抵抗力よりも大きな滑雪抵抗力である。各温度条件による凍着強度は、下式(3.2)で求めることができる。なお、下式の温度条件の範囲は、-10.0~-2.0℃である。

$$F_a = -2.53 \times T^2 - 66.9 \times T + 418 \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

ここに、 $F_a$ ：凍着強度 (kg/m<sup>2</sup>)

$T$ ：実験温度 (℃)



### 3.5 膜材料の動摩擦係数と粘性抵抗力

---

#### 3.5.1 実験方法

これまでの滑雪持続条件に関する研究をみると、動摩擦抵抗力のみを考慮した研究が多い<sup>17)・22)・23)</sup>。一方、滑雪持続条件を検討する場合には、動摩擦抵抗力の他に屋根葺材と雪氷との界面の水分によって発生する粘性抵抗力を考慮しなければならないことを指摘している<sup>11)・15)</sup>。屋根雪が移動し始めてからの屋根雪と屋根葺材との界面状況を考えると、動摩擦抵抗力の他に水膜の影響を受けて移動速度に比例する粘性抵抗力が作用すると考える。これらの滑雪抵抗力は、屋根葺材に直接関わり合うため、滑雪処理後の飛距離や飛散範囲などを検討する場合の重要な要因になると考える。多雪地域における膜構造建築物は、大スパン構造物が多いことを考えると膜材料における動摩擦抵抗力および粘性抵抗力を明らかにすることは重要と言える。このようなことから本実験では、膜材料における動摩擦抵抗力と粘性抵抗力について以下に示す屋外モデル実験で実験的に検討した。

写真3-2に、屋外に設置した実験装置の概要を示す。本実験装置は、北海道工業大学内の屋上（高さ13.1m）に設置した滑雪実験装置と地上に設置した滑雪後の挙動を観察するための黒板（幅9.0m×高さ3.6m）とで構成されている。図3-12に、屋上に設置した滑雪装置を示す。この滑雪実験装置は、滑動挙動の観察、屋根勾配および滑雪速度の測定が容易なことから室内モデル実験と同様に傾斜平板法を採用した。傾斜台（長さ8.0m、幅1.0m）の両端には、写真3-3に示すように速度測定用光センサー（読み取り精度 1/100秒）が、4.25m 間隔で2個取り付けてある。光センサーの設置位置は、本センサーが測定誤差を少なくするために4m以上の測定間隔が必要であることと、実験時の安全性を考慮して決定した。

滑雪モデル（以下、「雪モデル」という。）は、屋上の積雪（全層平均積雪密度0.24～0.35g/cm<sup>3</sup>）を木製枠（内径：縦87×横82×高さ30cm）内に骨材ふるい分け用の15mmふるいでふるいながら堆積させてブロック状に作製した。この滑走モデルの高さは10、20、30cmの3種類とした。なお、滑雪開始前にスノーサンプラーで雪モデルの積雪密度、秋田谷式含水率計で含水率を測定した。

実験条件は、滑走距離を3.3m、5.3m、7mの3種類とし、表3-2に示す条件で実施した。表に示すように、滑走距離を一定にして屋根勾配と積雪深とを変えた8種類の実験と積雪深を一定にして屋根勾配と滑走距離とを変えた6種類の実験を行った。

実験は、雪モデルを傾斜台に滑走距離が所定の距離（3.3、5.3、7m）になるように設置し、所定の勾配になるまで滑雪しないように雪モデル前方にストッパーを取り付けた。その後、ハンディウインチを所定の勾配に達するまで巻き上げて、スト

ッパーを取り外して滑雪させた。雪モデルの滑雪速度は、傾斜台の両端に取り付てある速度測定用光センサーで測定した。滑雪速度 $V_1$  (m/s) は、 $V_1=L_1/t$  ( $L_1$ : センサー間の距離、 $t$ : センサー間の滑雪時間) より求めた。滑雪後の飛距離は、黒板の前方に設置したビデオカメラで観測した。いずれの実験も同一条件で3回行った。なお、滑雪後の観測および測定を正確にするため、雪面に希薄した青色のインク溶液を噴霧した。



写真 3 - 2 実験装置の概要

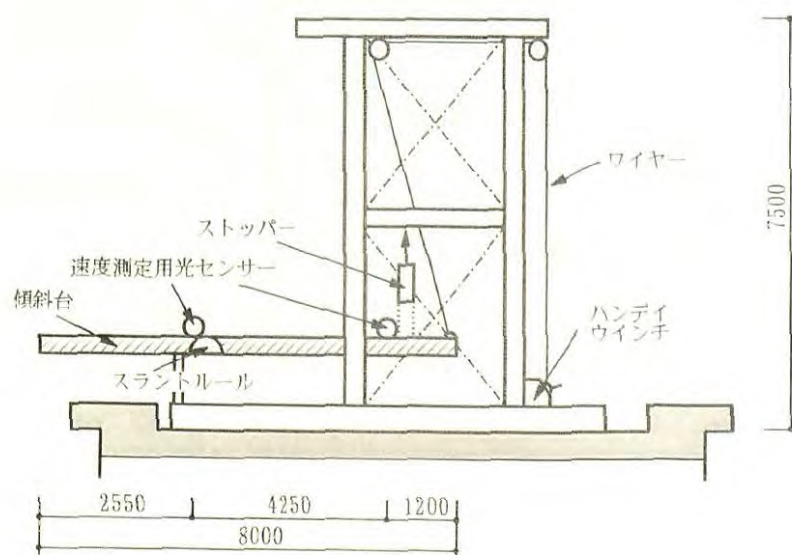


図 3 - 12 滑雪実験装置の概要



写真 3 - 3 傾斜台の概要

表 3 - 2 実験シリーズ

積雪深 (cm)		10			20			30		
積雪重量 (kg/m <sup>2</sup> )		25~35			50~70			75~105		
屋根勾配 (°)		15	20	25	15	20	25	15	20	25
滑雪距離 (m)	3.3	-	-	-	-	-	-	●	-	●
	5.3	-	-	-	-	-	-	●	-	●
	7.0	○	○	○	○	●	-	●	●	●

注) 表中の●は実験中の外気温が-5.0℃前後, ○は実験中の平均外気温が-2.0℃前後である。

### 3.5.2 実験結果

雪モデルの滑雪中および滑雪後の挙動を観察すると、雪モデルは、ブロック形状を保ちながら大きな揺れもなく一気に滑雪して落下した。滑雪後は、雪モデルの隅各部で多少の分離がみられたが、大きく分離することなくブロック形状を保ちながら雪面に衝突し、前後に大きく飛散した。これらの実験結果を基に、滑雪飛距離と滑雪抵抗力の関係について検討すると、以下のようなになる。なお、実験に用いた雪モデルの密度は $0.25\sim 0.35\text{g/cm}^3$ 、含水率は $5\sim 9\%$ でしまり雪に近似した状態であった。

#### 3.5.2.1 動摩擦抵抗力

これまでの屋根雪の滑雪飛距離に関する研究では、動摩擦抵抗力のみを考慮した質点の運動法則に従い下式で飛距離を求めている<sup>17), 22), 23)</sup>。

$$D = V \times \cos \theta \times \left( \sqrt{((V \times \sin \theta / g)^2 + 2 \times H / g)} - V \times \sin \theta / g \right) \quad \text{----- (3.3)}$$

$$\text{ただし, } V = \sqrt{2 \times g \times L \times (\sin \theta - \mu_k \times \cos \theta)} \quad \text{----- (3.4)}$$

$$\mu_k = (g \times \sin \theta - \alpha) / (g \times \cos \theta) \quad \text{----- (3.5)}$$

ここに、 $D$  : 滑雪飛距離 (m)                       $\theta$  : 屋根勾配 ( $^\circ$ )  
 $V$  : 飛び出し速度 (m/s)                       $H$  : 軒高 (m)  
 $L$  : 滑走距離 (m)                                   $\mu_k$  : 動摩擦係数  
 $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)                       $\alpha$  : 加速度 (m/s<sup>2</sup>)

ここで、滑走距離7mの場合における式(3.3)、(3.4)、(3.5)から得られた飛距離と実測値とを対比すると、図3-13となる。図に示すように、実測値では屋根勾配 $15^\circ$ で6.5m前後、屋根勾配 $20^\circ$ で8.0m前後の飛距離となり、屋根勾配の増加に伴い滑雪飛距離が顕著に増加する。しかし、屋根勾配 $25^\circ$ になると8.5m前後の飛距離となり、緩慢な増加傾向を示す。これらの実測値は、図中の実線で示す $\mu_k=0$ と $\mu_k=0.2$ を用いて算出した飛距離の計算値の間に位置しているが、屋根勾配が低いほど計算値との差が大きくなり計算値と必ずしも一致する傾向はみられない。各屋根勾配ごとの飛距離をみると、積雪重量が大きいほど飛距離が大きくなる傾向にあり、各勾配とも滑走距離の30%程度に相当する2m前後のバラツキがみられる。

図3-14に、積雪深が30cm (積雪重量 $75\sim 105\text{kg/m}^2$ ) の場合の滑走距離と滑雪飛距離との関係を示す。図中には、前述の式(3.3)、(3.4)、(3.5)から得られる滑雪

飛距離の値を合わせて示してある。図に示すように、滑雪飛距離の実測値は滑走距離の増加に伴い緩慢な増加傾向を示す。これに対し、計算値は滑走距離の増加に伴い急激な増加傾向を示し、実測値と計算値とでは大きく異なる傾向を示す。これらの実測値と計算値との差をみると、滑走距離が3.3mでは実測値が計算値を上回る。逆に、滑走距離が7.0mになると計算値が実測値を上回り、さらに、滑走距離が長くなると両者の差が大きくなる傾向を示す。

従って、滑走距離が長くなる大スパン構造物などには式(3.3)，(3.4)，(3.5)を適用することができない。これらのことから、滑雪飛距離の算出には、これまで用いられていた運動法則式だけでは不十分であり、動摩擦抵抗力以外の抵抗力も考慮することが必要と考える。

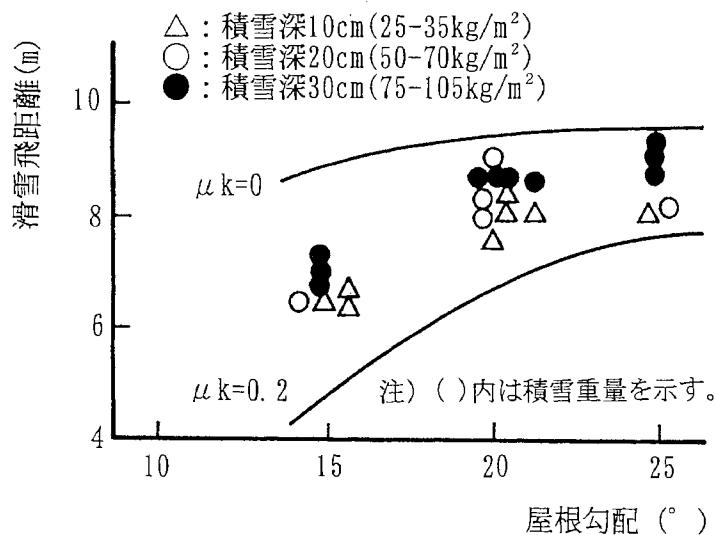


図3-13 屋根勾配と滑雪飛距離との関係

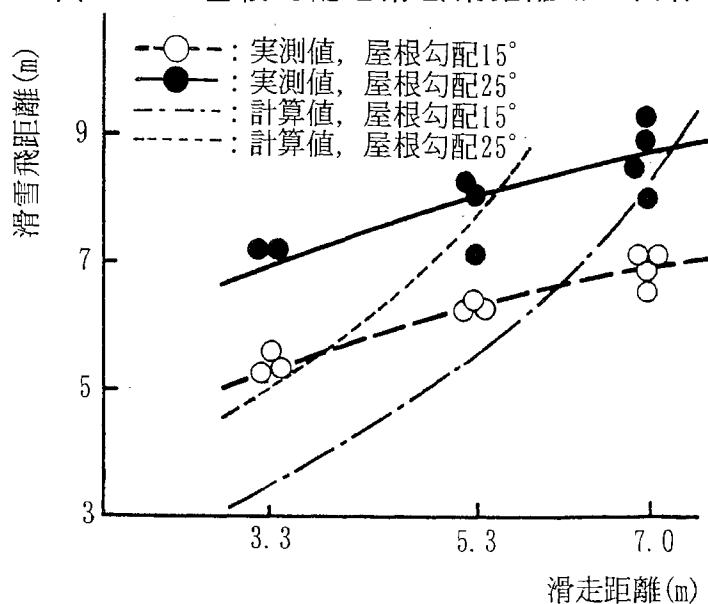


図3-14 滑走距離と滑雪飛距離との関係



## 動摩擦係数

$$\mu k = 0.217 \times e^{-0.07 \times \theta} \text{ ----- (3.9)}$$

ここに、 $\mu k$ ：動摩擦係数                       $\theta$ ：屋根勾配（°）

滑雪直後の膜材料表面を観察すると、滑走時の摩擦熱によって発生したと考えられる微量の水がみられる。前述の膜材料と雪モデルとの界面に働く粘性抵抗力は、この水膜によって発生していると考えられる。膜材料と雪モデルとの界面に発生する水膜の厚さは粘性流体の法則に従うと、下式で求められる<sup>19)</sup>。

$$F_{ch} = \mu c \times A \times (\Delta V / \Delta Y) \text{ ----- (3.10)}$$

ここに、 $\mu c$ ：水の粘性係数（ $\text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ ）

$A$ ：膜材料と雪モデルとの見かけの接触面積（ $\text{m}^2$ ）

$\Delta V$ ：雪モデルが傾斜台を滑雪する時の速度（ $\text{m} / \text{s}$ ）

$\Delta Y$ ：膜材料と雪モデルとの界面の微少な距離（ $\text{m}$ ）

ここで、本実験結果で得られた粘性抵抗力から膜材料と雪モデルとの界面の微少な距離 $\Delta Y$ を求めると、0.13～0.28mmの薄い厚さとなる。なお、水の粘性係数は、1 atm、0℃における水の粘性係数（ $182.7 \times 10^{-6} \text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ ）を用いた。すなわち、屋根雪の滑雪に必要な水分量は、この薄い微小空間に介在していることになる。

このように、滑雪抵抗力として動摩擦抵抗力と微量の水膜によって発生していると考えられる粘性抵抗力とが作用している。ここで、各屋根勾配における両者の抵抗力の作用度合をみると図3-17となる。図に示すように、動摩擦抵抗力は積雪重量の増加に伴い大きくなり、屋根勾配の増加に伴い減少する。この減少傾向は積雪重量が大きいほど顕著である。これに対し、粘性抵抗力は屋根勾配の増加に伴い増加し、両者は相反する傾向を示す。これらの傾向をみると、滑雪抵抗力は、屋根勾配15°では動摩擦抵抗力が大きく作用し、屋根勾配25°では粘性抵抗力が大きく作用している。すなわち、低い勾配では動摩擦抵抗力が大きく作用し、逆に勾配の増加に伴い粘性抵抗力の影響が大きくなる。

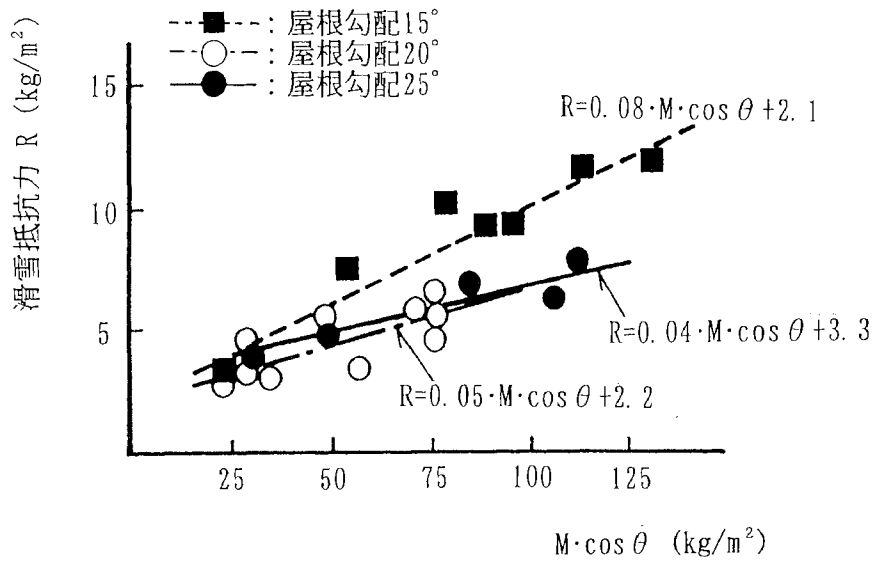


図 3 - 15  $M \cdot \cos \theta$  と滑雪抵抗力  $R$  との関係

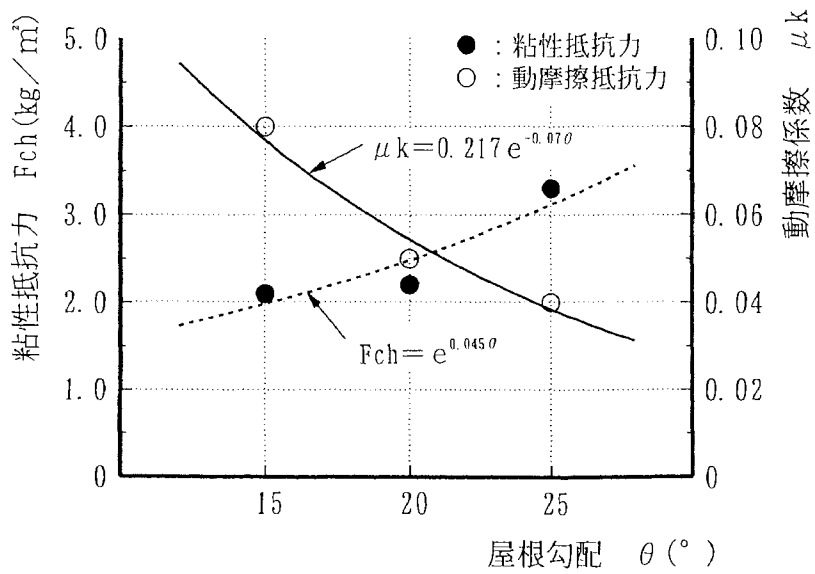


図 3 - 16 屋根勾配と粘性抵抗力および動摩擦係数との関係



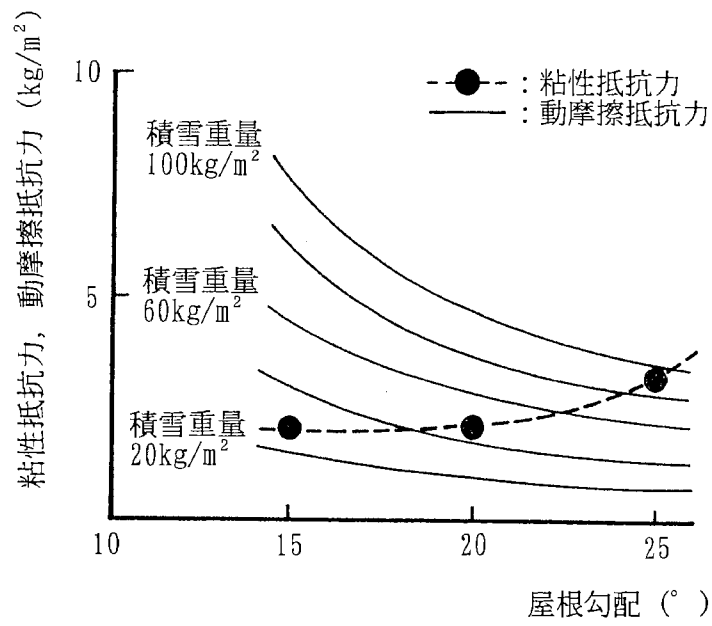


図 3 - 17 屋根勾配と粘性抵抗力, 動摩擦抵抗力との関係

### 3.5.3 実験結果のまとめ

これまでの屋根雪の滑雪持続条件に関する研究では、粘性抵抗力を実験的に研究し、具体的な値を提示しているのは遠藤らによるフッ素樹脂塗装鋼板を用いた研究のみである<sup>15)</sup>。動摩擦係数および粘性抵抗力は、屋根雪の滑雪後の飛距離を検討する上で極めて重要である。

本節の実験結果から判断すると、滑走距離が3 m以上になると、動摩擦係数のみを考慮した式(3.3)、(3.4)、(3.5)では実測値と異なる値を示す。従って、膜構造建築物のように規模が大きい建築物には、前述の式を適用することはできない。このようなことから、動摩擦係数および粘性抵抗力を考慮した膜構造建築物固有の屋根勾配15~25°までの滑雪飛距離の推定式を提示すると、以下のようなになる。

$$D = V \times \cos \theta \times \left( \sqrt{\left( \frac{V \times \sin \theta}{g} \right)^2 + 2 \times H / g} - \frac{V \times \sin \theta}{g} \right) \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

$$\text{ただし, } V = \sqrt{\left( \frac{2 \times g \times L \times (M \times \sin \theta - \mu_k \times M \times \cos \theta - F_{ch})}{M} \right)} \quad \text{-----} \quad (3.11)$$

- ここに、D：滑雪飛距離 (m)            M：積雪重量 (kg/m<sup>2</sup>)            θ：屋根勾配 (°)  
V：飛び出し速度 (m/s)    L：滑走距離 (m)            H：軒高 (m)  
g：重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)  
μ<sub>k</sub>：動摩擦係数 (式(3.8))  
F<sub>ch</sub>：粘性抵抗力 (式(3.9))

以上のように、膜構造建築物における滑雪持続条件に関わる膜材料固有の材料特性から滑雪飛距離の推定式を得ることができた。これらの結果は、滑雪処理による滑雪後の性状を把握するための重要な資料になり得ると考える。

### 3.6 膜材料の表面劣化が滑雪特性に及ぼす影響

金属材料を対象とした表面劣化と滑雪特性に関わる既往の研究成果をみると、年数の経過に伴い屋根雪の滑雪による摩耗を受け、塗膜が薄くなる現象が指摘されている<sup>24)</sup>。特に、滑雪現象が多く発生する急勾配屋根は、軒先部の塗膜の劣化が著しい。これまでの膜材料を対象とした屋根雪の滑雪による摩耗に関わる研究は、雪ブロックを用いて何年かの積雪量を想定し、促進的な滑雪実験を行っているのみである<sup>25)、26)</sup>。このように、数年間にわたって滑雪現象の影響を受けた膜材料を対象とした経年後の耐久性に関する検討が行われていない状況にある。

このようなことから、本節では、9冬期間、屋根雪の滑雪実験に用いた曝露膜材料を対象とした滑雪性状に関する実験、表面性状に関する測定、表面観察およびおよび多雪地帯において屋根雪の滑雪現象を経験している竣工後6年および8年経過した膜構造建築物を対象とした膜材料表面の実態調査を行った。

曝露膜材料の滑雪性状に関する実験は、静摩擦係数および動摩擦係数について滑雪面に介在する水分量を変えた実験を行った。実験に用いた曝露膜材料は、1987～1996年において北海道・札幌市（北海道工業大学構内）で9冬期間、滑雪実験を行った膜材料である<sup>27)、28)、29)</sup>。自然滑雪および融滑雪実験を行った期間は、1987、1988、1990、1991年度の4冬期間である。他の期間は、試験体を10°、20°、25°、30°と屋根勾配を設定し自然滑雪させていた。

#### 3.6.1 曝露膜材料の滑雪特性

##### (1) 静摩擦係数および動摩擦係数に関する実験方法

静摩擦係数に関する実験は、本章の静摩擦雪モデル実験と同一の雪モデルおよび滑雪実験装置を用いた。実験は、膜材料上に置いた雪モデルを滑雪させて、滑雪時の勾配 $\theta$ をスランtrルールで読みとった。静摩擦係数 $\mu_s$ は、 $\mu_s = \tan \theta$ より求めた。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。

動摩擦係数に関する実験は、図3-18に示す水平滑雪装置を用いて行った。実験は、図に示すように膜材料上に置いた雪モデルを水平移動させて、雪モデルと膜材料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、静摩擦係数に関する実験と同一である。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>30)</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。

両実験とも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℃の水を吹き付けて水分量を種々に変化させて実験を行った。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) 曝露膜材料の表面性状の測定および表面観察方法

3.4節の実験結果から屋根葺材の滑雪性状は、表面粗さの影響を大きく受けていると考える。このことから、曝露膜材料の表面性状は、微視的表面形状を示す表面粗さおよび表面の撥水性を示す接触角について測定を行った。さらに、曝露膜材料とオリジナル膜材料（以下、「オリジナル」という。）との表面性状を比較するために、走査型電子顕微鏡で表面観察を行った。

曝露膜材料の表面性状の測定は、3.3節の膜材料の表面性状と同一の測定方法で表面粗さおよび接触角を測定した。表面粗さの測定は、触針式粗さ測定器を用いてJIS B 0601に基づき、膜材料の縦糸と横糸方向について中心線平均粗さRaおよび10点平均粗さRzを測定した。接触角は、自動接触角測定装置を用いて0.04ccの蒸留水を滴下し、液滴形状が安定する60秒後に測定した<sup>30)</sup>。走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた曝露膜材料およびオリジナルの表面観察は、膜材料の表面、滑雪方向と直行する断面について観察した。

## (3) 多雪地域における膜構造建築物を対象とした膜材料表面の実態調査方法

多雪地域における膜構造建築物を対象とした膜材料表面の実態調査は、竣工後6年経過した青森県・青森市の「青森市屋内グラウンドサンドーム（1991年竣工）」および竣工後8年経過した秋田県・雄和町の「あきたスカイドーム（1989年竣工）」について行った。これらの膜構造建築物の実態調査は、表面性状の測定、表面観察を行った。

表面性状の測定は、表面粗さを評価できる光沢度測定を行った<sup>20)・30)</sup>。光沢度は、JIS Z 8741に基づき60度鏡面光沢を測定した。表面観察は、被写体距離10mmから撮影可能な広角レンズ付きのCCDマイクロカラーカメラ（以下「CCDカメラ」という。）を用いて行った。なお、表面状態は、CCDカメラに接続したビデオで収録した。

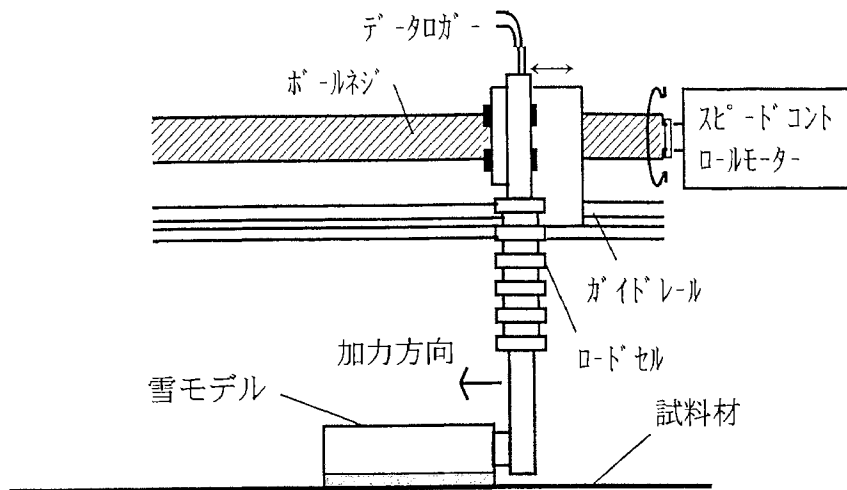


図 3 - 18 水平滑雪装置の概要

### 3. 6. 2 曝露膜材料の滑雪特性に関する実験結果

#### (1) 曝露膜材料の静摩擦係数および動摩擦係数に関する実験結果

図3-19に、曝露膜材料の滑雪面の水分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。図中には、3.4 節で得られたオリジナルの縦糸方向の実験結果を加えている。図に示すように、曝露膜材料の静摩擦係数は、水分量の増加に伴い増加傾向を示し、水分量35gで最大値0.26を示す。縦糸方向、横糸方向、バイアス方向の傾向を比較すると、ほぼ同様の傾向を示すことから、曝露膜材料もオリジナルと同様に水の飽和層やその層に介在する水膜の影響を大きく受けるため、滑雪現象は繊維方向による影響をほとんど受けないと考える。曝露膜材料とオリジナルを比較すると、曝露膜材料は、オリジナルよりも常に小さな値を示す。特に、水分量を加えない場合、静摩擦係数は、オリジナルの半分程度の0.13となる。

図3-20に、曝露膜材料およびオリジナルの滑雪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。図中には、膜材料の比較材料として低光沢ポリエステル鋼板（P3）の実験結果を加えている。図に示すように、曝露膜材料およびオリジナルは、水分量の増加に伴い増加する傾向を示し、曝露膜材料の場合、水分量40gで最大値0.29、オリジナルの場合、水分量30gで最大値0.40を示す。曝露膜材料とオリジナルについてそれぞれ縦糸方向、横糸方向、バイアス方向の傾向を比較すると、ほぼ同様の傾向を示している。曝露膜材料とオリジナルを比較すると、曝露膜材料は、前述の静摩擦係数の実験結果と同様にオリジナルよりも常に小さな

値を示す。これらのことから、曝露膜材料は、9冬期間、滑雪実験を行っていたため、滑雪などの摩耗の影響を受けて膜材料表面の粗さが滑らかになっていると考えられる。

ここで、比較材料である低光沢ポリエステル鋼板 (P3) の動摩擦係数の傾向をみると、3.4 節で得られた静摩擦係数の実験結果と同様に膜材料と傾向が異なり水分量10gで最大値を示し、その後、減少する傾向を示す。従って、膜材料は、他の屋根葺材と表面性状が異なり、雪モデルの界面が水の飽和層に達する前の方が静摩擦および動摩擦係数が小さく滑雪しやすいため、融滑雪処理など熱エネルギーを与える場合には十分な検討が必要である。

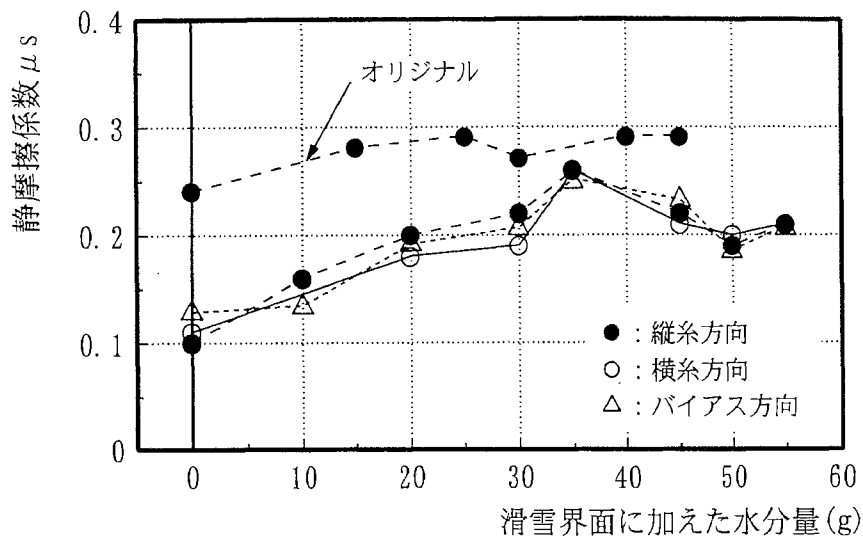


図 3 - 19 曝露膜材料の滑雪面の水分量を徐々に増加させた場合の変化状況

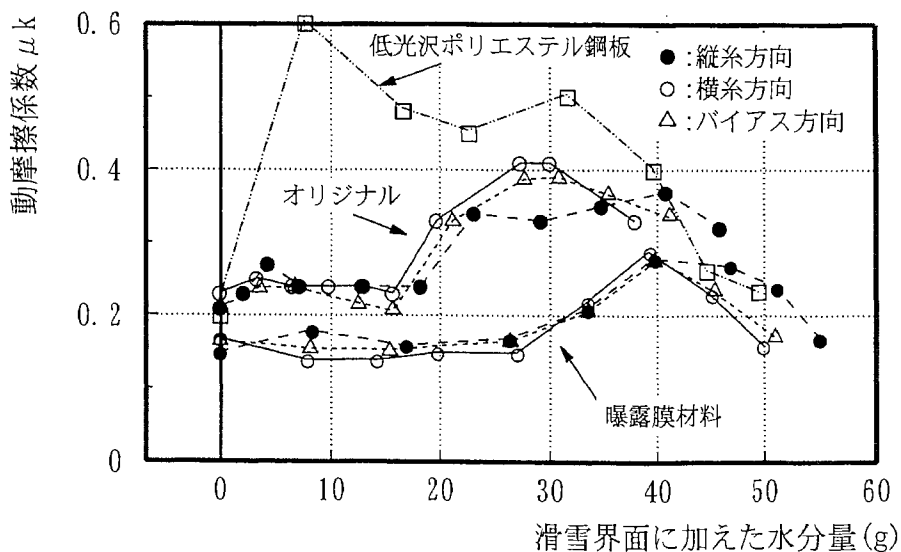


図 3 - 20 曝露膜材料およびオリジナルの滑雪面の水分量を徐々に増加させた場合の変化状況

## (2) 曝露膜材料の表面性状および表面観察結果

図3-21に、曝露膜材料およびオリジナルの中心線平均粗さRa, 10点平均粗さRz, 表面粗さ波形の一例を示す。なお, Ra, Rzは, 3回測定した平均値である。図に示すように, 曝露膜材料は,  $\overline{Ra}=6.1\mu\text{m}$ ,  $\overline{Rz}=32.2\mu\text{m}$ , オリジナルは,  $\overline{Ra}=11.5\mu\text{m}$ ,  $\overline{Rz}=45.0\mu\text{m}$ となる。曝露膜材料は, オリジナルに比べてRaが約53.0%程度, Rzが約71.6%程度の値となり, 表面粗さ波形が滑らかな状態になっている。この現象から判断すると, 曝露膜材料は, 年数の経過に伴い滑雪などの摩耗の影響を受けて表面粗さが小さく滑らかになっていると言える。

