

大規模建築物における屋根雪の落下衝撃荷重  
に関する研究

2002年3月

小竹達也

## 総 目 次

### 第 1 章 序論

1.1 研究の背景	1- 1
1.1.1 建築物における雪氷害と対策	1- 1
1.1.2 落雪に対する構造設計上の取組み	1- 5
1.1.3 多雪地域に建つドーム建築物	1- 9
1.2 現在の積雪荷重評価について	1-15
1.2.1 日本における積雪荷重評価の現状	1-15
1.2.2 ISO および諸外国における積雪荷重評価の現状	1-15
1.2.3 衝撃荷重に関する規定上の取り扱いについて	1-16
1.3 これまでのアプローチとその評価	1-17
1.3.1 衝撃荷重に関する既往の研究	1-17
1.3.2 雪塊による衝撃荷重のメカニズム	1-18
1.3.3 衝撃荷重を評価するために（本研究の課題）	1-19
1.4 本研究の目的	1-20
1.5 本論文の構成	1-21
参考文献	1-24

### 第 2 章 雪氷塊の落下衝撃実験

2.1 はじめに	2- 1
2.1.1 衝撃荷重に関する既往の測定方法	2- 1
2.1.2 雪塊による既往の衝撃実験方法	2- 4
2.2 実験方法	2- 5
2.2.1 実験体制および実験装置	2- 5
2.2.2 計測装置（ロードセル）設置手順	2- 8
2.2.3 試験体（雪氷ブロック）	2-10
2.2.4 実験パラメータ	2-10
2.2.5 実験手順	2-11
2.3 実験結果	2-13
2.3.1 雪氷ブロックの密度	2-13
2.3.2 雪氷ブロックの状態と衝撃波形	2-13
2.3.3 エネルギー量と最大衝撃荷重	2-18
2.3.4 積雪密度と最大衝撃荷重	2-18

2.3.5	連続落雪による衝撃波形	2-21
2.4	まとめ	2-23
	参考文献	2-25

### 第3章 大規模建築物における滑雪性状の検討

3.1	はじめに	3- 1
3.2	大規模建築物の屋根材料について	3- 2
3.2.1	ステンレス材料概説	3- 2
3.2.2	膜材料概説	3- 2
3.3	大規模建築物における滑雪性状について	3- 6
3.3.1	札幌ドームモックアップによる滑雪実験	3- 6
3.3.2	札幌ドームにおける滑雪飛距離の測定	3-12
3.3.3	J R A新潟競馬場屋根モックアップによる滑雪実験	3-18
3.4	衝撃荷重に与える滑雪抵抗力の影響	3-30
3.4.1	検討の目的	3-30
3.4.2	実験結果の分析	3-30
3.4.3	屋根長さと滑雪抵抗の関係	3-31
3.4.4	まとめ	3-33
	参考文献	3-34

### 第4章 軒下堆雪形状による落下衝撃荷重の検討

4.1	はじめに	4- 1
4.2	大規模建築物における堆雪形状	4- 2
4.2.1	札幌コミュニティドームにおける堆雪形状調査	4- 2
4.2.2	こまつドームにおける堆雪形状調査	4- 8
4.2.3	札幌ドームにおける堆雪形状調査	4-14
4.2.4	調査結果のまとめ	4-19
4.3	堆雪形状と衝撃荷重の関係	4-20
	参考文献	4-22

### 第5章 動的応答解析による落下衝撃荷重の検討

5.1	雪氷塊の衝撃荷重の評価方法	5- 1
5.1.1	構造物に対する耐衝撃設計法の現状	5- 1
5.1.2	雪氷塊の衝撃波形特性	5- 3

5.2	雪氷塊の落下衝撃荷重による動的応答解析	5- 4
5.2.1	動的応答解析概要	5- 4
5.2.2	解析モデルおよび衝撃荷重の設定	5- 6
5.2.3	静的解析	5- 9
5.2.4	動的応答解析	5-10
5.3	まとめ	5-15
	参考文献	5-16

## 第6章 雪氷塊の落下衝撃荷重の評価

6.1	はじめに	6- 1
6.2	動的応答解析による評価方法の提案	6- 2
6.2.1	解析用波形モデルの設定	6- 2
6.2.2	破壊強度の設定	6- 3
6.2.3	衝突円錐形成時間の設定	6- 4
6.2.4	動的応答解析の流れ	6- 4
6.3	静的解析による評価方法の提案	6- 6
6.3.1	静的解析の必要性	6- 6
6.3.2	検討条件	6- 6
6.3.3	解析結果	6- 8
6.3.4	積的荷重解析による評価式	6- 9
6.4	まとめ	6-11
	参考文献	6-12

