

屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価  
に関する研究

2000年3月

北海道工業大学大学院

高倉政寛

# 屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価に関する研究

## 総目次

<b>第1章：序論</b>	pp.
1.1 研究の目的	1- 1
1.2 勾配屋根における屋根雪の滑落処理の特徴と有効性	1- 3
1.3 既往の研究における勾配屋根の積雪荷重評価	1- 4
1.4 本論文の構成	1- 8
1.5 本研究の特徴	1-11
参考文献	1-13
<b>第2章：勾配屋根における積雪荷重評価の変遷と現状</b>	
2.1 はじめに	2- 1
2.2 勾配屋根における屋根上積雪深の増減プロセス	2- 3
2.3 勾配屋根における積雪荷重評価の変遷	2- 5
2.3.1 滑落処理の成立過程	2- 5
2.3.2 屋根雪の滑落処理と積雪荷重法令との関係	2-10
2.4 勾配屋根における積雪荷重評価の現状	2-14
2.5.1 建築基準法による評価基準の概要	2-14
2.5.2 日本建築学会建築物荷重指針による評価基準の概要	2-15
2.5.3 諸外国およびISOにおける評価基準の概要	2-16
2.5.4 我が国における積雪荷重の評価基準と諸外国の基準との対比	2-18
2.5 まとめ	2-20
参考文献	2-22
<b>第3章：勾配屋根における屋根雪の滑落条件</b>	
3.1 はじめに	3- 1
3.2 屋外観察でみられる屋根雪の部分滑落	3- 3
3.3 屋根雪の部分滑落に関するモデル実験	3- 6
3.3.1 モデル雪の作製および諸性状の測定方法	3- 6
3.3.2 滑落モデル実験の概要	3-11
3.3.3 滑落実験に用いたモデル雪の諸性状	3-13
3.3.4 滑落モデル実験の結果	3-16
3.3.5 滑落実験のまとめ	3-19
3.4 力学的要因からみた部分滑落	3-20
3.4.1 検討の方法	3-20
3.3.2 検討の結果	3-23
3.5 まとめ	3-26
参考文献	3-27

#### 第4章：屋根葺材の表面性状が滑落抵抗力に及ぼす影響

4.1	はじめに	4- 1
4.2	研究の方法	4- 3
4.2.1	屋根葺材の表面粗さが滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験	4- 3
4.2.2	水分が滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験	4- 7
4.2.3	屋根葺材の撥水性が滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験	4- 8
4.3	研究結果	
4.3.1	表面粗さ特性が滑落抵抗力へ及ぼす影響	4-10
4.3.2	屋根葺材との界面付近における水分が滑落抵抗力に及ぼす影響	4-15
4.3.3	屋根葺材の撥水性が滑落抵抗力に及ぼす影響	4-19
4.4	滑落抵抗力に対する屋根葺材表面性状の関連強さ	4-24
4.5	まとめ	4-28
	参考文献	4-30

#### 第5章：屋根雪の雪質が滑落抵抗力に及ぼす影響

5.1	はじめに	5- 1
5.2	屋根雪の滑落に関わる抵抗力と雪質	5- 2
5.3	研究の方法	5- 3
5.3.1	戸建住宅を対象とした屋根葺材と屋根雪 との界面における雪質の観測方法	5- 8
5.3.2	小屋裏モデルを用いた屋根葺材と屋根雪 との界面における雪粒径の測定方法	5- 9
5.3.3	摩擦抵抗力の測定方法	5-10
5.4	屋根葺材裏面温度の推移と雪質変化との関係	5-17
5.4.1	戸建住宅の各部温度推移および屋根葺 材との屋根雪との界面における雪質	5-17
5.4.2	小屋裏モデルを用いた場合における屋根葺 材との屋根雪との界面における雪質	5-21
5.5	雪粒径と摩擦抵抗力との関係	5-23
5.5.1	粒径の異なる場合の摩擦抵抗力	5-23
5.5.2	雪粒径が経時的に変化する過程の摩擦抵抗力	5-29
5.6	雪質が摩擦抵抗力に及ぼす影響に関する考察	5-32
5.7	まとめ	5-39
	参考文献	5-41

## 第6章：勾配屋根における屋根雪の滑落と積雪荷重評価

6.1	はじめに	6- 1
6.2	屋根雪の滑落を支配する抵抗力と日数との関わり	6- 3
6.2.1	屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の前提条件	6- 3
6.2.2	屋根雪の滑落に要する日数と凍着抵抗力との関わり	6- 5
6.2.3	屋根雪の滑落に要する日数と摩擦抵抗力との関わり	6- 6
6.3	研究の方法	6- 8
6.3.1	凍着抵抗力の作用日数の算出方法	6-10
6.3.2	屋根雪と屋根葺材との摩擦抵抗力に影響を及ぼす 界面の雪粒径に関する実験および観察方法	6- 9
6.4	研究結果	6-11
6.4.1	地点別にみた凍着抵抗力の作用日数	6-11
6.4.2	雪粒径の粗大化状況	6-17
6.4.3	凍着抵抗力・摩擦抵抗力からみた滑落に要する日数	6-19
6.5	勾配屋根における滑落を考慮した積雪荷重評価	6-22
6.6	まとめ	6-28
	参考文献	6-30

## 第7章：結論

7.1	研究の総括	7- 1
7.2	今後の課題	7- 7
	参考文献	7- 7

	謝辞	X- 1
	研究発表の目録	X- 2
	本研究で用いられる記号一覧	X- 6

## 第 1 章 序論

	pp.
1.1 研究の目的 -----	1- 1
1.2 勾配屋根における屋根雪の滑落処理の特徴と有効性 -----	1- 3
1.3 既往の研究における勾配屋根の積雪荷重評価 -----	1- 4
1.4 本論文の構成 -----	1- 8
1.5 本研究の特徴 -----	1-11
参考文献 -----	1-13

# 第 1 章 序論

## 1. 1 研究の目的

---

多雪地域に建設される建物は、降積雪現象がもたらす諸問題に対して安全性および快適性が損なわれないように設計する必要がある。多雪地域において過去に発生した豪雪<sup>1)・2)・3)</sup>では、積雪荷重の超過による建物倒壊等の被害の他、社会的な混乱、金銭的な損失も発生している。また、多雪地域ほど広域的でないものの、同様の被害は寡雪地域においても発生している<sup>4)</sup>。このような被害の現状ををみると、豪雪に関する対策は、我が国において克服しなければならない大きな課題と考える。

冬期間に建物が倒壊することは、生活上深刻な状況となると同時に、人命にも関わる。このようなことから、多雪地域では、屋根上に堆積した雪を人力による「雪下ろし」で計画的に処理し、建物の倒壊を事前に回避することが慣習的に行われてきた。しかし、近年では、建物の大規模化、高齢化、人手不足によって「雪下ろし」の計画的な実行が危惧されている<sup>4)</sup>。過去の豪雪年における建物の被害状況をみると、豪雪による全壊・半壊は、屋根面積が大きな小学校の体育館や工場、倉庫の場合が多く、その割合は、北陸地方の場合、住宅の約6倍となっている<sup>2)</sup>。この被害背景には、雪下ろしの作業量が膨大となり対応が遅れがちになることが挙げられる。このような危険性を考えた上で、近年建設された大規模構造物では、「雪下ろし」が不要となるように、屋根勾配を大きくとり、屋根上に堆積した雪を積極的に滑落させる処理手法に移行しつつある<sup>5)・6)</sup>。

屋根上に堆積した雪を積極的に滑落させる処理を採用した建物における積雪荷重評価の現状についてみると、我が国では、この処理を考慮した積雪荷重評価を行うことができる。建築基準法では屋根勾配の増減を指標として、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価が可能になっている。しかし、この法律での評価は、昭和19年当時の材料、技術水準下で公布された臨時日本基準規格第532号<sup>7)</sup>とほぼ同様の内容であり、抜本的な改定作業が行われないうまま、半世紀以上継続的に用いられている。この間には、連続溶融亜鉛メッキ鋼板の量産開始（1953年）<sup>8)</sup>、塗装鋼板の立平葺工法の開発（1954年）<sup>8)</sup>、膜材料を屋根葺材とした建物の出現（1985年）<sup>9)</sup>等、建物の屋根構成が大きく変化している。一方、1993年に改定された日本建築学会建築物荷重指針<sup>10)</sup>では、個々の建物における雪の滑落性能を考慮した制御積雪荷重を用いることが可能になっている。しかし、この指針は滑落の性能を評価する具体的な指標を明示しておらず、不十分な段階にある。この

ように、我が国における積雪荷重の評価基準は、屋根雪の滑落を考慮されているものの、建物の設計に必要な技術資料が十分に提示されていない現状にある。

勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を考える場合、滑落を支配する諸抵抗力の特徴を定量的に評価する必要がある。既往の研究によれば、屋根雪の滑落を支配する抵抗力は、屋根葺材の表面性状、雪質、気温等の諸要因によって大きく増減することが指摘されている<sup>11)・12)・13)・14)</sup>。しかし、これら諸要因と積雪荷重との関係を定量的に評価した研究は殆どなく、雪の滑落を定量的に評価する段階には到達していない<sup>4)</sup>。そのため、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重を採用する建物では、大型試験体等を屋外に設置し、その試験体における実測結果で対応せざる得ない現状にある。大型試験体を用いた屋根上積雪状況の実測は、その結果が整理されるまでに少なくとも数年を要するため、必ずしも効率的な荷重の評価手法と言えない。

本研究は、以上に示した現状の問題点を研究の背景として、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価について論じたものである。本研究の目的を具体的に述べると次のようになる。

1)勾配屋根を持った建物における積雪荷重評価の現状についてみると、我が国では、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行うことが可能となっている。しかし、屋根雪の滑落を評価する際に必要な評価指標が十分に提示されていない段階にある。本研究は、この現状を鑑みて勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価指標を提示しようとするものである。

2)現状では、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を行う場合、個々の建物条件を想定した大型試験体を用いて、屋根上積雪状況の実測調査から滑落の評価を行わざる得ない。この実測は、少なくとも数年を要すると同時に、実測で得られた結果の汎用性が低く、実測結果をそのまま他の建物の積雪荷重として評価することはできない。このような現状に対し、本研究では、実測調査以外の方法として、気象資料および小規模な屋内実験から屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価手法を提案しようとするものである。

本研究は、以上に示した1)～2)の問題について解明することを目的とする。このことから、実測調査を主軸とした勾配屋根における積雪荷重評価の現状に対し、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の汎用性向上に寄与しようとするものである。

## 1. 2 勾配屋根における屋根雪の滑落処理の特徴と有効性

屋根上に堆積する積雪を処理する手法には、様々な手法があり、この中でも屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を考える場合、他の処理手法との違いを明らかにしておく必要がある。このことから、我が国における積雪荷重の評価基準で示されている処理手法を挙げ「屋根雪の滑落」の特徴を示すと次のようになる。

現行の建築基準法施行令および日本建築学会建築物荷重指針では、図1-1で示す「屋根雪の滑落」、「融降雪」、「融雪」、「雪下ろし」による屋根雪処理を考慮した積雪荷重評価を行うことができる。これら4種類の屋根雪処理のうち「屋根雪の滑落」の特徴を整理し、積雪荷重の評価に関わる有効性を述べると、次のようになる。

屋根雪の滑落は、屋根雪の位置エネルギーすなわち積雪荷重（重さ）を利用して処理する方法である。従って、屋根上の積雪量が多いほど、滑落する能力が増

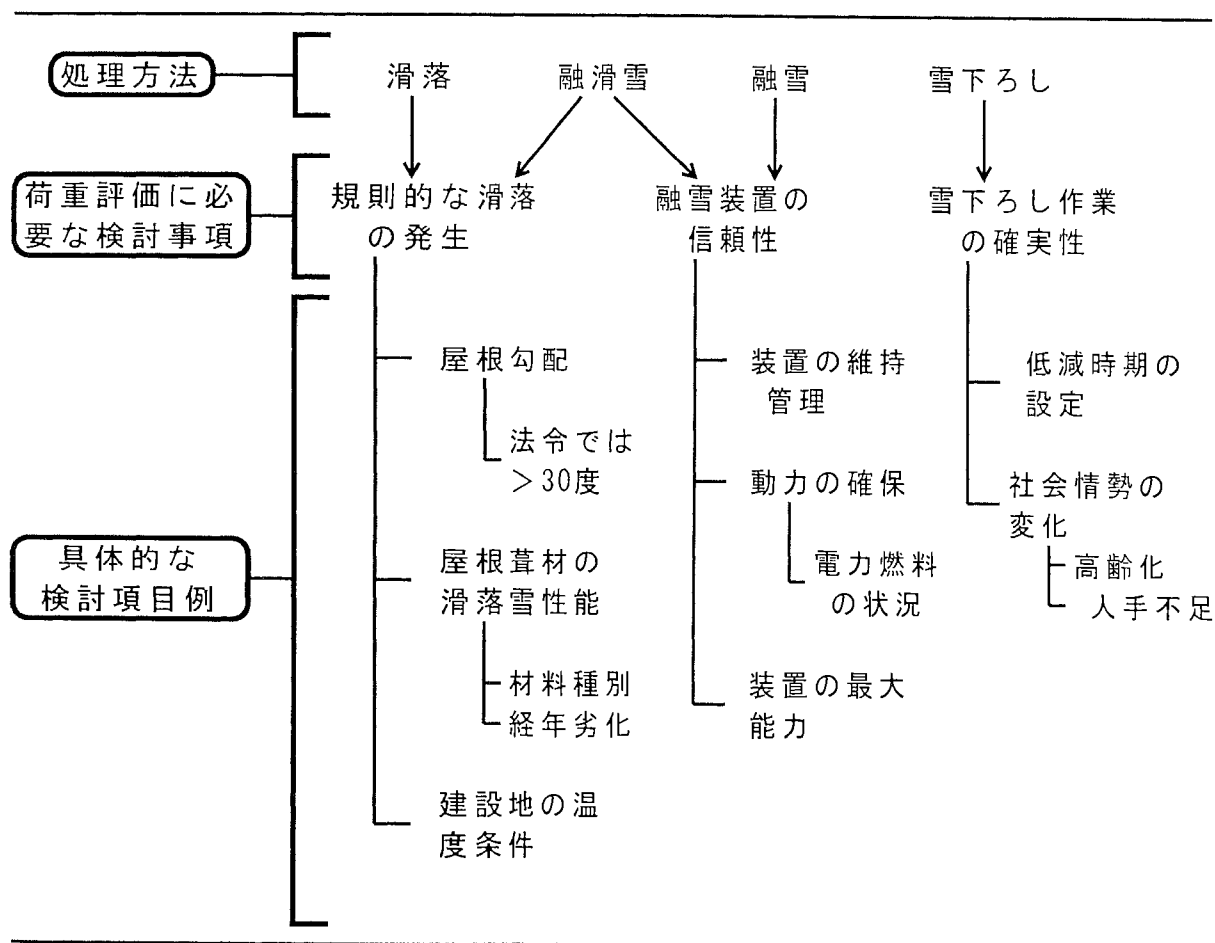


図1-1 屋根雪処理の方法と荷重評価の際に必要な検討項目



加するため、多雪時に対応しやすい方法である。さらに、人工的に屋根上の雪を排除する他の屋根雪処理とは異なり、雪処理作業に人間や機械装置が介入することがない。そのため、ヒューマンエラーや装置の作動不良が発生しにくい。このことから、近年、危惧されている雪氷災害と他の自然災害とが複合的に発生し、都市のライフラインが途絶<sup>15)</sup>した場合においても、屋根雪処理の性能は低下しない。このような「屋根雪の滑落」の特徴に対し、「融滑雪処理」、「融雪処理」では、災害時の停電等で屋根雪の処理が困難となる。「雪下ろし」の場合は、住民の高齢化や人手不足等の社会情勢の変化への対応に関する危険性が指摘されていると同時に<sup>4)</sup>、小・中学校の体育館のように、建築面積が大きな建物では雪下ろしの作業量が膨大になる。

このように積雪荷重の評価に間接的な影響を及ぼす「災害」、「社会情勢への対応」を考えると、「屋根雪の滑落」は、他の屋根雪処理に比べて有効な荷重制御手法と考える。なお、屋根雪の処理性能は、図1-1中に示したように、建設地の温度条件や屋根葺材の種別に大きく依存する。「屋根雪の滑落」が有効な荷重制御手法となるためには、建設地の温度条件や屋根葺材の種別を十分に考慮する必要がある。

### 1. 3 既往の研究における勾配屋根の積雪荷重評価

---

地上積雪深は、一度の降雪によって最大となるのではなく、降雪・変態（圧密、融解等）による積雪の増減を繰り返しながら、一般的には2月中旬頃に年最大積雪深となる<sup>16)・17)</sup>。屋根上積雪深においても、地上の積雪と同様に降雪・変態を繰り返しながら屋根上の最大積雪深になる。しかし、屋根上積雪深は、屋根形状毎に大きく異なるため、単純に地上積雪深＝屋根上積雪深と捉えることはできない。例えば、陸屋根上の積雪は滑落することがないため、地上積雪深と同様に「降雪・変態」の繰り返しによって最大値となる。一方、勾配屋根上の積雪は、陸屋根と同様「降雪・変態」の影響を受けるものの、雪が頻繁に滑落する。そのため、地上積雪深が最大となる2月中旬になると、陸屋根と勾配屋根の屋根上積雪深には、大きな差が生ずる。すなわち、これら屋根形状の違いを考慮した合理的な積雪荷重を評価するためには、屋根形状による積雪状況の差を十分に考慮する必要がある。このような観点から、屋根形状を陸屋根と勾配屋根とに大別し、それぞれの屋根における積雪荷重評価について、既往の研究を整理すると次のようになる。

## 陸屋根における積雪荷重評価に関する研究

陸屋根における積雪荷重は、通常、屋根上の積雪深に単位積雪重量を乗ずることで算出される。屋根上の積雪深は、地上積雪深に屋根形状係数を乗ずることで算出される。ここで、陸屋根における積雪荷重評価に関連する既往の研究を整理すると次のようになる。

陸屋根における積雪荷重算定の基礎となる地上積雪深に関する研究をみると、和泉ら<sup>1<sup>8</sup>)</sup>、桜井<sup>1<sup>9</sup>)</sup>の解析によって、年最大地上積雪深の統計的な性質が明らかにされており、気象資料からこの値を予測することが可能となっている。

次に、屋根形状係数（地上積雪深と屋根上積雪深との差）に関する研究をみると、森ら<sup>2<sup>0</sup>)</sup>、Thorburnら<sup>2<sup>1</sup>)</sup>、大野ら<sup>2<sup>2</sup>)</sup>、Taylor<sup>2<sup>3</sup>)</sup>、和泉ら<sup>2<sup>4</sup>)</sup>、苔米地<sup>2<sup>5</sup>)</sup>、三橋<sup>2<sup>6</sup>)</sup>等によって陸屋根の屋根上積雪状況が数多く実測されている。このような実測結果（180棟分）に基づいて、新井ら<sup>2<sup>7</sup>)</sup>は、屋根形状係数の算定方法について検討を行っている。これら屋根形状係数に関する研究結果を要約すると、陸屋根における屋根上積雪深は、地上に比べて小さくなる。地上積雪深に対する屋根上積雪深の割合を係数化した屋根形状係数は、冬期間の風速とパラペットの高さとを考慮することで算出できることが明らかとなっている。

屋根上積雪の単位積雪重量に関しては、中村<sup>2<sup>8</sup>)</sup>による積雪断面観測、前田<sup>2<sup>9</sup>)</sup>による平均密度測定、城ら<sup>3<sup>0</sup>)</sup>による気象資料解析から検討が行われている。これらの中でも城らによる検討では、年最大地上積雪深から単位積雪重量の最大値を予測する式が提案されている。

## 勾配屋根における積雪荷重評価に関する研究

勾配屋根における積雪荷重は、先に示した陸屋根の場合と同様、屋根上の積雪深に単位積雪重量を乗ずることで算出される。但し、勾配屋根では、屋根雪が頻繁に滑落する。すなわち、この屋根における積雪荷重を算出しようとする場合は、陸屋根と同様に地上積雪深の推移を把握するのみでなく、雪が滑落することも考慮する必要がある。ここで、勾配屋根における積雪荷重評価に関連する研究を概観すると次のようになる。

始めに、勾配屋根における屋根形状係数に関する研究をみると、苔米地<sup>2<sup>5</sup>)</sup>の粉体風洞実験、川上<sup>3<sup>1</sup>)</sup>の数値シミュレーションによる推定等が行われている。これらの研究を要約すると、勾配屋根の屋根上に堆積する積雪深は、地上に比べて小さな値となる。屋根形状係数は、切妻屋根、アーチ型屋根のような単純な形状の場合、屋根勾配を指標とした評価が可能であることが明らかとなっている。

次に、勾配屋根における屋根上積雪状況を実測調査した研究についてみると、

木村<sup>32, 33, 34)</sup>、清原<sup>35)</sup>は、一般住宅における勾配屋根の屋根上積雪状況を実測している。近年では、小竹ら<sup>5)</sup>、倉橋ら<sup>6)</sup>、山口<sup>9)</sup>によって大規模構造物のビデオカメラによる無人観測が行われている。また、Sackら<sup>36)</sup>は、低温室内に設置した模擬屋根上に50年再現期待値相当の雪を堆積させ、勾配屋根における積雪荷重の低減効果について検討を行っている。これら研究を要約すると、勾配屋根では頻繁に滑落が発生するため、積雪荷重が陸屋根に比べて小さくなることが明らかとなっている。しかし、屋根雪の滑落は、屋根勾配や屋根葺材の種別、雪質等によって大きく異なるため、陸屋根のように実測結果に基づいた評価手法が提案されていない現状にある。

ここで、屋根雪の滑落は、屋根葺材と屋根雪との凍着抵抗力や摩擦抵抗力、雪の引張・せん断抵抗力、屋根面の温度、雪質、屋根面の温度条件に大きく影響を受ける。すなわち、滑落を支配する諸抵抗力の特性が明らかとなれば、実測調査によらなくても屋根雪の滑落を定量的に評価することが可能になる。これらの抵抗力に関する研究の現状についてみると、次のようになる。

凍着抵抗力に関する基礎的研究、すなわち雪氷体と固体物質（屋根であれば屋根葺材）との低温時の付着現象は、井上<sup>37)</sup>、Jellinek<sup>38)</sup>、水野ら<sup>39, 40)</sup>、竹内<sup>41)</sup>等によって、雪および固体物質の性状の面から検討が行われている。屋根雪を対象とした研究をみてみると、前田<sup>11)</sup>、上野ら<sup>42)</sup>、清水ら<sup>43)</sup>、苫米地ら<sup>44)</sup>等によって、凍着抵抗力の温度依存性、屋根葺材の種別による影響が検討されている。

摩擦抵抗力については、スキーの摩擦機構について検討したbowden<sup>45)</sup>の研究、藤岡ら<sup>46)</sup>による雪橇の摩擦に関する研究を基礎として、前田<sup>11)</sup>、対馬<sup>47)</sup>、渡辺ら<sup>12, 13)</sup>、伊東ら<sup>14)</sup>等が、主に金属板の屋根葺材を対象とした検討を行っている。また近年、建設が進められている大規模膜構造物に関しては、大塚ら<sup>48)</sup>、山口<sup>9)</sup>等が検討している。これらの研究の中でも、屋根葺材の種別によって滑落特性が大きく異なることを明示した渡辺らの研究、さらに、この結果を基にして屋根葺材の経年劣化の影響を検討した伊東らの研究は、勾配屋根における屋根雪の滑落を評価する際に、屋根葺材の影響を考慮する必要性を示した点で重要な研究と考える。

屋根雪の滑落が多方向で発生する切妻やかまぼこ型等の屋根形態では、屋根頂部の積雪に亀裂が入った後に滑落する。従って、積雪の引張・せん断抵抗力は、屋根雪の滑落を説明する上で重要な検討項目である。積雪の引張やせん断抵抗力を扱った研究は雪崩の発生機構に関する研究が主で、渡辺<sup>49)</sup>、成田<sup>50)</sup>がこれらの抵抗力と雪密度との関係等を検討している。屋根雪の滑落を対象として、積雪の引張抵抗力を測定した例には、大塚ら<sup>48)</sup>の研究がある。

次に、屋根面の温度条件についてみてみると、伊東ら<sup>5.1)</sup>は、実験建物を用いて屋根面の温度分布を測定し、外気温や風速の影響で屋根部位に温度むらが生じることを明らかにしている。さらに、屋根雪の滑落雪開始時の屋根面温度も検討している<sup>5.2)</sup>。既存建物を対象として屋根面温度を実測したものには、渡辺らの研究<sup>5.3)</sup>等がある。

以上に示した既往の研究の概略から、陸屋根、勾配屋根における積雪荷重を評価の現状を整理すると、次のようになる。

1) 陸屋根における屋根雪は、滑落するすることが殆どないため、屋根上積雪状況の実測調査が数多く行われており、地上積雪深との差異も把握されている。また、陸屋根の積雪深が最大となる時期は、地上積雪深が最大となる時期と重なることから、気象資料を用いた解析によって、積雪荷重の評価手法が提案されている。

2) 勾配屋根では、屋根雪が頻繁に滑落し、滑落の度に屋根上積雪深が大きく変動する。すなわち、勾配屋根における積雪荷重を評価する場合には、屋根雪の滑落を定量的に評価する必要がある。勾配屋根における屋根上積雪深は、屋根雪が滑落するために、地上積雪深に比べて小さくなることが既往の実測調査から明らかとなっている。しかし、屋根雪の滑落は、屋根勾配や屋根葺材の種別、雪質等によって大きく異なることから、実測結果のみに基づいた滑落の評価手法が提案されていない現状にある。

3) 屋根雪の滑落は、屋根葺材と屋根雪との凍着・摩擦抵抗力、積雪の引張・せん断抵抗力に大きく影響を受ける。すなわち、滑落を支配する諸抵抗力の特性が明らかとなれば、実測調査によらなくても屋根雪の滑落を定量的に評価することが可能になる。これらの研究の現状をみると、各抵抗力の基礎特性は明らかとなっている。しかし、各抵抗力の特性を組み合わせる屋根雪の滑落を定量的に評価した例はなく、勾配屋根における積雪荷重と滑落との関係性を評価できる段階に到達していない現状にある。

## 1. 4 本論文の構成

---

本論文は、図1-2に示す全編7章で構成されている。各章の内容は、以下の通りである。

第1章は「序論」であり、本研究の目的、意義および本論の構成を述べている。

第2章は「勾配屋根における積雪荷重評価の変遷と現状」である。この章では、始めに、屋根形状別に屋根上積雪深の増減プロセスを整理し、勾配屋根における積雪荷重推移の特徴を整理した。次に、勾配屋根における積雪荷重評価の変遷について整理し、現行法令で示されている評価体系の成立過程や根拠について検討した。さらに、法令以外の指針や諸外国の積雪荷重評価の手法から、積雪荷重評価に必要な指標について整理した。これらのことから、屋根勾配を持つ建物における積雪荷重評価の現状と問題点を明確にした。

第3章は「勾配屋根における屋根雪の滑落条件」である。この章では、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の前提条件について検討を行った。屋根雪は、一般に、全体に移動して滑落することが希で、屋根の棟やげらばに雪が残る部分滑落が多い。このような屋根雪の部分滑落は、規則的な雪の滑落を抑制すると同時に、屋根上積雪深の偏分布を招く。屋根上の積雪が不均一に堆積した場合、屋根上積雪深の増減状況を把握することが極めて困難になる。増減状況を把握できない場合には、構造上の安全を考えて、滑落が発生しない屋根と同等の積雪荷重評価にせざる得ない。本章では、既存建物における屋根上積雪状況を観察し、勾配屋根における部分滑落の発生要因を整理した。その要因に基づいて、既存建物で発生している部分滑落のモデル実験を行った。これらのことから、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価に必要な評価の前提条件を明らかにした。

第4章は「屋根葺材の表面性状が滑落抵抗力に及ぼす影響」である。屋根葺材の表面性状は、屋根葺材の種別によって大きな差が生じ、屋根雪の滑落特性に影響を及ぼす。このことから、本章では、屋根雪の滑落を支配する主要な抵抗力として、凍着・摩擦抵抗力に着目し、これら抵抗力に影響を及ぼす屋根葺材の表面性状について検討を行った。始めに、屋根葺材の表面粗度を示す表面粗さが凍着・摩擦抵抗力に及ぼす固有の影響について検討を行った。次に、屋根葺材の撥水性を示す接触角が凍着・摩擦抵抗力に及ぼす固有の影響について検討を行った。これらの結果から、勾配屋根の積雪荷重評価において、屋根葺材の材料種別を考慮する場合に必要な評価指標について考察を行った。

第5章は、「屋根雪の雪質が滑落抵抗力に及ぼす影響」である。前章に示した

凍着・摩擦抵抗力は、屋根葺材の表面性状のみではなく、気象条件や屋根雪の雪質等にも大きく影響を受ける。このことから、本章では、凍着・摩擦抵抗力に影響を及ぼす外気温特性、雪粒径の影響について検討を行った。始めに、凍着抵抗力に影響を及ぼす外気温について既往の研究を整理し、この抵抗力の温度依存性を明らかにした。次に、摩擦抵抗力に影響を及ぼす雪物性を整理するとともに、実際の建物・モデル建物における雪粒径変化を観測した。この結果に基づいて、屋根雪の経時的な雪粒径の変化が摩擦抵抗力に及ぼす影響について実験を行った。これらのことから、勾配屋根の積雪荷重を評価する場合、外気温の推移、および雪粒径の変化を評価指標として用いる必要があることを明らかにした。

第6章は「勾配屋根における屋根雪の滑落と積雪荷重評価」である。現行の日本建築学会建築物荷重指針をみると、屋根雪が滑落する場合の積雪荷重は、積雪荷重が継続的に作用する日数を明らかにしたのち、この日数内に積もり得る最大積雪深から算出する必要がある。そのため、屋根雪の滑落に要する日数を算出し、荷重の継続日数を明らかにする必要がある。本章では、前章までに得られた知見を基に、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価手法について検討を行った。屋根雪の滑落に要する日数は、前章までに示した滑落を支配する抵抗力の特性を考慮し、気象資料から統計的に算出する新しい考え方を提案した。このことから、勾配屋根における積雪荷重の継続日数が定量的に評価可能であることを明示した。

第7章は、「結論」である。本章では、本研究で得られた成果を要約し、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価に関する考え方を統括的に述べている。

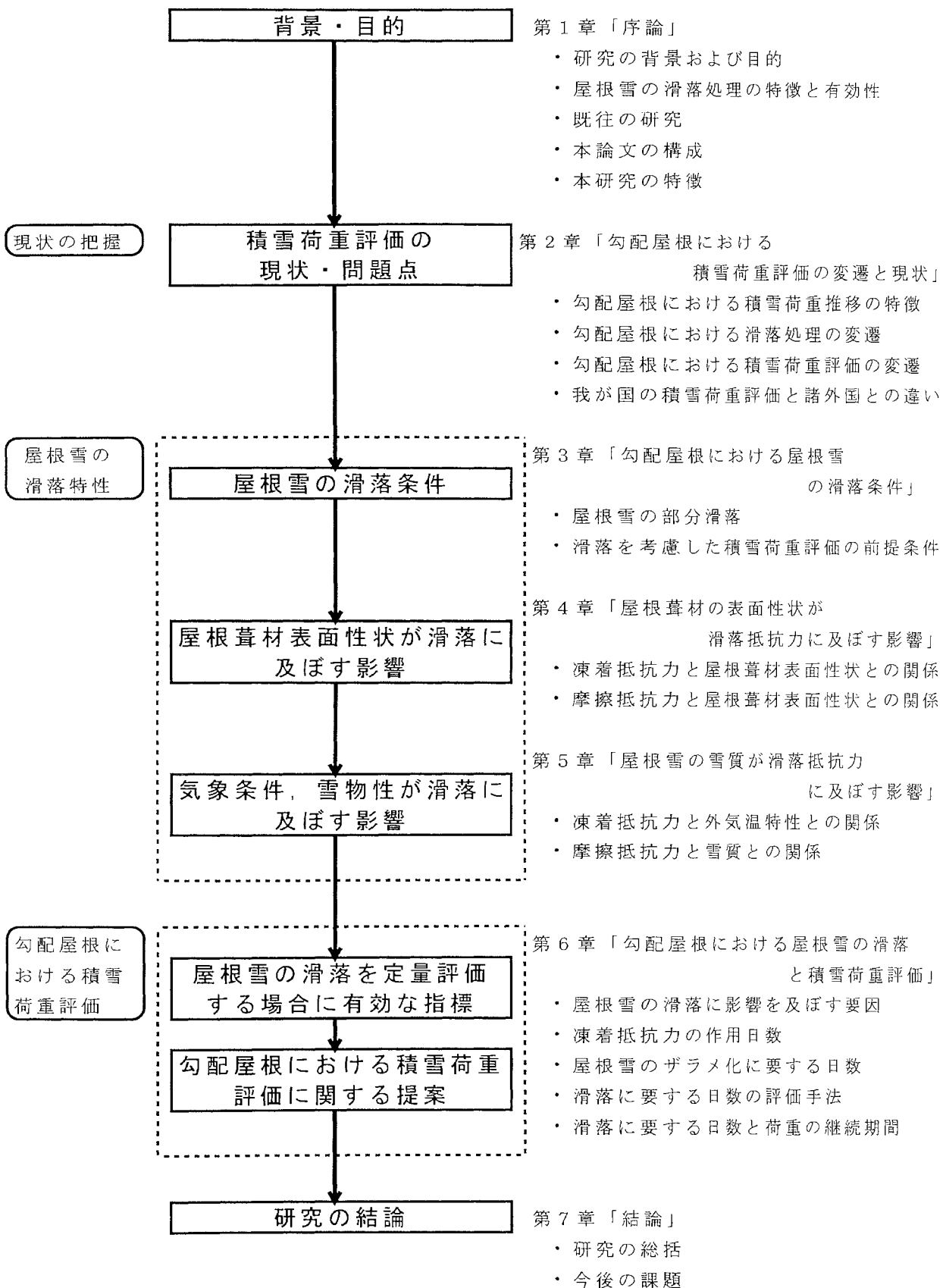


図1-2 本研究の構成

## 1. 5 本研究の特徴

---

本研究の特徴は次の通りであり、本論文のオリジナリティもここにある。

1) 既往の研究によれば、屋根雪は、全体に移動して滑落することが希で、屋根の棟やけらばに雪が残る部分滑落が多いことが指摘されている。屋根雪の部分滑落は、屋根上積雪の偏分布を招き、滑落を考慮した積雪荷重評価を困難にする。しかし、このような屋根雪の滑落形態に関する研究は殆どなく、滑落を考慮した積雪荷重評価の前提条件は明らかとなっていない。本研究では、屋根雪の滑落形態の特徴について検討を行った。その結果、屋根雪の部分滑落は、屋根上積雪の偏分布を招くと同時に、一定条件での規則的な滑落を阻害することが明らかとなった。このことから、勾配屋根における滑落を考慮した積雪荷重評価を行う前提条件として、棟部に雪切り板を設置する等、屋根雪の部分滑落が発生しないような工夫を行う必要性があることを明示した。

2) 屋根雪の滑落に関する既往の研究の多くは、屋根葺材の表面性状が滑落に及ぼす影響を明らかにすることに主眼が置かれていたため、雪質が滑落に及ぼす影響を定量的に評価するまでに至っていない。しかし、屋根雪の雪質は屋根上に堆積している数日間において不変ではなく、数日間であってもその物性が大きく変化する。このことから、屋根雪の滑落を評価する場合、雪質に関わる要因を無視できないと言える。本研究では、屋根雪の雪質変化が滑落に及ぼす影響を実験的に検討した。具体的には、実際の屋根上で数日間のうちに起こり得る雪粒子の粗大化が屋根雪の滑落に及ぼす影響について検討を行った。この検討結果から、屋根雪の滑落を評価する場合に雪質の影響を考慮する必要があることを指摘し、雪粒径の大きさを指標にすることで雪質が滑落に及ぼす影響が定量的に評価可能であることを明らかとした。

3) 日本建築学会建築物荷重指針に基づいて、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合、個々の建物毎に屋根雪の滑落状況を屋外観測によって検証する必要がある。個々の建物毎に屋外観測を行い、屋根雪の滑落を検証する積雪荷重の評価手法は、汎用性に乏しいと同時に多くの観測費用を要することから、必ずしも広く普及していると言えない現状にある。このような積雪荷重評価となっている背景には、屋根雪の滑落を支配する要因が十分に明らかにされていないため、実測以外で屋根雪の滑落性能を評価するのが難しいことが挙げられる。本研究で



は、前述2)で示した結果に加えて既往の研究結果を整理し、気象資料から屋根雪の滑落を定量的に評価可能であることを示した。さらに、気象資料を用いて屋根雪が滑落するまでに要する日数、すなわち、積雪荷重の継続期間を評価する手法を提案した。荷重の継続期間が気象資料から定量的に評価可能な場合、屋外観測に依存しないで積雪荷重を算出することが可能となる。この考え方に基づき、屋根雪の滑落現象に対応した積雪荷重評価の新しい手法を提案した。これらのことから、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の汎用性向上に寄与できる資料を提示した。

## 第 1 章 参考文献

---

- 1) 日本建築学会編：豪雪被害概報，建築雑誌，pp. 333-359, 1963. 6
- 2) 日本建築学会編：昭和56年豪雪被害調査報告，pp. 106-112, 1981. 12
- 3) 小林俊一，他：1996年豪雪による広域雪氷災害の実態調査，平成7年度文部省科学研究補助金総合研究(A)研究成果報告書，1996. 3
- 4) 三橋博三：耐雪設計と積雪荷重の評価，日本雪工学会誌，Vol. 14, No. 3, 1998. 7
- 5) 小竹達也，他4名：積雪地域に建設される膜構造物における屋根上積雪荷重の評価について，日本建築学会技術報告集，第3号，pp. 34-39, 1996. 10
- 6) 倉橋勲，他4名：（仮称）但馬ドームの積雪荷重の検討，日本建築学会技術報告集，第5号，pp. 91-95, 1997. 12
- 7) 建築学会編：戦時建築規格欄（第1報），建築雑誌，第58輯，第712-3号，pp. 281-284, 1944. 9
- 8) 飛田春雄：屋根小論，明現社，pp. 7-13, 1993. 3
- 9) 山口英治：膜構造建築物における制御積雪荷重に関する研究，北海道工業大学学位論文，1998. 3
- 10) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説，第5章 積雪荷重，pp. 168-235, 1993
- 11) 前田博司：金属屋根における積雪の滑落，日本雪氷学会誌，第41巻，3号，pp. 199-204, 1979. 9
- 12) 渡辺正朋，平井和喜：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との静摩擦，日本雪工学会誌，第3号，pp. 1-11, 1987. 6
- 13) 渡辺正朋，平井和喜他：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
- 14) 伊東敏幸，苫米地司，星野政幸：劣化した屋根用塗装鋼板の表面性状と滑雪性について，日本雪工学会誌，Vol. 10, No. 2, pp. 2-10, 1994. 4
- 15) 山形敏明：北海道における市街地を対象とした雪氷防災に関する研究，北海道工業大学学位論文，1997. 3
- 16) 日本建設機械化協会編：新編防雪工学ハンドブック，pp. 7-15, 1993. 9
- 17) 高橋博，他：雪氷防災，第1章，降積雪現象，pp. 39-42, 白亜書房，1986. 12
- 18) 和泉正哲，三橋博三，高橋徹：年最大積雪深の確率統計的性質と再現期間推定法，日本建築学会構造系論文集，第390号，pp. 49-58, 1988. 8
- 19) 桜井修次：建築物設計用雪荷重に関する基礎的研究，北海道大学学位論文，1996. 3
- 20) 森晴勇，新井健一：陸屋根の積雪荷重の実態について，第8回日本建築学会北海道支部研究発表会論文集，pp. 47-50, 1954. 5
- 21) Thorburn H. J., et al., : Recent failures point out importance of of snow loads on roofs, Natioal Builder Vol.5, No.5, pp.18-21, 1988
- 22) 大野和夫，新井健一：札幌市内における積雪荷重の実体，第16回日本建築学会北海道支部研究発表会論文集，pp. 6-10, 1960. 3

- 23) Taylor, D. A : A survey of snow on the roofs of arena-type buildings in Canada, Canadian Journal of Civil Engineering Vol.6 , pp.85-96 , 1979
- 24) 和泉正哲, 他 3 名 : 積雪荷重の評価に関する基礎的研究 (その 1 ~ 8) , 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.1025-1041, 1984.10
- 25) 苫米地司 : 乾雪地帯における屋根上積雪形状に関する基礎的研究, 東北大学学位論文, 1986
- 26) 三橋博三, 高橋徹 : 雪荷重の設定に関する一考察, 第 4 回雪工学シンポジウム論文集, pp.71-78, 1988.1
- 27) 新井寛, 苫米地司 : 屋外調査資料を用いた屋根上積雪荷重の評価に関する研究, 寒地技術論文・報告集, Vol.12, No.1, pp.453-458, 1996.11
- 28) 中村勉, 阿部修 : 陸屋根上の積雪の断面観測とその積雪底部での融解, 国立防災科学技術センター研究報告, 第19号, pp219-228, 1978
- 29) 前田博司 : 雪荷重の評価に関する基礎的研究 (その 1 積雪の平均密度について) , 日本建築学会構造系論文集, 第319号, pp.32-38, 1982.9
- 30) 城攻, 桜井修次 : 多雪地帯における等価単位積雪重量について, 日本雪工学会誌, Vol.9, No.2, pp.22-24, 1993.4
- 31) 川上俊一, 植松孝彦, 苫米地司 : 数値シミュレーションによる屋根上積雪形状の推定に関する研究, 第11回日本雪工学大会論文報告集, pp.207-212, 1994.11
- 32) 木村幸一郎 : 屋上積雪の防御に関する研究 (第 1 報) , 建築学会論文集, 第25号, pp.114-120, 1942.4
- 33) 木村幸一郎 : 屋根積雪の自然落下について, 日本雪氷学会誌, 第 5 卷, 第 7 号, pp.6-9, 1943.7
- 34) 木村幸一郎 : 屋上積雪の防御に関する研究 (第 2 報) , 屋根葺材と屋根雪との摩擦について, 日本雪氷学会誌, 第 8 卷, 第 5 号, 1946.12
- 35) 清原潔 : 住宅屋上積雪の建築計画的取り扱い方法に関する研究, 北海道寒地建築研究所研究報告, No.5, 1960.2
- 36) Sack, R. L., et al., : Cold Room Studies for Sliding Snow, First International Conference on Snow Engineering, pp.199-209, 1988
- 37) 井上力太, 本田正 : 固体面と積雪の付着の実験, 日本雪氷学会誌, 第17巻, 1 号, pp.18-20, 1955
- 38) Jellinek, H. H. G. : Adhesive Properties of Ice, Journal of colloid Science, Vol.14, pp.268-280, 1959
- 39) 水野悠紀子, 若浜五郎 : 湿雪の付着強度, 低温科学物理編, 第35輯, pp.133-145, 1977
- 40) 水野悠紀子, 若浜五郎 : 融点以下での着雪に関する実験的研究, 低温科学物理編, 第38輯, pp.17-32, 1979
- 41) 竹内政夫 : 道路標識への着雪とその防止, 日本雪氷学会誌, 第40巻, 3 号, pp.117-127
- 42) 上野学, 他 3 名 : 雪氷に対する屋根鋼板の特性評価, 日本雪氷学会誌, 第49, 3 号, pp.131-137, 1987.9
- 43) 清水増治郎, 木村忠志 : 氷点下における雪の屋根材への付着, 雪氷, 第54巻, 3 号, pp.269-275, 1992.9

- 44) 苔米地司, 伊東敏幸: 屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究 (第1報 屋根雪と屋根葺材との凍着性状について), 日本雪氷学会誌, 第56巻, 3号, pp. 215-222, 1994. 9
- 45) Bowden, F. P. : Friction on Snow and Ice, Proceeding Royal Society, A217, pp.462-478, 1958
- 46) 藤岡敏夫, 他: 雪橇の抵抗 I ~ VI, 低温科学物理編, 第5輯, pp. 85-91, 1950, 第13輯, pp. 38-47, 1954, 第14輯, pp. 43-54, 1955, 第17輯, pp. 31-51, 1958, 第20輯, pp. 159-179, 1962, 第21輯, pp. 31-44, 1963
- 47) 対馬勝年: 金属平板と氷との摩擦実験, 昭和56年日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp. 5, 1981
- 48) 大塚清敏, 他5名: 膜構造物の屋根雪処理に関する研究, 膜構造研究論文集'90, No. 4, pp. 55-67, 1990. 12
- 49) 渡辺善八: 積雪の物理的特性, 雪氷の科学, 山形・雪の国際シンポジウム講演集, pp. 31-39, 1985
- 50) 成田英器: 雪の引張強度の試料体効果, 日本雪氷学会誌, 第49巻, 3号, pp. 115-121, 1987. 9
- 51) 伊東敏幸, 苔米地司, 三橋博三: 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
- 52) 伊東敏幸, 苔米地司, 三橋博三: 屋根雪滑落による屋根葺材の磨耗現象に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第477号, pp. 1-8, 1995. 11
- 53) 渡辺正朋, 月永洋一, 月舘敏栄: 積雪下における屋根面温度の実測 (青森市の鉄板葺住宅を実例として), 第6回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 113-118, 1989. 11

## 第2章 勾配屋根における積雪荷重評価の変遷と現状

	pp.
2.1 はじめに -----	2- 1
2.2 勾配屋根における屋根上積雪深の増減プロセス -----	2- 3
2.3 勾配屋根における積雪荷重評価の変遷 -----	2- 5
2.3.1 滑落処理の成立過程 -----	2- 5
2.3.2 屋根雪の滑落処理と積雪荷重法令との関係 -----	2-10
2.4 勾配屋根における積雪荷重評価の現状 -----	2-14
2.5.1 建築基準法による評価基準の概要 -----	2-14
2.5.2 日本建築学会建築物荷重指針による評価基準の概要 -----	2-15
2.5.3 諸外国およびISOにおける評価基準の概要 -----	2-16
2.5.4 我が国における積雪荷重の評価基準と諸外国の基準との対比	2-18
2.5 まとめ -----	2-20
参考文献 -----	2-22

## 第2章 勾配屋根における積雪荷重評価の変遷と現状

### 2.1 はじめに

多雪地域における地上積雪深は、一度の降雪によって最大となるのではなく、何度かの降雪を経て最大積雪深になる。この過程で積雪層は、降雪が発生する毎に増加する経過をたどりながら、変態（圧密，融解等）によって積雪深が減少する経過をも同時に受ける<sup>1)</sup>。このように、地上積雪深は、降雪・変態による積雪の増減を繰り返しながら、一般的には2月中旬頃に年最大積雪深となる<sup>2)</sup>。屋根上の積雪深においても、地上の積雪深と同様に降雪・変態を繰り返しながら屋根上の最大積雪深になる。しかし、屋根上の積雪は、写真2-1のように、建物属性（屋根形状，屋根葺材の種類，使用状況等）によって、その積雪状況は異なる。そのため、建築物における合理的な積雪荷重を評価するためには、これらの属性の差異による積雪状況を十分に把握することが重要となる。

建物属性の差異を陸屋根と勾配屋根とに大別し、屋根上積雪深が最大となるプロセスを比較すると、次のようになる。陸屋根の屋根雪は、滑落したりすることがないため、地上積雪深と同様に「降雪・変態」の繰り返しによって最大値となる。一方、勾配屋根の屋根上積雪深は、陸屋根と同様「降雪・変態」の影響を受けるものの、雪が頻繁に滑落する。そのため、地上積雪深が最大となる2月中旬になると、陸屋根と勾配屋根の屋根上積雪深には、大きな差が生ずる。すなわち、勾配屋根を持つ建築物の積雪荷重を算出しようとする場合は、陸屋根と同様に地上積雪深の推移を把握するのみでなく、屋根雪が滑落することも考慮する必要がある。

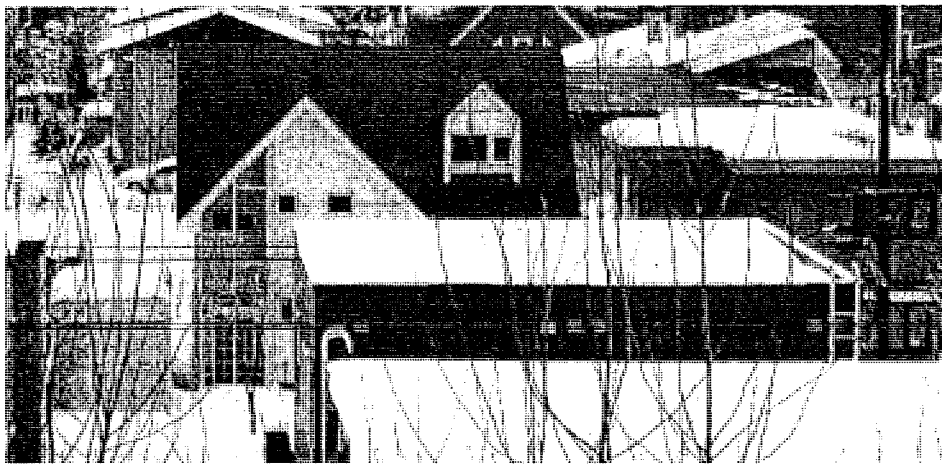


写真2-1 陸屋根と勾配屋根の積雪状況（手前：陸屋根，奥：勾配屋根）

勾配屋根の積雪荷重の評価方法について建築基準法をみると、屋根雪の滑落を評価する指標として屋根勾配が提示されている。しかし、雪の滑落は、屋根勾配のみでなく、屋根葺材の種類や雪質、気温等の影響も受けるため<sup>3)・4)・5)</sup>、十分な評価を行っているとは考えにくい。すなわち、勾配屋根における積雪荷重の評価体系は、十分に整備されていない現状にある。

このような背景から本章では、勾配屋根における積雪荷重評価の変遷と現状を明らかにすることを目的に、以下のことについて検討を行った。始めに、屋根形状別に屋根上積雪深の増減プロセスを整理し、勾配屋根における積雪荷重推移の特徴を整理した。次に、勾配屋根における積雪荷重評価の変遷について整理し、現行法令で示されている評価体系の成立過程や根拠について検討を行った。さらに、法令以外の指針や諸外国の積雪荷重評価の手法から、積雪荷重評価に必要な指標について整理した。これらのことから、屋根勾配を持つ建築物における積雪荷重評価の現状と問題点について考察する。

## 2. 2 勾配屋根における屋根上積雪深の増減プロセス

---

屋根上の積雪は、地上の積雪と同様に降雪・変態の影響を受けながら年最大の屋根上積雪深となる。しかし、最大積雪深に至るプロセスは、屋根の形状、屋根葺材の種類、建築物の使用状況等、建築物の属性によって大きく異なる。本項では、屋根の形状を「陸屋根」と「勾配屋根」とに大別し、各屋根形状での屋根上積雪深の増減プロセスを整理した。この結果から、勾配屋根における屋根上積雪の特徴について検討し、この屋根の積雪荷重を評価する際に必要な項目を明らかにする。

屋根上積雪深の増減プロセスを「陸屋根」と「勾配屋根」とに大別し、各屋根形状における屋根上積雪深の増減プロセスを整理すると、図2-1になる。図のように、陸屋根における屋根上の最大積雪深は、通常、地上積雪深に比べて小さな値となる。陸屋根上の積雪深が地上積雪深に比べて小さくなる要因には、降雪時の風速が関与することが指摘されている<sup>6) 7)</sup>。具体的には、高い建物や冬期間の風速が大きい地域になるほど、屋根上積雪深は小さくなる。ここで、最大積雪深に至るプロセスについてみると、陸屋根では「屋根面への降雪」←→「降雪した雪の変態」の繰り返しによって屋根上に積雪する。この繰り返し現象は地上積雪深と同様である。そのため、陸屋根の積雪深は、地上積雪深の経時推移に近似した形状となる。これらの特徴をみると、陸屋根の積雪荷重は、地上積雪深の経時的な推移と降雪時の風速とを考慮することで評価可能と言える。

勾配屋根における屋根上積雪深をみると、屋根上の最大積雪深は、陸屋根と同様、地上積雪深に比べて小さな値となる。しかし、その積雪深に至るプロセスは、地上積雪深の経時推移に近似した形状とならないため、地上積雪深の経時的な推移に基づいた評価のみでは、勾配屋根の積雪荷重を算出できない。具体的に最大積雪深に至るプロセスをみると、勾配屋根では「屋根面への降雪」←→「降雪した雪の変態」の繰り返しによって屋根上に積雪が堆積してゆく一方で、堆積した雪が滑落する。このように勾配屋根では、最大の地上積雪深となる時期が、必ずしも最大の屋根上積雪深になる時期に重ならない。このことから、積雪荷重を評価する際には、陸屋根と同様「降雪・変態」の影響を把握する一方で、滑落に関する考慮も行う必要がある。この滑落に関する検討を行わなければ、勾配屋根における合理的な積雪荷重評価は難しいと考える。



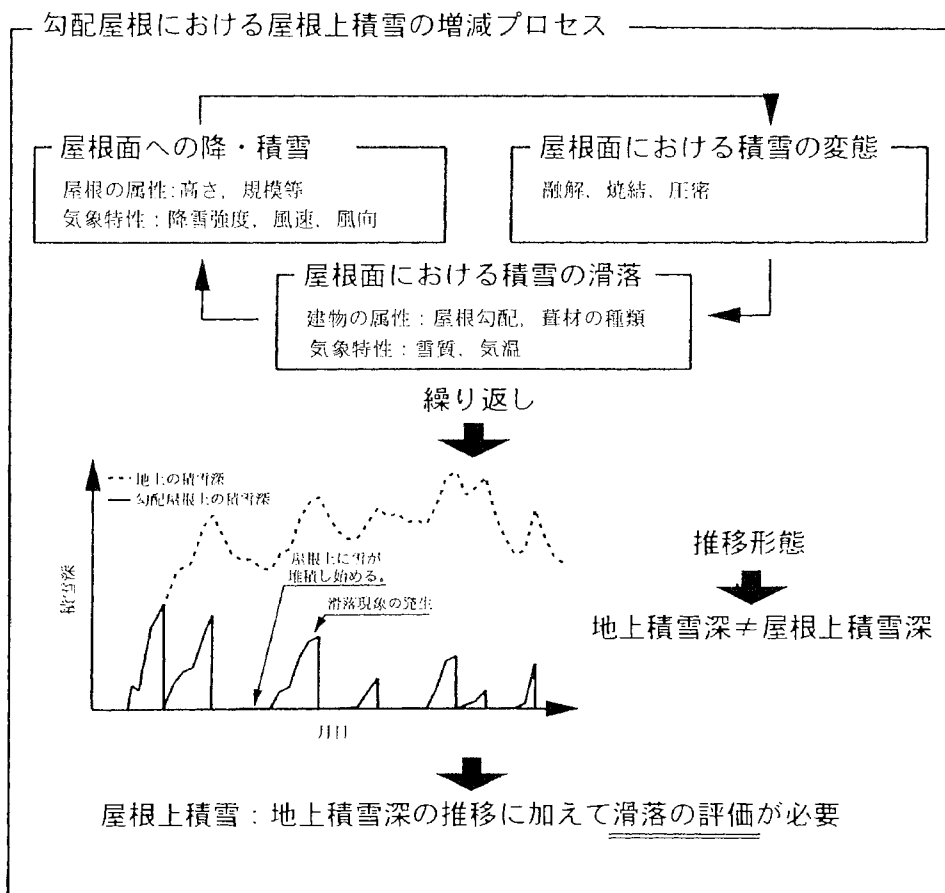
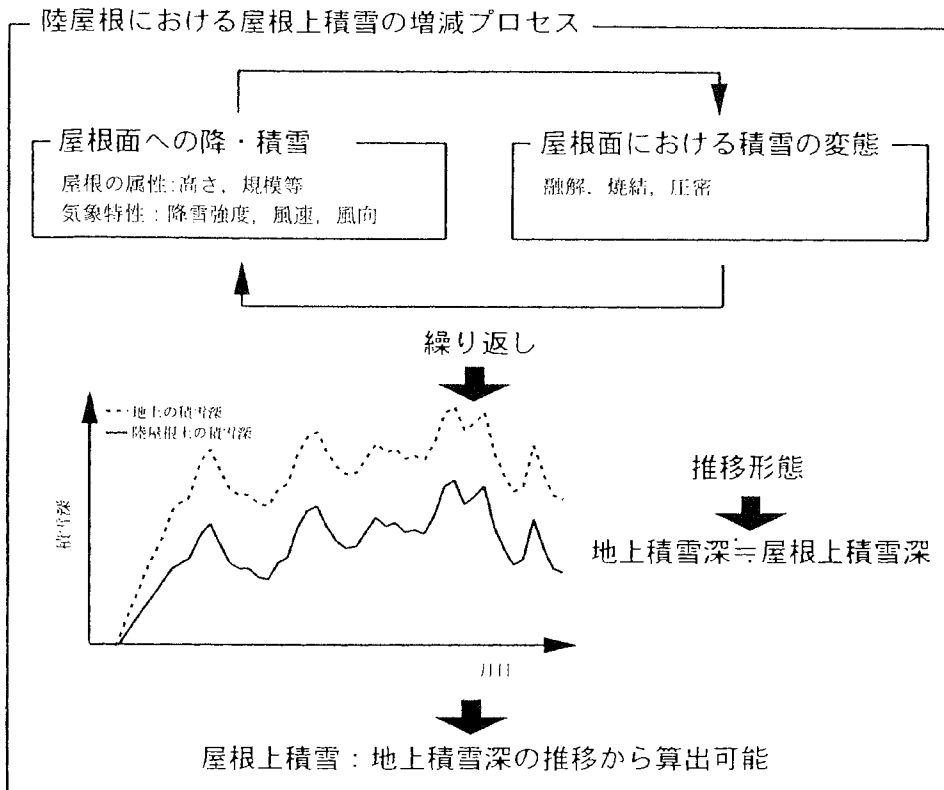


図2-1 屋根形状別にみた屋根上積雪深の増減プロセス

## 2. 3 勾配屋根における積雪荷重評価の変遷

勾配屋根では、屋根雪が滑落することを考慮しなければ、合理的な積雪荷重評価を行うことが難しい。ここで、現行の建築基準法をみると、勾配屋根における積雪荷重は、屋根勾配が $30^\circ$ を越える場合、勾配の増加に応じて、積雪荷重を低減することが可能となっている。すなわち、建築基準法は、屋根雪が滑落することを考慮した積雪荷重の評価体系を採っている。しかし、近年の研究成果をみると、屋根雪の滑落は屋根勾配のみでなく、屋根葺材の種類や気温等の影響を受けることが明らかとなっており<sup>3) 4) 5)</sup>、屋根雪の滑落に関して必ずしも十分な評価を行っているとは考えにくい現状にある。

このようなことから、本項では、現行の法令における勾配屋根の積雪荷重評価の変遷・背景を明らかにすることを目的に、次のことについて検討を行った。始めに、滑落処理の成立過程を整理し、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価が採り入れられるに至った背景を明らかにする。次に、滑落を考慮した積雪荷重評価が採り入れられた以後における評価手法の変遷について整理し、現行法令の評価基準の根拠について考察を行う。

### 2.3.1 滑落処理の成立過程

滑落処理は、屋根雪の位置エネルギーすなわち積雪荷重を利用して処理する方法である。そのため、処理機構が極めて単純であり、処理に要する専用の装置や装置稼働の電力や燃料を必要としない。その反面、処理の性能を左右する建物の特徴が不明瞭になる。例えば、勾配を有する屋根は多雪地域以外でも一般的であり、滑落処理を行う建物の屋根葺材として広く普及している塗装鋼板やスレートも多雪地域固有の屋根葺材ではない。このようなことから、滑落処理が成立する過程には、雪の滑落を目的にする以外の要因も大きく影響を及ぼしていると考えられる。このようなことから、本節では、表2-1のように、滑落処理の成立過程に関わる要因として、屋根葺材および雪害対策の変遷に着目し、これら時代変遷から、滑落処理が勾配屋根の積雪荷重評価に採り入れられるに至った背景を考察する。

#### 1) 屋根葺材の不燃化が行われる以前における雪の滑落

屋根雪の滑落には屋根勾配が大きく関わり、建築基準法にも示されているとおり、勾配が大きくなるほど滑落が発生しやすくなる。ここで、明治期以前に建設された建築物の一例として、写真2-2に世界遺産に登録された豪雪地帯に属する岐阜、富山の県境にある合掌造り建築物を示す。写真のように、この建築物は、

50～60°にもおよぶ急勾配の屋根を有しているものの、屋根が茅で葺かれているために、冬期間を通じて頻繁に雪の滑落が発生するわけではない。具体的には、1月になると気温が下がり、屋根雪が茅に凍り付くため、滑落しにくくなる。従って、1～2月の厳寒期では数回の雪下ろしを行うのが一般的である<sup>8)</sup>。このような建築物の特徴を考えると、多雪地域における建築物の屋根が茅等の可燃材料で葺かれていた時代は、滑落処理が存在しなかったと考える。すなわち、この時

表2-1 滑落処理の時代変遷

	明治以前	明治後期～大正期	昭和期
	雪下ろし主体の屋根雪処理	屋根の不燃化 ↓ 雪が滑落する屋根が出現	雪害対策 ↓ 雪下ろしの軽減を目的とした建築物の出現
茅葺屋根	茅、こけら葺き主体	屋根の不燃化が段階的に強化される 明治37年：小樽の大火、明治40年札幌の大火 明治37年：屋上規制令（屋根の不燃化） 明治39年：銅板の国内製造開始（官営八幡製鉄所） 大正末年：市外化建築物法	
板葺屋根		多雪地域での雪害対策の実施 昭和5年：雪害決議案（国会可決） 昭和7年：雪害対策協議会の設置（内務省） 昭和8年：積雪地方農村経済調査所の設置 昭和10年：日本雪氷協会の設立 昭和19年：戦時建築規格第532号	

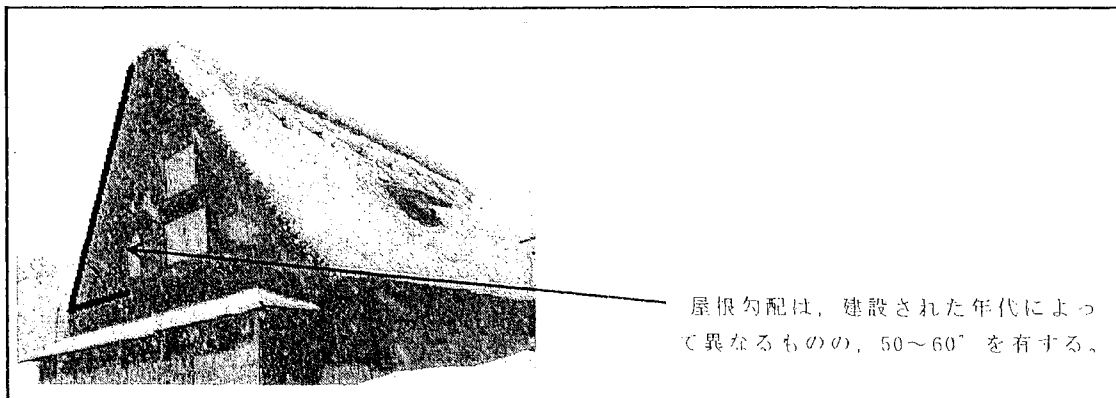


写真2-2 合掌づくりの建物

代では屋根雪の滑落処理を期待していたものの、処理性能が十分に確保できないために、雪下ろしの補助的な役割のみを担っていた段階と考える。

## 2) 屋根葺材の不燃化が規定され始めた頃の雪の滑落

一般に、塗装鋼板やスレート板を用いる勾配屋根では、屋根雪が頻繁に滑落することが知られている。現行の北海道建築基準法施行令細則、岩手県の積雪荷重取扱基準をみると、塗装鋼板、スレート等の平滑な材料で葺かれた屋根である場合に限って、屋根勾配の増加に応じた積雪荷重の低減（25°を越える勾配）を認めている<sup>9)</sup>。このような鋼板やスレート板が本格的に建築物の屋根に用いられたのは北海道の場合、開拓史が明治37年に発布した屋上規制令以降となる<sup>10)</sup>。他の地域においても明治末期には、同規制が公布されている<sup>11)</sup>。この規制令は、市街地建築物法（大正末年）による屋根の不燃化規定が適用されるまで段階的に強化される。このことから、鋼板を葺材に用いた屋根が普及するのは、明治末～大正末のことと考える。ここで、北海道における屋上規制令は、明治37年に発生した小樽の大火を契機として導入された防火上の規制である。従って、この規制が導入された背景に屋根雪の滑落を加味したとは考えにくい。但し、大正期における札幌の街並みを撮影した写真では、鋼板葺きに改修（明治末年頃）された時計台（屋根勾配39°）、さらに雪止めを配置した瓦葺きの屋根がみられる<sup>12)</sup>。そのため、冬期間、雪の滑落現象が頻繁に発生する屋根は存在したと考える。また、山形県新庄市における大正期の街並みについて検討した結果をみても、雪止めを設置した屋根がみられることから<sup>13)</sup>、この時期に滑落現象の発生する屋根は存在していたと考える。

このようなことから、明治・大正期では、屋根葺材の不燃化を行った結果、副産物として屋根雪の滑落現象が頻繁に発生する屋根は存在していたと考える。しかし、副産物である滑落を何らかの科学的な根拠や技術資料に基づいて建築物の設計に取り入れる段階には到達していなかったと考える。

## 3) 雪害対策が実施され初めてからの雪の滑落

雪害とは、雪がもたらす自然災害として現在一般的に用いられている言葉であるが、昭和初期におけるこの用語は自然災害のみだけではなく、雪がもたらす不利益、すなわち平年的な積雪によって発生する生活上の支障等も含んでいた<sup>14)</sup>。建築物に関わる項目では、冬期間に行わなければならない屋根の雪下ろしも雪害として扱われていた。このような雪害感を下地として、昭和5年には国会で雪害決議案が通過し、昭和7年には内務省内で雪害対策協議会が設置される<sup>15)</sup>。同