曝露膜材料およびオリジナルの接触角の測定結果みると, 曝露膜材料で $\theta=91.2^\circ$  オリジナルで $\theta=98.5^\circ$ となり, 曝露膜材料は9年経過しても $\theta=90^\circ$ 以上の大きな値を示している。本章の実験に用いた比較材料の接触角は, フロート板ガラス (FG1) で $\theta=17.8^\circ$ , 光沢ポリエステル鋼板 (P2) で $\theta=79.3^\circ$ となり, 膜材料よりも小さな値となる。なお, 接触角の測定値は, 3回測定した平均値である。写真3-4に示すように, 撥水性の大きい膜材料のコーティングに用いられている四ふつ化エチレン樹脂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>20)</sup>。本節の実験結果からもみられるように膜材料は, 滑雪面に介在する水分量が少ない時に最も摩擦係数が小さく, 滑雪しやすい状況にある。この現象は, 乾き雪の場合, 滑雪現象が発生する前は見かけの接触面積がより小さい状態にあると考える。このようなことから, 膜材料は, 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滑雪に効果的と言える。

写真3-5に, 曝露膜材料の断面状態を示す。写真の倍率は, 100倍である。写真に示すように, 滑雪面側のコーティング層の断面には滑雪による傷跡はみられないが, 滑雪面と滑雪させていない面とではコーティング層の厚さがやや異なっている写真のスケールを基に測定すると, オリジナルの約1/9に相当する $20\mu\text{m}$ 程度摩耗している。しかし, 滑雪面のコーティング層の厚さが $130\mu\text{m}$ 程度保持していることから, ガラス繊維を外的環境から保護する役割は十分に果たしていると言える。

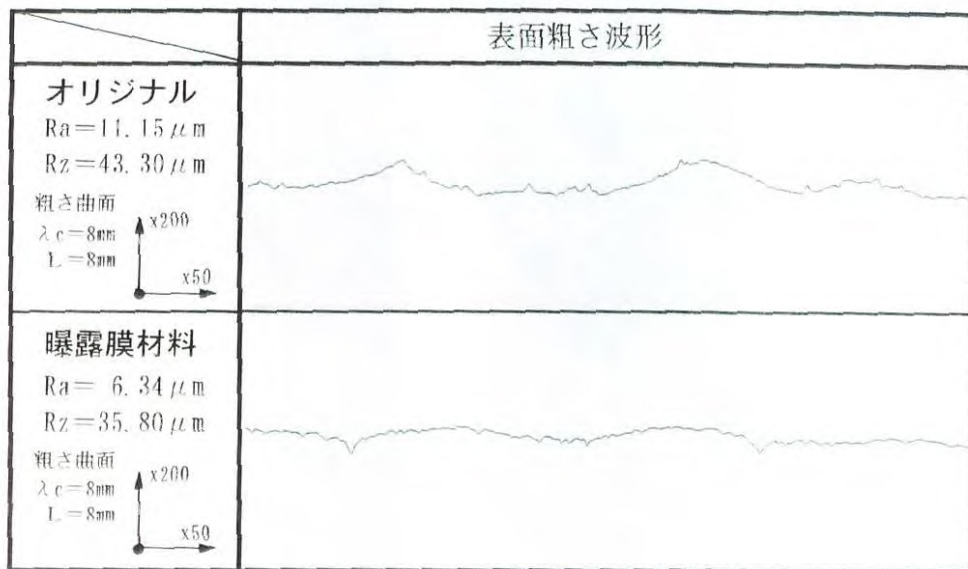


図 3 - 21 表面粗さ波形の一例

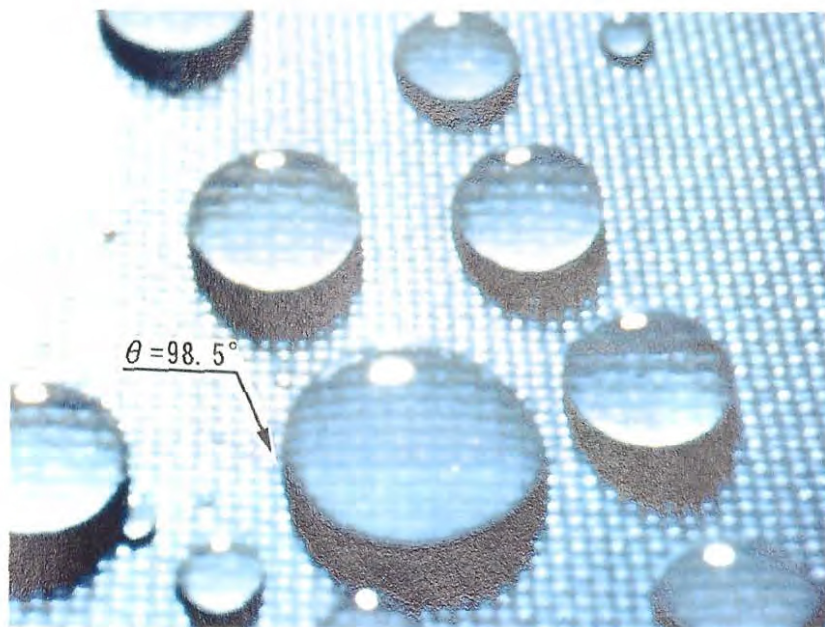


写真 3 - 4 膜材料の撥水性





写真 3-5 曝露膜材料の断面状態

### (3) 多雪地域における膜構造建築物を対象とした 膜材料表面の実態調査結果

図3-22に青森市屋内グラウンドサンドームおよびあきたスカイドームの光沢度測定結果を示す。図に示すX軸は、膜材料表面の測定点を示しており、軒先部を原点として屋根頂部に向かって測定した屋根面の実長を示している。図に示すY軸は、光沢度比を示しており、光沢度比は、測定した光沢度をオリジナル（未使用で膜材料表面が白色系で無彩色）の光沢度で除した値とした。なお、図中には、9冬期間、滑雪実験に使用した曝露膜材料の光沢度比を加えている。オリジナルおよび曝露膜材料の光沢度の測定は、ドームの測定前に現地で行った。両ドームとも内部照明は、行われていない状態であった。図に示すように、両ドームとも光沢度比が1を上回る傾向を示した。この傾向は、オリジナルに比べてドームの膜材料表面が滑らかであることを示している。各ドームの光沢度比の傾向をみると、青森屋内グラウンドサンドームの場合には測定点A, Bで2.5、あきたスカイドームの場合には測定点eで1.95となり、最も大きな値を示す。この現象は、各ドームの屋根形状が大きな影響を及ぼしていると考えられる。青森市屋内グラウンドサンドームの場合、本測定点C, Dは、屋根頂部付近のため勾配が緩く屋根雪の滑雪速度が遅くなるが、測定点A, Bは、急勾配であるとともに上方から屋根雪が滑雪してくるため加速度が加わり滑雪速度が速くなると考える。あきたスカイドームの場合、光沢度比が大きくなる測定点e付近は、屋根形状が変化し始める部位である。屋根雪は、屋根頂部付近から数十mの距離を徐々に加速して測定点e付近で滑雪速度が速くなり、測定点d付近になると膜材料表面を押さえつけているケーブル材が膜材料表面から離れるため、このケーブル材が屋根雪の滑雪を妨げ滑雪速度を低下させていると考える。従って、測定点eが最も滑雪速度が速くなる部位と考える。この部位は、滑雪速度の影響を受けるため、滑雪による摩耗が大きく膜材料表面が他の部位に比べて滑らかになっていると考える。

ここで、図中に示した曝露膜材料の光沢度比をみると、滑雪速度が最も速くなると予測される部位（A, B, e）以外と近似した値となるため、両ドームの多くの部位は曝露膜材料とほぼ同様の滑雪による摩耗状態と推察できる。

写真3-6に青森市屋内グラウンドサンドーム、写真3-7にあきたスカイドームの膜材料表面をCCDカメラで観察した表面状態を示す。なお、両ドームの写真は、光沢度比が最も大きかった部位である。写真に示すように、両ドームとも膜材料表面に滑雪現象による傷は確認されなかった。青森市屋内グラウンドサンドームの場合、屋根に金属材料を使用している部位がある。この金属材料を使用した部位についてCCDカメラを用いて表面観察をすると、写真3-8に示すように、滑雪によって発生

したと考えられるはげ部の劣化を確認することができた。このように同時期に施工された膜材料と金属材料とを比べると、膜材料は、滑雪による摩耗損傷劣化において優れた耐久性を有していると言える。

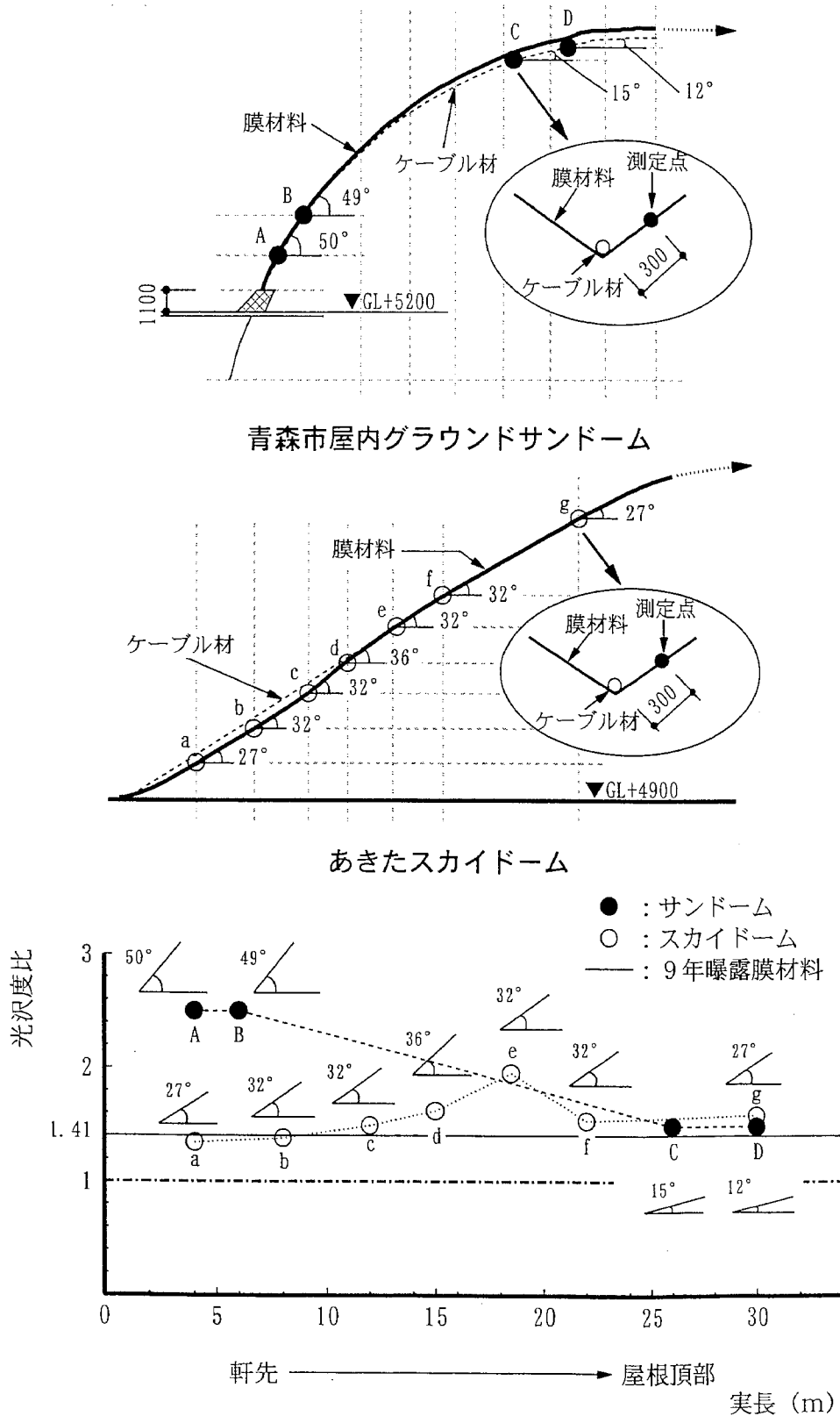


図 3 - 22 青森市屋内グラウンドサンドームおよびあきたスカイドームの光沢度測定結果



写真 3 - 6 青森市屋内グラウンドサンドームの膜材料表面

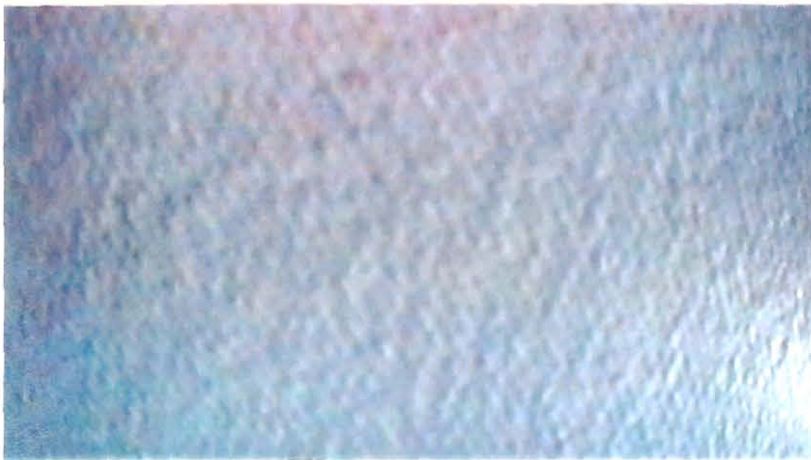


写真 3 - 7 あきたスカイドームの膜材料表面



写真 3 - 8 青森市屋内グラウンドサンドームの金属屋根部分

### 3.6.3 実験結果のまとめ

膜材料の表面劣化が滑雪特性に及ぼす影響について整理すると、膜材料の場合、年数が経過すると滑雪による摩耗の影響を受けて表面が滑らかになり、滑雪しやすくなることを明らかにした。滑雪によって発生するコーティング層の摩耗量は、9年経過した膜材料でオリジナルの約1/9に相当する20 $\mu\text{m}$ 程度である。コーティング層の残存量をみると、130 $\mu\text{m}$ 程度保持していることから、膜材料の強度を負担するガラス繊維を保護し、耐久性、防火性、耐水性などを高める機能は十分に果たしている。この現状から、膜材料は、ガラス繊維織物の引張強度が保持し続けられれば、20年以上も使用し続けることが可能と言える。なお、膜材料の引張強度保持率については、20年以上と言われている<sup>32)</sup>。このような膜材料に対し金属材料は、滑雪による摩耗の影響を受けると、摩耗損傷劣化が発生して滑雪性の低下につながるものが既往の研究で明らかにされている<sup>24)</sup>。本節においても、金属材料のはず部分の滑雪による劣化が観察することができた。

これらのことから判断すると、膜材料は、他の屋根葺材に比べ滑雪性に優れた材料と言える。本節で得られた結果は、多雪地域における膜材料の信頼性を検討するための重要な資料に得ると考える。

### 3.7 まとめ

本章では、屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性に関する実験を行った。その結果、膜材料の滑雪性状に大きな影響を与える要因を明らかにした。これらの結果をまとめると、以下のようなになる。

(1)膜材料は、滑雪面に介在する水分量が少ないほど滑雪に有効であることを明らかにした。従って、屋根雪を融滑雪によって滑雪処理する場合、エネルギーの供給量によって滑雪面に介在する水分量が異なることから、滑雪現象を誘発するエネルギー量の供給方法が重要と考える。また、外気温が0℃以下で発生する凍着強度は、温度条件の影響を大きく受けていることを明らかにした。従って、凍着強度を緩和して滑雪を誘発させるためには、温度条件に適用したエネルギー量の供給方法が重要と考える。なお、温度条件を考慮した-10.0~-2.0℃の範囲における凍着強度の推定式は、以下のようなになる。

$$F_a = -2.53 \times T^2 - 66.9 \times T + 418 \quad \text{----- (3.2)}$$

ここに、 $F_a$ ：凍着強度 (kg/m<sup>2</sup>)                       $T$ ：実験温度 (℃)

(2)膜構造建築物は、屋根勾配を利用した滑雪処理が有効であることを第2章で明らかにした。滑雪処理を行う場合、屋根雪の滑雪後の性状が大きな問題となる。滑雪後の性状は、膜構造建築物の周辺の配置計画や防災計画に大きな影響を与えるため重要となる。これまで滑雪飛距離の推定式は、動摩擦抵抗力のみを考慮した式(3.3)、(3.4)、(3.5)が用いられている。しかし、前述の式は、規模が大きくなるほど推定値と実測値が対応しないことから、膜構造建築物のように規模が大きい建築物には、適用させることはできない。このようなことから、動摩擦係数および粘性抵抗力を考慮した膜構造建築物固有の屋根勾配15°～25°までの滑雪飛距離の推定式を提示すると、以下のようなになる。

$$D = V \times \cos \theta \times \left( \sqrt{((V \times \sin \theta / g)^2 + 2 \times H / g)} - V \times \sin \theta / g \right) \quad \text{----- (3.3)}$$

ただし、 $V = \sqrt{((2 \times g \times L \times (M \times \sin \theta - \mu_k \times M \times \cos \theta - F_{ch})) / M)}$  ----- (3.11)

ここに、 $D$ ：滑雪飛距離 (m)                       $M$ ：積雪重量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )       $\theta$ ：屋根勾配 ( $^\circ$ )  
 $V$ ：飛び出し速度 (m/s)                       $L$ ：滑走距離 (m)                       $H$ ：軒高 (m)  
 $g$ ：重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )  
 $\mu_k$ ：動摩擦係数 (式(3.8))  
 $F_{ch}$ ：粘性抵抗力 (式(3.9))

(3)膜材料は、年数が経過すると滑雪による摩耗の影響を受けて表面が滑らかになり、滑雪しやすくなることを明らかにした。このようにコーティング層は、滑雪により摩耗されるが、コーティング層の残存量から9年経過しても十分にその機能を果たしている状態を確認した。コーティング層の残存量から膜材料の滑雪による摩耗損傷劣化を評価すると、致命的な損傷劣化が生じない優れた材料と言える。

以上の結果は、膜構造建築物を多雪地域に建設する場合の滑雪条件や耐久性を検討するための資料になり得ると考える。

### 第3章の参考文献

- 1) 田中義章ほか：空気膜構造建物モデルを用いた融雪に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 785-786，1984.10
- 2) 川島 実ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第1報 小型実験ドームによる融雪実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 787-788，1984.10
- 3) 森野仁夫ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第2報 風洞箱による実験，日本建築学会，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 789-790，1984.10
- 4) 宮川保之ほか：空気膜構造棟に関する実験・研究（その8 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，pp. 629-630，1985.10
- 5) 川島 実ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第3報 融雪シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 913-914，1985.10
- 6) 森野仁夫ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第4報 融雪に要する熱量の定量化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 915-916，1985.10
- 7) 西川 薫ほか：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，pp. 893-894，1986.8
- 8) 西 安信ほか：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，pp. 895-896，1986.8
- 9) 鳥居 壮ほか：膜構造材料，（財）住宅・建築 省エネルギー機構 I B C E，No. 52，pp. 37-41，1989.5
- 10) 前田博司：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，pp. 199~204，1979.9
- 11) 前田博司ほか：屋根の雪荷重に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，PP. 559~560，昭和50年10月
- 12) 上野 学ほか：雪氷に対する屋根鋼板の特性評価，日本雪氷学会誌，雪氷，49巻，3号，PP. 131-137，1987.9
- 13) 渡辺正朋ほか：屋根葺材と屋根雪の摩擦に関する研究（その1）主要な屋根葺材と氷ブロックの静摩擦，日本雪工学会誌，第3号，pp. 1-11，1987.6
- 14) 渡辺正朋ほか：屋根葺材と屋根雪の摩擦に関する研究（その2）屋根葺材に対する雪氷の滑走速度および動摩擦，日本雪工学会誌，第9号，pp. 4-15，1988.12
- 15) 遠藤八十一ほか：屋根雪の滑落条件と飛距離，寒地技術シンポジウム'88講演論文集，PP. 220-225，1988.11
- 16) 伊東敏幸ほか：屋根葺材と屋根雪の凍着性状に関する研究 材料特性と気象要素に基づく凍着過程と凍着強度，日本建築学会構造系論文集，第470号，pp. 43-51，1995.4
- 17) 渡辺正朋：屋根葺材の降雪特性に関する基礎的研究，学位論文，1990.6
- 18) 清水増治郎ほか：氷点下における雪の屋根材への付着，雪氷，54巻，3号，pp. 269-275，1992.9
- 19) 生井武文：流れの力学，コロナ社，pp. 3-7，1976.10
- 20) 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
- 21) 伊東敏幸：積雪地域における勾配屋根の材料設計および維持保全に関する研究，学位論文，1995.12
- 22) 阿部 修：大型傾斜屋根における軒下落雪の堆積形状，日本雪氷学会全国大会講演予稿集，p. 7，1990.10
- 23) 阿部 修：大型傾斜屋根における軒下落雪の堆積形状—その2，日本雪氷学会全国大会講演予稿集，p. 130，1991.10
- 24) 伊東敏幸ほか：屋根雪落雪による屋根葺材の摩耗現象に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集 第477号，pp. 1-8，1995.11
- 25) 北川澄男ほか：フッ素樹脂製膜材の降雪について（第1報），膜構造研究論文集'87，pp. 31-38，1987.10
- 26) 北海道立寒地住宅都市研究所ほか：膜構造建築物の寒冷積雪地への適用に関する研究，平成元年度共同研究報告書，1990.3



- 27) 苫米地司：膜構造物の屋根雪の滑落雪性状について，日本雪氷学会講演予講集，p. 50, 1989. 10
- 28) 山口英治ほか：膜構造物の雪処理に関する研究，寒地技術シンポジウム'90講演論文集，pp. 295-300, 1990. 12
- 29) 苫米地司ほか：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報告集第426号，pp. 99-105, 1991. 8
- 30) 伊東敏幸ほか：劣化した屋根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
- 31) 竹島悦機ほか：塗装鋼板の耐久寿命予測法に関する研究（第1報）ポリエステル樹脂系塗装鋼板の耐久寿命の予測，色材，55, pp. 715-729, 1982
- 32) 太陽工業（株）：技術資料，1995. 5

## 第4章 膜構造建築物における屋根形状と屋根上積雪荷重

4.1	はじめに	4-1
4.2	膜構造建築物における 屋根形状と降雪	4-2
4.3	V字張り屋根形状の降雪特性	4-6
4.3.1	V字張り屋根形状を対象とした 屋外観測実験方法	4-6
4.3.2	V字張り屋根形状を対象とした 屋外観測実験結果	4-7
4.4	V字張り屋根形状を対象とした 膜構造解析	4-13
4.4.1	膜構造解析方法	4-13
4.4.2	膜構造解析結果	4-19
4.5	まとめ	4-25
	参考文献	4-26

## 第4章 膜構造建築物における屋根形状と屋根上積雪荷重

### 4.1 はじめに

前章の研究結果から膜材料は、滑雪面に介在する水分量が少ない方が静摩擦係数や動摩擦係数が小さいことが明らかとなった。また、膜材料は、撥水性に優れており凍着強度も他の屋根葺材に比べ小さいことが明らかとなった。さらに、膜材料は、年数の経過に伴い滑雪による摩耗の影響を受けて表面が滑らかになり滑雪しやすくなることが明らかとなった。この表面特性は、他の屋根葺材と大きく異なっており、金属材料の場合には、年数の経過に伴い材料表面の摩耗損傷劣化が進み滑雪性を低下させている<sup>1)</sup>。従って、膜材料は、他の屋根葺材に比べて滑雪性に優れていると言える。このように前章では、膜材料固有の材料特性を明らかにした。

図4-1に示すように膜構造建築物の屋根雪に作用する滑雪抵抗力は、膜材料特性に関わる滑雪抵抗力だけでなく、膜材料の張り方（構法）に関わる「上部積雪との引張抵抗力、側部積雪とのせん断抵抗力」がある。膜材料の張り方は、種々の方法があることから引張抵抗力やせん断抵抗力を考慮した屋根上積雪荷重の検討が必要と考える。このようなことから本章では、膜構造建築物における膜材料の張り方を含めた屋根形状に着目して「屋根形状と屋根上積雪荷重との関わり合い」について検討するため、以下に示す評価、実験および解析を行った。

- (1) 第2章の調査結果から、膜材料をV字状に張った屋根形状（V字張り屋根形状）は、連続する屋根雪をV字峰部で分割してV字ごとに滑雪処理することができるため、屋根雪の滑雪処理に有効と考える。この調査結果を踏まえて、上部積雪との引張抵抗力および側部積雪とのせん断抵抗力を取り上げ、膜材料の張り方の差異による屋根雪の滑雪現象について力の釣り合い式を用いて評価し、V字張り屋根形状が屋根雪の滑雪現象に有効であることを提案する。
- (2) V字張り屋根形状の滑雪特性を検討するため、桁行方向3mのスパンを持つV字張り屋根形状を2つ連続させた大型の試験体を設置して連続的な屋外観測実験を行う。
- (3) V字張り屋根形状では、屋根雪をV字峰部で分割して滑雪処理を行うため、V字部分の屋根上積雪荷重を考慮した桁行方向のスパンや初期サグの設定が重要と考える。このことから、屋根上積雪荷重とV字屋根形状を有する膜構造建築物との構造的な関わり合いについて検討するため、特定膜構造技術基準に基づいた現状の設計用屋根上設計荷重を用いて膜構造解析を行う。

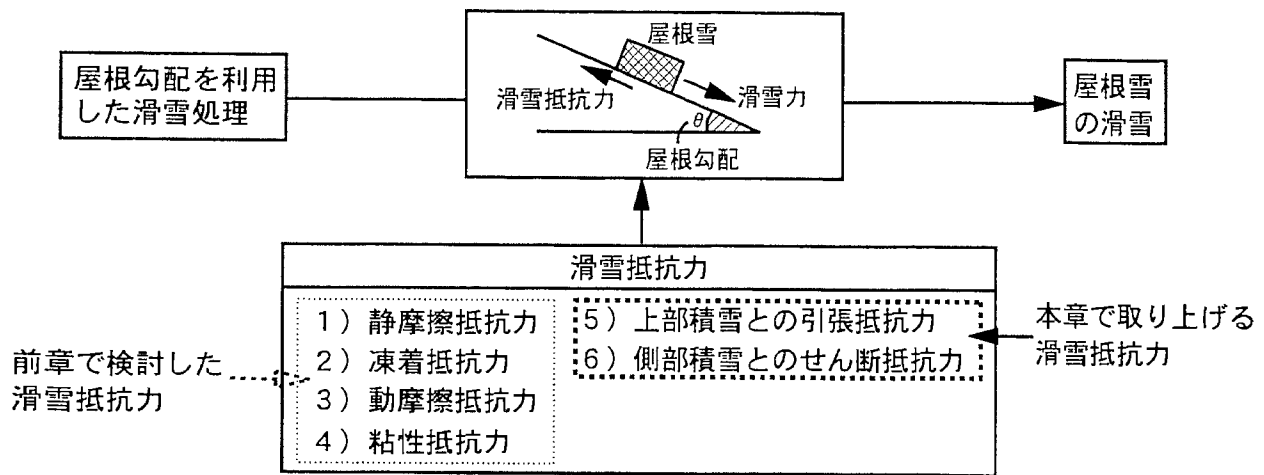


図 4 - 1 本章で対象とする膜構造建築物における屋根雪に作用する滑雪抵抗力

#### 4.2 膜構造建築物における屋根形状と滑雪

多雪地域における膜構造建築物の構造方式は、第2章の建設状況で明らかにしたように骨組膜構造が多い状況にある。多雪地域では、過大な屋根上積雪荷重に対して膜材料の許容膜応力で骨組間隔が計画でき、屋根雪処理を含めた屋根の構造計画がしやすいため、骨組膜構造の採用が多いと考える。骨組膜構造における膜材料の張り方（構法）は、写真4-1に示すように骨組と骨組との間を平面的に膜材料を張る方法「平張り屋根形状」と膜材料表面をケーブル材で押さえ込んでV字状に張る方法「V字張り屋根形状」とに大別することができる。また、第2章の調査結果からV字張り屋根形状は、屋根雪を分割して処理できるため、滑雪処理に有効と考える。このことから、本節では、この2種類の膜材料の張り方の差異による屋根雪の滑雪現象について力の釣り合い式を用いて評価し、V字張り屋根形状の屋根雪の滑雪現象に対する有効性を明らかとした。

一般に屋根雪の滑雪状況をみると、屋根雪は、屋根面の雪が全体に移動して滑雪することは稀で、屋根頂部やけらばに部分的に屋根雪が残る現象がみられる<sup>2)</sup>。これらの現象を模式図で示すと、図4-2となる。図に示すように、屋根頂部の屋根雪は、滑雪方向の反対側の屋根雪とつながって滑雪しにくく、けらば部分の屋根雪は、屋根面の温度むらと外気温（マイナス温度）との影響を受けて凍着現象が発生する

ため、滑雪しにくくなっていると考える。これらに関する苫米地らの研究<sup>3)</sup>をみると、引張抵抗力およびせん断抵抗力をほとんど無視できるほど低減することで、極めて円滑な滑雪が発生している。

これらのことを膜構造建築物で考えると、V張り屋根形状は、第2章の調査結果のように屋根面に積もった雪を分割し、各V字ごとに滑雪現象が発生している。このようにV字張り屋根形状は、屋根雪に発生するせん断抵抗力を低減することが可能なことから、滑雪処理に有効と言える。また、膜材料は、熱抵抗が小さく<sup>4)</sup>熱エネルギーを伝えやすいことから、屋根雪の界面に作用する最も大きい凍着抵抗力を解除し、滑雪処理させやすい材料と考える。従って、膜構造建築物における屋根雪の滑雪処理は、V字張り屋根形状や膜材料の熱的特性を活用することが有効と考える。

ここで、平張り屋根形状とV字張り屋根形状について、滑雪開始条件に関わる力の釣り合い式を示すと、以下のようなになる。

#### (1) 平張り屋根形状の場合

【温度条件  $t \leq 0$  (°C)】

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_a + \underline{F_t} + F_s \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置しない場合})$$

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_a + \underline{F_s} \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置した場合})$$

【温度条件  $t > 0$  (°C)】

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + \underline{F_t} + F_s \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置しない場合})$$

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + \underline{F_s} \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置した場合})$$

#### (2) V字張り屋根形状の場合

【温度条件  $t \leq 0$  (°C)】

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_a + \underline{F_t} \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置しない場合})$$

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_a \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置した場合})$$

【温度条件  $t > 0$  (°C)】

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + \underline{F_t} \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置しない場合})$$

$$\underline{m \times g \times \sin \theta} > F_{sf} \quad (\text{屋根頂部に雪切り板を設置した場合}) \leftarrow \text{最も滑雪抵抗力が少ない条件}$$

ここに、 $F_{sf}$ ：静摩擦抵抗力       $F_a$ ：凍着抵抗力  
 $F_t$ ：引張抵抗力       $F_s$ ：せん断抵抗力  
 $m$ ：屋根雪の質量       $g$ ：重力加速度  
 $\theta$ ：屋根勾配

このように膜構造建築物における屋根雪の滑雪開始条件は、膜材料の張り方によって大きな影響を受けることから、屋根頂部や側部の滑雪抵抗力を低減させる屋根の形状計画が重要と考える。

図4-3 に、V字張り屋根形状における滑雪現象の模式図を示す。図に示すように屋根雪は、谷部へ移動しようとする力が作用して峰部で屋根雪が分割される。この谷部へ移動しようとする力は、図中に示すV字角度 $\theta_1$ が大きくなるほど大きくなることから、せん断抵抗力の低減に対して効果的である。これに加え、屋根雪は、谷部へ移動しようとする力の作用によってV字谷部へ集まるように堆積するため、V字部分における単位面積当たりの積雪重量の増加が滑雪現象を誘発していると考ええる。

以上のことから、V字張り屋根形状は、平張り屋根形状に比べて滑雪しやすく、滑雪処理する上で効果的な張り方（構法）と言える。膜材料は、滑雪性に優れた材料であり、このV字張り屋根形状の滑雪現象に対する優位点を有効に活用することで滑雪処理による膜構造建築物の制御積雪荷重が可能と考える。