## 第7章 結論

7.1	研究の総括	7- 1
7.2	今後の課題	7- 6

謝辞	X- 1
研究発表の目録	X- 2

◆◆◆◆◆ 第1章 序論 ◆◆◆◆◆

1.1	研究の背景	1- 1
1.1.1	建築物における雪氷害と対策	1- 1
1.1.2	落雪に対する構造設計上の取組み	1- 5
1.1.3	多雪地域に建つドーム建築物	1- 9
1.2	現在の積雪荷重評価について	1-15
1.2.1	日本における積雪荷重評価の現状	1-15
1.2.2	ISOおよび諸外国における積雪荷重評価の現状	1-15
1.2.3	衝撃荷重に関する規定上の取り扱いについて	1-16
1.3	これまでのアプローチとその評価	1-17
1.3.1	衝撃荷重に関する既往の研究	1-17
1.3.2	雪塊による衝撃荷重のメカニズム	1-18
1.3.3	衝撃荷重を評価するために（本研究の課題）	1-19
1.4	本研究の目的	1-20
1.5	本論文の構成	1-21
	参考文献	1-24

## 第 1 章 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 建築物における雪氷害と対策

わが国の豪雪地帯は国土の半分以上を占めており、積雪や寒冷による災害も様々な形で発生している。ここで、豪雪地帯とは、昭和 37 年「豪雪地帯対策特別措置法」に基づき指定された、毎年の積雪の 30 年以上の平均値の一冬の累計が 5,000cm 以上の地域で、一定の条件を満たしている都道府県または市町村をいう<sup>1)</sup>（以下、この地域を本研究では、「多雪地域」という）。多雪地域では、降雪や積雪により建物の損壊等の直接的な被害から交通機能の途絶、混乱、麻痺による都市機能の低下等の間接的な被害まで様々な災害（雪氷害）が発生している。<sup>2)</sup>

雪氷害の中で建築物に関するものには、屋根上で起こる「雪庇・氷柱・まきだれ・すがもり」、建物表面で起こる「凍害」、地中で起こる「凍上」、建物内で起こる「結露」が挙げられる<sup>3)4)</sup>。

このうち、屋根上での雪氷害は、その規模が増大すれば、風による偏分布や滑落による片荷重等の積雪荷重評価に問題を残し検討が不十分な場合には、部分的な損傷に留まらず建物の倒壊にまで至る可能性もある<sup>5)</sup>。また、雪庇やまきだれは落下し、下方の工作物や隣接する構造物を損傷したり、通行人に危害を与え、死に至る例が毎年発生している<sup>6)</sup>。これらの対策として、雪庇やまきだれが発生して落下するのを防止するために早期の除雪や雪庇防止ネットの設置等の対策がとられている<sup>7)</sup>（写真 1-1、2 参照）。

また、屋根上から落下した雪は、建物の周辺に溜まるため、落雪量に見合った堆雪スペースを建物周辺に確保しておくことが必要となる。十分な堆雪スペースがない場合は建物周辺で成長した堆雪山が壁面やガラス面に接触し、採光を遮るだけでなく、大きな側圧をかけ、ガラスを破損させることもある。敷地上の問題等から十分な堆雪スペースが確保できない場合や住宅規模の建物のように落雪速度が小さく、軒下近辺に落下、堆雪する場合は、一般には雪囲いを設置してガラスを保護するような対策がとられている<sup>4)8)</sup>（写真 1-3、4 参照）。勾配屋根を持った建物の場合は、屋根面に雪止めを設置し、屋根上積雪を落とさないようにする場合もある（写真 1-5 参照）。建設時にはあった建物周辺の空き地に、その後、他の建物が建った場合等によく行われる対策である。また、地域によっては流雪構により処理している場合もある<sup>9)</sup>（写真 1-6 参照）。なお、流雪溝とは、道路の路側に河川水や下水処理水が流れる溝を設置し、その水の流れる力を利用して道路周辺の雪を