協議会が設置されたのを契機として、昭和8年に積雪地方農村経済調査所（山形県新庄市），昭和10年に日本雪氷協会（現，日本雪氷学会）が設立され，屋根雪の滑落に関する本格的な調査や研究が行われ始めている。この頃になると，新潟県魚沼郡に建設された小学校校長の自宅，写真2-3に示す同調査所が試験的に建設した農家住宅<sup>15)</sup>のように，屋根雪を処理する手法として雪の滑落を積極的に活用する建物がみられるようになる。これらの建築物は，何れも塗装鋼板一文字葺きで屋根勾配が約50°，高床式となっている。なお，小学校校長宅の場合は，軒下での堆積雪を考慮して融雪池も設置している。昭和初期は雪に関する諸機関が設置され始めた時期であることから，当時，雪の滑落に関する技術資料が充実していたとは考えにくいものの，雪下ろしの必要がない滑落処理を前提とした住宅が試験的に建設され始めている。ここで，屋根雪の滑落に関する研究をみると，昭和14年以降には，積雪荷重の低減を主な目的とした，実験や観測<sup>16)・17)・18)</sup>も行われ，滑落現象を支配する抵抗力の一つとして屋根雪と屋根葺材との静摩擦係数も測定されている。このようなことから，昭和10年代後半には，屋根雪の基本的な滑落特性が徐々に明らかになりつつあったと考える。すなわち，雪の滑落現象が屋根雪処理の手法の一つとして成立するのは，昭和10年代後半のことと考える。なお，滑落処理が成立した時期は，第2次世界大戦中であり，「古トタン板は小修用として使用する以外は，その他の金属類廃品と供に一切回収所に納める」と定められていた<sup>19)</sup>。このことから，このような塗装鋼板を用いた屋根が一般に大きく普及していたとは考えにくい。滑落処理を設計段階から考慮した建物が実際に広く普及するのは，戦後，長尺亜鉛めっき鋼板が生産<sup>20)</sup>されてからのことと考える。

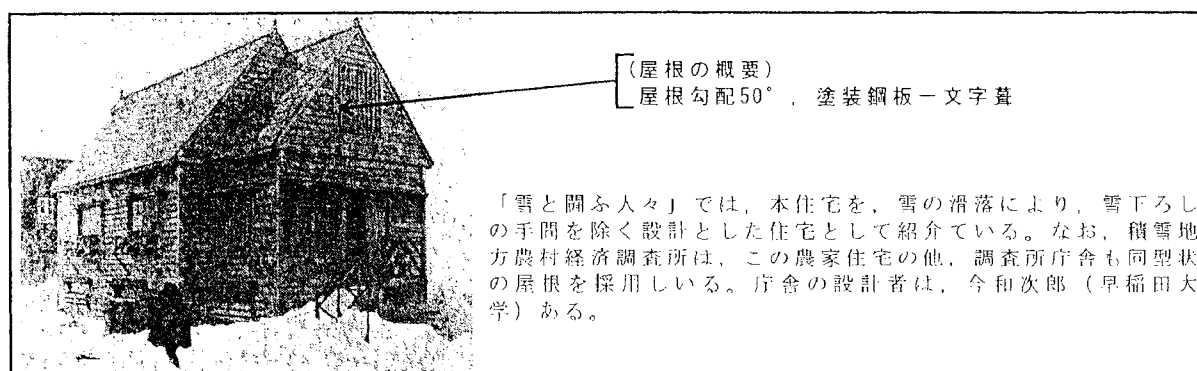


写真2-3 積雪地方農村経済調査所が試験的に建設した農家住宅  
（「雪と闘ふ人々」より引用）

#### 4) 滑落処理の成立過程

1)～3)に示した各時代の状況をみると、滑落処理の変遷は、図2-2のような各段階にまとめることができる。図のように、滑落現象が屋根雪処理の手法として成立する背景には、明治～大正期に行われた屋根葺材の不燃化に伴う塗装鋼板・スレート板の普及と、昭和10年代以降に行われた雪害の諸研究機関による技術資料の提示が大きく関わっている。すなわち、滑落現象が屋根雪を処理する手法の一つとして一般に認知されるようになったのは、昭和の10年代後半になってからのことと考える。

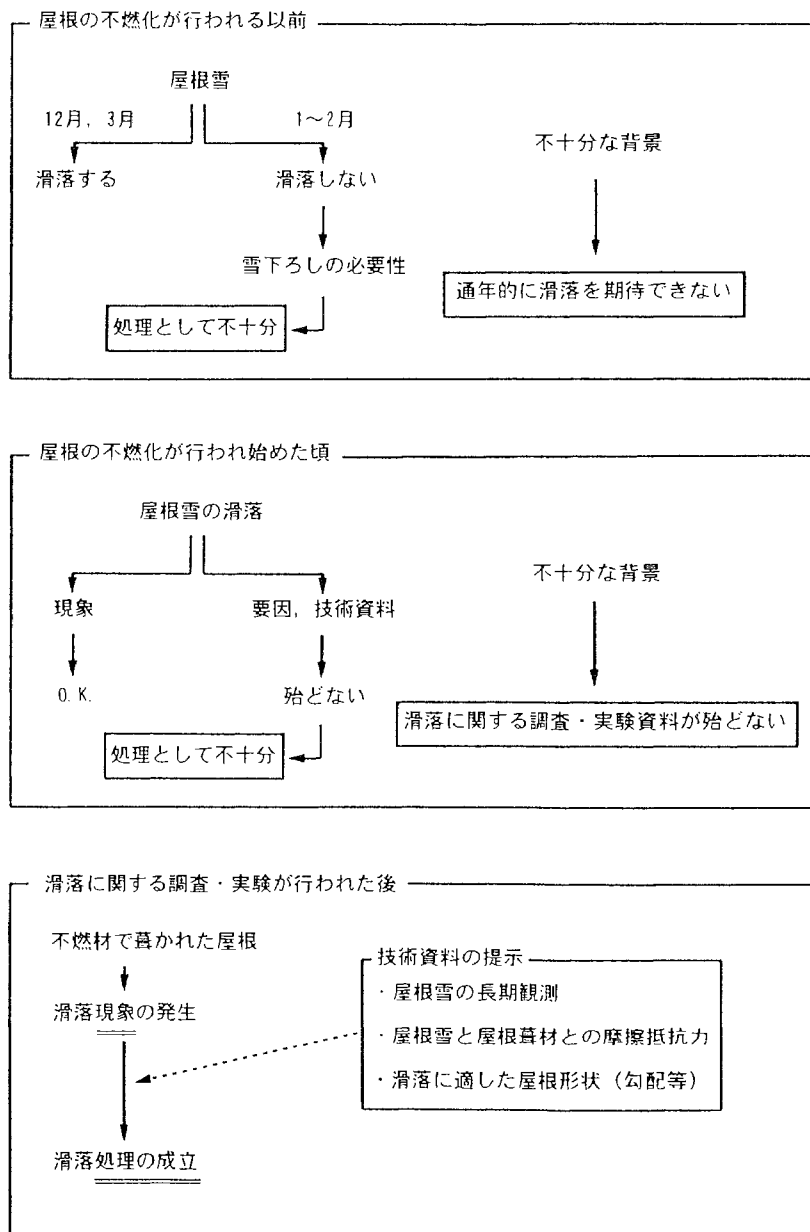


図2-2 滑落処理の成立過程

### 2.3.2 屋根雪の滑落処理と積雪荷重法令との関係

2.3.1節で示した滑落処理の成立過程をみると、この処理に関する技術資料が提示されるようになるのは、昭和10代以降のこととなる。このことから、勾配屋根における雪の滑落を考慮した積雪荷重評価が法令等に採り入れられるのは、昭和10年代以降のことと考える。本節では、勾配屋根における滑落を考慮した積雪荷重評価が法令採り入れられた以後における評価基準の変遷について整理し、評価基準の根拠について考察を行う。

#### 1) 法令にみられる雪の滑落を考慮した積雪荷重評価

滑落処理に関する技術資料が提示されるようになった昭和10年代以降の積雪荷重に関連する法令・規準をみると次のようになる。図2-3に、臨時日本基準規格第532号<sup>21)</sup>（以下、規格532）を示す。この規格は、戦時下の物資節約を主な目的として昭和19年に公布されている。表のように、積雪荷重は屋根勾配30°以上になると、勾配増加に応じて荷重低減が可能となっており60°以上ではこの荷重を用いないことができる。この規格は、戦後、昭和23年に制定された日本建築規格3001<sup>22)</sup>に受け継がれるものの、図2-4のように、屋根勾配と積雪荷重の関係は規格532と同一である。ここで、これら法令と同時期に行われた雪の滑落に関する研究をみると、鋼板瓦棒・平葺の5～6寸勾配（27～31°）以上において雪の滑落が顕著に発生すること、セメント瓦では屋根勾配50°においても滑落が発生しないこと等が報告されている<sup>16)・17)・18)</sup>。また、規格3001の解説文をみると、前述の研究結果を引用しながら勾配屋根における積雪荷重の評価手法が説明されている<sup>23)</sup>。屋根勾配による積雪荷重の低減が法制化された背景は十分に明らかとなっていないものの、何らかの形で当時の滑落処理に関する研究結果が反映されていると考える。

#### 2) 現行法令における評価基準の根拠

規格532以後に公布された法令・指針での評価基準の変遷をみると、図2-5になる。図のように、法令以外の指針（日本建築学会建築物荷重指針）では、近年の研究結果を反映して、「屋根勾配を指標とした滑落の評価」から「雪の滑落性能を個々の建物毎に調査・実験して評価する手法」へと勾配屋根の積雪荷重評価が移り変わってきている。一方、法令における積雪荷重評価では、規格532の公布以降、現行法令まで継続的に屋根勾配を指標として雪の滑落を評価している。ここで、諸法令における屋根勾配と積雪荷重の低減率との関係を表2-2に示す。図のように、規格532以降に公布された法令の積雪荷重は、ほぼ同様の評価の評価

(現代仮名使いに修正)

第1条 本規格は、戦時下建築せらるる一般建築物の強度計算につき、主要資材の節約を得る目的を以て採用すべき荷重(以下単に建築物の荷重と称す)を制定しこれを適用するものとし、仮設建築物又小規模なる建築物に対しては、これを適用せざるものとす。

第9条 (積雪荷重)

積雪荷重は、左の各号に基づきこれを算定するものとす。

1. 積雪量は、その土地の実況に応じこれを定む。
2. 雪の重量は水平面につき、積雪1 cm毎に2 kg/m<sup>2</sup>とす。但し長期に亘る積雪にいては、これを3 kg/m<sup>2</sup>とす。
3. 勾配屋根の水平投射面に加わる積雪荷重は、通常第11表の割合にまでこれを低減することを得。

第11表

勾配	30°以下	30°~60°	60°以上
%	100	中間値は直線的に補間す	0

4. 屋根の両側における積雪量著しく異なる場合に在りては、片側荷重に依る影響を考慮するものとす。
5. 雪の集積する部分に在りては、特に荷重を増大するものとす。

図2-3 臨時日本基準規格第532号の概要

(括弧内加筆、現代仮名使いに修正)

建築物の構造計算

この規格は、臨時に本規格532「建築物の強度計算の基本」が戦争中極度に資材節約を目標とした関係から荷重、外力の値を比較的低位に採り、許容応力度は相当高値に押さえたが、平時に戻った今日では将来に亘って用いられる計算の基準に改めるため、(日本建築)学会構造標準委員会が昨夏来(昭和21年)創意検討を加え両規格を一本にした改正案を得た。依って去る3月19日(昭和22年)工業基準調査会建築部会に上程された結果、可決を見たので急いでここに報告することとした。

第1条

この規格は一般建築物の構造計算に之に採用する荷重、許容応力度その他構造計算の基本となる事項を定めたものである。特別の調査結果に基づいて設計される建築物、仮設建築物又は小規模の建築物については、本規格を適用しなくてよい。

第12条 積雪荷重

積雪荷重は、次の各項に基づいて算定する。

1. 積雪荷重は最深積雪量とその単位重量によって算定する。
2. 屋根の鉛直最深積雪量は平地の最深積雪量を第13表により減らした値とする。ただし雪止めをもつ屋根または雪の落下しにくいフキ材を使った屋根に対しては別に考えなければならない。

第13表

勾配	30°以下	30°~60°	60°以上
採用値	100%	中間値は直線的に補間する	0%

3. 雪の単位重量は積雪1 cmごとに一般の地方では2 kg/m<sup>2</sup> 雪国では3 kg/m<sup>2</sup>以上とする。
4. 長期荷重として考えるときの積雪荷重または暴風、地震等の外力と併に考えるときの積雪荷重は、適当にその値を減らしてもよい。
5. 屋根の両側での積雪量が著しく異なる場合は片側荷重による影響を考える。
6. 雪の集積する部分に対してはとくに荷重を増大する。
7. 雪下ろしを行う場合には、積雪荷重の値を適当にへらしてもよい。

図2-4 日本建築規格第3001号の概要



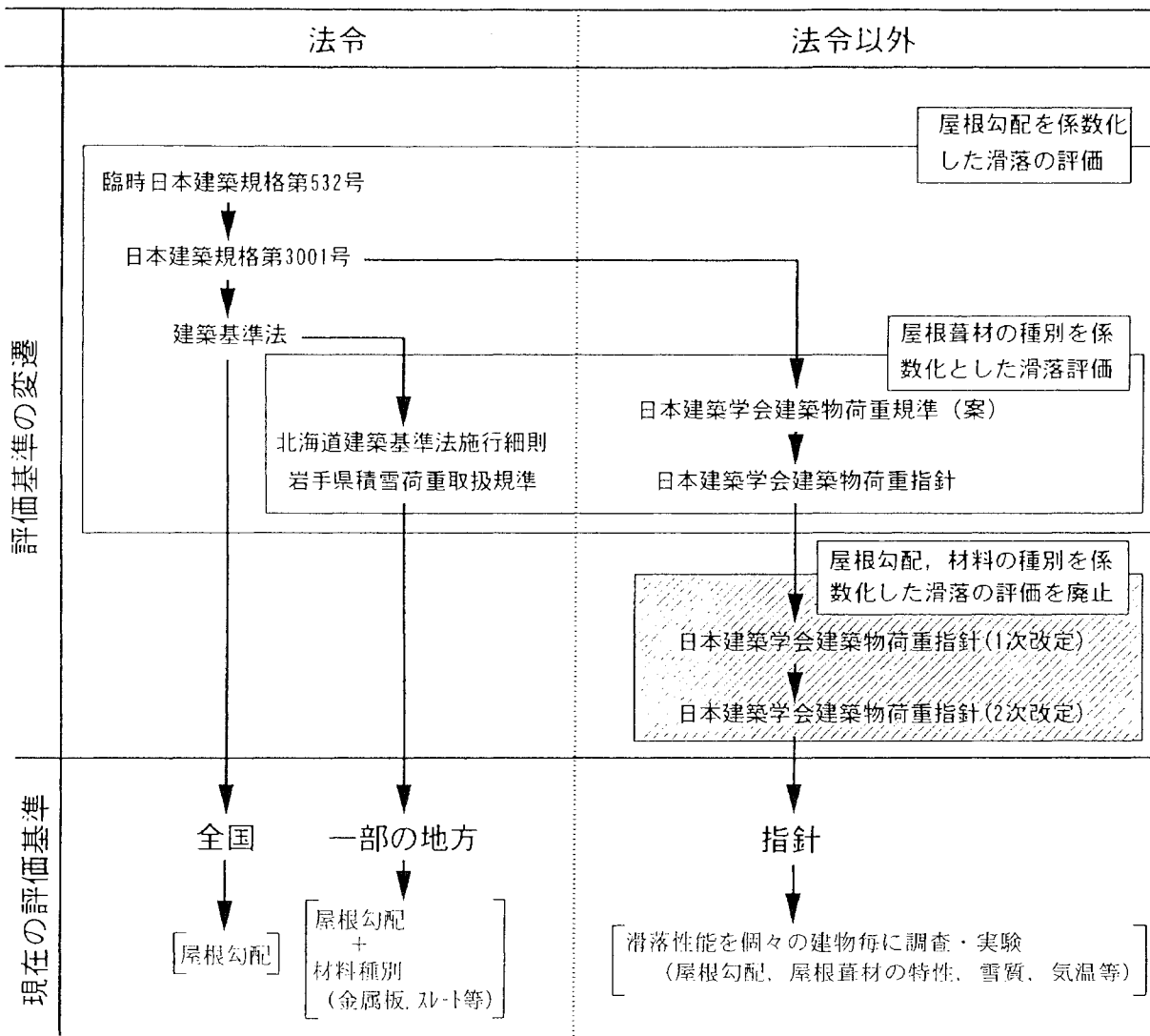


図2-5 勾配屋根における積雪荷重の評価基準の変遷

表2-2 法令にみられる屋根勾配と積雪荷重との関係

年	法令・規準の名称	積雪荷重の低減可能な屋根勾配	積雪荷重を採用しなくてよい屋根勾配	荷重の低減割合 (荷重の低減率/勾配)
昭和19	戦時建築規格第532号	30°を越えた場合	60°以上	100/30
昭和23	日本建築規格第3001号	30°を越えた場合	60°以上	100/30
現行	建築基準法施行令	30°を越えた場合	60°を越えた場合	100/30
現行	北海道建築基準法施行細則	25°以上	60°以上(スレート板等)	100/39
			55°以上(金属板)	100/33
現行	岩手県積雪荷重取扱規準	25°を越えた場合	60°以上	100/39
			50°以上(金属板)	100/28

基準を採っている。具体的には、屋根勾配が $25\sim 30^\circ$ を越えると積雪荷重が低減可能となり、 $50\sim 60^\circ$ の勾配になれば、この荷重を採用しないことができる。また、荷重の低減割合（積雪荷重の低減率／屋根勾配）も、 $\triangle 100/28\sim \triangle 100/39$ とほぼ同様となっている。

これらのことから、屋根雪と積雪荷重との関係に関する法令は、昭和19年当時の材料、技術水準から得られた結果に基づいて定められており、その後、抜本的な修正を経ずに現在まで継続的に用いられていると考える。

## 2. 4 勾配屋根における積雪荷重評価の現状

現在、我が国での積雪荷重は、基本的に建築基準法に基づいて評価されることになっている。この法律による評価以外には、主に大規模構造物の設計に用いられている日本建築学会建築物荷重指針<sup>24)</sup>（以下、荷重指針）がある。なお、荷重指針は、日本建築学会の積雪荷重に関する方針を示したもので、法的な枠組みの外側に位置する基準である。従って、本指針を用いた積雪荷重評価を行った建築物を建設する場合は、日本建築センターによる評定および建設大臣の認定が必要となる。ここでは、我が国での積雪荷重の評価基準と諸外国の基準とを対比する。

### 2.5.1 建築基準法による評価基準の概要

2.3.1節で指摘したとおり、現行の建築基準法施行令の内容は、昭和19年以降、抜本的な修正を経ずに現在まで継続的に用いられている。ここで、第86条の積雪荷重に関する規定を示すと、図2-6になる。表に示す各項をみると、屋根上積雪荷重の滑落雪による低減が認められるためには、法令第6項で示されている屋根面の積雪量が不均一とならない条件すなわち、屋根面に堆積した雪全体が滑落雪する条件を満たすと同時に、法令第4項で示されている30度を超える屋根勾配を確保しておく必要がある。

#### 建築基準法施行令第86条（積雪荷重）

第4項：屋根上の積雪荷重は、屋根に雪止めがある場合を除き、その勾配が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項の積雪荷重に次の表の数値（特定行政庁が屋根葺材、雪の性状等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。

勾配	30度をこえ40度以下の場合	40度をこえ50度以下の場合	50度をこえ60度以下の場合
積雪荷重に乗すべき数値	0.75	0.5	0.25

第6項：屋根面における積雪量が不均一等となるおそれのある場合においては、その影響を考慮して積雪荷重を計算しなければならない。

図2-6 建築基準法施行令第86条の概要

## 2.5.2 日本建築学会建築物荷重指針による評価基準の概要

図2-7に日本建築学会建築物荷重指針における積雪荷重設定のフローチャートを示す。図のように、本指針の積雪荷重は、再現期間100年に対する地上積雪深に等価単位積雪重量および環境係数を乗じた地上積雪荷重を求めた後、建築物の規模や形状、気温、風向、風速を考慮した屋根形状係数等を乗じて算出される。前述の地上積雪荷重は、屋根上積雪の制御すなわち、屋根雪の雪下ろしや融雪、滑落処理の有無によって評価が異なる。具体的には、屋根上積雪荷重の制御を積極的に行う場合、地上積雪荷重を算出する際の地上積雪深として年間を通しての最大値をとるのではなく、制御に要する日数（滑落に要する日数等）内に降り積もった雪の深さの年最大値を用いて積雪荷重（制御積雪荷重）を算出することが可能となっている。制御積雪荷重を用いる場合は、図2-8に示す規定を満たす必要がある。表のように、制御積雪荷重を用いる場合は、規則的な雪の滑落を保証できる実験、調査が必要となっている。

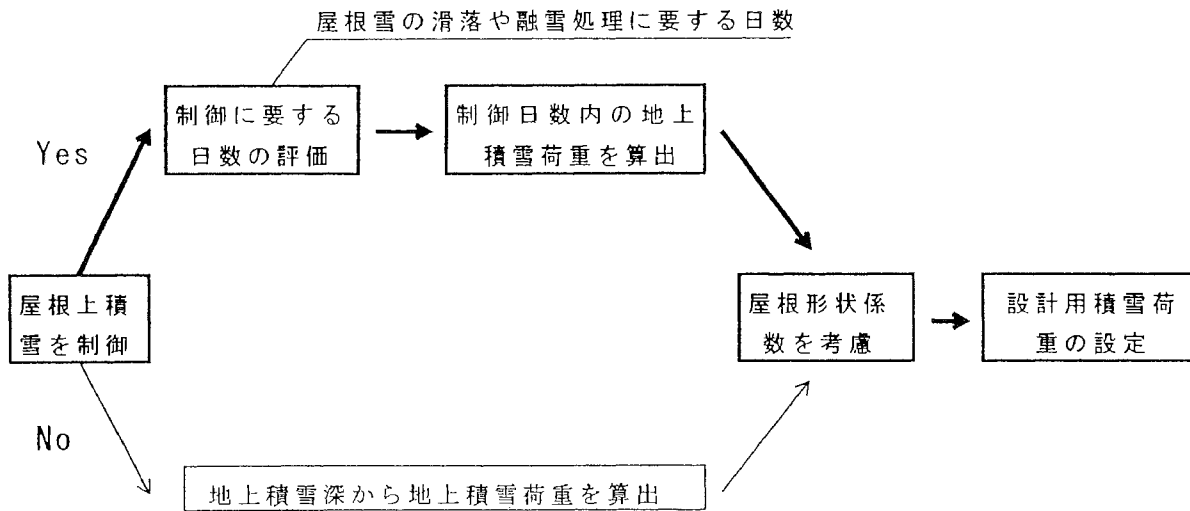


図2-7 日本建築学会建築物荷重指針における積雪荷重設定のフローチャート

**制御積雪荷重**  
 制御積雪荷重  $S_i$ 、 $S_c$ は、滑落または融雪装置の性能に応じて原則として調査・実験により定める。ここに  $S_i$ は豪雪開始時に屋根上に存在する分の積雪荷重であり、 $S_c$ は装置等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荷重である。

図2-8 日本建築学会建築物荷重指針による制御積雪荷重の評価手法

### 2.5.3 諸外国およびISOにおける評価基準の概要

諸外国およびISO（国際標準化規格）の屋根上積雪荷重の評価基準については、1992年に苫米地がまとめて対比した研究がある<sup>25)</sup>。この研究では、我が国で屋根上積雪荷重を算出する場合に取り入れていない係数として、表2-3に示す「標高に関する係数」、「滑落に関する係数」、「屋根葺材に関する係数」、「温度に関する係数」があることを指摘している。

本研究で対象としている滑落雪に関連のある係数で、我が国で取り入れられていないものには「屋根葺材に関する係数」、「温度に関する係数」がある。これらの係数についてはISO<sup>26)</sup> (International Organization for Standardization), アメリカ<sup>27)</sup> (Minimum Design Load for Buildings and Other Structure)で規定がある。ISOおよびアメリカでの屋根上積雪荷重の算定式の概要は次頁に示す通りである。

表2-3 諸外国の荷重算定に用いられている項および係数

(苫米地の研究より抜粋，筆者加筆)

	ISO	イギリス	フランス	カタール	アメリカ	建築基準法	建築学会荷重指針
地上積雪荷重	●	●	●	●	●	●	●
周辺環境の係数				●	●		●
屋根形状の係数	●	●	●	●	●	○	●
用途の係数				●	●	●	●
標高の係数		●	●				
吹きだまりの係数	●	○		○	○		●
滑落の係数	●	○		●	●	●	△
屋根葺材の係数	●				○	□	△
温度の係数	●				○		△

●：算定式に取り入れられている項および係数

○：規定の中で考慮されている項および係数

△：個々の建物について実験・調査を行って定める

□：地方条例を設けて独自に指導を行っている行政庁もある。(北海道，岩手県)

## 1) ISOの算定式

屋根上積雪荷重  $S$  は、下式で算出する。

$$S = S_b + S_d + S_s$$

ここに、 $S_b$ ：基本的な積雪荷重， $S_d$ ：吹きだまりによる雪荷重

$S_s$ ：滑落（移動）による雪荷重

$S_b$ ， $S_d$ ， $S_s$ は下式で算出する。

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

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

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

ここに、 $S_o$ ：地上積雪荷重， $C_e$ ：風による係数， $C_t$ ：温度による係数

$\mu_m$ ：屋根葺材による係数， $\mu_\beta$ ：屋根形状，屋根勾配による係数

$\mu_d$ ：吹きだまり係数， $\mu_s$ ：滑落（移動）による係数

## 2) アメリカの算定式

屋根上積雪荷重  $P_f$ （陸屋根の場合）， $P_s$ （勾配屋根の場合）は下式で算出する。

$$P_f = 0.7 C_e \cdot C_t \cdot I \cdot P_g$$

$$P_s = C_s \cdot P_f$$

ここに、 $C_e$ ：露出係数（風の影響を考慮した係数）， $C_t$ ：温度係数

$I$ ：重要度係数（建物が破壊したときの影響を考慮した係数）

$P_g$ ：地上雪荷重， $C_s$ ：屋根傾斜係数

算定式中の屋根傾斜係数  $C_s$  は、滑りやすい屋根と滑りにくい屋根とで異なるが、70度以上の屋根勾配では  $C_s = 0$  となる。温度係数  $C_t$  は、暖かい屋根で  $C_t = 1.0$  とし、冷たい屋根では  $C_t > 1.0$  となる。

1)，2)の算定式をみると、ISO，アメリカでは、屋根葺材の滑りやすさを係数として評価し、算定式に乗じることによって、屋根雪の滑落を考慮することが可能となっている。これと同時に、滑落の開始や持続および融雪に影響を及ぼす屋根面の温度条件についても考慮されている。

#### 2.5.4 我が国での屋根上積雪荷重の評価基準と諸外国の基準との対比

2.5.1～3節では、我が国の評価基準、諸外国およびISOの基準の概要について述べた。特に2.5.3節では、我が国で取り入れられていない屋根上積雪荷重の評価係数について述べ、滑落に関する係数として「屋根葺材に関する係数」、「温度に関する係数」があることを示した。

ここで、現行の建築基準法および日本建築学会建築物荷重指針における積雪荷重の評価プロセスと諸外国のプロセスとを比較すると図2-9となる。図のように、建築基準法における積雪荷重の算定プロセスは、ISOおよびアメリカと同様に基本となる積雪荷重を算出した後、この基本的な荷重から雪が滑落する分の積雪荷重を加・減算して、設計用の積雪荷重を算定する。滑落する分の積雪荷重は、建築基準法の場合、屋根勾配の増減のみを指標として算出される。一方、ISOやアメリカでの基準では、屋根勾配の他、屋根葺材の滑り易さ、温度をも指標としている。

次に、日本建築学会建築物荷重指針についてみると、この指針における積雪荷重は、他の基準と逆のプロセスから算出される。具体的には、屋根雪が滑落するまでに要する日数を評価したのち、その日数内に積もり得る積雪深から、積雪荷重を算出する。そのため、勾配屋根における雪の滑落性能が把握できないと積雪荷重が算定できないシステムになっている。滑落の性能評価について同指針は、ISOやアメリカのように屋根勾配、温度、屋根葺材の滑り易さ等の指標を示していない。個々の建物について実験・調査を行った結果に基づいて算出するように定めている。このように、同指針は、個々の建物に対する滑落特性を十分に設計用荷重に反映できる評価体系としているものの、滑落に関する性能評価の基準を明確に提示していない。この背景には、雪の滑落を評価する方法が確立されていない現状であるため<sup>28)</sup>、雪の滑落に要する日数を係数等で定める段階にないことが考えられる。

このように、我が国の積雪荷重評価は、屋根雪の滑落を考慮することが可能となっているものの、滑落を評価するために必要な技術資料が十分に提示されていない現状にある。従って、屋根雪の滑落を評価するための基礎データを収集、提示する必要がある一方で、基礎データを取りまとめた滑落の評価システムも提示する必要があると考える。

	積雪荷重の算定プロセス	滑落の評価手法
ISO	<p>基本となる積雪荷重 (最小値)</p> <p>加算</p> <p>滑落する分の積雪荷重</p> <p>設計用荷重</p> <p>小 ↑ 滑落 ↓ 大</p>	<p>屋根勾配 材料の滑り易さ 温度</p> <p>係数化</p>
アメリカ	<p>基本となる積雪荷重 (最大値)</p> <p>減算</p> <p>設計用荷重</p> <p>小 ↑ 滑落 ↓ 大</p>	<p>屋根勾配 材料の滑り易さ 温度</p> <p>係数化</p>
建築基準法	<p>基本となる積雪荷重 (最大値)</p> <p>減算</p> <p>設計用荷重</p> <p>しない ↑ 滑落 ↓ する</p>	<p>屋根勾配</p> <p>係数化</p>
日本建築学会 建築物荷重指針	<p>X日間に積み得る最大積雪荷重</p> <p>設計用荷重</p> <p>実験・調査</p> <p>滑落するまでに要する日数 (X日で滑落)</p> <p>X日</p>	<p>個々の建物に対する 実験・調査</p>

係数を用いた加・減算評価

処理の性能評価

図2-9 各基準にみられる積雪荷重の算定プロセスと滑落の評価手法



## 2. 7 まとめ

---

本章では、多雪地域に建設される建築物の積雪荷重評価の現状と問題点を明らかにするために、勾配屋根を持った建築物における屋根雪処理の時代変遷について整理した。次に、その変遷過程における法令等の成立過程や現状における法令の概要について整理した。これらの結果をまとめると次のようになる。

1) 屋根の形状を「陸屋根」と「勾配屋根」とに大別し、各屋根形状における屋根上積雪深の経時的な推移を整理したところ、陸屋根の最大積雪深に至るプロセスは、地上積雪に近似した傾向となる。一方、勾配屋根の最大積雪深は、屋根雪が頻繁に滑落することから、地上積雪深の増減プロセスと異なった特性を持っている。このことから、勾配屋根の屋根上積雪に関する検討を行う場合は、屋根雪の滑落を考慮する必要がある。この滑落に関する検討を行わなければ、勾配屋根における合理的な積雪荷重評価は難しいと考える。

2) 屋根雪処理の時代変遷を整理したところ、滑落処理が成立する過程には、明治末期から大正にかけての平滑な不燃材料（鋼板やスレート板）の普及、昭和10年前後に設置された雪害対策機関の設置が大きく関わっている。このような時代背景を考えると、屋根葺材の不燃化が行われる以前では、滑落処理が存在しなかったと考える。我が国の積雪荷重評価において滑落処理に関連した項目が加えられるのは、昭和10年代以降のことと考える。

3) 昭和19年に公布された臨時日本基準規格第532号では、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の手法が提示されている。この規格は、屋根勾配が $30^\circ$ 以上の場合、屋根勾配の増減に応じて、積雪荷重を低減することが可能となっている。この考え方は、現行の建築基準法とほぼ同様である。すなわち、現行の建築基準法における滑落に関する規定の根拠は、昭和19年当時の材料、技術水準で得られた結果と考えることができる。

4) 建築基準法における積雪荷重の評価体系は、勾配屋根の場合、ISOおよびアメリカと同様に、基本となる積雪荷重を算出した後、この基本的な荷重から雪が滑落する分の積雪荷重を加・減算する方法を採っている。滑落する分の積雪荷重は、ISOやアメリカ基準の場合、屋根勾配の増減の他、屋根葺材の滑り易さ、温度をも指標として算出される。一方、建築基準法の場合、屋根勾配の増減のみを指標

としており、雪の滑落を評価する指標が十分に整備されていない現状にある。

5)近年の研究成果を取り入れた日本建築学会建築物荷重指針の積雪荷重評価をみると、雪が頻繁に滑落するような屋根では、滑落に要する日数を評価し、その日数から積雪荷重（制御積雪荷重）を採ることが可能となっている。しかし、滑落に要する日数の算定方法をみると、個々の建物に対して実験・調査を行った結果に基づくように定められており、諸外国の積雪荷重規定のように汎用性のある具体的な評価指標（屋根勾配や屋根葺材の種類、気温等）を与えていない。このように、日本建築学会建築物荷重指針の制御積雪荷重が概念的な記述に留まっている背景には、屋根雪の滑落に要する日数を評価する手法が確立されていないことが考えられる。

以上のように、多雪地域に建設される勾配屋根を持った建築物における積雪荷重評価の現状についてみると、我が国の荷重規定は、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行うことが可能となっている。特に、日本建築学会建築物荷重指針では、個々の建物における雪の滑落性能を考慮した制御積雪荷重を用いることが可能になっている。しかし、この指針では、滑落の性能を評価する具体的な指標を明示しておらず、不十分な段階にある。このような背景には、滑落を支配する諸抵抗力の特性が十分に説明されていないことが関わっている。図2-10のように既往の研究を整理すると、屋根雪の滑落には、屋根勾配、建設地の気温や屋根雪の雪質、屋根葺材の種類等の要因が大きく関わる。このようなことから、屋根勾配を持つ建築物での滑落を考慮した積雪荷重の評価を確立するためには、これら諸要因が雪の滑落に及ぼす影響を明らかにする必要があると考える。

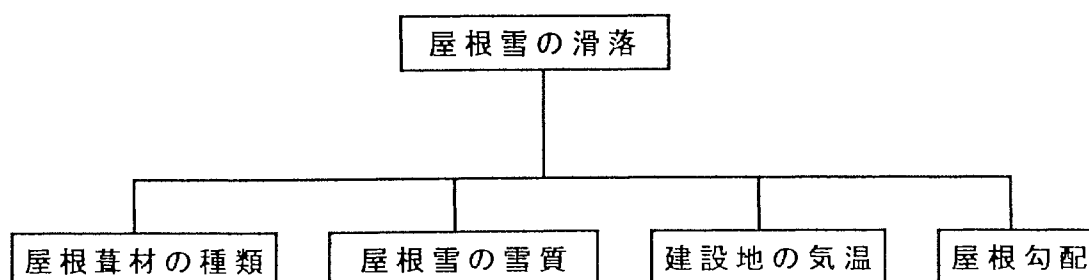


図2-10 屋根雪の滑落に影響を及ぼす要因

## 第2章 参考文献

- 1) 日本建設機械化協会編：新編防雪工学ハンドブック，pp.7-15，1993.9
- 2) 高橋博，他：雪氷防災，第1章，降積雪現象，pp.39-42，白亜書房，1986.12
- 3) 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」，第41巻，3号，pp.199-204，1979.9
- 4) 渡辺正朋：屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究，東北大学学位論文，1990.6
- 5) 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
- 6) 苔米地司：乾雪地帯における屋根上積雪性状に関する基礎的研究，東北大学学位論文，1985.12
- 7) Taylor. D. A. : A survey of snow on the roofs of arena-type buildings in Canada, Canadian Journal of Civil Engineering Vol.6, pp.85-96, 1979
- 8) 飛越合掌文化研究会：世界遺産の合掌造り集落，岐阜新聞社，pp.38-40，1996.1
- 9) 日本建築士事務所協会編：実務者のための積雪寒冷建築技術資料Ⅰ，pp.10-18，1984.8
- 10) 札幌市教育委員会編：北の生活具，さっぽろ文庫82，北海道新聞社，pp.120-121，1997.9
- 11) 斉藤和夫，赤崎弘平：防火対策としての屋上制限地方令規について，日本建築学会学術講演梗概集（東北），pp.1843-1844，1982.10
- 12) 札幌市教育委員会編：時計台，さっぽろ文庫6，北海道新聞社，pp.90-91，1978.10
- 13) 高橋博，他：雪氷防災，第4章，屋根雪対策法，白亜書房，pp.240-242，1986.12
- 14) 山口弘道：雪害問題と雪の科学的研究，建築雑誌，第51輯，第630号，pp.1098-1103，1937.9
- 15) 塚本閣治：雪と闘ふ人々，東亜書林，pp.10-57，1941.6
- 16) 木村幸一郎：屋上積雪の防御に関する研究（第1報），建築学会論文集，第25号，pp.114-120，1942.4
- 17) 木村幸一郎：屋根積雪の自然落下について，日本雪氷学会誌，第5巻，第7号，pp.6-9，1943.7
- 18) 木村幸一郎：屋上積雪の防御に関する研究（第2報），屋根葺材と屋根雪との摩擦について，日本雪氷学会誌，第8巻，第5号，1946.12
- 注）本論文は，当初，建築学会論文集の昭和19年7月号に掲載予定であったが，戦時下における印刷工場の焼失によって同論文集が未刊となったため，戦後改めて，雪氷学会誌上に掲載されたものである。
- 19) 平井聖：屋根の歴史，13章 鉄板葺，東洋経済新報社，pp.181-187，1973.12
- 20) 飛田春雄：屋根小論，明現社，pp.7-58，1993.3
- 21) 建築学会編：戦時建築規格欄（第1報），建築雑誌，第58輯，第712-3号，pp.281-284，1944.9
- 22) 日本建築学会編：日本建築規格，建築3001，建築雑誌，第62輯，第730-1号 pp.13-18，1947.3
- 23) 松下清夫：雪荷重について，日本建築学会論文集，第39号，pp.27-37，1949.11

- 24) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説，第5章 積雪荷重，pp.168-235，1993
- 25) 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
- 26) ISO/DIS 4355: Bases for design of structure-Determination of snow loads on roofs, 1992
- 27) American National Standards Institute: American National Standard minimum design loads for buildings and other structures, ANSI A 58.1-1982, 1982
- 28) 三橋 博三：設計用雪荷重の問題点，日本雪工学会誌，Vol.8，No.1，1992.1

## 第3章 勾配屋根における屋根雪の滑落条件

	pp.
3.1 はじめに -----	3- 1
3.2 屋外観察でみられる屋根雪の部分滑落 -----	3- 3
3.3 屋根雪の部分滑落に関するモデル実験 -----	3- 6
3.3.1 モデル雪の作製および諸性状の測定方法 -----	3- 6
3.3.2 滑落モデル実験の概要 -----	3-11
3.3.3 滑落実験に用いたモデル雪の諸性状 -----	3-13
3.3.4 滑落モデル実験の結果 -----	3-16
3.3.5 滑落実験のまとめ -----	3-19
3.4 力学的要因からみた部分滑落 -----	3-20
3.4.1 検討の方法 -----	3-20
3.3.2 検討の結果 -----	3-23
3.5 まとめ -----	3-26
参考文献 -----	3-27

## 第3章 勾配屋根における屋根雪の滑落条件

### 3.1 はじめに

勾配屋根では、屋根雪が頻繁に滑落することから、陸屋根における屋根上積雪深の増減プロセスと異なった特性を持っている。一般に、勾配屋根では、滑落の発生頻度が増加するほど、陸屋根よりも小さな屋根上積雪深となる。このことから、屋根雪の滑落が及ぼす影響を何らかの形で考慮することが、勾配屋根における合理的な積雪荷重の評価につながると考える。

ここで、既往の研究によれば、屋根雪は、全体に移動して滑落することが希で、屋根の棟やけらばに残雪する部分滑落が多い<sup>1)</sup>。写真3-1に示す筆者の観察でも同様の結果が得られている。これら部分滑落の発生要因を観察結果から推察すると、棟部の積雪は、滑落方向と反対側の屋根雪とつながって滑落を抑制している。一方、けらば部分の屋根面温度は、外気温（マイナス温度）と同程度で推移するため、屋根面の一部で凍着現象が発生し、滑落を抑制していると考えられる。すなわち、積雪の破断抵抗力や屋根面の温度むらによる凍着現象の発生が屋根雪の部分滑落に大きく影響を及ぼしている。このように、屋根雪の部分滑落は、規則的な滑落を抑制すると同時に、屋根上積雪深の偏分布を招くことになる。屋根雪が不均一に堆積した場合、屋根上積雪深の増減状況を把握することが極めて困難になる。増減状況を把握できない場合には、構造上の安全を考えて、滑落が発生しない屋根と同等の積雪荷重評価にせざるを得ない。そのため、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合は、部分滑落しないことが評価の前提条件になる。

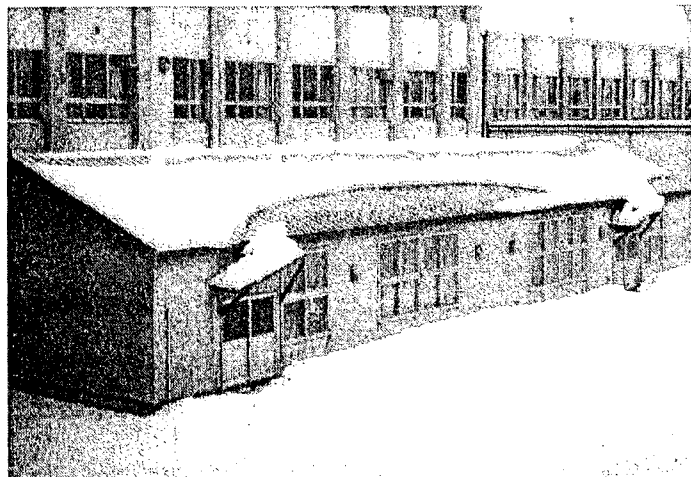


写真3-1 屋根雪の部分滑落の一例（1994年 札幌市）

このような背景から、本章では、図3-1のように、一定条件下での規則的な滑落を抑制する部分滑落の主要因について検討を行った。始めに、既存建築物における屋根上積雪状況を観察し、勾配屋根における部分滑落の発生要因を整理した。その要因に基づいて、既存建築物で発生している部分滑落をモデル実験で再現した。これらのことから、勾配屋根における積雪荷重制御の前提条件となる屋根雪が全面滑落する条件について考察する。

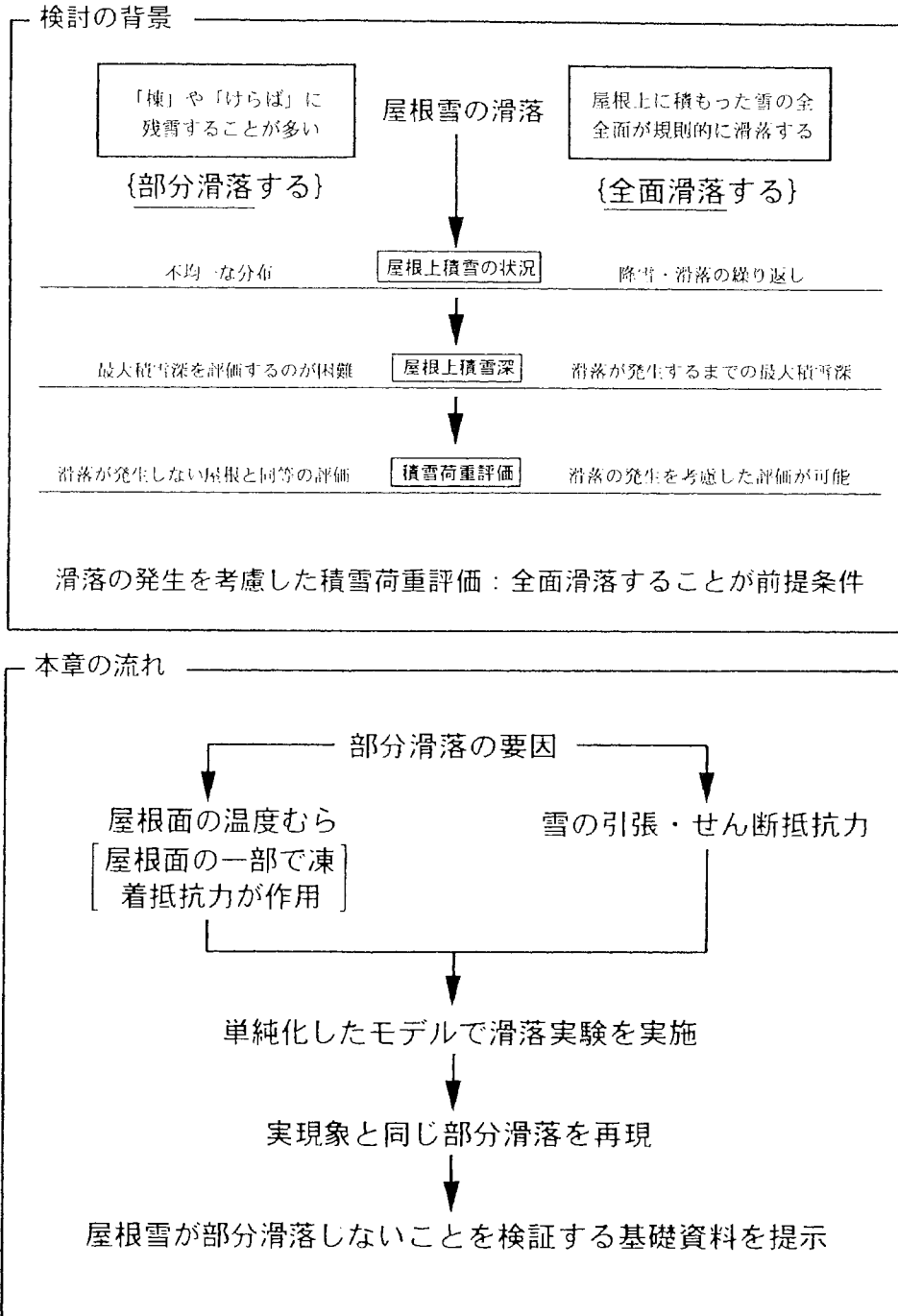


図3-1 本章の背景と検討の範囲

### 3. 2 屋外観察でみられる屋根雪の部分滑落

既往の研究によれば、屋根上の積雪は、全体に移動して滑落することが稀で、屋根の棟やけらばに残雪する部分滑落が多い<sup>1)</sup>。本項では、このような部分滑落の特徴を把握するために、1994～1996年の冬期間、勾配屋根の屋根上積雪状況を屋外観察した。観察地点は、札幌市内およびその周辺市町、ニセコ町、石川県小松市、新潟県塩沢町である。屋根雪の観察は、降雪のあった日の翌日～翌々日に、勾配屋根の建物を写真撮影した。観察時刻は、滑落が発生した後の屋根上積雪状況が撮影できるように、日中の最高気温が上昇する午後を中心に設定した。

写真の撮影結果を整理したところ、既存建築物で発生している屋根雪の部分滑落には何れも積雪の破断抵抗力が関わっており、その滑落形態は3タイプに大別することができた。これらの部分滑落の特徴について述べると次のようになる。

#### 1) 棟部分に雪が残る部分滑落

棟部分に残雪する部分滑落の代表的な事例を写真3-2に示す。この滑落形態は、屋根頂部に積雪が跨る切妻やアーチ形状の屋根でみられることが多い<sup>2)</sup>。写真のように、屋根雪は屋根頂部付近を残して滑落している。さらに、残雪した部分では、滑落方向に対して直角方向に破断した痕跡がみられる。このことから屋根雪は、屋根頂部付近の積雪が引張破断したのちに滑落したと考えられる。すなわち、このタイプの部分滑落には、積雪の引張抵抗力が大きく関与していると考えられる。なお、このような部分滑落の防止対策には、屋根頂部への雪切り板の設置が挙げられる。写真3-3のように、屋根頂部に積雪が跨って堆積しないように工夫された場合では、屋根雪が全面滑落している。

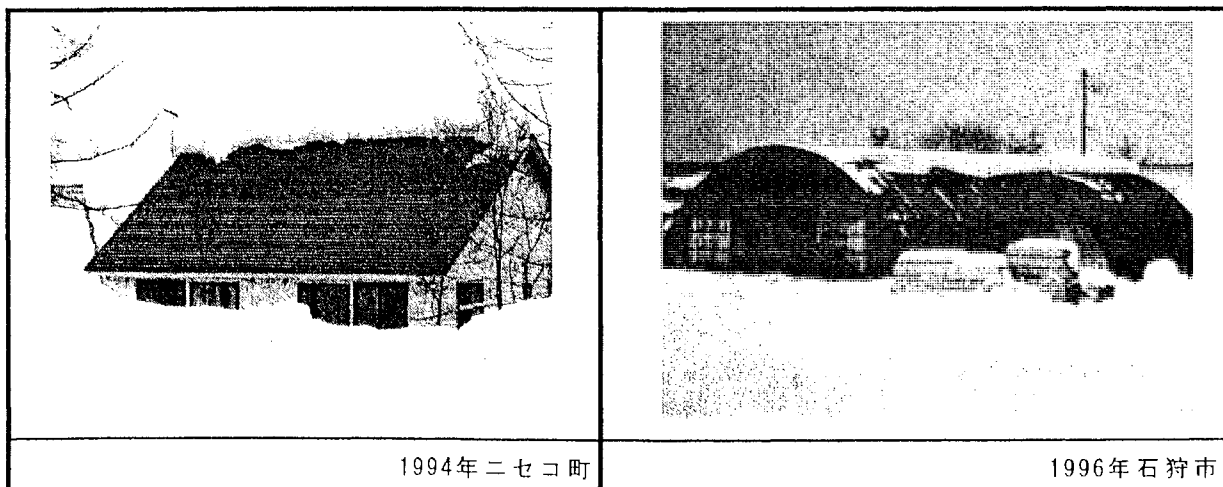


写真3-2 棟部分に残雪する部分滑落





写真3-3 雪切り板が設置された場合の屋根上積雪状況（新潟県塩沢町）

## 2) けらば部分に雪が残る部分滑落

けらば部分に残雪する部分滑落の代表的な事例を写真3-4に示す。この滑落形態は、屋根面の一部に低温となりやすい箇所が存在する場合に発生する。けらば部分は、屋内からの暖房熱等が伝わりにくく、外気温に近い屋根面温度になることから、屋根雪と屋根葺材とが凍着しやすい。凍着現象が発生する箇所は、他の部分に比べて滑落しにくくなる。このことから、写真のように、屋根雪はけらば部分のみを残して滑落していると考えられる。この滑落形態の特徴をみると、残雪した部分では、滑落方向に対して水平に破断した痕跡がみられる。従って屋根雪は、けらば付近の積雪がせん断破壊したのちに滑落したと考えられる。すなわち、このタイプの部分滑落には、積雪のせん断抵抗力が大きく関与していると考えられる。なお、積雪のせん断破壊が関与する部分滑落は、屋根のけらばのみに限らず、写真3-5のように、屋内の温度分布が不均一な建物においても頻繁にみられる。

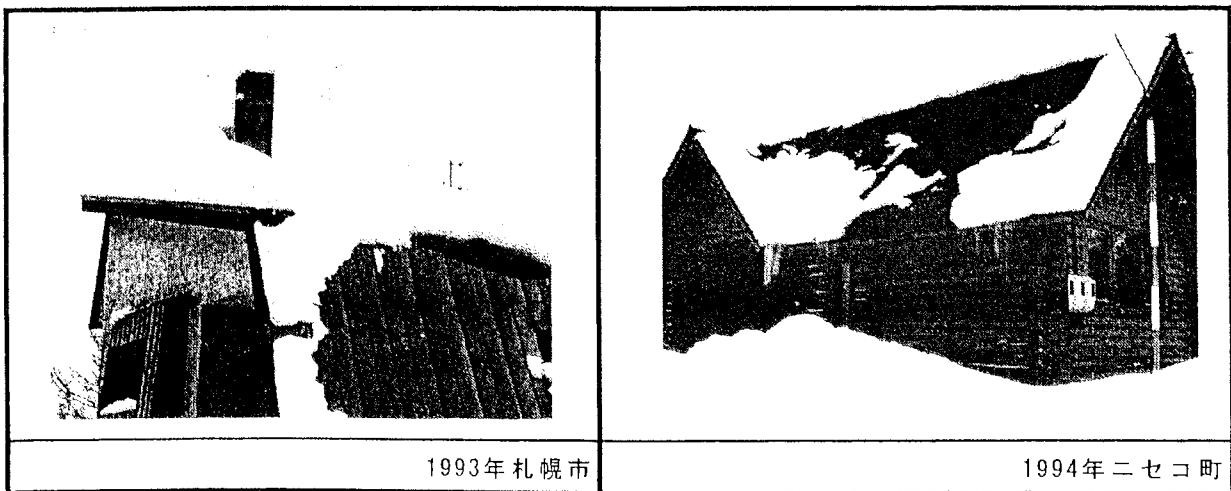
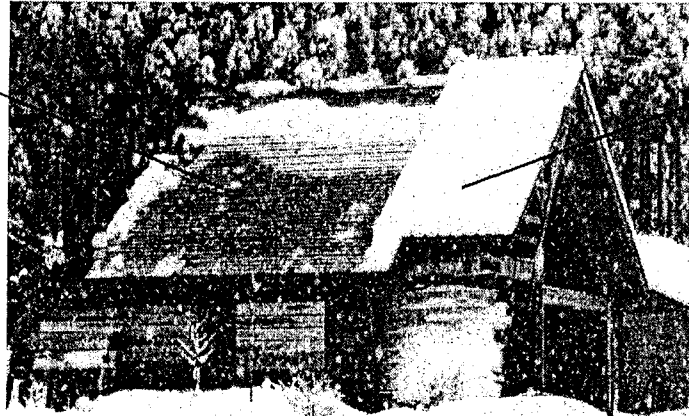


写真3-4 けらば部分に雪が残る部分滑落

屋根面温度  
が高い部分

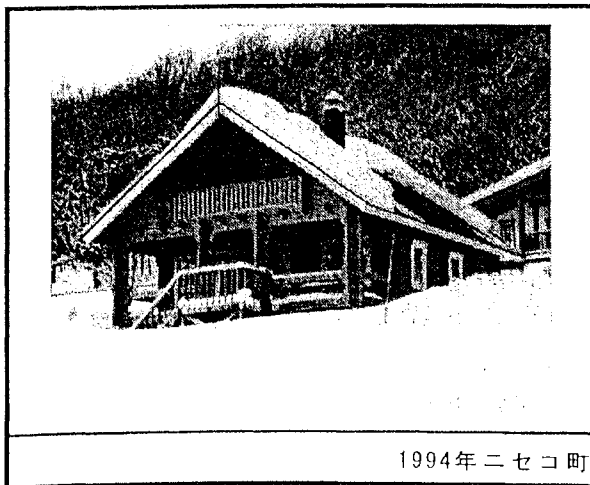


屋根面温度  
が低い部分

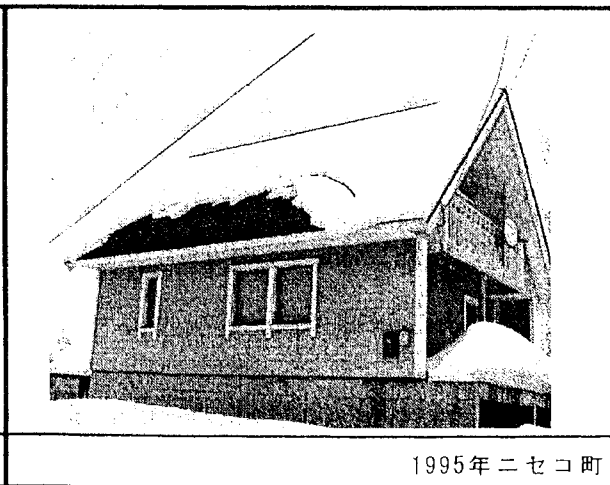
写真3-5 温度分布が不均一な屋根面で発生する部分滑落（石川県小松市）

### 3) 放物線状に発生した部分滑落

放物線状に亀裂が発生した部分滑落の代表的な事例を写真3-6に示す。写真のように、屋根雪の中央下方に放物線状の破断痕がみられ、破断した部分の下方が部分滑落している。この滑落形態は、1)と2)に示した部分滑落の要因が複合した場合に発生すると考える。具体的には、けらば部分が滑落しにくくなっていると同時に、屋根頂部の積雪も滑落しにくくなっていると考えられる。すなわち、このタイプの部分滑落には、積雪の引張・せん断抵抗力が同時に滑落を抑制している。



1994年ニセコ町



1995年ニセコ町

写真3-6 放物線状に発生した部分滑落

### 3. 3 屋根雪の部分滑落に関するモデル実験

---

既存建築物で発生している屋根雪の部分滑落は、3. 2項に示したように、3タイプの滑落形態に大別することができる。この滑落形態の特徴をみると、何れのケースも積雪が破断した後に滑落していると同時に、屋根面の温度が低温となりやすい場所に残雪している。このようなことから、本項では、部分的な滑落現象の発生要因を積雪の破断抵抗力、屋根面の温度むらによる凍着抵抗力の発生と仮定し、低温室内でモデル雪を用いた部分滑落の再現を行った。

3.3.1～2節は実験の方法について述べ、3.3.3節では実験に用いたモデル雪の諸性状について述べた。3.3.4～5節では、モデル雪を用いた滑落実験の結果について述べ、部分滑落の要因と特性について考察する。

#### 3.3.1 モデル雪の作製および諸性状の測定方法

3. 2項の観察結果に示した通り、屋根雪の部分滑落には積雪の破断抵抗力が大きく関わっている。このことから、部分滑落に関する実験を行う場合、自然雪を用いるか、もしくは積雪の破断抵抗力が自然雪に近似したモデル雪を用いる必要がある。実験は、自然雪が最も適していると考えられるが、安定した雪質の自然雪が常に採取できるとは限らない。このようなことから、本研究では、モデル雪を用いて部分滑落に関する実験を行った。

屋根雪の滑落実験で一般的に用いられているモデル雪についてみると、図3-2になる。図のように、既往の研究では「板状の氷」、「氷をフレーク状に削ったもの」がモデル雪として用いられる場合が多い<sup>3) 4) 5) 6)</sup>。しかし、これらのモデル雪は、雪物性が及ぼす滑落への影響を排除する目的で用いられるのが一般的であるため、本実験のように、積雪の破断抵抗力等、屋根雪の物性が滑落に積極的に関わる場合には用いることが難しい。一方、何らかの形で屋根雪の物性を影響を考慮した滑落実験においては、R. L. Sackの研究<sup>7)</sup>のように、雪粒径とほぼ同等の細かな氷粒子がモデル雪として用いられている。

これらのことから、本実験で用いるモデル雪は、雪粒径とほぼ同等の粒径を持つ氷粒子とした。モデル雪の作製装置の概要を図3-3に示す。図のように、モデル雪は、R. L. Sackの滑落実験で用いられたモデル雪の作製原理を参考に、次のように作製した。始めに、+5℃の水が入れられた塗装用のスプレーガン（ノズル径：1.2mm）を-20℃に冷却した低温室に設置した。次に、スプレーガンから100 ml/minの水量を3～5気圧の圧搾空気によって噴霧し、霧状になった水分を凍らせながら氷粒子を作製した。

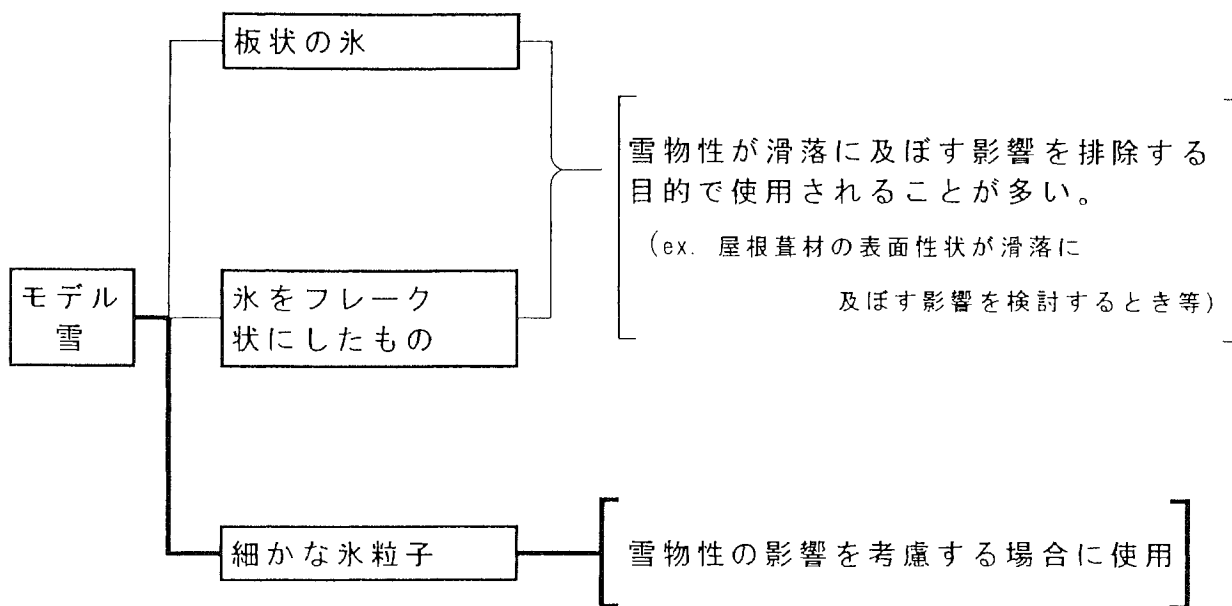


図3-2 既往の研究で一般的に用いられているモデル雪

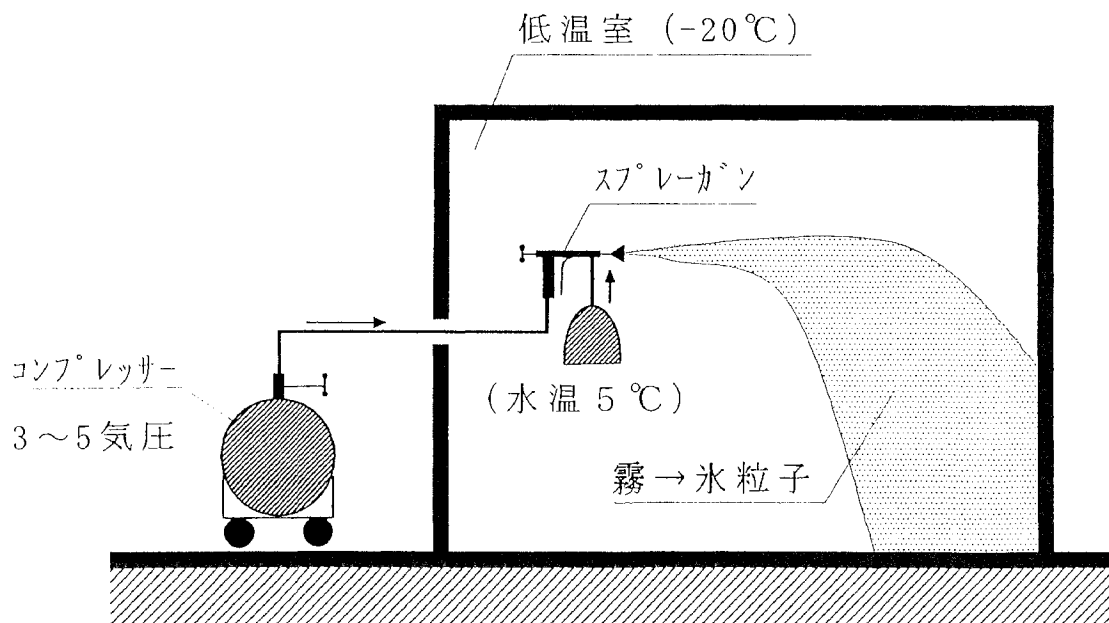


図3-3 モデル雪作製装置の概要

### 1) 粒径の測定方法

モデル雪を用いた滑落实験を行う場合、実験に用いたモデル雪の雪質を把握しておく必要がある。ここで、我が国で用いられている一般的な雪質の分類をみると、自然雪の雪質を「新雪」、「しまり雪」、「ざらめ雪」、「しもざらめ雪」の4種類に大別し、分類基準の一つに雪の粒径を挙げている<sup>\*)</sup>。このようなことから、本実験で用いられるモデル雪の雪質を把握するために、粒径の測定を実施した。

モデル雪の粒径は、以下の手順で測定した。始めに、屋根葺材上に堆積させた少量のモデル雪をマクロレンズを装着したカメラによって接写した。次に、撮影して得られたネガフィルムを万能投影機（倍率：100倍）で拡大し、図3-4に示す方法で、映し出された雪粒子の平均粒径を1/100mm単位で測定した。なお、粒径の測定は、ネガフィルム内に撮影された任意の120個のモデル雪を対象とした。