V字張り屋根形状の一例



平張り屋根形状の一例

写真4-1 膜材料の張り方の差異

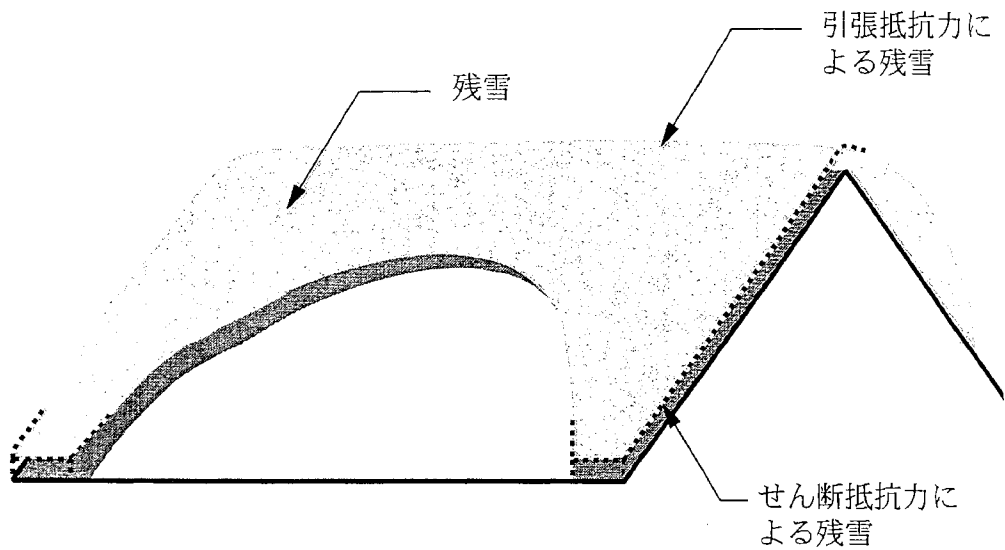


図 4 - 2 屋根頂部やけらば部分に屋根雪が残る現象の模式図

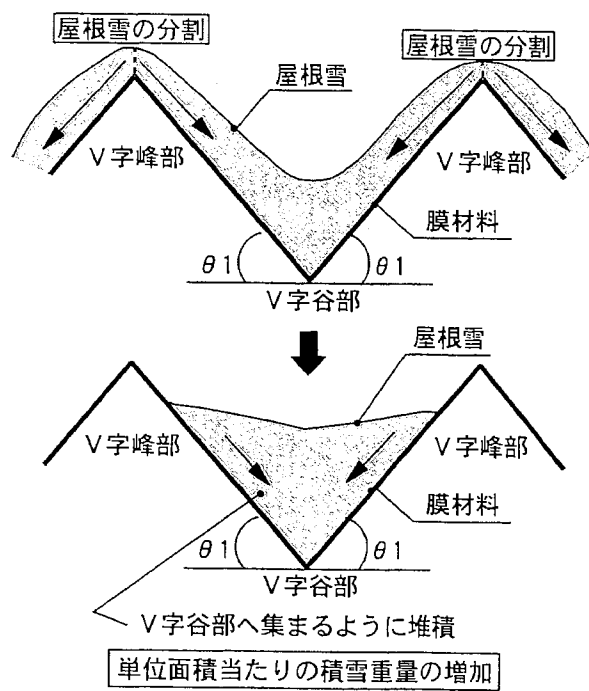


図 4 - 3 V字張り屋根形状における滑雪現象の模式図

### 4.3 V字張り屋根形状の滑雪特性

#### 4.3.1 V字張り屋根形状を対象とした屋外観測実験方法

前節から判断すると、V字張り屋根形状は、滑雪抵抗力を低減できるため、滑雪処理する上で効果的と考える。このようなことから本節では、V字張り屋根形状が滑雪処理に効果的であることを検証するため、大型の試験体を屋外に設置して屋根雪の滑雪状況について連続的な観測実験を行った。

図4-4 に試験体および観測概要を示す。図に示すように試験体は、膜材料をV字状に張っている。本試験体の桁行方向のスパンは、3 mである。試験体の屋根雪の滑雪状況は、試験体から約10m離れた高さ約5.4mの位置にタイムラプスビデオを設置して2秒間隔で観測した。V字張り屋根形状の屋根勾配は、滑雪方向を $\theta_1$ 、桁行方向を $\theta_2$ とし、以下の4種類とした。

- 1) CASE1 :  $\theta_1 = 10^\circ$  ,  $\theta_2 = 0^\circ$
- 2) CASE2 :  $\theta_1 = 20^\circ$  ,  $\theta_2 = 0^\circ$
- 3) CASE3 :  $\theta_1 = 25^\circ$  ,  $\theta_2 = 0^\circ$
- 4) CASE4 :  $\theta_1 = 20^\circ$  ,  $\theta_2 = 10^\circ$

なお、それぞれ暖房装置を稼働させた場合と暖房装置を稼働させていない場合について観測した。膜材料裏面温度、膜材料裏面の近傍温度は、図に示す位置において熱電対を用いて測定した。観測期間は、1994年12月27日～1995年3月7日および1995年12月26日～1996年2月25日の2冬期間である。

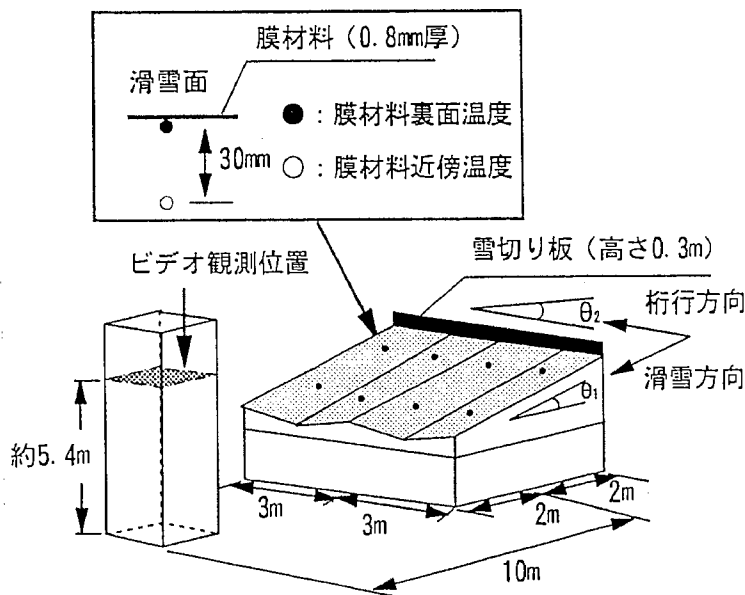


図 4 - 4 試験体および観測概要



#### 4.3.2 V字張り屋根形状を対象とした屋外観測実験結果

試験体を設置した石川県・小松市大杉における観測期間の降雪深および外気温は、石川県土木事務所の雪量観測情報から収集した。これらの観測資料は、1時間ごとの観測値である。現地の風速が極めて弱いために、試験体の屋根上積雪深は滑雪および融雪終了までの累積積雪深とした。

図4-5に、1時間当りの降雪深の発生頻度を示す。図に示すように、1時間当たりの降雪深は1～2cmが最も多く、1995年は1cm以上の降雪が180回で累積降雪深が405cm、1996年は1cm以上の降雪が333回で累積降雪深が522cm観測されている。一般に1時間当たりの降雪量は、降水量に換算すると通常1～2mmで10mm以上になることは稀である<sup>5)</sup>。本観測期間で降雪深が最大値8cmは、雪密度を $0.15\text{g}/\text{cm}^3$ と仮定した場合、降水量に換算すると12mm/hとなる。すなわち、1時間当たりの降雪量としては極値に近い値が観測されたことになる。図4-6に、本観測期間における石川県・小松市大杉の外気温と日降雪深の関係を示す。図に示すように降雪時の外気温は、 $0^{\circ}\text{C}$ 近傍で推移する場合が多く、 $-3.0^{\circ}\text{C}$ 以下での降雪はほとんど観測されなかった。苫米地らの研究によると<sup>6)</sup>、最も大きな滑雪抵抗力として屋根雪と屋根葺材との界面に発生する凍着強度は $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以上になると急激に減少することから、本観測で得られる滑雪現象は凍着強度の影響が小さいと考える。

暖房装置を稼働させていない場合の実験は、CASE2、CASE3の条件で行った。この条件における試験体の屋根上積雪状況を観察すると、自然滑雪現象が顕著に発生している。この滑雪現象を写真4-2に段階的に示す。写真に示すように、屋根雪は、軒先に巻だれが発生し、その後、V字張り屋根形状を有した2つの屋根のV字峰部（本試験体では桁行方向の中央部分となる）に亀裂が入り屋根雪は分割される。分割された屋根雪は、それぞれの屋根のV字谷部へ移動しながら滑雪現象が発生する。このようにV字張り屋根形状の場合、連続する屋根雪を分割処理できることを明らかにした。これらの滑雪現象の中で、屋根面に5cm以上の積雪があった場合における膜材料裏面温度と積雪深との関係を整理すると、図4-7となる。図に示すように滑雪時の膜材料裏面温度は、 $-1.0\sim+0.3^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布している（外気温および膜材料裏面の近傍温度は、膜材料裏面温度とほぼ同程度の値を示している）。さらに、積雪深の増加に伴い、低い膜材料裏面温度で滑雪現象が発生している。すなわち、積雪重量が大きくなるに伴い、滑雪しやすくなることを示している。なお、積雪深5cm未満の場合、外気温が高いため融雪する場合が多くみられた。

暖房装置を稼働させた場合の実験は、CASE1、CASE2、CASE3、CASE4の条件で行った。これらの条件における屋根雪の滑雪状況をみると、降雪状況や外気温によって異なるが、融滑雪および融雪現象が発生している。CASE1、CASE2、CASE3について

みると、軒先に巻だれが発生すると同時にV字谷部へ融雪しながら雪が移動して巻だれが滑雪する。 $\theta = 20^\circ$  以上では1日以内で全ての屋根雪が滑雪するが、CASE1では滑雪に3日程度要する場合もある。写真4-3に、CASE4の融滑雪状況を段階的に示す。写真に示すように、軒先に巻だれが発生すると同時にV字張り屋根形状の屋根の右側が谷部に向かって、左側は滑雪方向に向かって融雪しながら移動して巻だれが滑雪する。いずれの場合も、この現象を繰り返して全ての屋根雪が滑雪している。また、融雪現象をみると、降雪現象が発生してから暖房装置を稼働させた場合でも降雪深が15cm程度であれば完全に融雪されている。なお、積雪深5cm未満の場合は、いずれも滑雪現象がみられず融雪している。

これらの観測実験結果を整理すると、以下のようなになる。

- (1) V字張り屋根形状は、いずれの屋根勾配においても連続する屋根雪を分割処理していることから、せん断抵抗力の低減に対して有効に作用していることを明らかにした。従って、V字張り屋根形状は、屋根雪の滑雪処理に効果的な膜材料の張り方と言える。
- (2) 自然滑雪処理の場合には、膜材料裏面温度および外気温がマイナスの状態でも滑雪現象が発生することを明らかにした。この滑雪現象は、積雪重量が大きいほど低い膜材料裏面温度および外気温で滑雪している。従って、膜材料裏面温度、外気温および積雪重量が自然滑雪現象の発生を捉える指標になると考える。
- (3) 融滑雪処理の場合には、屋根勾配 $20^\circ$  以上あれば融滑雪現象が有効に作用して1日以内で全ての屋根雪が融滑雪することを明らかにした。また、屋根勾配 $10^\circ$  の場合にも屋根勾配 $20^\circ$  以上の場合に比べ融滑雪処理に対する時間は長くなるものの、全ての屋根雪が滑雪することを明らかにした。

以上のことから、膜構造建築物の滑雪現象は、屋根勾配、膜材料裏面温度、外気温および膜材料の張り方の差異により、大きな影響を受けていることを明らかにした。従って、合理的な屋根上積雪荷重評価を行うためには、これらを指標とした屋根上積雪荷重の制御を行うことが有効と考える。

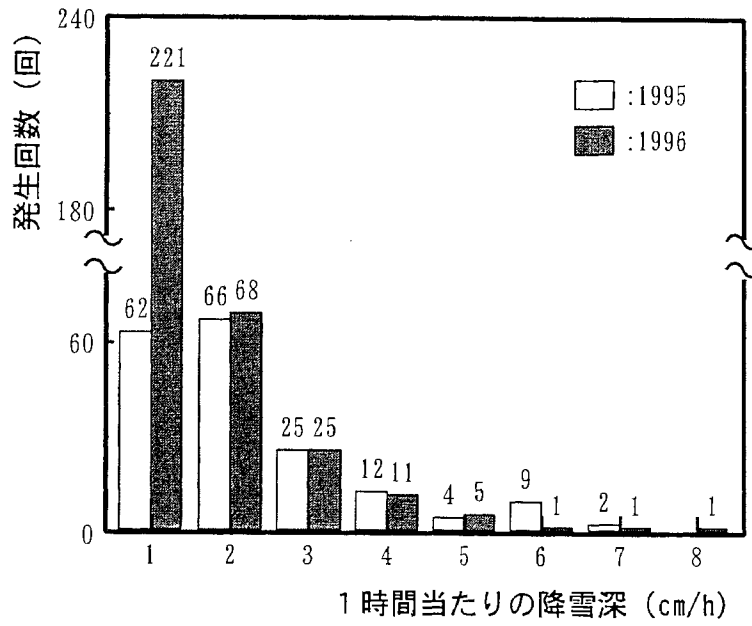


図 4 - 5 1 時間当たりの降雪深と発生回数との関係

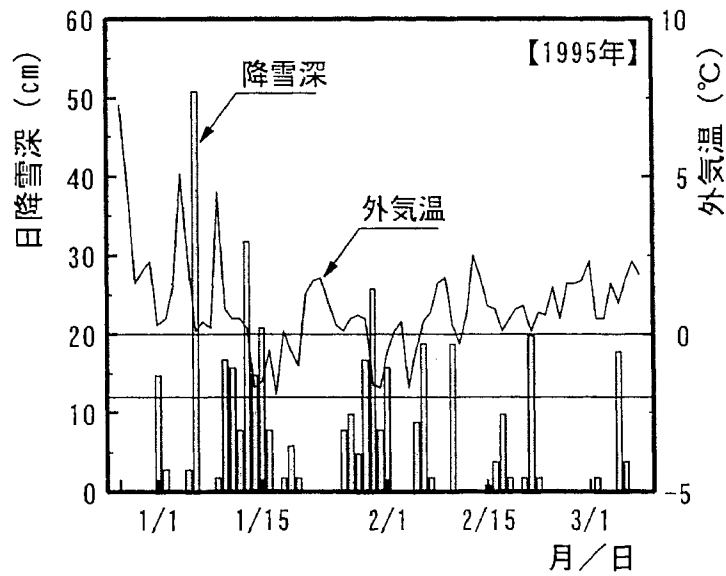


図 4 - 6 (1/2) 外気温と日降雪深との関係

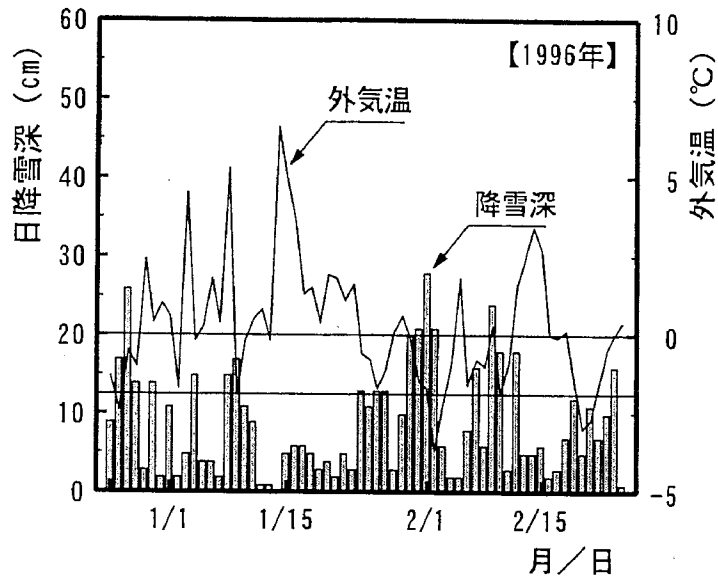


図 4 - 6 (2/2) 外気温と日降雪深との関係

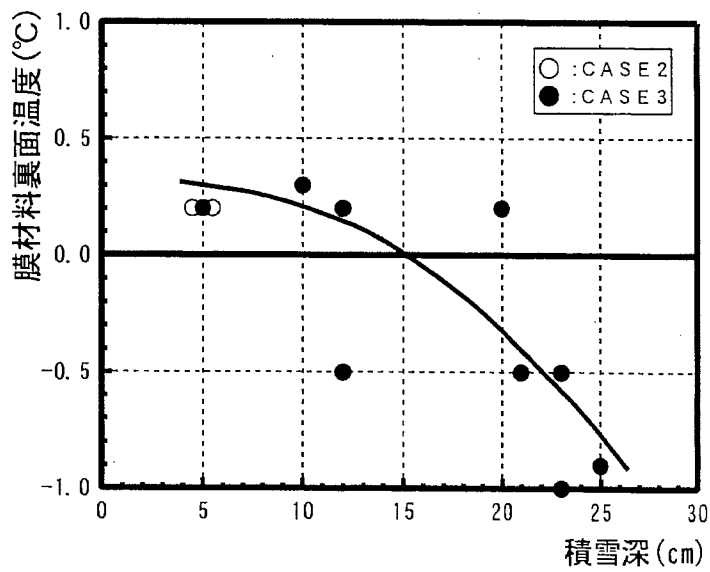


図 4 - 7 滑雪時の膜材料裏面温度と積雪深との関係

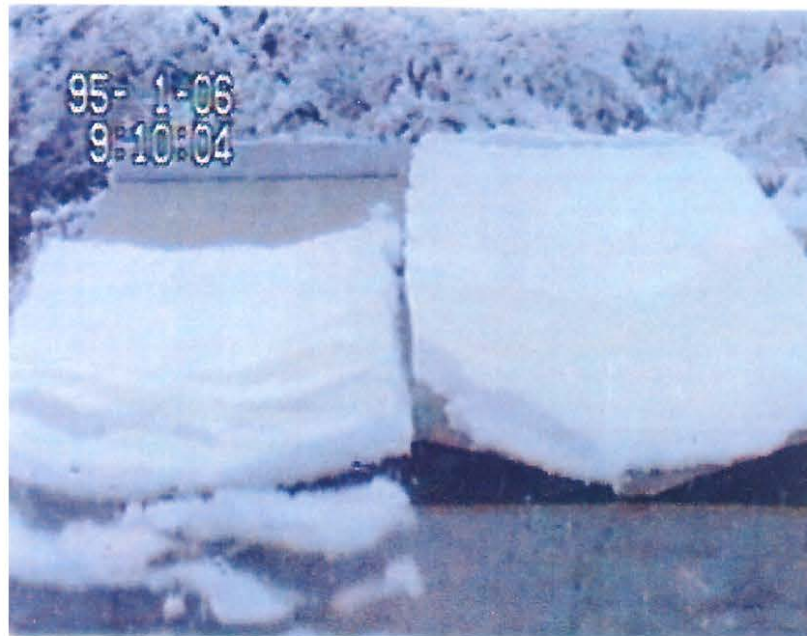


写真 4 - 2 自然降雪現象の一例

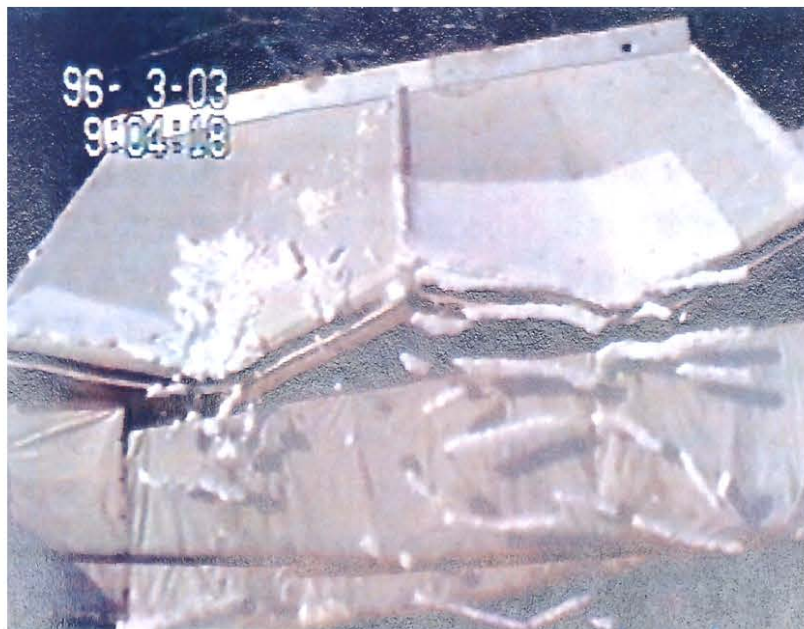


写真 4 - 3 融滑雪現象の一例

## 4.4 V字張り屋根形状を対象とした膜構造解析

V字張り屋根形状は、連続する屋根雪をV字峰部でせん断抵抗力を低減することができるため、屋根雪の滑雪処理に有効である。従って、V字張り屋根形状を有した膜構造建築物を建設する場合、V字部分の屋根上積雪荷重を考慮した桁行方向のスパンや初期サグの設定が重要と考える。すなわち、V字張り屋根形状を有する膜構造建築物の合理的な屋根上積雪荷重評価を行うためには、種々の設計用屋根上積雪荷重に対応する膜構造解析を行い、屋根上積雪荷重と桁行方向のスパン、初期サグとの関係を明らかにする必要がある。このようなことから、本節では、V字張り屋根形状と屋根上積雪荷重との構造的な関わり合いについて検討するため、特定膜構造技術基準に基づいた現状の設計用屋根上積雪荷重でV字張り屋根形状を有する骨組膜構造を対象とした膜構造解析を行った<sup>7)~9)</sup>。なお、膜構造建築物の設計は、膜部分および膜部分を支持する架構材の2つに分けて行っている。膜部分については、膜定着部を固定境界と仮定して設計している。架構材については、膜部分の設計結果より反力を求め、これを新たに外力として設計している。本節では、V字張り屋根形状における屋根上積雪荷重と桁行方向のスパン、初期サグとの関係を明らかにすることを目的としているため、膜部分の設計のみを行った。

### 4.4.1 膜構造解析方法

膜構造解析は、膜材料およびケーブル材に適切な初期張力を与え安定した形態を決定する。この安定した形態を初期応力状態とし、これに設計用屋根上積雪荷重および他の設計荷重を組み合わせる解析を行う。この解析結果を用いて膜構造建築物の応力と変形の評価を行う。

膜面の形状解析は、膜材料の縦糸、横糸の張力比を1:1の等張力曲面として行う<sup>10)~13)</sup>。その後、膜材料およびケーブル材に初期張力を導入し、それぞれの自重を考慮した応力変形解析を行う<sup>14)~20)</sup>。外荷重については、前述の初期張力導入によって力学的に釣り合った構造体に外荷重を加え静的な応力変形解析を行う。

応力変形解析は、膜材料を三角形平面要素、ケーブル材を線要素として両者を複合した有限要素法により、荷重増分法、ニュートンラプソン法を組み合わせる幾何学的非線形問題として行う。膜材料およびケーブル材は、圧縮・曲げに抵抗しえない非抗圧縮材料とし、フックの法則が成り立つ直交異方性材料とする。

以下に、形状解析および応力変形解析に用いた有限要素法の有限変形理論における歪みと変形との関係、膜材料を直方異方性材料として扱った場合の応力と歪みの関係についての仮定式を示す。なお、膜構造解析は、太陽工業株式会社の解析プ

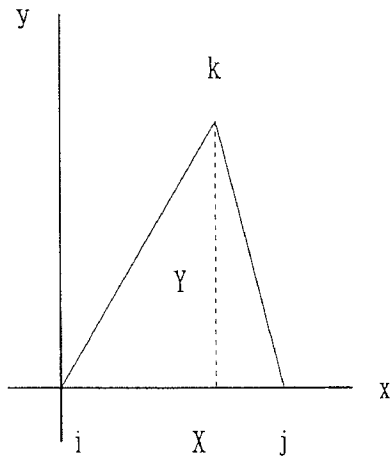
プログラムを用いた。

(1)有限変形理論における歪みと変形との関係

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \partial u / \partial x + (1/2) \times ((\partial u / \partial x)^2 + (\partial v / \partial x)^2 + (\partial w / \partial x)^2) \\ \varepsilon_y &= \partial u / \partial y + (1/2) \times ((\partial u / \partial y)^2 + (\partial v / \partial y)^2 + (\partial w / \partial y)^2) \\ \gamma_{xy} &= \partial u / \partial x + \partial u / \partial y + ((\partial u / \partial x) \times (\partial u / \partial y) \\ &\quad + (\partial v / \partial x) \times (\partial v / \partial y) + (\partial w / \partial x) \times (\partial w / \partial y)) \end{aligned}$$

u, v, w は、要素の局所座標系での x, y, z 方向の変位を示す。

ここに、 $\varepsilon_x$ : x 方向の歪み	$\varepsilon_y$ : y 方向の歪み
$\gamma_{xy}$ : せん断の歪み	u : x 方向の変位
v : y 方向の変位	w : z 方向の変位
x : z 方向の局所の長さ	y : y 方向の局所の長さ



本解析では、i - j 方向をタテ糸方向とする。

(2)膜材料を直方異方性材料として扱った場合の応力と歪みとの関係

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E_{tx} \times \varepsilon_x / (1 - \nu_x \times \nu_y) + \nu_y \times E_{tx} \times \varepsilon_y / (1 - \nu_x \times \nu_y) \\ \sigma_y &= E_{ty} \times \varepsilon_y / (1 - \nu_x \times \nu_y) + \nu_x \times E_{ty} \times \varepsilon_x / (1 - \nu_x \times \nu_y) \\ \tau_{xy} &= G_t \times \gamma_{xy} \end{aligned}$$

ここに、 $\sigma_x$ : x 方向の膜応力	$\sigma_y$ : y 方向の膜応力
$\tau_{xy}$ : せん断応力	$E_{tx}$ : x 方向の引張弾性係数
$E_{ty}$ : y 方向の引張弾性係数	$G_t$ : せん断弾性係数
$\nu_x$ : x 方向のポアソン比	$\nu_y$ : y 方向のポアソン比



図4-8 に、膜構造解析に用いた解析モデルの概要を示す。図に示すように解析モデルは、スパン60m、高さ30m（ライズ15m）を基本に桁行方向のスパンLおよび初期サグfを変えて作成した。なお、解析モデルの外周部の境界条件は、X, Y, Z 軸を拘束した。

表4-1 に、解析シリーズを示す。表に示すように解析は、桁行方向のスパンLおよび初期サグfを変えた20種類の解析モデルについて、以下に示す荷重の組み合わせで行った。なお、地震荷重については、膜材料およびケーブル材の重量が軽微であるため解析は省略する。

### 設計荷重の組み合わせ

- 1) 初期応力時 CASE1（長期）：D. L. + I. L.
- 2) 積雪荷重時 CASE2（長期）：D. L. + I. L. + S. L.
- 3) 風荷重時 CASE3（短期）：D. L. + I. L. + W. L.

ここに、D. L.：固定荷重（膜材料，ケーブル材）

I. L.：初期張力

S. L.：設計用屋根上積雪荷重

W. L.：設計用風荷重

なお、膜材料の初期張力は、縦糸：200kg/m、横糸：200kg/mを用いた。初期張力の値は、膜構造建築物の安定した形態の設定などを考慮して一般に200kg/m程度とされている。設計用風荷重W. L.については、建築基準法施行令第87条に準じ図4-9 に示す風力係数Cと速度圧qを用いて下式より求めた。

$$W. L. = C \times q$$

ここに、 $q = 120^4 \sqrt{h} = 281 \text{kg/m}^2$ 、 $h = 30 \text{m}$ （軒高GL+15m，ライズ15m，最高高さ30m）

解析に用いた膜材料およびケーブル材の材料定数は、表4-2 に示す通りである。本解析に用いた膜材料の基準強度は、縦糸方向：15,000kg/m、横糸方向：12,000kg/mである。従って、許容膜応力 $f_m$ は、以下のようになる。なお、長期の安全率は8、短期の安全率は4である<sup>21)</sup>。

### 許容膜応力 $f_m$

1) 長期：縦糸方向  ${}_L w f_m = 15,000 / 8 = 1,875 \text{ (kg/m)}$

横糸方向  ${}_F f_m = 15,000 / 8 = 1,500 \text{ (kg/m)}$

2) 短期：縦糸方向  ${}_S w f_m = 15,000 / 4 = 3,750 \text{ (kg/m)}$

横糸方向  ${}_S f_m = 15,000 / 4 = 3,000 \text{ (kg/m)}$

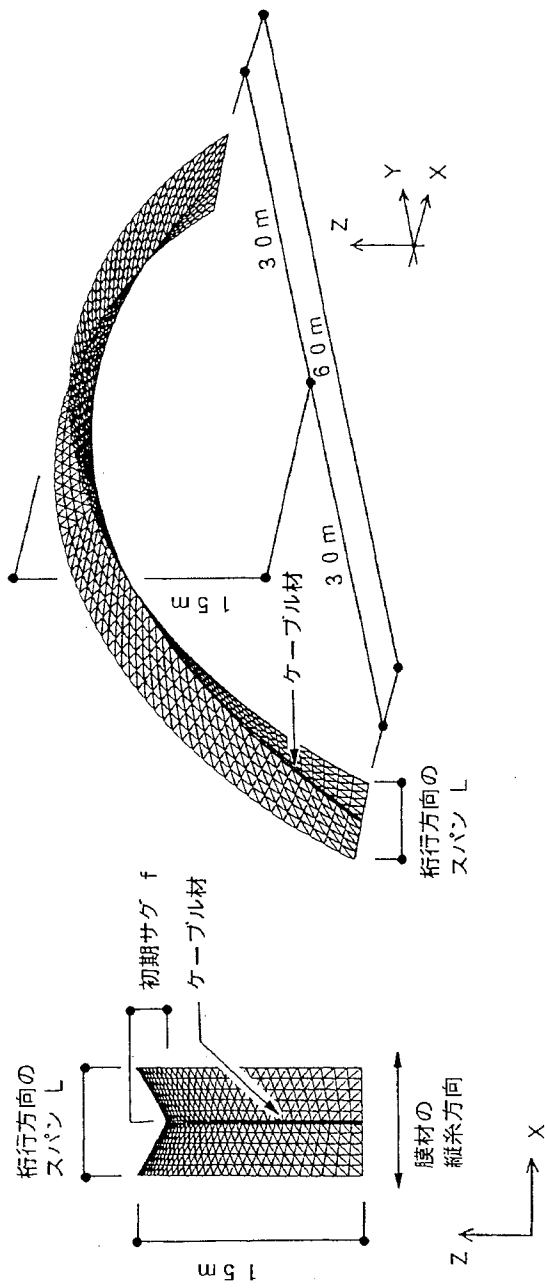


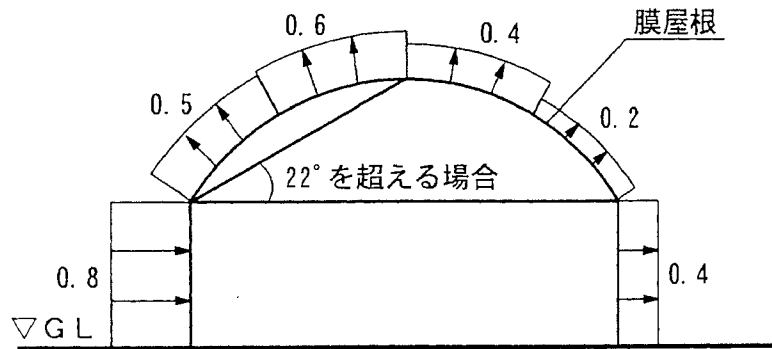
図 4-7 解析モデルの概要

表 4-1 解析シリーズ

●：解析例なし

解析モデル の条件	桁行方向のスペンL=4.0m					桁行方向のスペンL=5.0m					桁行方向のスペンL=6.0m					桁行方向のスペンL=7.0m					桁行方向のスペンL=8.0m														
	初期サグ					初期サグ					初期サグ					初期サグ					初期サグ														
	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)					
荷重 CASE																																			
CASE1 (長期)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CASE2 (長期)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
100kg/m <sup>2</sup>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
200kg/m <sup>2</sup>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
250kg/m <sup>2</sup>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
300kg/m <sup>2</sup>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
350kg/m <sup>2</sup>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
400kg/m <sup>2</sup>	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●
450kg/m <sup>2</sup>	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●	—	●	●	●	●
CASE3 (短期)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ケ-ブル材の径 φ	25.0	25.0	28.0	30.0	30.0	25.0	28.0	30.0	31.5	31.5	25.0	28.0	30.0	31.5	31.5	28.0	30.0	31.5	33.5	33.5	28.0	30.0	31.5	33.5	33.5	28.0	31.5	33.5	35.5	35.5					
ケ-ブル材の初期張力 t	3.3	6.2	8.6	10.5	10.5	2.4	5.0	7.2	9.0	9.0	1.8	4.1	6.1	7.8	7.8	1.3	3.3	5.2	6.8	6.8	0.9	2.8	4.4	6.0	6.0	0.9	2.8	4.4	6.0	6.0					

※ケ-ブル材は、構造用ストランドロープ(7×7)ST1570である。



※建築基準法施行令第87条より

図 4 - 8 風力係数

表 4 - 2 材料定数

膜材料	定数	引張剛性 (×厚) Et kg/m	ポアソン比 $\mu$	せん断剛性 (×厚) Gt kg/m	自重 W Kg/m
縦糸		118,000	0.77	6,600	1.5
横糸		96,200	0.63		

ケーブル	定数	引張剛性 E kg/cm <sup>2</sup>
構造用スラットロープ 7×7 ST1570		1,400,000

#### 4. 4. 2 膜構造解析結果

表4-3 に、解析結果の一覧表を示す。積雪荷重時 CASE2の膜応力状態をみると、同表の積雪荷重時の最大膜応力 $\sigma_{m \cdot max}$  にみられるように、縦糸方向に膜応力が大きく作用し縦糸方向：横糸方向の膜応力比は、それぞれの最大応力で概ね10：7の関係となる。従って、積雪荷重時 CASE2の場合、膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重は、縦糸方向の最大膜応力 $L_w \sigma_{m \cdot max}$  の値で決定される。ここで、積雪荷重時 CASE2における縦糸および横糸の最大膜応力の発生部位をみると、スパンLや初期サグfの値に関係なく解析モデルの頂部から2m程度下がった外周部の境界部付近の三角平面要素に両者ともみられる。

桁行方向のスパンLと設計用屋根上積雪荷重との関係をみると、膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重は、桁行方向のスパンLの増加に伴い減少する傾向を示す。さらに、各桁行方向のスパンLの膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重をみると、初期サグfが大きくなるに伴い増加する傾向にある。このように膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重は、桁行方向のスパンLおよび初期サグfの影響を大きく受けていると考える。