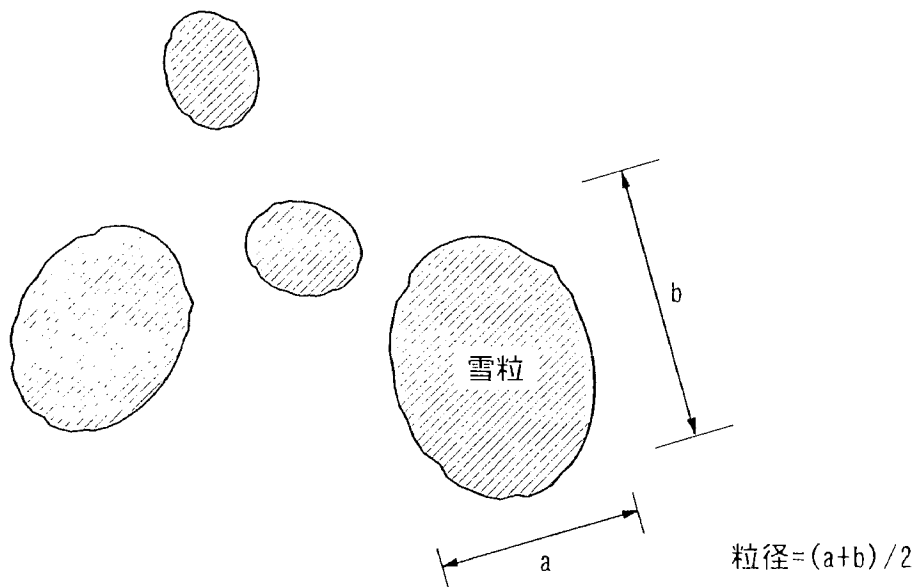


図3-4 平均粒径の測定方法

## 2) 引張およびせん断抵抗力の測定方法

屋根雪の部分滑落には積雪の破断抵抗力，すなわち積雪の引張・せん断抵抗力が大きく影響を及ぼしている。このことから，既往の研究で行われている積雪の引張・せん断抵抗力の測定方法を参考<sup>9)</sup>に，写真3-7に示す実験装置を作製した。この装置によって，滑落実験に用いたモデル積雪（モデル雪を堆積させたもの）の引張・せん断抵抗力を測定した。さらに，自然積雪の引張・せん断抵抗力も併せて測定した。自然積雪の引張・せん断抵抗力は1994年1月～3月の期間に実施した。

自然積雪を用いた引張・せん断抵抗力は，図3-5に示す実験装置を屋外に設置し，降雪によって装置内に堆積した雪が破断するまでの最大荷重を測定した。図のように，最大引張荷重  $T_t$  は，B部を固定し，A B間の積雪が破断するまでA部をレールに沿って移動させて測定した。最大せん断荷重  $T_s$  は，引張荷重と同様にB部を固定し，B C間の積雪が破断するまでC部をレールに沿って移動させて測定した。さらに，破断後にA部およびC部のレールとの摩擦抵抗力  $R_a$ ， $R_c$  を測定した。これらの値を用いて，自然積雪の引張抵抗力  $\sigma_t$  およびせん断抵抗力  $\sigma_s$  を式1)，2)から算出した。既往の研究によれば，自然積雪の引張・せん断抵抗力には，雪密度が大きく関わる<sup>10)</sup>。このことから引張・せん断抵抗力の測定に併せて雪密度も測定した。雪密度は，円筒形のスノーサンプラー（直径31mm，高さ50mm）を用いて測定した。

モデル積雪の引張・せん断抵抗力は，上述の自然雪を対象とした実験と同様の手法によって測定した。なお測定は，作製直後（密度 $260\text{kg/m}^3$ ）および滑落実験において破断した時（密度 $326\text{kg/m}^3$ ）のモデル積雪を対象とした。

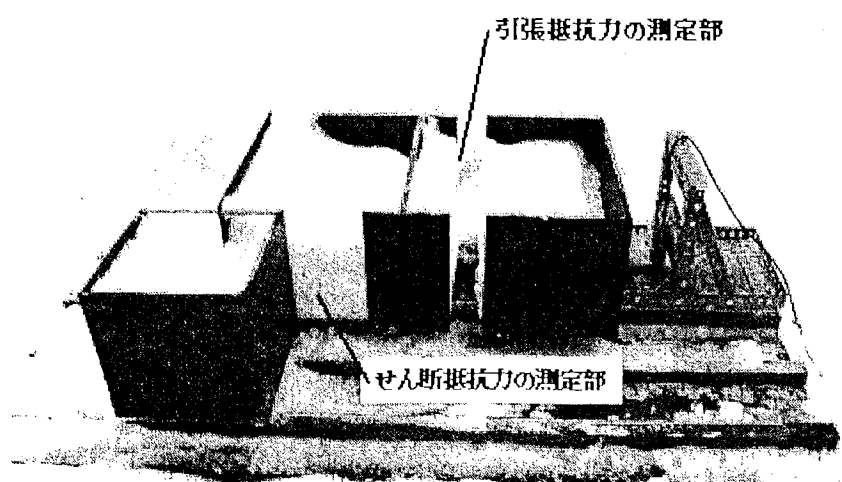
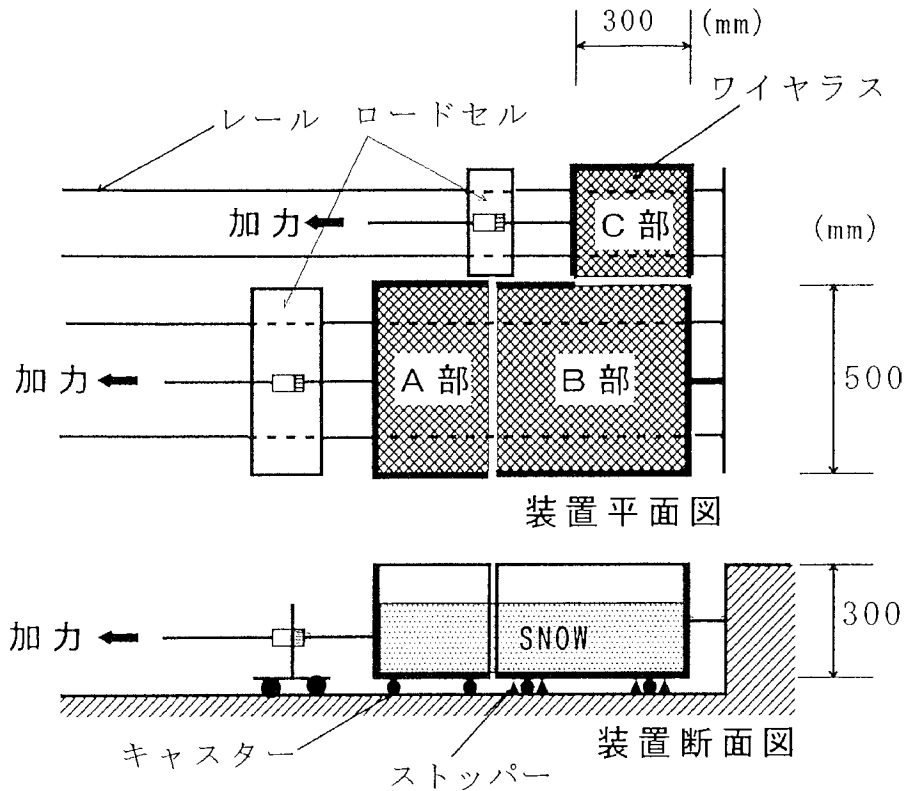


写真3-7 引張・せん断抵抗力の測定に用いた実験装置



$$\sigma_t = (T_t - R_a) / S_t \quad \dots 1)$$

$$\sigma_s = (T_s - R_c) / S_s \quad \dots 2)$$

ここに、 $\sigma_t$  : 積雪の引張抵抗力       $R_a$  : A部とレールとの摩擦抵抗力  
 $\sigma_s$  : 積雪のせん断抵抗力       $R_c$  : C部とレールとの摩擦抵抗力  
 $T_t$  : 最大引張荷重  
 $T_s$  : 最大せん断荷重  
 $S_t$  : A B間における破断面積  
 $S_s$  : B C間における破断面積

図3-5 積雪の引張・せん断抵抗力の測定装置概要

### 3.3.2 滑落モデル実験の概要

#### 1) 屋根雪の固定条件および試験体概要

既存建築物で発生している屋根上積雪の部分滑落には、積雪の破断抵抗力や屋根面の温度むらが影響を及ぼしており、その滑落形態は3タイプに大別することができる。このようなことから、部分滑落の発生要因を積雪の破断抵抗力、屋根面の温度むらによる凍着抵抗力の発生と仮定し、低温室内でモデル積雪を用いて部分滑落の再現を試みた。

実験に用いた試験体は、図3-6のように、滑落が発生しにくくなる部分にワイヤスを貼り付けて、モデル積雪の移動を抑制させた。滑落形態は、3.2項の屋外観察結果に基づいて、以下のような3条件（1～3辺固定）に想定した。さらに、屋根雪が全面滑落を想定した条件（固定なし）も併せて実験した。

**固定なし：**屋根面に温度むらが発生せず、温度上昇に伴い均一に凍着抵抗力が低減する場合。また、棟部分に雪は堆積せず積雪の引張抵抗力は発生しない条件。（全面滑落する条件）

**1辺固定：**屋根面には温度むらは生じていないが、棟部分に比較的多くの雪が堆積して積雪の引張抵抗力が発生する条件。

**2辺固定：**屋根面の両端部（けらば）が低温となる温度むらが発生している場合。棟部分に雪は堆積せず積雪のせん断抵抗力が発生する条件。

**3辺固定：**屋根面の両端部が低温となる温度むらが生じ、棟部分に比較的多くの雪が堆積し、積雪の引張抵抗力とせん断抵抗力が発生する条件。

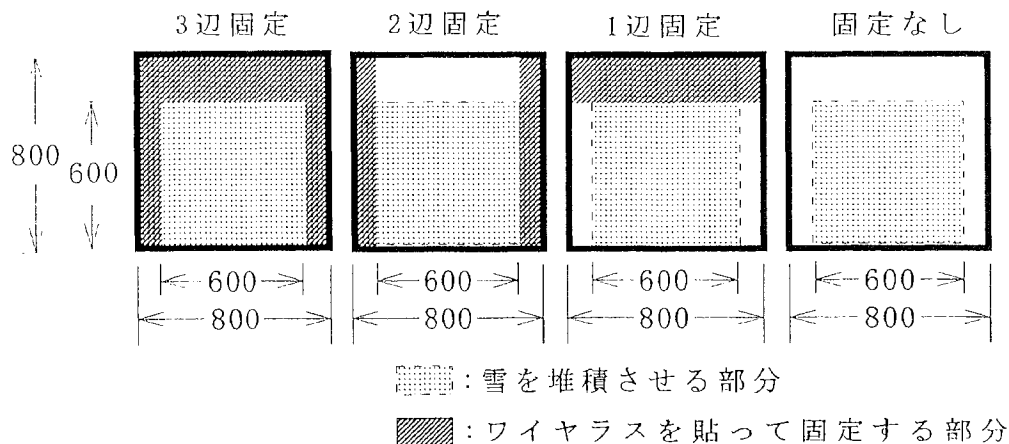


図3-6 滑落モデル実験の試験体概要



## 2) 実験シリーズおよび実験方法

滑落実験における実験条件の概要を表3-1に示す。表のように、実験に用いた屋根葺材は、表面が平滑で滑落が発生しやすい材料としてフロート板ガラスを選定した。なお、予備実験を実施したところ、実験勾配が20°前後では、滑落が極めて発生しにくかった。このことからから、実験勾配は、滑落が円滑に発生する40°を中心として設定している。実験の方法は、-20℃の低温室内で各屋根葺材上にモデル雪を5mmふるいを用いて均一に50mm堆積させた。次に、堆積させたモデル積雪の表面に滑落状況を観察するためのマーキング（100mm格子）を写真3-8のように行った。その後、-5℃に設定した低温室内で所定の勾配に設定し、1時間30分の間で+10℃になるように低温室の温度を上昇させてモデル積雪の移動状況をタイムラプスビデオで観測した。実験中の各材料裏面温度は熱電対によって1分毎に測定した。

表3-1 実験シリーズ

材料名および概要	実験勾配(°)	固定方法			
		0辺	1辺	2辺	3辺
フロート板ガラス(材料厚5mm)	30				●
	40	●	●	●	●
	60				●

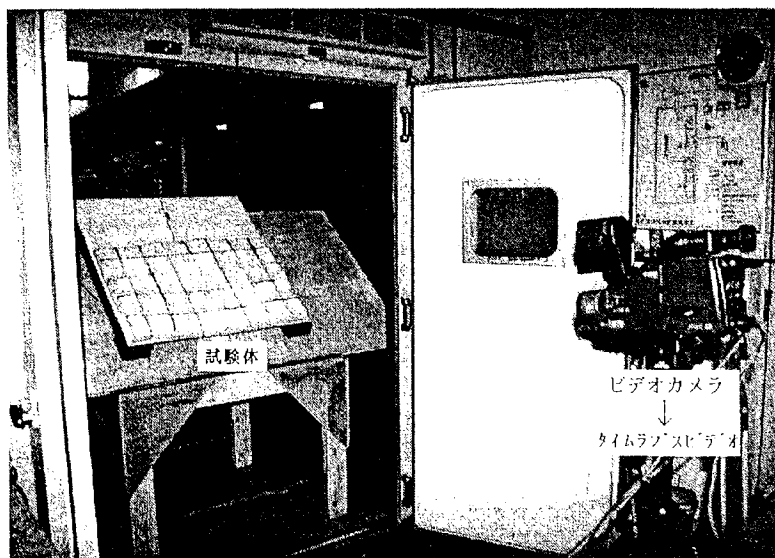


写真3-8 滑落モデル実験の様子

### 3.3.3 滑落実験に用いたモデル雪の諸性状

滑落実験に用いたモデル雪を写真3-9に、その雪の粒径分布を図3-7に示す。なお図中には、小島が行った札幌における自然雪（降雪中の雪）の観測結果を併せて示してある<sup>11)</sup>。図のように、モデル雪の粒径は、粒径0.6～0.9mm（平均粒径：0.83mm）に最も多く分布しており、札幌の雪に比較してやや大きな粒径分布と考えられるものの、その分布曲線は自然雪とほぼ同様の形状となっている。

屋根雪の滑落現象に大きく影響を及ぼす抵抗力の一つには、積雪の引張抵抗力およびせん断抵抗力がある。本実験に用いたモデル積雪の引張・せん断抵抗力をみると次のようになる。図3-8にモデル積雪の密度と引張抵抗力との関係を示す。なお、図中には、札幌市で測定を行った自然積雪の引張抵抗力および相関曲線、大塚らの自然積雪を対象とした相関曲線を併せて示してある<sup>12)</sup>。図のように、モデル積雪の引張抵抗力は、自然積雪における密度と引張抵抗力との相関曲線上に位置しており、密度 $260\text{kg/m}^3$ 時の引張抵抗力は、積雪断面 $1\text{m}^2$ 当たり $500\text{N}$ 程度となる。図3-9にモデル積雪の密度とせん断抵抗力との関係を示す。なお図中には、図3-8と同様に札幌市で行った自然積雪におけるせん断強度の測定結果を併せて示してある。図のように、モデル積雪のせん断強度は自然積雪における積雪の単位重量とせん断抵抗力との相関曲線近傍に位置しているが、自然積雪よりもやや大きな値を示す。

これらの結果をみると、滑落実験に用いたモデル積雪の引張・せん断抵抗力（滑落終了時の密度 $326\text{kg/m}^3$ ）は、同程度の密度を持つ自然積雪の特性に近似していると考えられる。但し、作製直後におけるモデル積雪の密度は $260\text{kg/m}^3$ であった。我が国で用いられている一般的な雪質分類に従えば、本実験で用いたモデル積雪は、真冬の積雪層の大部分を占めるしまり雪（密度： $150\sim 500\text{kg/m}^3$ ）に該当し、降雪直後の新雪（密度： $30\sim 150\text{kg/m}^3$ ）に比べて大きな密度になる<sup>8)</sup>。すなわち、モデル積雪を用いて行った実験の結果は、降雪直後の新雪が滑落する状況を示しているのではなく、降雪から数日経過して積雪が圧密された状況下での滑落状況を示していると考えられる必要がある。

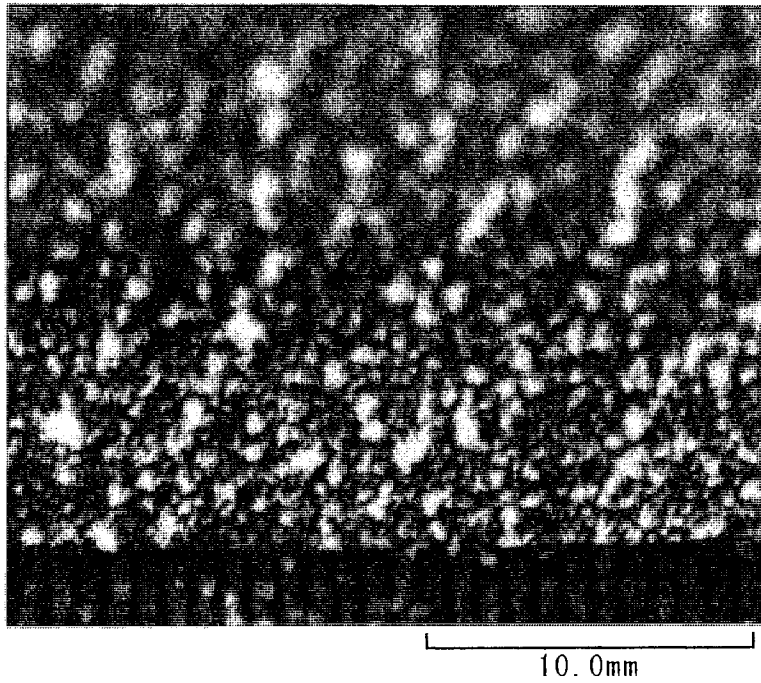


写真3-9 作製したモデル雪

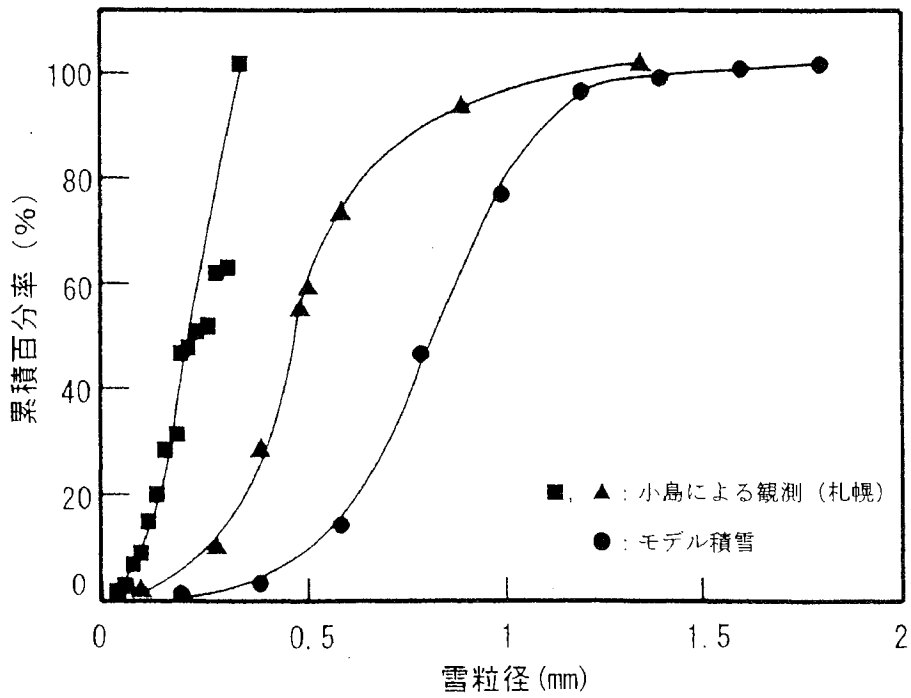


図3-7 モデル雪の粒径分布

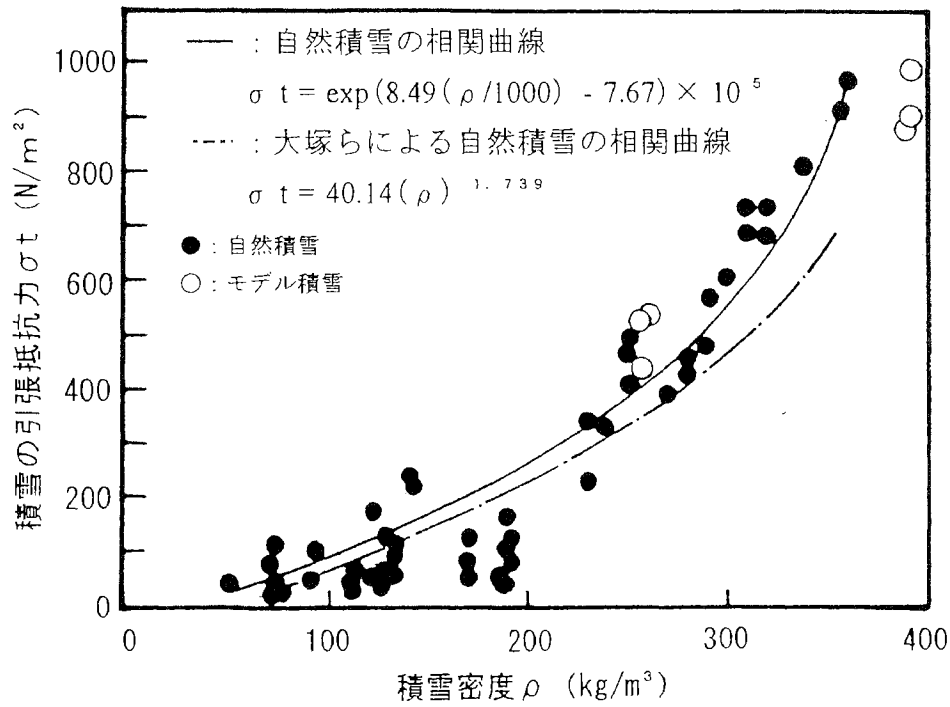


図3-8 モデル積雪の密度と引張抵抗力との関係

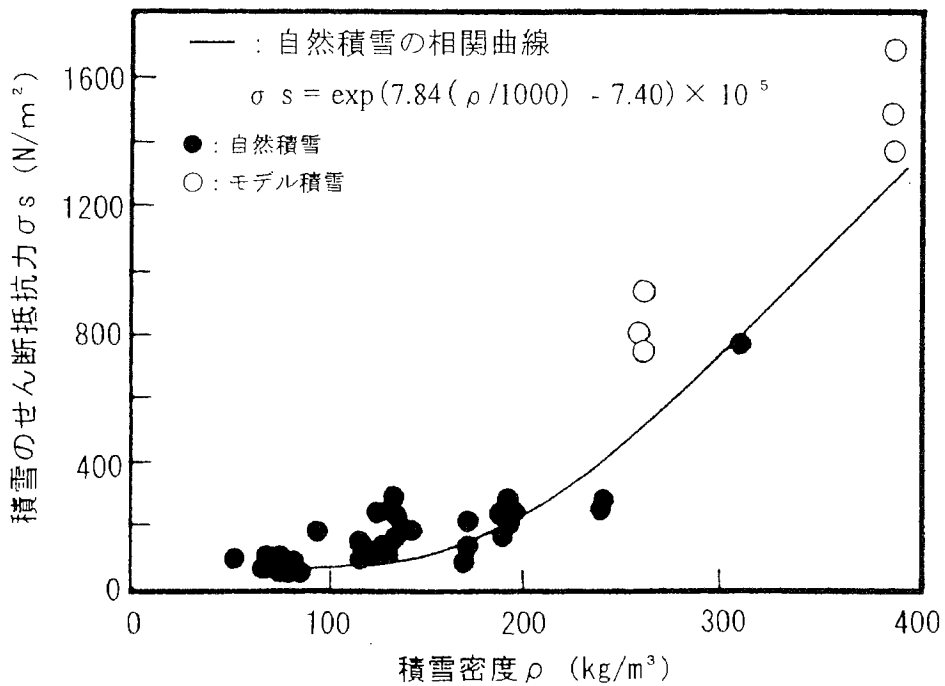


図3-9 モデル積雪の密度とせん断抵抗力との関係

### 3.3.4 滑落実験の結果

#### 1) 各固定条件ごとの滑落状況

試験体の両端および上部を固定した「3辺固定」、実験勾配 $40^\circ$ における滑落の推移状況を写真3-10に示す。写真のように、固定されていない下方に顕著な変形が見られ、下方端部が巻だれが形成されている。さらに、中央部にはクラックが発生している。一方、固定部分を設けない場合には、裏面温度が $0\sim+2^\circ\text{C}$ になるとモデル積雪全体が徐々に移動し始め、その後、一気に移動して滑落が終了する。

ここで、実験勾配 $40^\circ$ を対象にタイムラプスビデオの画像を基に滑落状況を模式的に整理すると、図3-10となる。図のように、上部のみを固定した1辺固定の場合は固定されていない部分全体が下方に移動する。その後、固定部と固定していない部分との間に直線状のクラックが発生し、一気に移動して滑落が終了する。両端部を固定した2辺固定の場合は、中央部全体が下方に移動しながら変形し、下方端部および固定部と固定していない部分との境界に縦方向のクラックが発生する。その後、下方端部の巻だれ部分から部分的な滑落現象がみられる。両端および上部を固定した3辺固定の場合は、固定されていない部分の下方に顕著な変形がみられ、中央部には複数のクラックが発生する。その後、クラックに沿った放物線状の滑落がみられる。このように、固定条件によって滑落状況が大きく異

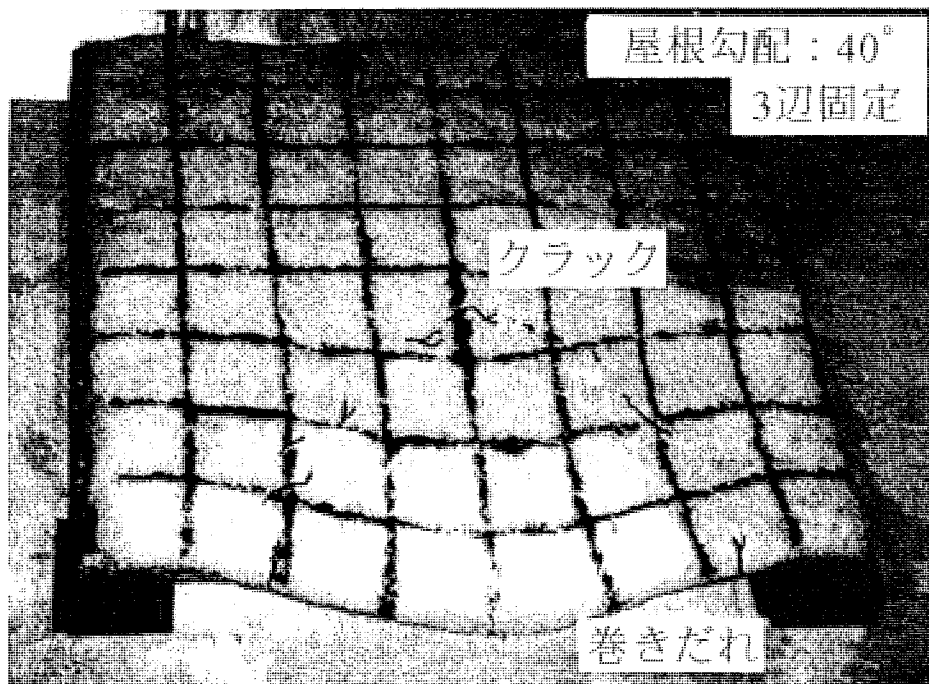


写真3-10 モデル実験における滑落の推移状況

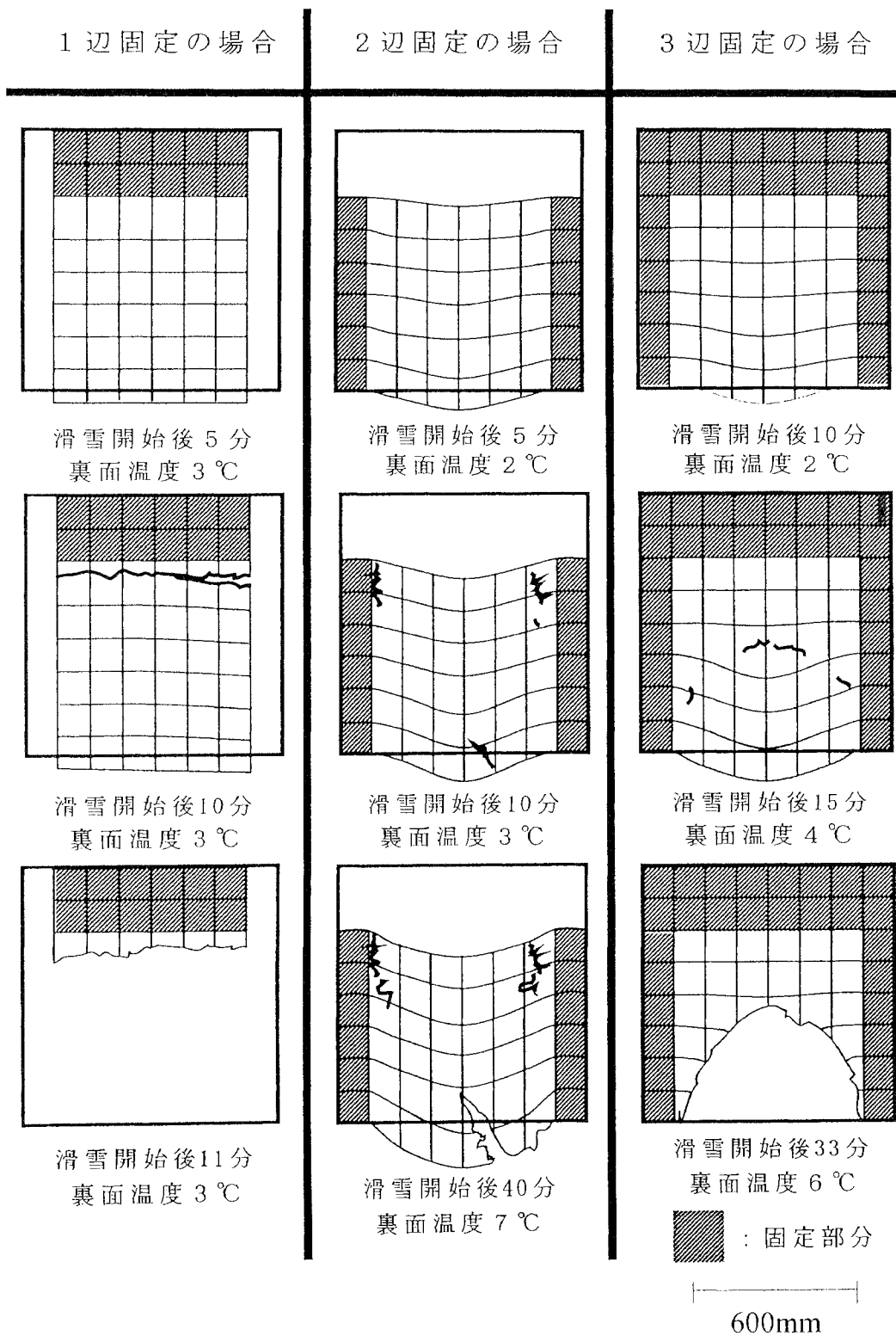


図3-10 滑落状況の模式図（勾配40°）

なっている。

顕著な変形が始まる材料の裏面温度をみると、いずれの固定条件においても0℃前後である。しかし、滑落が終了する裏面温度をみると、固定なしの場合が0～+2℃で最も低く、1辺固定で+3℃前後、2および3辺固定で+6℃前後となり、固定数が多くなるに伴って滑落終了時の裏面温度が上昇する傾向を示した。

次に、滑落に要する時間についてみると、次のようになる。固定部分を設けない場合の滑落は、屋根雪が移動開始してから7分で終了する。一方、1辺固定の場合は11分を要し、2および3辺固定の場合は、30分を経過しても滑落が生じなかった。このように、滑落終了までに要する時間は、固定数が多くなるに伴い長くなる傾向がみられる。これらのことから、1辺固定の場合は、固定なしに比べて約1.5倍、2及び3辺固定の場合は、5倍以上滑落しにくいことが明らかとなった。

## 2) 屋根勾配と部分的な滑落状況との関係

3辺固定の各勾配における滑落終了時の状況を模式的に示すと、図3-11となる。図のように、モデル積雪の滑落形態は、何れの勾配においても写真3-10に示すような下方端部に巻だれが形成され、その巻だれに引っ張られるように放物線状にクラックが発生し、その後、滑落が終了する。勾配60°では最初の滑落時に既に上部にクラックが発生している。この放物線状のクラックの傾きは、勾配の増加に伴って大きくなり、破断面の全長が長くなる。このように、屋根勾配が大きいほど、残雪する部分の面積が少なくなる。

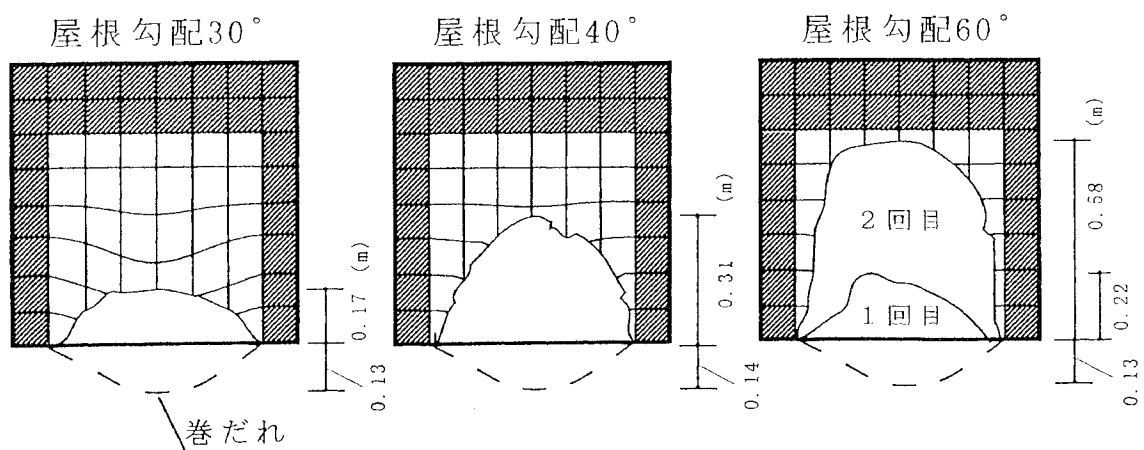


図3-11 3辺固定の各勾配における滑落終了時の状況

### 3.3.5 滑落実験のまとめ

3.3.1～4節では、既存建築物で発生している部分滑落をモデル積雪を用いて再現する実験を行った。その結果をまとめると、以下ようになる。

1) 既存建築物で発生している部分滑落現象の特徴から、この現象の発生する要因を仮定してモデル実験を実施したところ、実際の部分滑落を再現することができた。このことから、部分的な滑落現象の発生要因は、屋根面に温度むらが生じ「けらば部分」で凍着抵抗力が発生する場合、棟部分に雪が跨って堆積した場合で発生すると考えられる。

2) 部分的な滑落現象は、屋根雪の破断に伴って発生する。そのため、この滑落現象の発生には、積雪の破断抵抗力が大きく関与している。部分的な滑落現象に関するモデル実験を行った結果、破断を伴わない滑落（固定なし）は、屋根雪が移動開始して間もなく終了する。一方、積雪の引張破断を伴う滑落（1辺固定）の場合は、固定なしに比べて1.5倍の時間を要し、積雪のせん断を伴う滑落（2辺固定）および積雪の引張・せん断を伴う滑落（3辺固定）の場合では、5倍以上もの時間を要した。このように、滑落終了までに要する時間は、固定数が多くなるに伴い長くなる傾向となる。これらのことから、屋根雪の破断を伴う部分滑落は、その破断条件が変化することで、極めて滑落しにくくなり、規則的な滑落を大きく阻害すると考えられる。



### 3. 4 力学的要因からみた部分滑落

3. 3項では、既存建築物で発生する屋根雪の部分滑落をモデル実験によって再現を試みた。その結果、部分滑落の発生は、「棟部に雪が跨って堆積する場合」、「屋根面の温度むらによる凍着抵抗力の発生」が主な要因であることが明らかとなった。このことから、本節では、先に示した部分滑落の実験結果を力学的要因から考察する。

#### 3.4.1 検討の方法

勾配屋根で発生する屋根雪の滑落現象は、屋根雪の持つ位置エネルギー、すなわち滑動力が動力源である。滑落現象は、滑動力が滑動を阻止しようとする諸抵抗力を上回った場合に発生する。このような滑落現象を支配する力学的要因を模式的に示すと図3-12になる。図のように、屋根雪が滑落しようとする力は、屋根雪の質量( $m$ )に重力加速度( $g$ )を乗ずることで算出される。一方、滑動を阻止しようとする諸抵抗力は「屋根雪と屋根葺材との界面に作用する抵抗力」と「積雪の破断抵抗力」の2種類に大別することができる。前者の界面抵抗力には凍着抵抗力( $F_{af}$ )や摩擦抵抗力( $F_{sf}$ ,  $F_{kf}$ )等があり、後者の破断抵抗力には、積雪の引張抵抗力( $F_t$ )やせん断抵抗力( $F_s$ )等がある。このような滑動力と滑動を阻止する抵抗力との釣合関係について既往の研究を整理すると<sup>3)・13)・14)</sup>、表3-2のようになる。表のように、屋根雪の滑落を力学的な要因から考察しようとする場合には、各項目に示した諸抵抗力の特徴や具体的な数値等を予め把握・設定する必要がある。

ここで、3. 2項で示したモデル実験における部分滑落の特徴と、滑落を支配する力学的要因との関係を整理すると次のようになる。始めに、部分滑落の温度条件についてみると、先の実験結果で示したとおり、何れの固定条件においても0℃以上で雪が移動し始めている。すなわち、屋根雪が滑落した部分（予め、ワイラスを貼った屋根面の両端部分を除く「図3-6参照」）では、凍着抵抗力は作用していないと言える。このことから、本モデル実験での滑落条件は、表3-2中の網掛けで示した条件No. 2および4となる。条件No. 2とNo. 4は、それぞれ部分滑落の推移状況を釣合式として示しており、No. 2は積雪が破断する前の状況、No. 4では、積雪が破断した後の状況を示している。このことから、部分滑落による屋根雪の破断形状等を検討する場合には、条件No. 2の釣合式を用いる必要がある。条件No. 2の釣合式を3.3.2節で示した部分滑落実験の固定条件に従って整理すると、次に示す式3)~6)のようになる。

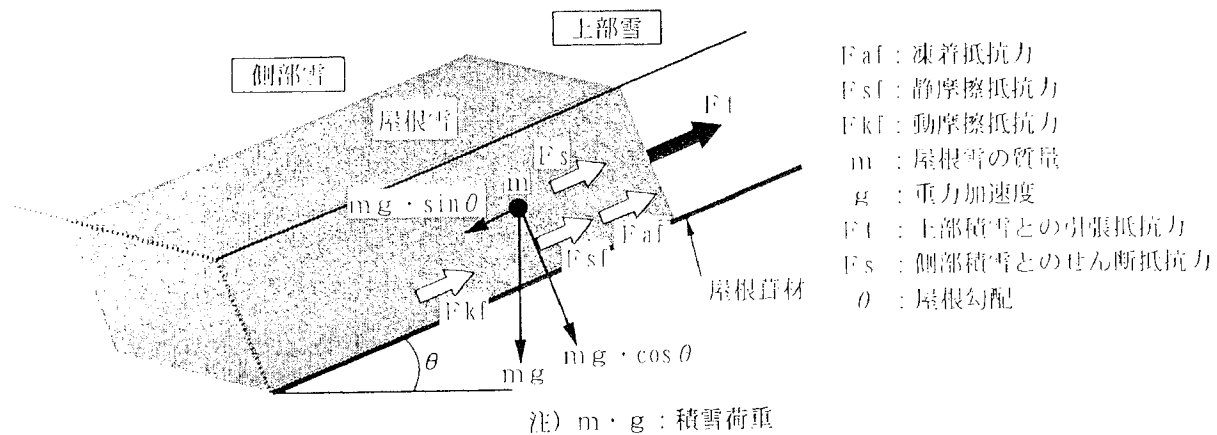


図3-12 屋根雪の滑落時に作用する力

表3-2 勾配屋根における屋根雪の滑落条件

	温度 ( $t$ °C)	力の釣合条件	条件No.
滑落開始	$t \leq 0$	$m \times g \times \sin \theta > F_{af} + F_{sf} + F_t + F_s + F_c$	1
	$t > 0$	$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_t + F_s + F_c$	2
滑落持続	$t \leq 0$	$m \times g \times \sin \theta > F_{kf}$	3
	$t > 0$	$m \times g \times \sin \theta > F_{kf}$	4

固定なしの場合

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} \quad \dots 3)$$

1 辺固定の場合

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_t \quad \dots 4)$$

2 辺固定の場合

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + 2F_s \quad \dots 5)$$

3 辺固定の場合

$$m \times g \times \sin \theta > F_{sf} + F_t + 2F_s \quad \dots 6)$$

ここに、 $F_{sf}$  : 静摩擦抵抗力(N),  $F_t$  : 上部積雪の引張抵抗力(N)  
 $F_s$  : 側部積雪のせん断抵抗力(N),  $\theta$  : 屋根勾配 (°)  
 $m \times g$  : 積雪荷重(N)

これら式3)～6)をみると、固定なしの場合は、屋根雪と屋根葺材との摩擦抵抗力によって滑落条件が推定できる。しかしながら、積雪の破断現象に伴って滑落現象が発生する1～3辺固定の場合は、破断に必要な屋根雪の量に関する検討が必要となる。1～3辺固定の場合について滑落条件を推定すると、以下のようになる。

任意の屋根を対象として式4)～6)の各項を関数として表すと式7)、式9)および式11)となる。式7)、式9)および式11)を積雪の破断位置や破断に必要な屋根雪の量について整理すると式8)、式10)および式12)となる。式8)、式10)および式12)は、滑落開始条件を満たす釣り合い位置を示している。なお、雪密度と引張およびせん断抵抗力との関係は図3-8～9に示した結果を用いている。

### 1 辺固定の場合

$$LhZ\rho\sin\theta > LhZ\rho\mu s\cos\theta + 10000hZ\exp(8.49(\rho/1000)-7.67) \quad \dots\dots 7)$$

$$L > \frac{\exp(8.49(\rho/1000)-7.67)}{\rho(\sin\theta - \mu s\cos\theta)} \times 10^4 \quad \dots\dots 8)$$

### 2 辺固定の場合

$$LhZ\rho\sin\theta > LhZ\rho\mu s\cos\theta + 20000Lh\exp(7.84(\rho/1000)-7.40) \quad \dots\dots 9)$$

$$Z > \frac{2\exp(7.84(\rho/1000)-7.40)}{\rho(\sin\theta - \mu s\cos\theta)} \times 10^4 \quad \dots\dots 10)$$

### 3 辺固定の場合

$$LhZ\rho\sin\theta > LhZ\rho\mu s\cos\theta + 10000hZ\exp(8.49(\rho/1000)-7.67) + 20000Lh\exp(7.84(\rho/1000)-7.40) \quad \dots\dots 11)$$

$$LZ > \frac{(Z\exp(8.49(\rho/1000)-7.67) + 2L\exp(7.84(\rho/1000)-7.40))}{\rho(\sin\theta - \mu s\cos\theta)} \times 10^4 \quad \dots\dots 12)$$

ここに、 $\theta$  : 屋根勾配( $^{\circ}$ )、 $\rho$  : 積雪密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $h$  : 雪の厚さ(m)

$\mu s$  : 屋根雪と屋根葺材との静摩擦係数

$L$  : 滑落方向の屋根雪の長さ(m)

$Z$  : 滑落方向に垂直な屋根雪の長さ(m)

注)  $LhZ\rho \times 10 = m \cdot g(\text{N})$  とした (図3-11参照)

### 3.4.2 検討の結果

前述の式8)～式12)に3.3項に示した滑落モデル実験の各条件を代入すると以下に示す結果が得られた。なお、各式の結果を導くためには、屋根葺材と屋根雪との静摩擦係数 $\mu_s$ を設定する必要がある。この $\mu_s$ については、滑落モデル実験における摩擦に界面が十分に水分が介在しており、フロート板ガラスとモデル積雪との静摩擦係数が0に近い値となっていると考えられるため、 $\mu_s=0$ を設定した。この $\mu_s$ に関する特性の詳細は、第4章～5章で述べることとする。

#### 1 辺固定の場合

式8)に滑落モデル実験における1辺固定の条件( $\theta=40^\circ$ ,  $\rho=326\text{kg/m}^3$ ,  $\mu_s=0$ )を代入すると $L>0.35\text{m}$ となる。実験で得られた1辺固定における破断位置は軒先から0.50～0.57mであり、式8)で得られる $L$ の条件範囲内となる。すなわち、1辺固定の条件における屋根雪は $L$ (滑落方向の屋根雪の長さ)が0.35m以上の場合、固定部分と固定されていない部分との境界で積雪が破断して、滑落すると考える。

#### 2 辺固定の場合

式10)に滑落モデル実験における2辺固定の条件( $\theta=40^\circ$ ,  $\rho=326\text{kg/m}^3$ ,  $\mu_s=0$ )を代入すると、 $Z>0.76\text{m}$ となる。この算出結果に従えば、2辺固定の場合、桁行方向における屋根の幅 $Z$ が0.76m以上になれば、殆どの積雪が滑落すると推測できる。ここで、式10)の釣り合い式における屋根雪は、剛体として扱っている。しかし、図3-9で示したように2辺固定におけるモデル積雪の滑落は、巻だれの発生を伴いながら発生しており完全な剛体ではない。従って、式10)で示した結果は、実際の屋根雪における破断の形状を予測するまでの十分な式とはなっていないものの、モデル実験における滑落状況を考慮しながら1辺固定の場合の結果と対比すると次のことが言える。1辺固定における算出結果をみると、 $L$ は0.35m以上になると滑落する。これに対し、2辺固定における $Z$ は0.76m以上にならないと滑落しない。すなわち、2辺固定における屋根雪の滑落は、少なくとも1辺固定に比べて2倍以上滑落しにくいことになる。図3-10中に示した2辺固定の滑落状況をも、固定部と固定されていない部分に完全なせん断破壊が発生していない。このことからみても、けらば部分に雪が残る滑落は、棟部に雪が残る滑落に比べて、極めて滑落しにくくなると考えられる。

### 3 辺固定の場合

式12)に滑落モデル実験における3辺固定の条件 ( $\rho = 326 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0$ ) を代入すると、式13)の関係が得られる。

---

$$\sin \theta LZ > 0.23Z + 0.48L \quad \dots 13)$$

但し、 $L > 0$ ,  $Z > 0$ とする

ここに、 $L$  : 滑落方向の屋根雪の長さ (m)

$Z$  : 滑落方向に垂直な屋根雪の長さ (m)

$\theta$  : 屋根勾配 ( $^\circ$ )

---

ここで、式13)が滑落モデル実験と同様の試験体を想定し、式13)に $Z=0.6\text{m}$ ,  $\theta=40^\circ$ を代入すると、 $L < -1.4\text{m}$ となり全く滑落しない結果となる。さらに、同式に $Z=0.6\text{m}$ ,  $\theta=60^\circ$ を代入すると $L > 5.76\text{m}$ 以上とならないと滑落しない。このように、式13)の釣合条件式を用いて積雪が破断して滑落する屋根雪の量を算出すると、3辺固定の条件では、1辺および2辺に比べて極めて全面滑落しにくいと考えられる。なお、図3-10, 11で示した滑落モデル実験の結果みると、屋根勾配 $\theta=40^\circ$ の3辺固定では、 $L=0.31\text{m}$ の位置でクラックが発生し、その位置以下で放物線状の部分滑落が発生している。このように、滑落モデル実験と式13)の算出結果とが一致しない要因には、式13)の屋根雪が剛体と想定しているのに対し、滑落モデル実験における屋根雪が完全な剛体でなく、巻だれやクラックが発生することが挙げられる。式13)は屋根雪が全面滑落する釣合条件を示しており、屋根雪の破断形状(放物線の形状等)を予測する式となっていない。このような屋根雪の破断形状を予測し、例えば、部分滑落がもたらす偏荷重の影響等を検討する場合には、積雪の粘弾性を考慮した予測式を求める必要がある。

これらの結果から、屋根雪の部分滑落が積雪荷重評価に及ぼす影響を考察すると、図3-13のようになる。図のように、「1辺固定」および「2辺固定」では、屋根の長さが $0.35\text{m}$ 以上、桁行方向の長さが $0.76\text{m}$ 以上となれば、殆どの雪が滑落する。残雪は「けらば」や「棟部分」のみとなる。建築物における屋根長さは、これら長さよりも大きくなることが一般的である。このことから、1辺固定の状況や2辺固定の状況は、勾配屋根における積雪荷重の評価に大きな影響を及ぼすとは考えにくい。すなわち、多量の残雪が長期にわたって存在し、屋根上の積雪が不均一となることが少ないと考える。一方、「3辺固定」の場合は、1辺および2辺固定の条件に比べて全面滑落が極めて発生しにくく、滑落が発生したとし

でも残雪する部分が多い。図3-11で示した実験結果をみても、 $60^\circ$ 以下の屋根勾配では、屋根面の半分以上が残雪している。このような特徴をみると、3辺固定の条件では多量の残雪が長期にわたって存在し、屋根上積雪が不均一になりやすいと考える。これらのことから、勾配屋根で発生する屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合、「3辺固定」のように、「けらば」と「棟部分」の雪が同時に滑落を抑制する状態にならないことが、評価の前提条件になると言える。

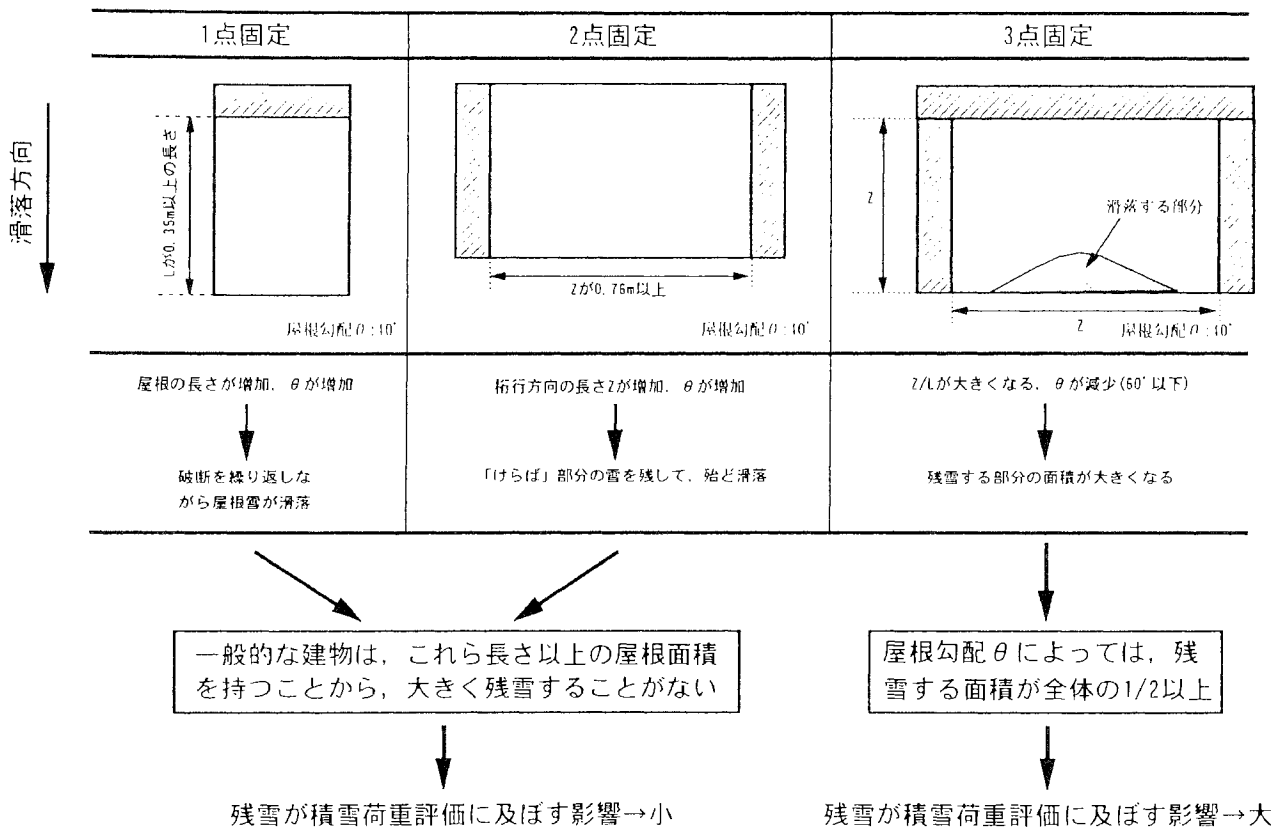


図3-13 勾配屋根における積雪荷重評価と各固定条件との関係

### 3. 5 まとめ

---

屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を考える場合、屋根堆積した雪全体が、一定の条件で規則的に滑落する必要がある。屋根面の一部で残雪すると、屋根上の積雪深が不均一になるため、積雪荷重を算定することが困難になる。本章では、屋根上の積雪深が不均一となる要因として、屋根雪の部分滑落に着目し、この滑落の主要因について検討を行った。その結果をまとめると次のようになる。

1) 既存建築物で発生している部分滑落の特徴から、この現象の発生する要因をモデル実験したところ、実際の部分滑落と同様の現象を再現することができた。このことから、屋根雪の部分滑落の発生要因は、屋根面に温度むらが生じ「けらば部分」で凍着抵抗力が発生する場合、棟部分に雪が跨って堆積する場合で発生すると考えられる。

2) 部分的な滑落は、屋根雪の破断に伴って発生する。そのため、この滑落の発生には、積雪の破断抵抗力が大きく関与している。部分的な滑落に関するモデル実験を行った結果、破断を伴わない滑落（固定なし）は、屋根雪が移動開始して間もなく終了する。一方、積雪の引張破断を伴う滑落（1辺固定）の場合は、固定なしに比べて1.5倍の時間を要し、積雪のせん断を伴う滑落（2辺固定）および積雪の引張・せん断を伴う滑落（3辺固定）の場合では、5倍以上もの時間を要した。このように、滑落終了までに要する時間は、固定数が多くなるに伴い長くなる傾向となる。これらのことから、屋根雪の破断を伴う部分滑落は、その破断条件が変化することで、極めて滑落しにくくなり、規則的な滑落を大きく阻害すると考えられる。

3) 部分滑落の特徴を滑落を支配する力学的要因から考察したところ、1辺固定のように、棟部の屋根雪のみが固定される状況では、勾配屋根における積雪荷重の評価に大きな影響を及ぼすとは考えにくい。すなわち、多量の残雪が長期にわたって存在し、屋根上の積雪が不均一となることが少ないと考える。残雪する部分の面積は、2、3辺固定のように、固定数の増加に伴って多くなる特徴を持っている。特に、3辺固定（棟・けらばの両方が固定）」の場合は、雪の引張・せん断抵抗力が同時に作用するため全面滑落が極めて発生しにくく、滑落したとしても残雪する部分の面積が多い。従って、屋根上積雪深が不均一になりやすいと考える。これらのことから、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合、「3辺固定」のように、「けらば」と「棟部分」の雪が同時に滑落を抑制する状態にならないことが、評価の前提条件になると言える。

### 第3章 参考文献

---

- 1) 前田博司：金属板屋根における積雪の滑落，雪氷，第41巻3号，pp.199-204, 1979.9
- 2) 島田洋：サスペンション膜構造の除雪実験，日本雪工学会誌，Vol.6, No.3, pp.10-17, 1990.9
- 3) 山口英治：膜構造建築物における整序積雪荷重に関する研究，北海道工業大学学位論文，1998.3
- 4) 伊東敏幸，苫米地司，星野政幸：劣化した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.2-10, 1994.4
- 5) 渡辺正朋，平井和喜：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との静摩擦，日本雪工学会誌，第3号，pp.1-11, 1987.6
- 6) 渡辺正朋，平井和喜：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
- 7) Sack, R. L., et al., : Cold Room Studies for Sliding Snow, First International Conference on Snow Engineering, pp.199-209, 1988
- 8) 前野紀一，福田正巳編：基礎雪氷学講座I，雪氷の構造と物性，古今書院，pp.132-142
- 9) 吉田順五：雪の一生，pp.50-51，北方文化写真シリーズ5，楡書房，1957.2
- 10) 渡辺善八：雪質の破壊強度および積雪の崩落について，東北地域災害科学研究報告，No.14, pp.13-16, 1985
- 11) 小島賢治：顕微鏡による飛雪粒子の観測，低温科学，物理編，Vol.27, pp.74-80, 1969
- 12) 大塚清敏，他5名：膜構造物の雪処理に関する研究，膜構造物研究論文集'90, No.4, pp.55-68, 1990
- 13) 渡辺正朋：屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究，東北大学学位論文，1990.6
- 14) 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



## 第 4 章 屋根葺材の表面性状が滑落抵抗力に及ぼす影響

	pp.
4.1 はじめに -----	4- 1
4.2 研究の方法 -----	4- 3
4.2.1 屋根葺材の表面粗さが滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験	4- 3
4.2.2 水分が滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験 -----	4- 7
4.2.3 屋根葺材の撥水性が滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験 -	4- 8
4.3 研究結果	
4.3.1 表面粗さ特性が滑落抵抗力へ及ぼす影響 -----	4-10
4.3.2 屋根葺材との界面付近における水分が滑落抵抗力に及ぼす影響	4-15
4.3.3 屋根葺材の撥水性が滑落抵抗力に及ぼす影響 -----	4-19
4.4 滑落抵抗力に対する屋根葺材表面性状の関連強さ -----	4-24
4.5 まとめ -----	4-28
参考文献 -----	4-30

## 第4章 屋根葺材の表面性状が滑落抵抗力に及ぼす影響

### 4.1 はじめに

---

屋根雪の滑落を支配する抵抗力（以下、滑落抵抗力）は、屋根雪の破断を阻止する雪粒子相互の破断抵抗力と、屋根雪と屋根葺材との間に発生する界面抵抗力の2つに大別できる。前者の破断抵抗力には積雪の引張およびせん断抵抗力があり、これら抵抗力は、屋根上に堆積する雪の全面が滑落する場合では作用しない。このことから、屋根上の雪が全面滑落する場合は、図4-1に示す界面抵抗力が雪の滑落を評価する上で支配的な抵抗力となる。この界面抵抗力について既往の研究をみると次のようになる。

屋根雪と屋根葺材との間に発生する界面抵抗力には、滑落開始への抵抗力として作用する凍着抵抗力および静摩擦抵抗力、滑落持続への抵抗力として作用する動摩擦抵抗力がある<sup>1) 2)</sup>。これら抵抗力は、屋根葺材の表面性状に影響を受ける。例えば、屋根葺材が経年劣化して「表面粗さ」が上昇すると、新品時に比べて、屋根雪の滑落性能が著しく低下する<sup>3)</sup>。また、屋根葺材の「撥水性」が高いA種膜材料は、塗装鋼板等に比べて低温下でも雪が滑落しやすいことが指摘されている<sup>4)</sup>。このように、屋根葺材の表面性状を示す「表面粗さ」や「撥水性」は、屋根雪の滑落を大きく支配している。しかし、これら表面性状が及ぼす界面抵抗力への固有の影響、相互関係が十分に把握されていない現状にあるため、現行の積雪荷重評価（建築基準法，日本建築学会建築物荷重指針）では、屋根葺材の表面性状について十分に考慮した評価基準を設けていない。

このような背景から本研究では、勾配屋根における屋根葺材の諸特性に対応した積雪荷重の評価手法を確立することを目的に、次の検討を行った。始めに、屋根葺材の表面粗度を示す表面粗さと凍着・摩擦抵抗力との関係について検討を行った。次に、屋根葺材の撥水性を示す接触角と凍着・摩擦抵抗力との関係について検討を行い、勾配屋根の積雪荷重評価において屋根葺材の材料種別を考慮する場合に必要な評価指標について考察を行う。

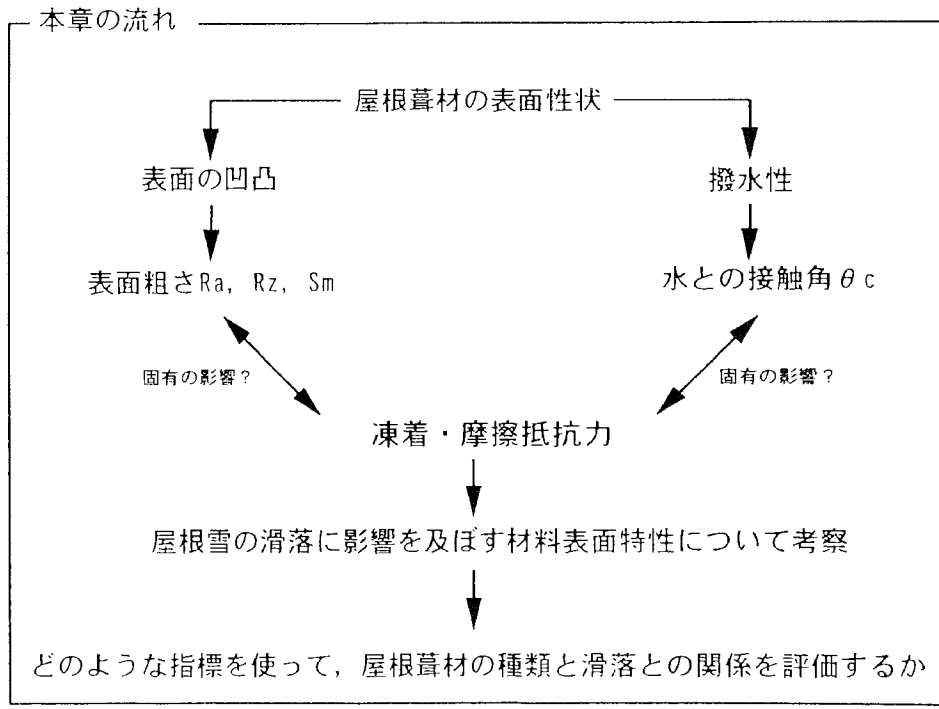
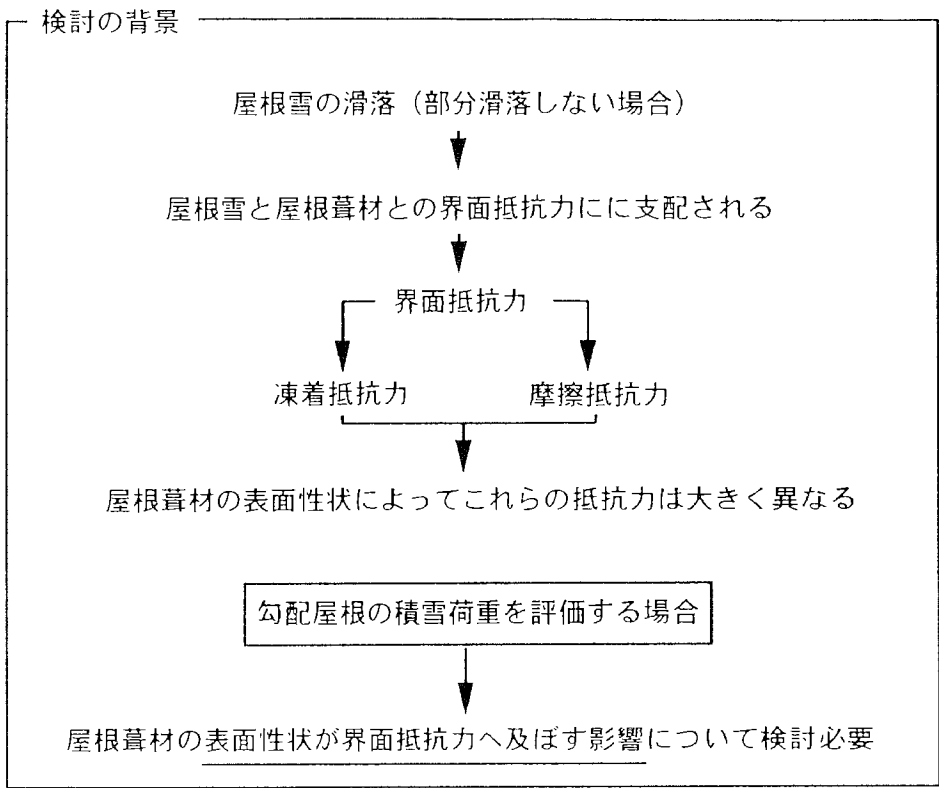


図4-1 本章の背景およびと検討の範囲

## 4. 2 研究の方法

---

屋根葺材の表面性状を示す指標には、表面の凹凸形状を示す「表面粗さ」や材料の撥水性を示す「接触角」等の指標があり、これらの指標は各々、滑落抵抗力（凍着・摩擦抵抗力）の増減に影響を及ぼしている。そのため、屋根葺材の特性を考慮して、勾配屋根における積雪荷重の評価を行うためには、「表面粗さ」もしくは「接触角」が各々、凍着・摩擦抵抗力へ及ぼす影響を明らかにする必要がある。

屋根葺材の表面性状が凍着・摩擦抵抗力に及ぼす影響について既往の研究をみると、表面粗さが大きく、水との接触角が低い屋根葺材であるほど、凍着・摩擦抵抗力が増加することが指摘されている<sup>3)・5)・6)・7)・8)・9)・10)</sup>。しかし、これら研究は、表面粗さと接触角とが同時に変化する一般の屋根葺材を評価対象としているために、相対的な傾向を述べるにとどまっている。すなわち、表面粗さもしくは、接触角が、個々に凍着・摩擦抵抗力に及ぼす影響は明らかとなっていない。

このようなことから、本項では屋根葺材の表面性状を示す「表面粗さ」、「接触角」が各々、凍着・摩擦抵抗力へ及ぼす直接的な影響を明らかにすること目的とした実験・分析を行った。4. 2項では実験の方法について述べ、4. 3項では、実験の結果について述べる。4. 4項では、実験の結果に基づいた分析を行い、凍着・摩擦抵抗力の特性を評価するために必要な指標について考察を行う。

### 4.2.1 屋根葺材の表面粗さが滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験

一般に、滑落抵抗力と屋根葺材の表面粗さと関係を検討する場合には、表面凹凸の高さを示す「10点平均粗さ $R_z$ 」が表面粗さの指標として用いられる。この10点平均粗さ( $R_z$ )と滑落抵抗力との関係について既往の研究をみると、屋根葺材が塗装鋼板の場合、 $R_z$ が大きくなるに伴って抵抗力が大きくなり、滑落しにくくなることが明らかとなっている<sup>3)・5)・5)</sup>。一方、10点平均粗さ( $R_z$ )のみでは、滑落抵抗力に及ぼす表面凹凸の影響を十分に説明できないことも指摘されている<sup>4)・8)</sup>。具体的には、図4-2のように、 $R_z$ がほぼ同一のA種膜材と塗装鋼板では、同一の滑落抵抗力とならない。このように、表面粗さと滑落抵抗力との関係を明らかにする場合は、屋根葺材表面の凹凸の高さのみでなく、他の表面粗さ特性も考慮する必要がある。

このような表面粗さの特性が滑落抵抗力へ及ぼす影響を明らかにするため、表面素材が同一であり、その表面粗さが表4-1のように、規則的に変化する13種類の耐水研磨紙（80～2000番）を用いて、屋根雪の滑落に及ぼす表面粗さの影響を

検討した。なお、滑落抵抗には材料表面の撥水性が影響するが、ここで用いる各耐水研磨紙における液滴法による水との接触角は79~83°となるので、撥水性の影響は無視できると考えられる。表面粗さは、JIS B 0601に従い、写真4-1に示す触針式粗さ測定装置によって中心線平均粗さ(Ra)および10点平均粗さ(Rz)、さらに材料表面における山谷の平均波長すなわち凹凸の平均間隔(Sm)を測定した。なお、Smの測定値は、山谷のピークカウントが大きく関わる。このピークカウントは、図4-2中に示したように、最大高さ(Ry)の10%以上の粗さ成分を対象とした。

表4-2に表面粗さと滑落抵抗に関する実験シリーズを示す。滑落抵抗は静摩擦係数および動摩擦係数、さらに凍着抵抗を測定して評価した。凍着抵抗の測定は、表面温度0℃の材料上に設置した塩ビ管内(内径31mm)に10mmの高さまで2℃の水道水を注ぎ、室温を-10℃にして試料表面に氷を付着させた。その後、図4-3のように、付着した氷体に極めて低速(10mm/min)の水平荷重<sup>3)</sup>をかけて強制的にせん断剥離させ、剥離時の荷重をロードセル(Max500N, 誤差0.015%)で測定した。静摩擦係数の測定は、あらかじめ作製した氷ブロック(直径120mm, 重量320g)を表面温度0℃の試料上に載せ、平板傾斜法<sup>5)</sup>(試料上に氷プロ

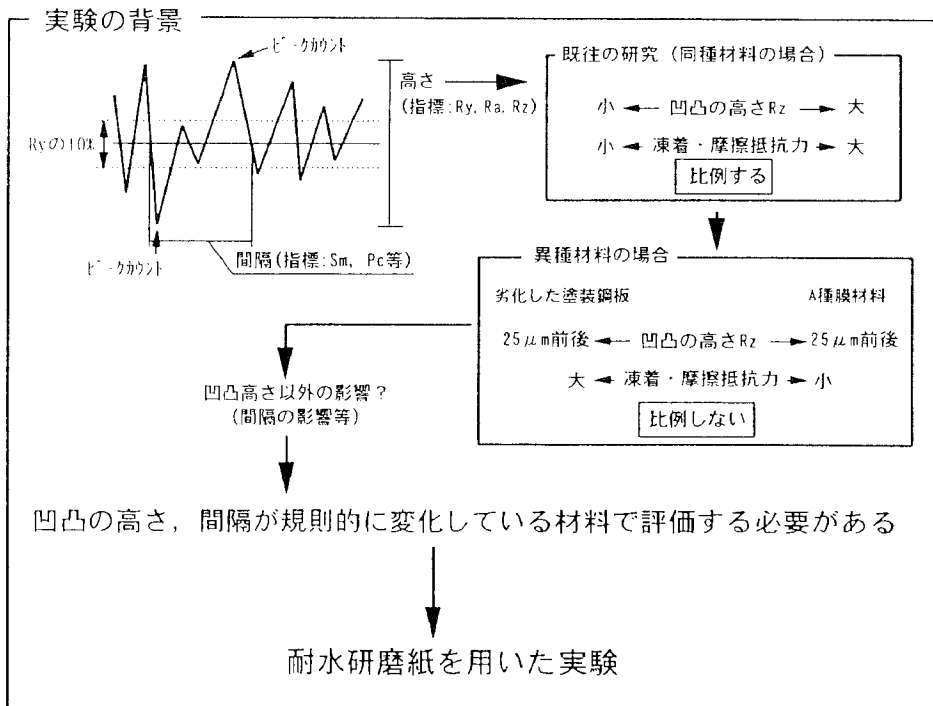


図4-2 既往の研究にみられる表面粗さと滑落抵抗力との関係

ックを載せ、試料を傾斜させながらブロックの滑り始めた勾配を読みとる方法) によって行った。動摩擦係数の測定は、図4-4のように、静摩擦の測定と同様の手順で載せた氷ブロックを一定速度で水平滑動させ、その滑動抵抗をロードセル (Max20N, 誤差0.015%) で測定した後、氷ブロックの重量で除して求めた。動摩擦係数の速度依存性に関する研究によれば、0℃における動摩擦係数は、移動速度が50mm/min以上の場合、殆ど変化しない<sup>3)</sup>。このことから、動摩擦係数の測定における水平移動の速度は60mm/minとした。

表4-1 実験に用いた耐水研磨紙の表面波形

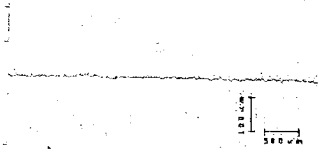
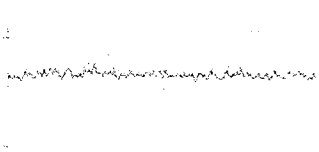
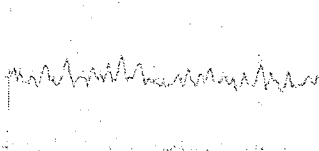
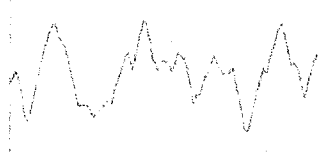
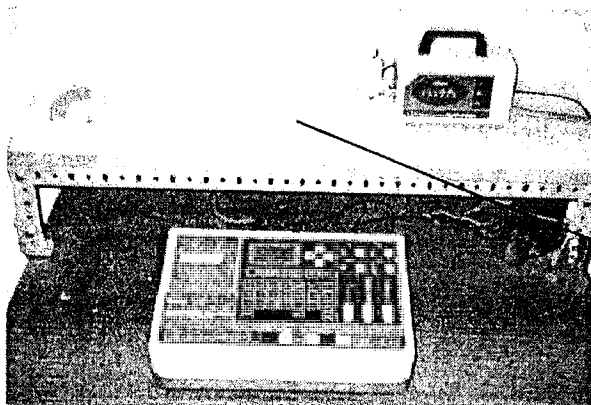
実験に用いた試料	表面波形	凹凸の高さ	凹凸の間隔
耐水研磨紙2000番 凹凸の高さ (Rz): 17.9 μm 凹凸の間隔 (Sm): 198.4 μm		低 ↑ ↓ 高	狭 ↑ ↓ 広
耐水研磨紙800番 凹凸の高さ (Rz): 45.9 μm 凹凸の間隔 (Sm): 345.2 μm			
耐水研磨紙320番 凹凸の高さ (Rz): 100.9 μm 凹凸の間隔 (Sm): 358.2 μm			
耐水研磨紙80番 凹凸の高さ (Rz): 240.1 μm 凹凸の間隔 (Sm): 868.4 μm			

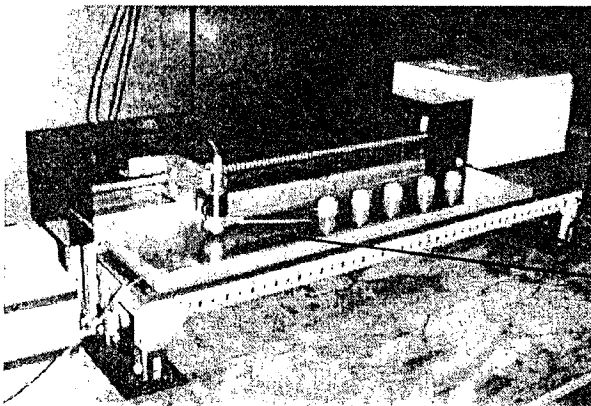
表4-2 表面粗さと滑落抵抗に関する実験シリーズ

測定項目	耐水研磨紙の番数												
	80	120	150	180	240	320	400	500	600	800	1000	1500	2000
動摩擦係数	_____						計13種類	_____					
静摩擦係数	_____						計13種類	_____					
凍着抵抗力	_____						計13種類	_____					



触針部分

写真4-1 表面粗さの測定に用いた触針式粗さ測定装置の概要



拡大図 (図4-3, 4-4)

写真4-2 凍着抵抗力および動摩擦係数の測定に用いた装置概要

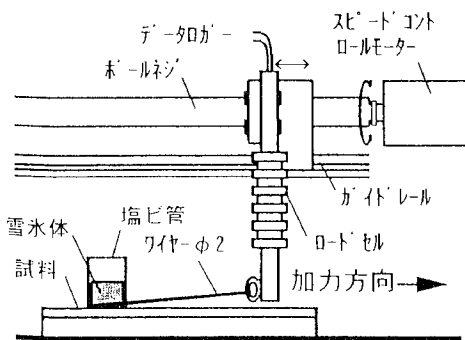


図4-3 凍着抵抗力の測定

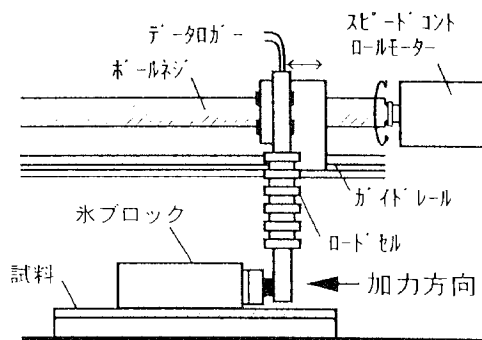


図4-4 動摩擦係数の測定

#### 4.2.2 水分が滑落抵抗力に及ぼす影響に関する実験

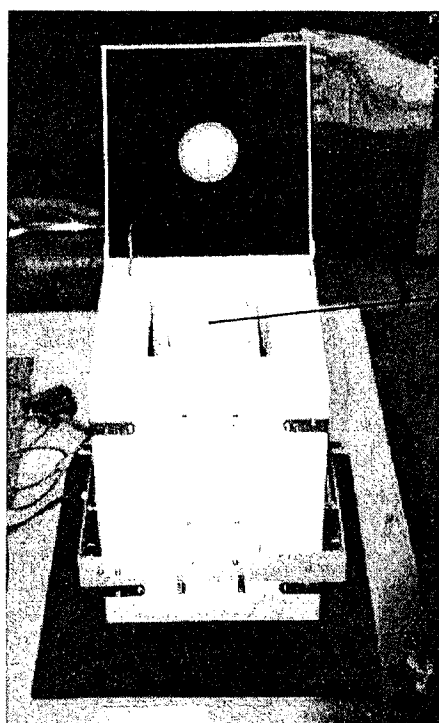
屋根雪と屋根葺材との界面に作用する滑落抵抗力について検討を行う場合、その界面は、乾燥した状態から湿潤した状態まで考えられる。このことから、滑落抵抗力に影響を及ぼす表面粗さ特性について検討を行う場合においても、水の有無が及ぼす影響を無視することはできない。このことから、屋根雪と屋根葺材との界面に介在する水膜の影響を加味して、屋根葺材の表面粗さが滑落抵抗力に及ぼす影響を検討した。屋根雪と屋根葺材の界面に介在する水膜を示す指標は、雪の水分量を表す含水率を用いた。なお、雪の含水率は、写真4-3に示す装置でカロリメータ法によって測定した。

表4-3に雪の含水率と滑落抵抗力に関する実験シリーズを示す。実験に用いた屋根葺材は、膜材（M材）、ステンレス板（S材）、屋根用塗装鋼板（P材）およびフロート板ガラス（FG材）である。各材料の滑落抵抗力は、静摩擦係数および動摩擦係数を測定して評価した。静・動摩擦係数の測定に用いた雪ブロックは、0℃の屋根葺材上に載せた塩ビ管内（内径 240mm、高さ15mm）に、均一の自然雪（しまり雪）を入れ、その中に所定の水量を投入して作製した。なお、本実験は、屋根葺材の表面性状と水分とが滑落抵抗力に及ぼす影響を検討するのが目的のため、雪粒径（ザラメ雪、新雪）等を変化させた試料は作製していない。静摩擦係数の測定は、上述のように作製した雪ブロック上に340gの重りを載せ（積雪密度200kg/m<sup>3</sup>で積雪深15cmに相当）、平板傾斜法によって行った。動摩擦係数の測定は、静摩擦係数と同様の手順で作製した雪ブロック上に同じ重りを載せ、前述4.2.1節に示した方法と同様に、屋根葺材上を水平滑動させて実施した。

表4-3 界面付近の雪の含水率と滑落抵抗力に関する実験シリーズ

試料 CODE	屋根葺材の名称	静摩擦および動摩擦係数					
		自然雪への投入水量 (g)					
		0	10	30	50	70	90
M	膜材（4フッ化エチレンコーティングガラス繊維布）	●	●	●	●	●	●
FG	フロート板ガラス	●	●	●	●	●	●
P	屋根用塗装鋼板（ポリエステル樹脂光沢）	●	●	●	●	●	●
S	冷間圧延ステンレス板	●	●	●	●	●	●
雪の含水率（カロリメータ法で測定）		●	●	●	●	●	●





40℃の温水が入っている。含水率測定に用いる雪を入れた後、温度測定する。温度の下降割合から、含水を算出する。  
同様の原理を用いた含水率測定機には、秋田谷式含水率計がある。

(設計・製作：北海道工業大学 応用電子工学科 佐々木研究室)

写真4-3 積雪含水率計の概要

#### 4.2.3 屋根葺材の撥水性が滑落抵抗に及ぼす影響

4.2.1節で述べたように、屋根葺材の撥水性は雪の滑落に影響を及ぼすと考える。本節では、写真4-4のように、フロート板ガラスに撥水剤を塗布した試料を用いて、屋根葺材の撥水性すなわち接触角が滑落抵抗に及ぼす影響について実験を行った。なお、滑落抵抗には表面粗さが影響するものの、ここで用いる各材料の10点平均粗さ $R_z$ は $0.3 \sim 0.67 \mu\text{m}$ 、凹凸の平均間隔 $S_m$ は $24.6 \sim 71.4 \mu\text{m}$ となるので、表面粗さの影響は無視できると考えられる。

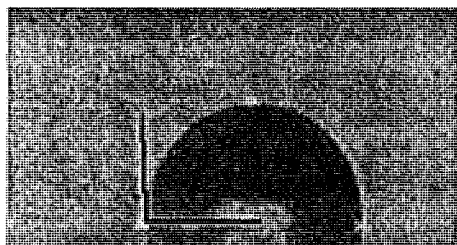
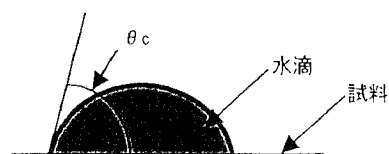
表4-4に接触角 $\theta_c$ と滑落抵抗に関する実験シリーズを示す。滑落抵抗は、凍着抵抗、静摩擦係数および動摩擦係数を測定して評価した。凍着抵抗は、4.2.1節と同様、屋根葺材上に付着させた氷体を強制的にせん断剥離させて測定した。静・動摩擦係数は、4.2.1節に示した「氷ブロックを用いた実験」と4.2.2節に示した「雪ブロックを用いて含水率を変化させた実験」の2通りを行って評価した。接触角 $\theta_c$ は、液滴法を用いて測定した。なお、液滴には20℃の蒸留水を使用し、材料への液滴の滴下量は既往の研究を参考に、 $0.004\text{cc}$ とした<sup>1)</sup>。測定時刻は滴下後60secとした。



フロント板ガラス（撥水剤なし）

接触角  $\theta_c$  : 17.8°

↑ 撥水性：低  
↓ 撥水性：高



フロント板ガラス（自動車ガラス用撥水剤2回塗）

接触角  $\theta_c$  : 96.7°

写真4-4 接触角と滑落抵抗に関する実験に用いた材料の撥水性

表4-4 接触角と滑落抵抗に関する実験シリーズ

塗布した撥水剤 (基材：フロント板ガラス)	接触角 $\theta_c$ (°)	凍着抵抗	静摩擦および動摩擦係数						氷 ブロック
			自然雪への投入水量(g)						
			0	10	30	50	70	90	
なし	17.8	●	●	●	●	●	●	●	●
スキー用液体ワックス	38.0	●							●
自動車用液体ワックス	51.6	●	●	●	●	●	●	●	●
スキー用固形ワックス	78.9	●	●	●	●	●	●	●	●
自動車用固型ワックス	82.1	●							●
自動車ガラス用撥水剤(1回塗)	88.8	●							●
自動車ガラス用撥水剤(2回塗)	96.7	●	●	●	●	●	●	●	●

・凍着抵抗、氷ブロックを用いた静・動摩擦係数の測定は3.2.1節に準じた

・雪ブロックを用いた静・動摩擦係数の測定は3.2.2節に準じた

### 4. 3 研究結果

#### 4.3.1 表面粗さ特性が滑落抵抗に及ぼす影響

屋根葺材の表面粗さと摩擦抵抗との関係を検討する場合、表面粗さの指標として中心線平均粗さRaおよび10点平均粗さRzを用いることができる<sup>3)・5)・6)</sup>。しかし、これまでの研究によると、表面凹凸の高さを示す指標であるRa、Rzのみでは摩擦および凍着抵抗を十分に説明できないことが明らかとなっている<sup>4)・6)</sup>。このことから、本研究では材料表面の凹凸形状を示す指標としてRa、Rzに加えて凹凸の平均間隔Smを用いて、表面粗さ特性と摩擦および凍着抵抗との関係について検討した。ここで、本実験に用いた耐水研磨紙の表面粗さ特性をみると、次のようになる。耐水研磨紙の表面に用いられている研磨材は同一素材であり、表面状態は均一である。図4-5のように、研磨紙の番数（80～2000番）が大きくなるに伴って、RaおよびRzが小さくなり、Smは番数に比例して小さくなる関係にある。すなわち、研磨紙の表面の凹凸波形は何れの番数においても相似的な波形と言える。なお、耐水研磨紙におけるRaとRzはほぼ比例関係にあったので、以下では10点平均粗さRzを凹凸の高さを示す指標とした。

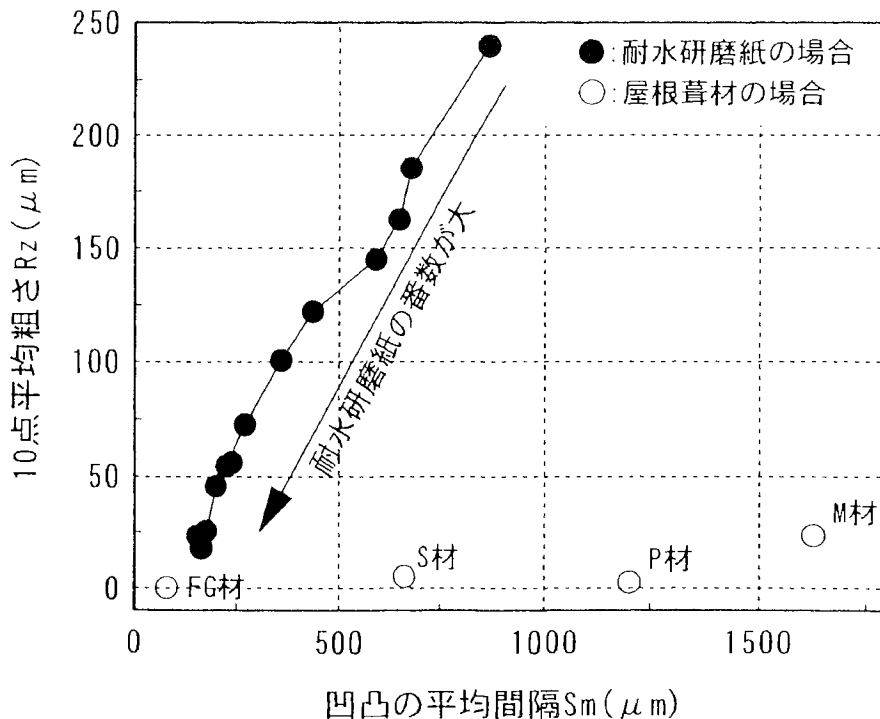


図4-5 耐水研磨紙におけるRzとSmとの関係

## 1) 表面粗さ特性と摩擦係数との関係

図4-6に10点平均粗さ $R_z$ と摩擦係数との関係、図4-7に $S_m$ と摩擦係数の関係を示す。図には代表的な屋根葺材の値も併せて示してある。これらの図をみると、表面凹凸の高低差を示す $R_z$ では $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 、表面凹凸の間隔を示す $S_m$ では $300\sim 500\ \mu\text{m}$ のときに摩擦係数が最大となる関係になる。すなわち、摩擦係数が最大となる時点以下では10点平均粗さ $R_z$ あるいは $S_m$ の増加に伴い摩擦係数が増加する傾向を示すのに対し、その時点以降では $R_z$ あるいは $S_m$ の増加に伴って摩擦係数が減少する傾向を示す。また、代表的な屋根葺材についてみると、何れの屋根葺材も10点平均粗さ $R_z$ は耐水研磨紙よりも小さな値となり、 $S_m$ はそれらよりも大きな値となる。すなわち、ここに示した屋根葺材は、耐水研磨紙よりも表面凹凸の高低差が小さく、その間隔が大きい表面性状の材料と言える。

これらのことから、材料表面の凹凸の状態は凹凸の高低差を示す $R_z$ の他に、単位面積当たりの凹凸個数の指標となる $S_m$ を用いることによって、具体的に把握することが可能になると言える。なお、10点平均粗さ $R_z$ および $S_m$ と摩擦係数との関係が上述のような傾向になる要因の詳細は不明であるものの、概括的な要因として次のことが考えられる。凹凸表面を持つ材料と氷との摩擦抵抗力は、材料の凸部によって生じる氷表層部の掘り起こし抵抗力が支配的になるため<sup>5)・6)・12)</sup>、その抵抗力は、凸部の高さとその個数に依存する。すなわち、それらの指標である10点平均粗さ $R_z$ および $S_m$ に影響を受ける掘り起こし抵抗力の大小が摩擦係数を変化させていると考えられる。

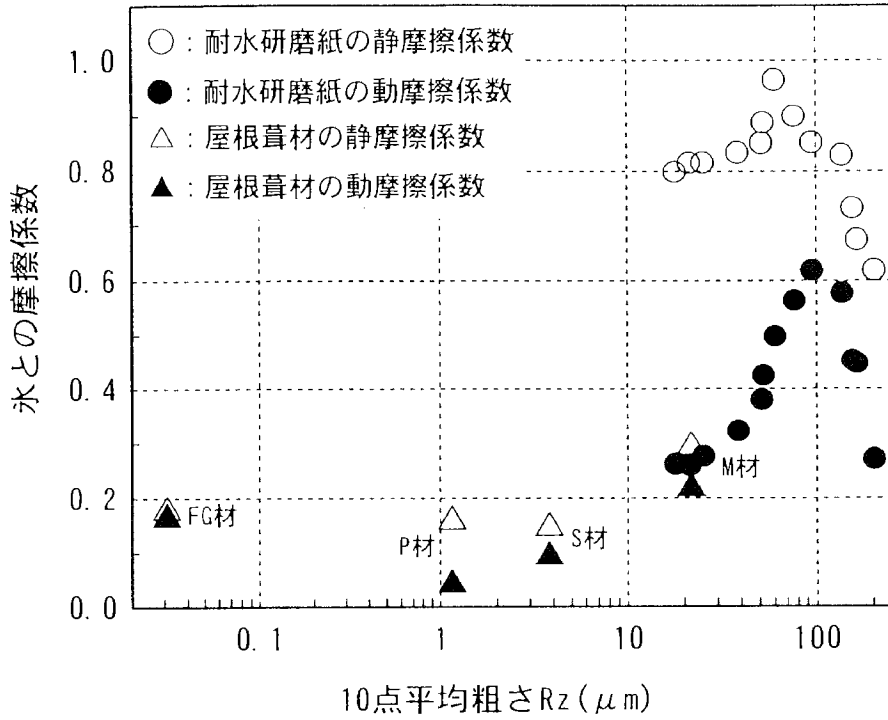


図4-6 10点平均粗さ(Rz)と摩擦係数との関係

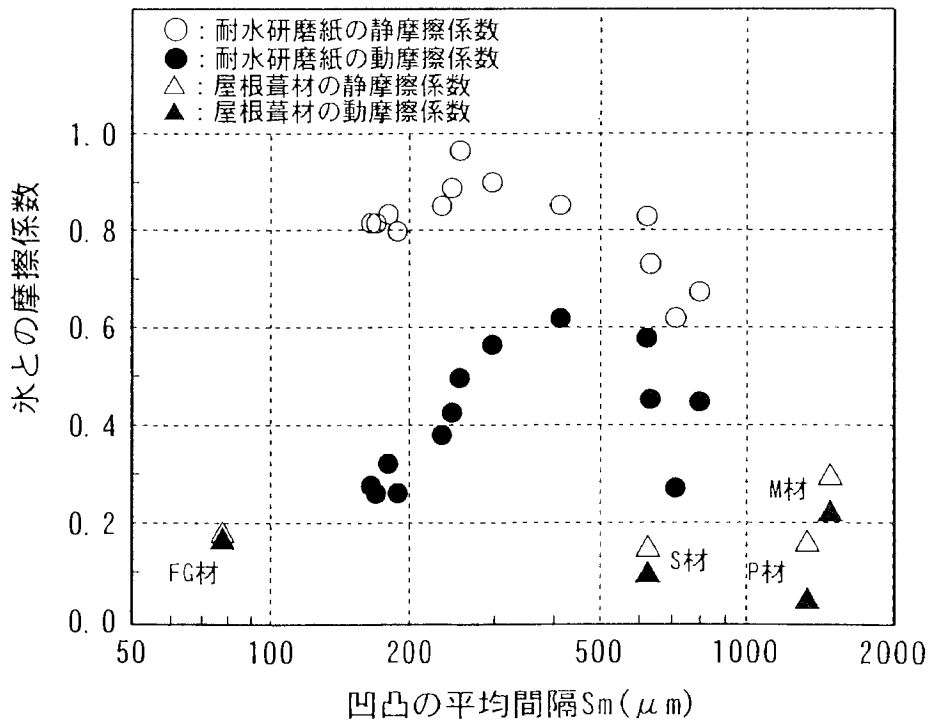


図4-7 凹凸の平均間隔(Sm)と摩擦係数との関係

## 2) 表面粗さ特性と凍着抵抗力との関係

凍着抵抗力と10点平均粗さ $R_z$ との関係を図4-8, 凹凸の平均間隔 $S_m$ との関係を図4-9に示す。両図をみると, それぞれの関係は, 先に示した摩擦係数における関係とほぼ同一の増減傾向を示し,  $R_z$ が $50\sim 100\ \mu\text{m}$ ,  $S_m$ では $300\sim 500\ \mu\text{m}$ が変曲点となる。ここで, 凍着抵抗力に関わる材料表面の凹凸形状について考えると次のようになる。氷の凍着抵抗力は材料表面との実質的な付着面積に支配されることから, 材料表面の凹凸形状および単位面積当たりの個数が影響している。すなわち, 凹部に生じる空隙の状態, あるいは氷の剥離機構の影響などが関わると考えられる。従って, 単位面積当たりの凹部の個数の指標となる $S_m$ を用いることによって, 表面凹凸の状況を詳細に把握することが可能になると言える。

代表的な屋根葺材についてみると, 10点平均粗さ $R_z$ ではFG材(フオート板ガラス)およびS材(ステンレス板), 凹凸の平均間隔 $S_m$ ではFG材の凍着抵抗力が耐水研磨紙と大きく異なる位置に存在する。このことは, 摩擦係数と異なる傾向であり,  $R_z$ や $S_m$ 以外の材料性状が凍着抵抗力に影響を及ぼしていることを示唆している。このことを材料表面の撥水性の影響と考えると, 次のようになる。材料表面の撥水性を示す液滴との接触角は, 耐水研磨紙は $78\sim 83^\circ$ , M材(膜材)は $66.3^\circ$ , S材(ステンレス板)は $65.5^\circ$ , P材(屋根用塗装鋼板)は $58.3^\circ$ となり, これらの最小値は最大値の約7/10である。これに対し, FG材は $17.8^\circ$ であり, 先に示した材料に比べて約1/6~1/4と非常に小さい値を示す。このように, FG材の凍着抵抗力は接触角の影響を大きく受けることから, その抵抗力を論じるには表面凹凸の形状的指標の10点平均粗さ $R_z$ および $S_m$ 以外に液滴との接触角も考慮する必要があると言える。この接触角の影響に関しては, 4.3.3節で述べることとする。

1), 2)に示す結果をみると, 材料表面における凹凸の高さを示す $R_z$ は, 既往の研究で指摘されているとおり, 滑落抵抗力を増加させる要因となっている。一方, 凹凸の間隔を示す $S_m$ は, この間隔が $300\sim 500\ \mu\text{m}$ を越えると, 滑落抵抗力を顕著に減少させる特徴を持つ。これらのことから, 凹凸の間隔 $S_m$ が同一の材料間(例えば, 同種類の塗装鋼板)では, 10点平均粗さ $R_z$ を指標とした滑落抵抗力の評価が可能と言える。しかし, 凹凸の間隔 $S_m$ が異なる材料間での滑落特性を論ずるためには, 10点平均粗さ $R_z$ に関する評価に加えて凹凸の平均間隔 $S_m$ 等, 表面凹凸の波形を考慮した評価が必要であるあると考える。

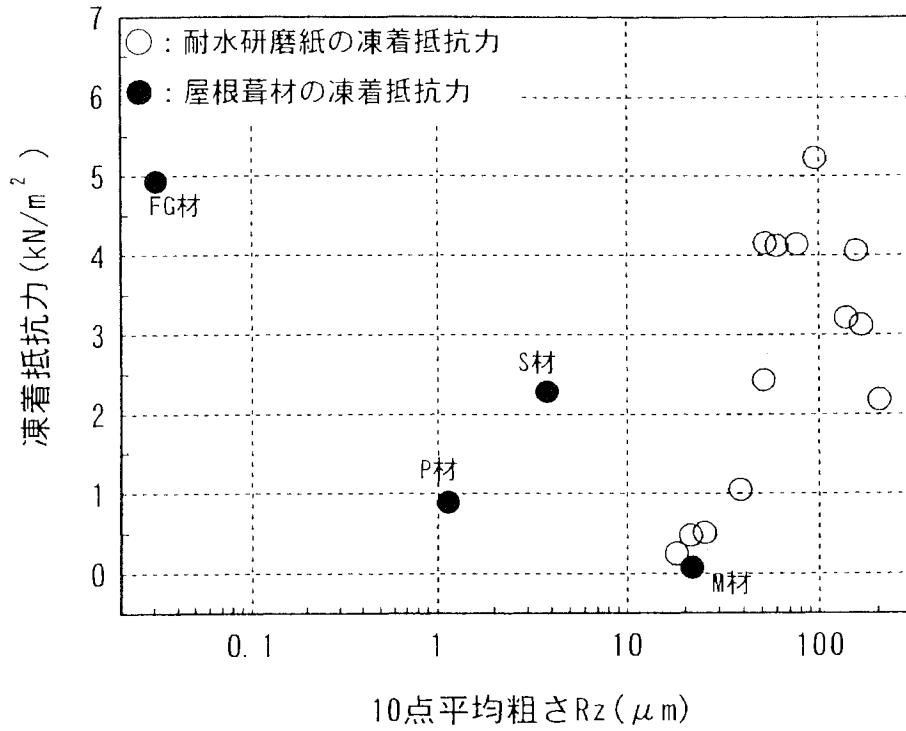


図4-8 10点平均粗さ ( $R_z$ ) と凍着抵抗力との関係

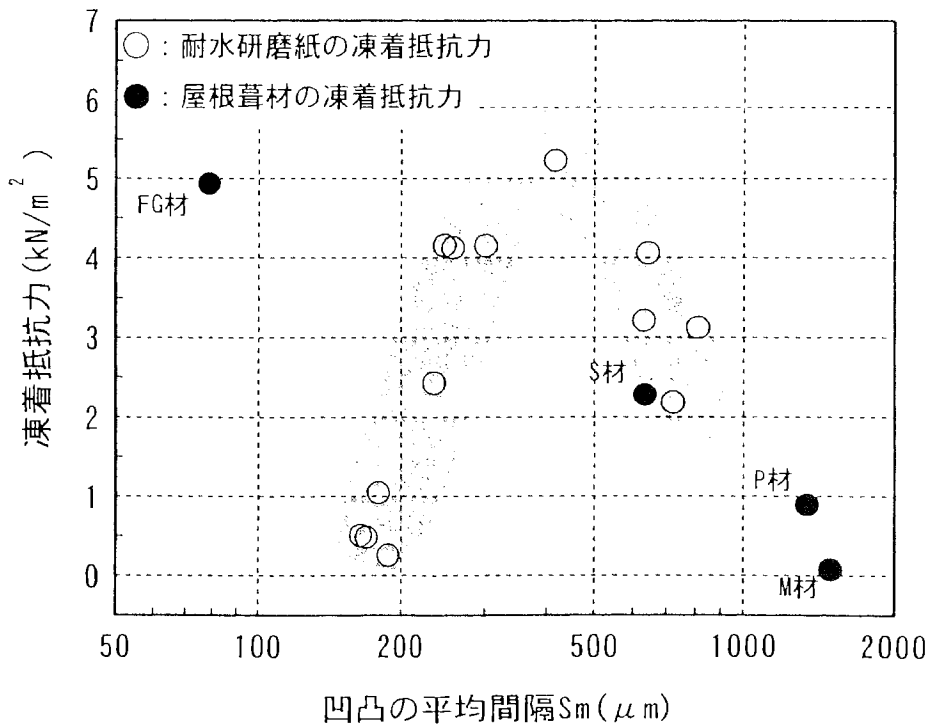


図4-9 凹凸の平均間隔 ( $S_m$ ) と凍着抵抗力との関係

#### 4.3.2 屋根葺材との界面付近における水分が滑落抵抗に及ぼす影響

実験に用いた雪ブロックの含水状況を写真4-5に示す。写真に示す雪ブロックは含水状況が把握し易いように着色水を用いて濃淡を表している。写真に示すように、自然雪に投入した水量の増加に伴って雪ブロックの含水率が上昇している。なお、含水率37%および53%の場合における屋根葺材と雪ブロックとの界面を観察すると、投入した水が余剰水となって、雪ブロックの外側に溢れ出る状態であった。

図4-10に雪ブロックの含水率と摩擦係数との関係を示す。図のように、FG材は含水率の増加に伴って摩擦係数が減少する傾向を示す。これに対し、M材は含水率の増加に伴って摩擦係数が増加し、その含水率が約37%（換算密度 $650\text{kg/m}^3$ ）以上になると減少する傾向を示す。同様に、P材は含水率が12~20%（換算密度 $300\sim 420\text{kg/m}^3$ ）までは摩擦係数が増加し、含水率が約20%以上になると減少する傾向を示す。また、S材の場合はP材に類似した傾向を示す。このように、屋根葺材と屋根雪との界面付近における雪の含水率は、摩擦係数に大きな影響を及ぼし、さらにその影響は屋根葺材の違いによる固有の特性を持っている。

次に、図4-10において動摩擦係数が最大となった含水率と $R_a$ 、 $R_z$ および $S_m$ との関係を図4-11に示す。この図は図4-10において含水率と動摩擦係数との関係が山形分布を示したP材、S材およびM材について示している。図のように、動摩擦係数が最大となるときに含水率が大きいほど $R_a$ および $R_z$ が大きくなる傾向がみられる。しかし、 $S_m$ との関係には明らかな相関がみられない。なお、この傾向は静摩擦係数についても同様となる。前述4.3.1節に示した通り、氷ブロックとの摩擦係数は $S_m$ の影響を大きく受けていることから考えると、屋根雪と屋根葺材の界面付近の雪の含水状態の違いによって、摩擦係数に影響を及ぼす表面粗さの成分が異なると考える。

次に、図4-12に示すような屋根葺材と屋根雪との界面付近の模式図を用いて摩擦性状に及ぼす雪の含水率の影響を検討する。流体の粘性に関する法則によると、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>13)・14)</sup>。従って、図のように、積雪中の水分が飽和含水量を越えて流出し、屋根雪と屋根葺材との界面に一様な水膜が介在すると、摩擦係数は材料表面の粗さ成分を越える水膜に支配されることになる。しかし、粗さ成分を埋没させる厚さ以下の水膜のときには、屋根葺材表面の凸部と屋根雪とが接触する摩擦が生じるので、そのときの屋根雪の掘り起こし抵抗に支配されることになる。この考え方に従えば、含水率の増加に伴って摩擦係数の増加する領域と減少する領域が存在する（M材の場合は含水率約37%が最大値、



図4-10参照) ことを説明できる。すなわち、屋根葺材の表面粗さ成分を埋没させるに至る水量以下では含水率の増加に伴って摩擦係数が増加し、それ以上の水量が介在する状態になると、摩擦係数が減少する。このような要因から、10点平均粗さRzが小さな材料(P材)の場合は、摩擦係数が最大となる含水率が小さくなるのに対し、10点平均粗さ(Rz)が大きな材料(M材)の場合は、摩擦係数が最大となる含水率が大きくなる。

以上のことから、屋根葺材との界面付近における水分は、滑落抵抗力へ及ぼす表面粗さの影響を、より顕著にする効果を持っていると考える。すなわち、水分が少ない時の滑落では表面粗さの影響が顕著にみられなくても、界面の水分が徐々に増加することによって、表面粗さが大きな屋根葺材では著しく滑落性能が低下すると考える。

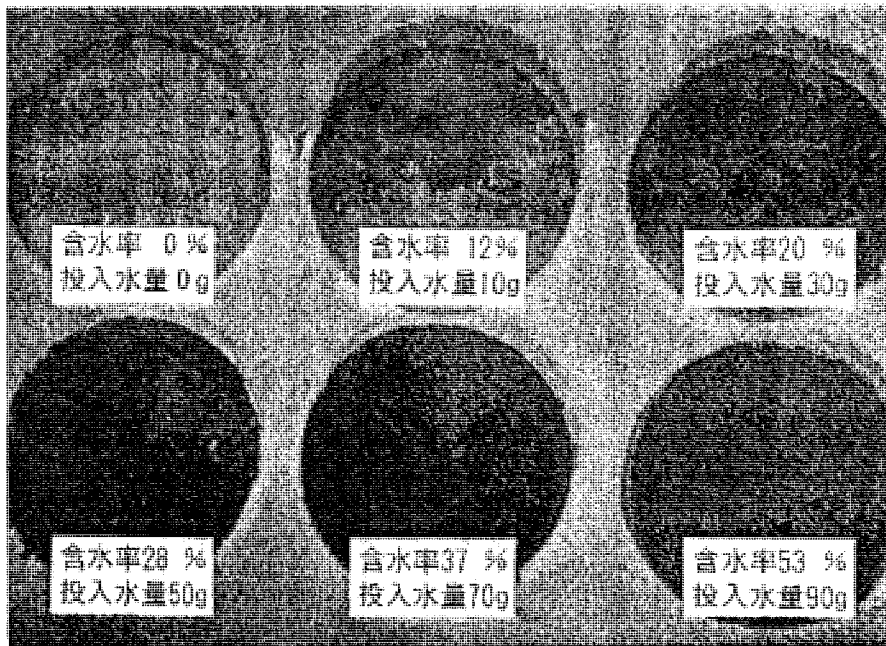


写真4-6 実験に用いた雪ブロックの含水状況

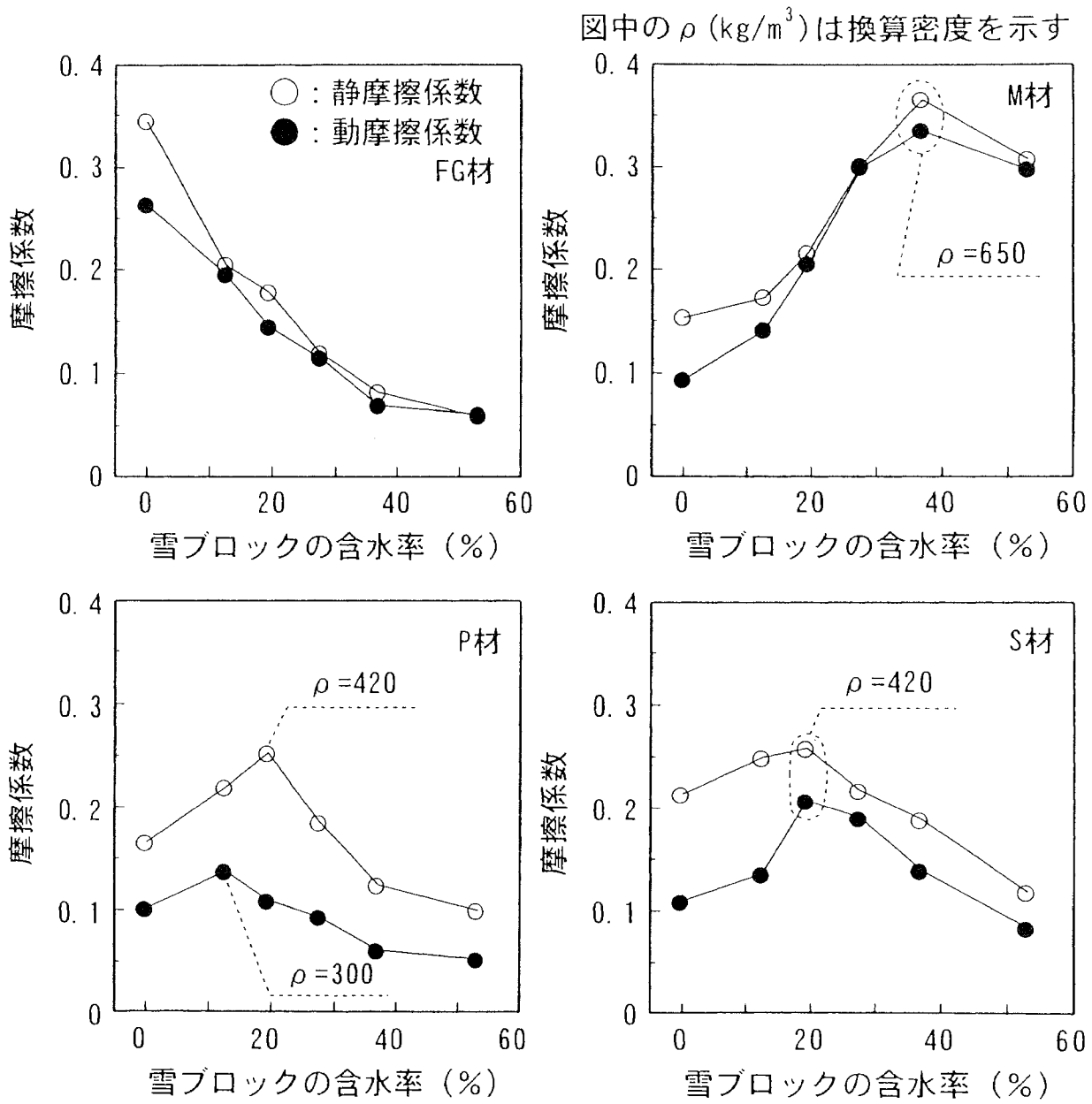


図4-10 雪ブロックの含水率と摩擦係数との関係

Ra : 中心線平均粗さ, Rz : 10点平均粗さ, Sm : 凹凸の平均間隔

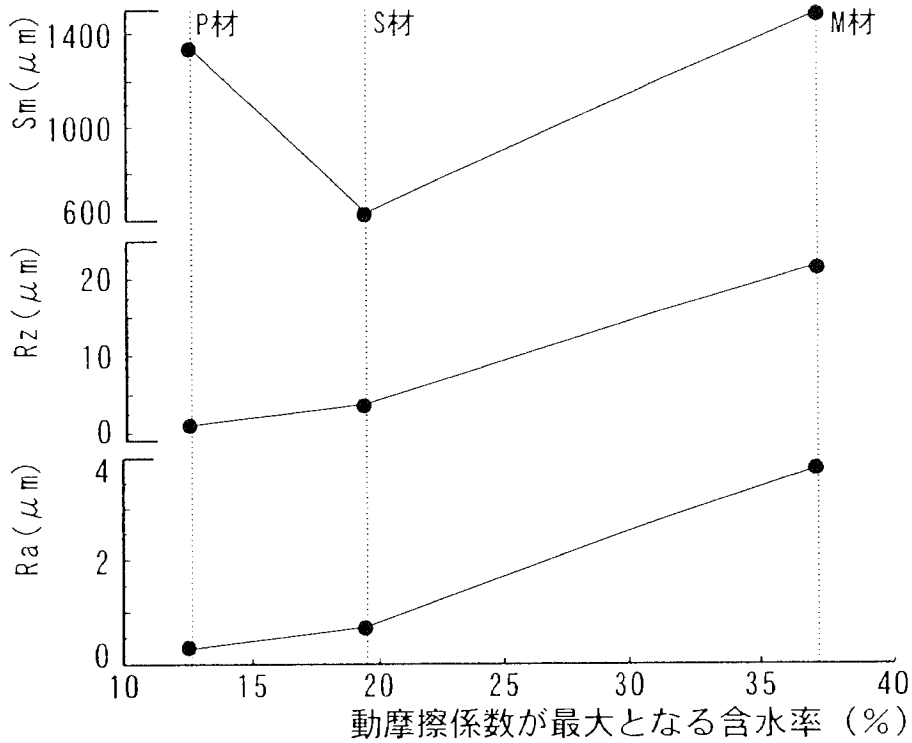


図4-11 動摩擦係数が最大となった含水率とRa, RzおよびSmとの関係

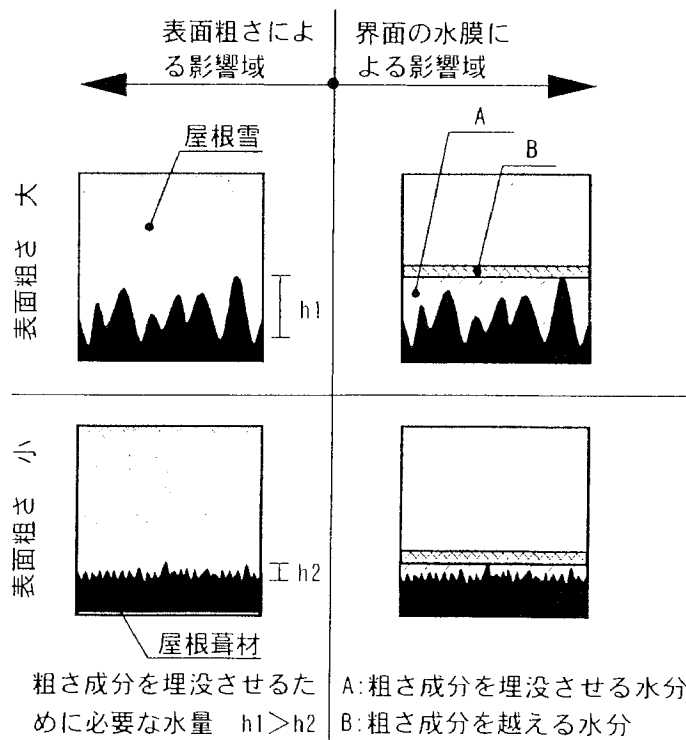


図4-12 屋根葺材と屋根雪との界面付近の模式図

### 4.3.3 屋根葺材の撥水性が滑落抵抗力に及ぼす影響

#### 1) 接触角と凍着抵抗力との関係

4.3.1節では、フロート板ガラス(FG材)の凍着抵抗力が他の材料と大きく異なることについて述べ、この要因には、材料の撥水性を示す接触角の影響があることを示した。接触角と凍着抵抗力との関係を図4-13に示す。図のように、接触角の増加に伴って凍着抵抗力は減少する傾向を示す。伊東の研究によれば、液滴(水滴)の「ぬれ形式」によって微細な凹凸へ充填する水分の状況が異なり、付着ぬれ(接触角 $\theta_c=90^\circ$ 以上)に近い特性を持つ材料では実質的な付着面積が小さくなるため凍着抵抗力が小さくなる<sup>9)</sup>。

ここで、「ぬれ形式(付着ぬれ等)」を、材料表面上の液滴がなす仕事量として検討すると次のようになる。液体が固体に接着しようとする力すなわち、接着仕事は式1)で示す Young-Dupre の式で求められる<sup>10)</sup>。

$$W_A = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta_c) \quad \dots 1)$$

ここに、 $W_A$ : 接着仕事、 $\gamma_{LV}$ : 液体の表面張力、 $\theta_c$ : 接触角

式1)をみると接着仕事 $W_A$ は、液体の表面張力 $\gamma_{LV}$ および接触角 $\theta_c$ から説明できる。なお、本実験での液滴は蒸留水のみを用いたため、液体の表面張力 $\gamma_{LV}$ は一定と考えられる。この条件で式1)の相関関係をみると、 $\cos \theta_c = -1$ すなわち、接触角 $\theta_c$ が $180^\circ$  ( $0^\circ \leq \theta_c \leq 180^\circ$ ) に近づくほど、接着仕事は小さくなる。従って、接触角 $\theta_c$ が増加すれば水分が材料表面に接着しようとする力は減少すると言える。そのため、接触角の大きな材料の場合は、水分が微細な凹凸へ充填しようとする力が小さいと同時に材料へ接着しようとする力が小さくなる。このような過程で凍着現象が発生するため、接触角の小さな材料に比べて凍着抵抗力が小さくなると考えられる。

これらのことから、接着仕事を支配する接触角は、凍着抵抗力を説明する上で重要な指標と考えられる。

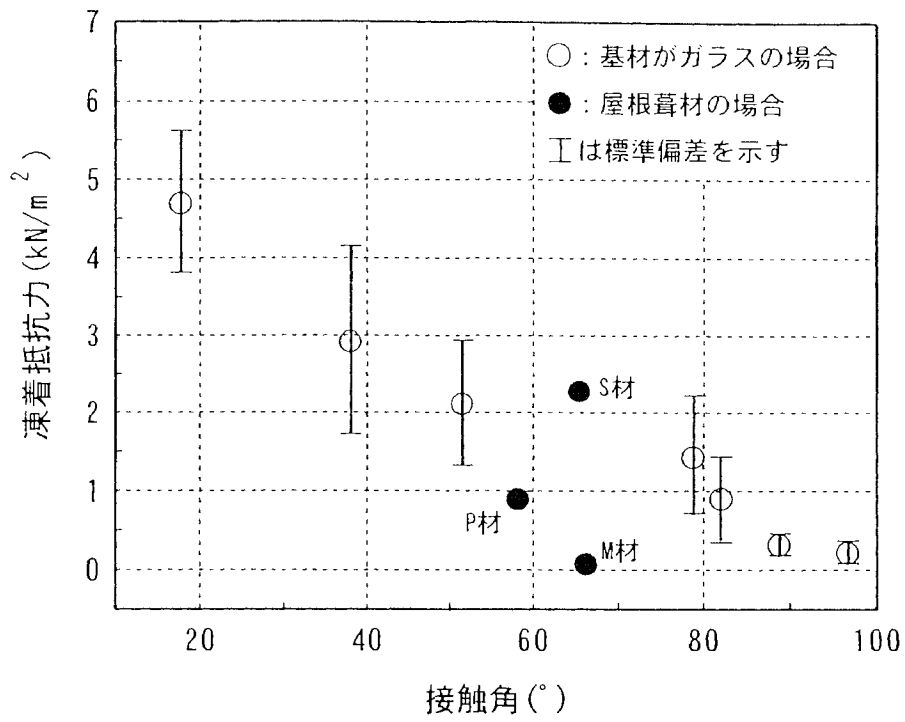


図4-13 接触角と凍着抵抗力との関係

## 2) 接触角と摩擦係数との関係

氷ブロックを用いた場合の接触角と摩擦係数との関係を図4-14に示す。図のように、静・動摩擦係数は、接触角の増加に伴って緩やかに減少する傾向を示す。このように、表面が乾燥した氷ブロックの場合、接触角の増加は、静・動摩擦係数を減少させる効果を持っている。

次に、雪ブロック（しまり雪）の含水率と静摩擦係数との関係を図4-15、動摩擦係数との関係を図4-16に示す。両図のように、何れの試料においても含水率の上昇に伴って摩擦係数が減少する傾向がみられる。ここで、接触角の違いが摩擦係数に及ぼす影響についてみると、雪の含水率が低く（0%、12%）、屋根葺材と雪ブロックとの界面が乾燥している場合、接触角の増加は静・動摩擦係数を減少させる効果を持っている。この傾向は、図4-14で示した氷ブロックの場合と同様である。一方、含水率が20%を越えると、接触角の違いによる動摩擦係数の値の差異がみられなくなる。このように、含水率が高くなるに伴って、摩擦係数に及ぼす接触角の影響が小さくなる要因について考察すると、次のようになる。雪の物性に関する研究によれば、しまり雪の飽和含水率は9～14%であり、この含水率以上では水分が余剰水として下方に流出する<sup>16)</sup>。すなわち、図4-15～16中の含水率が20%を越える領域においては、屋根雪と屋根葺材との界面に余剰水が発生し、水膜が形成されていると考えられる。屋根葺材と屋根雪との界面に水分が介在するときの摩擦係数は、4.3.2節で述べた通り、粘性流体の法則に大きく支配されており、界面に発生した水膜の厚さが増加するほど、この係数は小さくなる。このように、屋根葺材と屋根雪との界面に水膜が介在することが要因で、接触角による摩擦係数の変化がみられなくなっていると考えられる。

これらのことから、屋根葺材と屋根雪との界面に水膜が形成されない乾燥した状態の場合でも、接触角の増加は摩擦係数を減少させる効果を持っている。一方、界面に水膜が形成されると、摩擦係数の増減は、水膜の厚さによる影響が支配的となるため、接触角の影響が小さくなることが明らかとなった。

1)、2)に示す結果をみると、屋根雪の滑落特性に影響を及ぼす凍着抵抗力について検討を行うためには、4.3.1節に示した材料表面の凹凸性状と同時に、材料の撥水性を示す接触角を用いる必要がある。同様に、摩擦抵抗力については、屋根雪と屋根葺材との界面が乾燥している場合、すなわち、低温下では接触角を用いた評価が必要であると考えられる。

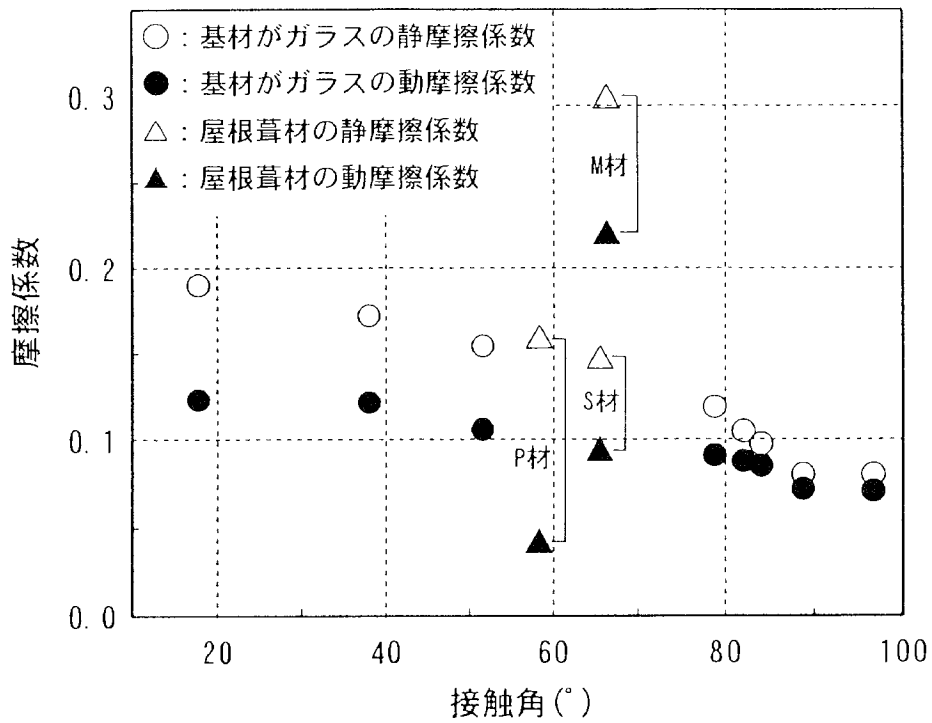


図4-14 氷ブロックの場合における接触角と摩擦係数との関係

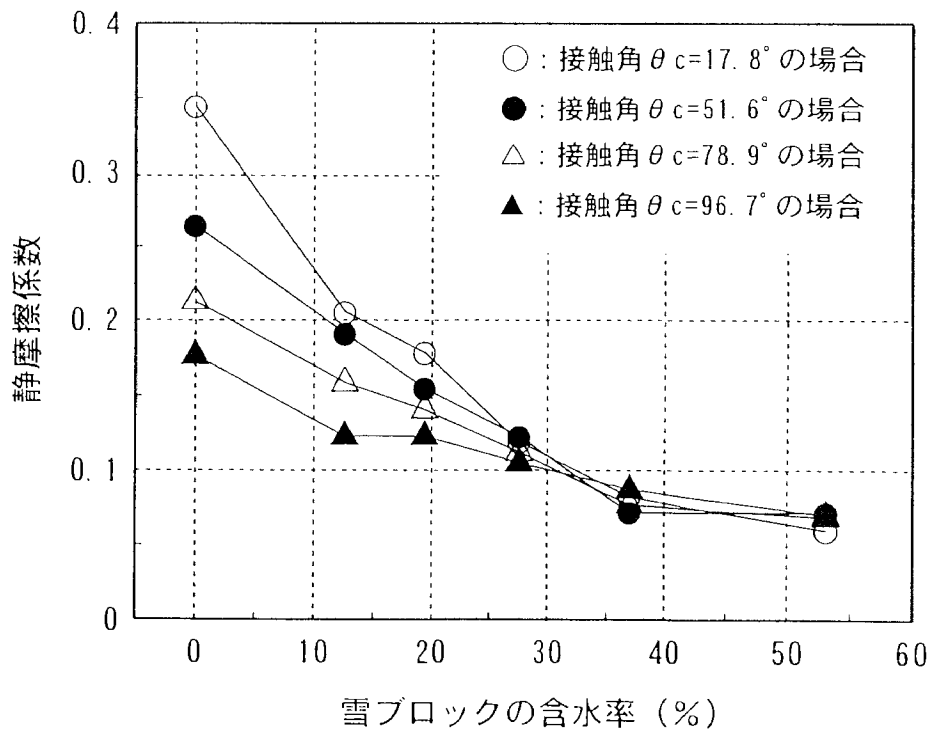


図4-15 雪ブロックの含水率と静摩擦係数との関係

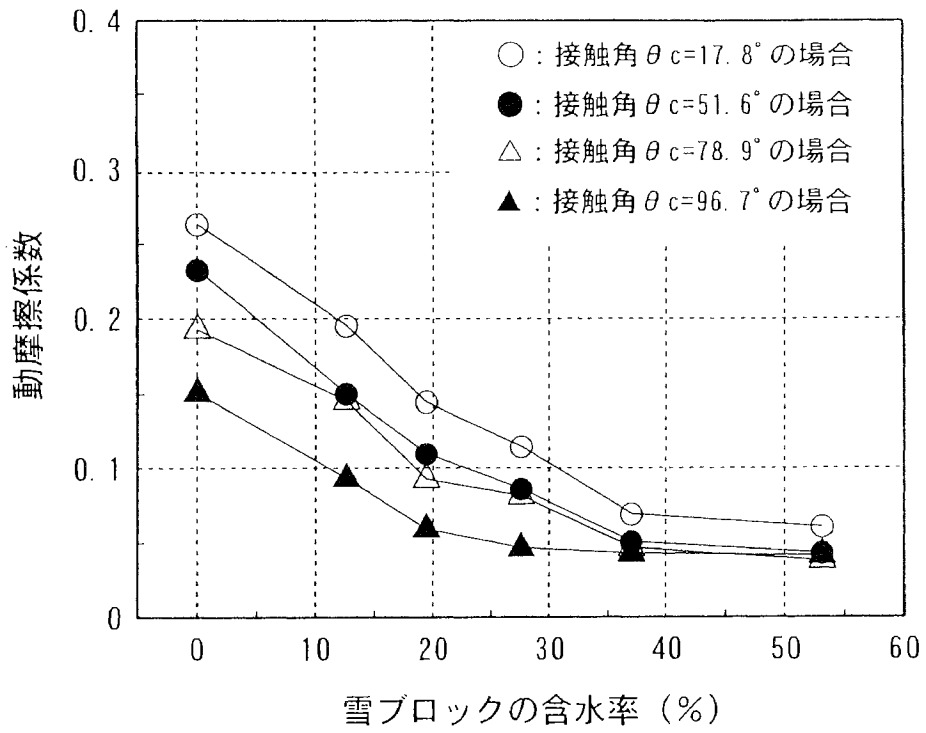


図4-16 雪ブロックの含水率と動摩擦係数との関係



#### 4. 4 滑落抵抗力に対する諸性状の関連強さ

本項では、4. 3項の実験結果を基に重回帰分析を行い、材料表面の諸性状および屋根雪の性質が及ぼす滑落抵抗力への関連の強さを総括的に分析した。なお、分析に用いた基準変数と説明変数は表4-5に示す項目とした。

表4-5 重回帰分析に用いた基準変数と説明変数

基準変数	凍着抵抗力Fa	静摩擦係数 $\mu_s$ 、動摩擦係数 $\mu_k$
説明変数	10点平均粗さRz( $\mu m$ ) 凹凸の平均間隔Sm( $\mu m$ ) 接触角 $\theta_c(^{\circ})$	10点平均粗さRz( $\mu m$ ) 凹凸の平均間隔Sm( $\mu m$ ) 接触角 $\theta_c(^{\circ})$ 雪の含水率WC(%)

但し、氷ブロックの含水率は0%とした

##### 1) 凍着抵抗力に影響を及ぼす諸性状

凍着抵抗力を基準変数として重回帰分析を行った結果は、次に示す通りとなる。説明変数間の相関マトリックスを表4-6に示す。表のように、説明変数間での内部相関は低い状況にある。

基準変数に対する説明変数の各係数を表4-7に示す。表のように、基準変数に対する説明変数の関連の強さを示す標準偏回帰係数の絶対値は、0.721の値を示すRzが最も高く、次いで0.514を示す $\theta_c$ の順になる。Smの場合は、凍着抵抗力との単相関係数が-0.045と非常に低いにも関わらず、標準偏回帰係数の絶対値が0.330となる。これらのことから、本分析に用いたRz、 $\theta_c$ およびSmは、凍着抵抗力に影響を及ぼしていると言える。

凍着抵抗力の増減要因は、標準偏回帰係数における正負の符号から評価できる。この符号によって凍着抵抗力の増減関係を整理すると表4-8のようになる。表のように、Rzが増加すれば凍着抵抗力が増加し、Smおよび $\theta_c$ が増加すれば凍着抵抗力が減少する関係にある。従って、屋根葺材表面の凹凸高さを示すRzが小さいと同時に、凹凸の平均間隔Smおよび接触角 $\theta_c$ が大きな材料であるほど凍着抵抗力が小さくなると考えられる。

表 4-6 説明変数間の相関マトリックス（基準変数：凍着抵抗力）

	Rz	Sm	$\theta_c$
Rz	1.000	0.355	0.296
Sm	0.355	1.000	-0.056
$\theta_c$	0.296	-0.056	1.000

表 4-7 凍着抵抗力を基準変数とした場合における説明変数の各係数

基準変数：凍着抵抗力 $F_a$		重相関係数 $R=0.697$		
説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	偏相関係数	単相関係数
10点平均粗さ Rz	1.931	0.721 (0.721)	0.662	0.452
凹凸の平均間隔 Sm	-0.133	-0.330 (0.330)	-0.389	-0.045
接触角 $\theta_c$	-4.864	-0.514 (0.514)	-0.559	-0.282

カッコ内は絶対値を示す

表 4-8 標準偏回帰係数の正負からみた凍着抵抗力の増減関係

凍着抵抗力	減少 ←————→ 増加	凍着抵抗力
減少 ↓	10点平均粗さ Rz	増加 →
増加 →	凹凸の平均間隔 Sm	減少 ↓
増加 →	接触角 $\theta_c$	減少 ↓

## 2) 摩擦係数に影響を及ぼす諸性状

静・動摩擦係数を基準変数として重回帰分析を行った結果は、次に示す通りとなる。説明変数間の相関マトリックスを表4-9に示す。表のように、説明変数間での内部相関は低い状況にある。

表4-10に静摩擦係数に対する説明変数の各係数、表4-11に動摩擦係数に対する各係数を示す。これらの表をみると、静・動摩擦係数に対する標準偏回帰係数の絶対値は、 $R_z$ およびWCが大きくなる。すなわち、屋根葺材表面の凹凸高さを示す $R_z$ 、屋根雪の含水率を示すWCは、他の説明変数に比べて静・動摩擦係数への関連が強いと考えられる。