積雪荷重時 CASE2におけるケーブル材の張力をみると、桁行方向のスパンL=7.0m, 8.0m, 初期サグf=0.5mの時にケーブル張力が0tとなる。この現象は、ケーブル材が張力を失い緩んだ状態となるため構造上好ましくない。従って、常にケーブル材の張力が発生するように桁行方向のスパンLに対して適切な初期サグfを設定する必要がある。ここで、本解析結果を用いて積雪荷重時におけるケーブル材の残存張力の最低値を提案すると、以下のようなになる。ケーブル材の残存張力の最低値は、本解析条件の中で設計用屋根上積雪荷重S.L.として最も少ない100kg/m<sup>2</sup>を指標に用いた。S.L.=100kg/m<sup>2</sup>のケーブル材に発生する最大張力の中で最も低かった張力をみると、桁行方向のスパンL=6.0m, 初期サグf=0.5mの時に1.1tであった。従って、積雪荷重時におけるケーブル材の残存張力の最低値は、1.1t以上が目安と考える。

風荷重時 CASE3の膜応力状態をみると、積雪荷重時と傾向が異なり、表4-3の風荷重時の最大膜応力 $\sigma_{m \cdot max}$  にみられるように、横糸方向に膜応力が大きく作用している。各桁行方向のスパンLにおける最大膜応力は、縦糸方向では初期サグfに関係なくほぼ一定の値を示すが、横糸方向は初期サグfが大きくなるに伴い増加する傾向を示す。従って、風荷重時 CASE3の場合、横糸方向の最大膜応力 $s_f \sigma_{m \cdot max}$  の値で決定される。ここで、風荷重時 CASE3における縦糸および横糸の最大膜応力の発生部位をみると、スパンLや初期サグfの値に関係なく、解析モデルに風力係数0.6を設定した部位の外周部の境界部付近の三角平面要素に両者ともみられる。

さらに、風荷重時 CASE3における横糸方向の最大膜応力 $s_F \sigma_{m \cdot \max} = 1,845 \text{ kg/m}$ と横糸方向の許容膜応力 $s_F f_m = 3,750 \text{ kg/m}$ との関係を見ると、 $(s_F \sigma_{m \cdot \max} / s_F f_m) \times 100 = 49.2\%$ で横糸の膜応力にかなりの余力がみられる。従って、多雪地域では、風荷重時よりも積雪荷重時の方が設計荷重として支配的と言える。

図4-10に、桁行方向のスパン $L = 5.0 \text{ m}$ における設計用屋根上積雪荷重 $S.L.$ と縦糸方向の膜応力 $L_w \sigma_m$ との関係を示す。図のように、いずれの初期サグ条件をみても設計用屋根上積雪荷重 $S.L.$ の増加に伴い膜応力 $L_w \sigma_m$ は、直線的に増加する傾向を示し、初期サグ $f$ が大きいほど緩やかな増加傾向となる。各初期サグ $f$ の膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重 $S.L._{\max}$ をみると、以下のようになる。

$$f = 0.5 \text{ m} : S.L._{\max} = 225.7 \text{ kg/m}^2$$

$$f = 1.0 \text{ m} : S.L._{\max} = 324.2 \text{ kg/m}^2$$

$$f = 1.5 \text{ m} : S.L._{\max} = 403.5 \text{ kg/m}^2$$

$$f = 2.0 \text{ m} : S.L._{\max} = 454.3 \text{ kg/m}^2$$

なお、各桁行方向のスパン条件においても同様の傾向が得られた。このように、初期サグが大きいほど膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重が大きいこと、初期サグが大きいほど設計条件として有利になると考える。従って、膜材料をV字状に張った膜構造建築物は、初期サグの大きさが膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重を捉える上で重要な要因となる。

図4-11に、初期サグ $f = 2.0 \text{ m}$ における設計用屋根上積雪荷重 $S.L.$ と縦糸方向の膜応力 $L_w \sigma_m$ との関係を示す。図のように、いずれの桁行方向のスパン条件をみても設計用屋根上積雪荷重 $S.L.$ の増加に伴い膜応力 $L_w \sigma_m$ は直線的に増加する傾向を示し、桁行方向のスパン $L$ が大きくなるほど急激な増加傾向となる。各桁行方向のスパン $L$ の膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重 $S.L._{\max}$ をみると、以下のようになる。

$$L = 4.0 \text{ m} : S.L._{\max} = 601.8 \text{ kg/m}^2$$

$$L = 5.0 \text{ m} : S.L._{\max} = 454.4 \text{ kg/m}^2$$

$$L = 6.0 \text{ m} : S.L._{\max} = 339.8 \text{ kg/m}^2$$

$$L = 7.0 \text{ m} : S.L._{\max} = 268.1 \text{ kg/m}^2$$

$$L = 8.0 \text{ m} : S.L._{\max} = 218.1 \text{ kg/m}^2$$

このように、桁行方向のスパンが大きくなるに伴い膜応力が許容膜応力に達する屋

根上積雪荷重が小さくなるため、桁行方向のスパンの影響を大きく受けている。各初期サグ条件においても同様の傾向が得られた。従って、膜パネルをV字に張った膜構造建築物は、初期サグだけでなく桁行方向のスパンの影響も受けるため、桁行方向のスパンの大きさも膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重を捉える上で重要である。

これらのことから判断すると、膜材料をV字状に張った膜構造建築物の設計は、初期サグおよび桁行方向のスパンのバランスの良い設定が欠かすことができない条件である。

ここで、初期サグ条件として  $f = 2.0\text{m}$  を指標に用いて桁行方向のスパン  $L$  と縦糸方向の膜応力  $L_w \sigma_m$  との関係を示すと、図4-12となる。図中には、設計用屋根上積雪荷重 ( $S.L. = 100, 200, 250, 300, 350\text{kg/m}^2$ ) の回帰曲線式を示している。図のように、いずれの設計用屋根上積雪荷重の条件をみても桁行方向のスパン  $L$  の増加に伴い膜応力  $L_w \sigma_m$  は、緩やかに増加する傾向を示し、設計用屋根上積雪荷重  $S.L.$  が小さいほど緩やかな増加傾向となる。各設計用屋根上積雪荷重  $S.L.$  に対する桁行方向の許容できる最大スパン  $L_{max}$  は、 $S.L. = 200\text{kg/m}^2$  で  $L_{max} = 8.2\text{m}$ 、 $S.L. = 250\text{kg/m}^2$  で  $L_{max} = 7.3\text{m}$ 、 $S.L. = 300\text{kg/m}^2$  で  $L_{max} = 6.5\text{m}$ 、 $S.L. = 350\text{kg/m}^2$  で  $L_{max} = 5.9\text{m}$  となり、設計用屋根上積雪荷重の増加に伴い桁行方向のスパんに制約が大きくなる。

以上の膜構造解析から得られた解析結果を整理すると、V字張り屋根形状は、初期サグが大きく、桁行方向のスパンが小さいほど膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重が大きくなる。従って、V字張り屋根形状は、初期サグが大きくV字峰部が鋭角な程、大きな設計用屋根上積雪荷重を許容でき、連続する屋根雪を分割して滑雪現象を誘発する効果が大きいと言える。

しかし、桁行方向のスパンを小さくし過ぎると、谷部に堆積させる雪の量に対して制約が大きくなりV字部分を雪が埋めてしまうため、屋根面に一様に積もった雪をV字峰部で分割する効果が小さくなるを考える。また、初期サグを大きくし過ぎると、V字を形成させるケーブル材の径が大きくなることや膜材料の歩留まりが低下するなどコスト的な問題にもつながる。このようなことから、滑雪処理に効果的なV字張り屋根形状を有する膜構造建築物の設計は、初期サグおよび桁行方向のスパンのバランスの良い設定が重要と言える。

表 4 - 3 解析結果の一覧

○：許容膜応力内 ×：許容膜応力外 -：解析例なし

解析モデル の条件	桁行方向のスペンL=4.0m					桁行方向のスペンL=5.0m					桁行方向のスペンL=6.0m					桁行方向のスペンL=7.0m					桁行方向のスペンL=8.0m														
	初期サグ					初期サグ					初期サグ					初期サグ					初期サグ														
	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	f(m)					
荷重 CASE	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CASE1 (長期)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CASE2 (長期)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
100kg/m <sup>2</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
200kg/m <sup>2</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
250kg/m <sup>2</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
300kg/m <sup>2</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
350kg/m <sup>2</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
400kg/m <sup>2</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
450kg/m <sup>2</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
最大膜 縦糸kg/m	1749	1760	1516	1435	1700	1745	1745	1840	1819	1819	1252	1619	1861	1677	1677	1493	1189	1667	1765	1765	1747	1351	1188	1188	1188	1754	1754	1754	1754	1754					
最大膜 横糸kg/m	1173	1187	1021	991	1143	1175	1226	1213	1213	1213	862	1091	1240	1123	1123	1013	826	1127	1179	1179	1173	923	837	837	837	1173	1173	1173	1173	1173					
最大ケーブル張力t	4.9	12.1	16.5	19.1	2.5	9.9	15.8	19.9	19.9	19.9	1.1	7.6	13.9	18.0	18.0	0.0	5.2	11.1	16.2	16.2	0.0	3.7	8.5	8.5	8.5	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4					
CASE3 (短期)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
最大膜 縦糸kg/m	980	984	982	983	1146	1147	1164	1182	1182	1182	1269	1251	1271	1290	1290	1424	1391	1406	1431	1431	1534	1497	1487	1487	1487	1506	1506	1506	1506	1506					
最大膜 横糸kg/m	1031	1139	1182	1235	1231	1302	1367	1427	1427	1427	1354	1421	1502	1565	1565	1545	1595	1677	1741	1741	1724	1737	1792	1792	1792	1845	1845	1845	1845	1845					
最大ケーブル張力t	15.8	19.2	23.2	26.8	17.6	22.4	26.0	29.4	29.4	29.4	20.1	25.3	29.0	32.8	32.8	21.5	27.1	31.1	34.9	34.9	22.6	29.5	34.0	34.0	34.0	38.1	38.1	38.1	38.1	38.1					



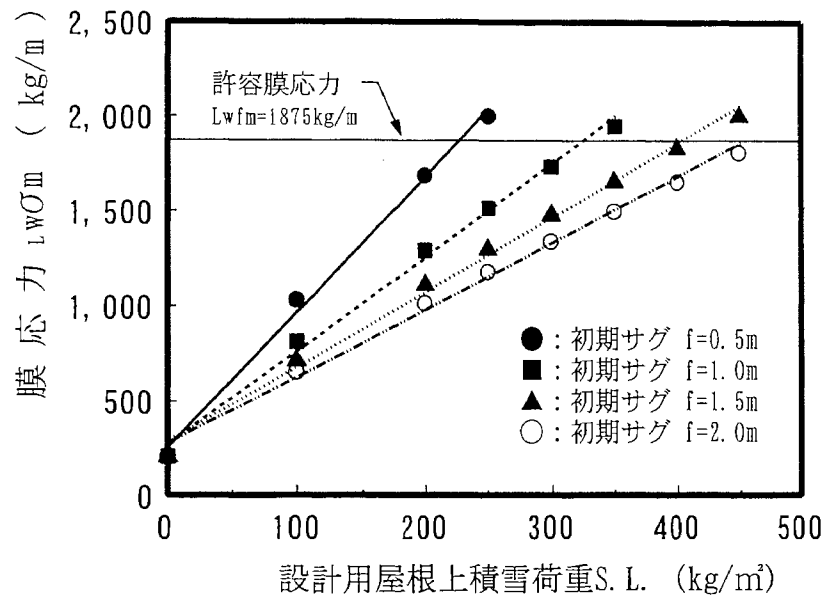


図 4 - 9 桁行方向のスパン  $L = 5.0\text{m}$ における設計用屋根上積雪荷重と縦糸方向の膜応力との関係

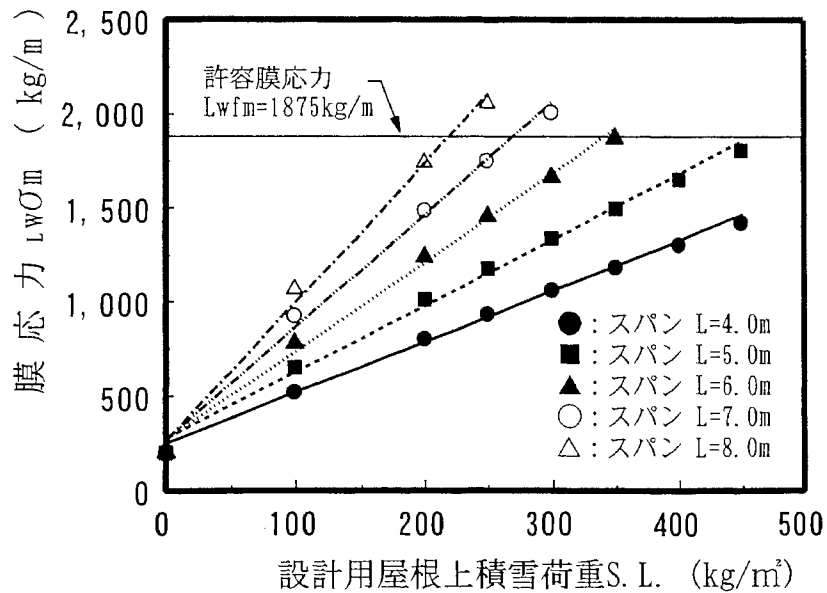


図 4 - 10 初期サグ  $f = 2.0\text{m}$ における設計用屋根上積雪荷重と縦糸方向の膜応力との関係

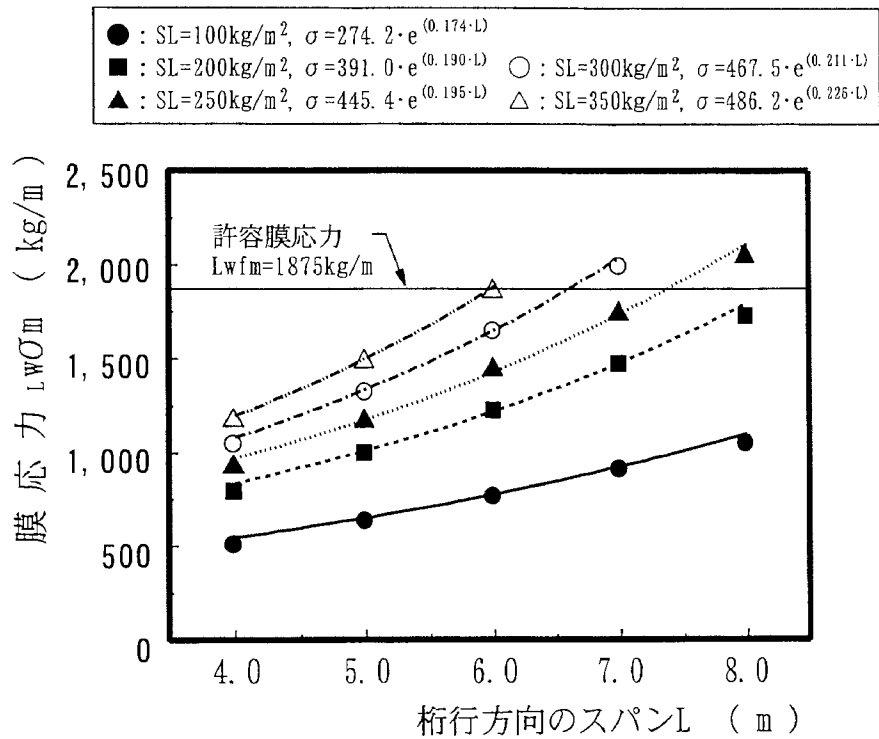


図 4 - 11 初期サグ  $f = 2.0\text{m}$ における桁行方向のスパンと縦糸方向の膜応力との関係

## 4.5 まとめ

---

本章では、膜構造建築物の屋根形状と屋根上積雪荷重との関わり合いについて検討した。その結果、膜材料の張り方（構法）を含めた屋根形状の差異が滑雪現象に大きな影響を与えることを明らかにした。V字張り屋根形状は、連続する屋根雪を分割して滑雪抵抗であるせん断抵抗力を低減できるため、平張り屋根形状よりも滑雪しやすく、滑雪処理に有効である。V字張り屋根形状の滑雪特性をまとめると以下のようなになる。

(1)自然滑雪処理の場合には、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上あれば膜材料裏面温度および外気温がマイナスの範囲でも滑雪現象が発生することを明らかにした。融滑雪処理の場合には、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上あれば融滑雪が有効に作用して1日以内で全ての雪が融滑雪し、屋根勾配 $10^{\circ}$ においても融滑雪に要する時間が長くなるものの、融滑雪現象が発生することがすることを明らかにした。従って、屋根勾配 $10^{\circ}$ 以上あれば融滑雪処理することが可能と考える。

(2)V字張り屋根形状は、初期サグが大きく、桁行方向のスパンが小さいほど膜応力が許容膜応力に達する屋根上積雪荷重が大きくなるが、桁行方向のスパンを小さくし過ぎると、谷部に堆積させる雪の量に対して制約が大きくなりV字部分を雪が埋めてしまい屋根面に一様に積もった雪をV字峰部で分割する効果が小さくなると考える。また、初期サグを大きくし過ぎると、ケーブル材が太くなることや膜材料の歩留まり、加工費などのコストアップが考えられる。従って、V字張り屋根形状を有する膜構造建築物の設計は、初期サグおよび桁行方向のスパンのバランスの良い設定が重要と言える。

以上のことから、V字張り屋根形状を有した膜構造建築物における屋根雪の滑雪に関わる資料を得ることができた。さらに、屋根上積雪荷重を考慮したV字張り屋根形状の設計支援資料を提示することができた。これらの資料は、膜構造建築物における合理的な屋根上積雪荷重評価を行うための資料になり得ると考える。

## 第4章の参考文献

- 1) 伊東敏幸：積雪地域における勾配屋根の材料設計および維持保全に関する研究，東北大学学位論文，1995.12
- 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) 苫米地司ほか：膜構造物における降雪現象に関する一考察，膜構造研究論文集'94，No.8，pp.103-110，1994.12
- 4) 鳥居 壮ほか：膜構造材料，（財）住宅・建築 省エネルギー機構 I B C E，No.52，pp.37-41，1989.5
- 5) 日本雪氷学会編：雪氷辞典，1990.10
- 6) 苫米地司ほか：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
- 7) （社）日本膜構造協会：膜構造建築物構造設計の手引・計算例集，1989.5
- 8) 石井一夫：膜構造の応力・変形解析概説，膜構造研究論文集'90，No.4，pp.69-105，1990.12
- 9) 石井一夫：膜構造用膜材料概説，膜構造研究論文集'92，No.6，pp.91-119，1992.12
- 10) K. ISHII: Membrane Structure Analysis in Consideration of the Weights of Membrane and Cables, Proc. IASS Int. Colloquium on Space Structures for Sports Building, China, pp.574-581 1987.10
- 11) 石井一夫：膜構造の形状解析（形状決定の問題）概説，膜構造研究論文集'89，No.3，pp.83-107，1989.11
- 12) 鈴木俊男ほか：等張力曲面の数値解析，膜構造研究論文集'89，No.3，pp.1-12，1989.11
- 13) 鈴木俊男ほか：等張力曲面の形状解析法，日本建築学会講演学術梗概集，pp.1163-1164，1989.10
- 14) 谷本勉之助：実用数値解析法，森北出版，1967
- 15) O. C. Zienkiewicz（吉識政夫訳）：基礎工学におけるマトリクス有限要素法，培風館，1975
- 16) O. C. Zienkiewicz（吉識政夫訳）：マトリクス有限要素法，培風館，1975
- 17) 南 宏和：膜構造に使用されるコーティング平織物の二軸変形特性，日本建築学会講演学術梗概集，pp.303-304，1984.10
- 18) 西川 薫ほか：織布特性を考慮した膜構造の応力・変形解析法，膜構造研究論文集'89，No.3，pp.41-55，1989.11
- 19) 南 宏和：PTFEコーテッド・ガラス繊維布（膜材料A種）の非線形伸長曲線への多段階線形近似とその応用，日本建築学会構造系論文報告集，第436号，pp.13-19，1992.6
- 20) 日野吉彦ほか：膜構造解析における材料非線形性の評価，膜構造研究論文集'94，No.8，pp.35-49，1994.12
- 21) 建設省住宅局建築指導課：膜構造建築物技術基準・同解説，（社）日本膜構造協会，1991.3

## 第5章 膜構造建築物における制御積雪荷重

5.1	はじめに	5-1
5.2	膜構造建築物における制御積雪荷重の基本的な考え方	5-2
5.3	膜構造建築物における自然降雪による制御積雪荷重の検証 —札幌コミュニティドームの降雪状況に関する連続観測—	5-10
5.3.1	観測方法	5-10
5.3.2	観測結果	5-13
5.3.3	観測結果のまとめ	5-22
5.4	膜構造建築物の融降雪実験	5-23
5.4.1	実験方法	5-23
5.4.2	実験結果	5-25
5.4.3	実験結果のまとめ	5-28
5.5	膜構造建築物における融降雪の制御方法に関する提案	5-29
5.5.1	実験方法	5-29
5.5.2	実験結果	5-31
5.5.3	融降雪における供給エネルギー量の推定方法	5-35
5.5.4	融降雪における供給エネルギー量の推定値の適用性	5-37
5.5.5	まとめ	5-40
5.6	まとめ	5-41
	参考文献	5-44

## 第5章 膜構造建築物における制御積雪荷重

### 5.1 はじめに

1993年に改訂された日本建築学会建築物荷重指針では、屋根上積雪荷重を制御する考え方が取り入れられ、この制御する場合の荷重を制御積雪荷重としている<sup>1)</sup>。この制御積雪荷重を採用する場合には、制御方法に関する明確な考え方や信頼性が必要となる。これらの考え方を膜構造建築物に取り入れる場合には、膜構造建築物固有の特性を有効に活用した制御方法を取り入れ、その信頼性を明らかにすることが必要となる。前章までの結果を基に、膜構造建築物固有の特性を整理すると、以下のようなになる。

#### 膜構造建築物に用いられる膜材料の材料特性

- (1) 膜材料は、撥水性が大きく、一般に用いられる屋根葺材よりも滑雪性に優れている。
- (2) 膜材料は、素材そのものが内外の仕上げ材料となり、熱伝導率も大きく屋根雪の融雪に適している。

#### 膜構造建築物の構造特性

- (1) 膜構造建築物の屋根形状はV字張り屋根形状が多く、特に、多雪地域では屋根面に連続する屋根雪をV字峰部で分割できるため、雪のせん断抵抗力の低減に有効である。
- (2) 多雪地域に建設される膜構造建築物は骨組膜構造が多く、大きな屋根勾配を有している場合が多い。

これらの膜構造建築物固有の特性をみると、屋根雪の滑雪現象が誘発しやすい条件を整えていると言える。このようなことから、屋根上積雪荷重の制御方法として滑雪現象を有効に活用することが合理的と考える。本章では、これらの結果を基に以下の1)～3)の検討を行い、膜構造建築物における滑雪現象を有効に活用した制御積雪荷重の評価方法を提案した。

- 1) 膜構造建築物における制御積雪荷重に関する基本的な考え方を提案する。
- 2) 自然滑雪による制御積雪荷重については、実在している膜構造建築物を対象とした自然滑雪現象に関する連続的な観測結果と気象条件との関わりを明らかにし、制御方法を提案し、その妥当性を検証する。
- 3) 融滑雪による制御積雪荷重については、屋根勾配、温度条件および雪質を考慮したエネルギー量の供給方法について室内および屋外モデル実験を行い、制御方法を提案する。

## 5.2 膜構造建築物における制御積雪荷重に関する基本的な考え方

前章までの結果から明らかなように、多雪地域に建設されている膜構造建築物は、骨組膜構造が主流で、屋根勾配が大きく屋根雪が滑雪しやすい形状を有している。膜構造建築物の屋根雪処理は、空気膜構造の融雪処理が中心に進められてきた<sup>21)~29)</sup>。

膜構造建築物における融雪処理による屋根上積雪状況をみると、勾配の大きい部位では、降雪直後に滑雪現象が発生したり、融雪されながら滑雪する状況が観察される。このようなことから、第2章では、実在している膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する実態調査を行い、その結果から屋根雪の滑雪現象が発生する条件を明らかにした。これらを踏まえて、第3章、第4章では、膜材料の滑雪性状や膜材料の張り方（構法）を含めた屋根形状を考慮した屋根雪の滑雪に関わる実験を行い、滑雪現象に影響を及ぼす要因を明らかにした。これらの要因は、屋根勾配、温度条件、屋根雪と膜材料との界面状況（雪質）、積雪重量、膜材料の張り方を含めた屋根形状、エネルギー量である。

図5-1に、膜構造建築物における制御積雪荷重に関する流れを示す。膜構造建築物は、積極的な滑雪による屋根雪処理を行っている。その結果、屋根雪処理が有効に作用して、長期間屋根面に雪が残っていない状況にある。このようなことから、前述の滑雪現象に影響を与える要因を指標に用いることで滑雪処理による合理的な制御積雪荷重評価が可能と考える。

膜構造建築物における制御積雪荷重に関する概念図を示すと、図5-2となる。本概念図は、時間の経過と屋根上積雪深との関係を示している。図中点線は、累積積雪深を示し、実線は、屋根雪処理を行っている膜構造建築物の屋根上積雪深の推移状況を示している。図に示すように、現状の屋根上積雪荷重評価は、図中点線のように設計用屋根上積雪深として年最大積雪深を用いなければならない。しかし、膜構造建築物は、積極的に自然滑雪および融滑雪処理を行っているため滑雪現象が発生する。従って、膜構造建築物は、図中実線のように屋根面に雪が積もり始めてから滑雪現象が発生するまでに要する期間（以下、この期間を「荷重の継続期間」という。）の最大積雪深を設計用屋根上積雪深として採用することが可能と考える。従って、「荷重の継続期間」における最大積雪深を用いることで、合理的な屋根上積雪荷重評価が可能と考える。この荷重の継続期間は、滑雪現象の発生状況で期間が種々に変わるため、常に安定した期間を確保できる指標を得ることが重要となる。膜構造建築物における屋根雪の自然滑雪現象は、第2章および第4章の研究結果で屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上で自然滑雪現象が発生することを明らかにしている。この滑雪現象が発生した時の温度条件をみると、長野県・野沢温泉村の「野沢温泉村総合アリ

ーナ」では外気温 $-2.0\sim+1.0^{\circ}\text{C}$ の範囲、石川県・小松市での屋外観測実験では外気温 $-1.0\sim+0.3^{\circ}\text{C}$ の範囲で降雪が発生している。

従って、「屋根勾配」や「外気温」を指標に用いて荷重の継続期間を評価することが可能と考える。これらを踏まえて、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の膜構造建築物における制御積雪荷重を考えると、自然降雪による制御では、日最高気温の連続日数を基に屋根上積雪荷重を設定することが可能と考える。

この考え方にに基づき、第2章で調査した「音更総合体育館」，「鳥取ドーム」，「青森市屋内グラウンドサンドーム」，「あきたスカイドーム」，「野沢温泉村総合アリーナ」の5件の膜構造建築物を対象に屋根上積雪荷重評価を行うと、以下のようになる。ここで、指標に用いる外気温の設定を考えると、苫米地らの北海道・札幌市での自然降雪処理を対象とした屋外モデル実験では、外気温が $-5.0^{\circ}\text{C}$ 以上であれば自然降雪現象が発生すると報告されている<sup>10)</sup>。また、外気温がマイナスの範囲で発生する屋根雪の凍着抵抗に関する研究では、凍着強度は $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以上になると急速に減少すると報告されている<sup>11)</sup>。本研究では、自然降雪の場合、前述に示した外気温が得られている。これらのことから、日最高気温の連続日数に用いる外気温の設定値を $-2.0^{\circ}\text{C}$ とした。なお、石川県・小松市の場合には、降雪時の外気温が $0^{\circ}\text{C}$ 近傍で推移することから、自然降雪時の外気温の下限値が $-1.0^{\circ}\text{C}$ であったと考える。

前述の5件の膜構造建築物における日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数を求めると、図5-3～図5-7となる。この連続日数は、日本建築学会荷重指針に基づいて100年再現期待値とした。気象資料は、いずれも各気象官署における1962～1994年までの日最高気温とした。従って、音更町総合体育館は帯広市、あきたスカイドームは秋田市、野沢温泉村総合アリーナは長野市と建設所在地に最も近い管区気象台の気象資料を用いた。図5-3～図5-7に示す連続日数の結果を整理すると、以下のようになる。

#### 1) 北海道・帯広市（音更総合体育館）

日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数：24日

積雪深の増分量の極値（1976年12月23日～1997年1月8日）：45cm

#### 2) 北海道・釧路市（鳥取ドーム）

日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数：25日

積雪深の増分量の極値（1977年2月6日～2月17日）：34cm



### 3) 青森県・青森市（青森屋内グラウンドサンドーム）

日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数：10日

積雪深の増分量の極値（1986年1月21日～1月29日）：50cm

### 4) 秋田県・秋田市（あきたスカイドーム）

日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数：7日

積雪深の増分量の極値（1991年2月23日～2月24日）：35cm

### 5) 長野県・長野市（野沢温泉村総合アリーナ）

日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数：5日

積雪深の増分量の極値（1968年2月14日～2月15日）：31cm

このように、外気温の推移状況から「荷重の継続期間」を求め、この期間に対応した積雪深の増分量を検討することで自然降雪現象を考慮した各地域ごとの適切な屋根上積雪荷重評価が可能と考える。「現行の設計用屋根上積雪荷重」と「荷重の継続期間を採用した設計用屋根上積雪荷重」との比較で表5-1をみると、各膜構造建築物の「現行の設計用屋根上積雪荷重」に対する「荷重の継続期間を採用した設計用屋根上積雪荷重」は、音更町総合体育館で64.3%、鳥取ドームで56.7%、青森屋内グラウンドサンドームで41.7%、あきたスカイドームで33.3%、野沢温泉村総合アリーナで10.3%の荷重となる。このように、いずれの膜構造建築物をみても現行の設計用屋根上積雪荷重に比べて大幅に低減される。従って、膜構造建築物は、屋根面に雪を堆積し続けることがないことから、「荷重の継続期間」を採用することで現行よりも大幅に屋根上積雪荷重を制御することが可能と言える。

また、表5-1に示す現行の設計用屋根上積雪荷重は、多雪地域を対象としているため「長期」として荷重評価している。しかし、本節で提案した「荷重の継続期間」を採用すると、荷重評価は、「短期」と捉えることが可能と考える。この荷重評価の差異は、膜材料や膜材料を支持する架構材の安全率の評価に影響し、構造設計に大きな影響が生じると考える。

融降雪による制御は、大雪に対しても常に安定した熱エネルギーの供給が絶対条件となる。山形らの北海道を対象とした雪害による一般国道、電力および鉄道などのライフラインの復旧に関する研究によると、概ね3日以内で復旧している<sup>12)</sup>。融降雪処理は、第2章および第4章で明らかにしたように外気温がマイナスの状態でも屋根勾配 $10^{\circ}$ 以上あれば融雪装置が有効に作用して概ね3日以内で屋根面の雪が全てなくなる状態である。このような融降雪による制御は、自然降雪現象が発生しにくい屋根勾配や外気温において有効に働くと考える。従って、融雪装置の信頼