1)に示した凍着抵抗力的の場合と同様に、摩擦係数の増減要因を標準偏回帰係数における正負の符号から整理すると、表4-12のようになる。表のように、 $R_z$ が増加すれば摩擦係数が増加し、WCが減少すれば摩擦係数が減少する関係にある。従って、10点平均粗さ $R_z$ が小さい材料で屋根雪の含水率WCが大きい状態になれば、摩擦係数が減少すると考えられる。また、 $R_z$ やWCに比べて関連が弱いものの、接触角 $\theta_c$ および凹凸の平均間隔 $S_m$ が増加すれば摩擦係数が減少すると言える。

表4-9 説明変数間の相関マトリックス（基準変数：静摩擦、動摩擦係数）

	$R_z$	$S_m$	$\theta_c$	WC
$R_z$	1.000	0.156	0.244	-0.335
$S_m$	0.156	1.000	-0.046	0.080
$\theta_c$	0.244	-0.046	1.000	-0.168
WC	-0.335	0.080	-0.168	1.000

表4-10 静摩擦係数を基準変数とした場合における説明変数の各係数

説明変数	基準変数：静摩擦係数 $\mu_s$		重相関係数 $R=0.746$	
	偏回帰係数	標準偏回帰係数	偏相関係数	単相関係数
10点平均粗さ $R_z$	0.004	0.586 (0.586)	0.622	0.690
凹凸の平均間隔 $S_m$	-0.000	-0.040 (0.040)	-0.059	0.026
接触角 $\theta_c$	0.000	-0.079 (0.079)	-0.113	0.269
雪の含水率WC	-0.004	-0.273 (0.273)	-0.356	-0.486

カッコ内は絶対値を示す

表4-11 動摩擦係数を基準変数とした場合における説明変数の各係数

基準変数：動摩擦係数 $\mu_k$		重相関係数 $R=0.765$		
説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	偏相関係数	単相関係数
10点平均粗さ $R_z$	0.002	0.673 (0.673)	0.686	0.736
凹凸の平均間隔 $S_m$	0.000	-0.022 (0.022)	-0.033	0.112
接触角 $\theta_c$	-0.000	-0.058 (0.058)	-0.086	0.142
雪の含水率 $WC$	-0.002	-0.220 (0.220)	-0.302	-0.434

カッコ内は絶対値を示す

表4-12 標準偏回帰係数の正負からみた静・動摩擦係数の増減関係

静・動摩擦	減少 ← → 増加	静・動摩擦
減少 ↘	10点平均粗さ $R_z$	増加 ↗
増加 ↗	凹凸の平均間隔 $S_m$	減少 ↘
増加 ↗	接触角 $\theta_c$	減少 ↘
増加 ↗	雪の含水率 $WC$	減少 ↘

1), 2)で示した結果をみると、滑落抵抗力の増減には、屋根葺材の表面性状が大きな影響を及ぼしている。この影響は、凍着抵抗力の場合、屋根葺材表面の凹凸高さ  $R_z$  が最も大きい。次いで、材料の撥水性を示す接触角、凹凸の平均間隔  $S_m$  の順となる。但し、表面凹凸の形状が凍着抵抗力へ及ぼす影響は、凹凸の高さ  $R_z$  のみを指標とするのは十分な評価とは言えない。具体的には、 $R_z$  の増加は凍着抵抗力の増加へ寄与し、 $S_m$  の増加はこの抵抗力の減少へ寄与する。すなわち、屋根葺材の表面凹凸が凍着抵抗力へ及ぼす影響を検討する場合は、 $R_z$  (凹凸の高さ) のみでなく、 $S_m$  (凹凸の間隔) についても併せて考慮する必要があると考える。これら  $R_z$ ,  $S_m$  と同時に接触角  $\theta_c$  を用いることで、屋根葺材の表面性状が凍着抵抗力に及ぼす影響を把握できると考える。

次に、摩擦抵抗力の場合についてみると、屋根葺材の表面凹凸が及ぼす影響は、凍着抵抗力と同様、 $R_z$ ,  $S_m$  について考慮する必要がある。この一方で、雪の含水率も摩擦抵抗力の増減に寄与している。すなわち、摩擦抵抗力の増減を明らかにするためには、屋根葺材の表面性状を把握すると同時に、屋根雪と屋根葺材との界面における水分状態も十分に考慮する必要があると考える。

#### 4. 5 まとめ

---

屋根葺材の表面特性に対応した滑落特性を明らかにすることを目的とし、屋根葺材表面の凹凸性状、撥水性を示す接触角が滑落抵抗に及ぼす固有の影響について実験的に検討した。さらに、この実験結果を基に重回帰分析を行い、各表面特性と滑落抵抗との関連の強さについて検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 屋根葺材の表面性状が及ぼす凍着・摩擦抵抗の増減は、表面凹凸の形状を示す指標が最も支配的となる。表面凹凸の形状が凍着・摩擦抵抗に及ぼす影響は、凹凸の高低差を示す10点平均粗さ $R_z$ が最も支配的な指標となり、 $R_z$ が $100\mu\text{m}$ 以下の場合、 $R_z$ の増加に伴って凍着・摩擦抵抗は増加する。一方、屋根葺材表面における凹凸の間隔 $S_m$ は、その値が大きくなると、屋根葺材表面の凸部と屋根雪との直接接触、さらに実質付着面積を減少させるため、凍着・摩擦抵抗を減少させる効果を持っている。 $S_m$ による凍着・摩擦抵抗の減少は、 $R_z$ が $100\mu\text{m}$ を越える場合に顕著にみられる。これらのことから、10点表面粗さ $R_z$ が $100\mu\text{m}$ 以下の屋根葺材では、 $R_z$ を指標とした滑落抵抗の評価が可能と言える。しかし $R_z$ が $100\mu\text{m}$ を越える粗度の大きな屋根葺材の場合には、凹凸の高さを示す $R_z$ の他に、凹凸の間隔を示す $S_m$ 等の指標を用いて、屋根葺材の表面波形が滑落抵抗へ及ぼす影響を十分に考慮する必要がある。

2) 屋根雪と屋根葺材との界面付近における水分状況は、摩擦係数に大きな影響を及ぼし、さらにその影響は屋根葺材の違いによる固有の特性を持っている。具体的には、しまり雪の場合、この雪の飽和含水率となる $10\sim 20\%$ で著しく滑落性能が低下する。この滑落性能の低下は、屋根葺材の表面粗さが大きいほど顕著となる。このことから、屋根雪の滑落を評価するためには、屋根葺材の凹凸形状を把握すると同時に、屋根雪と屋根葺材との界面における水分の介在状況についても十分に検討を行う必要がある。

3) 屋根葺材と屋根雪との界面における水分は、摩擦抵抗に及ぼす接触角の影響を希薄にする効果を持っている。屋根葺材と屋根雪との界面が水膜で満たされるようになると、屋根葺材と屋根雪との摩擦抵抗は、水膜の厚さに支配されるようになり、接触角の影響を受けにくくなる。

以上のことから、勾配屋根の積雪荷重を評価しようとする場合、屋根葺材表面の凹凸性状および材料の撥水性に対応した滑落特性を十分に把握する必要がある。このような屋根葺材の表面性状を十分に考慮することで、屋根葺材の違いが雪の滑落に及ぼす影響等、屋根雪の滑落性能を評価することが可能になり、雪の滑落を考慮した合理的な積雪荷重評価につながると考える。

一方、本章で示した摩擦抵抗力の特徴についてみると、この抵抗力は、屋根葺材の表面性状の他に、屋根葺材と屋根雪との界面における水分状況に大きく支配される。界面における水分の変化によって、摩擦抵抗力は無視できないほどに増減（例えば、A種膜材の場合、乾燥→湿潤で3.5倍）することが明らかとなった。既往の研究をみると、滑落を支配する抵抗力には、屋根葺材の表面性状の他に、外気温や雪質が大きく関わるということが指摘されている<sup>7)・8)・12)・18)</sup>。屋根葺材と屋根雪との界面における水分状況は、外気温や雪質によって大きく変化すると考えられることから、屋根雪の滑落を定量的に評価しようとする場合、屋根葺材の表面性状のみではなく、外気温や雪質が滑落に及ぼす影響も併せて評価することが極めて重要になると考える。このことから、次章では、屋根葺材の表面性状に加えて、外気温や雪質が屋根雪の滑落に及ぼす影響について検討する。

## 第4章 参考文献

---

- 1) 渡辺正朋：屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究，東北大学学位論文，1990.6
- 2) 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
- 3) 伊東敏幸，苫米地司，星野政幸：劣化した屋根用塗装鋼板の表面性状と滑雪性について，日本雪工学会誌Vol.10, No.2, pp.76-84, 1994.4
- 4) 山口英治：膜構造建築物における整序積雪荷重に関する研究，北海道工業大学学位論文，1998.3
- 5) 渡辺正朋，平井和喜：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との静摩擦，日本雪工学会誌，第3号，pp.1-11, 1987.6
- 6) 渡辺正朋，平井和喜：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
- 7) 渡辺正朋：屋根葺材と雪氷との凍着強さに関する研究，第9回日本雪工学会論文報告集，pp.127-130, 1993.1
- 8) 苫米地司，伊東敏幸：屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究，第1報，日本雪氷学会誌，第56巻，3号，pp.215-222, 1994.9
- 9) 伊東敏幸，苫米地司，三橋博三：屋根葺材と屋根雪の凍着性状に関する検討，日本建築学会構造系論文集，pp.43-51, 1995.4
- 10) 上野学，他4名：雪氷に対する屋根鋼板の特性評価，第2報，日本雪氷学会誌，第50巻，3号，pp.207-215, 1988.12
- 11) 吉田光則，他8名：着氷雪防止技術に関する研究(1)，各種材料の着氷力について，北海道の雪氷，第12号，pp.24-26, 1993.8
- 12) 対馬勝年：単結晶氷の摩擦に関する研究I～III，低温科学物理編，第35輯，pp.1-46, 1977
- 13) 生井武文：流れの力学，コロナ社，pp.3-7, 1976.10
- 14) 田中久一郎：摩擦のおはなし，日本規格協会，pp.189-195
- 15) 井本立也：SCIENCE AND TECHNOLOGY，接着のはなし，日刊工業新聞社，pp.93-104, 1988
- 16) 前野紀一，黒田登志雄：雪氷の構造と物性，基礎雪氷学講座1，古今書院，pp.186-187, 1986.7
- 17) 前田博司：金属屋根における積雪の滑落，日本雪氷学会誌，第41巻3号，pp.199-204, 1979.9
- 18) 清水増治郎，木村忠志：氷点下における雪の屋根材への付着，雪氷，第54巻，3号，pp.269-275, 1992.9

## 第 5 章 屋根雪の雪質が滑落抵抗力に及ぼす影響

	pp.
5.1 はじめに -----	5- 1
5.2 屋根雪の滑落に関わる抵抗力と雪質 -----	5- 2
5.3 研究の方法 -----	5- 3
5.3.1 戸建住宅を対象とした屋根葺材と屋根雪 との界面における雪質の観測方法	5- 8
5.3.2 小屋裏モデルを用いた屋根葺材と屋根雪 との界面における雪粒径の測定方法	5- 9
5.3.3 摩擦抵抗力の測定方法 -----	5-10
5.4 屋根葺材裏面温度の推移と雪質変化との関係 -----	5-17
5.4.1 戸建住宅の各部温度推移および屋根葺 材との屋根雪との界面における雪質	5-17
5.4.2 小屋裏モデルを用いた場合における屋根葺 材との屋根雪との界面における雪質	5-21
5.5 雪粒径と摩擦抵抗力との関係 -----	5-23
5.5.1 粒径の異なる場合の摩擦抵抗力 -----	5-23
5.5.2 雪粒径が経時的に変化する過程の摩擦抵抗力 -----	5-29
5.6 雪質が摩擦抵抗力に及ぼす影響に関する考察 -----	5-32
5.7 まとめ -----	5-39
参考文献 -----	5-41



## 第5章 屋根雪の雪質が滑落抵抗力に及ぼす影響

### 5.1 はじめに

---

前章で示した通り，勾配屋根の積雪荷重を評価しようとする場合，屋根葺材表面の凹凸性状および材料の撥水性に対応した滑落特性を十分に把握する必要がある。この評価指標には，表面凹凸の高さ $Rz$ および間隔 $S_m$ ，接触角 $\theta_c$ を用いる必要がある。一方，屋根雪の滑落を支配する抵抗力（以下，滑落抵抗力）は，屋根雪と屋根葺材との界面における水分の変化によって，無視できないほどに増減することが明らかとなった。水分の発生状況は，気象条件や屋根雪の雪質等に大きく影響を受ける。これらのことから，屋根雪の滑落を定量的に評価しようとする場合は，屋根葺材の表面性状のみでなく，外気温や雪質が滑落に及ぼす影響も併せて評価することが極めて重要になる。

図5-1のように，屋根上に降り積もった積雪が滑落するまでの時間的な状況を見ると，雪の滑落は降雪直後に発生するのではなく，数時間～数日間にわたって屋根上に堆積した後に発生する一般的である<sup>1)・2)</sup>。この堆積期間中に屋根面に接する雪粒子は，外気温の変動や小屋裏からの伝熱によって生ずる融解に伴って，新雪からしまり雪，ざらめ雪等へと雪質が変態する。この状況は屋根雪の断面観測でも確認されている<sup>3)</sup>。このように，屋根面に接する雪質は屋根上に堆積している数日間において不変ではなく，数日間であってもその物性が大きく変化する。これらのことから，滑落抵抗力を評価する場合，図5-2に示すような雪質に関わる要因を無視できない。既往の研究をみると，滑落抵抗力の一要素である摩擦抵抗力は，雪質の違いによって増減することが自然雪を用いた屋外実験結果から指摘されている<sup>4)・5)</sup>。前章に示した実験においても，雪質の評価指標の一つとなる雪の含水率の違いによって摩擦抵抗力が大きく変化することを示した。このように，滑落抵抗力は，雪質の違いによって増減することが確認されているものの，既往の研究では屋根葺材の表面性状に主眼が置かれていたことから<sup>6)・7)</sup>，両者の関係を定量的に評価するまでに至っていない。

このような背景から本章では，屋根雪の雪質変化が摩擦抵抗力に及ぼす影響を実験的に検討した。始めに，滑落現象に影響を及ぼす雪物性を整理すると同時に，実際の建築物・小屋裏モデルにおける雪質変化を観測した。この結果に基づいて，屋根雪の雪質変化が摩擦抵抗力に及ぼす影響について実験を行った。これらのことから，屋根雪の滑落に影響を及ぼす雪質について考察を行った。

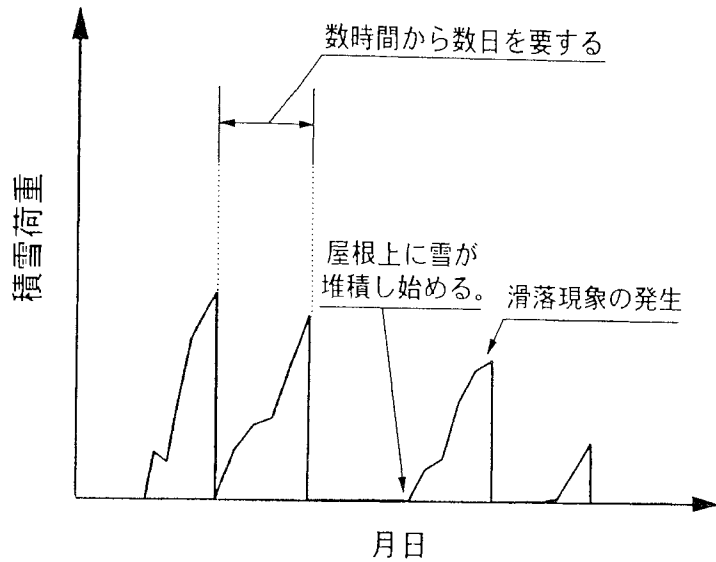


図5-1 勾配屋根における屋根上積雪荷重の荷重状況

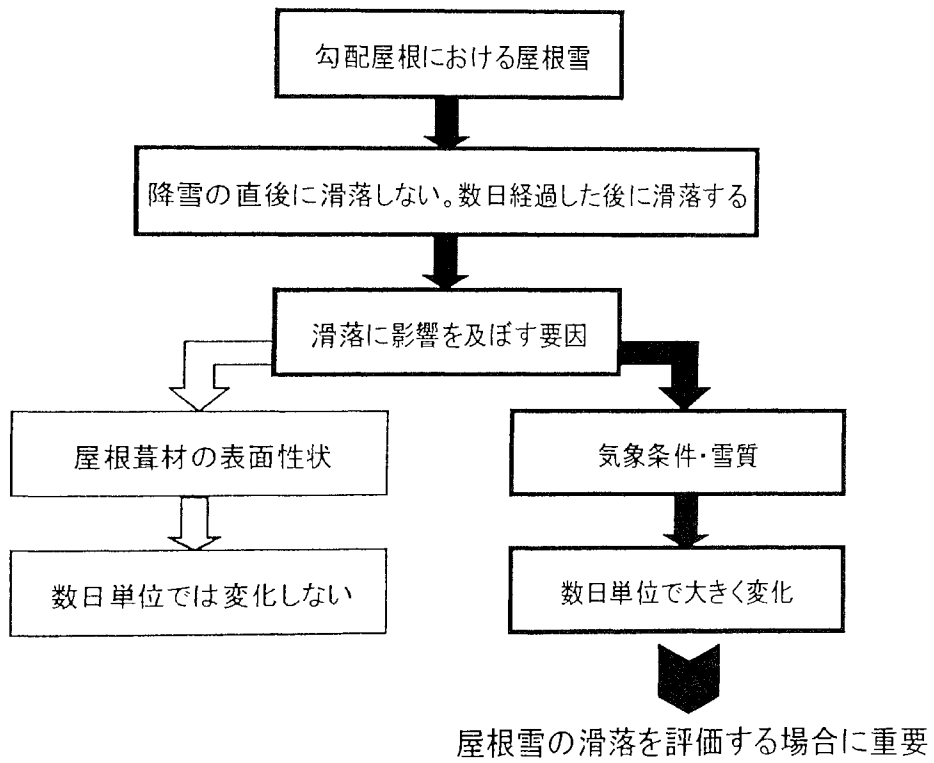


図5-2 本章の背景

## 5. 2 屋根雪の滑落に関わる抵抗力と雪質

屋根雪の滑落を支配する抵抗力は、連続的な屋根雪の破断を阻止する雪粒子相互の破断抵抗力と、屋根雪と屋根葺材との間に発生する界面抵抗力の2つに大別できる。前者の破断抵抗力には積雪の引張およびせん断抵抗力などがあり、これらの抵抗力は、第3章で示した通り、屋根雪が全面滑落する場合では作用しない。後者の界面抵抗力には、滑落開始への抵抗力として作用する凍着抵抗力および静摩擦抵抗力、滑落持続への抵抗力として作用する動摩擦抵抗力がある。ここで、屋根雪の滑落に関わる凍着抵抗力および静・動摩擦抵抗力の基礎特性を整理すると次のようになる。

凍着抵抗力の基礎特性についてみると、この抵抗力の増減には屋根葺材の表面性状および温度条件が大きく関わっている。屋根葺材の表面性状が凍着抵抗力に及ぼす影響についてみると、凍着抵抗力が小さくなるためには、第4章で示した通り、表面凹凸の高さ $R_z$ が小さいと同時に、その凹凸間隔 $S_m$ が広く、撥水性を示す水との接触角 $\theta_c$ が高い必要がある。ここで、一般的に市販されている屋根用塗装鋼板を対象とした場合の凍着抵抗力について、既往の研究結果<sup>2, 9, 10, 11)</sup>を整理すると図5-3になる。これら研究では、屋根葺材の表面性状が凍着抵抗力に

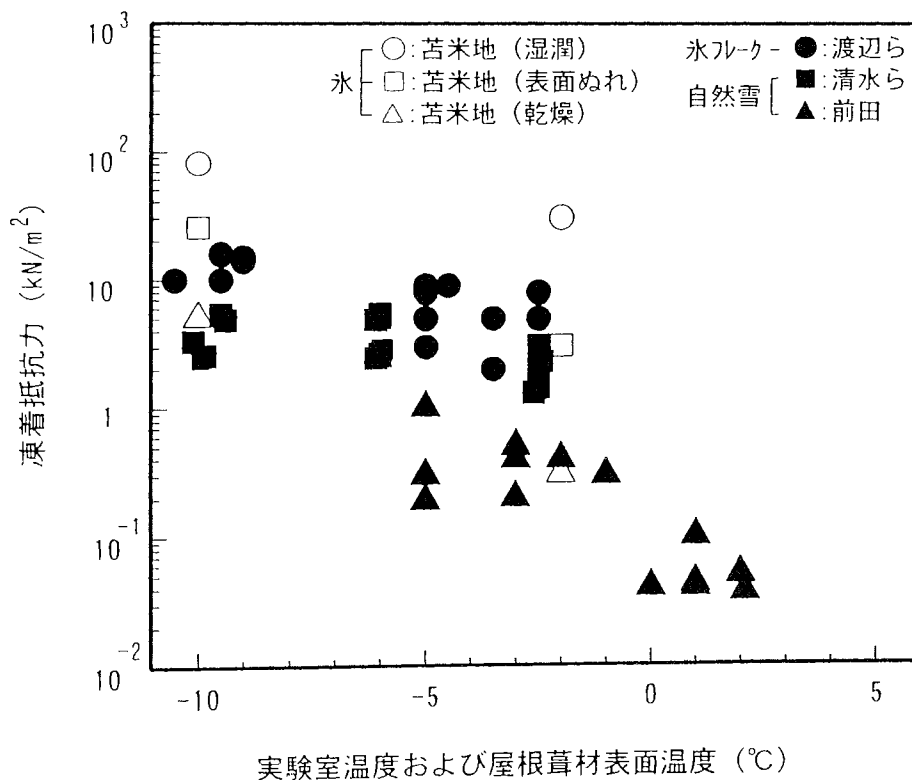


図5-3 既往の研究から得られる凍着抵抗力の特性

影響を及ぼすことが明らかとされている一方で、この抵抗力に顕著な温度依存性があることが指摘されている。図のように、凍着抵抗力の増減は「界面の乾燥・湿潤」「雪質」等の要因が複雑に関与している。そのため、各研究における測定値は大きなバラツキをみせるものの、 $-10^{\circ}\text{C}$ の実験温度では $2\text{kN}/\text{m}^2$ 程度が凍着抵抗力の下限値となる。例えば、屋根勾配 $30^{\circ}$ の建築物で凍着抵抗力の下限値が作用したとしても、滑落の発生に必要な屋根上積雪深は $1.3\text{m}$  (凍着抵抗力 $\div \sin\theta \div$ 積雪密度 $=2\text{kN}/\text{m}^2 \div \sin 30^{\circ} \div 3\text{kN}/\text{m}^3$ )以上となる。この積雪深は、札幌における年最大積雪深の平年値 ( $0.99\text{m}$ )<sup>12)</sup>を上回る値となる。このように、 $-10^{\circ}\text{C}$ の温度条件では凍着抵抗力の下限値が作用したとしても極めて滑落しにくい。一方、凍着抵抗力は $-2^{\circ}\text{C}$ 以上の温度になれば、この値が急減する傾向がみられる。さらに、 $0^{\circ}\text{C}$ を上回る温度になると、この抵抗力は殆ど作用しなくなる。このように、凍着抵抗力には屋根葺材の表面性状が及ぼす影響がある一方で、顕著な温度依存性がみられ、マイナス温度で推移する場合の滑落を大きく支配している。一方、プラス温度では、この抵抗力が作用しないことから、凍着抵抗力以外の要因が屋根雪の滑落を支配している。温度条件がプラスとなり、凍着抵抗力が解除された状態に作用する抵抗力は、静・動摩擦抵抗力のみとなる。すなわち、静・動摩擦抵抗力は、屋根雪と屋根葺材との界面温度が $0^{\circ}\text{C}$ 以上となった場合の滑落を支配している。静・動摩擦抵抗力は、屋根雪と屋根葺材との界面に作用する。このことから、屋根葺材の表面性状および界面の接触状況を示す雪質が、静・動摩擦抵抗力を大きく支配している。ここで、静・動摩擦抵抗力に影響する屋根葺材および屋根雪の諸要因について整理すると、図5-4になる。図のように、静・動摩擦抵抗力に影響する屋根葺材の表面性状には表面粗さおよび撥水性が挙げられ、第4章で示した通り、これら性状の中でも表面粗さの影響が最も大きい。この一方、静・動摩擦抵抗力に影響する屋根雪の性状には、雪の含水率、密度および硬度、あるいは雪粒子の形や粒径が挙げられる。このうち、密度は雪の粒径に依存し、硬度は低温下での温度に依存する。雪粒子の形状は雪の粗大化過程で球形化し、雪の含水率は、屋根雪と屋根葺材との界面における水量よりも摩擦に対する影響が小さい。従って、これらの物性の中で滑落抵抗力に大きく影響する項目は雪粒径と融雪で生じる水分との2つと言える。このように、静・動摩擦抵抗力は、屋根葺材の表面性状の影響を受ける一方で、粒径や融雪水の影響も受けると考える。

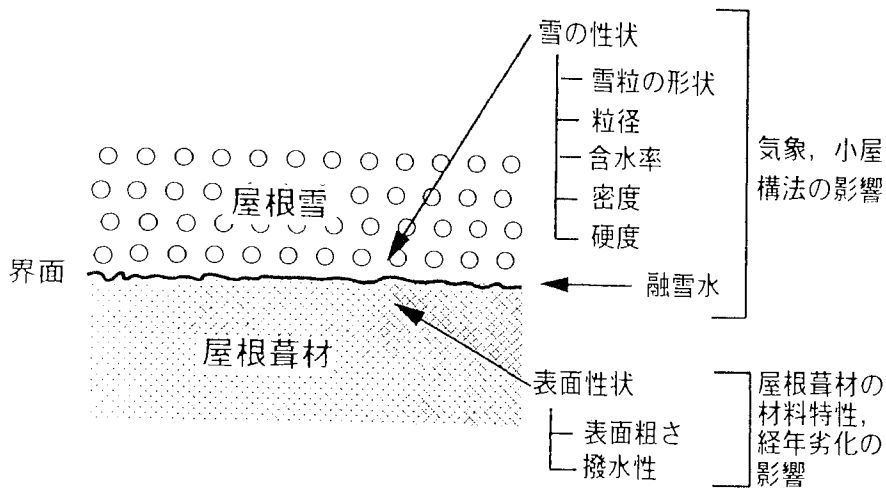


図5-4 摩擦抵抗力に影響を及ぼす諸要因

以上の結果をみると、屋根雪の滑落と界面抵抗力との関係は、図5-5のように整理できる。始めに、凍着抵抗力の特性を整理すると「屋根葺材の表面性状」および「屋根雪と屋根葺材との界面温度」が、この抵抗力の増減を支配している。これら2つの要因のうち「屋根雪と屋根葺材との界面温度」が滑落に及ぼす影響は、この温度が $-2^{\circ}\text{C}$ 以下になると顕著にみられるようになり、 $-10^{\circ}\text{C}$ になると殆ど滑落しないような凍着抵抗力となる。すなわち、外気温がマイナス温度領域となり、屋根雪と屋根葺材との界面温度が $-2^{\circ}\text{C}$ 以下となった場合は、凍着抵抗力が滑落の発生を大きく抑制しており、この抵抗力が一旦作用すると滑落は期待できないと考える。一方、凍着抵抗力が解除され、滑落が期待できる温度領域になった場合は、静・動摩擦抵抗力が滑落を支配している。静・動摩擦抵抗力の特性を整理すると、「屋根葺材の表面性状」および「雪質（雪粒径・融雪水）」が、この抵抗力の増減を支配している。これら2つの要因のうち、「屋根葺材の表面性状」が及ぼす影響については、既往の研究等<sup>(6)・(7)・(8)</sup>でも検討が行われていると同時に、本論文の第4章でも検討を行っている。しかし、雪質が及ぼす影響については既往の研究等でも十分な検討が行われておらず、定量的な評価を行える段階にない。これらのことから、屋根雪の滑落を定量的に評価するためには、雪粒径の変化や融雪による水分の発生が、静・動摩擦抵抗力へ及ぼす影響を把握する必要があると考える。

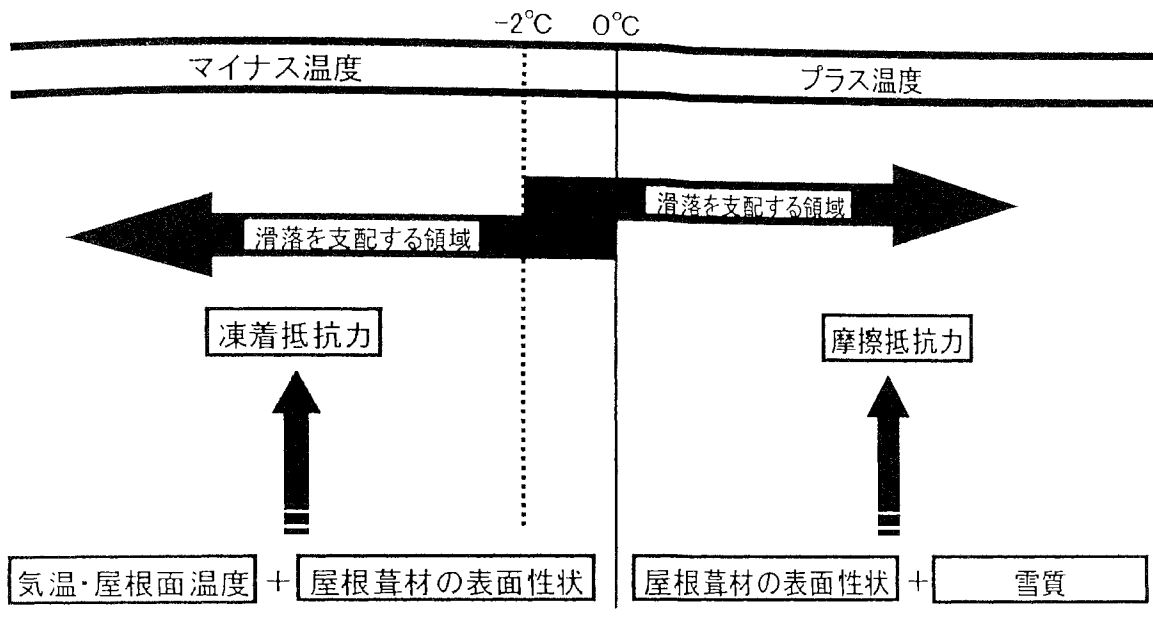


図5-5 屋根雪の滑落と界面抵抗力との関係

### 5. 3 研究の方法

屋根雪の滑落を支配する摩擦抵抗力の特性を整理すると、屋根雪の雪質に関連した物性である「雪粒径・融雪水」は、この抵抗力の増減を支配している。しかし、「雪粒径・融雪水」が滑落に及ぼす影響については、既往の研究等でも十分な検討が行われておらず、定量的な評価を行える段階にない。このことから、本項では、屋根雪の滑落を定量的に評価するための基礎資料を得ることを目的に、図5-6のことについて検討を行った。始めに、一般的な戸建住宅・小屋裏モデル（実験用試験体）の温度推移を観測し、各温度条件下における屋根雪の雪質を明らかにした。次に、雪質を示す一指標である雪粒径を用いて定量化し、雪粒径が摩擦抵抗力に及ぼす影響について実験した。これらのことから、屋根雪の雪質が摩擦抵抗力に及ぼす影響について考察を行った。本項では、これらの検討に必要な観測・実験の方法について述べる。

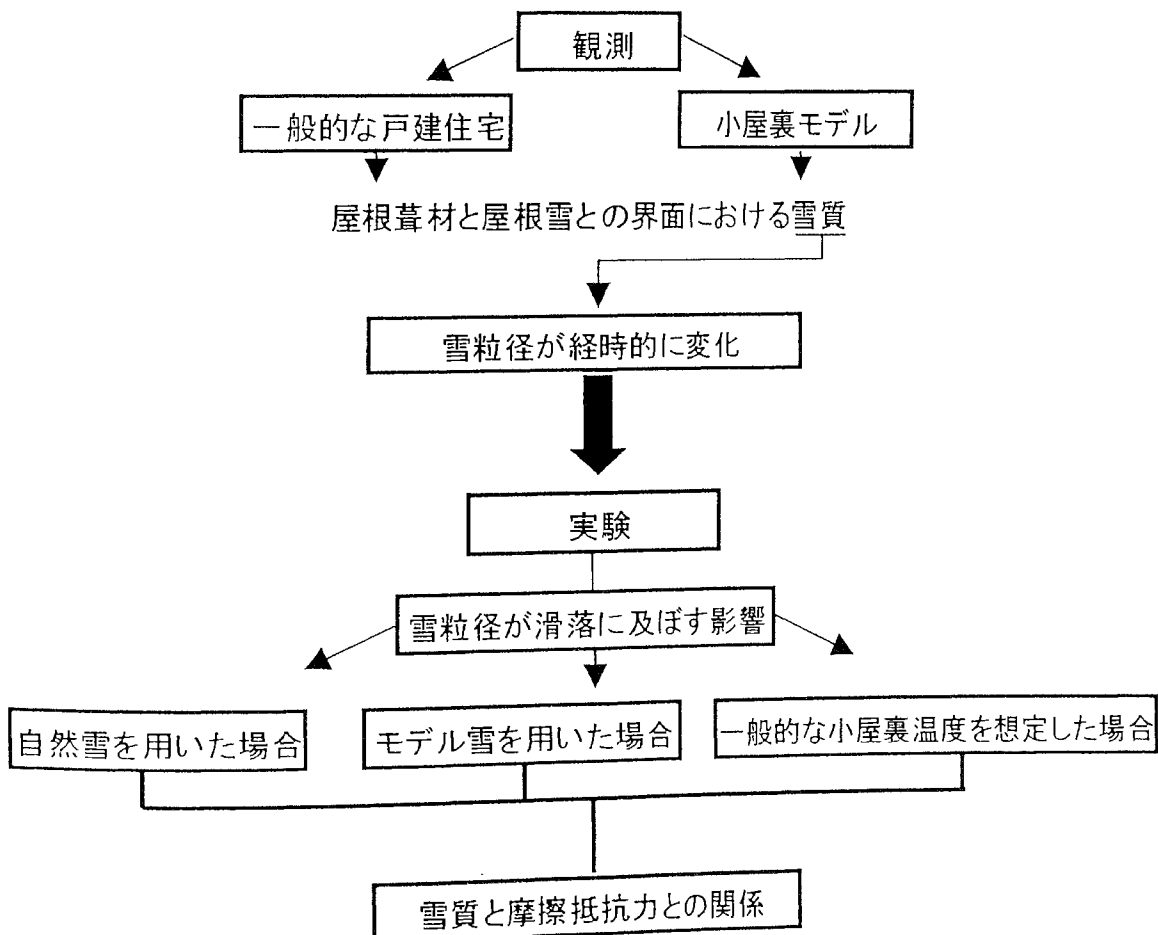


図5-6 本項の検討範囲

### 5.3.1 戸建住宅を対象とした屋根葺材と屋根雪との界面における雪質の観測方法

5.2項に示した摩擦抵抗力の基礎特性をみると、この抵抗力の増減には、雪質が大きく関わっている。このことから、実際の建築物における屋根葺材裏面温度を測定すると同時に、屋根雪と屋根葺材との界面における雪質を観察した。屋根葺材裏面温度の測定は、図5-7に示す札幌市手稲区に建設された一般的な戸建住宅を対象に実施した。対象とした住宅屋根は、艶消し塗装鋼板を葺いた勾配屋根で小屋裏換気が行われており、天井と小屋裏との間にグラスウール200mmの断熱が施されている。屋根勾配は4寸勾配(21.8°)であり、室内温度は約18℃で推移するように暖房が行われている。屋根葺材裏面温度は棟と軒の中央部における屋根葺材の裏面に熱電対を貼り付けて10分毎に測定した。雪質は、スケール付きの100倍ルーペで観察した。観察は、屋根雪の最下層部を一部切除して行った。これらの温度測定および雪質の観察は、1997年2月に実施した。

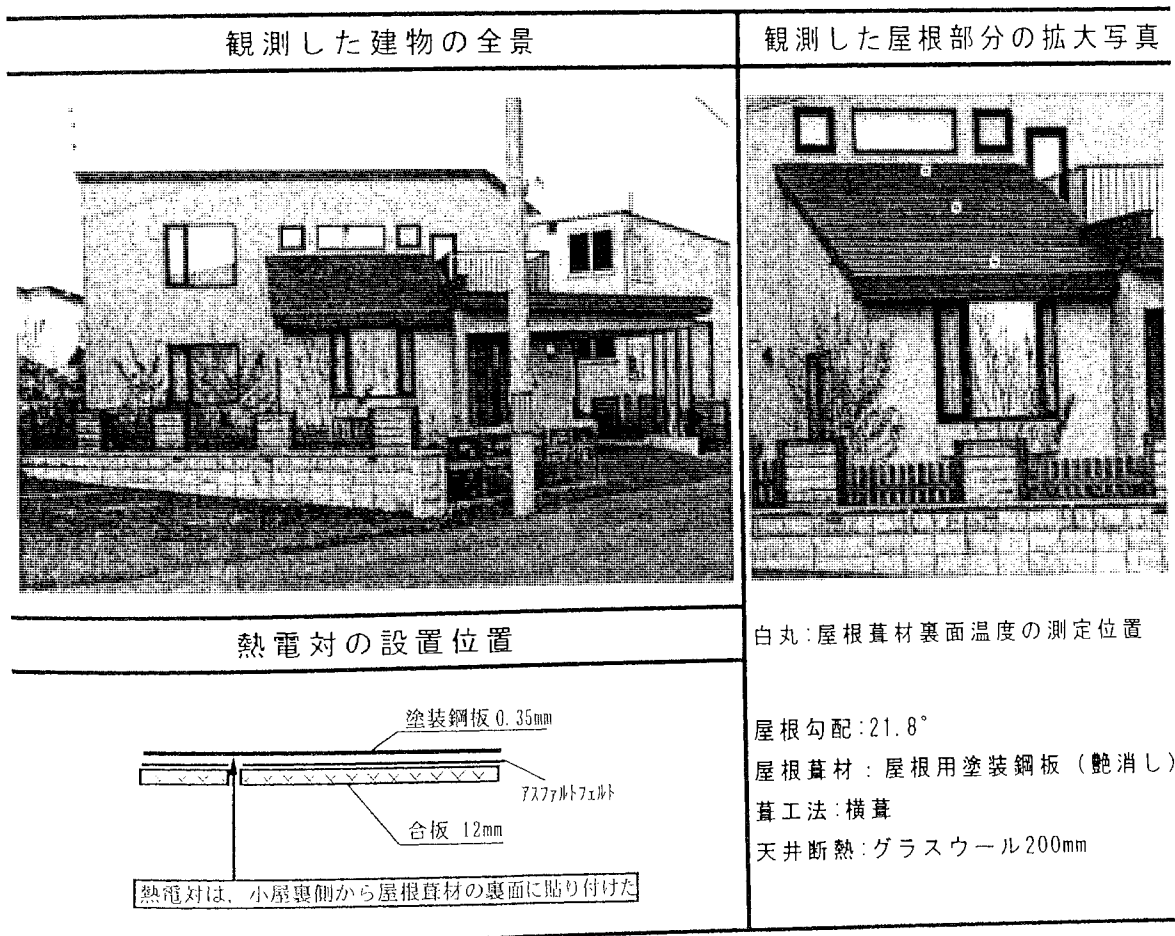


図5-7 屋根葺材裏面温度の実測に用いた建物



### 5.3.2 小屋裏モデルを用いた屋根雪と屋根葺材との界面における雪粒径の測定方法

5.3.1節で示した一般的な戸建住宅におけるの温度状況を想定し、小屋裏モデル（実験用試験体）を用いて、屋根雪と屋根葺材との界面における経時的な雪粒径の変化状況を測定した。

雪粒径の測定には、実際の建物における温度条件を想定するため、図5-8に示すような小屋裏モデルを用いた。図に示すように、試験体はランバーコア合板上に20mm厚のフォームポリスチレン板およびパネルヒーターを載せ、その上にある9mm厚の野地板に屋根葺材を貼り付けている。このような試験体を-8~-5℃で降雪した日にパネルヒーターの電源を絶った状態で屋外に水平状態で放置し、屋根葺材上に自然状態で10cm以上積雪させた。その後、写真5-1のように、積雪した状態の試験体を-5℃の低温室内へ移動し、積雪深10cm以上の部分を取り除いた後、パネルヒーターに通電した。パネルヒーター表面の温度は、予備実験によって屋根葺材表面の温度が0℃を若干上回るような温度になる5通りを設定した。なお、低温室の温度（-5℃）は札幌における1・2月の平均外気温である-4.5℃を想定している。実験時の積雪密度は何れも180~210kg/m<sup>3</sup>であった。

低温室内に移動した試験体を用い、表5-1に示す経過時間毎に雪粒子の観察を行った。観察の間隔は、表のように、0℃で推移する水に浸った新雪の雪粒径変化<sup>13)</sup>（130hourで0.3mmから1.1mmへ粗大化）を参考に、0.5~1日間隔を目安とした。所定時間を経過した時点で、試験体上の雪を10cm角の大きさに成形した雪ブロック下面を一部切除し、黒い樹脂板上に薄く載せて、雪の観察を実施した。雪粒子の観察には、写真5-2に示すマイクロウォッチャー（倍率：10倍）を用いた。マイクロウォッチャーで撮影した画像を基に、雪粒径の経時変化も測定した。

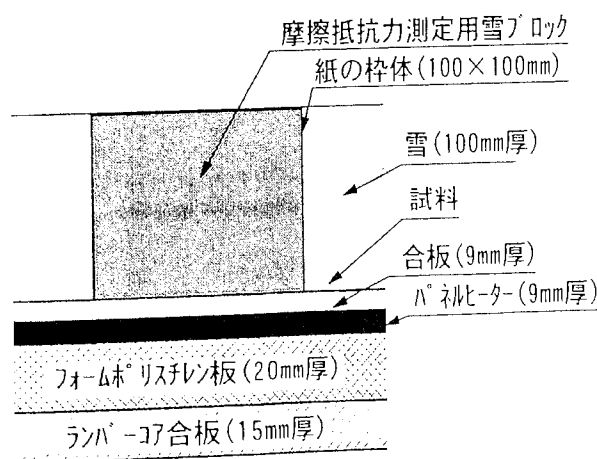
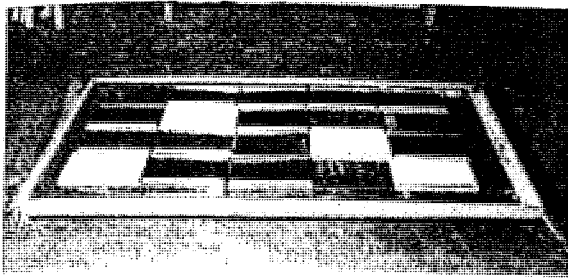
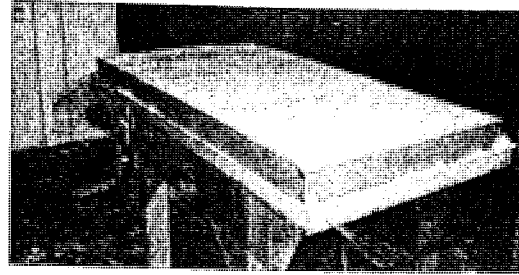


図5-8 実験に用いた小屋裏モデルの断面詳細

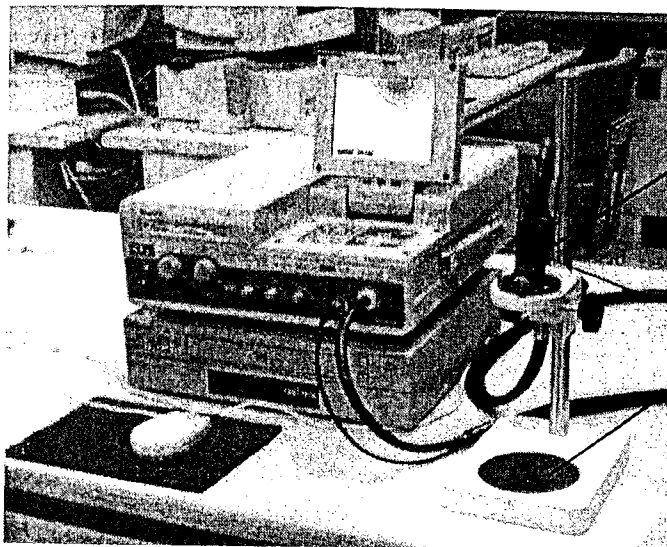


積雪させる以前の小屋裏モデル



積雪させた後の小屋裏モデル

写真5-1 低温室内に移動させた時の小屋裏モデル



CCDカメラ (10倍)

雪の設置箇所

雪粒子の観察は本装置を $-5^{\circ}\text{C}$ の低温室内に持ちこんで、実施している。

写真5-2 雪粒子の観察および雪粒径の測定に用いたマイクロウォッチャー

表5-1 界面における雪質の観察間隔およびパネルヒーターの設定温度

実験No.	パネルヒーターの温度	動摩擦抵抗力の測定および雪粒の観察 (●印)
No. 1	$1.2^{\circ}\text{C}$	● ● ● ● ● ● ● ●
No. 2	$1.5^{\circ}\text{C}$	● ● ● ● ● ● ● ●
No. 3	$1.9^{\circ}\text{C}$	● ● ● ● ● ● ● ●
No. 4	$2.4^{\circ}\text{C}$	● ● ● ● ● ● ● ●
No. 5	$3.3^{\circ}\text{C}$	● ● ● ● ● ● ● ●

0 6 12 24 36 48 60 72 84 96  
実験開始からの経過時間 (hours)

### 5.3.3 摩擦抵抗力の測定方法

屋根雪と屋根葺材との界面における雪粒子は時間経過に伴って、粒径が大きく変化すると考えられるため、この粒径変化に対応した屋根雪の滑落特性を把握しておく必要がある。本項では降雪直後から数日経過に至るまでの粒径変化を想定した自然雪・モデル雪を対象に、以下で示す(1)～(3)のように、屋根葺材と雪ブロックとの摩擦抵抗力を測定した。

#### (1) 粒径の異なる雪ブロックを用いた場合における摩擦抵抗力の測定方法

屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒径が摩擦抵抗力に及ぼす影響を明らかにするため、粒径の異なる自然雪を用いて摩擦抵抗力を測定した。なお、第4章で示した摩擦抵抗力の測定結果（例えば、図4-6～7）をみると、静摩擦抵抗力と動摩擦抵抗力との関係は、ほぼ比例関係にある。既往の研究においても同様のことが指摘されている<sup>7)</sup>。従って、摩擦抵抗力は、静もしくは動摩擦抵抗力の一方を測定することで評価可能と言える。ここで、氷点下の屋根葺材上で雪ブロックを滑動させると、静止状態から滑動開始までの間に凍着抵抗力が付加作用するため、静摩擦抵抗力が測定できない場合がある。このことから、本実験では、動摩擦抵抗力を摩擦抵抗力の指標とした。

動摩擦抵抗力の測定に用いる雪ブロックは、粒径が経時的に粗大化する過程の自然雪を用いた。雪質の違いに関して一般に用いられている分類<sup>14)</sup>は、表5-2の左欄の通りであり、同分類中で霜ざらめ雪に関しては屋根面付近の雪質と異なる分類となることから、本実験では同表右欄に示すような雪質の雪ブロックを対象とした。表のように、融解水の介在で粗大化したざらめ雪を粒径別に2通り（「ざらめ雪1」と「ざらめ雪2」）設定し、これに「新雪」と「しまり雪」を加えた合計4種類の雪質における動摩擦係数を測定した。なお、雪ブロックは、厳寒期の地上積雪層から採取した雪で作製した。また、氷ブロックについても測定した。なお、採取した雪の主な粒径はスケール付きの100倍ルーペで測定した。

測定の対象とした屋根葺材は、図5-8のように、屋根雪の滑落に及ぼす影響が大きい要因として表面粗さ $R_z$ が異なるものとした。その試料は表5-3に示すような表面粗さを持つ屋根用塗装鋼板6種類である。なお、屋根葺材の撥水性を示す接触角 $\theta_c$ は、試料の違いによって若干のバラツキを示すものの、何れも $\theta_c=90^\circ$ 以下の値を示していることから、これらの試料は、付着した水分がぬれ広がりやすい性質を持つ屋根葺材と言える。

動摩擦係数の測定は低温室内で第4章で行った実験と同様に、水平滑雪装置（第4章、写真4-2）を用いて実施した。この係数は、試料上に重量が28.8kgf

表5-2 一般的な雪質分類と本研究で用いた雪ブロック

一般的に用いられている雪質の分類		本研究で用いた雪ブロック	
名称	特徴	呼称	主な粒径 ( $\mu\text{m}$ )
新雪	降って間もない期間の雪で、構成粒子は、多かれ少なかれ結晶形を保存している。	新雪	10~100
しまり雪	降雪後数日経ち、構成粒子が丸みをおびた雪。粒子同士の結合も発達し、全体としてきめ細かくしまった感じを呈する。粒径は、0.3~0.6mm	しまり雪	100~500
霜ざらめ雪	温度勾配のために、内部に霜の結晶が成長した雪。粒子は鮮やかな結晶形を示し、粒径は1~5mmに達することもある。	ざらめ雪1	500~1000
		ざらめ雪2	1000~2000
ざらめ雪	融解水の介在で生じる粗い感じの雪。粒径は普通1~3mmもあり、一粒一をはっきりと見分けることができる。	氷ブロック	-

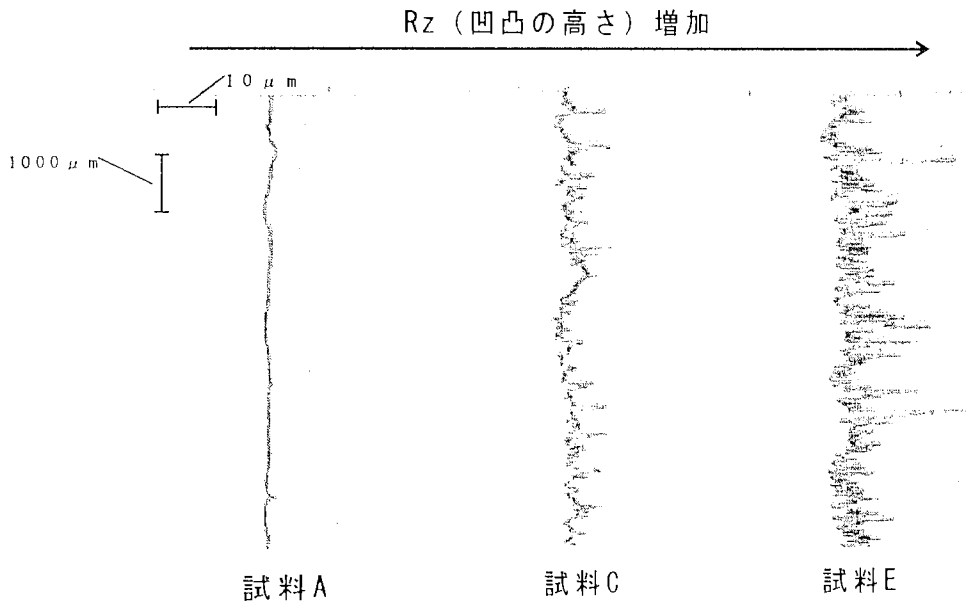


図5-8 実験に用いた屋根用塗装鋼板の表面粗さ波形

表5-3 実験に用いた屋根用塗装鋼板の表面性状と試料CODE

試料CODE	10点平均粗さ Rz ( $\mu\text{m}$ )	水との接触角 $\theta_c (^{\circ})$
試料A	1.40	72.3
試料B	2.97	75.4
試料C	12.10	75.4
試料D	16.20	84.6
試料E	23.07	62.5
試料F	26.13	68.9

(積雪密度 $100\text{kg/m}^3$ で $20\text{cm}$ の降雪があったことを想定)とした $120\times 120\text{mm}$ の雪ブロックを設置し、 $360\text{mm/min}$ の速度で水平滑動させたときの摩擦抵抗力から算出した。なお、滑動速度は伊東による屋外試験体での滑落速度の測定結果を参考<sup>3)</sup>に、実際の屋根雪が移動を開始した直後の状況を想定した。図5-9に動摩擦係数の測定手順を示す。図のように、実際の屋根雪の滑落を想定すると、屋根雪と屋根葺材との界面状態は、氷点下における乾燥状態から融雪過程における湿潤状態まで考えられる。このことから、屋根雪と屋根葺材が共に氷点下で界面が乾燥している状態を想定して、低温室および試料表面温度がともに $-10^\circ\text{C}$ のD-10、 $-5^\circ\text{C}$ のD-5および $-2^\circ\text{C}$ のD-2の3通りを測定した。その後、低温室の温度を上昇(試料表面温度は $+0.5^\circ\text{C}$ 前後)させて、屋根雪が融雪してゆく融雪初期の過程W1を想定した測定を行った。なお、新雪およびしまり雪におけるW1の状態を観察すると、屋根葺材表面がぬれている状態が確認できなかったため、これらの雪質におけるW1では、融雪水が界面を湿潤させるにまでは至っていない状態(水膜が形成される以前の状態)と言える。W1の測定後、融雪によって界面が湿潤してゆく状態を想定して、その状態を経過時間別にW2~W4の3通り測定した。これら動摩擦係数の測定は、同一条件で3回行い、その平均値で評価した。なお、測定値のバラツキは $\pm 15\%$ 以内であったので、雪質および界面状態の違いによる評価は可能と考える。

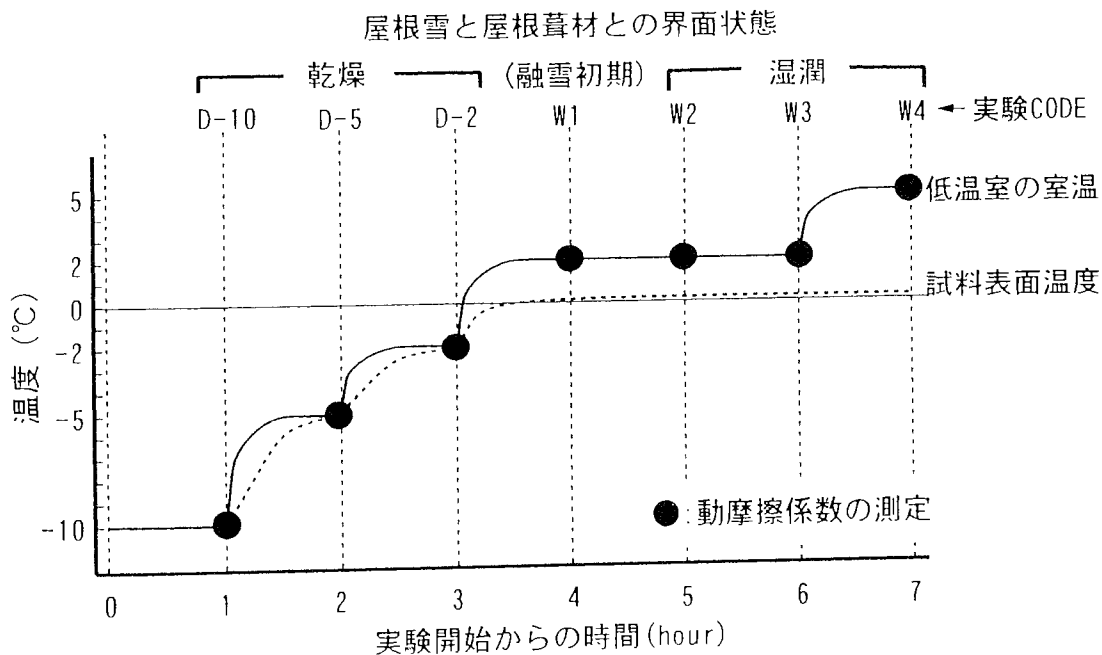


図5-9 動摩擦係数の測定手順および想定した界面状態

## (2) 小屋裏モデルを用いた場合の摩擦抵抗力の測定方法

5.3.2節で示した通り、一般的な戸建住宅におけるの温度状況を想定した小屋裏モデル（実験用試験体）を用いて、屋根葺材と屋根雪との界面における経時的な雪粒径の変化を観察・測定した。この測定に併せて、摩擦抵抗力の経時的な変化についても実験を行った。なお、摩擦抵抗力は、(1)の実験と同様に動摩擦抵抗力を評価の指標とした。

動摩擦抵抗力の測定は、低温室内で水平滑雪装置を用いて実施した。所定の経過時間毎に、各試験体上の雪を10cm角の大きさに成形した雪ブロックを(1)の実験と同様に、360mm/minの速度で水平滑動させ、そのときの摩擦抵抗力をロードセルを用いて測定した。この測定は、5.3.2節で示した雪粒径の測定に併せて、表5-1に示す経過時間毎に行った。なお、摩擦抵抗力の測定に用いた試料は2枚ずつとし、1枚の試料につき摩擦抵抗力を3回測定した。この実験に用いた試料は、表5-4に示すような積雪地域で多用されている屋根用塗装鋼板3種類とした。

表5-4 実験に用いた屋根葺材の表面性状と試料名称

試料名称	10点平均粗さ Rz ( $\mu\text{m}$ )	水との接触角 $\theta_c (^{\circ})$
光沢塗装鋼板	2.43	60.2
艶消塗装鋼板	23.07	71.6
塗装ステンレス鋼板	3.80	77.8

### (3) ガラスビーズを雪氷体とした場合における摩擦抵抗力の測定方法

屋根上に堆積した積雪は時間の経過に伴って、その粒径が大きく変化し、球形化する。このことから、雪粒径が摩擦抵抗力に及ぼす固有の影響を明らかにするため、粒子の形状が均一なガラスビーズをモデル雪として、屋根葺材との摩擦抵抗力を測定した。なお、摩擦抵抗力は、(1)、(2)の実験と同様に動摩擦抵抗力を評価の指標とした。

雪粒子が粗大化してゆく過程の雪をガラスビーズでモデル化して屋根葺材との動摩擦抵抗力を測定した。ここで、本実験で用いたガラスビーズと雪質との関わりについて粒径を指標として整理すると表5-5となる。表のように、ガラスビーズの粒径は自然雪の雪粒径<sup>14)</sup>に近似した3種類とした。これらのガラスビーズは、万能投影機（倍率×100倍）を用いて任意の100個の粒径を測定すると同時に、写真5-3のように走査電子顕微鏡で粒子形状が球形であることを確認した。なお、ガラスビーズの特性としては、粒子内部に吸水しないこと、粒子間における結合力が氷点下温度の場合においては自然雪に比べて弱いこと（自然雪の場合、粒子間における水分が氷結した状態となるため）が挙げられる。測定に用いた屋根葺材は、表面粗さの異なる塗装鋼板を試料とし、表5-6の通りとした。屋根雪の滑落が発生する際の摩擦界面を想定すると、氷点下における乾燥状態から融雪過程における湿潤状態まで考えられる。そのため、蒸留水をビーズに混入させて、その混入量が体積比率で0、2.5、5、10、15、20、30、40% vol.（以後、含水率）となるようにした。図5-10に示すように、動摩擦抵抗力の測定は、屋根葺材上に50×50×40mmの枠を設置し、枠体にビーズを入れて所定の水量を混入させた後、この枠体を屋根葺材上で(1)の実験と同様に、360mm/minの速度で水平滑動させた。その時の抵抗から動摩擦係数を算出した。

表5-5 実験に用いたガラスビーズと一般的な雪質分類

一般的な雪質分類 名称と粒径(mm)	本実験で用いたガラスビーズ	
	呼称	主な粒径
新雪 (0.1~0.1mm)	ビーズ粒径0.1mm	0.1~0.13mm
しまり雪 (0.1~0.5mm)	ビーズ粒径0.4mm	0.35~0.50mm
ざらめ雪 (1.0~2.0mm)	ビーズ粒径2.0mm	1.98~2.80mm

注) 主な粒径は、万能投影機(倍率×100倍)に写った任意の100個の粒子から算出した。

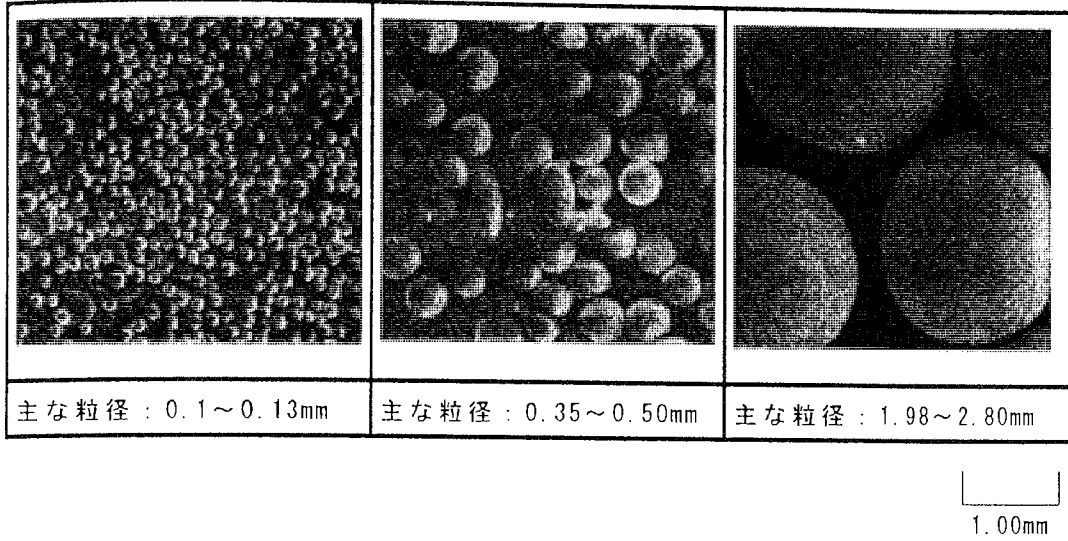


写真5-3 実験に用いたガラスビーズの形状と主な粒径

表5-6 実験に用いた屋根用塗装鋼板の表面性状と試料CODE

試料CODE	中心線平均粗さ Ra(μm)	10点平均粗さ Rz(μm)	水との接触角 θc(°)
試料A	0.33	1.40	72.3
試料B	1.44	12.10	75.4
試料C	3.20	23.07	62.5

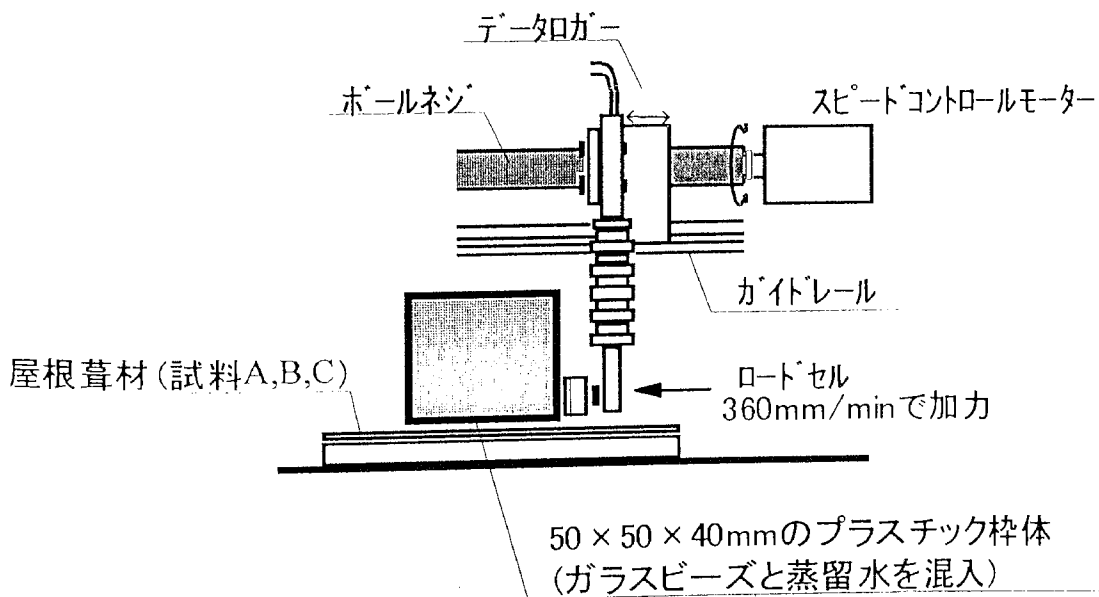


図5-10 ガラスビーズをモデル雪とした場合における摩擦抵抗力の測定方法



## 5. 4 屋根葺材裏面温度の推移と雪質変化との関係

一般的な戸建住宅・小屋裏モデル（実験用試験体）の温度推移を観測し、各温度条件下における屋根雪の雪質を観察した。その結果を示すと以下のようになる。

### 5.4.1 戸建住宅の各部温度推移および屋根葺材と屋根雪との界面における雪質

連続的な降雪があった期間における住宅各部の温度推移をみると、図5-11になる。なお、図示した期間内に雪の滑落は発生していない。図のように、2月16日の降雪以降は屋根面に積雪があり、それ以前は氷点下であった屋根材裏面温度が、約0.5℃まで上昇している。積雪がある期間内の小屋裏温度をみると、外気温の変化に影響を受けて推移している。これに対し、屋根葺材裏面温度は外気温の影響を殆ど受けず、常に0.5℃前後の温度を保ったままで推移している。すなわち、凍着抵抗力は作用しておらず、屋根雪の滑落は、摩擦抵抗力の増減に支配される状態となっている。屋根葺材裏面温度がこのような温度推移となる要因は、屋根面に積雪した雪の断熱作用が影響しているためと考える。この温度条件で経過した屋根雪を2月23日にスケール付きの100倍ルーペで観察すると、最下層部の雪は1～2mmの粒径を持つざらめ雪へと変態していた。このような雪の変態については、温風を直接屋根葺材裏面に吹き付ける膜構造物で降雪後24時間以内に約1mmまで粒径変化した事例もある<sup>15)</sup>。

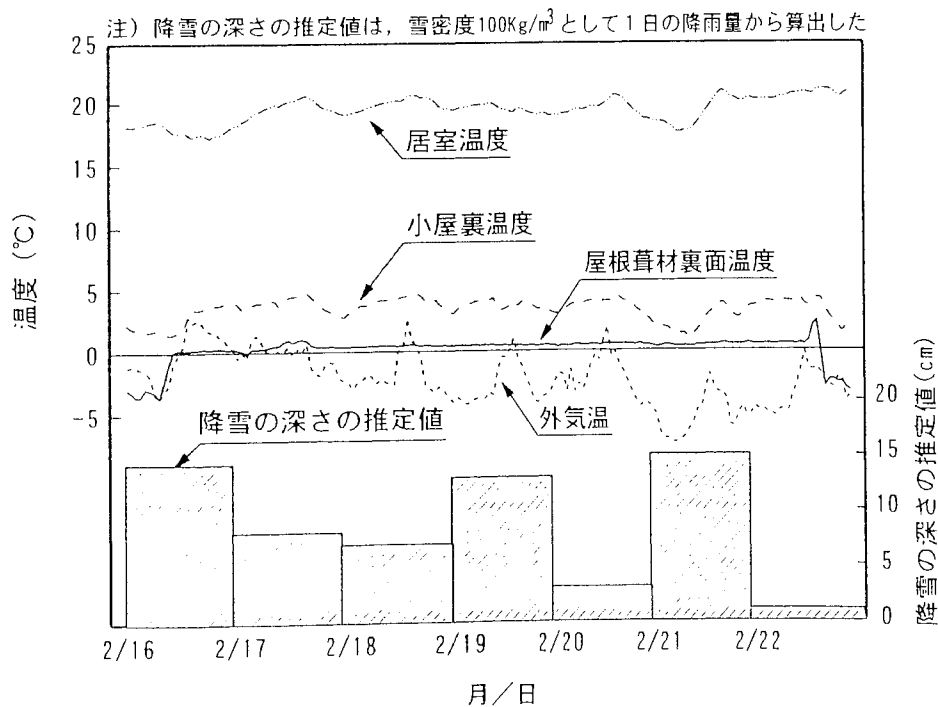


図5-11 連続的に降雪のあった期間における住宅内部の温度推移

このような雪の変態を扱った既往の研究を基に、雪粒径の粗大化に要する条件について整理すると表5-7のようになる。対馬は0℃で推移する水に浸った新雪の平均粒径が130時間で0.3mmから1.1mmへ粗大化することを観測し、粒径(mm)の増加が時間(hour)の1/3乗に比例することを明らかにしている<sup>13)</sup>。さらに、福沢らは、昼間の日射によって暖められた新雪層が1.5℃/cm程度の温度勾配で冷やされた場合、雪粒径が98時間で0.199mmから0.779mmへ粗大化することを明らかにしている<sup>16)</sup>。これらの研究結果をみると、雪粒径の粗大化は、プラス温度となって融雪水が発生する状態、もしくは積雪層に急激な温度勾配がある状態で進行することになる。これら2つの粗大化条件のうち、屋根葺材と屋根雪との界面で発生する雪粒径の粗大化は、図5-11で示した通り、屋根葺材が常に融雪水が発生し得る0.5℃前後の温度を保った状態となっているため、前者の融雪水の影響による粗大化であると考えられる。これらのことから、屋根葺材と屋根雪との界面における温度0℃以上となり、多くの水を含んだ状態になれば、雪質が変態が進行すると考える。時間経過に伴う雪粒径の変化は、屋根葺材と屋根雪との界面が0℃を若干上回る温度となる一般的な建物の場合、3～4日程度で1mm程度、1週間以上となれば2mm程度にまで粗大化すると推察できる。このように雪粒径の粗大化は、屋根葺材の劣化などのように年単位で変化する材料特性と異なり、数日間で急速に進行する。従って、屋根雪の滑落性状を評価する場合は、経時的に変化する雪粒径を考慮した検討が必要と言える。

屋根上に雪が載っている期間、屋根雪と屋根葺材との界面が0℃を若干上回る温度で推移している場合は、摩擦抵抗力が滑落を大きく支配しており、その摩擦に影響を及ぼす界面では雪が経時的に粗大化する。先に示した一般的な戸建住宅では、屋根上に雪が10～15cm堆積した状態における屋根葺材の表面温度は、外気温が-6℃程度（小屋裏温度：2～4℃，居室温度：18℃程度）の場合、0℃を若干上回る温度で推移し、屋根雪と屋根葺材との界面では経時的に雪質が変態して

表5-7 既往の研究にみられる雪質の変態条件

温度条件	水分状態	雪質の変態状況	要した時間
0℃で常に推移	湿潤	新雪（粒径：0.3mm）→ざらめ雪（1.1mm）	130hour
積雪層1cm毎に1.5℃の温度勾配	乾燥	98時間で粒径が0.199mm→0.779mmに粗大化	98hour
屋根面における観察結果			
屋根葺材裏面温度0.5℃で常に推移	湿潤	新雪→ざらめ雪（粒径1～2mm程度）	7日間

ている。但し、外気温は、必ずしも $-6^{\circ}\text{C}$ 以上であるとは限らない。すなわち、雪粒径の変化に関する検討を行う場合には、降雪後の外気温推移を把握しておく必要がある。このことから、降雪があった日から数日後までの外気温推移について分析した。この分析は年間降雪量が多かった1980年11月～1981年4月における札幌と新庄を対象に、気象官署の観測資料を用いた。

1日の降雪深が5 cm以上あった日を基点とした数日後までの日平均気温の推移について整理すると表5-8となる。なお、この表は以下の2条件を基にデータを抽出している。

- (1) 5 cm以上の降雪があった日の後、日最高気温が $2^{\circ}\text{C}$ 未満で推移する7日後までの期間を記載した。
- (2) 数日間連続して降雪があった場合については、札幌の1/25で示したように、降雪当日を含めて3日間の連続降雪までを1事象とし、4日目以降の降雪は次の事象として記載した。

表のように(1)、(2)の条件を満たした降雪日は札幌で12事象、新庄では13事象であった。これらの事象について日平均気温の推移を温度別に分類してみると表中の網掛けのようになる。札幌の場合をみると、降雪当日の日平均気温は、1/21および1/25では $-6^{\circ}\text{C}$ 未満となるものの、他の日については、通常に暖房を行っている建物の場合、ある程度の積雪があれば屋根葺材と屋根雪との界面に融雪水が発生し得る外気温となっている。さらに2日目以降についてみてみると、殆どの日において融雪水が発生し得る温度範囲にあり、1/25の場合は4日目以降にこの状態となる。一方、新庄の場合をみると、降雪当日は何れの日においても平均気温が $-6^{\circ}\text{C}$ 以上となっており、2日目以降で一時的に気温が下がる日も若干存在するが、全体的には継続的に融雪水が発生する外気温推移となっている。

これらの結果をみると、札幌および新庄における暖房している一般の住宅では、小屋裏からの伝熱による融雪水の発生によって、経時的に雪粒径が粗大化するものと考えられる。このように、屋根雪の滑落抵抗力を評価する場合、時間経過に伴う摩擦界面付近の雪物性変化を考慮する必要があると言える。

表5-8 日降雪深が5cm以上あった日を基点とした数日後までの日平均気温の推移

気象官署:札幌	当日		2日目		3日目		4日目		5日目		6日目		7日目	
YEAR/MONTH/DAY	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)
80/12/14	-2.5	13	-0.4	6	-1.7	1	-1.0		-1.6	1	-4.8	7		
80/12/19	-4.8	7	-2.3	33	-2.1	6	-4.1	43	-5.1	1	-3.6			
81/01/02	-2.2	11	-0.3	16	-2.4		-6.7		-6.0	8	-5.7	11	-5.0	23
81/01/06	-6.0	8	-5.7	11	-5.0	23	-2.4	2	-2.1	19	-5.7	15	-7.3	1
81/01/10	-2.1	19	-5.7	15	-7.3		-6.2		-5.2	4	-6.0	2	-5.5	
81/01/21	-7.2	5	-7.3	51	-4.4	17	-2.3		-6.8	19	-7.8	10	-6.6	16
81/01/25	-6.8	19	-7.8	10	-6.6	16	-5.6	19	-5.5	8	-4.6	10	-2.5	7
81/01/28	-5.6	19	-5.5	8	-4.6	10	-2.5	7	-2.0		-3.3		-2.5	
81/01/31	-2.5	7	-2.0		-3.3		-2.5		-0.9	9	-2.2	2	-1.3	
81/02/04	-0.9	9	-2.2	2	-1.3		-1.6		-3.2		-4.3	1	-1.8	
81/02/19	-1.3	18	-3.0	3	-3.5	2	-5.1	3	-5.3	4	-7.5		-7.8	1
81/03/07	-2.4	6	-4.2		-6.0	9	-6.0		-3.5	16				

気象官署:新庄	当日		2日目		3日目		4日目		5日目		6日目		7日目	
YEAR/MONTH/DAY	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)	平均気温(°C)	日降雪深(cm)
80/12/19	-1.7	10	-3.0	4	-2.0	17	-0.1	10						
80/12/27	-0.5	10	-0.7	30	0.2	38	-0.2	6						
81/01/03	1.6	12	-0.1	17	-0.8	22	-2.9	45	-3.4	13	-1.2	3		
81/01/10	-0.9	40	-2.6	22	-3.7	22	-4.8	26	-8.1	15	-5.5	34	-4.8	2
81/01/13	-4.8	26	-8.1	15	-5.5	34	-4.8	2	-3.7	18	-1.0	12	-1.7	20
81/01/16	-4.8	2	-3.7	18	-1.0	12	-1.7	20	-3.1	20	-4.6	24	-4.0	41
81/01/19	-1.7	20	-3.1	20	-4.6	24	-4.0	41	-1.5	11				
81/01/25	-2.3	6	-4.2	14	-4.2	17	-3.1	16	-2.3	13	-1.9	12		
81/02/08	-1.1	20	-1.6	7	0.2	6	-2.3	13	0.5	9				
81/02/19	-0.7	28	-1.6	8	-2.9	4	-3.3	17	-4.8	5	-0.7	3	-1.9	6
81/02/22	-3.3	17	-4.8	5	-0.7	3	-1.9	6	-4.6	5	-5.0	25	-4.5	27
81/02/25	-1.9	6	-4.6	5	-5.0	25	-4.5	27	-3.8	10				
81/03/08	-0.9	6	-1.5		-1.0	9	-2.4	6						

□ : -3°C > 平均気温 ≥ -6°C    ■ : -6°C > 平均気温

#### 5.4.2 小屋裏モデルを用いた場合における屋根雪と屋根葺材との界面における雪質

小屋裏からの伝熱を想定したモデル実験によって、経時的な雪粒径変化を観察した。その結果を図5-12、写真5-4に示す。なお、これらの図・写真はパネルヒーター温度が2.4℃（5.4.1節で示した一般住宅の小屋裏温度を想定した温度）、低温室の温度は、1～2月における札幌の外気温平年値（-4.5℃）に近い-5℃に設定した場合で示してある。このときの屋根葺材裏面温度は0～0.3℃で常に推移しており、5.4.1節に示した戸建住宅の屋根葺材裏面温度（0.5℃）とほぼ同程度となっている。経時的な雪粒子の形状変化をみると、写真・図のように、6時間を経過した時点までは、新雪時と同様な細かい雪粒子であり雪の粗大化は殆ど確認できない。しかし、実験開始から12時間を経過すると、雪粒径は0.3mmを越える程度、24時間経過した時点では0.6mmを越える程度の球状粒子に変化していることが分かる。さらに時間の経過に伴って雪粒子は粗大化が進行し、実験開始から48時間経過した時点では0.9mmを越える粒子がみられるようになり、72時間経過した時点では1.0～2.0mmの粒径にまで成長していることが確認できる。なお、パネルヒーター温度がこれよりも低い1.2℃の場合、雪粒径が1.0mm程度になるまでの経過時間は96時間を要している。

このように、屋根雪と屋根葺材との界面が0℃を上回る温度で推移すると、界面の雪は経時的に変態し、その雪粒子が粗大化する。その場合、屋根の小屋裏温度が+2.4℃の場合、積雪3日目には粒径1mm程度のざらめ雪が屋根面付近に存在することが明らかとなった。

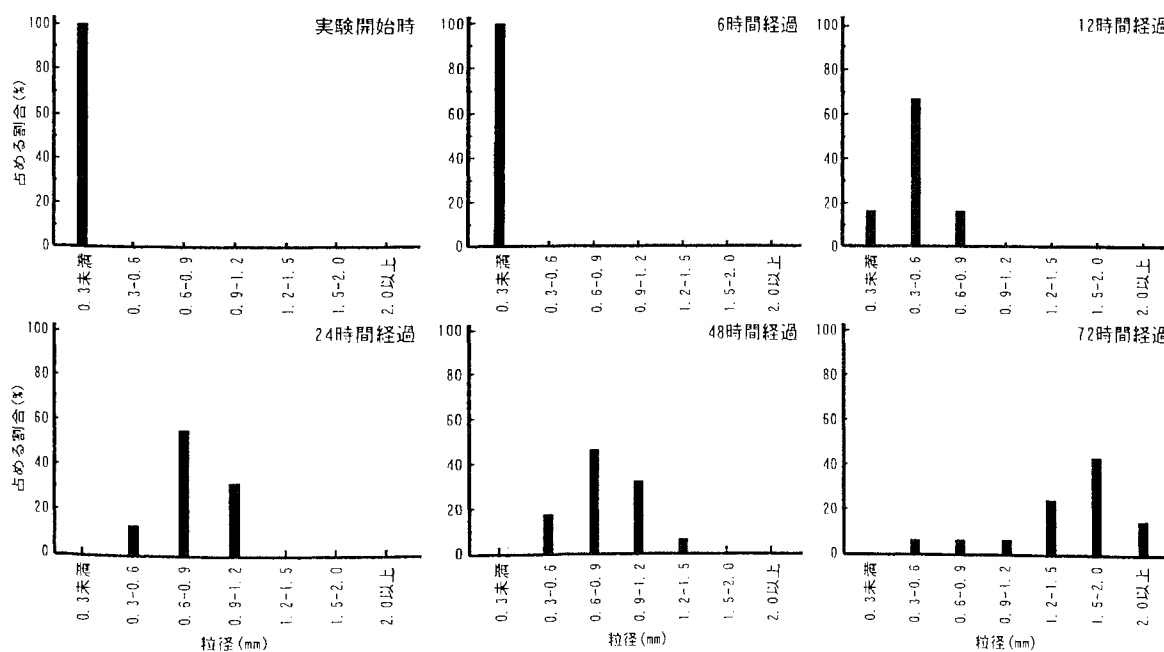
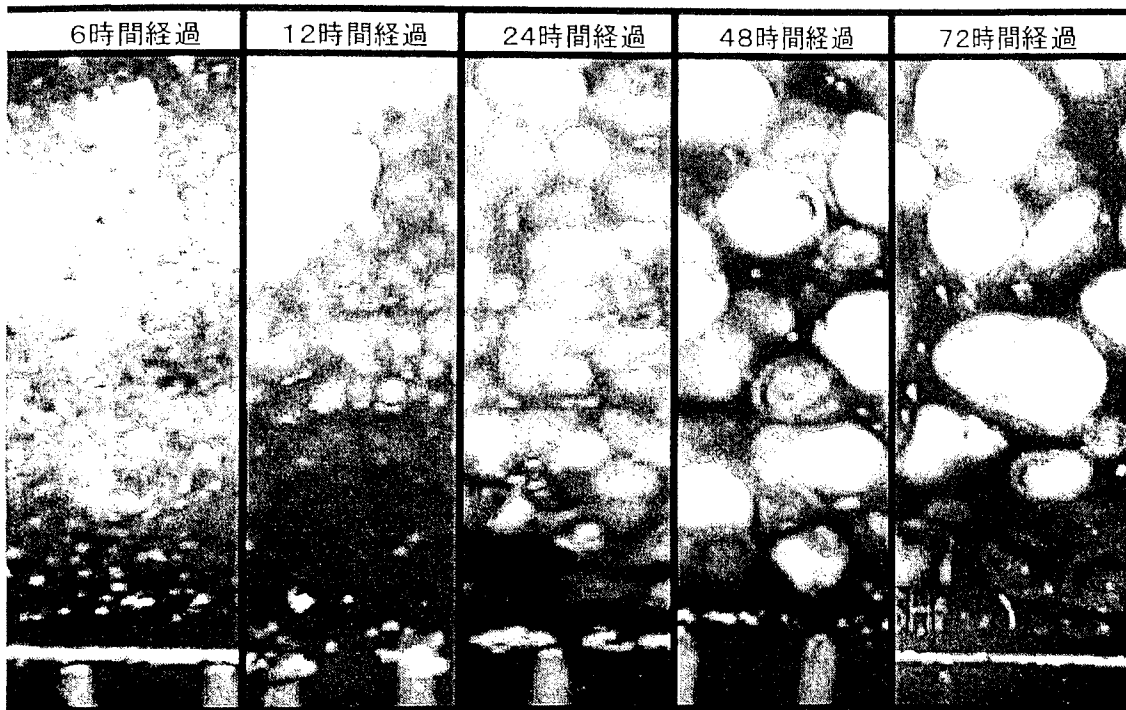


図5-12 時間経過に伴う雪粒径の変化（パネルヒーターの温度2.4℃の場合）



パネルヒーターの温度：2.4℃  
 屋根面温度：0～0.3℃  
 屋根葺材：光沢塗装鋼板

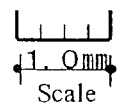


写真5-4 経時的な雪粒径の変化状況

## 5. 5 雪粒径と摩擦抵抗力との関係

5. 4項に示した通り、屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子は、時間の経過に伴って、粒径が大きく変化する。このことから、雪粒径の変化が屋根雪の滑落に及ぼす影響を把握しておく必要がある。本項では降雪直後から数日経過に至るまでの粒径を想定した雪粒径を対象に、摩擦抵抗力を測定した。その結果を示すと以下のようなになる。

### 5.5.1 雪粒径の異なる場合の摩擦抵抗力

屋根雪と屋根葺材との界面における雪粒径が摩擦抵抗力に及ぼす影響を明らかにするため、粒径の異なる自然雪を用いて動摩擦係数を測定した。その結果を示すと次のようなになる。

屋根雪と屋根葺材との界面状態・雪粒径が動摩擦係数に及ぼす影響を図5-13に示す。図のように、界面が乾燥した状態の場合における動摩擦係数は、D-10(低温室の室温： $-10^{\circ}\text{C}$ ，試料表面： $-10^{\circ}\text{C}$ )からD-2( $-2^{\circ}\text{C}$ ， $-2^{\circ}\text{C}$ )へと温度が上昇しても、若干小さくなる程度で顕著な変化はみられない。また、屋根葺材の表面粗さの違いによる動摩擦係数の変化も小さい。これに対し、融雪初期を経て界面が湿潤した状態になると、動摩擦係数は急激な増加傾向を示した後、十分な湿潤状態であるW4( $+4^{\circ}\text{C}$ ， $+0.5^{\circ}\text{C}$ )になると減少する傾向を示す。湿潤状態の動摩擦係数は、屋根葺材の表面粗さ毎に顕著に差がみられ、10点平均粗さRzが $12.0\mu\text{m}$ 以上となる試料CとEは、試料Aのような表面粗さの小さな屋根葺材(Rz： $1.4\mu\text{m}$ )に比べて2～3倍の動摩擦係数を示す傾向がみられた。動摩擦係数の変化を雪質の違いからみると、湿潤した状態における動摩擦係数の最大値は、しまり雪(雪粒径： $100\sim 500\mu\text{m}$ )が最も大きく、次に新雪( $10\sim 100\mu\text{m}$ )，ざらめ雪1( $500\sim 1000\mu\text{m}$ )，ざらめ雪2( $1000\sim 2000\mu\text{m}$ )，氷ブロックの順となる。このように、屋根雪と屋根葺材との動摩擦係数は、屋根葺材の表面粗さのみではなく、界面の湿潤状態および雪質の違いによって大きく増減する。

雪質の影響が顕著にみられた融雪初期の状態W1(低温室の室温： $+2^{\circ}\text{C}$ で1 hour経過)から、界面が湿潤状態であるW2からW4( $+2^{\circ}\text{C}$ で3 hour後 $+4^{\circ}\text{C}$ で1 hour経過)に至るまでの動摩擦係数を雪粒径別にみると図5-14となる。なお、この図は表面粗度の異なる2試料について示してある。図のように、平滑な表面の試料Aおよび粗い表面を持つ試料Eの両試料において、雪粒径が $100\sim 500\mu\text{m}$ の場合に動摩擦係数が最も大きくなり、その粒径以上になると減少する傾向を示す。界面状態別にみると、W1からW3へと界面が湿潤化するに伴って雪粒径が動摩擦係数へ

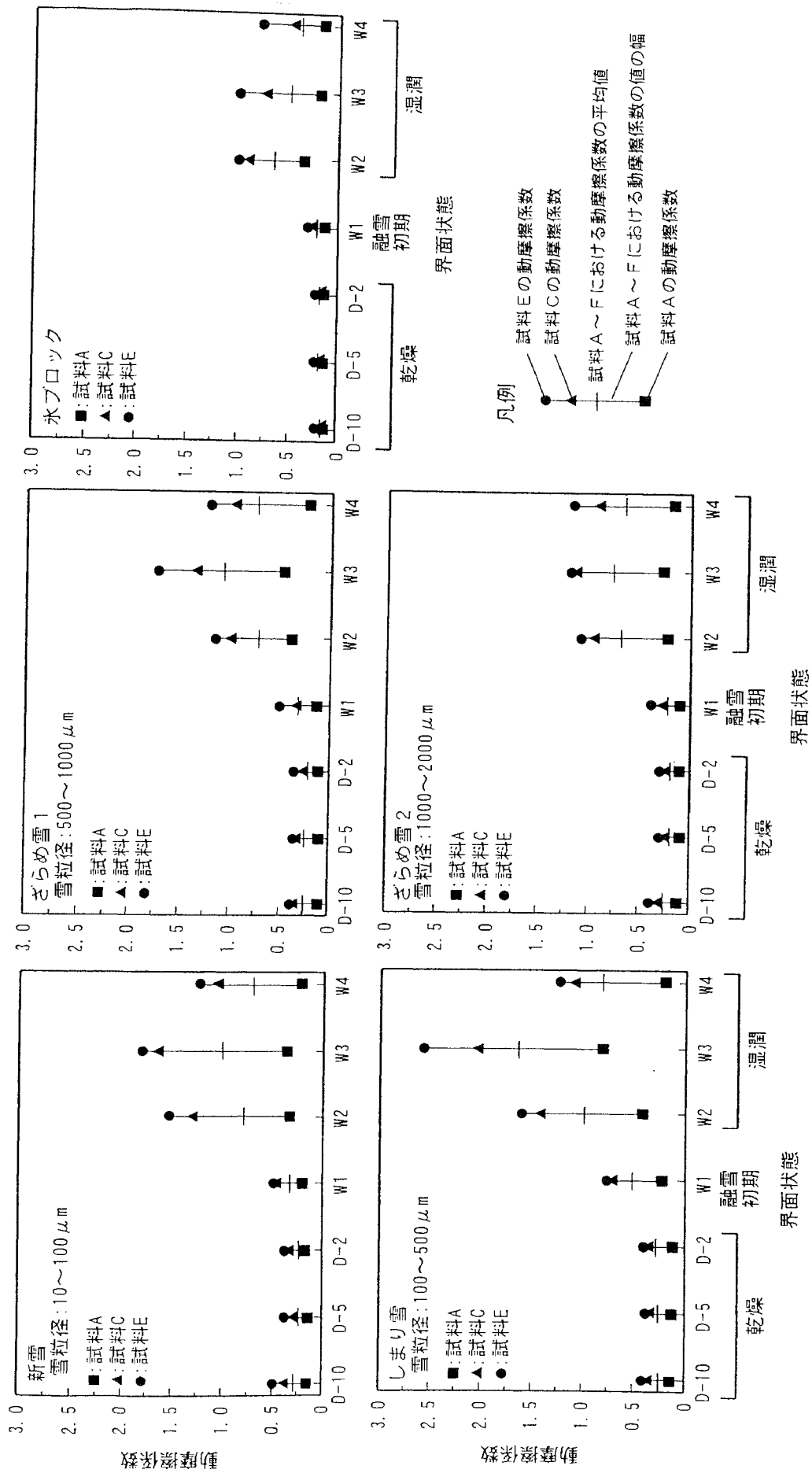


図5-13 屋根雪と屋根葺材との界面状態および雪粒径が動摩擦係数に及ぼす影響



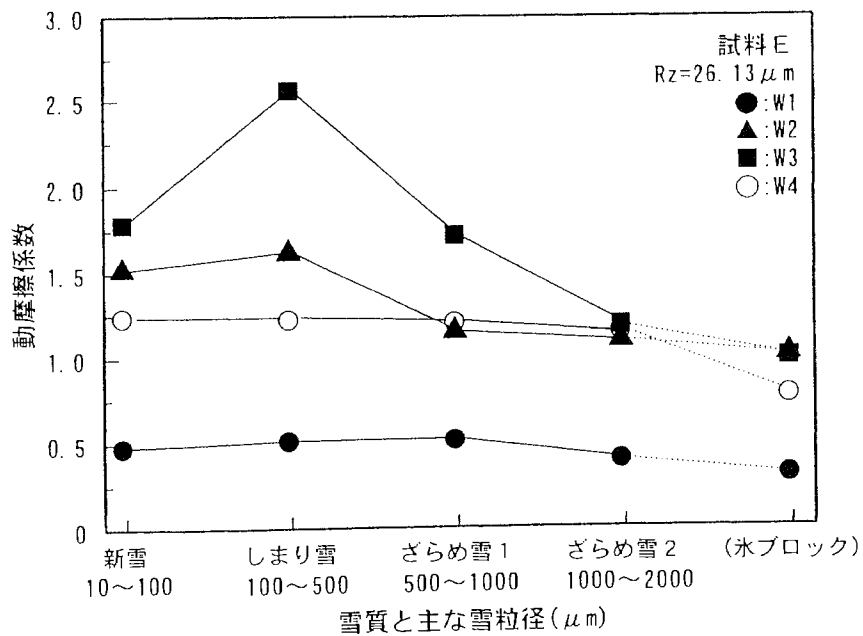
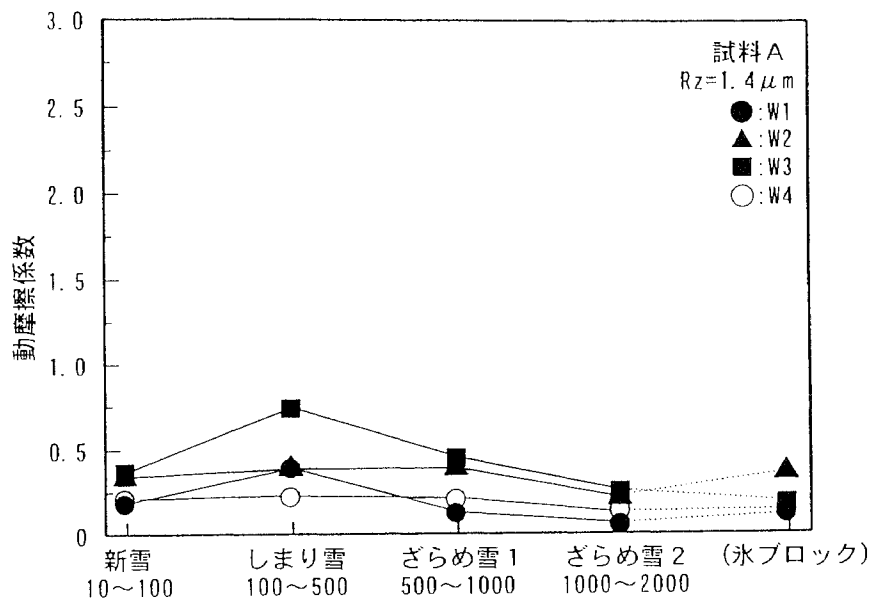


図5-14 雪粒径と動摩擦係数との関係

及ぼす影響が顕著になり、それ以上の湿潤状態であるW4になると雪粒径による違いが小さくなる。この傾向は、しまり雪からざらめ雪2への粒径変化において顕著であった。

試料に用いた屋根葺材の表面粗さ $R_z$ と動摩擦係数との関係を、最も大きな動摩擦係数を示した雪質であるしまり雪についてみると、図5-15になる。なお、この図は動摩擦係数が急激な増加傾向を示したW1からW3の状態について示してある。図のように、融雪初期の状態であるW1では $R_z$ が $12\mu\text{m}$ の試料Cにおいて最も大きな動摩擦係数を示すものの、屋根葺材の表面粗さが摩擦係数に及ぼす影響が小さい。その後W2の状態になると、 $R_z$ が $15\sim 23\mu\text{m}$ で動摩擦係数が最大となる傾向を示す。さらに、融雪が進んだ界面状態W3では、表面粗さ $R_z$ が $23\mu\text{m}$ の試料Eにおいて最も大きな動摩擦係数となる。このように、滑落界面の湿潤化が進行するに伴って、表面粗さが動摩擦係数へ及ぼす影響が明瞭にみられるようになると同時に、動摩擦係数が最大となる表面粗さが大きくなる傾向がみられた。

屋根雪の滑落性能を評価する手法として、氷ブロックを用いて動摩擦係数を測定することは、ブロックとする試料の作製が比較的簡便であり、その物性が安定していること、さらには自然積雪のように採取期間に左右されないことなどの利点がある。このような氷ブロックを用いた動摩擦係数の測定は、既往の研究でも広く行われている<sup>6) 7) 8)</sup>。ここで、屋根雪と屋根葺材との界面が湿潤化してゆく過程における氷ブロックと各雪質との動摩擦係数の違いを整理すると図5-16になる。なお、図中の縦軸に示す動摩擦係数比は、氷ブロックを基準とした場合の各雪質の場合の比である。図のように、試料表面が平滑な場合におけるW3の状態をみると、しまり雪で氷ブロックの5.0倍程度を示し、ざらめ雪2では1.5倍程度となる。このように、動摩擦係数は、雪粒子の粗大化に伴って氷ブロックで得られる値に近づく傾向を示す。試料表面の粗度が大きい場合についてみると、その動摩擦係数は小さくなるものの、平滑な試料と同様の傾向となる。ここで、融雪初期の状態であるW1では、試料表面の粗度に関わらず、しまり雪の動摩擦係数が氷ブロックに比べて大きくなる傾向がみられる。この要因としては、しまり雪は比較的小さな雪粒子が密に配置されているため、他の雪質に比べて融雪水の毛管現象が発生しやすく、界面が水分で満たされにくいことが考えられる。また、含水しているしまり雪の下面では、雪粒子間あるいは、屋根葺材と雪粒子間の付着力が大きくなることも動摩擦係数が大きくなる要因と考える。以上のように、氷ブロックから得られる動摩擦係数と経時的に変化する雪質の動摩擦係数とを比較すると、しまり雪のように雪粒子が小さく密に配置された雪質や融雪初期の状態における動摩擦係数は、粒子を持たない氷ブロックの場合と比べて大きな値とな

る。すなわち、氷ブロックの摩擦係数を用いて屋根雪の滑落を検討した場合、実際の滑落よりも過大評価する可能性がある。このことを、勾配屋根における雪の滑落を考慮した積雪荷重評価に当てはめると、実際の積雪荷重よりも小さな荷重値と誤認し得る。すなわち、氷ブロックで得られる摩擦係数は、積雪荷重の評価に用いられる分に限っては、用いるべきでないと考える。勾配屋根における雪の滑落を考慮した積雪荷重評価においては、少なくとも雪粒子を持った雪氷体で摩擦係数を測定する必要がある。

これら雪粒径の異なる場合における摩擦抵抗力の測定結果を整理すると、次のことが言える。屋根雪の雪質は、屋根雪の滑落抵抗力の一つである摩擦抵抗力の増減を大きく支配している。このことから、勾配屋根における積雪荷重の評価を行う場合には、屋根雪の雪質が滑落に及ぼす影響を十分に考慮する必要があると考える。

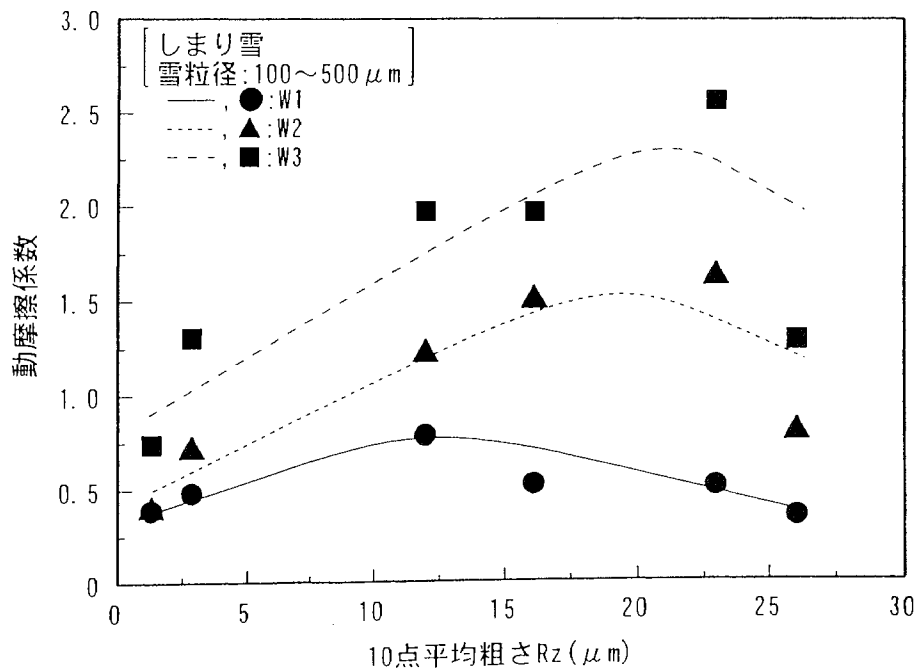


図5-15 屋根葺材の表面粗さRzと動摩擦係数との関係

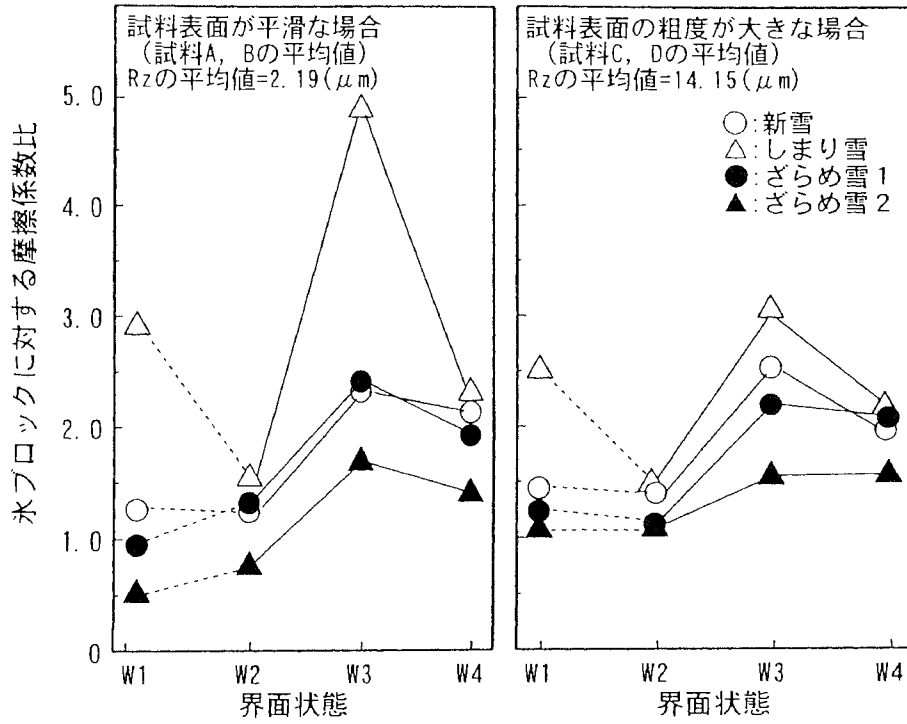


図5-16 雪ブロックとそれぞれの雪質との動摩擦係数の違い

## 5.5.2 雪粒径が経時的に変化する過程の摩擦抵抗力

5.4.2節に示した小屋裏モデルを用いた雪質の観察では、雪粒径が経時的に粗大化することを明らかにした。この観察過程において行った動摩擦係数の測定結果についてみると、次のようになる。小屋裏モデルにおける経時的な動摩擦係数の変化をパネルヒーター温度 $2.4^{\circ}\text{C}$ の場合で示すと、図5-17になる。図のように、各屋根葺材と雪ブロックとの動摩擦係数は6時間経過の時に最も大きな値となり、それ以後は、何れの屋根葺材においても経時的に減少する傾向がみられる。動摩擦係数の減少割合は、24時間経過頃までが大きく、それ以後の時間経過では小さくなる。なお、48時間経過までに動摩擦係数は、測定開始時（6時間経過時点）の約 $1/3$ まで減少する。ここで、5.4.2節に示した雪粒径の経時的な変化をみると、6時間を経過した時点までは、新雪時と同様な細かい雪粒子であり、雪の粗大化は殆ど確認できない。一方、24時間経過した時点では、 $0.6\text{mm}$ を越える程度、48時間経過した時点では $0.9\text{mm}$ を越える程度にまで雪粒子が粗大化し、粒子周辺に水分が介在している（写真5-4参照）。このことから、経時的な動摩擦係数の減少には、雪粒径の経時的な粗大化および界面の水分状況が影響を及ぼしていると考えられる。

次に、塗装ステンレス鋼板および艶消塗装鋼板における経時的な動摩擦係数の変化をパネルヒーターの温度別に整理すると、図5-18になる。なお、図中に示す各プロット値は、パネルヒーターの温度が $1.2^{\circ}\text{C}$ と $1.5^{\circ}\text{C}$ の場合における動摩擦係数の平均値、 $1.9^{\circ}\text{C}$ と $2.4^{\circ}\text{C}$ の平均値、 $3.3^{\circ}\text{C}$ の場合の測定値の3ランクで示してある。図のように、屋根葺材の違い毎に動摩擦係数の経時的な変化をみると、6時間を経過した時点では、屋根葺材による動摩擦係数の違いは殆どみられない。一方、48時間を経過した以降では、屋根葺材の表面粗さが大きくなると、動摩擦係数が大きくなる傾向がみられる。この経過時間における動摩擦係数は、表面が平滑 ( $Rz:3.80\mu\text{m}$ ) な塗装ステンレス鋼板で0.20程度、表面が粗い ( $Rz:23.00\mu\text{m}$ ) 艶消塗装鋼板で0.45程度となる。このように、屋根葺材の表面粗さが及ぼす摩擦抵抗力への影響は、界面の雪粒径が $0.9\text{mm}$ 以上となった場合に顕著にみられる。ここで、同図中に示した温度ランクの違いが動摩擦係数に及ぼす影響についてみると、次のようになる。図のように、 $3.3^{\circ}\text{C}$ 場合における動摩擦係数が全体的に小さな値で推移するものの、経時的な動摩擦係数の減少割合は、何れの温度ランクにおいても大きな違いがみられない。なお、 $3.3^{\circ}\text{C}$ の場合における雪ブロックは、他の場合に比べて急激に融雪が進行し、48時間経過後に動摩擦係数が測定不可能となっている。このように $3.3^{\circ}\text{C}$ は、他の場合に比べて融雪水が多量に発生していたにも関わらず、経時的な動摩擦係数の減少割合が大きくなる背景に

は、雪粒径の影響が考えられる。融雪が急速に進行しても、雪粒径が粗大化しない場合は、発生した水分が雪に毛管現象によって吸い上げられるため、屋根葺材と屋根雪との界面に水膜が形成されにくい。このことが摩擦抵抗力の増減に影響を及ぼすため、図中に示した各温度ランクにおける動摩擦抵抗力の減少割合には、大きな違いがみられないと考える。

これらのことから、経時的な動摩擦係数の減少傾向には、雪粒径の経時的な粗大化が影響を及ぼしている。屋根葺材の表面粗さが及ぼす摩擦抵抗力への影響は、界面の雪粒径が約1 mm以上となった場合に顕著にみられる。しかし、雪粒径の粗大化は、必ずしも温度が高い場合に急激に進行するのではないため、高い屋根面温度を維持することが必ずしも粗大化の促進に有効でないと考える。具体的には、安定した水分を供給する屋根面温度を維持することが雪粒径の粗大化に重要な項目になると言える。

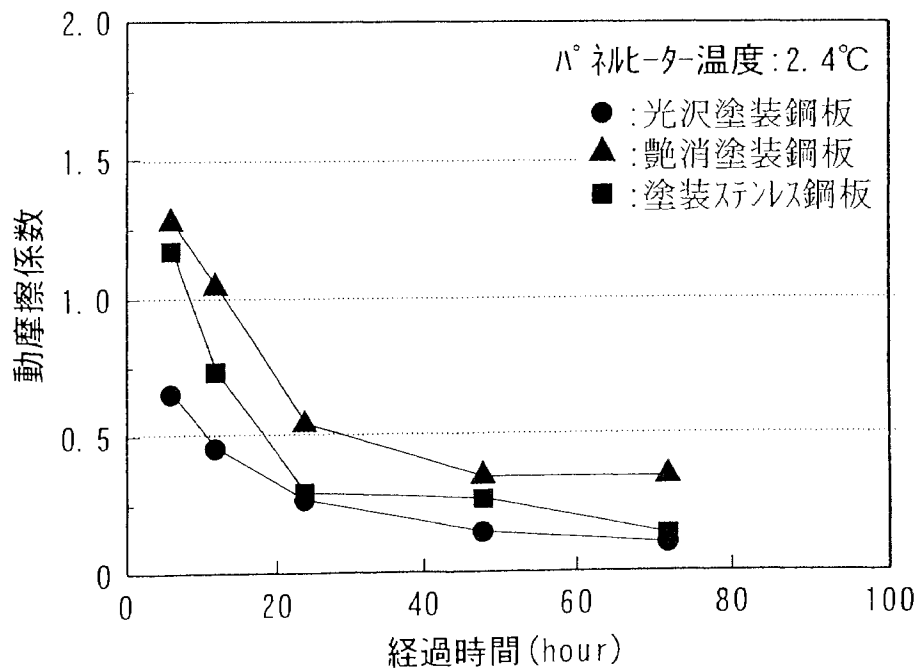


図5-17 動摩擦係数の経時変化

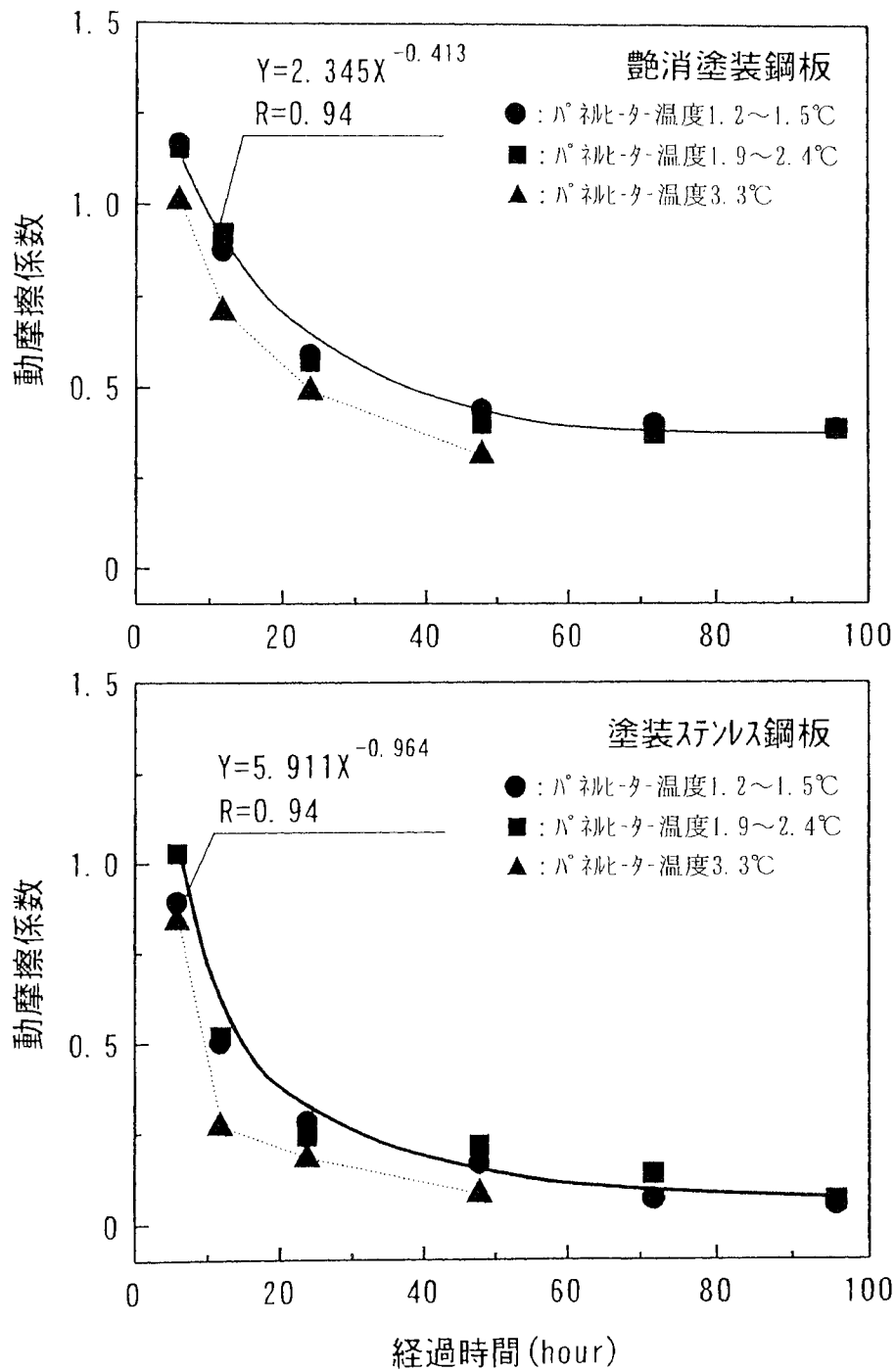


図5-18 表面粗さの違いおよび温度ランク別に見た動摩擦係数の変化

## 5. 6 雪質が摩擦抵抗力に及ぼす影響に関する考察

5. 5項では、雪粒径の異なる雪氷体の摩擦抵抗力、雪粒径が経時的に変化する過程の摩擦抵抗力について実験を行った。これら実験結果をみると、屋根雪と屋根葺材との界面では、経時的に雪質が変化し、雪粒径が大きくなっている。さらに、時間の経過に伴って界面は湿潤化している。このような2つの要因が関与する経時的な雪質変化の過程では、摩擦抵抗力が減少することが明らかとなった。このようなことから、本項では、屋根雪と屋根葺材との界面における雪粒径・湿潤状態が摩擦抵抗力に及ぼす影響について、モデル雪を用いた実験を行った。モデル雪は、雪粒子が粗大化してゆく過程を想定し、粒径の異なるガラスビーズを用いた。界面の湿潤化は蒸留水をビーズに混入させて再現した。このモデル実験の結果から、雪粒径・界面の湿潤化が摩擦抵抗力に及ぼす影響について考察する。

ガラスビーズと試料に用いた屋根葺材との動摩擦係数を示すと、図5-19になる。なお、この図は使用した粒径の異なるガラスビーズ3種類および試料3種類の表面粗さの大きさごとに配置してある。図のように、全体的な傾向をみると動摩擦係数は蒸留水を混入して含水率が増加するに伴って増加する傾向を示し、最大値となる。さらに含水率が増加すると、動摩擦係数は減少する傾向を示した。増加あるいは減少傾向を示したときのガラスビーズと蒸留水の様子を観察すると、前者は蒸留水が混入することで粒子同士が粘着しており、後者はガラスビーズと試料との界面に余剰水が発生している状況であった。試料とした屋根葺材別に動摩擦係数をみると、試料の表面粗度が大きくなるに伴って、動摩擦係数の最大値が大きくなる傾向を示した。さらに、ガラスビーズの粒径別に動摩擦係数をみると、ビーズの粒径が小さいほど動摩擦係数が最大値となる際の含水率が大きくなる傾向がみられた。動摩擦係数の最大値と試料の表面粗さ(10点平均粗さ $R_z$ )との関係を示すと図5-20になる。なお、この図はガラスビーズの粒径の異なる2ケースについて示してある。図のように、この2ケースを比較してみると、小さい粒径のガラスビーズでは、試料とした屋根葺材の表面粗さの違いによって摩擦抵抗力に顕著な差がみられると同時に、動摩擦係数が最大値となった際の含水率が高い。一方、大きい粒径のガラスビーズでは屋根葺材の表面粗さが増加しても摩擦抵抗力の違いが少ない。さらに、動摩擦係数が最大となった際の含水率は、小さい粒径のガラスビーズに比べて低い傾向を示す。このように蒸留水を混入したガラスビーズと屋根葺材との動摩擦係数は、両者の接触状態によって顕著な差を示す。これら図5-19, 20の傾向は、新雪の場合の結果を除く、自然雪を用いた動摩擦係数の測定結果(図5-13参照)でもほぼ同一になることを示した。すなわち、界面



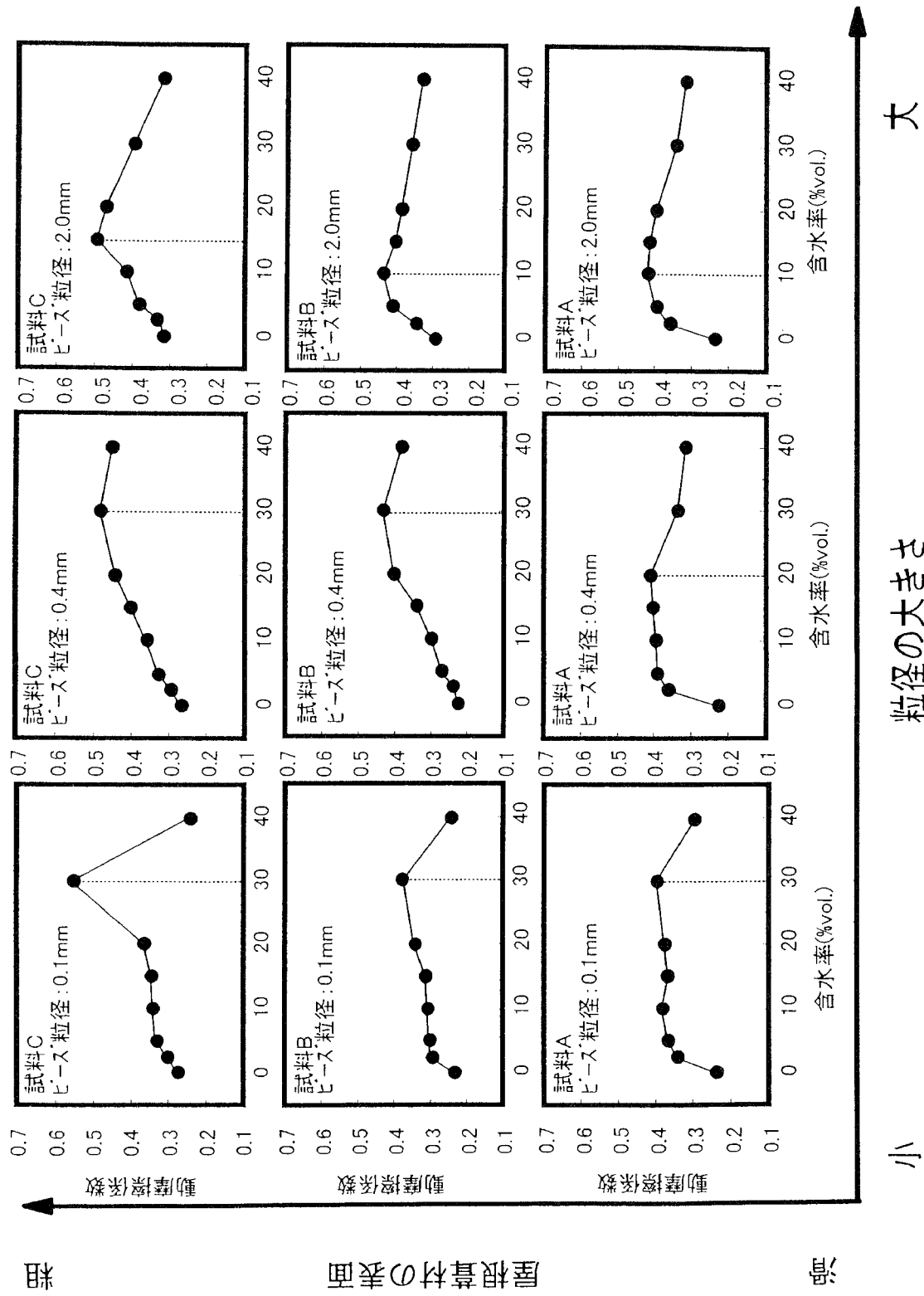


図5-19 ガラスビーズと試料に用いた屋根葺材との動摩擦係数

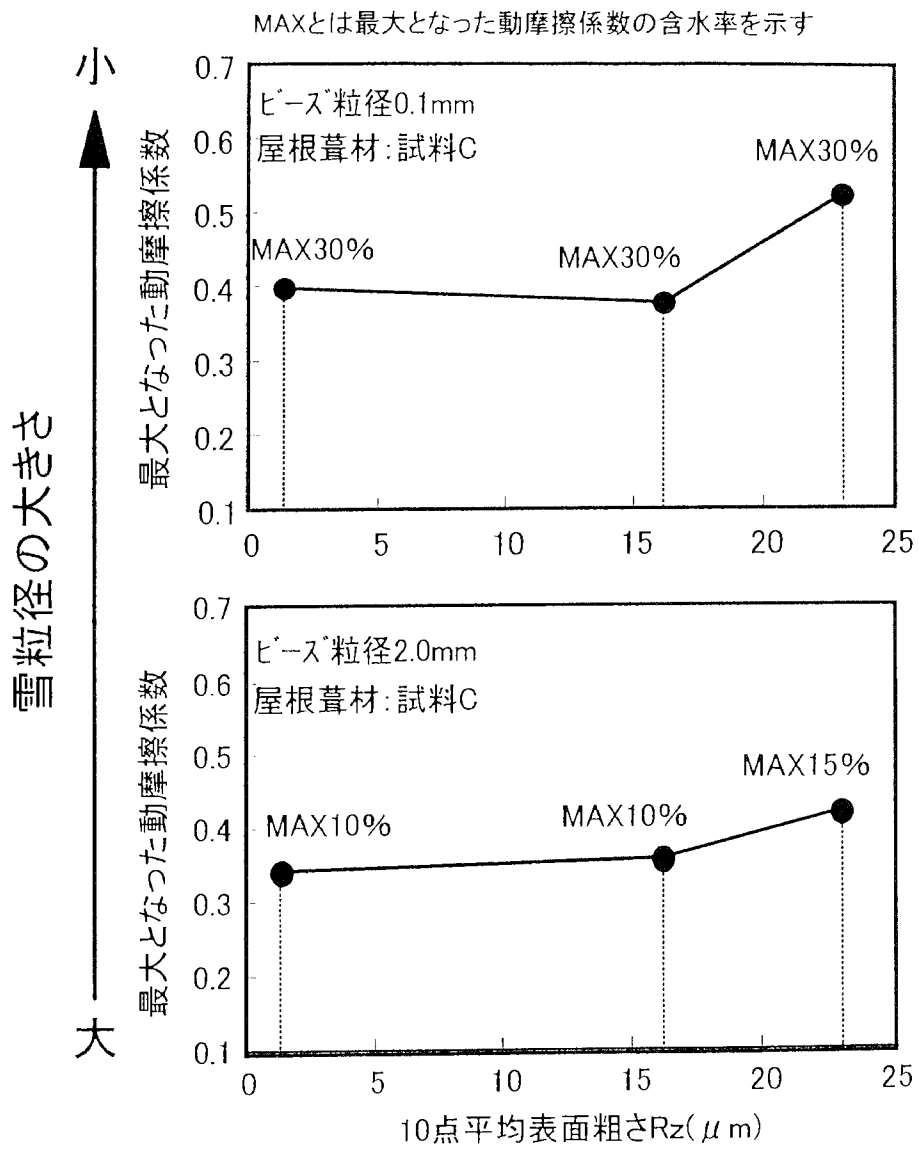


図5-20 動摩擦係数の最大値と試料表面粗さとの関係

における雪粒径および水分量の変化は、摩擦抵抗力の増減を大きく支配していると言える。なお、自然雪の場合において、雪粒子が最も小さな新雪で動摩擦係数が最大とならない要因は、新雪の場合、しまり雪よりも雪粒子が粗に配置され、毛管現象がしまり雪よりも発生しにくいことが挙げられる。

ここで、動摩擦係数の増減に影響を及ぼした蒸留水に着目し、蒸留水よりも粘度が低いヘキサン<sup>17)</sup> (蒸留水  $891 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$  に対してヘキサン  $299 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) を用いて液体の粘度 (毛管現象を支配) が動摩擦抵抗力に及ぼす影響について検討を行った。なお、実験方法は蒸留水を用いた場合と同様である。ヘキサンを混入させた場合のガラスビーズと屋根葺材との動摩擦係数について試料Cを例として示すと図5-21になる。なお、この図は、液体の粘度による違いがわかるように蒸留水を用いた場合についても併せて示してある。図のように、粘度の低いヘキサンは、蒸留水での実験でみられたような動摩擦係数の増減関係が確認できない。なお、屋根葺材とガラスビーズとの界面を観察すると、ヘキサンの含有率が2.5 (% vol.)の時点で既に界面が湿潤化していることが確認できた。このことは、ガラスビーズと屋根葺材との摩擦現象に水が持つ表面張力が大きく関与していることを示唆している。

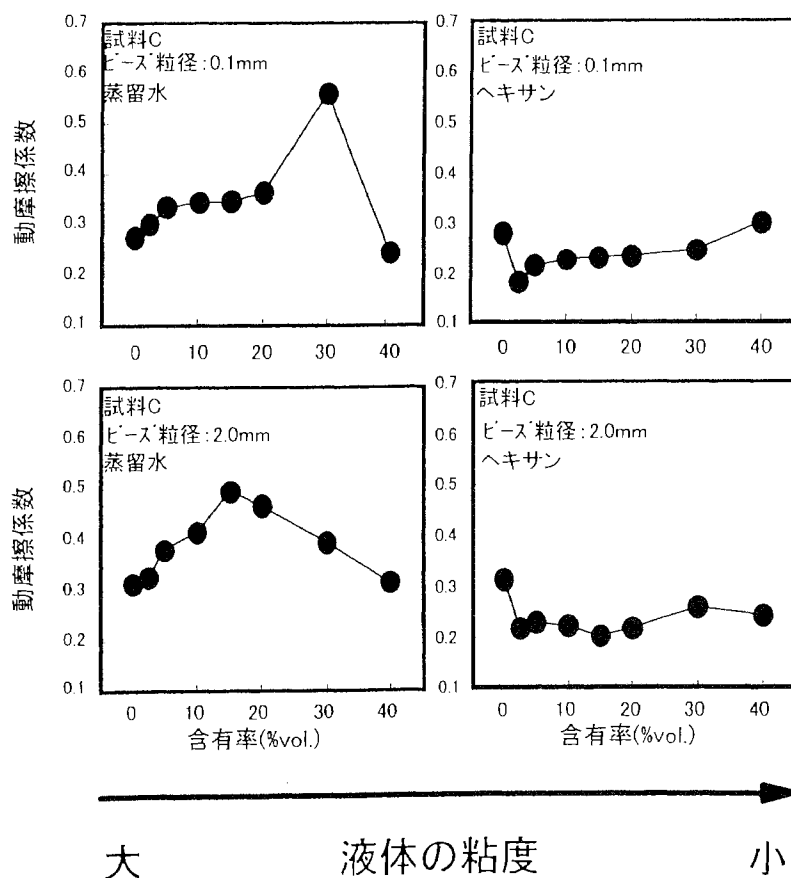


図5-21 動摩擦係数へ及ぼす液体粘度の影響

以上の結果から、ガラスビーズと屋根葺材との摩擦抵抗には、屋根葺材の表面粗さが影響を及ぼしているのと同時に、ガラスビーズに混入する水量およびその粘度が影響を及ぼしていることが明らかとなった。さらに、屋根葺材と屋根雪との界面における水分の介在状況は、ガラスビーズの粒径によって異なることも明らかとなった。このモデル実験の結果から、摩擦抵抗力の増減に影響を及ぼす雪質について考察を行う。

屋根雪と屋根葺材との界面における摩擦現象には、雪粒子と屋根葺材との直接接触による境界摩擦、融雪水が屋根葺材と屋根雪との界面に介在することで生ずる潤滑摩擦の2つの摩擦現象が関与している。ここで、本研究で行ったモデル実験の結果から、この摩擦現象を説明すると次のようになる。本研究で行ったモデル実験の結果を模式的に示すと図5-22となる。なお、図示した摩擦抵抗力の増減状況については、図5-13で示した自然雪を用いた既往の研究結果においても確認されている。図のように、乾燥状態の摩擦抵抗力は境界摩擦による抵抗力  $a$  のみが作用する。摩擦界面が湿潤した状態になると、雪粒子間あるいは雪粒子と屋根葺材との接触摩擦部の空隙内に融雪水が介在することによって、その水の粘着抵抗力  $b$  が付加作用する。その空隙部全てが水で飽和した状態（雪の飽和含水量）

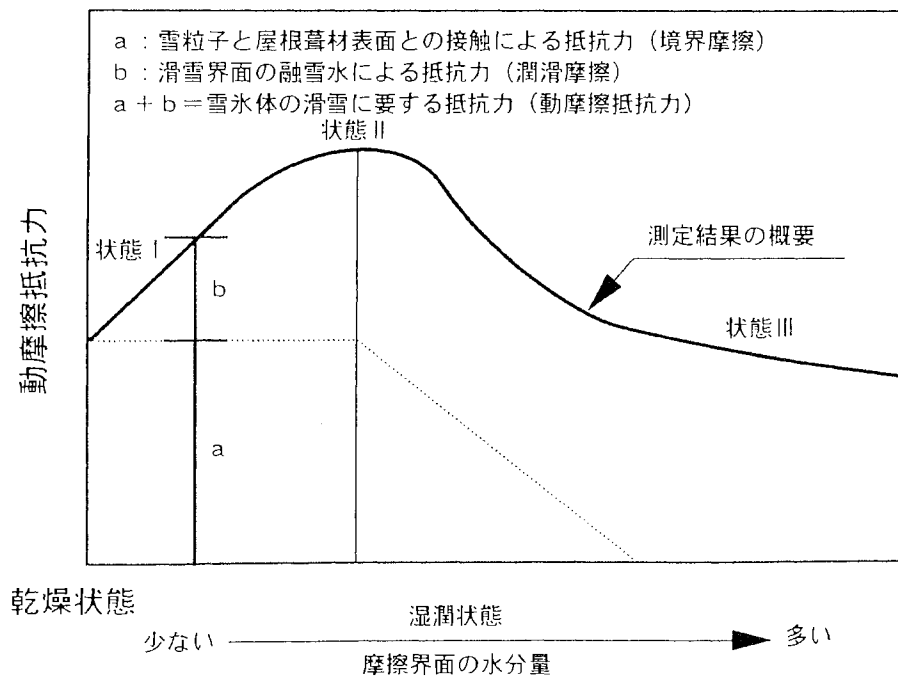
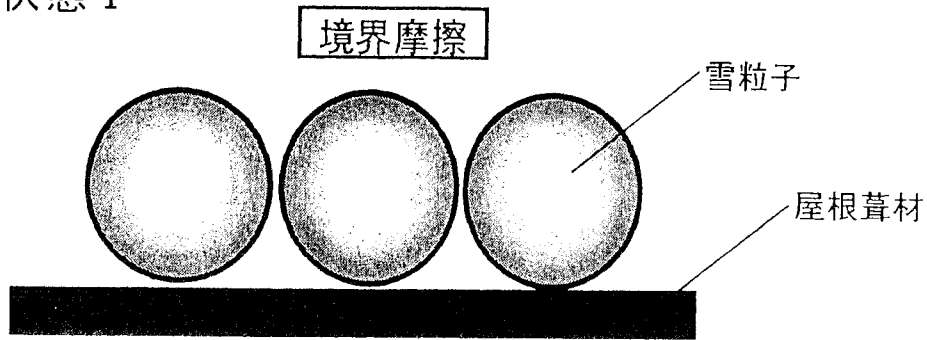


図5-22 摩擦界面の変化に伴う動摩擦抵抗力の変化

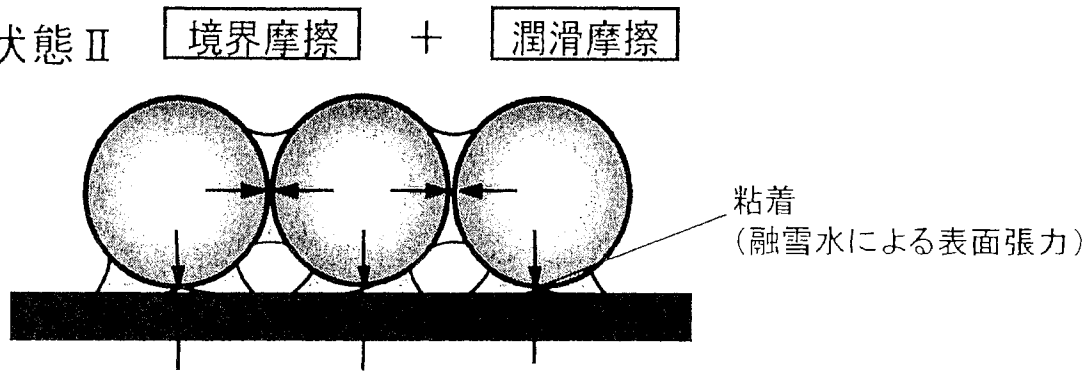
になるときに最大の摩擦抵抗力となり、それ以上の融雪水が発生すると、水分は雪粒子と屋根葺材との直接接触による境界摩擦を減少させる。雪粒子と屋根葺材との直接接触部がなくなると、融雪水が摩擦界面付近を満たす状態となり、その水量増加に伴って界面の水膜が厚くなり、摩擦抵抗力はさらに減少する。