性に関わる作動性能と管理運用計画を十分に検討することで制御積雪荷重を用いることが十分に可能と考える。

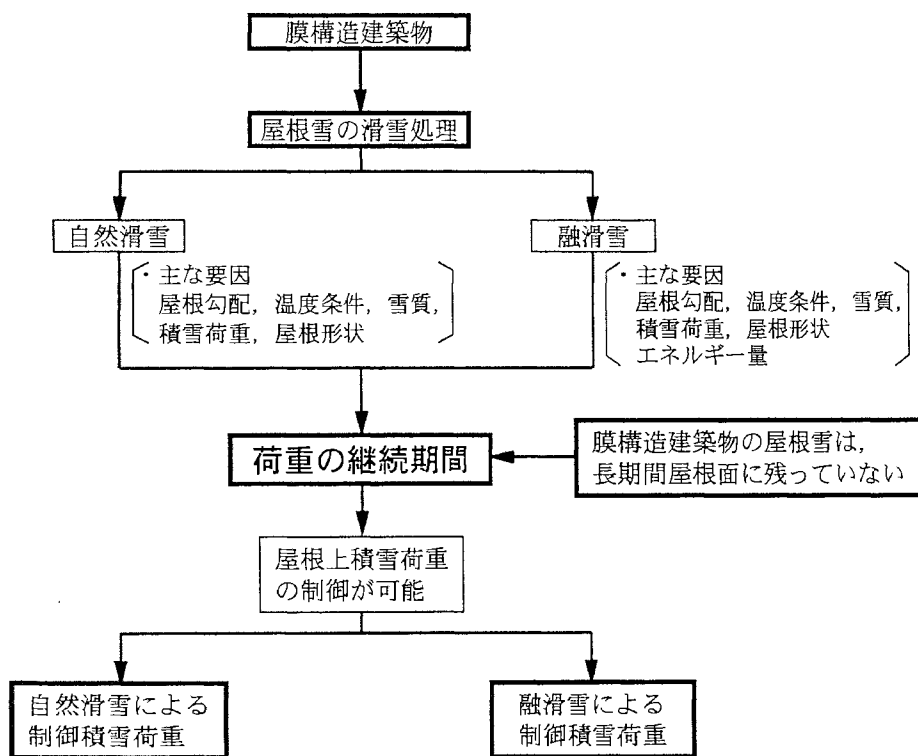


図 5 - 1 積雪制御荷重に関する流れ

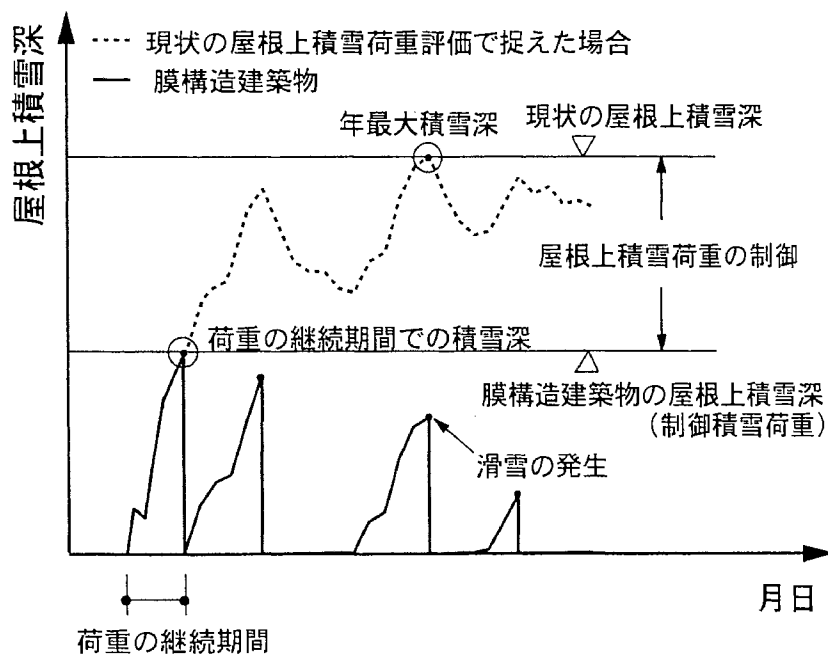


図 5 - 2 制御積雪荷重に関する概念図

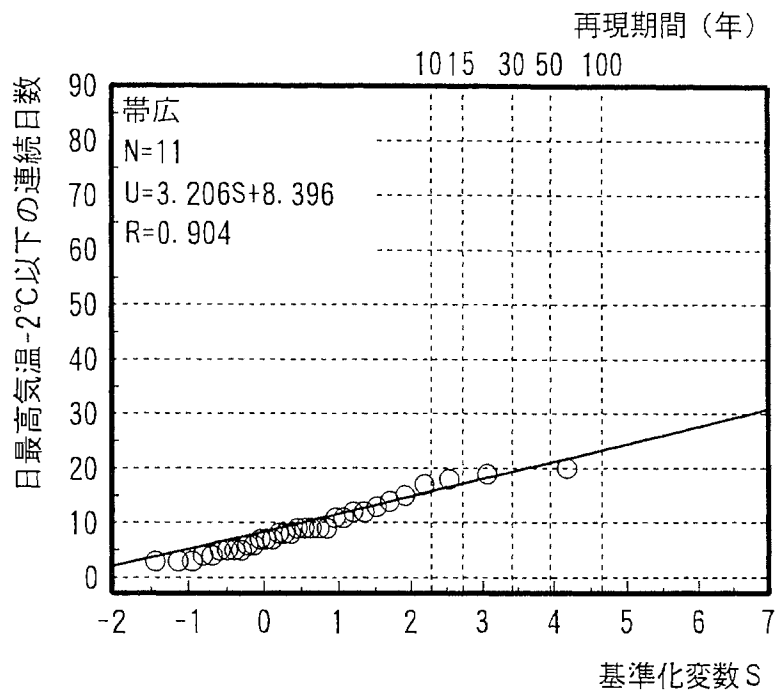


図 5 - 3 帯広市における日最高気温-2.0°C以下の連続日数

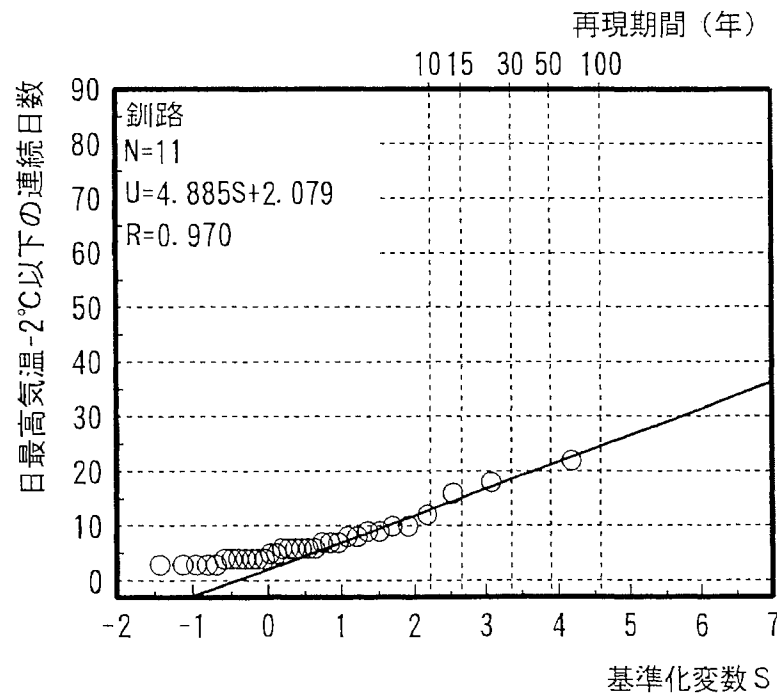


図 5 - 4 釧路市における日最高気温-2.0°C以下の連続日数

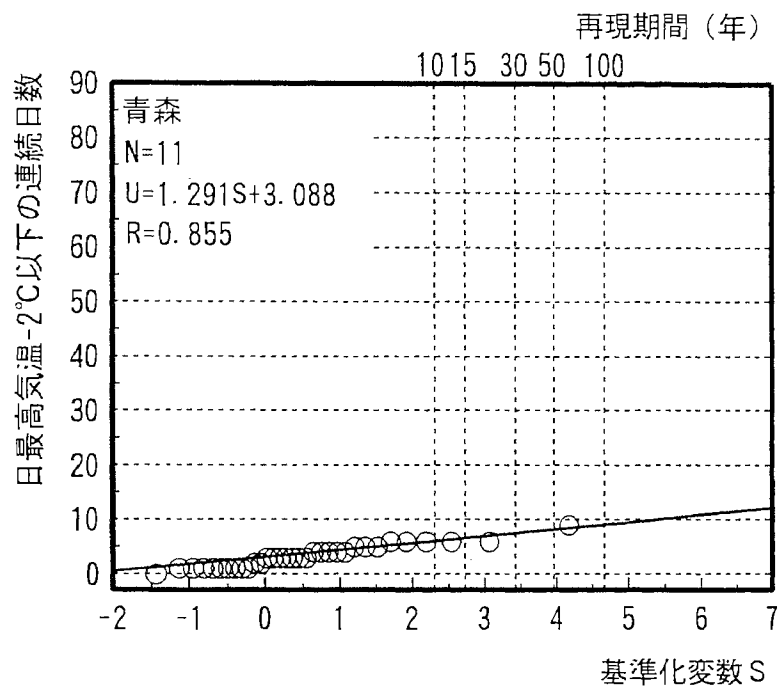


図 5 - 5 青森市における日最高気温-2.0℃以下の連続日数

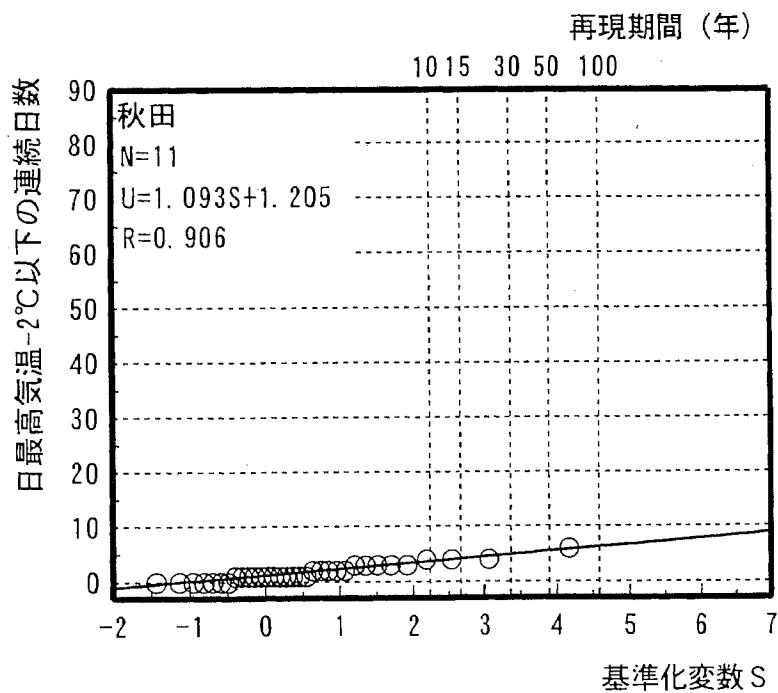


図 5 - 6 秋田市における日最高気温-2.0℃以下の連続日数

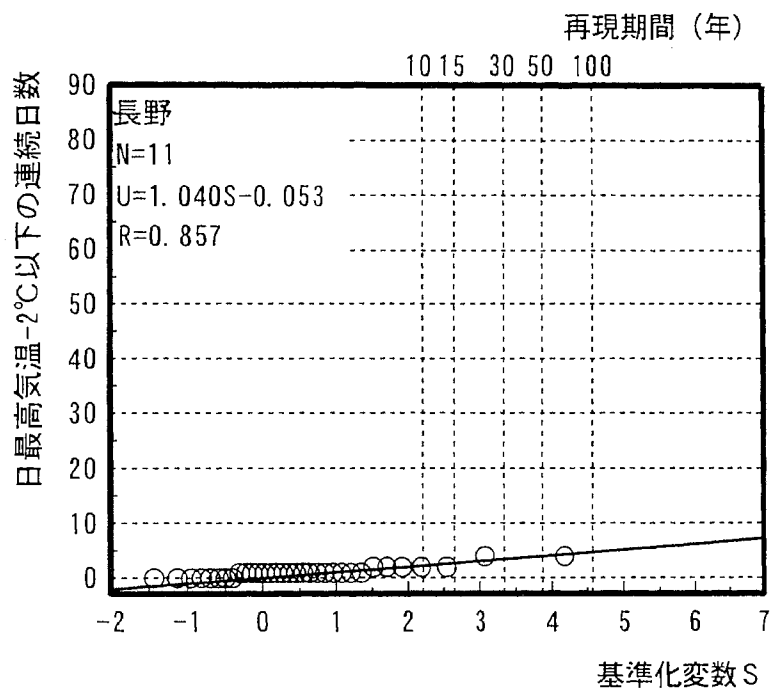


図 5 - 7 長野市における日最高気温 -2.0°C 以下の連続日数

表5-1 「現行の設計用屋根上積雪荷重」と「荷重の継続期間を採用した設計用屋根上積雪荷重」との比較

	現行の設計用屋根上積雪荷重 S. L (kg/m <sup>2</sup> )	荷重の継続期間を採用した設計用屋根上積雪荷重 S. L' (kg/m <sup>2</sup> )	S. L' / S. L × 100 (%)
音更町総合体育館 サンドームおとふけ (北海道・音更町)	$S D \times \rho \times \alpha$ = $100 \times 3 \times 0.7 \times 3 = 210$	$S D' \times \rho$ = $45 \times 3 = 135$	64.3
鳥取ドーム (北海道・釧路市)	$S D \times \rho$ = $60 \times 2 = 120$	$S D' \times \rho$ = $34 \times 2 = 68$	56.7
青森屋外グラウンド サンドーム (青森県・青森市)	$S D \times \rho \times \alpha$ = $150 \times 3 \times 0.8 \times 3 = 360$	$S D' \times \rho$ = $50 \times 3 = 150$	41.7
あきたスカイドーム (秋田県・雄和町)	$S D \times \rho \times \alpha$ = $150 \times 3 \times 0.7 \times 3 = 315$	$S D' \times \rho$ = $35 \times 3 = 105$	33.3
野沢温泉村総合 アリーナ (長野県・野沢温泉村)	$S D \times \rho$ = $300 \times 3 = 900$	$S D' \times \rho$ = $31 \times 3 = 93$	10.3

S D : 積雪深 (cm)  
 ρ : 雪の単位重量 (kg/m<sup>3</sup>)  
 α : 特定行政庁が多雪地域において長期と扱う場合に定めた乗ずべき数値。  
 S D' : 日最高気温 -2.0℃以下の連続日数の100年再現期待値を基に求めた積雪深の増分量の極値。  
 注記) 1. 現行の設計用屋根上積雪荷重については、各建設所在地の建築指導課へのヒアリング調査による (1995, 1996年)。  
 2. 荷重の継続期間を採用した設計用屋根上積雪荷重については、短期として捉えることが可能なことから、特定行政庁が多雪地域において長期と扱う場合に定めた乗ずべき数値を採用していない。

### 5.3 膜構造建築物における自然滑雪による制御積雪荷重の検証 －札幌コミュニティドームの滑雪状況に関する連続観測－

前節では、「荷重の継続期間」という新しい考え方を取り入れ、膜構造建築物における合理的な制御積雪荷重の評価について提案した。この提案は、膜構造建築物における屋根雪の滑雪条件から自然滑雪現象が発生する屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の領域およびその滑雪現象が発生する時の外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ を指標に、日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数の100年再現期待値を基に屋根上積雪荷重を評価した。

これまでの膜構造建築物を対象とした屋根上積雪荷重および屋根雪処理に関する研究は、モデル実験が主流で実在している膜構造建築物対象とした滑雪現象を連続的に観測した事例はない。このようなことから、前節の荷重の継続期間を捉える指標に用いた屋根勾配、外気温の有効性を明らかにし、その指標を用いた制御積雪荷重の評価の妥当性を検証するため、北海道・札幌市に建設された札幌コミュニティドームを対象とした滑雪現象に関する連続観測を行った。

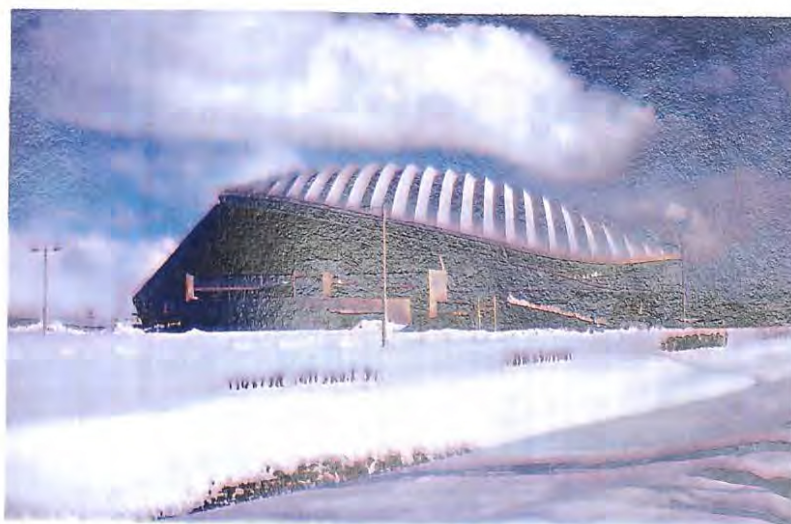
#### 5.3.1 観測方法

写真5-1に、札幌コミュニティドームの概要を示す。写真に示すように、本ドームは、滑雪性を考慮しV字張り屋根形状を有している。V字張り屋根形状にする場合、ケーブル材で膜材料表面を押え込むのが一般的である。多雪地域では、膜材料表面にケーブル材が露出していると、ケーブル材に屋根雪が付着して滑雪現象の妨げになる状況がみられる。このようなことから本ドームは、図5-8に示すように滑雪の妨げとなるものがないように膜材料の室内側谷部にケーブル材を設置し、ケーブル材に取り付けたテンションロッドで膜材料（外膜）を内側に引き込んでいる。V字の深さは、最も深い部分で1.5mである。また、本ドームの屋根構造は、二重膜構造で外膜と内膜との間に温風（温風の吹き出し温度は、 $60^{\circ}\text{C}$ 程度である。）を送風して屋根雪を融滑雪および融雪処理することができる。

滑雪状況の連続観測は、図5-9に示すように本ドームから約50m離れた集合住宅の8階からタイムラプスビデオを用いて2秒1コマで観測した。観測した屋根面は、図に示すように冬期間の主風向の風下側に位置する部位である。観測期間中の気象条件は、本ドームに隣接する丘珠空港の気象観測資料を用いた。分析に用いた気象要素は、日降雪深、積雪深および外気温である。これらの値は、以下に示す計測時間に計測した値である。

計測項目	計測時間（0～24時）
日降雪深（cm）	9時
時刻ごとの降雪深（cm）	6時，9時，15時，21時の合計4回
積雪深（cm）	9時
外気温（℃）	1時間ごと

観測期間は、1996年12月16日～1997年3月21日とした。この観測期間中の1997年2月14日～27日の間、図中に示す8点の膜材裏面温度を10分ごとに熱電対を用いて測定した。観測期間中は、温風が送風されていない状況であった。本ドームの観測領域である11膜パネル（膜パネルとは、V字張り屋根形状ごとを示す。）の谷部は、水上側では棟部から屋根勾配 $10^\circ$ を確保した直線、水下側では軒先の先端から屋根勾配 $25^\circ$ を確保した直線、中間部では緩やかな曲線となっている。なお、中間部の屋根勾配は、設計図面を基に水上側および水下側の両直線と中間部の曲線との接点を直線的に結んで求めると勾配 $20^\circ$ となる。



【建設場所】 北海道札幌市東区  
【敷地面積】  $135,889\text{m}^2$   
【建築面積】  $17,865\text{m}^2$   
【延床面積】  $18,882\text{m}^2$   
【膜伏面積】  $11,706\text{m}^2$   
【最高高さ】 GL+43m  
【軒高】 GL+33m（最高）, GL+16m（最低）  
【階数】 地上2階

【構造】  
1) 屋根構造：骨組膜構造（二重膜構造）  
2) 下部構造：鉄骨鉄筋コンクリート造  
【設計用屋根上積雪荷重S.L.】  $S.L. = SD \times \rho \times \alpha$   
1) 設計用屋根上積雪深：SD=100cm  
2) 雪の単位重量： $\rho = 3\text{kg/m}^2/\text{cm}$   
3) 長期として扱う場合に定めた低減係数： $\alpha = 0.7$   
注）設計用屋根上積雪荷重の数値は、建築指導課へのヒアリング調査による（1995年調査）

写真5-1 札幌コミュニティドームの概要



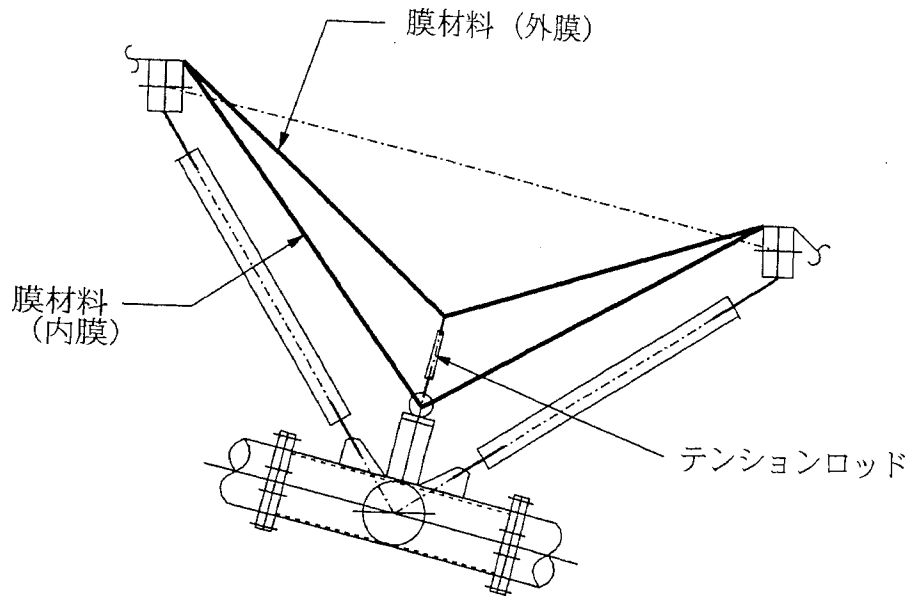
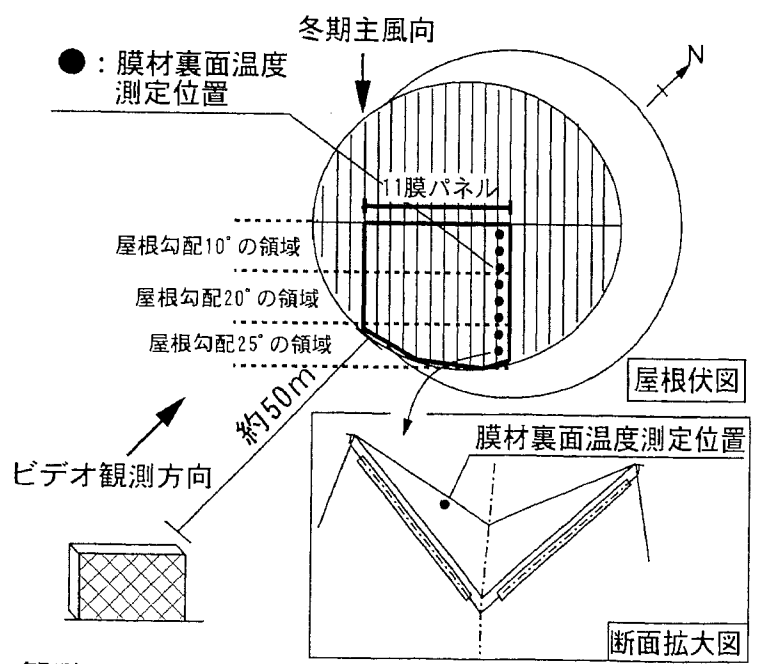


図 5 - 8 V字張り屋根形状における谷部の納まりについての概要



観測は11膜パネル内について行った。

図 5 - 8 観測概要

### 5.3.2 観測結果

図5-10に、観測期間中における気象の推移状況を示す。積雪深をみると、観測開始から2月1日までは降雪量が少なく大きな変化はみられない。その後、積雪深は、日降雪深の累積に伴い徐々に増加する傾向を示し、19日の日降雪深38cmを契機として22日に観測期間中で最大の積雪深85cmとなった。外気温をみると、日最高および日最低気温の変動は、いずれの月も15℃以上の大きな温度差の日がみられるものの日平均気温は概ね-5.0～0℃程度の範囲で推移している。

屋根雪の自然滑雪状況をみると、本ドームは、V字張り屋根形状のため、各膜パネルごとに屋根雪が分割され滑雪が発生している。各膜パネルごとの滑雪状況を整理すると、屋根勾配20°の領域で88回（降雪中の滑雪18回）、屋根勾配25°の領域で122回（降雪中の滑雪21回）の合計210回観測された。なお、本観測での滑雪回数のカウントは、各膜パネルにおいて屋根勾配ごとの領域で屋根雪が滑雪した回数を1カウントとして整理した。屋根勾配20°および屋根勾配25°の領域で滑雪が同時に発生した場合には、屋根勾配20°の領域での滑雪現象としてカウントした。また、屋根勾配20°や屋根勾配25°の領域で滑雪が部分的に発生した場合には、滑雪現象としてカウントに加えていない。

写真5-2に、滑雪現象が発生した状況の一例を示す。写真は、12月の観測期間中で最も日降雪深が多かった12月19日7時36分の滑雪状況である。写真には、12月19日6時40分の屋根上積雪状況（外気温-5.9℃）および12月21日15時00分の屋根上積雪状況（外気温-3.1℃）を加えている。19日の日降雪深は17cm、日最高気温は-3.3℃、日平均気温は-5.5℃であった。写真に示すように屋根雪は、屋根勾配20°以上の領域で自然滑雪現象がみられ、屋根頂部付近に若干の雪が残る状況であった。この残雪部位においても、時間の経過に伴い低速度の屋根雪移動がみられ、21日の屋根上積雪状況のように2～3日程度で屋根面から雪が全てなくなる状況が観察された。この状況は、他の観測日においても同様であった。

観測された210回の滑雪現象を対象に、これらの発生現象を時刻ごと（例えば、時刻7時は7：00～7：59を示す）に整理すると図5-11となる。図中には、屋根勾配20°の領域で滑雪が最も多く発生した2月16日、屋根勾配25°の領域で滑雪が最も多く発生した2月19日の外気温の推移状況を示している。16日の滑雪状況は、時刻9時に3回、時刻10時に4回、時刻11時に4回の合計11回、19日の滑雪状況は、時刻8時に3回、時刻9時に8回の合計11回発生している。図に示すように、滑雪現象の発生頻度は屋根勾配により異なっている。屋根勾配20°の領域では10～14時（全体の62.8%滑雪）、屋根勾配25°の領域では9～11時（全体の53%滑雪）に集中し、屋根勾配の大きい領域の方が早い時刻に滑雪現象が発生している。これらの

滑雪現象が発生した時刻の外気温をみると、屋根勾配 $20^{\circ}$ の領域における10～14時の場合には外気温 $-2.5\sim+3.0^{\circ}\text{C}$ を示し、屋根勾配 $25^{\circ}$ の領域における9～11時の場合には外気温 $-3.5\sim+3.0^{\circ}\text{C}$ を示す。このように滑雪時の外気温は、図中の16日および19日の外気温の推移状況にみられるように、外気温がマイナスの状態でも滑雪現象が発生している。水野らの研究によると、乾き雪の場合、膜材料のコーティング材に用いられている四ふつ化工チレン樹脂には付着することがないと報告されている<sup>13)</sup>。このことから、膜構造建築物は、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の場合、外気温がマイナスの範囲でも自然滑雪現象が発生すると言える。

図5-12に、屋根勾配 $20^{\circ}$ および屋根勾配 $25^{\circ}$ の領域における滑雪時の外気温と屋根上積雪深との関係を示す。なお、外気温は、1時間ごとの観測のため、滑雪現象が発生した時刻に最も近い時刻とした。ドームの屋根上積雪深は、直接計測することが困難なことから、ビデオ観察を基に得られた滑雪に要する時間内の降雪深を前述の気象観測資料から求め、この降雪深を屋根上積雪深と仮定した。図に示すように各屋根勾配ごとの滑雪状況は、屋根上積雪深および外気温とともに大きなバラツキを持っている。滑雪時の屋根上積雪深をみると、外気温がマイナスの場合には、最大で25cmの屋根上積雪深がみられるものの、外気温がプラスの場合には最大で13cmとマイナスの場合に比べて1/2程度の屋根上積雪深で滑雪している。マイナスの範囲での滑雪現象をみると、屋根勾配ごとに滑雪時の外気温が異なり、図中に示す点線が各屋根勾配ごとにおける滑雪時の外気温の境界値として捉えることができる。各屋根勾配ごとにおける滑雪時の外気温の範囲は、屋根勾配 $20^{\circ}$ の領域の場合には $-2.5\sim+4.0^{\circ}\text{C}$ を示し、屋根勾配 $25^{\circ}$ の領域の場合には $-5.9\sim+3.3^{\circ}\text{C}$ を示す。本観測で得られた $0^{\circ}\text{C}$ 以下における滑雪現象の発生頻度をみると、210回中170回発生しており、全体の81.0%となる。従って、自然滑雪現象は、外気温の影響を大きく受け、外気温がマイナスの範囲でも顕著に発生すると言える。

図5-13に、自然滑雪現象が発生した時の外気温と膜材料裏面温度との関係を示す。なお、図中には、第4章の石川県・小松市で行った屋外実験結果も併せて示してある。図に示すように、滑雪時の外気温は $-2.5\sim+1.1^{\circ}\text{C}$ の範囲を示し、膜材料裏面温度は $-2.3\sim+0.3^{\circ}\text{C}$ の範囲を示す。このように膜材料裏面温度は、外気温と同一温度でないものの、ほぼ外気温に追従した温度状況となっている。従って、外気温と膜材料裏面温度に大きな差異がみられないことから、外気温は、自然滑雪現象の発生を捉える指標になると言える。

これらの観測結果をみると、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の領域では、自然滑雪現象が発生し、この発生現象は外気温による影響を受けている。これまでの研究で滑雪現象の発生に大きな影響を及ぼす凍着抵抗力は、 $-2.0\sim 0^{\circ}\text{C}$ の範囲で急激に減少する結果

が得られている<sup>11)</sup>。従って、 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以上になると、屋根雪は、滑雪しやすい状況にあると考える。これらのことから判断すると、膜構造建築物における自然滑雪による合理的な屋根上積雪荷重の制御を行うためには、自然滑雪現象の発生条件として屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上で外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以上必要と考える。

図5-14に、屋根勾配 $20^{\circ}$ の場合における屋根上積雪深、地上積雪深の経時変化および外気温の推移状況を示す。データの分析期間は2月12日21時～2月20日9時である。なお、屋根上積雪深は、図5-12と同様に滑雪に要する時間内の降雪深を気象観測資料から求めた。図中の屋根上積雪深および地上積雪深の最大値は、分析期間中の最大値である。図に示すように、屋根上積雪は、連続して何日も積もり続けることなく、ほぼ1日で滑雪現象が発生している。分析期間中で屋根上積雪深が最大値を示した2月19日の状況についてみると、屋根上積雪深が2月18日12時から徐々に増加し、2月19日9時には最大値 $36\text{cm}$ となり滑雪現象が発生した。この時の気象条件をみると、外気温は $-3.3^{\circ}\text{C}$ 、地上積雪深は $77\text{cm}$ であった。屋根上積雪深と地上積雪深とを比べると、屋根上積雪深は、地上積雪深の $47\%$ 程度となる。分析期間中の地上積雪深の最大値は、2月20日の $80\text{cm}$ であった。

現在、膜構造建築物の屋根上積雪荷重評価は、積極的に屋根雪処理を行わない建築物と同様に年最大積雪深（地上積雪深）を用いているのが一般的である。しかし、膜構造建築物の場合、積極的に屋根雪処理を行っているため、本章5.1で提案した「荷重の継続期間」を採用して、この期間での積雪深の極値を設計用屋根上積雪深として用いることが可能と考える。分析期間中の最大積雪深（地上積雪深） $SD=80\text{cm}$ と分析期間中で滑雪現象が発生するまで最も多く積もった屋根上積雪深  $SDr=36\text{cm}$ を用いて屋根上積雪荷重  $S.L.$  を求めると、以下のようになる。

#### 1) 分析期間中の最大積雪深を用いた場合

$$S.L. = SD \times \rho \times 0.7 = 80 \times 3 \times 0.7 = 168\text{kg}/\text{m}^2 \text{ (長期)}$$

#### 2) 分析期間中で滑雪現象が発生するまでの最大屋根上積雪深を用いた場合

$$S.L. = SDr \times \rho = 36 \times 3 = 108\text{kg}/\text{m}^2$$

ここに、 $\rho$ ：雪の単位重量 ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{cm}$ )

このように滑雪現象を基に膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価を行うと、膜構造建築物は、現状の屋根上積雪荷重よりも合理的な荷重で設計することが可能となる。従って、膜構造建築物は、「荷重の継続期間」を取り入れることで制御積雪荷重を採用することが可能と言える。

本ドームの観測結果から判断すると、膜構造建築物における荷重の継続期間は、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の領域に対し外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ を指標に用いて捉えることが可能と言える。従って、外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の期間中に積もった雪の極値が設計用屋根上積雪深となる。これらのことを踏まえて、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の膜構造建築物における制御積雪荷重に関する制御方法を考えると、自然滑雪による制御では、日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数を基に屋根上積雪荷重を設定することが可能と言える。

北海道・札幌市における日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数（荷重の継続期間）について、日本建築学会建築物荷重指針に示されている100年再現期待値に基づいて求めると、図5-15となる。なお、この算出に用いた気象資料は、札幌管区気象台における1962～1994年の観測値である。図に示すように、外気温の推移から求めた札幌市の日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数は18日となることから、荷重の継続期間は100年再現期待値で18日となる。この18日間における積雪深の増分量の極値は、54cm（1978年1月25日～2月5日）であった。札幌市の設計用屋根上積雪深が100cmであることから、荷重の継続期間を取り入れることで屋根上積雪荷重を合理的に評価できる。以上のことから、自然滑雪による制御積雪荷重は、日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数の100年再現期待値を基に、各地域に対応した屋根上積雪荷重を設定することが可能と考える。