以上のような摩擦特性を拡大モデルを用いて説明すると、図5-23のようになる。屋根葺材と屋根雪との界面では、湿潤化することによって雪粒子間あるいは雪粒子と屋根葺材との粘着抵抗力（水の表面張力による毛管負圧）が増加する。すなわち融雪初期から摩擦界面が湿潤化するまでの状態では、「状態Ⅱ（図5-22参照）」で示したように、雪が徐々に融雪することで摩擦界面における雪の含水量が上昇し、粘着抵抗力が増加するために動摩擦係数が増加すると考えられる。また、摩擦界面が湿潤した状態では「状態Ⅲ」で示したように、雪の飽和含水量を越える融雪水が発生するために、水分は水膜の形成を促進し、雪粒子と屋根葺材との直接接触の面積（境界摩擦）を減少させる。そのため、雪粒径の変化による動摩擦係数への影響が少なくなると考える。図5-19で示した雪粒径が大きい場合、動摩擦係数の増減が小さいことの要因には、雪粒径が大きい場合、粒子間の毛管現象が発生し難いため、雪の飽和含水量が小さくなり摩擦界面が融雪水で満たされやすく、水膜が形成されやすいことが挙げられる。さらに、粒径が大きい場合において湿潤化に伴う雪粒子間の粘着抵抗力が小さくなることも、この要因と考えられる。図5-20でみられた湿潤の程度に応じて動摩擦係数が最大となる屋根葺材の表面粗さが異なることの要因は、境界摩擦の抵抗力となる材料表面の凹凸部の雪が融雪水で飽和するとき摩擦抵抗力が最大となることが考えられる。すなわち、平滑な屋根葺材では水膜が形成される状態となるのに必要な水量が少なく、粗い材料では水量が多く必要となる。これらのことから、経時的に雪粒子が粗大化する現象および摩擦界面が十分に湿潤することは、動摩擦抵抗力を減少させる効果を持っていると言える。

状態Ⅰ



状態Ⅱ



状態Ⅲ

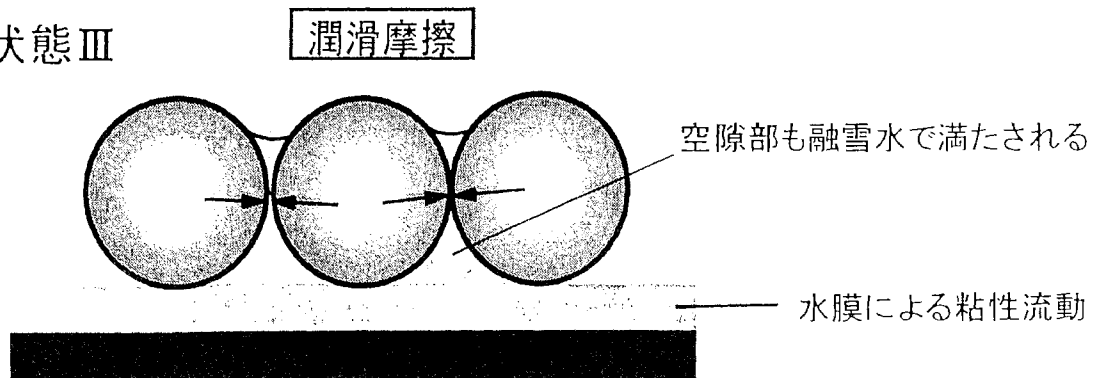


図5-23 摩擦界面の拡大モデル図

## 5. 7 まとめ

---

屋根上に降り積もった雪が滑落するまでの時間的な状況をみると、滑落は、降雪の直後に発生することが稀で、数時間～数日間にわたって屋根上に堆積した後、発生する。この堆積期間中において、屋根面に接する雪は、外気温の変動や小屋裏からの伝熱によって生ずる融雪によって、雪質が新雪からしまり雪、ざらめ雪等へと変態する。このように、屋根面に接する雪質は屋根上に堆積している数日間において不変ではない。従って、滑落抵抗力を評価する場合、雪質に関わる要因を無視できない。このようなことから本章では、屋根雪の雪質変化が摩擦抵抗力に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 多雪地域における1～2月の平均的な外気温条件下において、一般的な戸建住宅の温度推移を想定したモデル実験を行った。その結果、屋根葺材と屋根雪との界面では、経時的に雪質が変化することが明らかとなった。雪質を示す一指標である雪粒径を測定したところ、その粒径は、72時間で0.3mm以下から1～2mmにまで粗大化することが明らかとなった。
- 2) 屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒径は、経時的に粗大化することから、雪粒径と屋根雪の滑落との関係について検討を行った。滑落抵抗力の指標は、プラス温度での滑落を支配する摩擦抵抗力とした。検討の結果、屋根葺材と屋根雪との界面が湿潤してゆく過程において、雪粒径は摩擦抵抗力の増減に影響を及ぼしていることが明らかとなった。摩擦抵抗力に及ぼす雪粒径の影響は、粒径0.3～0.5mmのしまり雪で最も顕著となり、摩擦抵抗力が最も大きい。一方、粒径1.0～2.0mmのざらめ雪における摩擦抵抗力は、しまり雪の場合に比べて1/2～1/3程度となる。このように、雪粒径の違いによって、摩擦抵抗力は大きく変化することが明らかとなった。
- 3) ざらめ雪の摩擦抵抗力がしまり雪に比べて小さな値となる要因を明らかにするため、粒径の異なるガラスビーズをモデル雪として屋根葺材との摩擦抵抗力を測定した。この測定結果から、雪粒径が摩擦抵抗力に及ぼす影響について考察すると、次のことが言える。ざらめ雪の場合、雪粒径が大きいことから、屋根葺材と屋根雪との界面に水分が発生しても毛管現象が発生し難い。そのため、雪の内部に毛管現象で吸い上げる水分量が小さくなり、界面が融雪水で満たされやすい。また、粒径が大きい場合では、湿潤化に伴う雪粒子間の粘着抵抗力が小さくなる。

さらに、粒径が大きい場合は、雪粒子と屋根葺材との直接接触の面積が小さくなる。これらの影響によって、ざらめ雪の摩擦抵抗力は、しまり雪に比べて小さな値になると考える。

以上のことから、勾配屋根における雪の滑落を評価しようとする場合、屋根雪と屋根葺材との界面における雪質について十分に考慮する必要があると言える。



## 第5章 参考文献

---

- 1) 豊田裕道：園芸施設の積雪荷重見直しと新構造ハウスの傾向，第12回農業施設研究会，pp. 25-40, 1997. 7
- 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，第41巻3号，pp. 199-204, 1978. 12
- 3) 清原潔：住宅屋上積雪の建築計画的取り扱い方法に関する研究，北海道寒地建築研究所研究報告，No. 5, 1960. 2
- 4) 木村幸一郎：屋根上積雪の自然落下について，日本雪氷学会誌，第5巻7号，pp. 6-9, 1943. 7
- 5) 前田博司，他3名：平板上の自然積雪の滑落性状について，第11回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 35-38, 1994. 11
- 6) 渡辺正朋，平井和喜：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との静摩擦，日本雪工学会誌，第3号，pp. 1-11, 1987. 6
- 7) 渡辺正朋，平井和喜：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
- 8) 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
- 9) 渡辺正朋：屋根葺材と雪氷との凍着強さに関する研究，第9回日本雪工学会大会論文報告集，pp. 127-130, 1993. 1
- 10) 苔米地司，伊東敏幸：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，第56巻3号，pp. 215-222, 1994. 9
- 11) 清水増治郎，木村忠志：氷点下における雪の屋根材への付着，日本雪氷学会誌，第54巻3号，pp. 269-275, 1992. 9
- 12) 札幌管区气象台：地域気象観測所の雪の統計，解説資料第18号，pp. 47, 1991. 3
- 13) 対馬勝年：水に浸った雪の粗大化，日本雪氷学会誌，第40巻4号，pp. 1-11, 1978. 12
- 14) 前野紀一，黒田登志雄：雪氷の構造と物性，基礎雪氷学講座I，古今書院，pp. 132-142, 1986. 7
- 15) 竹中隆一，他3名：積雪寒冷地域における膜ドームの膜上積雪処理に関する研究その2，自然落雪と温風融雪の効果に関する解析，第9回寒地技術シンポジウム講演論文集，pp. 7-12, 1993. 12
- 16) 福沢卓也，秋田谷英治：しもざらめ雪層の急速形成過程の観測，低温科学，物理編，第50輯，1991. 11
- 17) 日本機化学会編：流体の熱物性値集，pp. 22-23, 1983. 8

## 第 6 章 勾配屋根における屋根雪の滑落と積雪荷重評価

	pp.
6.1 はじめに -----	6- 1
6.2 屋根雪の滑落を支配する抵抗力と日数との関わり -----	6- 3
6.2.1 屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の前提条件 -----	6- 3
6.2.2 屋根雪の滑落に要する日数と凍着抵抗力との関わり -----	6- 5
6.2.3 屋根雪の滑落に要する日数と摩擦抵抗力との関わり -----	6- 6
6.3 研究の方法 -----	6- 8
6.3.1 凍着抵抗力の作用日数の算出方法-----	6-10
6.3.2 屋根雪と屋根葺材との摩擦抵抗力に影響を及ぼす 界面の雪粒径に関する実験および観察方法	6- 9
6.4 研究結果 -----	6-11
6.4.1 地点別にみた凍着抵抗力の作用日数 -----	6-11
6.4.2 雪粒径の粗大化状況 -----	6-17
6.4.3 凍着抵抗力・摩擦抵抗力からみた滑落に要する日数 -----	6-19
6.5 勾配屋根における滑落を考慮した積雪荷重評価 -----	6-22
6.6 まとめ -----	6-28
参考文献 -----	6-30

## 第6章 勾配屋根における屋根雪の滑落と積雪荷重評価

### 6.1 はじめに

多雪地域に建設される建物は、降積雪現象がもたらす問題を除外して計画することができない。特に大規模構造物の積雪荷重は大きな外力となり、構造上の制約を受ける場合が多い。そのため、既存建物のいくつかでは、この荷重を屋根雪の滑落によって積極的に制御する試みが行われている<sup>1)・2)</sup>。このような考え方を取り入れる場合は、屋根雪が滑落するのに要する期間の捉え方が重要となる。積雪荷重の評価について、1993年に改定された日本建築学会建築物荷重指針・同解説（以下、荷重指針）では、実験や調査に基づいた検討によって十分に信頼性のある屋根雪処理が可能な場合、降雪から処理に至る期間内の積雪量を用いて積雪荷重を求めることが可能となっている<sup>3)</sup>。すなわち、滑落の発生する勾配屋根では、降雪から滑落に要する期間を明らかにする必要がある。

ここで、現行の積雪荷重の評価概要を、荷重指針と建築基準法とで対比して示すと図6-1になる。図のように、屋根雪の滑落は、建築基準法施行令第86条第4項にみられる通り、屋根勾配に依存することが一般的に知られている。屋根勾配は、既往の屋根上積雪観測例<sup>4)・5)</sup>と比較しても、滑落の発生による積雪荷重の増減を簡便に評価できる有効な指標と考える。しかし、この考え方は、屋根雪の滑落に関連する時刻歴が不明瞭になりやすい一面を持ち合わせており、先に示した荷重指針の要求する条件を満たすことが難しい。ここで、先に示した第3～5章では、屋根雪の滑落を支配する諸抵抗力について検討を行い、凍着抵抗力や摩擦抵抗力、積雪の破壊抵抗力が滑落に大きな影響を及ぼすことを指摘した。これらの抵抗力は、屋根葺材の種類等、建物固有の特性に影響を受ける一方、外気温や雪質等の気象・物性的な要因にも影響を受ける。従って、降雪から滑落の発生に要する期間を予測しようとする場合は、屋根勾配の変化のみでなく、滑落を妨げる個々の抵抗力の特性を用いて滑落条件を定義する必要がある。

このようなことから本章では、屋根雪の滑落に影響を及ぼす諸抵抗力について検討を行った第3～5章に引き続き、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価手法を提案することを目的とする。始めに、滑落を抑制する抵抗力の増減特性およびその抵抗力の日数との関わりを整理した。整理して得られた結果に基づき、凍着抵抗力に影響を及ぼす外気温特性について統計処理を行った。さらに、摩擦抵抗力に影響を及ぼす雪質の経時変化に関して実験・観測を行った。

これらのことから、勾配屋根における積雪荷重の評価に必要な「屋根雪の滑落までに必要な日数」の算出法について検討を行った。

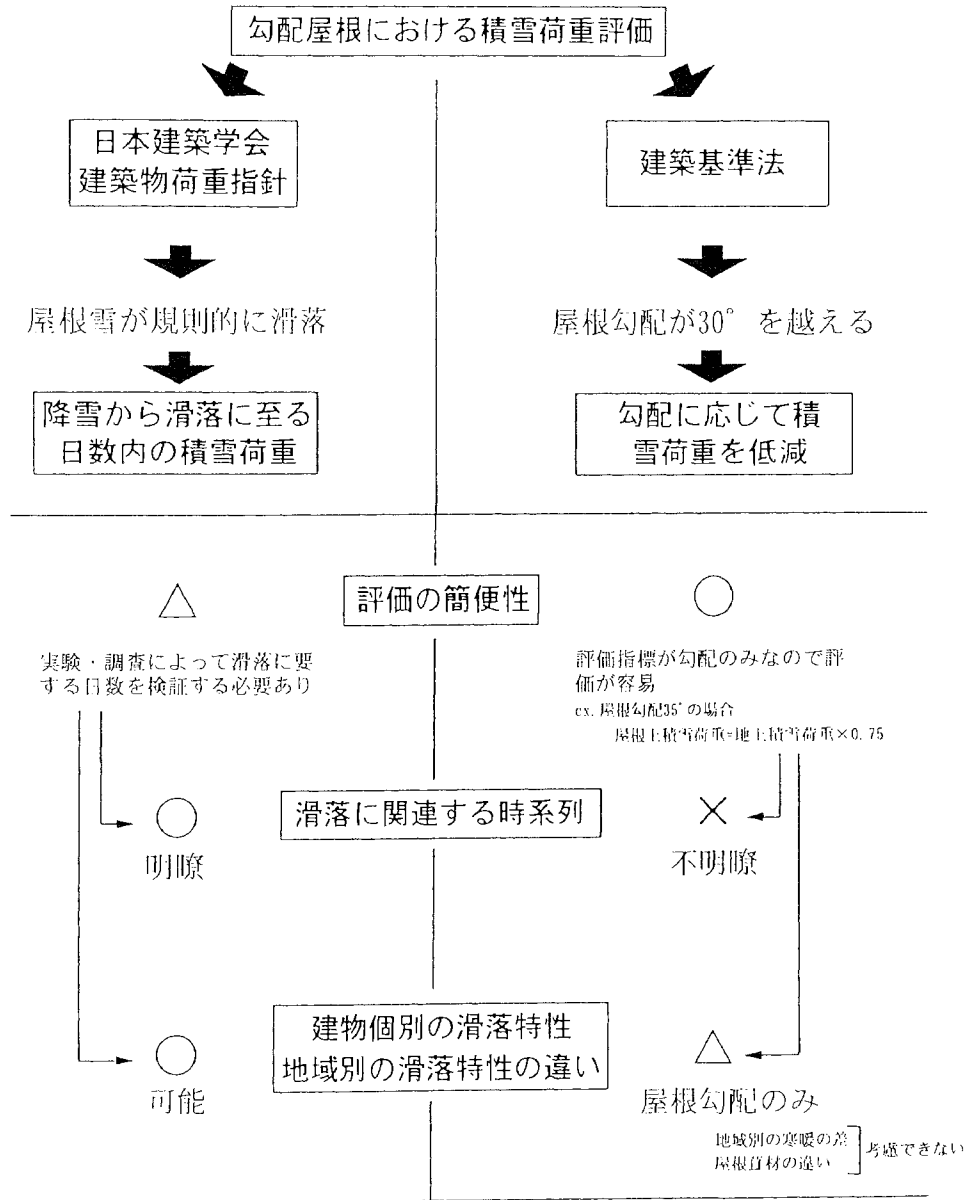


図6-1 日本建築学会建築物荷重指針・建築基準法における積雪荷重の評価概要

## 6. 2 屋根雪の滑落を支配する抵抗力と日数との関わり

---

屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を行う場合、滑落するまでの屋根上積雪状況を予測することが極めて重要となる。この予測を行うためには、屋根雪が滑落する条件を明らかにしておく必要がある。このことから、前章までに示した結果に基づいて、滑落を支配する抵抗力の特性を整理すると、以下のようになる。

### 6.2.1 屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の前提条件

屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を考える場合、屋根上に堆積した積雪全体が一定の条件で規則的に滑落する必要がある。屋根面の一部で残雪すると、屋根上積雪深が不均一になり、屋根上積雪深を予測することが困難となる。屋根上積雪深が不均一となる場合は、例え滑落が発生したとしても、陸屋根のように滑落が発生しない屋根と同等の積雪荷重評価を行わざるを得ない。ここで、第3章に示した通り、実際の屋根面における雪の滑落形態を観察したところ、屋根上の雪は、全体に移動して滑落することが稀で、屋根面の一部に残雪する部分滑落の場合が多い。図6-2に示すように、部分滑落の特性について検討を行ったところ、この滑落の要因には、積雪の引張・せん断抵抗力が大きく関与しており、この2つの抵抗力が複合して発生する部分滑落（③：放物線状に発生する部分滑落）の場合が最も多く残雪する。放物線状に発生する部分滑落は、屋根勾配が小さくなるに伴って残雪量が多くなる特性があるため、積雪荷重を評価する場合、部分滑落が発生しないようにする必要がある。部分滑落を防止する対策には、屋根の棟部に雪切り板を設置する（第3章、写真3-3参照）、屋根面の温度分布を均一（第3章、写真3-5参照）にすること等が考えられる。これらのことから、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価では、上述のような部分滑落が発生しないよう検証することが評価の前提条件になる。

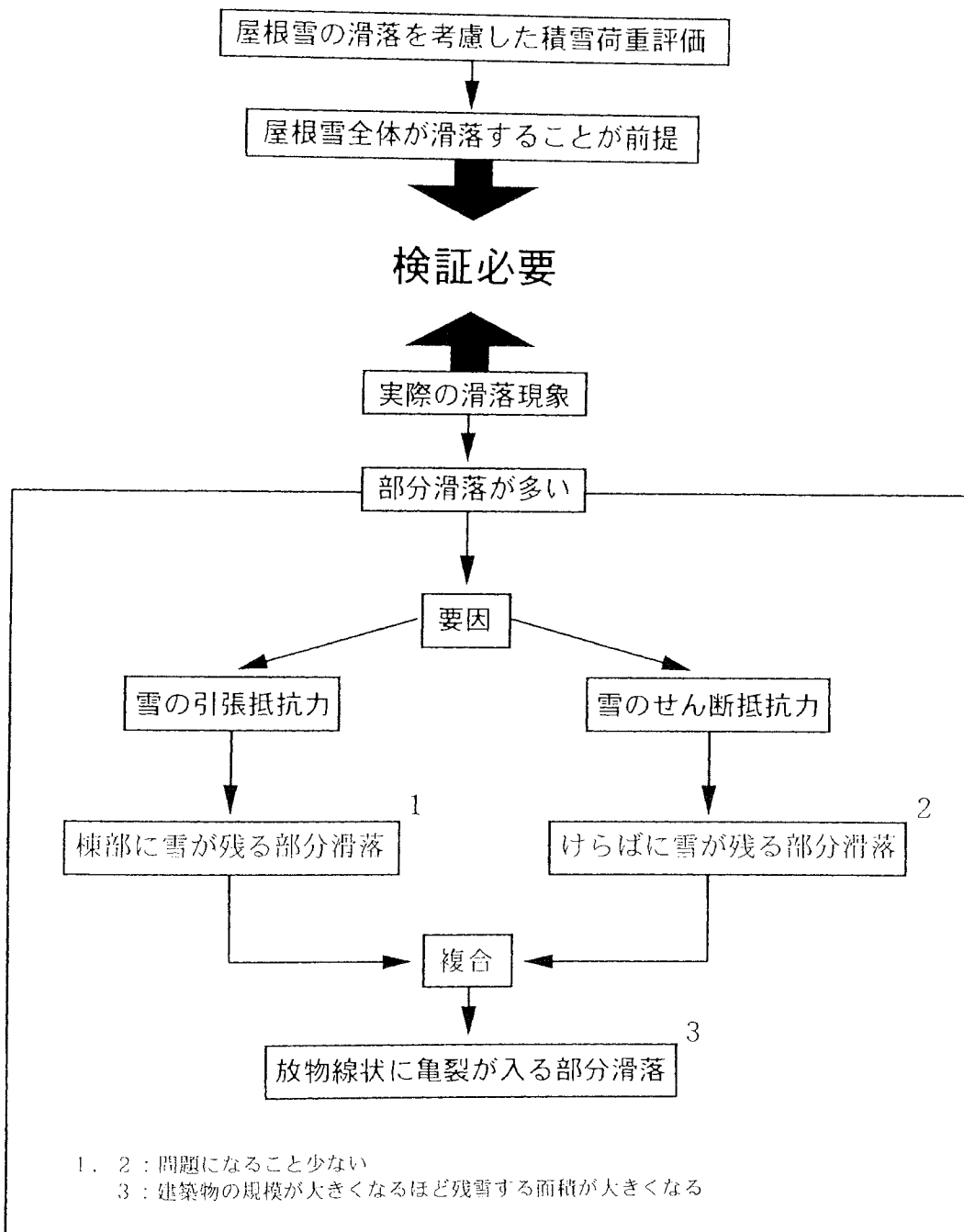


図6-2 勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価の前提条件

## 6.2.2 屋根雪の滑落に要する日数と凍着抵抗力との関わり

屋根雪の滑落を支配する抵抗力は、連続的な屋根雪の破断を阻止する破断抵抗力と、屋根雪と屋根葺材との間に発生する界面抵抗力の2つに大別できる。そのうち、前者に示した破断抵抗力は、屋根雪が全面滑落する条件では作用しない。そのため、6.2.1節に示した前提条件を満たす建物では、後者の界面抵抗力が滑落を支配する抵抗力となる。ここで、界面抵抗力には、凍着抵抗力および摩擦抵抗力がある。これら2つの抵抗力のうち、凍着抵抗力の増減特性を屋根雪の滑落に要する日数との関わりで整理すると以下のようなになる。

凍着抵抗力に影響する屋根葺材および屋根雪の諸要因について整理すると、図6-3になる。図のように、多雪地域の屋根葺材として広く普及している塗装鋼板の凍着抵抗力は、 $-10^{\circ}\text{C}$ の温度条件で $2\text{kN/m}^2$ 程度が下限値となる。このような凍着抵抗力が作用したとしても、屋根雪の滑落は期待できない。一方、この抵抗力は $-2^{\circ}\text{C}$ 以上の温度になると急減し、 $0^{\circ}\text{C}$ を越えると殆ど作用しなくなる。このように、凍着抵抗力の増減には顕著な温度依存性があり、水の融点に近づくに伴って減少する。従って、屋根雪が滑落するまでに要する日数を評価する場合、凍着抵抗力が継続的に作用する日数、すなわち外気温がマイナス温度で推移する日数について検討を行っておく必要がある。

ここで、凍着抵抗力の増減には、外気温が影響を及ぼす一方で、屋根葺材の表

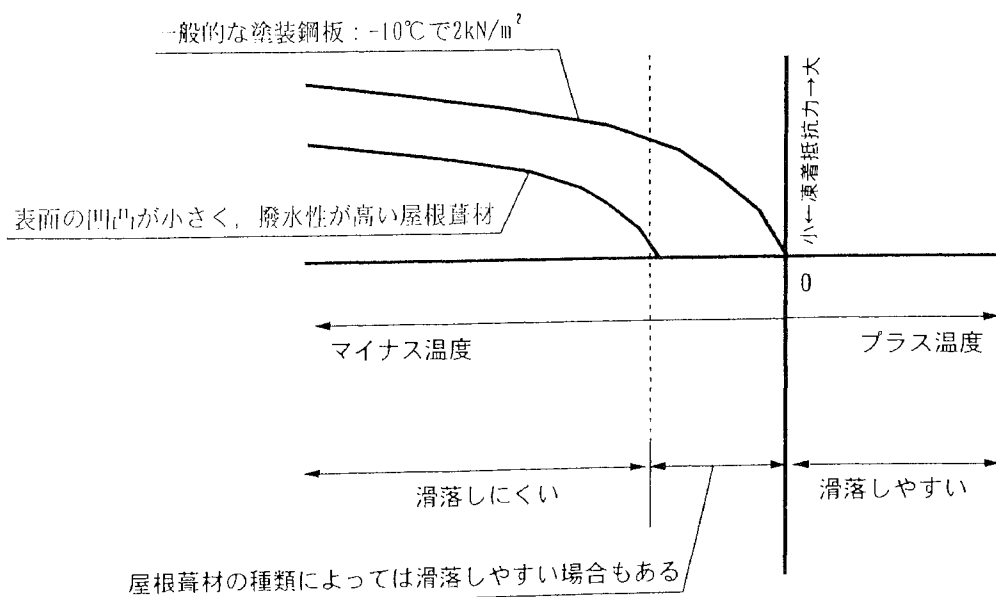


図6-3 滑落に要する日数と凍着抵抗力との関わり

面性状も大きく関与している。凍着抵抗力に関わる屋根葺材の表面性状には、表面粗さおよび撥水性が挙げられる。第4章で示した通り、表面凹凸の高さ( $R_z$ )が小さいと同時に、その凹凸間隔( $S_m$ )が広く、水との接触角( $\theta_c$ )が高い屋根葺材では、凍着抵抗力が先に示した塗装鋼板よりも小さくなる。このような場合、マイナス温度でも凍着抵抗力が作用しないことがあり得る。マイナス温度においても、凍着抵抗力が作用しない屋根葺材の場合、その材料の特殊性が検証できれば、 $0^\circ\text{C}$ 以外の外気温が凍着抵抗力の作用するか否かの境界となる。例えば、 $-2^\circ\text{C}$ で凍着抵抗力が作用しないことを検証すれば、外気温が $-2^\circ\text{C}$ 以下で推移する日数を、凍着抵抗力が継続的に作用する日数とすることが可能と考える。

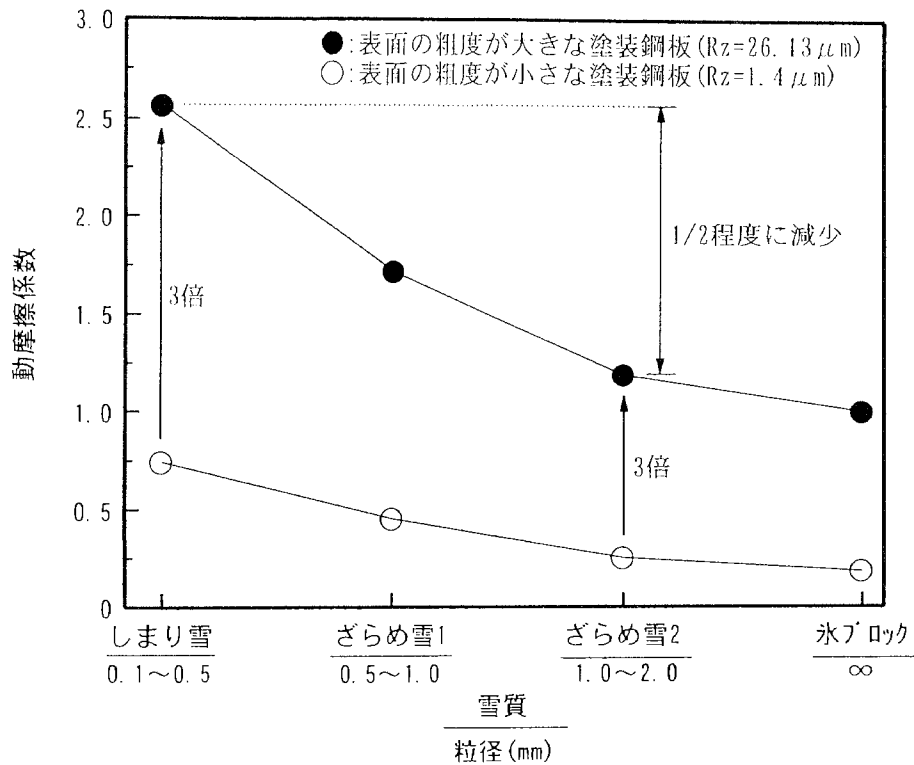
### 6.2.3 屋根雪の滑落に要する日数と摩擦抵抗力との関わり

摩擦抵抗力の特性について整理すると、第4章に示した通り、この抵抗力は、屋根葺材の表面性状の影響を受ける。屋根葺材の表面性状のうち、表面凹凸の高さ(10点平均粗さ $R_z$ )が大きくなると、摩擦抵抗力は顕著に増加する特性がある。一方、雪質の違いによっても摩擦抵抗力は、大きく変化する。雪質が摩擦抵抗力に及ぼす影響について、先に示した第5章の結果を整理すると、図6-4になる。図のように、屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子が細かい場合は(粒径： $0.1\sim 0.5\text{mm}$ )、屋根葺材と雪との界面で発生した水分が雪に吸い上げられる現象(毛管現象)が発生するため、摩擦抵抗力が極めて大きくなる。この場合の動摩擦係数は平滑な塗装鋼板( $R_z=1.4\mu\text{m}$ )で0.45、粗面の場合( $R_z=23.16\mu\text{m}$ )で2.5程度となり、平・粗の材料間で5.5倍におよぶ摩擦係数の差異が生ずる。一方、雪粒子が粗大化( $1\sim 2\text{mm}$ )した場合の摩擦係数は、水分の影響を受けにくく、平滑な塗装鋼板の場合0.2、粗面の塗装鋼板では0.4前後となって、細かな雪粒子の場合に比べて全体的に $1/2\sim 1/6$ 程度の値となる。また、平・粗の材料間における摩擦係数の差異は2倍程度となる。このように、摩擦抵抗力は、雪粒径が大きくなるに伴って減少し、滑落しやすくなる。一般の戸建住宅をを想定したモデル実験(小屋裏温度 $2.4^\circ\text{C}$ 、屋根葺材裏面温度 $0\sim 0.3^\circ\text{C}$ )における雪粒径を測定したところ、雪粒径は、72時間経過した時点で $0.3\text{mm}$ 以下から $1.0\sim 2.0\text{mm}$ にまで粗大化することが明らかとなった。このように、屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒径は、経時的に粗大化することから、屋根雪の滑落に要する日数を取り扱う場合には、無視できない要因であると考ええる。

6.2.1～6.2.3節に示した滑落抵抗力を支配する抵抗力の特徴をみると、屋根上に堆積した雪全体が滑落する建物の場合、凍着抵抗力および摩擦抵抗力の増減か



ら、滑落に要する日数を算出できると考える。この算出指標には、温度依存性がある凍着抵抗力の場合、外気温の推移、雪質に依存する摩擦抵抗力の場合、屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒径の粗大化日数を用いる必要があると考える。



注) 本図で示す各雪の含水状態は、毛管現象が発生するような状態(W3)で示してある。(第5章)

図6-4 雪粒径が摩擦抵抗力に及ぼす影響

## 6. 3 研究の方法

6. 2項で示した滑落を支配する抵抗力の特性をみると、凍着抵抗力の増減は外気温の推移に依存する。一方、摩擦抵抗力の増減は、雪粒径の変化に依存している。これらの結果をみると、凍着・摩擦抵抗力各自の依存指標を適切に組み合わせることで、屋根雪が滑落するのに要する日数を算出できると考える。このことから、本項では、凍着・摩擦抵抗力の特性を考慮して、滑落に要する日数を算出した。その方法について述べると以下のようなになる。

### 6.3.1 凍着抵抗力の作用日数の算出方法

屋根雪の滑落には、凍着抵抗力が及ぼす影響が大きい。図6-3で整理した通り、 $-10^{\circ}\text{C}$ では、凍着抵抗力の影響によって滑落が発生しにくい。凍着抵抗力の増減には、温度依存性があり、水の融点に近づくに伴って減少する。従って、滑落現象の発生に要する日数を評価する場合、外気温が融点以下で推移する日数、すなわち、凍着抵抗力が継続的に作用する日数が重要な指標の一つになる。このことから、外気温が融点以下で推移する日数を気象資料から算出した。

凍着抵抗力は、水の融点温度がこの抵抗力の作用するか否かの境目になる。第5章図5-3で示した温度と凍着抵抗力との関係を示した式をみても、 $0^{\circ}\text{C}$ 付近がこの抵抗力が作用するか否かの境目となっている。このことから、本研究では、図6-5のように、 $0^{\circ}\text{C}$ を上回る温度になれば凍着抵抗力が作用しなくなると考えて、日最高気温が $0^{\circ}\text{C}$ 以下で推移する期間を凍着抵抗力の作用日数と定義した。なお、屋根葺材の表面性状によっては、マイナス温度でも凍着抵抗力が作用しない場合もあり得る。このことから、外気温が $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$ 以下で推移する期間も併せて算出した。

ここで、凍着抵抗力の作用日数は、積雪荷重の評価に大きく関わる事象となる。本来であれば設計する建物の耐用年数以上の外気温データが確保されている状況で、そのデータを統計処理することが望ましい。しかし、統一的な方法で観測された気象資料で入手可能なものは、一般的な建物の耐用年数よりも観測期間が短いことから、本研究では全国の気象官署における33年間(1962~1994年)の気象観測値が収録されているSDPデータ<sup>9)</sup>(Surface Daily Processing data)を用いた。SDPデータの外気温観測値によって得られる凍着抵抗力の作用日数の各年極値から再現期待値を算出した。再現期待値の算出は、Gumbel確率紙上に33年分の各年極値をプロットし、そのプロット値を直線回帰して算出した。再現期間値は、荷重指針で終局限界状態設計用に使用される再現期間100年に対する値とした。な

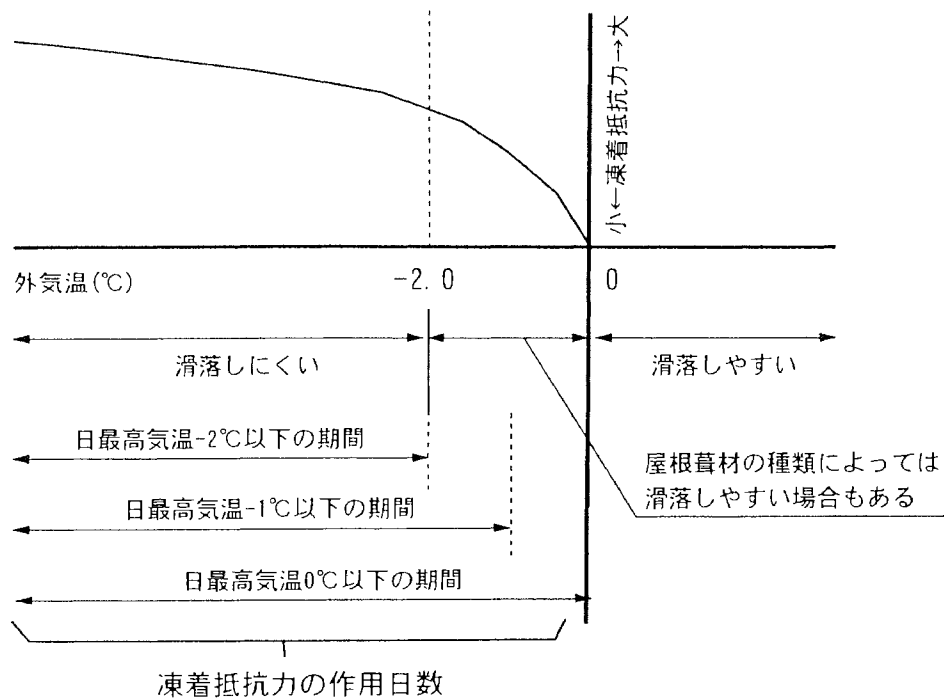


図6-5 凍着抵抗力の作用日数の算出条件

お、他の再現期間（例えば再現期間50年）における再現期待値も同等の手法によって算出することは可能である。

### 6.3.2 屋根雪と屋根葺材との摩擦抵抗力に影響を及ぼす界面の雪粒径に関する実験および観察方法

屋根雪の滑落は、屋根雪の最下層における雪粒子の粗大化の影響を受け、粒径0.1～0.5mmのしまり雪では、摩擦抵抗力が大きくなり滑落しにくい。一方、粒径1～2mmのザラメ雪になると滑落しやすくなる。従って、滑落雪の発生に要する日数を評価する場合は、最下層の雪粒子が粗大化するのに要する日数を明らかにしておく必要がある。雪粒径が1～2mmになるのに要する日数は、一般の戸建住宅を想定した場合（小屋裏温度2.4℃，屋根葺材裏面温度0～0.3℃），72時間程度を要する。ここで、勾配屋根の使用状況は、前述の戸建住宅のように必ずしも暖房を行っているとは限らない。すなわち、勾配屋根における滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合、無暖房の状況下における雪粒径の粗大化状況を把握

しておく必要がある。このようなことから、屋根雪の最下層における雪粒径の経日変化に関する屋内・屋外実験を行った。

雪粒子の経日変化に関する屋内実験は、図6-6に示す試験体（無暖房）を低温室内に設置して行った。図のように、模擬屋根には自然雪を10cm堆積させて、屋根葺材に接する最下層の雪粒子を24時間経過毎に採取した。雪粒子は融解を防ぐため、採取直後に $-5^{\circ}\text{C}$ の低温室内でビデオカメラ（倍率10倍）で撮影した。撮影は各時間毎に3回行い、15個の雪粒子から平均雪粒径を算出した。なお、低温室の室温は、札幌における1～2月の外気温平年値を想定して $-5^{\circ}\text{C}$ とした。同時に、屋外に設置（札幌市手稲区）した図6-7に示す試験体（塗装鋼板葺）を対象に、雪粒子の経日変化を観測した。なお、この観測は1999年1～2月に実施し、観測方法は屋内実験と同様である。これらの屋内・屋外の実験結果から雪粒子の粗大化について評価した。

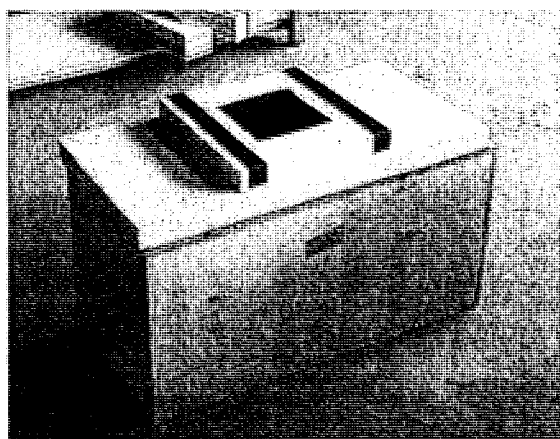
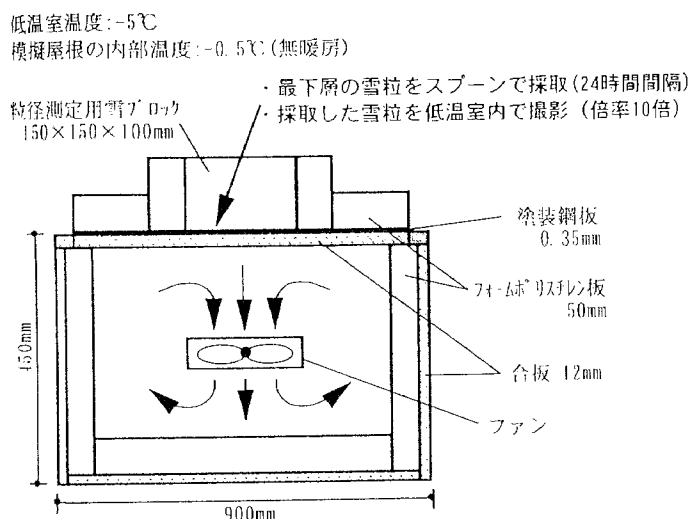


図6-6 屋内実験に用いた模擬屋根

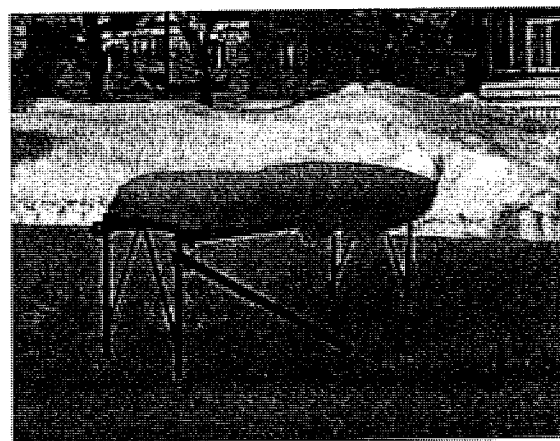
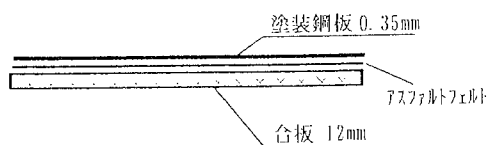


図6-7 屋外実験に用いた無暖房の屋根

## 6. 4 研究結果

### 6.4.1 地点別にみた凍着抵抗力の作用日数

凍着抵抗力の作用日数の各年極値をGumbel確率紙上にプロットした結果の一例として札幌、釧路の場合をみると図6-8になる。なお、図中のプロット値は、0℃以下の日を基準とした凍着抵抗力の作用日数で示してある。図のように、凍着抵抗力の作用日数の各年極値は、必ずしも直線的な分布形状ではなく、地点ごとに極値分布（プロット値の分布）が異なっている。そのため、33年間分のプロット値全てを直線回帰（破線）して100年再現期待値を得ると、釧路のように過小評価となる場合がある。ここで、既往の研究によれば、気象要素の一つである年最大積雪深においても同様に、極値分布が観測地点毎に異なることが指摘されている<sup>7)</sup>。年最大積雪深の場合、各年極値をGumbel確率紙上にプロットし、そのプロット値の上位1/3のみを直線回帰することで、年最大積雪深の100年再現期待値を算出する手法が提案されている<sup>8)</sup>。さらに、この研究では比較的短期間の気象資料、例えば30年前後の統計期間においても、50年あるいは100年再現期待値を推定するのは問題ないとしている。なお、極値上位1/3を直線回帰して100年再現期待値を得る方法は、現行荷重指針の積雪深算定手法にも採り入れられている<sup>3)</sup>。この方法に従って、再現期待値を算出した結果をみると図6-8中の実線で示した回帰式となる。この図から得られる再現期待値は、再現期間2年（非超過確率50%）のようにその期間が極めて短い場合、再現期待値がプロット値を下回る場合がある。一方、再現期間100年（非超過確率99%）に対する値を得る場合、33年分全てを直線回帰した場合（破線）に比べてプロット値に近似した再現期待値を得ることができる。凍着抵抗力の作用日数は、その値が積雪荷重の評価に用いられる場合、非超過確率50%のような平年的な数値が要求されるのではなく、耐用年数中に起こり得る最大値が必要とされる。また、豪雪年の周期等のように、各年毎の極値変動が問題とはならない。このことから、以下の検討では凍着抵抗力の作用日数として、極値上位1/3のプロット値のみを直線回帰して得られる100年再現期待値を用いることにした。

上述の手法に従って、凍着抵抗力の作用日数の100年再現期待値を算出した。その一例として、多雪地域の代表的な都市での算出結果を表6-1に示す。なお、表中の-1℃、-2℃以下を基準とした凍着抵抗力の作用日数は、7日未満の場合、空欄として示してある。表のように、緯度や標高が高い地点における凍着抵抗力の作用日数は、長期間となる傾向がみられる。稚内における算出結果をみると、0℃を基準とした場合の凍着抵抗力の作用日数は75日となり、2.5ヶ月の間、継

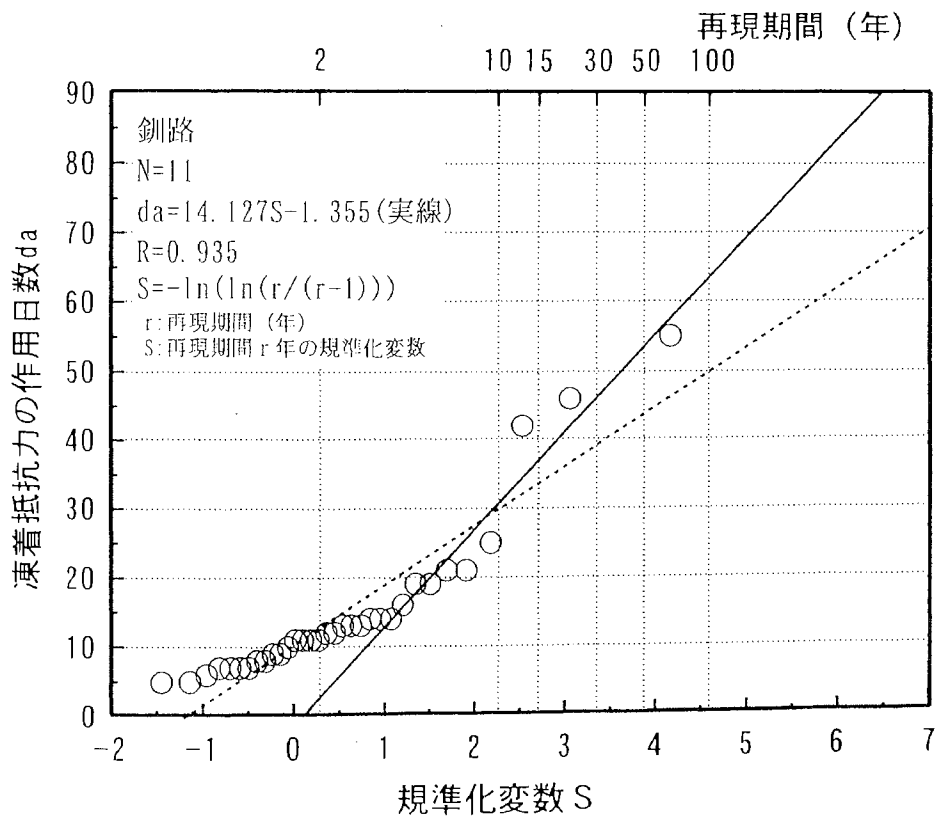
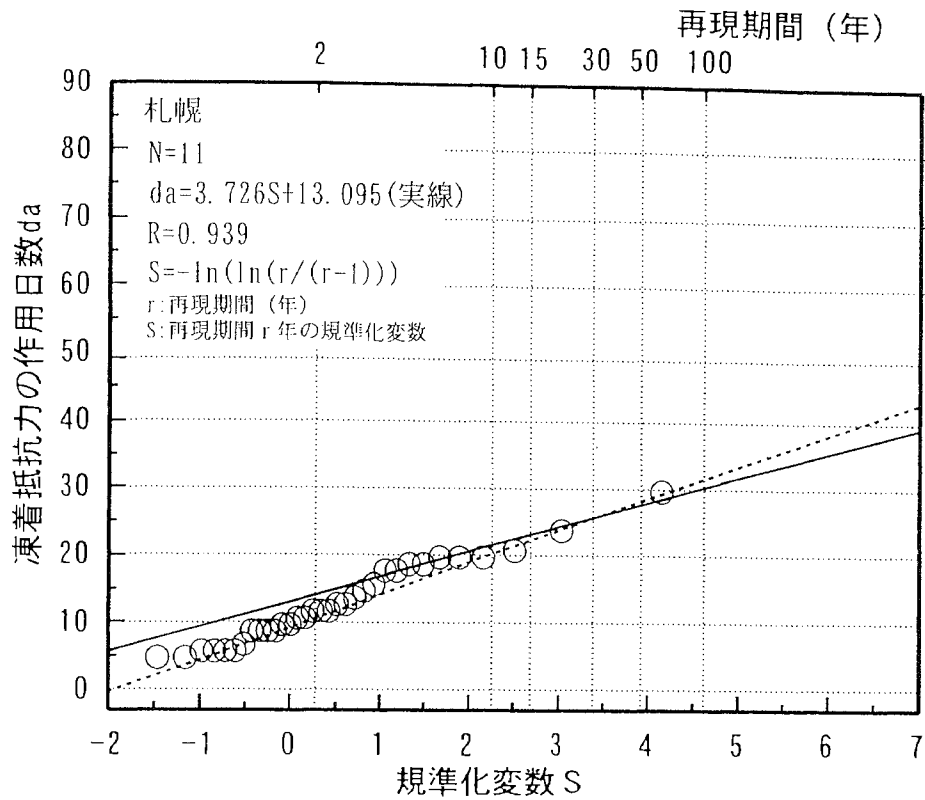


図6-8 札幌・釧路における凍着抵抗力の作用日数

表6-1 多雪地域に属する代表的な都市における凍着抵抗力の作用日数

所在地	気象 官署名	北緯(°)	標高(m)	凍着抵抗力の 作用日数(日)		
				0°C以下	-1°C以下	-2°C以下
北海道	稚内	45.4	2.8	75	60	52
北海道	北見枝幸	44.9	6.1	92	80	56
北海道	羽幌	44.4	7.9	64	61	31
北海道	雄武	44.6	13.8	99	69	57
北海道	留萌	44.0	22.0	60	56	22
北海道	旭川	43.8	111.9	81	68	53
北海道	網走	44.0	37.6	69	59	48
北海道	小樽	43.2	24.9	44	24	22
北海道	札幌	43.1	17.2	31	32	18
北海道	岩見沢	43.2	42.3	61	52	32
北海道	帯広	42.9	38.6	48	32	23
北海道	釧路	43.0	31.7	63	31	25
北海道	根室	43.3	25.8	58	44	36
北海道	寿都	42.8	15.7	37	22	22
北海道	室蘭	42.3	42.6	41	22	21
北海道	苫小牧	42.6	5.9	35	25	17
北海道	浦河	42.2	33.5	39	21	11
北海道	江差	41.9	3.7	25	22	14
北海道	函館	41.8	33.2	22	18	16
北海道	倶知安	42.9	174.4	57	41	31
北海道	紋別	44.4	15.8	74	66	52
北海道	広尾	42.3	32.4	46	30	25
青森	深浦	40.7	66.1	21	11	7
青森	青森	40.8	3.0	22	13	9
青森	むつ	41.3	2.9	26	16	9
青森	八戸	40.5	27.1	12	8	
秋田	秋田	39.7	9.4	10	8	
岩手	大船渡	39.1	36.5	10		
岩手	盛岡	39.7	155.2	14	10	8
岩手	宮古	39.7	42.5	7		
山形	新庄	38.8	94.4	15	10	8
山形	酒田	38.9	3.1	9		
山形	山形	38.3	152.5	12	9	
新潟	相川	38.0	34.6	5		
新潟	新潟	37.9	1.9	7		
新潟	高田	37.1	12.9	5		
宮城	仙台	38.3	38.9	7		
宮城	石巻	38.4	43.0	9		
石川	輪島	37.4	5.3	4		
石川	金沢	36.6	26.1	4		
富山	伏木	36.8	12.1	4		
富山	富山	36.7	8.6	7		
長野	長野	36.7	418.2	10	8	
長野	松本	36.3	610.0	5		
長野	諏訪	36.1	760.3	7		
福井	福井	36.1	9.1	4		
岐阜	高山	36.2	560.2	9	8	
鳥取	境	35.6	2.1	3		
京都	舞鶴	35.5	2.5	2		
滋賀	彦根	35.3	87.3	2		

注1) 表に示す凍着抵抗力の作用日数(日)は、小数点以下の数値を切り上げて表記した。  
 注2) -1°C、-2°Cにおける空欄部は、凍着抵抗力作用日数が7日未満であることを示す。

続的に屋根雪が滑落しにくい状況となる。すなわち、凍着抵抗力の増減特性からみると、滑落までに要する日数を75日以上として設定する必要がある。一方、福井の算出結果をみると、凍着抵抗力の作用日数（0℃）は、4日となる。この結果に従って、凍着抵抗力の増減のみを指標とする場合、福井における屋根雪の滑落に要する日数は、4日とすることが可能になる。

ここで、凍着抵抗力の増減には、外気温が影響を及ぼす一方で、屋根葺材の表面性状も大きく関与している。凍着抵抗力に関わる屋根葺材の表面性状には、表面粗さおよび撥水性が挙げられる。表面凹凸の高さ(Rz)が小さいと同時に、その凹凸間隔(Sm)が広く、水との接触角 $\theta$ が高い屋根葺材では、マイナス温度でも凍着抵抗力が作用しないことがあり得る。ここで、同表に示した凍着抵抗力の作用日数を温度別にみると、次のことが言える。稚内を事例として説明すると、-1℃を越えれば凍着抵抗力が作用しなくなると検証できた場合、凍着抵抗力の作用日数は60日となる。-2℃を越えれば作用しなくなると検証できた場合には52日となる。このように、マイナス温度でも凍着抵抗力が作用しないことが検証できれば、凍着抵抗力の作用日数は、徐々に短くなる。表6-1に示した観測地点を日本地図上にプロットすると図6-9になる。図中の○印の地点は、凍着抵抗力の作用日数が7日未満となる地点を示している。凍着抵抗力の作用日数を温度別にみると、0℃を越えれば凍着抵抗力が作用しなくなるとした場合、その作用日数が7日以上となる地点は全観測地点(148箇所)中の25%(33箇所)となり、豪雪地帯対策特別措置法に指定されている地域の観測地点のおおよそ70%を占める。一方、-2℃を越えれば凍着抵抗力が作用しなくなると検証できれば、青森県以南における殆どの地域で7日未満の作用日数となる。このように、マイナス温度においても凍着抵抗力が作用しないような屋根葺材を用いた場合、青森県以南における殆どの地域で、一週間以下の日数を凍着抵抗力の作用日数とすることが可能となる。

屋根雪は、凍着抵抗力が作用している日数内において、極めて滑落しにくい状況となる。ここで、凍着抵抗力の作用日数内における最大差分積雪深を算出すると、以下のようになる。なお、最大差分積雪深とは、凍着抵抗力の作用日数内における最大積雪深と最小積雪深との差である。すなわち、屋根雪が滑落するまでの最大積雪深となる。凍着抵抗力の作用日数内における最大差分積雪深の100年再現期待値を算出し、北海道を事例として年最大積雪深の100年再現期待値と比較すると、図6-10～11になる。図6-10のように、凍着抵抗力の作用条件を0℃以下の日とした場合の最大差分積雪深は、年最大積雪深の75%程度の値となる。具体的に稚内の事例でみると、0℃以下となる75日間に1.15mの雪が屋根上に堆積し、この値は年最大積雪深(1.96m)の59%程度となる。同様に、凍着抵抗力の



作用条件を $-2^{\circ}\text{C}$ 以下の日とした場合の最大差分積雪深をみると、図6-11となる。図のように、最大差分積雪深は、年最大積雪深の50%程度の値となる。このように、屋根雪の滑落を支配する凍着抵抗力の作用日数を算出することで、この抵抗力が作用している日数内の屋根上積雪深が明らかとなる。

これらの結果をみると、凍着抵抗力の作用日数は、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重を評価する際に有効な指標になると考える。



図6-9 凍着抵抗力の作用日数の地理的分布

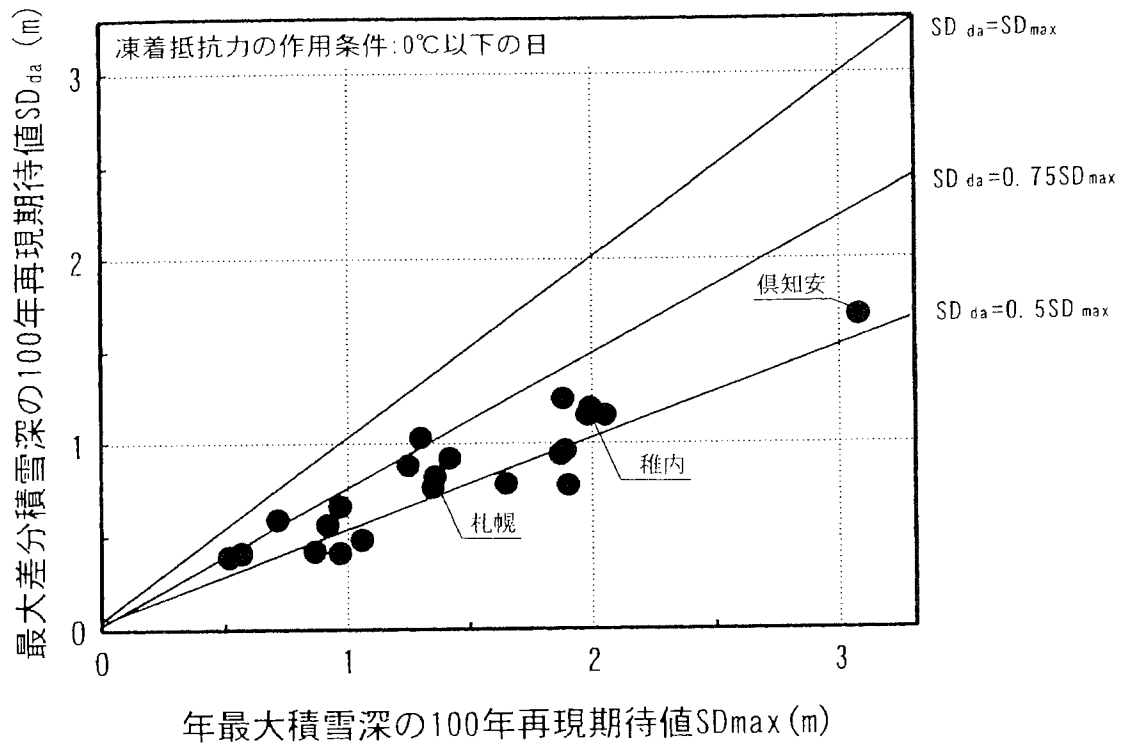


図6-10 凍着抵抗力の作用日数内における最大差分積雪深  
(凍着抵抗力の作用条件: 0°C以下)

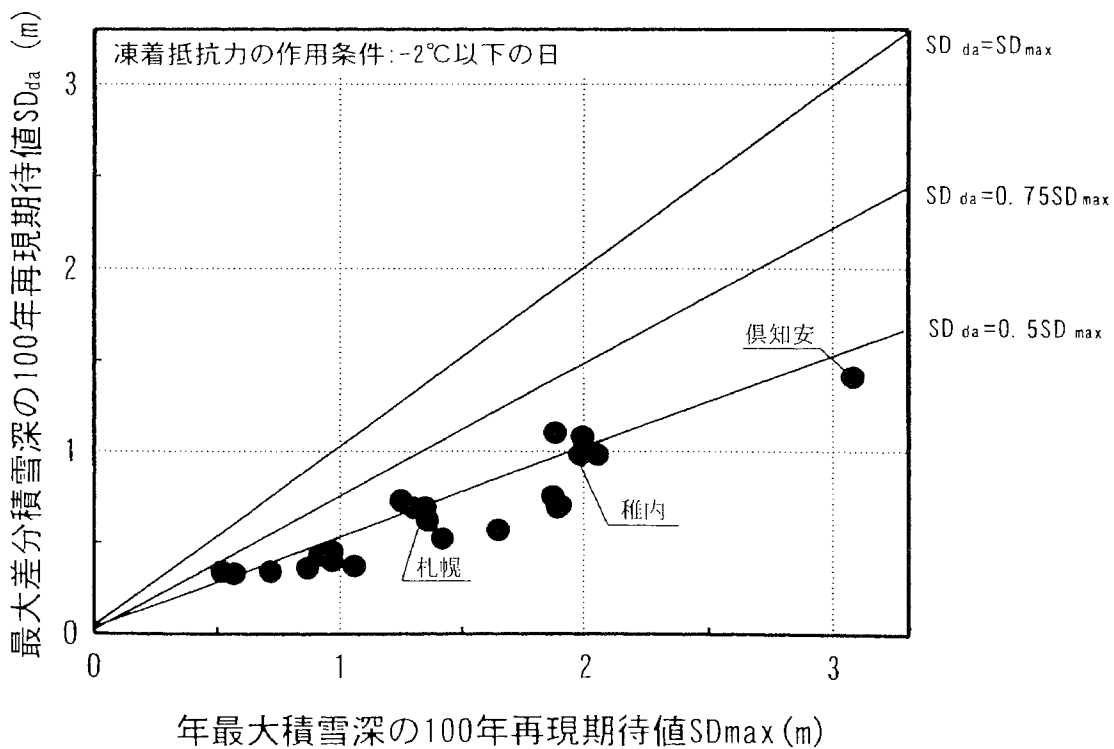


図6-11 凍着抵抗力の作用日数内における最大差分積雪深  
(凍着抵抗力の作用条件: -2°C以下)

#### 6.4.2 雪粒径の粗大化状況

屋根雪の滑落は、屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化に影響を受け、粒径 0.1～0.5mmのしまり雪では、摩擦抵抗力が大きくなり滑落しにくい。一方、粒径 1～2 mmのザラメ雪になると滑落しやすくなる。従って、滑落に要する日数を評価する場合、6.4.1節に示した凍着抵抗力の作用日数のみでなく、最下層の雪粒子が粗大化するのに要する日数をも明らかにしておく必要がある。このことから、屋内・屋外試験体（無暖房）を用いて屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒径の経時変化を観測した。

屋根雪の最下層における雪質を観察したところ、雪粒子は、写真6-1のように、日ごとに大きくなってゆく様子が確認できた。このような雪粒子の経日変化をみると図6-12になる。なお、図中には、戸建住宅で暖房（小屋裏温度 2.4℃）を行っている場合の結果を併せて示してある（5.4.2節参照）。図のように、暖房を行っている場合、最下層の雪は2日で1 mmを程度の粒径となる。一方、無暖房の場合をみると、1 mmを越える粒径となるのに4～5日を要している。なお、勾配屋根における屋根上積雪の調査を行った既往の研究結果をみると、無暖房屋根の場合、最下層の雪が1～3 mmの粒径となるのに3～4日を要している<sup>5)</sup>。

次に、雪粒子の粗大化に及ぼす外気温の影響についてみると、平均気温が最も低い1月28日からの観測では、1 mm以上の粒径となるのに要する日数が最も長くなっている。既往の研究をみると、50cmを下回る積雪深の場合、雪の下層温度は、外気温の影響を受ける<sup>9)</sup>。このようなことから、本実験で想定した-5℃を下回る外気温で、積雪深が50cm未満となる地域では、図6-12に示した粒径粗大化に要する日数よりも大きな値を採る必要がある。

屋根雪の最下層が滑落しやすいザラメ雪（粒径 1～2 mm）となるためには、降雪から数日間程度の期間を要する。このように雪粒子が粗大化してゆく過程をみると、屋根雪の滑落に要する日数を評価する場合、摩擦抵抗力へ及ぼす粗大化の影響を考慮する必要がある。また、滑落が発生するのに要する日数とその時の雪質が明らかになれば、雪質と摩擦抵抗力の関係から屋根勾配を設定することが可能になると考える。



写真6-1 屋外観測による粗大化の様子（無暖房）

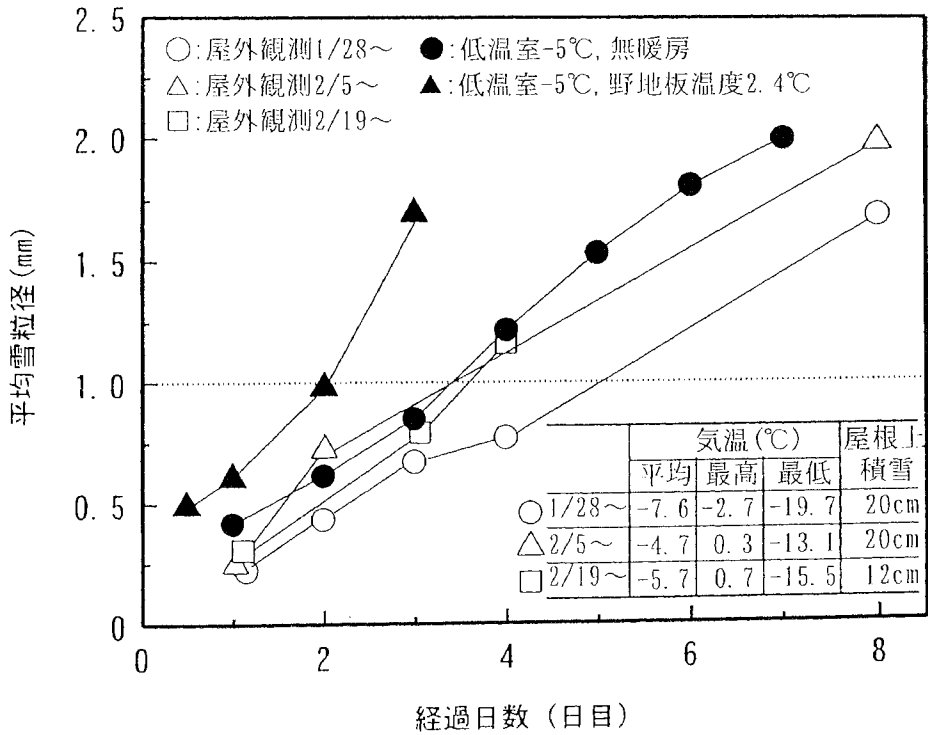


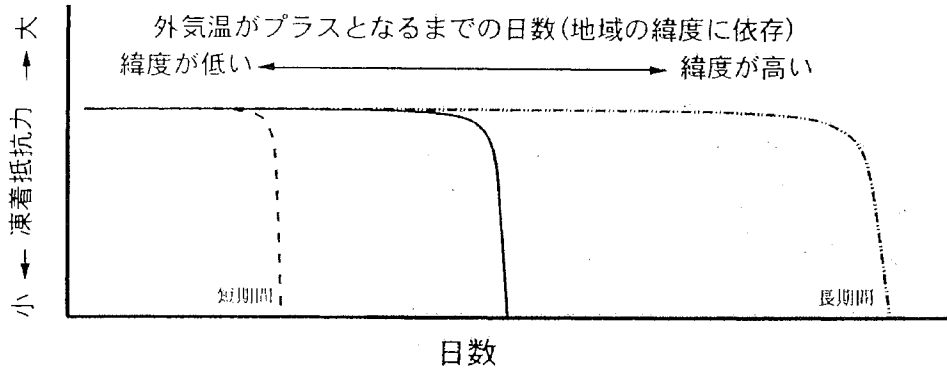
図6-12 屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒径の経日変化（札幌での観測）