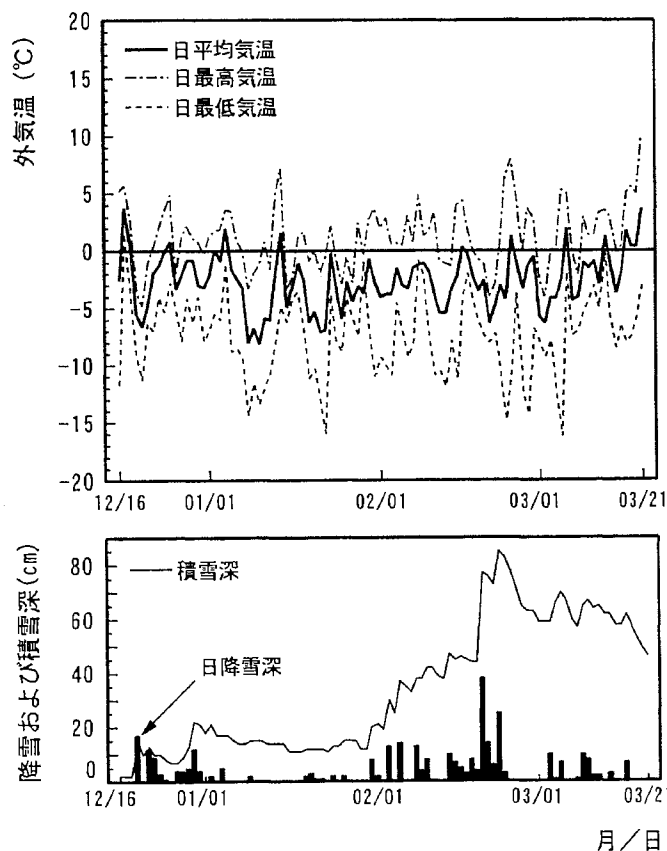


図 5 - 10 観測期間中における気象の推移状況

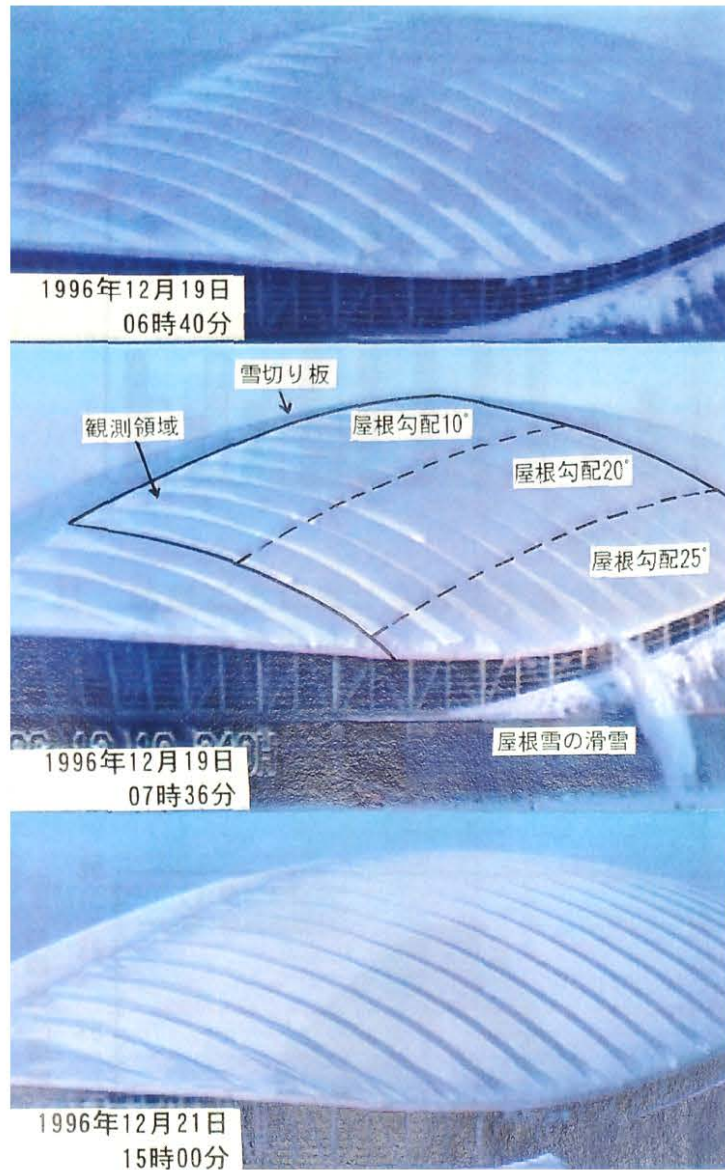


写真 5 - 2 札幌コミュニティドームにおける滑雪状況

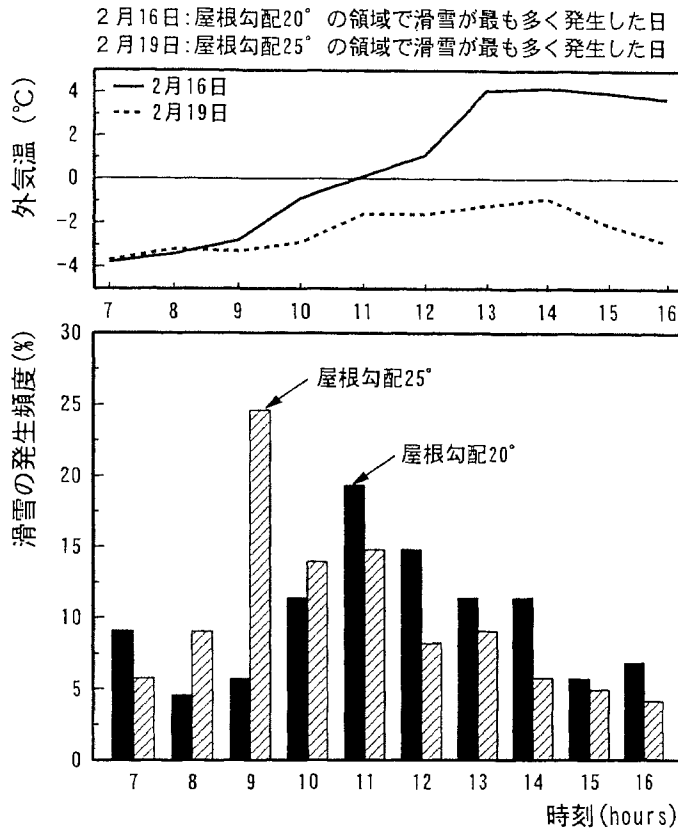


図 5 - 11 時刻ごとにおける降雪現象の発生頻度と外気温推移状況

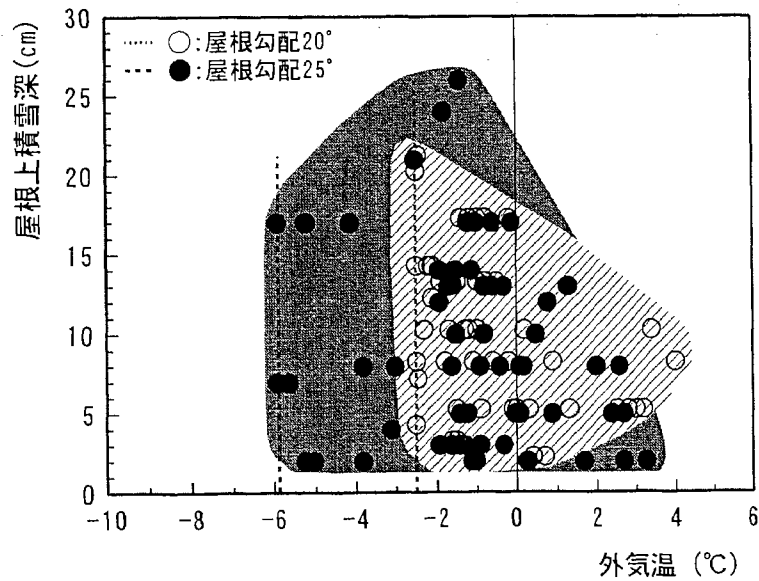


図 5 - 12 降雪時における外気温と屋根上積雪深との関係

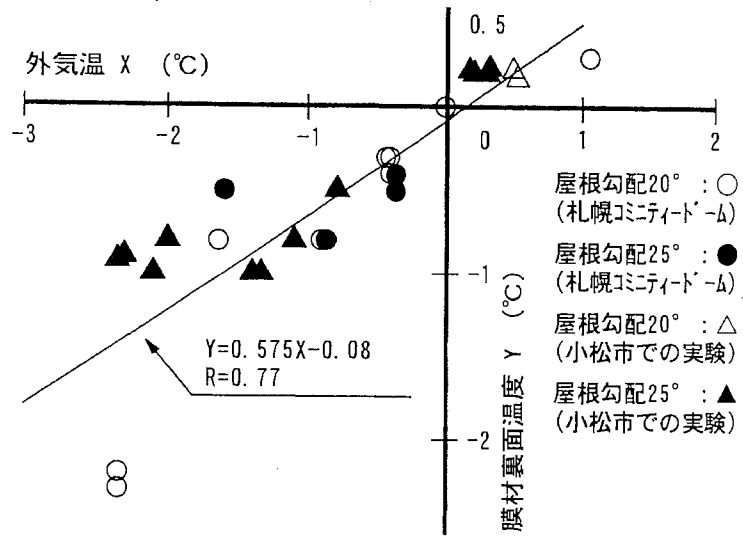


図 5 - 13 滑雪時の外気温と膜材料裏面温度との関係



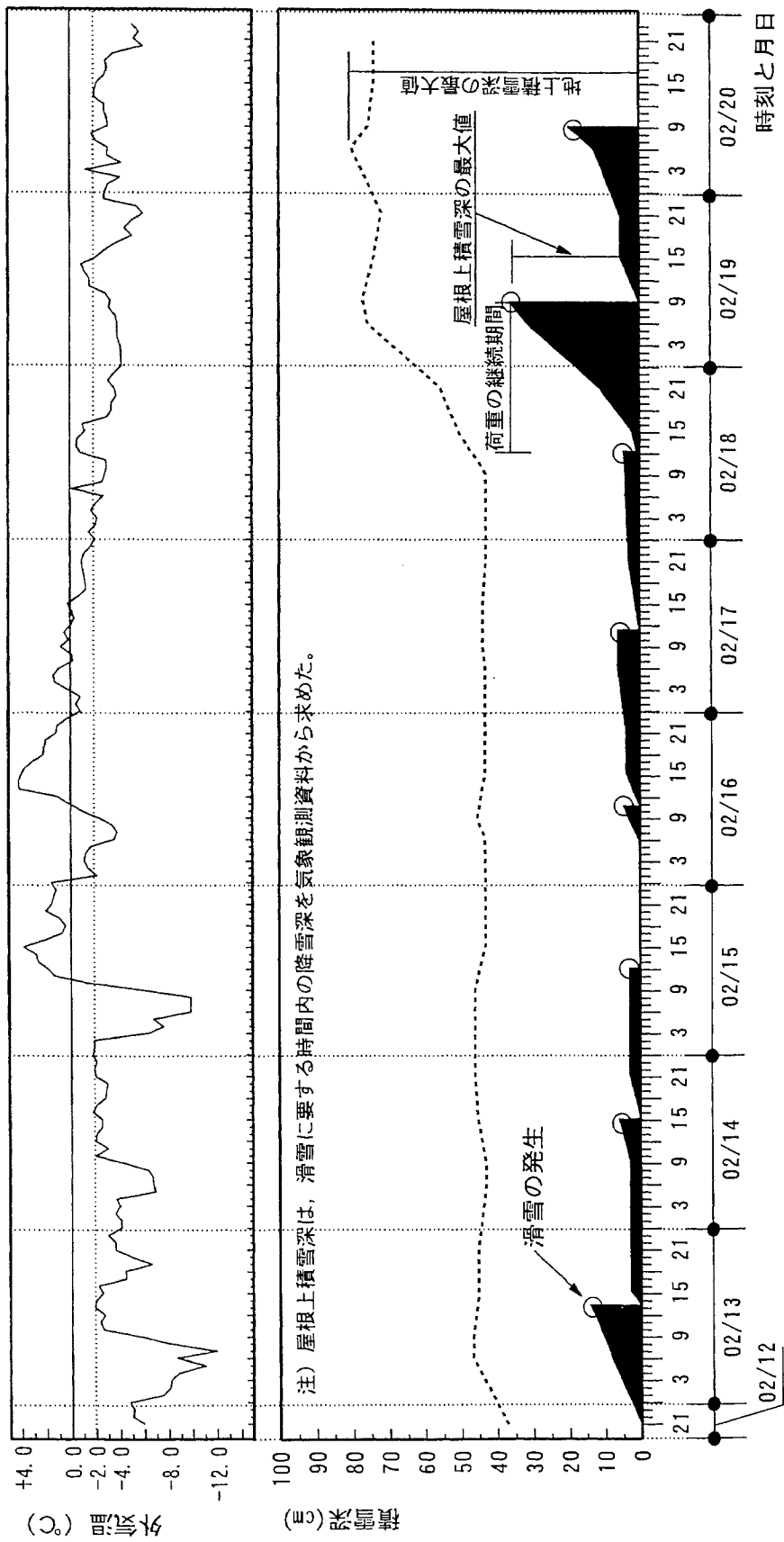


図 5 - 14 屋根勾配 20° の場合における屋根上積雪深，地上積雪深の経時変化および外気温の推移状況

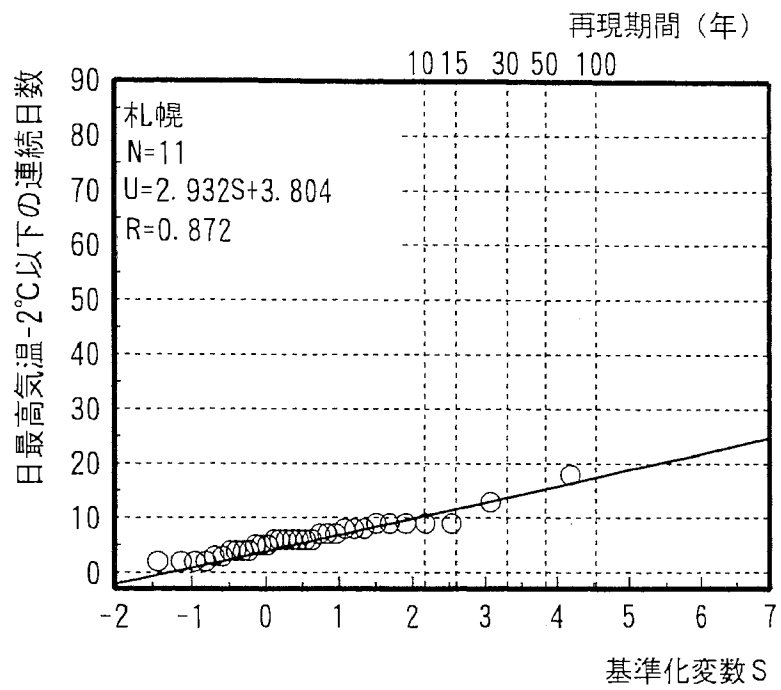


図 5 - 13 札幌市における日最高気温  $-2.0^{\circ}\text{C}$  以下の連続日数

### 5.3.3 観測結果のまとめ

本節では、「荷重の継続期間」を捉えるための指標として用いた屋根勾配、外気温の有効性を明らかにし、荷重の継続期間を取り入れた制御積雪荷重の評価の妥当性を検証するため、北海道・札幌市に建設された札幌コミュニティドームを対象とした降雪現象に関する連続観測を行った。この連続観測を基に得られた結果を整理すると、以下ようになる。

- (1)札幌コミュニティドームは、V字張り屋根形状になっており各V字ごとに屋根雪が分割され自然降雪現象が発生している。従って、V張り屋根形状の降雪処理に対する有効性を確認することができた。
- (2)膜構造建築物における屋根雪の自然降雪現象は、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上では外気温 $-2.5\sim+4.0^{\circ}\text{C}$ 、屋根勾配 $25^{\circ}$ 以上では $-5.9\sim+3.3^{\circ}\text{C}$ で発生し、外気温が $0^{\circ}\text{C}$ 以下での自然降雪現象の発生頻度は81.0%を示す。従って、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の場合、外気温がマイナスの範囲でも自然降雪現象が発生すると言える。
- (3)自然降雪現象が発生した時の膜材料裏面温度は、外気温と同一温度でないものの、ほぼ外気温に追従した温度状況にある。従って、外気温は、自然降雪現象の発生条件を捉える指標になると言える。
- (4)膜構造建築物における自然降雪現象の発生条件は、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上、外気温が $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以上であることを明らかにした。従って、外気温に基づいた自然降雪現象発生検討を行うことで、自然降雪による制御積雪荷重が可能と考える。屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の膜構造建築物における自然降雪による制御積雪荷重は、外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ を指標に用いて日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数の100再現期待値を基に、荷重の継続期間を捉え、各地域ごとに対応した合理的な屋根上積雪荷重を設定することが可能と考える。

これらの観測結果は、多雪地域に建設される膜構造建築物の屋根上積雪荷重評価を行う場合の資料になり得ると考える。

## 5.4 膜構造建築物の融滑雪実験

膜構造建築物における融滑雪処理は、屋根勾配や膜材料の熱抵抗が小さく熱が伝わりやすい特性を利用し、室内側から膜材料に何らかの熱エネルギーを与え、滑雪開始条件の滑雪抵抗力として最も大きい凍着抵抗力を解除して滑雪処理させる方法である。従って、融滑雪処理の場合、自然滑雪が発生しにくい屋根勾配や外気温などの滑雪条件においても滑雪を誘発することが可能となる。

融滑雪処理を採用した膜構造建築物の屋根上積雪状況をみると、融雪装置が有効に作用し、融滑雪および融雪現象が発生して屋根面に雪が残らない状況である。特に、50年ぶりの豪雪が発生した場合においても、その有効性を十分確認することができた。融滑雪によって屋根上積雪荷重の制御を行うためには、第3章で得られた滑雪現象に関する主な要因である屋根勾配、温度条件、雪質、積雪重量に加え、エネルギー量について定量的に捉える必要がある。

膜構造建築物における融雪現象に関する主な研究成果をみると、森野らは、降雪と同時に融雪を開始して屋根雪に雪を積もらせない方法と構造強度の範囲内に雪を積もらせてから融雪する方法とを比較し、融雪して積もらせない方法では過剰なエネルギーが必要となることを指摘している<sup>4)</sup>。西らは、融雪過程において屋根雪と膜材料との界面に空洞が形成され断熱作用を起こし、融雪効率を著しく低下させる現象を指摘している<sup>9)</sup>。また、膜材料は、第3章 3.4の実験結果で明らかにしたように、滑雪面が氷板状の方が雪よりも滑雪しやすい。従って、融滑雪処理する場合、屋根雪と膜材料表面との界面状態が「雪と氷」とでは、エネルギーの供給量に差異が生じるものと考えられる。このようなことから、膜構造建築物における融滑雪による合理的な制御積雪荷重の制御方法を捉えるためには、エネルギーの供給方法に関する十分な検討が必要である。

これらのことを踏まえて、本節では、膜構造建築物における融滑雪による制御積雪荷重の制御方法を捉える資料を得るため、屋根勾配、温度条件、雪質、積雪重量およびエネルギーの供給量を考慮した融滑雪現象に関する屋外モデル実験を行った。

### 5.4.1 実験方法

実験は、北海道・札幌市手稲区北海道工業大学構内において、5つの試験体を用い1990、1991年度の2冬期間、種々の気象条件の中で屋根雪の融滑雪実験を行った。

試験体は、断熱材(50mm)内張りの木製チャンバー(900×1800×450mm)の上に膜材料を張り付けたものである。この木製チャンバーは、ヒーティングによるエネルギーの供給量と積雪重量や外気温などの諸条件との関係を検討するために、チ

チャンバー内部にヒーター（1kW/h）を設置している。なお、チャンバー内部の温度は、サーモスタットで制御して一定に保つことができる。本実験では、+30.0℃に設定した。

実験の手順は、チャンバーを水平な状態に置いて自然降雪により積もらせた。実験を開始する前に、積雪深、積雪密度および積雪断面を観測した。その後、試験体を屋根勾配10°、15°、20°、30°とチェーンブロックで引き上げ固定した。設定後、滑雪するまでチャンバー内部をヒーティングして滑雪状況を観測した。なお、外気温、チャンバー内の温度および膜材料裏面温度を連続的に測定した。チャンバー内および膜材料裏面温度は、写真5-3に示すように2ヶ所で膜材料裏面から10mmの範囲では約2mm間隔、10mmを超えた範囲では10mm間隔で測定した。

また、屋根雪と膜材料との界面の雪質の差異を検討するため、界面に氷板を形成させて融滑雪実験を行った。氷板の形成は、膜材料表面に積もった雪にエネルギーを供給し、膜材料裏面温度が+2.5℃になった時点でエネルギーの供給を停止した。その後、一昼夜放置して屋根雪と膜材料表面との界面に氷板を形成させた。なお、膜材料裏面温度+2.5℃の設定は、前述の融滑雪処理実験から得られた融滑雪現象が発生した時の膜材料裏面温度を参考に予備実験を行い決定した。この温度設定で界面には、厚さ2mm程度の薄い氷板が形成される。



写真5-3 チャンバー内の状況

## 5.4.2 実験結果

図5-16に、融雪を開始してから滑雪するまでの外気温、膜材料裏面温度およびチャンバー内温度の推移状況の一例を示す。図に示すように、ヒーティング開始後、膜材料裏面温度は+2.5℃前後で2時間30分の間推移し、滑雪後は+10℃前後まで上昇する。これらの資料を基に本実験では、屋根雪が融滑雪するまでに要するエネルギーの供給量 $Q_s$  (kcal/m<sup>2</sup>)を求めた。以下、この求めたエネルギー供給量を「滑雪エネルギー量」という。なお、チャンバー内は、点検時以外開閉しないことから換気、すき間風損失について考慮していない。

$$Q_{s_i} = \Delta t \times (Q_h - Q_r - Q_w) \quad \text{-----} \quad (5.1)$$

$$Q_s = \sum_{i=1}^n (Q_{s_i} / A) \quad \text{-----} \quad (5.2)$$

ここに、 $Q_{s_i}$  :  $\Delta t$  時間に与えた熱量 (kcal)

$\Delta t$  : 計測間隔時間 (h)

$Q_h$  : ヒーターの発熱量 (kcal/h) , 1kW=860kcal・h

$Q_r$  : 底面の熱損失 (kcal/h) ,  $Q_r = k_r \times A_r \times (T_{in} - T_o)$

$Q_w$  : 側面の熱損失 (kcal/h) ,  $Q_w = k_w \times A_w \times (T_{in} - T_o)$

$k_r$  : 底面の熱貫流率 (kcal/m<sup>2</sup>・h・℃)

$A_r$  : 底面の面積 (m<sup>2</sup>)

$T_{in}$  : 室内温度 (℃)

$T_o$  : 外気温 (℃)

$k_w$  : 側面の熱貫流率 (kcal/m<sup>2</sup>・h・℃)

$A_w$  : 側面の面積 (m<sup>2</sup>)

$A$  : 膜部分の面積 (m<sup>2</sup>)

図5-17に、融滑雪における積雪重量と滑雪エネルギー量との関係を示す。なお、図中には、界面に氷板を形成させて融滑雪実験を行った結果を加えている。図に示すように、いずれの屋根勾配においても積雪重量の増加にともない滑雪エネルギー量が減少する傾向を示す。この傾向は、屋根勾配が大きくなるほど顕著である。各屋根勾配ごとの滑雪エネルギー量（界面が雪の場合）は、図中に示す近似式で推定することができる。界面に氷板を形成させていない場合と氷板を形成させた場合の滑雪エネルギー量の差異をみると、界面に氷板を形成させた場合には、界面が雪の場合に比べて、いずれの屋根勾配においても少ないエネルギー量で融滑雪現象が発

生している。各屋根勾配ごとの界面の雪質の差異による滑雪エネルギー量は、界面に氷板を形成させた場合には界面が雪の場合に比べて屋根勾配 $10^{\circ}$ で $1/6$ 程度の減少であるが、屋根勾配 $15^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ では $1/2$ 程度まで減少している。従って、界面に氷板を形成させた場合には、屋根勾配 $15^{\circ}$ 以上が有効と考える。これらの実験結果をみると、融滑雪処理は、各屋根勾配に対応したエネルギーの供給量を設定することが有効と考える。

融滑雪後の屋根雪の膜材料表面との付着面をみると、ざらめ雪やクラスト状の多結晶となっており、結晶間に融雪水を含み水の飽和層を形成している。これに対し、界面に氷板を形成させた場合の融滑雪後の屋根雪と膜材料表面との界面は、微量の融雪水が付着しているに過ぎない。これらの界面状況から判断すると、界面がざらめ雪やクラスト状の多結晶で微細な空隙を含む不均一な層の場合、滑雪現象を誘発する水の飽和層の形成過程において、界面が比較的均一な氷板に比べ空隙などの影響を受けるため、多くの滑雪エネルギー量を必要としていると考える。

融滑雪時（界面に氷板を形成させていない場合）における膜材料裏面温度は、屋根勾配 $10^{\circ}$ で $+2.4\sim+3.4^{\circ}\text{C}$ 、屋根勾配 $15^{\circ}$ で $+2.1\sim+2.6^{\circ}\text{C}$ 、屋根勾配 $20^{\circ}$ で $+1.9\sim+2.1^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。このように膜材料裏面温度は、 $+1.9\sim+3.4^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布し、これらの近傍付近（膜材料裏面から $10\text{mm}$ の範囲）の温度は $+2.0\sim+8.0^{\circ}\text{C}$ の範囲の分布となっている。また、これらの融滑雪現象が発生した時の外気温は、 $-5.1\sim-1.3^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布し、外気温 $-2.5^{\circ}\text{C}$ 以下での融滑雪現象が多い状況であった。このようなことから融滑雪処理する場合、膜材料裏面温度は、概ね $+2.0\sim+3.5^{\circ}\text{C}$ が目安と考える。

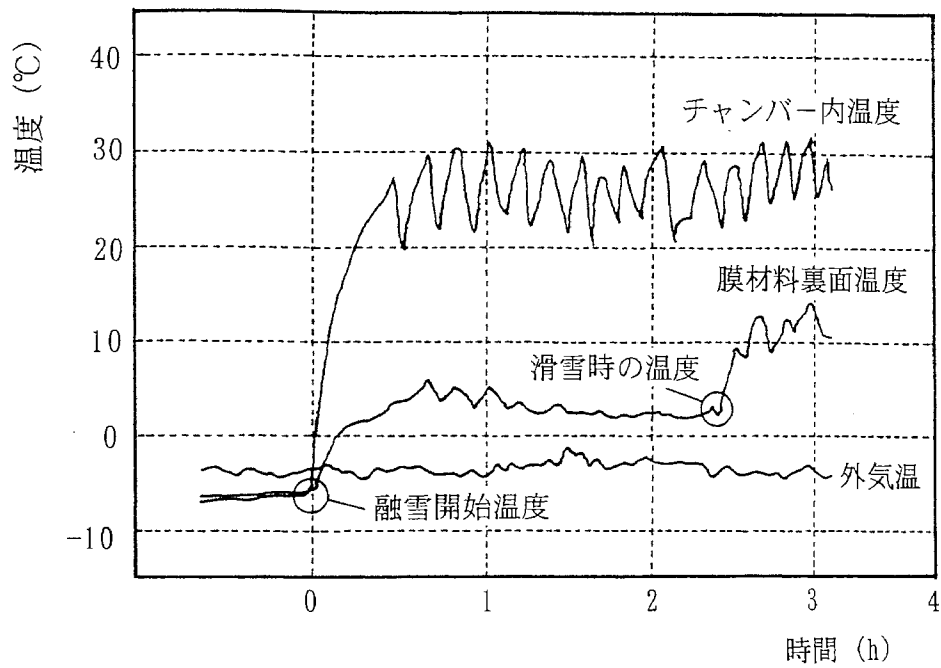


図 5 - 16 外気温，膜材料裏面温度およびチャンバー内温度の推移状況の一例

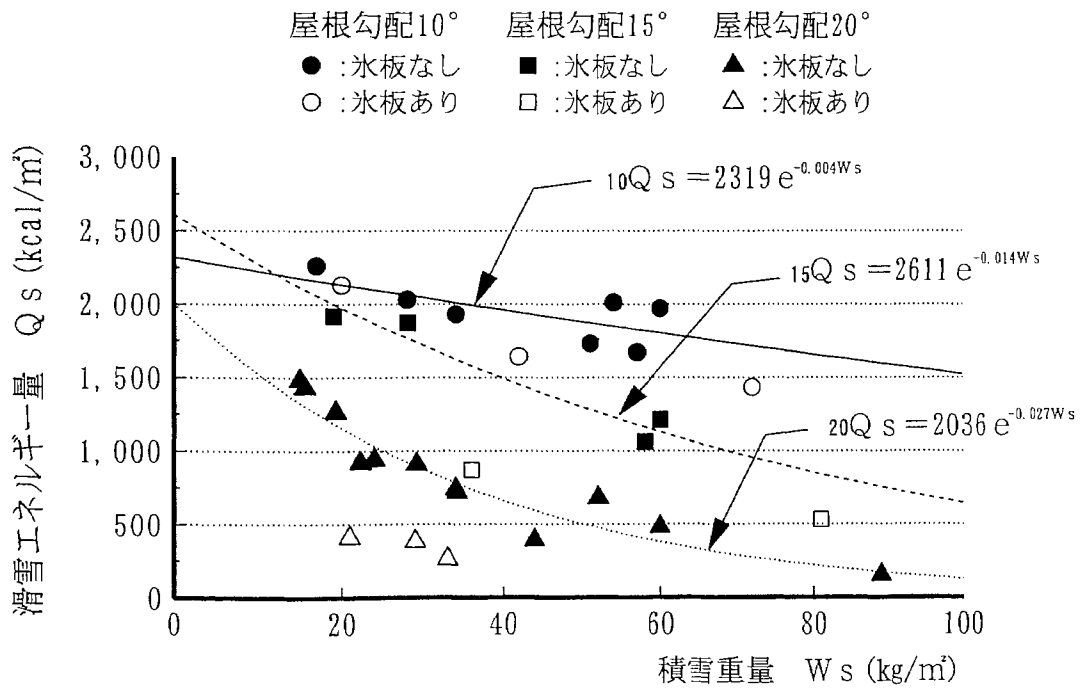


図 5 - 17 積雪重量と滑雪エネルギー量との関係



### 5.4.3 実験結果のまとめ

本節では、膜構造建築物における融滑雪による合理的な制御積雪荷重の制御方法を捉える資料を得るため、融滑雪現象に関する屋外モデル実験を行った。本実験から得られた結果を整理すると、以下ようになる。

(1) 屋根雪の融滑雪現象は、屋根勾配によって滑雪エネルギー量が異なることを明らかにした。従って、各屋根勾配に対応したエネルギーの供給量を設定することが有効と考える。屋根勾配 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ に対応した滑雪エネルギー量の推定式は、以下ようになる。

$$\text{屋根勾配 } 10^\circ : {}_{10}Q_s = 2319 \times e^{-0.004 W_s} \text{ ----- (5.3)}$$

$$\text{屋根勾配 } 15^\circ : {}_{15}Q_s = 2611 \times e^{-0.014 W_s} \text{ ----- (5.4)}$$

$$\text{屋根勾配 } 20^\circ : {}_{20}Q_s = 2036 \times e^{-0.027 W_s} \text{ ----- (5.5)}$$

ここに、 $Q_s$ ：滑雪エネルギー量 ( $\text{kcal}/\text{m}^2$ )

$W_s$ ：積雪重量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

(2) 融滑雪処理する場合、界面の雪質によって滑雪エネルギー量が大きく異なることを明らかにした。界面がざらめ雪やクラスト状の多結晶で微細な空隙を含む不均一な層の場合には、滑雪エネルギー量が多く、界面が比較的均一な氷板の場合には、滑雪エネルギー量が少ない。従って、界面に氷板を形成させて融滑雪処理する方法が有効と考える。

(3) 融滑雪現象が発生する時の膜材料裏面温度は、概ね $+2.0 \sim +3.5^\circ\text{C}$ であることから、この温度を指標に融滑雪処理の制御が可能と考える。

以上のことから、融滑雪処理は、屋根勾配 $10^\circ$ 以上とし、膜材料温度が $+2.0 \sim +3.5^\circ\text{C}$ になるように熱エネルギーを供給することが有効と言える。また、屋根雪と膜材料表面との界面に氷板を形成してから融滑雪処理すると、雪の場合に比べ少ない滑雪エネルギー量で融滑雪現象が発生することを明らかにした。しかし、融滑雪による処理効率を考慮すると、界面を氷板状にした場合には、屋根勾配 $15^\circ$ 以上に採用することが有効と考える。第3章 3.4においても界面が氷板状の場合、静摩擦係数が小さく滑雪しやすい実験結果が得られている。このように融滑雪処理は、界面に氷板を形成させることで滑雪エネルギー量の低減や滑雪性が良くなることから、融滑雪による屋根上積雪荷重の制御方法として有効である。従って、これらの結果を基に融滑雪による制御積雪荷重が可能と考える。

## 5. 5 膜構造建築物における融滑雪の制御方法に関する提案

---

融雪滑雪処理は、屋根雪と膜材料表面との界面の雪質によって滑雪エネルギー量が大きく異なることを屋外モデル実験結果から明らかにした。この界面の雪質の差異をみると、界面がざらめ状やクラスト状の結晶で微細な空隙を含む不均一な層の場合には、水の飽和層を形成させるための滑雪エネルギー量が多く、界面が比較的均一な氷板の場合には、水の飽和層を形成させるための滑雪エネルギー量が少なくなる。これらの状況は、雪と氷の物性の差異によるものと考えられる。雪の場合には、氷の場合に比べ界面の小さく空隙率が大きいことから、滑雪現象を誘発する水の飽和層を形成する滑雪エネルギー量を多く必要するためと考える。このことから判断すると、融雪滑雪処理する場合、界面に氷板を形成させることで滑雪エネルギー量の低減が可能と言える。このようなことから、室内モデル実験では、冬期間の種々の気象条件を想定した恒温室で氷板形成後における再融雪時のエネルギー供給方法について実験した。

### 5. 5. 1 実験方法

図5-18に、融雪滑雪実験装置の概要を示す。図に示すように実験装置は、傾斜台に融雪用パネルヒーターを取り付けている。この傾斜台は、ハンディウインチを巻き上げることにより任意に勾配を設定できる。表5-2に、実験シリーズを示す。表に示すように実験は、滑雪エネルギー量と滑雪現象を誘発するエネルギーの供給方法を捉えるため、氷モデルを用いて屋根勾配、温度条件、積雪重量および滑雪現象を誘発するために与えるエネルギー量（以下、「供給エネルギー量」という。）を変えて44種類の条件で行った。なお、実験に用いた氷モデルは、第2章の静摩擦氷モデル実験と同一のモデルである。

実験は、氷モデルを水平な傾斜台に置き、エネルギーを供給して氷モデルと膜材料との界面に水の飽和層を形成させた。その後、所定の時間凍着させた。凍着完了後、傾斜台を所定の勾配になるようにハンディウインチで巻き上げ、氷モデルが滑雪するまでエネルギーを供給した。なお、滑雪するまでの膜材料裏面温度およびエネルギーの供給時間を測定した。いずれの実験も同一条件で3回行った。

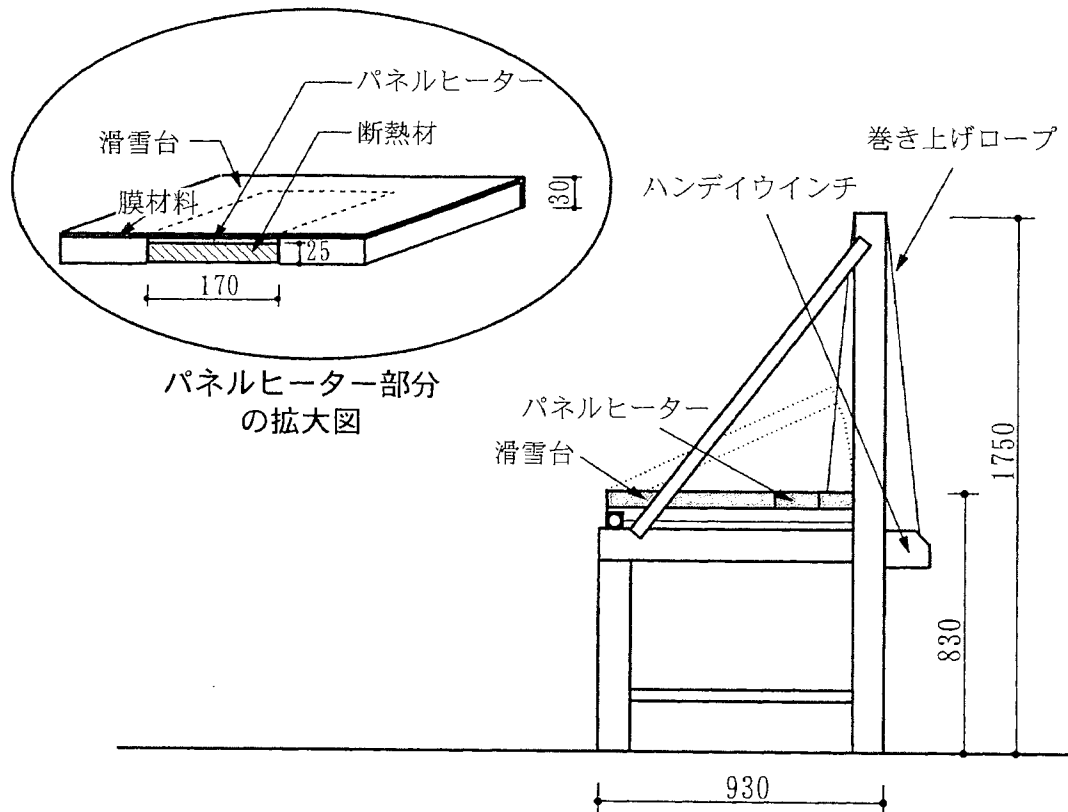


図 5 - 18 融滑雪実験装置

表 5 - 2 実験シリーズ

供給エネルギー量 (kcal/m <sup>2</sup> ·s)	積雪重量 (kg/m <sup>2</sup> )	屋根勾配 (°)	実験温度(°C)		
			-1.0	-5.0	-2.5
0.11	40	10	●	●	●
		15	○	▲	■
		20	●	●	●
		30	●	●	●
		40	●	●	●
0.11	20	15	●	●	●
	80		●	●	●
	120		●	●	●
	160		●	●	●
0.25	40	15	●	●	●
0.45			●	●	●
0.70			●	●	●

- : 凍着時間 3 時間の条件で実施した実験。
- : 凍着時間 2 ~ 5 時間の 4 種類の条件で実施した実験。
- ▲ : 凍着時間 2 ~ 4 時間の 3 種類の条件で実施した実験。
- : 凍着時間 1 ~ 4 時間の 4 種類の条件で実施した実験。

注) 表中の供給エネルギー量は、以下に示す電圧を融雪用パネルヒーターに与えた場合の 1 (m<sup>2</sup>) 当り 1 (s) 間に発生するエネルギー量を示している。

20 (V) : 0.11 (kcal/m<sup>2</sup>·s), 30 (V) : 0.25 (kcal/m<sup>2</sup>·s)  
 40 (V) : 0.45 (kcal/m<sup>2</sup>·s), 50 (V) : 0.70 (kcal/m<sup>2</sup>·s)

## 5. 5. 2 実験結果

図5-19に、融雪開始から滑雪までの膜材料裏面温度および外気温の推移状況の一例を示す。この一例は、積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ ，実験温度 $-5.0^\circ\text{C}$ ，屋根勾配 $15^\circ$ の場合である。図に示すように、氷モデルは、 $-5.0^\circ\text{C}$ で膜材料表面に凍着している。この状態で融雪を開始すると、膜材料裏面温度が $-5.0^\circ\text{C}$ から緩やかに上昇して $+2.6^\circ\text{C}$ で滑雪した。この間に要した時間は、12分50秒であった。これらの資料をもとに融雪開始から滑雪までに必要なエネルギー量（前節と同様に「滑雪エネルギー量」という。） $Q_{s1}$  ( $\text{kcal}/\text{m}^2$ ) を下式から求めた。なお、本実験では、氷モデルが小さく、凍着面積が小さいことや融雪用パネルヒーターの最下層に断熱材（25mm）を張り付けるなど熱損失を防ぐ工夫をしている。従って、滑雪エネルギー量の算出に当り熱損失は考慮していない。

$$Q_{s1} = \left( \left( (V^2/R) \times \Delta t \right) / J \right) / A / 10^3 \text{ ----- (5.6)}$$

ここに、 V：電圧(V)

R：抵抗 39.3( $\Omega$ )

$\Delta t$ ：融雪開始から滑雪まで要した時間(s)

J：熱の仕事当量 4.19 (J/cal)

A：凍着面積 ( $\text{m}^2$ )

図5-20に、供給エネルギー量  $0.11\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ，屋根勾配 $15^\circ$ ，凍着時間3時間の場合の積雪重量と滑雪エネルギー量との関係を示す。図に示すように、滑雪エネルギー量は、いずれの実験温度においても積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ まで積雪重量の増加に伴い減少し、この値を超えるとほぼ一定の値となる。この傾向は、実験温度の低い $-10.0^\circ\text{C}$ の場合が顕著で積雪重量 $20\text{kg}/\text{m}^2$ の時に滑雪エネルギー量が $220\text{kcal}/\text{m}^2$ 前後となる。しかし、積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ を超えると、滑雪エネルギー量が $150\text{kcal}/\text{m}^2$ 前後となり、前者に比べて滑雪エネルギー量が $70\text{kcal}/\text{m}^2$ 程度低減される。なお、積雪重量 $20\text{kg}/\text{m}^2$ では、融雪だけが進み水との共存状態による水膜の影響を受け、水の粘性抵抗力が大きく作用し滑雪しない場合がみられた。従って、界面が氷板の場合、融雪滑雪処理は、積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ 以上が目安と考える。

図5-21に、供給エネルギー量 $0.11\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ，積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ ，屋根勾配 $15^\circ$ の場合の凍着時間と滑雪エネルギー量との関係を示す。図に示すように、滑雪エネルギー量は、いずれの実験温度においても凍着時間3時間までは増加傾向を示すが、凍着時間3時間を超えるとほぼ一定の値となる。この傾向は、氷モデルと膜材料と

の界面に発生させた水の飽和層が凍着時間 3 時間で完全に凍りつく現象を示している。従って、凍着強度の上限値は、凍着時間 3 時間程度を目安にして良いと考える。さらに、各実験温度ごとの滑雪エネルギー量をみると、実験温度が低いほど滑雪エネルギー量を多く必要としている。凍着時間 3 時間以降の滑雪エネルギー量は、実験温度  $-10.0^{\circ}\text{C}$  では  $150\text{kcal}/\text{m}^2$  前後、実験温度  $-5.0^{\circ}\text{C}$  では  $80\text{kcal}/\text{m}^2$  前後、実験温度  $-2.5^{\circ}\text{C}$  では  $150\text{kcal}/\text{m}^2$  前後の値となる。

図 5-22 に、積雪重量  $40\text{kg}/\text{m}^2$ 、滑雪角度  $15^{\circ}$ 、凍着時間 3 時間の場合の供給エネルギー量と滑雪エネルギー量との関係を示す。図に示すように、滑雪エネルギー量は、 $-10.0^{\circ}\text{C}$  で  $0.26\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  前後、 $-5.0^{\circ}\text{C}$  で  $0.15\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  前後、 $-2.5^{\circ}\text{C}$  で  $0.10\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  前後の時に最も少なく、これらの値の前後で滑雪エネルギー量は増加する。すなわち、これらの値が各実験温度における滑雪エネルギー量の増減の分岐点となる。ここで、各実験温度の分岐点を結ぶと図中に示す回帰式 (5.7) が得られる。さらに、各実験温度の滑雪エネルギー量の増加傾向を回帰式で示すと、図中の式 (5.8)、(5.9)、(5.10) となる。従って、これらの回帰式の関係を検討することで、温度条件に対応した供給エネルギー量を捉えることができる。なお、図中の回帰式を整理すると、以下のようになる。

$$\text{分岐点を結ぶ回帰式} : Q_{s1} = 520 \times Q_{s2} \text{ ----- (5.7)}$$

$$\text{実験温度 } -10.0^{\circ}\text{C} : Q_{s1} = 100 \times Q_{s2} + 106.9 \text{ ----- (5.8)}$$

$$\text{実験温度 } -5.0^{\circ}\text{C} : Q_{s1} = 80 \times Q_{s2} + 71.3 \text{ ----- (5.9)}$$

$$\text{実験温度 } -2.5^{\circ}\text{C} : Q_{s1} = 40 \times Q_{s2} + 46.4 \text{ ----- (5.10)}$$

ここに、 $Q_{s1}$  : 滑雪エネルギー量 ( $\text{kcal}/\text{m}^2$ )

$Q_{s2}$  : 供給エネルギー量 ( $\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )

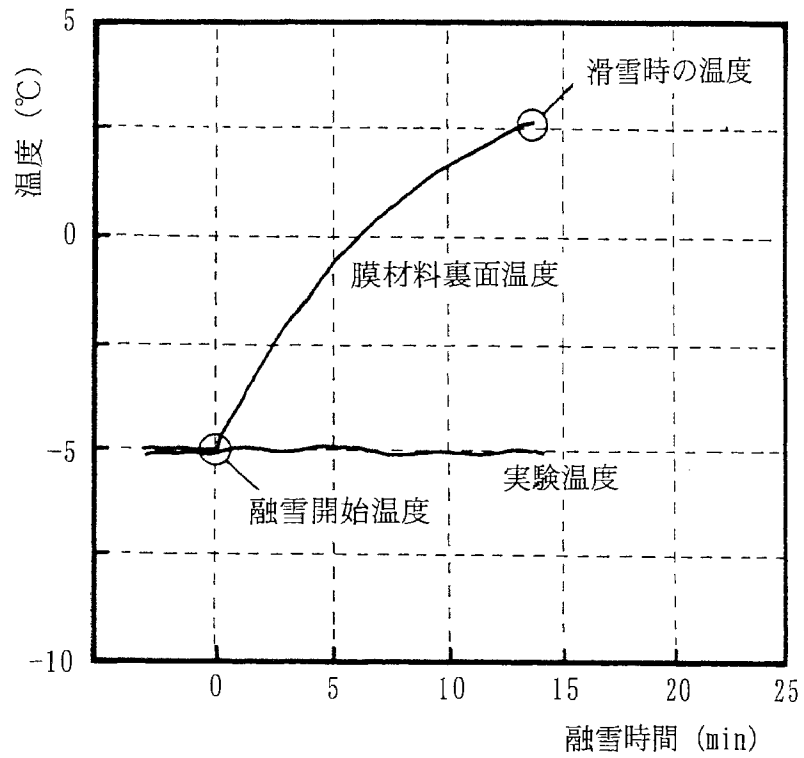


図 5 - 19 融雪開始から滑雪までの膜材料裏面温度および外気温の推移状況の一例

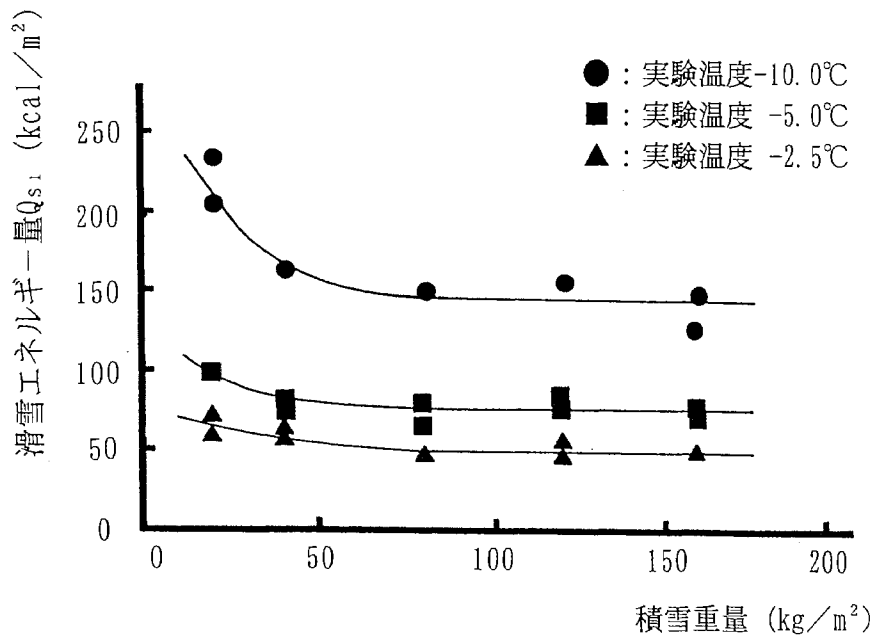


図 5 - 20 積雪重量と滑雪エネルギー量との関係

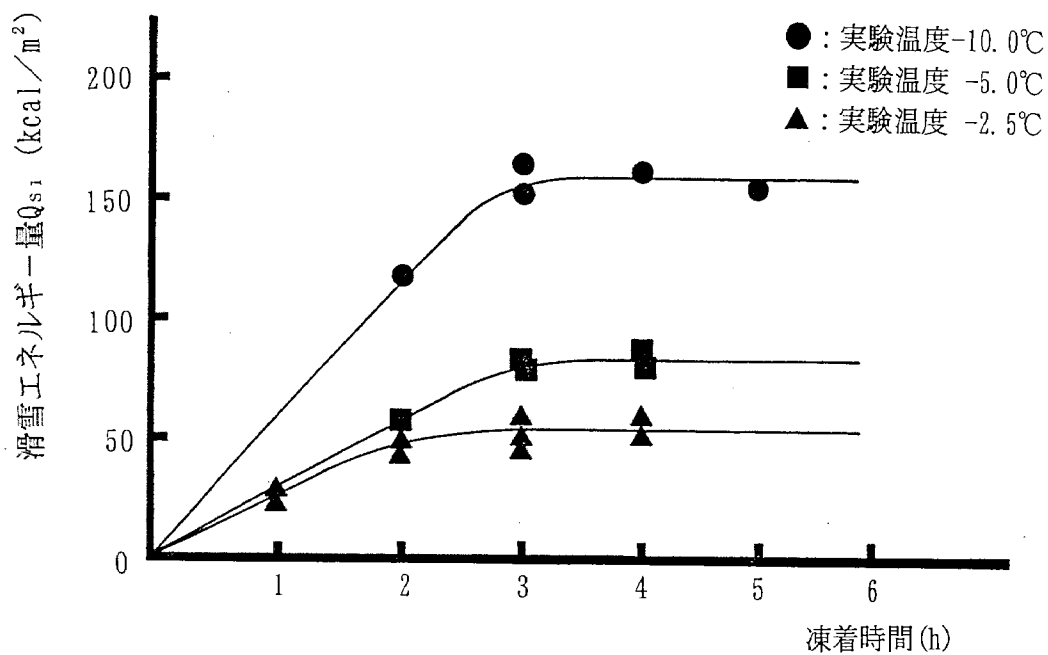


図5-21 凍着時間と滑雪エネルギー量との関係

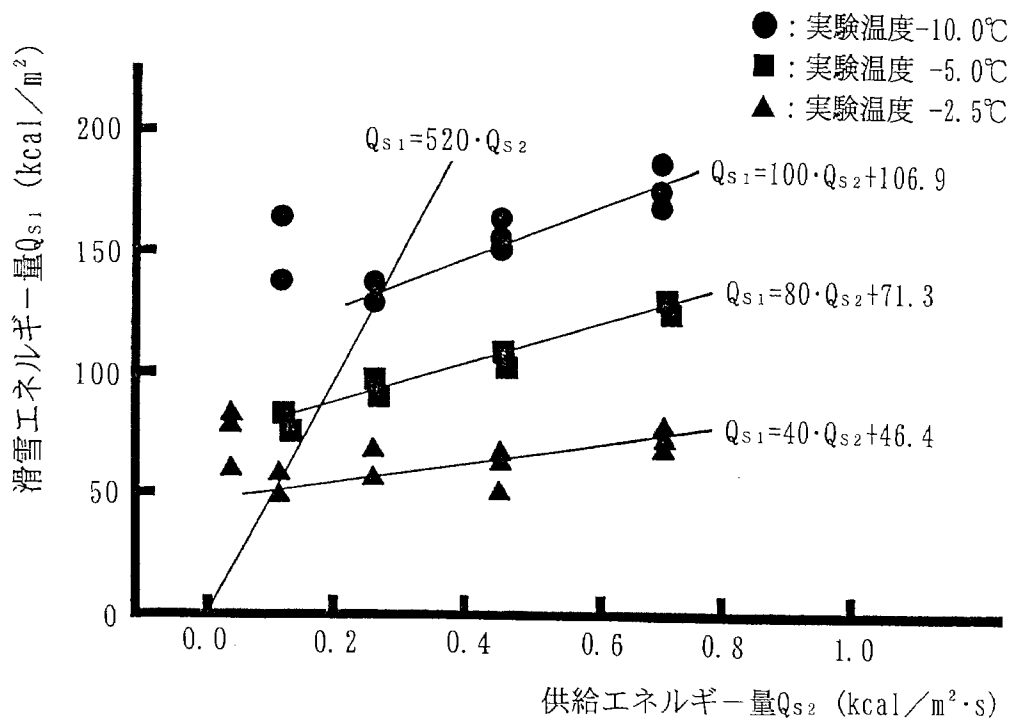


図5-22 供給エネルギー量と滑雪エネルギー量との関係

### 5.5.3 融滑雪における供給エネルギー量の推定方法

本節5.5.2の実験結果から、氷モデルを融滑雪させるまでに要するエネルギー量（滑雪エネルギー量）は、積雪重量，凍着時間，温度条件の影響を受けていることを明らかにした。この実験結果を整理すると、以下のようになる。

- (1) 滑雪エネルギー量は、各温度条件においても積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ まで減少し、この値を超えるとほぼ一定となることを明らかにした。
- (2) 滑雪エネルギー量は、各温度条件においても凍着時間3時間まで増加し、凍着時間3時間以上になるとほぼ一定となることを明らかにした。すなわち、各温度条件における滑雪エネルギー量の最大値は、実験温度 $-10.0^\circ\text{C}$ では $150\text{kcal}/\text{m}^2$ 前後、実験温度 $-5.0^\circ\text{C}$ では $80\text{kcal}/\text{m}^2$ 前後、実験温度 $-2.5^\circ\text{C}$ では $150\text{kcal}/\text{m}^2$ 前後の値となり、凍着時間3時間で得られる値を目安として考えることができる。
- (3) 滑雪エネルギー量は、温度条件による影響を受け、温度が低くなるにともない多くの滑雪エネルギー量が必要となることを明らかにした。
- (4) 滑雪エネルギー量は、供給エネルギー量の差異で滑雪エネルギー量が異なることを明らかにした。積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ ，屋根勾配 $15^\circ$ ，凍着時間3時間の場合、滑雪エネルギー量は、 $-10.0^\circ\text{C}$ で $0.26\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 前後、 $-5.0^\circ\text{C}$ で $0.15\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 前後、 $-2.5^\circ\text{C}$ で $0.10\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 前後の時に最も少なくなる。

以上のことから、界面が氷板の場合における融滑雪処理の有効な条件は、屋根勾配 $15^\circ$ 以上，積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ 以上と考える。さらに、温度条件に対応した供給エネルギー量を与えることで、より少ない滑雪エネルギー量で融滑雪現象が発生することを明らかにした。

これらの実験結果を踏まえて、界面が氷板の場合における温度条件に対応した供給エネルギー量を推定すると、以下のようになる。なお、推定条件は、積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ ，屋根勾配 $15^\circ$ ，凍着時間3時間を用いた。

図5-23に、実験温度と図5-22に示した回帰式(5.8)，(5.9)，(5.10)の係数（以下、「係数A」という。）および定数項（以下、「定数項B」という。）との関係を示す。図に示すように、実験温度の低下にともない係数Aおよび定数項Bは、増加する傾向を示し、図中の式(5.12)，(5.13)で近似できる。これらの近似式を基に、式(5.7)と式(5.11)との関係から温度条件に対応した供給エネルギー量 $Q_{s2}$  ( $\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )を推定すると、式(5.14)で推定可能となる。



$$Q_{s1} = 520 \times Q_{s2} \quad \text{-----} \quad (5.7)$$

$$Q_{s1} = A \times Q_{s2} + B \quad \text{-----} \quad (5.11)$$

$$Q_{s2} = B / (520 - A) \quad \text{-----} \quad (5.14)$$

ただし,  $A = 110 \times 0.15^t$ ,  $t = 1.36^T$  ----- (5.12)

$$B = -7.93 \times T + 28.6 \quad \text{-----} \quad (5.13)$$

ここに,  $Q_{s1}$ : 滑雪エネルギー量 (kcal/m<sup>2</sup>)

$Q_{s2}$ : 供給エネルギー量 (kcal/m<sup>2</sup>·s)

T: 実験温度 (°C)

A: 図5-22から得られる係数

B: 図5-22から得られる定数項

上述の供給エネルギー量の推定方法から得られた推定結果を簡便図として表現すると, 図5-24となる。図に示すように, 滑雪エネルギー量を最小とする供給エネルギー量は, 式(5.7)と式(5.11)から得られる等値線との交点となり, 式(5.14)から求めることができる。従って, この簡便図を用いることで, 温度条件に対応した供給エネルギー量が推定可能と考える。

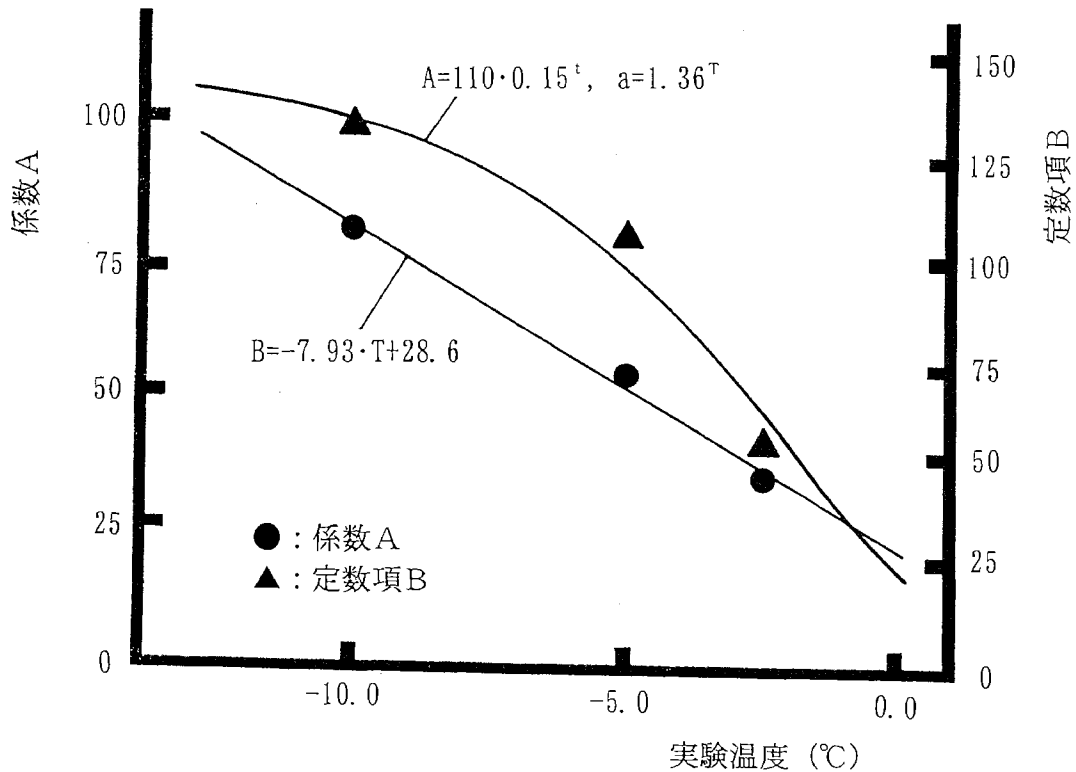


図5-23 実験温度と係数Aおよび定数項Bとの関係

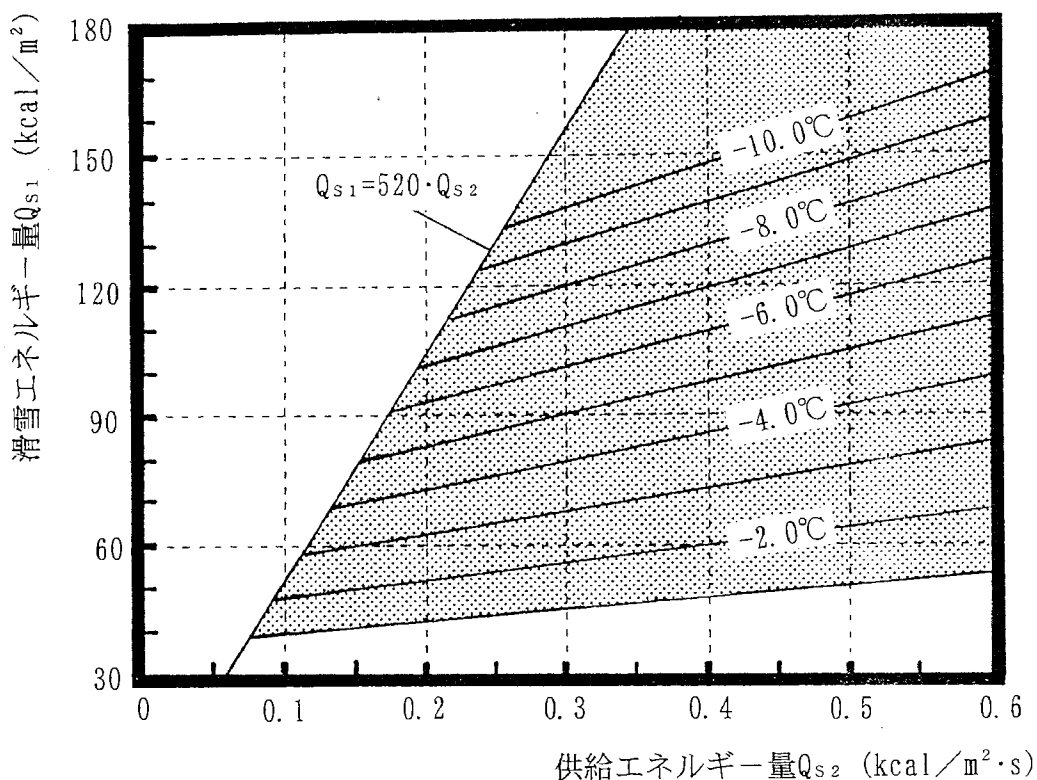


図 5 - 24 最適供給エネルギー量の簡便図

#### 5. 5. 4 融滑雪における供給エネルギー量の推定値の適用性

融雪滑雪処理は、屋根勾配を利用して融雪により屋根雪の滑雪現象を誘発し滑雪処理するため、合理的な屋根雪処理方法と言える。融雪滑雪処理する場合、屋根雪と膜材料表面との界面に氷板を形成させてから再融雪すると、少ない滑雪エネルギー量で融滑雪処理できることを明らかにした。室内モデル実験では、氷板形成後における再融雪時のエネルギー供給方法について検討するため、氷モデルを用いて「融雪→凍結→再融雪→滑雪処理」に関する融滑雪実験を行った。その結果、温度条件に対応した再融雪時の供給エネルギー量の推定方法を捉えることができた。この結果を踏まえて、本実験では、供給エネルギー量の推定値の適用性を評価するため、恒温室で雪モデルを用いて「融雪→凍結→再融雪→滑雪処理」と融滑雪実験を行った。

## (1) 実験方法

実験装置は、前述の融滑雪処理実験と同様の実験装置を用いた。実験に用いた雪モデルは、前述の融滑雪処理実験と同様の氷モデルの氷板部分を薄く製氷（厚さ 5 mm）して自然状態から採取した積雪（全層平均積雪密度  $0.24\sim 0.27\text{g}/\text{cm}^3$ ）を 15 mm 付着させ作製した。実験条件は、以下の 2 種類とした。

CASE1：屋根勾配  $15^\circ$ ，積雪重量  $40\text{kg}/\text{m}^2$ ，凍着時間 3 時間，実験温度  $-5.0^\circ\text{C}$

CASE2：屋根勾配  $15^\circ$ ，積雪重量  $40\text{kg}/\text{m}^2$ ，凍着時間 3 時間，実験温度  $-2.5^\circ\text{C}$

実験は、雪モデルを水平な傾斜台に置き、エネルギーを供給して雪モデルと膜材料との表面との界面に水の飽和層を形成させた。その後、3 時間凍着させ界面に氷板を形成させた。氷板形成後、傾斜台を勾配  $15^\circ$  になるようにハンディウインチで巻き上げ、雪モデルが滑雪するまでエネルギーを供給した（実験温度  $-5.0^\circ\text{C}$ ： $0.15\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ，実験温度  $-2.5^\circ\text{C}$ ： $0.1\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ）。同時に、氷板形成過程の観察や再融雪時の膜材料裏面温度およびエネルギーの供給時間を測定した。なお、雪モデルは、30分以上実験温度環境に置いた。いずれの実験も同一条件で 3 回行った。

## (2) 実験結果

本節 5.5.3 で提案した供給エネルギー量の推定式を基に、実験温度  $-5.0^\circ\text{C}$  および  $-2.5^\circ\text{C}$  における滑雪エネルギー量を推定すると、実験温度  $-5.0^\circ\text{C}$ ，供給エネルギー量  $0.15\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  の場合には、滑雪エネルギー量  $78\text{kcal}/\text{m}^2$  の値となり、実験温度  $-2.5^\circ\text{C}$  で供給エネルギー量  $0.10\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  の場合には滑雪エネルギー量  $52\text{kcal}/\text{m}^2$  となる。本実験で得られた雪モデルの実験結果を示すと、以下のようになる。

### 1) CASE1

実験温度  $-5.0^\circ\text{C}$ ，供給エネルギー量  $0.15\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  の場合、滑雪エネルギー量は、平均値で  $79\text{kcal}/\text{m}^2$  の値を示す。

### 2) CASE2

実験温度  $-2.5^\circ\text{C}$ ，供給エネルギー量  $0.10\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  の場合、滑雪エネルギー量は、平均値で  $45\text{kcal}/\text{m}^2$  の値を示す。

これらの実験結果をみると、実験値は、推定式から得られた計算値と比べてほぼ同様の値を示す。従って、この実験結果から、本節 5.5.3で提案した供給エネルギー量の推定式の有効性を確認することができる。

ここで、氷板形成までの融雪状況を観察すると、融雪開始から10分程度で雪モデルとの界面に3～4mm程度の水の飽和層が形成される。本実験では、この飽和層の形成度合から氷板の厚さを決定した。氷板の厚さの決定は、飽和層3～4mm程度の場合と5～7mm程度の場合の2種類について検討した。実験温度 $-5.0^{\circ}\text{C}$ 、飽和層3～4mm程度の場合の氷板形成状況をみると、雪モデルの界面には、2～3mm程度の氷板がきれいに形成されている。この氷板形成に要するエネルギー量は、 $180\text{kcal}/\text{m}^2$ 前後であった。これに対し、実験温度 $-5.0^{\circ}\text{C}$ 、飽和層5～7mm程度の場合の氷板形成状況をみると、飽和層2～3mm程度の時に比べて4～5mm程度の氷板が形成され、氷板形成に要するエネルギー量も $300\text{kcal}/\text{m}^2$ 前後と多くなる状況であった。これらの氷板の厚さの差異による滑雪エネルギー量について検討すると、両者は、ほぼ同様の値を示す。従って、界面に形成させる氷板は、2～3mm程度で十分と考える。

### 5.5.5 まとめ

融雪滑雪処理する場合，屋根雪の界面の雪質を氷板にすることで滑雪に必要なエネルギー量が低減できることを明らかにした。このことから，室内モデル実験では，屋根雪の氷板形成や再融雪時のエネルギー供給方法について氷モデルおよび雪モデルを用いて融滑雪実験を行った。その結果，温度条件に対応した供給エネルギー量を求める推定式を提案することができた。これらの実験から得られた結果を整理すると，以下のようなになる。