### 6.4.3 凍着・摩擦抵抗力からみた滑落に要する日数

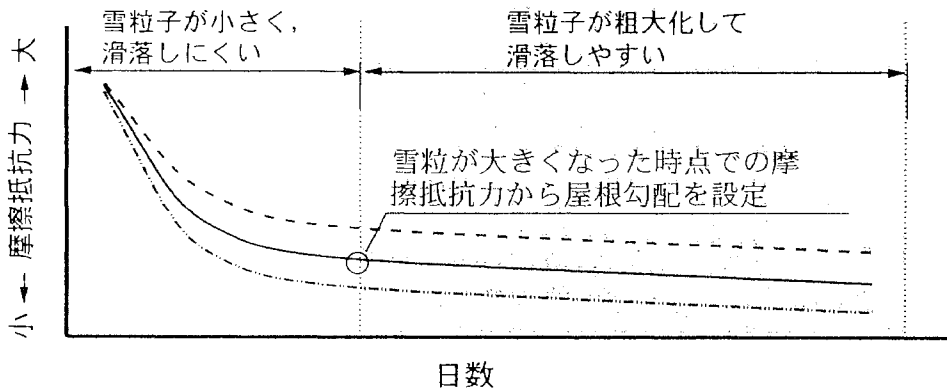
凍着抵抗力の作用日数を算出したところ、福井での作用日数は4日となった。しかし、摩擦抵抗力の影響を考慮すれば、雪粒子の粗大化が4日以内に起こらない場合、滑落が極めて発生しにくいこととなる。すなわち、屋根雪の滑落に要する日数は、凍着抵抗力の増減のみを指標とした場合、危険側に評価するケースもあり得る。このことから、凍着抵抗力のみでなく、摩擦抵抗力の増減特性を組み合わせ、雪が滑落するまでに要する日数の評価手法について考察する。凍着・摩擦抵抗力の増減特性を雪の滑落に必要な日数として整理すると、図6-13になる。はじめに、凍着抵抗力について考察すると、プラスの外気温となることが多い地域の場合、この抵抗力は短期間のうちに小さな値となる。しかし、摩擦抵抗力をみると、降雪直後は雪粒子が小さいことから、滑落しにくい。このことから、凍着抵抗力の作用日数が雪粒子の粗大化に要する日数よりも短い場合は、摩擦抵抗力の増減特性を基準とした滑落の評価を行う必要がある。具体的には、図6-4に示した札幌における雪粒子の粗大化に要する日数を基準とした場合、荷重評価に用いる積雪深は、5日を上回る増分積雪深とする必要がある。また、多雪地域で一般的に用いられている塗装鋼板は、経年劣化に伴って表面粗さ $R_z$ が増加し、25年以上経過すると $R_z$ が $17\sim 26\mu\text{m}$ 程度になる<sup>(9)</sup>。図6-4の通り、摩擦抵抗力は、屋根葺材の表面粗度の増加に伴って3~5倍になる。すなわち、屋根葺材が劣化するほど、滑落は見込めなくなることも十分に考慮する必要がある。

これらのことから、屋根雪の滑落処理に要する日数は、人工的に屋根面に熱を与える融滑雪処理<sup>(1)</sup>を使用しない自然滑落の場合、雪粒子の粗大化による摩擦抵抗力の増減を考慮した日数を設定する必要がある。なお、荷重指針では、制御積雪荷重を算出する際の積雪深として、7日増分積雪深を提示している。この7日増分積雪深は、凍着抵抗力の作用日数および雪粒子の粗大化に要する日数が7日以下の地域に建設される勾配屋根の有効な荷重評価指標になると考える。一方、マイナス温度が長期間継続するような北海道等で自然滑落を考える場合は、凍着抵抗力が7日以上継続的に作用する。このような地点では、凍着抵抗力の作用する日数内における積雪深（例えば、稚内では75日間の積雪深）を算出することで、勾配屋根で発生する滑落を考慮した制御積雪荷重を算出することが可能になると考える。

凍着抵抗力→温度依存



摩擦抵抗力→雪質依存



- : プラスの外気温になることが多い地域(A)
- · - · - · : マイナスの外気温になることが多い地域(B)
- : AとBの中間地域

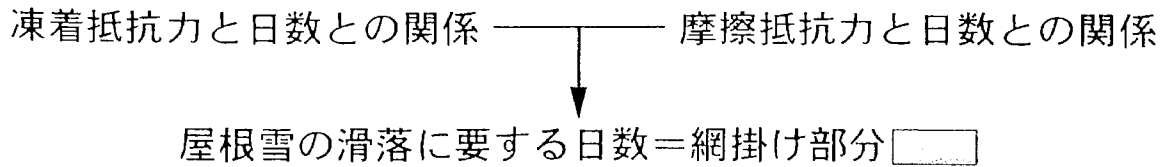


図6-13 日数を基軸とした場合における凍着・摩擦抵抗力の推移

## 6. 5 勾配屋根における滑落を考慮した積雪荷重評価

本章では、勾配屋根における滑落を支配する諸抵抗力の特徴から、「滑落に要する日数」の算出を行った。ここで、「滑落に要する日数」の使われ方について、我が国の積雪荷重評価へ提案を行うと次のようになる。

我が国における積雪荷重の評価は、建築基準法を基本として、日本建築学会建築物荷重指針<sup>1)</sup>によっても、行うことが可能となっている。これら2つの評価では、何れも屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価ができる。始めに、建築基準法における積雪荷重評価について整理すると、滑落の発生は、屋根勾配のみを指標として評価される。従って、建物の設計時に屋根勾配が明らかとなれば、滑落する分の積雪量を算出できる（例えば、屋根勾配35°では、年最大積雪深の25%が滑落する分の雪として評価できる）。このように、建築基準法による評価は簡便に滑落の評価を行うことが可能なものの、滑落に影響を及ぼす屋根勾配以外の要因を考慮することができない。ここで、ISO、諸外国の積雪荷重の評価基準をみると、屋根雪の滑落に関わる屋根勾配以外の要因として、屋根葺材の違い、温度条件等も考慮されている<sup>12)・13)・14)</sup>。ISOや諸外国の基準からみても、建築基準法における積雪荷重評価は、十分な滑落の評価を行っているとは考えにくい。本研究では、屋根勾配の設定に関わる屋根葺材と屋根雪との摩擦抵抗力について検討を行った。その結果、屋根葺材の表面性状や雪質は、摩擦抵抗力の増減を大きく支配しており、滑落を評価する場合に無視できないことを指摘した。さらに、屋根雪の滑落には、凍着抵抗力が大きな影響を及ぼしており、この抵抗力には、顕著な温度依存性があることを指摘した。これらの結果をみると、図6-14のように、建築基準法における積雪荷重評価では、滑落に影響を及ぼす屋根葺材の表面性状や雪質、気温等を評価体系に加える必要があると考える。現行建築基準法の滑落に関する積雪荷重評価は、昭和19年に公布された臨時建築規格第532号<sup>15)</sup>以降、抜本的な修正を経ずに現在まで継続的に用いられてきている。このことから考えても、評価体系の見直しが急務と考える。

次に、日本建築学会建築物荷重指針における積雪荷重評価は、1993年に大幅な改定が行われ、新たに、制御積雪荷重の考え方が盛り込まれた。この考え方に従えば、屋根上に堆積した雪を規則的に処理することが可能な場合、その処理性能に応じた積雪荷重を採ることが可能になる。具体的には、屋根雪の滑落が規則的に発生する建物では、制御積雪荷重として、「降雪から滑落までの日数内における積雪荷重」を採ることができる。屋根雪の滑落は、降雪の直後に発生することは希で、数時間～数日経過した後に発生する<sup>16)</sup>。このように荷重指針の評価は、

滑落に要する日数を考慮した点で、実現象との整合性が高い評価基準であると考えられる。ここで、日本建築学会建築物荷重指針における制御積雪荷重は、屋根雪が滑落するまでに要する日数を評価した後、その日数内に積もり得る積雪深から積雪荷重を算定する評価体系となっている。すなわち、降雪から滑落に至るまでの日数が評価できない場合は、制御積雪荷重を用いた建物の設計は不可能となる。なお、同指針における日数の評価では、建築基準法の「屋根勾配」のように具体的な評価指標を設けていない。滑落に至るまでの日数は、「個々の建物に対する実験・調査」によって定めることとしている。このように同指針の評価方針が概念的な記述に留まっている背景には、雪の滑落を評価する手法が確立されていないことが指摘されている<sup>17)</sup>。このように、日本建築学会建築物荷重指針の制御積雪荷重は、実際の滑落現象との整合性が高い評価体系を持ちながらも、その評価に必要な技術資料が不足している現状にある。本研究では、屋根雪の滑落を支配する抵抗力の特性から、「滑落に要する日数」の算出を行った。その結果から、日本建築学会建築物荷重指針における制御積雪荷重の評価方針について、次の提案ができる。荷重指針における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合には、図6-15のように、「個々の建物に対する実験・調査」によって、滑落に要する日数を検証する必要がある。このような現状の評価に対して、本提案では、「外気温の推移」、「雪粒子の粗大化」を指標とした滑落に要する日数の評価フローが提案できる。勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価フローを、図6-16に示す。図のように、屋根雪の滑落を考慮して、制御積雪荷重を用いた建物の設計を行う場合は、以下に示す①～④の評価を行う必要があると考える。

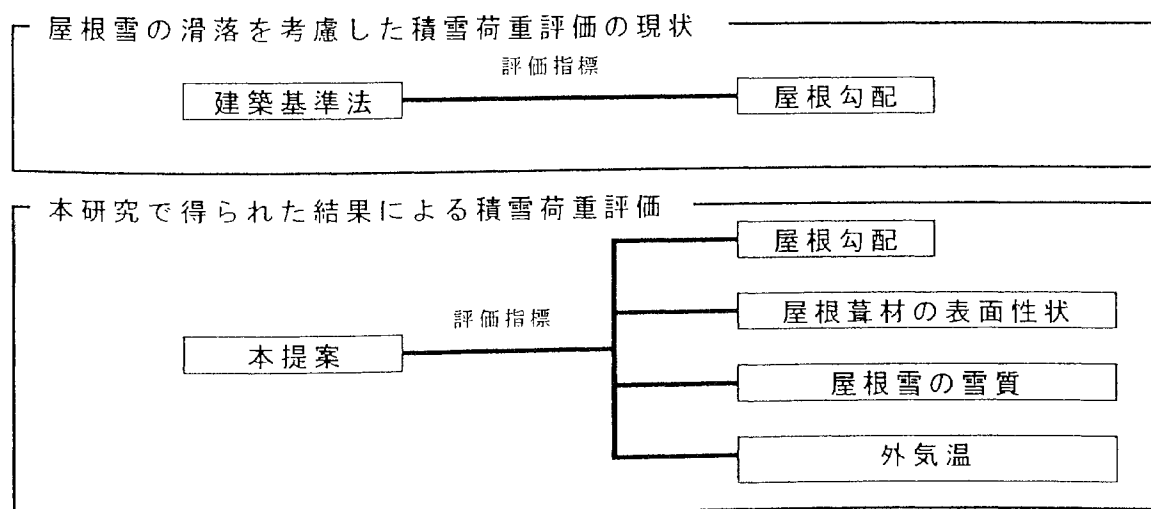


図6-14 滑落を考慮した積雪荷重の評価指標に関する提案



①：屋根上に堆積した雪全体が滑落することを検証する。

屋根面に堆積した雪は、全体に移動して滑落することが稀で、屋根面の一部で残雪する「部分滑落」が頻繁にみられる。屋根面の一部で残雪すると屋根上積雪深が不均一となるため、積雪荷重を予測することが困難となる。そのため、建物の設計段階から、部分的な滑落に関する対策を行い、屋根上に堆積した積雪全体が滑落することを検証する必要がある。この検証ができない場合、図中に示したように、基本的には、陸屋根等の滑落が発生しない屋根と同等の積雪荷重評価を行う必要がある。なお、屋根雪が部分滑落する建物において滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合には、部分滑落の特性を十分に考慮した上で、積雪荷重の偏分布に関する評価を十分に行う必要がある。

②：凍着抵抗力の作用日数（da）

屋根葺材と屋根雪との界面に作用する凍着抵抗力は、マイナス温度での滑落を大きく支配している。この抵抗力は、 $-10^{\circ}\text{C}$ の外気温で極めて大きな値となり、殆ど滑落を期待できない。一方、凍着抵抗力は $0^{\circ}\text{C}$ 以上では殆ど作用せず、滑落しやすくなる。このことから、外気温の推移が滑落に及ぼすの影響を評価する指標として、凍着抵抗力の作用日数（da）を算出する必要がある。凍着抵抗力が作用するか否かの境界は、一般的な屋根葺材の場合、外気温 $0^{\circ}\text{C}$ を基準とする必要がある。なお、屋根葺材の表面性状によっては、 $0^{\circ}\text{C}$ 以下の温度条件において

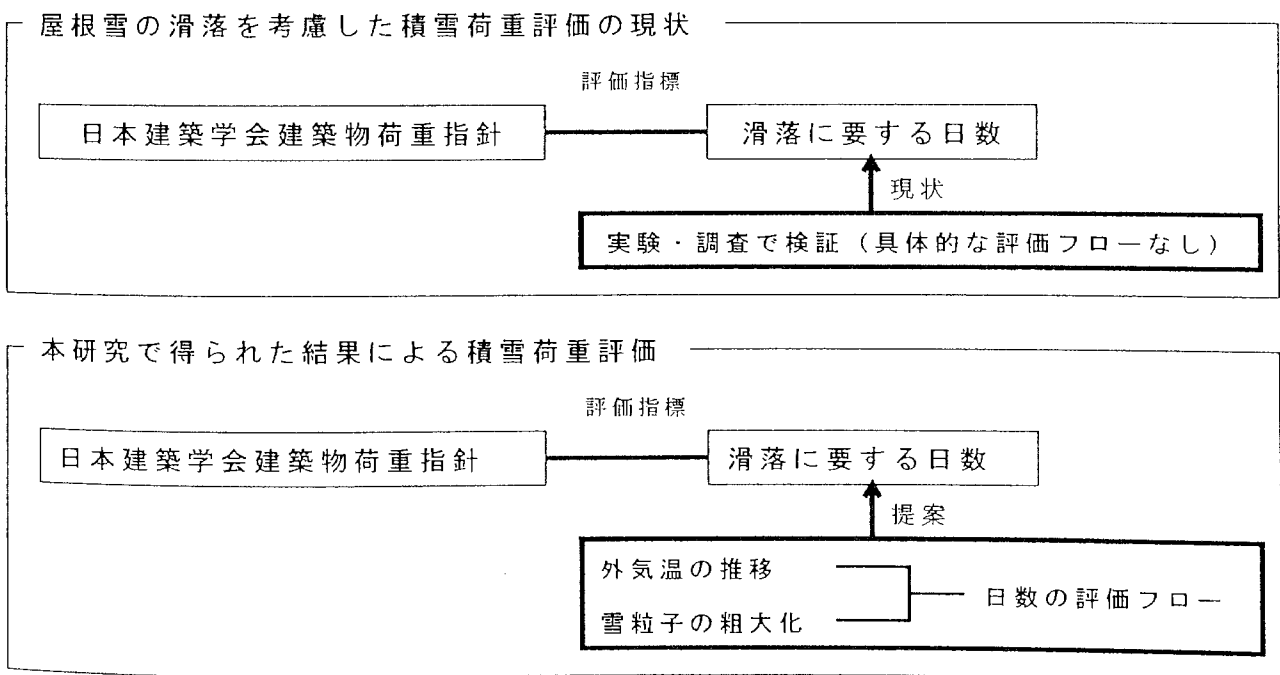


図6-15 滑落を考慮した積雪荷重評価に関する建築物荷重指針への提案

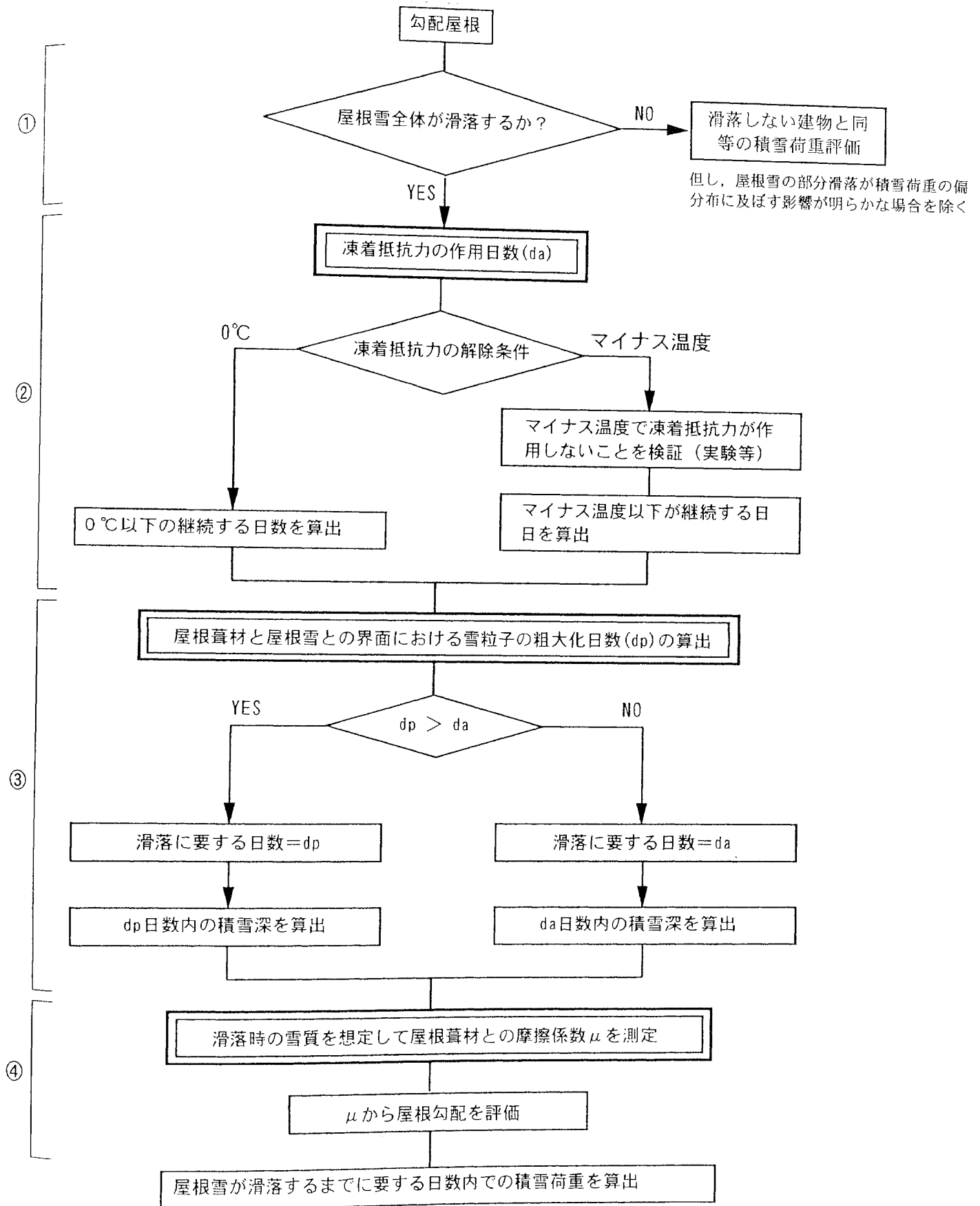


図6-16 勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価フロー

も凍着抵抗力が作用しない場合があり得る。このような特殊な屋根葺材においては、既往の研究で示されているような実験<sup>17)・18)・19)・20)</sup>で、マイナス温度においても凍着抵抗力が作用しないことを検証する必要がある。検証が可能な場合、マイナス温度以下の継続日数を凍着抵抗力の作用日数とすることが可能と考える。なお、凍着抵抗力の作用日数に関する評価は、基本的に建物内部が無暖房であることを想定して検討する必要がある。屋内で暖房を行っている場合、マイナスの外気温でも凍着抵抗力が作用しないこともあり得る。しかし、建物内部の暖房は、建物内部の使用状況によって異なる。従って、人工的に屋根面に熱を与える融滑雪処理<sup>11)</sup>を使用しない自然滑落（屋根勾配のみを処理の動力源とする）場合、建物内部の暖房は、考慮すべきでないと言える。

### ③：屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化日数（ $d_p$ ）

屋根葺材と屋根雪との界面に作用する摩擦抵抗力は、プラス温度での滑落を大きく支配している。この抵抗力は、屋根葺材の表面性状の影響を受け、表面の粗度が大きくなるに伴い増加する傾向がある。一方、雪質の違いによっても摩擦抵抗力は大きく増減する。屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子が細かい場合は（粒径：0.1～0.5mm）、その界面で発生した水分が積雪内部に吸い上げられる現象（毛管現象）が発生するため、摩擦抵抗力が極めて大きくなる。一方、雪粒子が粗大化（1～2mm）した場合の摩擦抵抗力は、水分の影響を受けにくく、細かな雪粒子の場合に比べて全体的に1/2～1/6程度の値となる。このことから、雪質が滑落に及ぼす影響を評価する指標として、「屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化日数（ $d_p$ ）」を算出する必要がある。この粗大化日数は、凍着抵抗力の作用日数と同様、建物内部が無暖房であることを想定して検討する必要がある。一般の暖房を行っている戸建住宅では、（小屋裏温度2.4℃、屋根葺材裏面温度0～0.3℃）、48時間程度で1mm程度にまで界面の雪が粗大化する。しかし、建物内部の暖房は、使用状況によって異なるため、基本的には考慮すべきでないと考える。屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化の日数（ $d_p$ ）および凍着抵抗力の作用日数（ $d_a$ ）を算出すると、「 $d_a$ 」と「 $d_p$ 」との大小関係から、滑落に要する日数を評価できる。

### ④：屋根勾配による影響の評価

屋根雪の滑落には屋根勾配が大きく関わっている。勾配が著しく小さい場合、滑落は発生しない。従って、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を行う場合には、滑落に必要な屋根勾配を把握する必要がある。滑落に必要な屋根勾配は、

屋根雪と屋根葺材との摩擦抵抗力から評価することができる。摩擦抵抗力の増減には、屋根葺材の表面性状や屋根雪の雪質が関わっている。雪質が及ぼす影響については、③の粗大化日数で評価を行った。すなわち、この段階においては、滑落時の雪質は把握できている。例えば、滑落時における雪質を粒径1～2mmのザラメ雪とした場合、そのザラメ雪と屋根葺材との摩擦抵抗力を測定することで、滑落に必要な最低限の屋根勾配を評価することができる。なお、摩擦抵抗力は、屋根葺材が経年劣化すると増加することが指摘されている<sup>10)</sup>。このことから、摩擦抵抗力の測定においては、屋根葺材が劣化した場合の状況をも想定した実験を行う必要があると考える。

以上に示した、①～④の検討を行うことで、屋根雪の滑落に要する日数、および滑落に必要な勾配の設定が可能となり、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した制御積雪荷重の評価を行うことができると考える。

ここで、滑落に要する日数を用いて制御積雪荷重を算出する場合には、次の提案ができる。本研究で提案する制御積雪荷重の考え方を、図6-17に示す。図6-17中の式1)で示すように、日本建築学会建築物荷重指針における制御積雪荷重は、「屋根雪が滑落する日数内の最大積雪深SD」に「単位積雪重量 $\rho$ 」を乗ずることで算出される。ここで式1)をみると、SDは、日数に関する考慮がなされている一方で、 $\rho$ は日数に対応した算出式となっておらず、年最大積雪深時の単位積雪重量から算出される。既往の研究によれば、勾配屋根の屋根雪は、滑落するまでの日数によって、単位積雪重量が大きく変化する<sup>22)</sup>。このような単位積雪重量の特性をみると、勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価では、式2)、式3)のように、単位積雪重量の算定に日数を考慮する必要があると考える。なお、単位積雪重量と日数との関係について既往の研究をみると、以下に示す式4)が提案されており、実際の勾配屋根における単位積雪重量とほぼ一致することが報告されている<sup>22)・23)</sup>。このように、勾配屋根を持つ建物では、屋根雪が滑落するまでに要する日数内の最大積雪深に、その日数内における単位積雪重量の最大値を乗ずることで、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価が可能になると言える。

日本建築学会建築物荷重指針における制御積雪荷重の考え方

$$\text{制御積雪荷重} = \rho \times (SD) \quad \dots \dots \dots 1)$$

$$\rho = 73 \times \text{SQRT}(SD) + 240$$

ここに、

SD : 屋根雪が滑落するまでに要する日数内の最大積雪深 (m)

$\rho$  : 単位積雪重量 (kg/m<sup>3</sup>)

本研究で提案する滑落を考慮した制御積雪荷重の考え方

$d_a > d_p$  の場合  $\rightarrow ts = d_a$  とする  
(外気温がマイナス温度となる場合が多い地域が該当)

$$\text{制御積雪荷重} = \rho_d \times SD_{da} \quad \dots \dots \dots 2)$$

$d_a < d_p$  の場合  $\rightarrow ts = d_p$  とする  
(外気温がプラス温度となる場合が多いが該当)

$$\text{制御積雪荷重} = \rho_d \times SD_{dp} \quad \dots \dots \dots 3)$$

$$\rho_d = 2.22ts + 160 \quad \dots \dots \dots 4)$$

ここに、

$d_a$  : 凍着抵抗力の作用日数 (day)

$d_p$  : 屋根雪と屋根葺材との界面における雪粒子の粗大化日数 (day)

$\rho_d$  : 屋根雪の滑落に要する日数内における最大単位積雪重量 (kg/m<sup>3</sup>)

$SD_{da}$  : 凍着抵抗力の作用日数内における最大差分積雪深 (m)

$SD_{dp}$  : 粗大化日数内における最大差分積雪深 (m)

図6-17 本研究で提案する制御積雪荷重

## 6. 6 まとめ

---

本章では、始めに、滑落を抑制する抵抗力の増減特性およびその抵抗力の日数との関わりを整理した。整理して得られた結果に基づき、凍着抵抗力に影響を及ぼす気温特性について統計処理を行った。次に、摩擦抵抗力に影響を及ぼす雪質の経時変化に関して実験・観測を行った。これらのことから、勾配屋根における積雪荷重の評価に必要な「屋根雪の滑落までに必要な日数」の算出を行った。これらのことから、我が国における積雪荷重評価への提案を行った。その結果をまとめると、次のようになる。

1) 屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を行う場合、屋根面に堆積した雪全体が規則的に滑落する必要がある。しかし、実際の滑落は、屋根の一部に残雪する部分滑落が多く、屋根上積雪深が不均一となる。屋根上積雪深が不均一になった場合には、滑落が発生しない屋根と同等の積雪荷重評価を行う必要がある。部分滑落の要因には、積雪の引張・せん断抵抗力が挙げられる。従って、滑落を考慮した積雪荷重の評価を行う場合には、これら抵抗力を解除できるような屋根形状の工夫を行い、建物の設計段階から部分滑落しないように十分検証を行う必要がある。なお、屋根雪が部分滑落する場合においては、部分滑落の発生形態を十分に考慮し、部分滑落が積雪荷重の偏分布に及ぼす影響を把握する必要がある。

2) 屋根葺材と屋根雪との界面に作用する凍着抵抗力は、マイナス温度に極めて大きな値となり滑落が期待できない。一方、この抵抗力はプラス温度になると殆ど作用せず、滑落しやすくなる。このように、凍着抵抗力には、顕著な温度依存性があるため、屋根雪の滑落を評価する場合、無視できない。このことから、外気温の推移を指標として、凍着抵抗力が作用する日数の算出を試みた。この「凍着抵抗力の作用日数」は、屋根雪の滑落に及ぼす外気温の影響を評価する上で、重要な項目になると考える。

3) 屋根葺材と屋根雪との界面に作用する摩擦抵抗力は、プラス温度での滑落を大きく支配している。この抵抗力は、屋根葺材の表面性状の影響を受け一方で、雪質の違いによっても大きく増減する。屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子が細かい場合は、屋根葺材と雪との界面で発生した水分が積雪内部に吸い上げられる現象（毛管現象）が発生するため、摩擦抵抗力が極めて大きくなる。一方、雪粒子が粗大化（1～2mm）した場合の摩擦抵抗力は、水分の影響を受けにくく、

細かな雪粒子の場合に比べて全体的に1/2～1/6程度の値となる。このことから、「屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化日数」について検討を行った。この粗大化日数は、雪質が滑落に及ぼす影響を評価する上で、重要な指標になると考える。

4)「凍着抵抗力の作用日数」と「屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化日数」とを組み合わせて、滑落に要する日数の評価手法を提案した。この手法を用いると、日本建築学会における積雪荷重評価に必要な「屋根雪処理の日数」が明らかとなり、屋根雪の滑落を考慮した「制御積雪荷重」の評価が可能になる。また、滑落に要する日数を検討する過程で、滑落時における屋根雪の雪質が明瞭になることから、その雪質に対応した屋根雪と屋根葺材との摩擦係数が評価できる。この摩擦係数から屋根雪の滑落に必要な屋根勾配の設定が可能になると言える。

## 第6章 参考文献

---

- 1) 小竹達也, 他4名: 積雪地域に建設される膜構造物における屋根上積雪荷重の評価について, 日本建築学会技術報告集, 第3号, pp. 34-39, 1996.10
- 2) 倉橋勲, 他4名: (仮称) 但馬ドームの積雪荷重の検討, 日本建築学会技術報告集, 第5号, pp. 91-95, 1997.12
- 3) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, 第5章, pp. 168-235, 1993
- 4) 木村幸一郎: 屋根上積雪の自然落下について, 日本雪氷学会誌, 第5巻7号, pp. 6-9, 1943.7
- 5) 清原潔: 住宅屋上積雪の建築計画的取り扱い方法に関する研究, 北海道寒地建築研究所研究報告, No.5, 1960.2
- 6) 気象庁編: 地上気象観測原簿データ (CD-ROM), 気象業務支援センター
- 7) 和泉正哲, 三橋博三, 高橋徹: 年最大積雪深の確率統計的性質と再現期間推定法, 日本建築学会構造系論文集, 第390号, pp. 49-58, 1988.8
- 8) 和泉正哲, 三橋博三, 高橋徹: 年最大積雪強度深の統計的性質とその地域特性, 日本建築学会構造系論文集, 第392号, pp. 68-77, 1988.10
- 9) 小島賢治: 雪と氷10問8答, 日本雪氷学会誌, 第48巻, 3号, pp. 159-167, 1986.9
- 10) 伊東敏幸, 苫米地司, 星野政幸: 劣化した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. 2-10, 1994.4
- 11) 大塚清敏, 他5名: 膜構造物の融雪・滑雪に関する研究, 膜構造研究論文集'91, No.5, pp. 93-104, 1991.12
- 12) 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
- 13) ISO/DIS 4355: Bases for design of structure Determination of snow loads on roofs, 1992
- 14) American National Standards Institute: American National Standard minimum design loads for buildings and other structures, ANSI A 58.1-1982, 1982
- 15) 建築学会: 戦時建築規格欄(第1報), 建築雑誌, 第58輯, 第712-3号, 1944.9
- 16) 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, 第41巻3号, pp. 199-204, 1979.9
- 17) 三橋博三: 設計用雪荷重の問題点, 日本雪工学会誌, Vol.8, No.1, 1992.1
- 18) 清水増治郎, 木村忠志: 氷点下における雪の屋根材への付着, 日本雪氷学会誌, 第54巻3号, pp. 269-275, 1992.9
- 19) 渡辺正朋: 屋根葺材と雪氷との凍着強さに関する研究, 第9回日本雪工学大会論文報告集, pp. 127-130, 1993.1
- 20) 吉田光則, 他7名: 着冰雪防止技術に関する研究, 各種材料の着氷力について, 北海道の雪氷, 第12号, pp. 24-26, 1993
- 21) 苫米地司, 伊東敏幸: 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, 第56巻3号, pp. 215-222, 1994.9
- 22) 千葉隆弘, 高倉政寛, 苫米地司: 滑雪現象が発生するまでの単位積雪重量に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.72, pp. 57-60, 1999.3
- 23) 苫米地司, 遠藤明久: 積雪密度と根雪機関との関係について, 日本建築学会学術講演梗概集B, pp. 61-62, 1988.9



## 第 7 章 結論

	pp.
7.1 研究の総括 -----	7- 1
7.2 今後の課題 -----	7- 7
参考文献 -----	7- 7

## 第7章 結論

### 7.1 研究の総括

屋根雪を積極的に滑落させる処理を採用した建物における積雪荷重評価の現状についてみると、我が国では、この処理を考慮した積雪荷重評価を行うことができる。建築基準法では屋根勾配の増減を指標として、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価が可能になっている。しかし、この法律での評価は、昭和19年当時の材料、技術水準下で公布された臨時日本基準規格第532号とほぼ同様の内容であり、抜本的な改定が行われないうまま、半世紀以上継続的に用いられている。一方、1993年に改定された日本建築学会建築物荷重指針では、屋根雪の滑落性能を考慮した制御積雪荷重を用いることができる。しかし、この指針は滑落の性能を評価する具体的な指標を明示してない。そのため、建物を設計する場合は、個々の建物に対して大型試験体を作製し、その試験体における屋根雪の滑落性能を屋外観測によって実証しなければならない。このように、我が国における積雪荷重の評価基準は、屋根雪の滑落が考慮されているものの、建物の設計に必要な資料や評価手法が十分に整備されていない現状にある。

このようなことから、本研究では、屋根葺材の表面性状および雪質を示す指標と屋根雪の滑落に及ぼす影響について実験的な検討を行い、これらの指標を用いることで屋根雪の滑落を定量的に評価できることを示した。さらに、実験の結果に基づいて、屋根雪が滑落するまでに要する日数、すなわち、積雪荷重の継続期間を気象資料から評価する手法を提案した。この提案に基づけば、屋外観測に依存しないで積雪荷重を算出することが可能となる。これらのことから、屋根雪の滑落現象に対応した積雪荷重評価の新しい手法を提案した。

本研究の各章で示した結果を要約すると次のようになる。

#### (1) 勾配屋根における滑落を考慮した積雪荷重評価の前提条件

屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を考える場合、屋根堆積した積雪全体が、一定の条件で規則的に滑落する必要がある。屋根面の一部で残雪すると、屋根上の積雪深が不均一になるため、積雪荷重を算定することが困難になる。このことから、屋根上の積雪深が不均一となる要因の一つとして、屋根雪の部分滑落現象に着目し、この現象の主要因について検討を行った。その結果を整理すると次のようになる。

1)既存建築物で発生している部分滑落現象の特徴から、この現象の発生する要因を仮定してモデル実験を実施したところ、実際の部分滑落を再現することができた。この結果から、部分的な滑落現象の発生要因は、屋根面の温度むらが生じ「けらば部分」で凍着抵抗力が発生する場合、棟部分に雪が跨って堆積した場合で発生すると考えられる。

2)部分的な滑落現象は、屋根雪の破断に伴って発生する。そのため、この滑落現象の発生には、積雪の破断抵抗力が大きく関与している。部分的な滑落現象に関するモデル実験を行った結果、破断を伴わない滑落（固定なし）は、屋根雪が移動開始して間もなく終了する。一方、積雪の引張破断を伴う滑落（1辺固定）の場合は、固定なしに比べて1.5倍の時間を要し、積雪のせん断を伴う滑落（2辺固定）および積雪の引張・せん断を伴う滑落（3辺固定）の場合では、5倍以上もの時間を要した。このように、滑落終了までに要する時間は、固定数が多くなるに伴い長くなる傾向となる。これらのことから、屋根雪の破断を伴う部分滑落は、その破断条件が変化することで、極めて滑落しにくくなり、規則的な滑落を大きく阻害すると考えられる。

3)部分滑落の特徴を滑落を支配する力学的要因から考察したところ、1辺固定のように、棟部の屋根雪のみが固定される状況では、勾配屋根における積雪荷重の評価に大きな影響を及ぼすとは考えにくい。すなわち、多量の残雪が長期にわたって存在し、屋根上の積雪が不均一となることが少ないと考える。残雪する部分の面積は、2、3辺固定のように、固定数の増加に伴って多くなる特徴を持っている。特に、3辺固定（棟・けらばの両方が固定）」の場合は、雪の引張・せん断抵抗力が同時に作用するため全面滑落が極めて発生しにくく、滑落したとしても残雪する部分の面積が多い。従って、屋根上積雪深が不均一になりやすいと考える。これらのことから、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価を行う場合、「3辺固定」のように、「けらば」と「棟部分」の雪が同時に滑落を抑制する状態にならないことが、評価の前提条件になると言える。

## **(2)屋根葺材の表面性状が屋根雪の滑落に及ぼす影響**

屋根葺材の表面性状と滑落との関係の評価する指標を提示することを目的とし、屋根葺材表面の凹凸性状、撥水性を示す接触角が滑落抵抗力に及ぼす固有の影響について実験的に検討した。その結果を整理すると、次のようになる。

1)屋根葺材の表面性状が及ぼす凍着・摩擦抵抗力の増減は、表面凹凸の形状を示す指標が最も支配的となる。表面凹凸の形状が凍着・摩擦抵抗力に及ぼす影響は、

凹凸の高低差を示す10点平均粗さ $R_z$ が最も支配的な指標となり、 $R_z$ が $100\mu\text{m}$ 以下の場合、 $R_z$ の増加に伴って凍着・摩擦抵抗力は増加する。一方、屋根葺材表面における凹凸の間隔 $S_m$ は、その値が大きくなると、屋根葺材表面の凸部と屋根雪との直接接触、さらに実質付着面積を減少させるため、凍着・摩擦抵抗力を減少させる効果を持っている。 $S_m$ による凍着・摩擦抵抗力の減少は、 $R_z$ が $100\mu\text{m}$ を越える場合に顕著にみられる。これらのことから、10点表面粗さ $R_z$ が $100\mu\text{m}$ 以下の屋根葺材では、 $R_z$ を指標とした滑落抵抗力の評価が可能と言える。しかし $R_z$ が $100\mu\text{m}$ を越える粗度の大きな屋根葺材の場合には、凹凸の高さを示す $R_z$ の他に、凹凸の間隔を示す $S_m$ 等の指標を用いて、屋根葺材の表面波形が滑落抵抗力へ及ぼす影響を十分に考慮する必要がある。

2) 屋根雪と屋根葺材との界面付近における水分状況は、摩擦係数に大きな影響を及ぼし、さらにその影響は屋根葺材の違いによる固有の特性を持っている。具体的には、しまり雪の場合、この雪の飽和含水率となる $10\sim 20\%$ で著しく滑落性能が低下する。この滑落性能の低下は、屋根葺材の表面粗さが大きいほど顕著となる。このことから、屋根雪の滑落を評価するためには、屋根葺材の凹凸形状を把握すると同時に、屋根雪と屋根葺材との界面における水分の介在状況についても十分に検討を行う必要がある。

3) 屋根葺材と屋根雪との界面における水分は、摩擦抵抗力へ及ぼす接触角の影響を希薄にする効果を持っている。屋根葺材と屋根雪との界面が水膜で満たされるようになると、屋根葺材と屋根雪との摩擦抵抗力は、水膜の厚さに支配されるようになり、接触角の影響を受けにくくなる。

以上のことから、勾配屋根の積雪荷重を評価しようとする場合、屋根葺材表面の凹凸性状および材料の撥水性に対応した滑落特性を十分に把握する必要がある。このような屋根葺材の表面性状を十分に考慮することで、屋根葺材の違いが雪の滑落に及ぼす影響等、屋根雪の滑落性能を評価することが可能になり、雪の滑落を考慮した合理的な積雪荷重評価につながると考える。

### (3) 屋根雪の雪質が屋根雪の滑落に及ぼす影響

屋根上に降り積もった雪は、その直後に滑落することが稀で、数時間～数日間にわたって屋根上に堆積した後に滑落するのが一般的である。この堆積期間中に屋根面に接する積雪は、外気温の変動や小屋裏からの伝熱によって、雪質が新雪からしまり雪、ざらめ雪等へと変態する。従って、滑落抵抗力を評価する場合、雪質に関わる要因を無視できない。このようなことから本章では、屋根雪の雪質

変化が摩擦抵抗力に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果を整理すると、次のようになる。

1)多雪地域における1～2月の平均的な外気温条件下において、一般的な戸建住宅の温度推移を想定したモデル実験を行った。その結果、屋根葺材と屋根雪との界面では、経時的に雪質が変化することが明らかとなった。雪質を示す一指標である雪粒径を測定したところ、その粒径は、72時間で0.3mm以下から1～2mmにまで粗大化することが明らかとなった。

2)屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒径は、経時的に粗大化することから、雪粒径と屋根雪の滑落との関係について検討を行った。滑落抵抗力の指標は、プラス温度での滑落を支配する摩擦抵抗力とした。検討の結果、屋根葺材と屋根雪との界面が湿潤してゆく過程において、雪粒径は摩擦抵抗力の増減に影響を及ぼしていることが明らかとなった。摩擦抵抗力に及ぼす雪粒径の影響は、粒径0.3～0.5mmのしまり雪で最も顕著となり、摩擦抵抗力が最も大きい。一方、粒径1.0～2.0mmのざらめ雪における摩擦抵抗力は、しまり雪の場合に比べて1/2～1/3程度となる。このように、雪粒径の違いによって、摩擦抵抗力は大きく変化することが明らかとなった。

3)ざらめ雪の摩擦抵抗力がしまり雪に比べて小さな値となる要因を明らかにするため、粒径の異なるガラスビーズをモデル雪として屋根葺材との摩擦抵抗力を測定した。この測定結果から、雪粒径が摩擦抵抗力に及ぼす影響について考察すると、次のことが言える。ざらめ雪の場合、雪粒径が大きいことから、屋根葺材と屋根雪との界面に水分が発生しても毛管現象が発生し難い。そのため、雪の内部に毛管現象で吸い上げる水分量が小さくなり、界面が融雪水で満たされやすい。また、粒径が大きい場合では、湿潤化に伴う雪粒子間の粘着抵抗力が小さくなる。さらに、粒径が大きい場合は、雪粒子と屋根葺材との直接接触の面積が小さくなる。これらの影響によって、ざらめ雪の摩擦抵抗力は、しまり雪に比べて小さな値になると考える。

4)勾配屋根の積雪荷重を評価しようとする場合、屋根葺材と屋根雪との界面における雪質を考慮する必要がある。本研究では、雪質が滑落に及ぼす影響を評価する指標として、雪粒径を提示し、雪粒径の粗大化に要する日数を用いた滑落の評価が必要であることを示した。

#### (4) 屋根雪の滑落までに必要な日数の提案

本研究では、滑落を抑制する抵抗力の増減特性および時系列との関わりを整理した。整理して得られた結果に基づき、凍着抵抗力に影響を及ぼす気温特性について統計処理を行った。次に、摩擦抵抗力に影響を及ぼす雪質の経時変化に関して実験・観測を行った。これらのことから、勾配屋根における積雪荷重の評価に必要な「屋根雪の滑落までに必要な日数」の算出し、我が国の積雪荷重評価へ提案を行った。その結果をまとめると、次のようになる。

1) 屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価を行う場合、屋根面に堆積した雪全体が規則的に滑落する必要がある。しかし、実際の滑落は、屋根の一部に残雪する部分滑落が多く、屋根上積雪深が不均一となる。屋根上積雪深が不均一になった場合には、滑落が発生しない屋根と同等の積雪荷重評価を行う必要がある。部分滑落の要因には、積雪の引張・せん断抵抗力が挙げられる。従って、滑落を考慮した積雪荷重の評価を行う場合には、これら抵抗力を解除できるような屋根形状の工夫を行い、建物の設計段階から部分滑落が生じないように十分検証を行う必要がある。

2) 屋根葺材と屋根雪との界面に作用する凍着抵抗力は、マイナス温度に極めて大きな値となり滑落が期待できない。一方、この抵抗力はプラス温度になると殆ど作用しなくなるので、滑落しやすくなる。このように、凍着抵抗力には、顕著な温度依存性があるため、屋根雪の滑落を評価する場合、無視できない。このことから、外気温の推移を指標として、凍着抵抗力が作用する日数の算出を試みた。この「凍着抵抗力の作用日数」は、屋根雪の滑落に及ぼす外気温の影響を評価する上で、重要な項目になる。

3) 屋根葺材と屋根雪との界面に作用する摩擦抵抗力は、プラス温度での滑落を大きく支配している。この抵抗力は、屋根葺材の表面性状の影響を受ける一方で、雪質の違いによっても大きく増減する。屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子が細かい場合は、屋根葺材と雪との界面で発生した水分が積雪内部に吸い上げられる現象（毛管現象）が発生するため、摩擦抵抗力が極めて大きくなる。一方、雪粒子が粗大化（1～2mm）した場合の摩擦抵抗力は、水分の影響を受けにくく、細かな雪粒子の場合に比べて全体的に1/2～1/6程度の値となる。このことから、「屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化日数」について検討を行った。この粗大化日数は、雪質が滑落に及ぼす影響を評価する上で、重要な指標になる。

4) 「凍着抵抗力の作用日数」と「屋根葺材と屋根雪との界面における雪粒子の粗大化日数」とを組み合わせて、滑落に要する日数の評価手法を提案した。この手法を用いると、日本建築学会における積雪荷重評価に必要な「屋根雪処理の日数」が明らかとなり、屋根雪の滑落を考慮した「制御積雪荷重」の評価が可能になる。また、滑落に要する日数を検討する過程で、滑落時における屋根雪の雪質が明瞭になることから、その雪質に対応した屋根雪と屋根葺材との摩擦係数が評価できる。この摩擦係数から屋根雪の滑落に必要な屋根勾配の設定が可能になると言える。

#### (5) 勾配屋根における屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の提案式

本研究で提案した勾配屋根における雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価手法を、式として示すと、以下の式1)～3)となる。

$d_a > d_p$  の場合 →  $t_s = d_a$  とする

$$\text{制御積雪荷重} = \rho_d \times S D_{d_a} \quad \dots \dots \dots 1)$$

$d_a < d_p$  の場合 →  $t_s = d_p$  とする

$$\text{制御積雪荷重} = \rho_d \times S D_{d_p} \quad \dots \dots \dots 2)$$

$$\rho_d = 2.22 t_s + 1.60 \quad \dots \dots \dots 3)$$

(苫米地による根雪期間と積雪密度との関係式<sup>1)</sup>)

ここに、

- $d_a$  : 凍着抵抗力の作用日数 (day)
- $d_p$  : 屋根雪と屋根葺材との界面におけるザラメ化日数 (day)
- $\rho_d$  : 屋根雪の滑落に要する日数内の最大単位積雪重量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $S D_{d_a}$  : 凍着抵抗力の作用日数内における最大差分積雪深 (m)
- $S D_{d_p}$  : ザラメ化日数内における最大差分積雪深 (m)

上記、式1)～3)は、屋根雪の滑落に影響を及ぼす外気温の変動および雪質の変態に対応し、マイナス温度となる場合が多い北海道、プラス温度となることが多い北陸地方等、各地方における気象条件を考慮した積雪荷重評価が可能となっている。また、本評価手法の積雪荷重は、気象資料等、汎用性の高い資料から算出される。このことは、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重を採用する建物が、大型試験体等を屋外に設置し、その試験体における数年間に及ぶ実測結果を基に滑落を評価している現状からみて、評価の一般化に大きく寄与できるものと考えられる。

## 7. 2 今後の課題

---

本論文では、滑落現象を支配する諸抵抗力の特性から、「滑落に要する日数」を示し、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重の評価手法を提案できたことから、一応の成果を得たと考える。しかし、本論文で示した積雪荷重の評価手法は、一連の実験的な検討から得られた基礎モデルであり、建築物の実設計に耐え得る段階まで成熟した評価手法となっていない。建築物の実設計に当たっては、屋根雪の滑落に関する信頼性等を十分に検証する必要がある。このような視点から、屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価に関して、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次のようになる。

1) 屋根雪の最下層部における雪粒径の粗大化速度は、外気温がプラス温度での滑落を大きく支配し、北陸地方等では、粗大化に要する日数が積雪荷重の継続期間となり得る。本論文では、雪粒径の経時的な粗大化について、モデル実験・屋外実測を行い、雪粒径の粗大化速度に関する基礎資料を提示したが、滑落の信頼性を評価できる段階までには到達していない。屋根雪の最下層における雪粒径が粗大化する速度に関しては、継続的に屋外観測等を含めた検証を行い、外気温推移の地域差、屋根上積雪深の増減が粗大化速度に及ぼす影響について検討する必要がある。

2) 屋根雪の滑落には、本研究で示した評価指標の他に、屋根葺材の劣化や屋根の葺工法等が大きく関わる。従って、本論文で示した提案を建築物の実設計に反映させるためには、建築材料学や建築施工学の要素を含んだ積雪荷重の評価体系を確立する必要がある。屋根葺材の劣化および屋根の葺工法の違いが積雪荷重に及ぼす影響を明らかにすることが、本論文に関する今後の大きな研究課題であると考えられる。

## 第7章 参考文献

---

- 1) 苫米地司，遠藤明久：積雪密度と根雪機関との関係について，日本建築学会 学術講演梗概集 B，pp. 61-62，1988. 9



謝辞	-----	X- 1
研究発表の目録	-----	X- 2
本研究で用いられる記号一覧	-----	X- 6

## 謝 辞

本論文は、筆者が北海道工業大学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「屋根雪の滑落と積雪荷重」に関する一連の研究成果をまとめたものであります。本論文をまとめるまでの過程では、多くの方々の多大なるご指導とご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

北海道工業大学 苫米地司 教授には、本論文をまとめるにあたり、研究手法から論文構成まで、終始暖かいご指導を賜りました。修士過程を修了後、博士後期課程に入学し、再び3年間の有意義な研究生活を送ることが出来たのも、公私にわたる先生のひとかたならぬお力添え無しには考えられません。今思いを巡らせますと、雪と建築に関する諸問題を扱う研究者の一員として建築雪氷工学研究室に在籍できたこと、常に快適な研究環境を案じてくださり、わがままな学生生活を送れたこと、合計6年の中で頂戴したご恩は書面で表現しきれません。ここに厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたりまして、多くのご指導、ご助言を賜りました北海道工業大学 藤野和夫 教授、田沼吉伸 教授に深謝いたします。各先生のお部屋をお尋ねし、雪の物性、建築構造と荷重との関わりに関するアドバイスを頂けたことは、筆者にとって有益な経験となりました。伊東敏幸 助教授には、本論文に関するご指導を賜りました他、筆者が大学4年次より合計6年間、屋根雪の滑落に関する実験手法等を基礎からご教示いただきました。また、幾度となく実験に立ち会ってくださり、実験の方向づけについて常に案じてくださいました。公私ともに大変お世話になったことにつきまして、ここに厚く御礼申し上げます。

本論文に関する実験を行うにあたり、雪物性の測定では、北海道大学低温科学研究所 堀口薫 助教授にご協力を賜りました。また、材料の撥水性に関する測定では、北海道工業試験場 吉田光則 氏にご協力を賜りました。両氏に、深く感謝申し上げます。

低温室での実験、電子顕微鏡による観察、雪の含水率測定におきましては、北海道工業大学 西安信 教授、高島敏行 助教授、佐々木正巳 助教授に、実験機器の使用等で便宜を図っていただきました。また、星野政幸 教授、大垣直明 教授は、ネガティブになりがちな筆者を常に激励してくださり、心の支えになりました。ここに深く御礼申し上げます。

本論文の執筆にあたり、筆者の先輩である日江金属株式会社 小林敏道 氏、明和学園山形敏明 氏、太陽工業株式会社 山口英治 氏は、論文の進捗状況等を案じてくださり、お会いする度に心強い励ましのお言葉とご助言を頂きました。諸先輩方の貴重なご助言につきまして深く感謝申し上げます。

本論文は、低温室や屋外での実験結果を主な結論の拠り所としております。何れの実験においても到底一人の手に負えるようなものではなく、筆者の後輩であります北海道工業大学 建築雪氷工学研究室、並びに建築材料学研究室の学部4年生、大学院生のご協力を頂きました。特に濱田信介 君、杉井英樹 君、堀貴弘 君、三尾和徳 君、長谷川哲哉 君、坂井秀年 君、千葉隆弘 君、高野正規 君、中田圭介 君には、低温条件下の過酷な実験や泊まり込みの定時観測等でお手伝い頂きました。本論文は、諸君と共に行った実験成果を基に論述されていることを記して感謝の意を表します。

2000年2月 高倉政寛

# 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, 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
- 2) 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.2-9, 1995.4
- 3) 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
- 4) T.Tomabechi, T.Ito & M.Takakura: Snow sliding on a membrane roof, *Third International Conference on Snow Engineering*, pp.341-344, May.1996.
- 5) 苫米地司, 高倉政寛, 伊東敏幸: 屋根葺材の表面粗さ特性が滑雪現象に及ぼす影響について, 日本雪工学会誌, Vol.12, No.3, pp.2-9, 1996.7
- 6) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 経時的に雪質の変化した屋根上積雪と塗装鋼板との摩擦特性, 日本建築学会構造系論文集, 第510号, pp.45-50, 1998.8
- 7) 伊東敏幸, 高倉政寛, 苫米地司: 屋根上積雪の経時的な雪質変化および摩擦特性, 日本雪工学会誌, Vol.15, No.1, pp.3-9, 1999.1
- 8) 高倉政寛, 千葉隆弘, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に滑落雪処理を用いる場合の制御日数について, 日本建築学会技術報告集, 第7号, pp.23-26, 1999.2
- 9) 高倉政寛, 千葉隆弘, 伊東敏幸, 苫米地司: 制御積雪荷重を用いる勾配屋根における制御日数について, 日本建築学会構造系論文集, 第528号, pp.53-57, 2000.2

### ・その他の論文

- 1) 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の評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第5号, pp.31-36, 1997.12
- 2) 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, 構造工学論文集, Vol.44B, pp.101-106, 1998.3

## ■ 大学紀要

- 1) 苫米地司, 伊東敏幸, 高倉政寛: 屋根雪の滑雪現象に関する基礎的研究, 北海道工業大学研究紀要, 第23号, pp.219-227, 1995.3
- 2) 伊東敏幸, 苫米地司, 高倉政寛: 屋根葺材の表面粗さ特性が滑雪現象に及ぼす影響, 北海道工業大学研究紀要, 第24号, pp.225-233, 1996.3

## ■ シンポジウム論文

- 1) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 大規模構造物における屋根雪処理に関する研究, 寒地技術論文・報告集, Vol.10, pp.307-310, 1994.11
- 2) 苫米地司, 伊東敏幸, 高倉政寛: 屋根葺材の表面性状が滑雪抵抗力に及ぼす影響について, 寒地技術論文・報告集, Vol.11, pp.432-437, 1995.11
- 3) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 滑雪現象の発生に影響を及ぼす外気温特性について, 寒地技術論文・報告集, Vol.13, pp.332-336, 1997.11
- 4) 伊東敏幸, 高倉政寛, 苫米地司: 屋根雪の経時的変態に伴う滑落雪性状の変化, 寒地技術論文・報告集, Vol.13, pp.352-337, 1997.11

- 5) 千葉隆弘, 高倉政寛, 苫米地司, 干場信司: 畜舎建築物における屋根雪の滑雪状況について, 寒地技術論文・報告集, Vol.14, pp.206-210, 1998.12
- 6) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根雪のザラメ化を利用した滑落雪の促進について, 寒地技術論文・報告集, Vol.14, pp.211-215, 1998.12

## ■ 学会学術講演

### 【日本建築学会】

#### ・北海道支部報告

- 1) 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研究 - その1 滑雪による制御方法の検討 -, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.73-76, 1994.3
- 2) 川上俊一, 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に関する研究 - その2 各種屋根葺材の滑雪抵抗力 -, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.77-80, 1994.3
- 3) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に関する研究 - その3 滑雪に及ぼす諸要因の検討 -, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.9-12, 1995.3
- 4) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の制御に関する研究 - その5 部分的な滑雪現象に関する検討 -, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.97-100, 1996.3
- 5) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 勾配屋根における滑雪抵抗力の増減要因に関する考察, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp149-152, 1998.3
- 6) 千葉隆弘, 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 勾配屋根における屋根上積雪荷重の評価に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp153-156, 1998.3
- 7) 伊東敏幸, 高倉政寛, 苫米地司: 屋根雪の滑落事故に関わる滑雪特性の考察, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp37-40, 1999.3
- 8) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 雪止め金具の設置に関する考察, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp41-44, 1999.3
- 9) 千葉隆弘, 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 滑雪現象が発生するまでにおける積雪単位重量に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp57-60, 1999.3

#### ・全国大会報告

- 1) 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B, pp.99-100, 1994.9
- 2) 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B, pp.101-102, 1994.9
- 3) 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 凍着強度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B, pp.103-104, 1994.9
- 4) 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B-1, pp.105-106, 1995.8
- 5) 苫米地司, 伊東敏幸, 高倉政寛, 西川薫: 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 -, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.767-768, 1995.8

- 6) 伊東敏幸, 高倉政寛, 苫米地司: 勾配屋根における屋根雪に関わる諸問題に関する基礎的研究—その4 屋根葺材の滑落雪性の評価方法—, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.127-128, 1997.9
- 7) 千葉隆弘, 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 勾配屋根における屋根雪に関わる諸問題に関する基礎的研究—その6 屋根葺材の滑落雪性の評価方法—, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.99-100, 1998.9
- 8) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 勾配屋根における屋根雪に関わる諸問題に関する基礎的研究—その7 屋根雪滑落に影響を及ぼす雪質について—, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.100-101, 1998.9
- 9) 伊東敏幸, 高倉政寛, 苫米地司: 勾配屋根における屋根雪に関わる諸問題に関する基礎的研究—その8 材料選定に用いる降雪性能に関する考察—, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.102-103, 1998.9
- 10) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 滑落雪現象を考慮した制御積雪荷重に関する研究, その1—積雪荷重の制御を行う場合の制御日数, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.301-302, 1999.9
- 11) 千葉隆弘, 高倉政寛, 苫米地司: 滑落雪現象を考慮した制御積雪荷重に関する研究, その2—勾配屋根における積雪単位重量の屋外観測とその結果, pp.303-304, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, 1999.9
- 12) 苫米地司, 千葉隆弘, 高倉政寛: 滑落雪現象を考慮した制御積雪荷重に関する研究, その3—制御日数内における積雪荷重の検討, 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.303-304, 1999.9

## 【日本雪氷学会】

### ・北海道支部報告

- 1) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 大規模構造物における屋根雪の降雪メカニズムに関する検討, 北海道の雪氷, No.13, pp.54-57, 1994.7
- 2) 伊東敏幸, 高倉政寛, 苫米地司: 屋根雪における積雪後のザラメ化に伴う摩擦抵抗力の変化, 北海道の雪氷, No.17, pp.38-41, 1998.8

### ・全国大会報告

- 1) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 勾配屋根における屋根雪の降雪形状について, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.74, 1994.9
- 2) 苫米地司, 伊東敏幸, 高倉政寛: 降雪による屋根雪の圧密変化について, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.25, 1995.10
- 3) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根葺材の表面性状が降雪抵抗力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, pp.26, 1995.10
- 4) 伊東敏幸, 高倉政寛, 苫米地司: 屋根雪の雪質変化が及ぼす降雪抵抗力への影響, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.89, 1997.10
- 5) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 勾配屋根における屋根上積雪荷重の継続期間について, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.90, 1997.10
- 6) 千葉隆弘, 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 畜舎建築物における降雪現象の発生状況について, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.157, 1998.10
- 7) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根雪のザラメ化が及ぼす降雪現象への影響, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.158, 1998.10
- 8) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の勾配低減について, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.59, 1999.10

## 【日本雪工学会】

- 1) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 各種屋根葺材の滑雪特性について, 第11回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 43-46, 1994. 11
- 2) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根上積雪荷重の評価方法に関する一考察, 第12回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 9-12, 1996. 1
- 3) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 屋根雪の滑雪現象に影響を及ぼす雪質について, 第14回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 19-22, 1997. 11
- 4) 千葉隆弘, 高倉政寛, 苫米地司: 降水量データを用いた勾配屋根における屋根上積雪荷重の評価について, 第15回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 145-146, 1999. 2
- 5) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 積雪の経時的な粒径粗大化を利用した滑落雪の促進について, 第15回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 125-126, 1999. 2
- 6) 苫米地司, 高倉政寛: 滑落雪処理を用いた制御積雪荷重に関する研究課題, 第16回日本雪工学大会論文報告集, 日本雪工学会誌, Vol. 15, No. 4, pp. 7-8, 1999. 12

## 【農業施設学会】

- 1) 苫米地司, 高倉政寛, 干場信司: 畜舎における屋根雪滑落の発生条件について—畜舎建築規制緩和に向けて2—, 農業施設学会大会講演要旨, pp28-29, 1997. 8
- 2) 高倉政寛, 苫米地司, 干場信司: 屋根雪滑落に影響を及ぼす外気温度特性について—畜舎建築規制緩和に向けて3—, 農業施設学会大会講演要旨, pp28-29, 1997. 8
- 3) 小林敏道, 高倉政寛, 千葉隆弘, 苫米地司, 干場信司: 畜舎建築における屋根上積雪荷重評価に関する研究—その1 滑落雪現象の発生状況について—, 農業施設学会大会講演要旨, pp. 604-605, 1998. 7
- 4) 高倉政寛, 千葉隆弘, 小林敏道, 苫米地司, 干場信司: 畜舎建築における屋根上積雪荷重評価に関する研究—その2 滑雪現象に影響を及ぼす温度条件について—, 農業施設学会大会講演要旨, pp606-607, 1998. 7
- 5) 千葉隆弘, 高倉政寛, 小林敏道, 苫米地司, 干場信司: 畜舎建築における屋根上積雪荷重評価に関する研究—その3 外気温度特性からみた勾配屋根における積雪荷重の評価—, 農業施設学会大会講演要旨, pp608-609, 1998. 7

## 本研究で用いた記号一覧

### 屋根雪の滑落抵抗力およびその算出に用いられる記号

- $L$  : 滑落方向の屋根雪の長さ (m)  
 $Z$  : 滑落方向に垂直な屋根雪の長さ (m)  
 $h$  : 雪の厚さ (m)  
 $\rho$  : 積雪密度 (単位積雪重量) ( $\text{kg/m}^3$ )  
 注)  $\rho$  を荷重として扱う場合は ( $\text{N/m}^3$ ) を用いる  
 $\theta$  : 屋根勾配 ( $^\circ$ )  
 $\sigma_t$  : 積雪の引張り抵抗力 ( $\text{N/m}^2$ )  
 $\sigma_s$  : 積雪のせん断抵抗力 ( $\text{N/m}^2$ )  
 $F_a$  : 凍着抵抗力 ( $\text{N/m}^2$ )  
 $\mu_s$  : 静摩擦係数  
 $\mu_k$  : 動摩擦係数  
 $F_t$  : 上部積雪の引張抵抗力 (N)  $\rightarrow F_t = h \times Z \times \sigma_t$   
 $F_s$  : 側部積雪のせん断抵抗力 (N)  $\rightarrow F_s = h \times L \times \sigma_s$   
 $F_{af}$  : 屋根面での凍着抵抗力 (N)  $\rightarrow F_{af} = L \times Z \times F_a$   
 $F_{sf}$  : 静摩擦抵抗力 (N)  $\rightarrow F_{sf} = L \times h \times Z \times \rho \times \mu_s$   
 $F_{kf}$  : 動摩擦抵抗力 (N)  $\rightarrow F_{kf} = L \times h \times Z \times \rho \times \mu_k$

### 屋根葺材の表面性状を示す記号

- $R_a$  : 中心線平均粗さ ( $\mu\text{m}$ )  
 $R_z$  : 10点平均粗さ ( $\mu\text{m}$ )  
 $S_m$  : 凹凸の平均間隔 ( $\mu\text{m}$ )  
 $\theta_c$  : 屋根葺材と水との接触角 ( $^\circ$ )  
 $\gamma_{lv}$  : 液体の表面張力 (J)  
 $W_A$  : 接着仕事 (J)  $\rightarrow W_A = \gamma_{lv} (1 - \cos \theta_c)$

### 屋根雪の滑落を考慮した積雪荷重評価に用いられる記号

- $r$  : 再現期間 (年)  $\rightarrow$  逆数 ( $1/r$ ) は, 非超過確率 (%) になる。  
 $S$  : 規準化変数  $\rightarrow S = \ln(\ln(r/(r-1)))$   
 注) 規準化変数  $S$  は, Hazen法によるプロット分散とした。  
 $d_a$  : 凍着抵抗力の作用日数 (日)  
 $d_p$  : 屋根雪と屋根葺材との界面における雪粒子の粗大化日数 (日)  
 $SD$  : 屋根雪が滑落するまでに要する日数内の最大積雪深 (m)  
 $SD_{aa}$  : 凍着抵抗力の作用日数内における最大差分積雪深 (m)  
 $SD_{ap}$  : 粗大化日数内における最大差分積雪深 (m)  
 $SD_{max}$  : 年最大積雪深 (m)  
 注)  $SD$ ,  $SD_{aa}$ ,  $SD_{ap}$ ,  $SD_{max}$  は, 再現期待値として算出した。  
 $\rho_d$  : 屋根雪が滑落するまでに要する日数内の最大単位積雪重量 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 注)  $\rho$  を荷重として扱う場合は ( $\text{N/m}^3$ ) を用いる