(1) 氷板形成後における融雪滑雪処理に効果的な条件は，積雪重量 $40\text{kg/m}^2$ 以上，屋根勾配 $15^\circ$ 以上と考える。

(2) 氷板形成後における融雪滑雪処理は，温度条件に対応した供給エネルギー量を与えることで滑雪エネルギー量をより低減することができる。温度条件に対応した供給エネルギー量 $Q_{s,2}$  ( $\text{kcal/m}^2\cdot\text{s}$ ) は，下式より推定可能である。

$$Q_{s,2} = B / (520 - A) \quad \text{-----} \quad (5.14)$$

$$\text{ただし， } A = 110 \times 0.15^t, \quad t = 1.36^T \quad \text{-----} \quad (5.12)$$

$$B = -7.93 \times T + 28.6 \quad \text{-----} \quad (5.13)$$

ここに， $T$ ：実験温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$A$ ：図5-22から得られる係数

$B$ ：図5-22から得られる定数項

(3) 滑雪エネルギー量は，界面の氷板の厚さによる影響を受けない。従って，氷板形成に要するエネルギー量を考慮すると，氷板の厚さは， $2 \sim 3\text{mm}$ 程度で十分と考える。

## 5.6 まとめ

---

本章では、「荷重の継続期間」という新しい考え方を取り入れ、膜構造建築物における制御積雪荷重に関する基本的な考え方を提案した。自然滑雪による制御積雪荷重については、実在している膜構造建築物を対象に連続的な観測結果と気象条件の関わりを明らかにし、荷重の継続期間を取り入れた制御積雪荷重評価の妥当性を検証した。融滑雪による制御積雪荷重については、屋根勾配、温度条件および雪質を考慮したエネルギー量の供給方法について室内および屋外モデル実験を行い、制御方法を提案した。これらの研究結果をまとめると、以下ようになる。

### 自然滑雪

- (1) V字張り屋根形状を有した膜構造建築物は、各V字ごとに屋根雪が分割され滑雪が発生しており、V字張り屋根形状が滑雪処理に対して有効であることを確認できた。
- (2) 膜構造建築物における自然滑雪現象は、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上であれば外気温がマイナスの範囲でも顕著に発生することを明らかにした。このように自然滑雪現象は、屋根勾配や外気温に依存していることから、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の膜構造建築物であれば、外気温に基づき自然滑雪による制御積雪荷重が可能と言える。
- (3) 自然滑雪現象が発生した時の外気温と膜材裏面温度との関係をみると、外気温と膜材料裏面温度とは同一温度でないものの、膜材料裏面温度が外気温に追従した温度状況となっている。このことから、外気温は、自然滑雪現象の発生条件を捉える有効な指標と言える。
- (4) 膜構造建築物における自然滑雪現象の発生条件は、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上、外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以上であることを明らかにした。

これらの結果を基に、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の膜構造建築物における自然滑雪による制御積雪荷重について検討すると、外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ を指標に用いて日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数の100年再現期待値を基に「荷重の継続期間」を捉え、各地域ごとに対応した合理的な屋根上積雪荷重を設定することが可能と考える。

## 融滑雪

(1)融滑雪処理は、屋根勾配ごとに滑雪エネルギー量が異なることを明らかにした。このことから、各屋根勾配に対応したエネルギーの供給量を設定することが有効と言える。屋根勾配 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ に対応した滑雪エネルギー量は、下式から求めることができる。

$$\text{屋根勾配 } 10^\circ : {}_{10}Q_s = 2319 \times e^{-0.004W_s} \quad \text{----- (5.3)}$$

$$\text{屋根勾配 } 15^\circ : {}_{15}Q_s = 2611 \times e^{-0.014W_s} \quad \text{----- (5.4)}$$

$$\text{屋根勾配 } 20^\circ : {}_{20}Q_s = 2036 \times e^{-0.027W_s} \quad \text{----- (5.5)}$$

ここに、 $Q_s$ ：滑雪エネルギー量 ( $\text{kcal}/\text{m}^2$ )

$W_s$ ：積雪重量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

(2)融滑雪処理する場合、界面の雪質によって滑雪エネルギー量が大きく異なることを明らかにした。界面が比較的均一な氷板の場合、滑雪エネルギー量が少ないことから、界面に氷板を形成させて融滑雪処理する方法が有効と言える。

### 氷板を形成させた場合

1)氷板形成後の融雪滑雪処理の有効な条件は、融滑雪の効率を考慮すると、屋根勾配 $15^\circ$ 以上、積雪重量 $40\text{kg}/\text{m}^2$ 以上と考える。

2)氷板形成後の融雪滑雪処理は、温度条件に対応した供給エネルギー量を与えることで滑雪エネルギー量をより低減することができることを明らかにした。温度条件に対応した供給エネルギー量 $Q_{s,2}$  ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) は、下式より求めることができる。

$$Q_{s,2} = B / (520 - A) \quad \text{----- (5.14)}$$

$$\text{ただし、} A = 110 \times 0.15^t, \quad t = 1.36^T \quad \text{----- (5.12)}$$

$$B = -7.93 \times T + 28.6 \quad \text{----- (5.13)}$$

ここに、 $T$ ：実験温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$A$ ：図5-22から得られる係数

$B$ ：図5-22から得られる定数項

(3)融滑雪現象が発生する時の膜材料裏面温度は、概ね+2.0～+3.5℃であることから、この温度を指標に融滑雪処理の制御が可能と考える。

これらの実験結果から、膜構造建築物における融滑雪処理は、屋根勾配10°以上とし、膜材料裏面温度を概ね+2.0～+3.5℃になるようにエネルギーを供給することが有効と言える。屋根雪と膜材料表面との界面に氷板を形成させた場合、雪よりも少ない滑雪エネルギー量で融滑雪現象が発生することを明らかにしたが、融滑雪による処理効率を考えると屋根勾配15°以上に採用することが望ましい。また、界面に氷板を形成させた場合、温度条件に対応した供給エネルギー量を与えることで滑雪エネルギー量をより低減できることを明らかにした。従って、これらの結果を基に、膜構造建築物における融滑雪による制御積雪荷重が可能と考える。

以上のことから、膜構造建築物における制御積雪荷重の制御方法に関する資料を得ることができた。これらの資料は、多雪地域に膜構造建築物を建設する場合の貴重な資料になり得ると考える。



## 第5章の参考文献

- 1) (社) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説，pp.197-200.1993
- 2) 田中義章ほか：空気膜構造建物モデルを用いた融雪に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.785-786，1984.10
- 3) 川島 実ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第1報 小型実験ドームによる融雪実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.787-788，1984.10
- 4) 森野仁夫ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第2報 風洞箱による実験，日本建築学会，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.789-790，1984.10
- 5) 宮川保之ほか：空気膜構造棟に関する実験・研究（その8 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，pp.629-630，1985.10
- 6) 川島 実ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第3報 融雪シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.913-914，1985.10
- 7) 森野仁夫ほか：空気膜構造（エアサポートドーム）融雪実験 第4報 融雪に要する熱量の定量化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.915-916，1985.10
- 8) 西川 薫ほか：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，pp.893-894，1986.8
- 9) 西 安信ほか：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，pp.895-896，1986.8
- 10) 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報告集，第426号，pp.99-105，1991.8
- 11) 苔米地司ほか：屋根上積雪荷重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
- 12) 山形敏明ほか：北海道における冬期間の雪害による国道・鉄道・電力の復旧状況について，日本雪工学会誌，Vol.10，No.3，pp.2-10，1994.7
- 13) 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

## 第6章 結 論

6.1	研究の総括 .....	6- 1
6.2	総合的考察と今後の研究課題 .....	6- 6

## 第6章 結論

### 6.1 研究の総括

本研究では、多雪地域に建設されている膜構造建築物における屋根上積雪状況の調査を実施した。この結果に基づいて屋根勾配、膜材料の張り方および気象条件との関わり合いを検討し、これらを指標に用いて屋根雪の滑雪条件を明らかにした。さらに、滑雪性状に関する実験、滑雪摩耗に関する調査、膜材料の張り方を考慮した滑雪実験および膜構造解析を実施し、滑雪に関わる膜材料特性や膜材料の張り方（構法）が屋根上積雪荷重に与える影響について検討した。その結果、膜構造建築物は、屋根として用いる膜材料が滑雪性状および滑雪摩耗に優れていることを明らかにした。また、屋根雪の滑雪を促しやすい膜材料の張り方を含めた屋根形状を捉えることができた。これらの結果を踏まえて、屋根雪の滑雪現象を屋根上積雪荷重評価に積極的に取り入れ、屋根面に雪が積もってから滑雪現象が発生するまでに要する期間を「荷重の継続期間」と捉え、この「荷重の継続期間」を用いた膜構造建築物固有の制御積雪荷重評価を提案している。

本研究で得られた結果をまとめると、以下のようなになる。

#### (1) 多雪地域の膜構造建築物における屋根上積雪状況の現状

多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪状況に関する調査から以下のことを明らかにした。

1) 多雪地域における膜構造建築物の滑雪状況をみると、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上で自然滑雪現象が発生し、この現象は降雪直後に発生することを明らかにした。融雪装置を施している場合には、融雪装置が有効に作用して融滑雪現象が顕著に発生し、この現象は、屋根勾配 $10^{\circ}$ 程度でも発生することを明らかにした。これらの現象は、1996年に発生した50年ぶりの豪雪においても確認できた。このことから、膜材料における滑雪条件を明らかにすることにより、滑雪条件を積極的に取り入れた膜構造建築物固有の屋根上積雪荷重の評価が可能と考える。

2) V字張り屋根形状は、屋根雪のせん断抵抗力を低減し、滑雪現象に有効に作用することを明らかにした。このことから、V字張り屋根形状を有効に活用して滑雪現象を促進するためには、V字張り屋根形状における積雪深と初期サグや桁行方向のスパンとの関わりについて検討することが重要と考える。

## (2) 屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性

屋根雪の滑雪に関わる膜材料特性に関する実験から、以下のことを明らかにした。

1) 膜材料は、滑雪面に介在する水分量が少ないほど滑雪に有効であることを明らかにした。従って、屋根雪を融滑雪によって滑雪処理する場合、エネルギーの供給量によって滑雪面に発生する水の飽和層が異なることから、滑雪現象を誘発するエネルギー量の供給方法が重要と考える。また、外気温が0℃以下で発生する凍着強度は、温度の影響を大きく受けていることを明らかにした。従って、凍着強度を解除して滑雪現象を誘発させるためには、温度条件に対応したエネルギー量の供給方法が重要と言える。

2) 滑雪処理を行う場合、滑雪後の屋根雪の飛距離や飛散は、膜構造建築物の周辺の配置計画や防災計画に大きな影響を与えるため、滑雪後の性状を十分把握しておく必要がある。これまで滑雪飛距離の推定式は、動摩擦抵抗力のみを考慮した式(3.3)、(3.4)、(3.5)が用いられている。しかし、前述の式は、規模が大きくなるほど推定値と実測値が対応しないため、膜構造建築物のように規模が大きい建築物には、適用することはできないことを明らかにした。このことから、滑雪持続条件のとして膜材料に直接関わる動摩擦係数および粘性抵抗力を考慮した膜構造建築物固有の屋根勾配15°～25°までの滑雪飛距離の推定式を提示すると、以下のようなになる。

$$D = V \times \cos \theta \times \left( \sqrt{((V \times \sin \theta / g)^2 + 2 \times H / g)} - V \times \sin \theta / g \right) \quad (3.3)$$

$$\text{ただし、} V = \sqrt{\frac{(2 \times g \times L \times (M \times \sin \theta - \mu_k \times M \times \cos \theta - F_{ch}))}{M}} \quad (3.11)$$

ここに、D：滑雪飛距離 (m)                      M：積雪重量 (kg/m<sup>2</sup>)    θ：屋根勾配 (°)

V：飛び出し速度 (m/s)                      L：滑走距離 (m)                      H：軒高 (m)

g：重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

μ<sub>k</sub>：動摩擦係数 (式(3.8))    F<sub>ch</sub>：粘性抵抗力 (式(3.9))

3) 膜材料は、年数が経過すると滑雪による摩耗の影響を受けて膜材料表面の凹凸が滑らかになり、滑雪しやすくなることを明らかにした。このようにコーティング層は、滑雪により摩耗の影響を受けているが、コーティング層の残存量から9年経過しても十分にその機能を果たしている状態を明らかにした。このことから、コーティング層の残存量を以て膜材料の滑雪による摩耗損傷劣化を評価すると、致命的な損傷劣化が生じない優れた材料と言える。

### (3) 膜構造建築物の屋根形状と屋根上積雪荷重との関わり

膜構造建築物の屋根形状と屋根上積雪荷重との関わりについて検討し、滑雪処理にV字張り屋根形状が効果的であることを明らかにした。V字張り屋根形状の滑雪特性は、以下ようになる。

1) 自然滑雪処理の場合には、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上あれば膜材料裏面温度および外気温がマイナスの範囲でも滑雪現象が発生することを明らかにした。融滑雪処理の場合には、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上あれば融雪が有効に作用して1日以内で全ての雪が滑雪し、屋根勾配 $10^{\circ}$ でも滑雪に要する時間が長くなるものの、融滑雪現象が発生することを明らかにした。

2) V字張り屋根形状は、初期サグや桁行方向におけるスパンの設定が屋根上積雪荷重、滑雪現象の誘発に大きな影響を与えることを明らかにした。従って、V字張り屋根形状を有する膜構造建築物の設計は、初期サグおよび桁行方向のスパンの設定で屋根上積雪荷重の捉え方が大きく変わるため、両者をバランス良く設計することが重要と言える。

### (4) 膜構造建築物における制御積雪荷重

自然滑雪による制御積雪荷重は、「荷重の継続期間」という新しい考え方を取り入れ、実在している膜構造建築物を対象に連続的な観測結果と気象条件との関わりを明らかにし、屋根勾配や外気温を指標に用いて荷重の継続期間を捉え、この荷重の継続期間を採用した合理的な制御方法を提案し、その妥当性を検証した。融滑雪による制御積雪荷重については、屋根勾配、温度条件、雪質を考慮したエネルギーの供給方法について検討し、合理的な制御方法を提案した。これらの研究結果を示すと、以下ようになる。

#### 自然滑雪

1) 膜構造建築物における自然滑雪現象は、屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上、外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ で発生することを明らかにした。これらを基に屋根勾配 $20^{\circ}$ 以上の膜構造建築物における自然滑雪による制御積雪荷重について検討すると、外気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ を指標に用いて日最高気温 $-2.0^{\circ}\text{C}$ 以下の連続日数（荷重の継続期間）の100再現期待値を採用するで、各地域ごとに対応した合理的な屋根上積雪荷重を設定することが十分可能と言える。

## 融滑雪

1) 融滑雪処理は、積雪重量の影響を受け屋根勾配が大きくなるにともない滑雪エネルギー量が少なくなることを明らかにした。積雪重量に対応した屋根勾配 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ の滑雪エネルギー量 $Q_s$ の推定値は、下式から求めることができる。

$$\text{屋根勾配 } 10^\circ : {}_{10}Q_s = 2319 \times e^{-0.004W_s} \text{ ----- (5.3)}$$

$$\text{屋根勾配 } 15^\circ : {}_{15}Q_s = 2611 \times e^{-0.014W_s} \text{ ----- (5.4)}$$

$$\text{屋根勾配 } 20^\circ : {}_{20}Q_s = 2036 \times e^{-0.027W_s} \text{ ----- (5.5)}$$

ここに、 $Q_s$ ：滑雪エネルギー量 (kcal/m<sup>2</sup>)

$W_s$ ：積雪重量 (kg/m<sup>2</sup>)

2) 融滑雪処理は、界面の雪質によって滑雪エネルギー量が大きく異なることを明らかにした。界面がざらめ雪やクラスト状の多結晶で微細な空隙を含む不均一な層の場合、空隙などの影響を受けるため屋根雪の滑雪現象を誘発する水の飽和層を形成するまで滑雪エネルギー量を多く必要とするが、界面が氷板の場合、界面が比較的均一なため滑雪現象を誘発する水の飽和層を形成するまでの滑雪エネルギー量が前者に比べ1/2程度と少ない。従って、界面に氷板を形成させて融滑雪処理する方法が有効と言える。

### 氷板を形成させた場合

- ・ 氷板形成後の融雪滑雪処理の有効的な条件は、融滑雪の処理効率を考慮し積雪重量40kg/m<sup>2</sup>以上、屋根勾配 $15^\circ$ 以上である。
- ・ 氷板形成後の融雪滑雪処理は、温度条件に対応した供給エネルギー量を与えることで滑雪エネルギー量をより低減することができる。温度条件に対応した供給エネルギー量 $Q_{s2}$  (kcal/m<sup>2</sup>·s) は、下式より推定することができる。

$$Q_{s2} = B / (520 - A) \text{ ----- (5.14)}$$

$$\text{ただし、 } A = 110 \times 0.15^t, \quad t = 1.36^T \text{ ----- (5.12)}$$

$$B = -7.93 \times T + 28.6 \text{ ----- (5.13)}$$

ここに、 $T$ ：実験温度 (°C)

$A$ ：図5-22から得られる係数

$B$ ：図5-22から得られる定数項

3) 融滑雪現象が発生する時の膜材料裏面温度は、 $+2.0 \sim +3.0^\circ\text{C}$ であることから、この温度を指標に融滑雪処理の制御が可能と考える。

(5) 膜構造建築物における制御積雪荷重に関する提案式

本研究から得られた結果を整理し、膜構造建築物における制御積雪荷重に関する提案式を示すと、以下のようなになる。

1) 融雪 :  $S.L. = d_{0.7} \times \rho_{0.7} + Sd_m$

(屋根勾配  $\theta^\circ < \text{屋根勾配} 10^\circ$  の場合)

2) 融滑雪 :  $S.L. = d_{0.7} \times \rho_{0.7} + Sd_{m+s}$

(屋根勾配  $10^\circ \leq \text{屋根勾配} \theta^\circ < \text{屋根勾配} 20^\circ$  の場合)

3) 自然滑雪 :  $S.L. = d_n \times \rho_n$

(屋根勾配  $20^\circ \leq \text{屋根勾配} \theta^\circ$  の場合)

ここに、S.L. : 設計用屋根上積雪荷重 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$d_{0.7}$  : 年最大7日増分積雪深の100年再現期待値 (m)

$\rho_{0.7}$  : 7日増分積雪密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$Sd_m$  : 融雪装置の性能によって決まる計画積雪量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$Sd_{m+s}$  : 融雪を誘発させるための計画積雪量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

$d_n$  : 各地域ごとの日最高気温  $-2.0^\circ\text{C}$  以下の連続日数 (荷重の継続期間) の100年再現期待値における増分積雪深の100年再現期待値 (m)

$\rho_n$  : 荷重の継続期間における増分積雪密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$n$  : 荷重の継続期間 (日)

これらの提案式を用い、屋根勾配条件に即した屋根雪処理を行うことで膜構造建築物の合理的な屋根上積雪荷重を設定することが可能と考える。

## 6.2 総合的考察と今後の課題

---

膜構造建築物における制御積雪荷重に関し、今後更に必要と考えられる研究課題について考察すると、以下のようなになる。

- (1)本研究では、制御積雪荷重評価を行うため屋根勾配および外気温を指標に用いて荷重の継続期間を提案した。屋根面に雪が堆積している期間を考慮すると、積雪密度も屋根上積雪荷重を制御するための重要な指標になると考える。従って、積雪密度を明らかにすることが今後の課題と言える。
- (2)経年後の膜材料を対象とした滑雪摩耗に関する研究は、本研究で明らかにした9年経過した曝露膜材料および6年、8年経過した実在している膜構造建築物についての研究が初めてである。膜材料の滑雪摩耗は、滑雪条件を指標に用いた制御積雪荷重の制御方法に関わるため、経過年数に対応した滑雪による摩耗性状を明らかにすることが重要と考える。従って、膜材料の滑雪による摩耗性状を明らかにするためには、本研究で対象とした膜構造建築物の継続的な追跡調査など積極的に行う必要がある。
- (3)滑雪現象を有効に活用した膜構造建築物の制御積雪荷重を行うためには、屋根面に滑雪の妨げになるものがないよう膜屋根の標準ディテールの開発が必要である。
- (4)膜構造建築物は、設計荷重に対する膜材料の許容膜応力で主架構の骨組間隔などが決定される。膜構造建築物の場合、膜材料の光の透過性を有効に活用するため、屋根面にできるだけ光を遮る部材がないことが望ましい。膜材料は、破損するが破壊しない材料特性を持っている。このことから、新しい膜構造建築物の設計手法として破れたら補修する積極的な考え方を取り入れ、主架構と膜部分とが同一の設計荷重ではなく、別々の設計荷重を設定し、一層明るい室内空間や架構材のコスト低減などにつながるよう設計することが今後必要と考える。



## 謝辞

本論文は、筆者が北海道工業大学工学部建築工学科4年、大学院工学研究科修士課程および博士後期課程在籍中に実施した膜構造建築物の屋根上積雪荷重についての研究成果をまとめたものであり、多くの皆様のご指導、ご支援、ご理解によりまして完成したものであり、ここに、厚くお礼申し上げます。

北海道工業大学 苫米地 司教授には、同大学に入学以来、公私ともに温かい指導および心の支えとなるお力添えを頂きました。本論文をまとめるにあたり、教授には研究手法、論文の構成および論点の整理などきめ細かなご指導を頂きました。筆者が本研究をまとめることができましたのは、ひとえに教授のご指導とご配慮の賜にほかなりません。この感謝の気持は、言葉では言い表せません。

同大学 柴田 拓二教授、藤野 和夫教授、橋本 健一教授には、論文内容に関する貴重なご教示と懇切なご指導、さらにはご丁寧な校閲を頂きました。星野 政幸教授、大垣 直明教授には、常に親身に勝る激励のお言葉をかけて頂き研究の大きな励みとさせて頂きました。伊東 敏幸講師には、力強い激励と論文に関するご助言、ご指導を頂きました。高島 敏行助教授には、電子顕微鏡による膜材料の撮影につきまして多大のお力添えを頂きました。佐藤 行敏教授には、査読論文の英文添削にご協力して頂きました。西 安信教授、鈴木 憲三教授には、恒温室の使用にご支援頂いたほか実験で貴重な助言頂きました。

太陽工業株式会社 能村 龍太郎会長、能村 博正副会長および能村 光太郎社長には、本研究の機会を与えて頂く等特段のご支援とご理解を賜りました。河野 康之常務取締役、能村 卓取締役、望月 利男取締役、山際 高典氏には、機会あるごとに心強い励ましの言葉と有益なご助言を頂きました。金澤 信夫元札幌支店長、武田 賢治札幌支店長、丸尾 博氏および札幌支店の皆様には、いつも温かい励ましの言葉と研究しやすい環境づくりにご理解を頂きました。東京技術部の皆様には、技術資料のご提供とご助言、ご協力を頂きました。山本 拓也氏には、文献調査に快くご協力して頂きました。豊田 宏氏には、膜材料の材料特性について数多くご助言を頂きました。奥原 剛彦氏には、常に激励を頂き仕事や研究に対して勇気づけられました。

さらには、本テーマの実験にあたり、鹿島建設株式会社 本郷 剛氏、清水建設株式会社 山田 利行氏、中島 肇氏、老川 進氏、大成建設株式会社 西川 薫氏の数々のご協力を頂きました。（社）日本膜構造協会 濱田 浩一常務理事事務局長には、膜構造建築物全般にわたりましてご助言頂きました。関係の皆様には心からのお礼を申し上げます。

本論文執筆にあたりまして、太陽工業株式会社 新井 覚氏、北海道工業大学大学院工学研究科博士後期課程 高倉 政寛氏、谷口 尚弘氏、同大学大学院工学研究科修士課程 数矢 彰氏、荒島 裕重氏、細川 和彦氏、西村 洋志氏の諸氏には、実験や図の清書などお手伝いして頂きありがとうございました。同大学大学院工学研究科博士後期課程の先輩である明和学園 山形 敏明学園長には、豊かな経験談や研究姿勢のありかたについてご助言を頂き勇気づけられました。なお、この研究を共有する我が北海道工業大学 建築雪氷学 苫米地研究室の多くの卒業生諸君に対し、記して感謝の意を表します。

最後に、本論文の主査であり、本研究の機会を与えて頂き最後まで温かく厳しく見守って下さった恩師、苫米地 司教授に重ねて心からの感謝を申し上げます。

平成10年3月 山口英治

## 研究発表の目録

### ■査読論文

[本研究に直接関係する論文]

- (1) 苫米地司, 山口英治, 伊東敏幸, 星野政幸: 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報告集, 第426号, pp. 99-105, 1991. 8
- (2) 山口英治, 苫米地司, 山田利行, 中島肇, 伊東敏幸, 星野政幸: 膜構造物における滑雪時の性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第437号, pp. 91-96, 1992. 7
- (3) 苫米地司, 山口英治: 膜構造物における屋根上積雪荷重の制御に関する研究 膜材と雪の凍着過程および凍着強度について, 膜構造研究論文集'93, No. 7, pp. 71-79, 1993. 12
- (4) 苫米地司, 山口英治, 高倉政寛: 膜構造物における滑雪現象に関する一考察, 膜構造研究論文集'94, No. 8, pp. 103-110, 1994. 12
- (5) 苫米地司, 伊東敏幸, 高倉政寛, 山口英治: 屋根雪の滑雪現象に関する基礎的研究, 日本雪工学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 88-95, 1995. 4
- (6) 苫米地司, 伊東敏幸, 高倉政寛, 山口英治: 膜材の表面粗さが滑雪特性に及ぼす影響について, 膜構造研究論文集'95 No. 9, pp. 71-77, 1995. 12
- (7) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 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, 膜構造研究論文集'96, No. 10, pp. 79-85, 1996. 12
- (8) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造建築物における屋根上積雪荷重の評価に関する基礎的研究 屋根上積雪荷重の低減に効果的な屋根形状の提案, 日本雪工学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 4-16, 1997. 10
- (9) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 多雪地域における膜構造建築物を対象とした屋根上積雪荷重の評価方法に関する研究, 膜構造研究論文集'97, No. 11, 1997. 12
- (10) 苫米地司, 細川和彦, 山口英治, 高倉政寛, 西川薫: 膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価について, 日本建築学会技術報告集, 第5号, pp. 31-36, 1997. 12
- (11) 山口英治, 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪荷重評価に関する基礎的研究 札幌コミュニティドームにおける屋根雪の滑雪状況に関する観測, 構造工学論文集, Vol. 44B, 1998. 3

[その他の論文]

- (1) 苫米地司, 山口英治, 橋本茂樹: 気象要素を用いた屋根上積雪の評価方法について, 日本雪工学会誌, Vol. 9, No. 3, pp. 206-213, 1993. 7

### ■大学研究紀要

[本研究に直接関係する論文]

- (1) 苫米地司, 山口英治, 伊東敏幸, 星野政幸: 膜構造物の雪処理に関する研究, 北海道工業大学研究紀要 第20号, pp. 1-7, 1992. 3
- (2) 伊東敏幸, 山口英治, 苫米地司: 膜構造建築物の設計用積雪荷重に関する研究, 北海道工業大学研究紀要 第25号, pp. 251-256, 1997. 3

## ■学会学術講演

[本研究に直接関係する論文]

- (1) 山口英治, 苫米地司: 膜材を用いた屋根の屋根雪滑落性状について, 日本雪氷学会, 北海道の雪氷 第9号, pp. 21-24, 1990. 8
- (2) 山口英治, 苫米地司: 膜材を用いた屋根の屋根雪滑落性状について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 121-122, 1990. 10
- (3) 山口英治, 苫米地司: 膜構造物の雪処理に関する研究, 第6回寒地技術シンポジウム講演論文集, pp. 295-300, 1990. 12
- (4) 山形敏明, 山田利行, 中島肇, 山口英治, 橋本茂樹, 苫米地司: 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
- (5) 山口英治, 山田利行, 中島肇, 橋本茂樹, 山形敏明, 苫米地司: 膜材を用いた屋根の滑雪飛距離について, 日本雪氷学会, 北海道の雪氷 第10号, pp. 40-43, 1991. 8
- (6) 橋本茂樹, 山田利行, 中島肇, 山口英治, 山形敏明, 苫米地司: 膜材を用いた屋根における滑落後の堆積形状について, 日本雪氷学会, 北海道の雪氷, 第10号, pp. 44-47, 1991. 8
- (7) 苫米地司, 伊東敏幸, 山口英治, 橋本茂樹, 星野政幸: ガラス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. 48-51, 1991. 8
- (8) 山口英治, 苫米地司, 山田利行, 相沢勝彦, 中島肇: 膜構造物の屋根雪処理に関する実験的研究 その2 膜材と雪氷との凍着性状について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 111-112, 1991. 9
- (9) 橋本茂樹, 山口英治, 苫米地司, 山田利行, 相沢勝彦, 中島肇: 膜構造物の屋根雪処理に関する実験的研究 その3 滑雪後の堆積性状について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 113-114, 1991. 9
- (10) 苫米地司, 山口英治: 屋根葺材と雪氷体との凍着力について, 日本雪氷学会, 北海道の雪氷, 第11号, pp. 48-51, 1992. 7
- (11) 福土昭治, 山田利行, 山口英治, 苫米地司: 膜構造物の屋根雪処理に関する実験的研究 その4 屋根雪の滑雪後の性状について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 231-232, 1992. 8
- (12) 山口英治, 川井昌裕, 中島肇, 苫米地司: 膜構造物の屋根雪処理に関する実験的研究 その5 膜材と雪氷との界面性状について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 233-234, 1992. 8
- (13) 山口英治, 苫米地司: 膜構造物における屋根雪の滑雪処理に関する基礎的研究, 第9回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 131-134, 1993. 1
- (14) 川上俊一, 苫米地司, 伊東敏幸, 山口英治: 屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究 その1 各種屋根葺材の表面性状と滑雪抵抗力との関係について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 1015-1016, 1993. 9
- (15) 山口英治, 苫米地司, 伊東敏幸, 川上俊一: 屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究 その2 滑雪制御の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 1017-1018, 1993. 9
- (16) 山口英治, 川上俊一, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根葺材と雪氷との凍着性状について, 第10回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 173-176, 1994. 1
- (17) 高倉政寛, 川上俊一, 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究 その3 滑雪開始条件の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 99-100, 1994. 9

- (18) 山口英治, 高倉政寛, 川上俊一, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究 その4 気象条件からみた凍着過程について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 101-102, 1994. 9
- (19) 川上俊一, 高倉政寛, 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究 その5 凍着荷重に及ぼす寸法効果について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 103-104, 1994. 9
- (20) 高倉政寛, 伊東敏幸, 山口英治, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究 その6 屋根葺材の滑雪特性について, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 105-106, 1995. 8
- (21) 山口英治, 苫米地司: 膜構造物の屋根雪処理に関する研究 その1 積雪地域における膜構造物の現地調査, 第12回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 39-42, 1996. 1
- (22) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造物における積雪荷重の一考察, 日本建築学会北海道支部研究報告集No. 69, pp. 81-84, 1996. 3
- (23) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜材料の滑雪特性に関する基礎的研究, 日本雪氷学会, 北海道の雪氷 第15号, pp. 54-57, 1996. 7
- (24) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造物の設計用積雪荷重に関する一考察, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 99-100, 1996. 9
- (25) 伊東敏幸, 山口英治, 苫米地司: 屋根上積雪の滑落性状に及ぼす滑雪界面の影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 103-104, 1996. 9
- (26) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: A種膜材の表面性状が滑雪特性に及ぼす影響について, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, p. 13, 1996. 9
- (27) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造建築物の設計用積雪荷重について, 第13回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 19-22, 1996. 11
- (28) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造建築物に用いられるA種膜材の滑雪特性に関する研究, 第12回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集Vol. 12-No. 1, pp. 437-440, 1996. 11
- (29) 苫米地司, 伊東敏幸, 山口英治, 荒島裕重, 西川薫: 膜構造物における屋根上積雪荷重の評価について, 第12回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集Vol. 12-No. 1, pp. 459-462, 1996. 11
- (30) 細川和彦, 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造建築物の滑雪性に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集No. 70, pp. 93-96, 1997. 3
- (31) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造建築物の設計用屋根上積雪荷重評価について, 日本建築学会北海道支部研究報告集No. 70, pp. 97-100, 1997. 3
- (32) 苫米地司, 細川和彦, 山口英治, 伊東敏幸: 札幌コミュニティドームにおける屋根雪の滑雪特性について, 日本雪氷学会, 北海道の雪氷, 第16号, pp. 31-32, 1997. 9
- (33) 山口英治, 細川和彦, 伊東敏幸, 苫米地司: 多雪地域における膜構造建築物の屋根上積雪荷重評価に関する研究, 第13回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集Vol. 13, pp. 347-351, 1997. 11
- (34) 山口英治, 伊東敏幸, 苫米地司: 膜構造建築物の屋根上積雪荷重評価に関する調査研究, 第14回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 5-8, 1997. 11

[その他の論文]

- (1) 山口英治, 苫米地司: 屋根上積雪深の推定手法に関する一考察, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, p. 6, 1990. 10
- (2) 山口英治, 苫米地司: 気象条件を用いた屋根上積雪の推定手法に関する一考察, 日本雪氷学会全国大会 講演予稿集, p. 54, 1991. 10
- (3) 橋本茂樹, 山口英治, 苫米地司: 気象特性を用いた屋根上積雪の評価方法について, 第8回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 29-32, 1992. 1
- (4) 苫米地司, 伊東敏幸, 山口英治: ガラス屋根の雪処理に関する研究, 第8回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 51-54, 1992. 1
- (5) 山口英治, 橋本茂樹, 苫米地司, 星野政幸: 滑雪後の堆積形状について, 第8回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 55-56, 1992. 1
- (6) 苫米地司, 山口英治, 橋本茂樹: 屋根上積雪の評価方法に関する一考察, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 229-230, 1992. 8
- (7) 伊東敏幸, 山口英治, 苫米地司: 屋根雪の滑落速度に及ぼす滑雪界面の水分量の影響, 第12回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集Vol. 12-No. 1, pp. 432-436, 1996. 11