運搬するための水路のことである。



写真 1 - 1 電線にかかった雪庇



写真 1 - 2 雪庇防止ネット

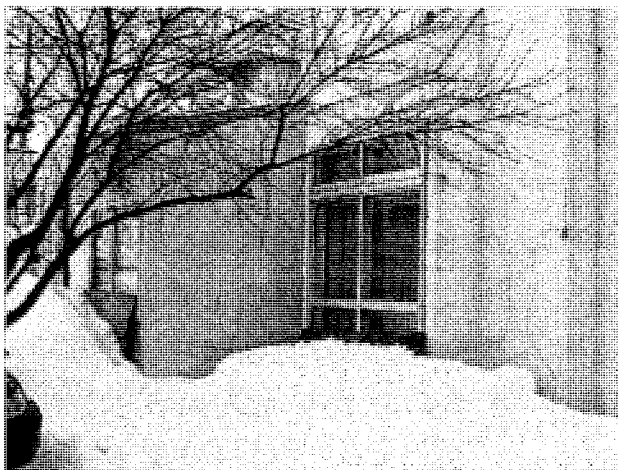


写真 1 - 3 雪囲いによるガラス面保護



写真 1 - 4 堆雪スペースのない住宅

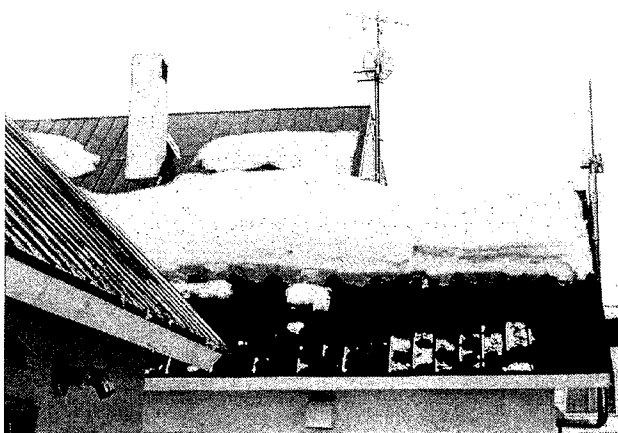


写真 1 - 5 雪止めによる落雪防止



写真 1 - 6 流雪溝による雪処理

ここで、屋根上での積雪現象について整理してみる。図1-1に屋根上積雪現象の相関図を示す。屋根上積雪現象には、一次現象として「雪庇・まきだれ・氷柱・吹雪・屋根上積雪」等の現象が挙げられる。これらの現象の発生後には「落下・移動・吹走」という現象の発生が想定される。ここでいう「移動」とは、斜面積雪がグライド、クリープ<sup>10)</sup>、重力により下方へずれる状況のことをいい、斜面上を滑る降雪は、「落下」に含むものとする。

次に、これらの現象によって起こる設計上の問題について考えてみる。飛雪・吹き溜まり<sup>11~15)</sup>や屋根上積雪荷重<sup>16~29)</sup>については、比較的多くの研究がなされているため、ここでは落雪現象に着目する。まず、「落下」した雪氷塊は、その下方にある地盤面や構造物に「衝突」する。このとき問題となるのが、構造物への衝突時の荷重である。構造設計をする上では衝突時の荷重（以下、衝撃荷重）を適切に評価する必要がある。このような例を構造的問題ということにする。また、雪氷塊が落下する位置への立入禁止や構造物を設置しないという計画上の配慮が必要になる場合がある。このような例を計画的問題ということにする。雪氷塊が何かに「衝突」すると、連続的に「飛散」及び「圧密」という現象が発生する<sup>30)</sup>。雪氷塊が飛散した場合、その飛散範囲内に工作物等があると二次的な衝撃荷重の検討が必要となってくる（飛散前の衝突による衝撃荷重を一次荷重とする）。また、雪氷塊の落下位置から飛散による四方への拡がりを考慮した範囲が落雪影響範囲となり、ここが動線計画と接しないような配慮が必要となる。

「圧密」については、時間変化により雪の自重で下層の密度が増加することが知られているが<sup>31)</sup>、ここでは衝突による外力によって密度が増加する現象のことをいう。もちろん密度が増す分だけ体積は減じるという関係は成立している。そして、落下現象の最終現象として「堆雪」が挙げられる。堆雪形状は、屋根上からの積雪量の他に、飛散距離や圧密により決定される現象であり、堆雪エリア上の積雪荷重や壁面等に接した場合の側圧等が構造的問題として挙げられる。

これらの関係をもてみると、落雪現象によって設計上問題となっていることは、全て「衝突」現象から始まっていることが分かる。従って、設計上の検討すべき項目は、衝撃荷重と何らかの関係を持っていると考えることができ、衝撃荷重を適切に評価することにより、他の現象のメカニズムや性状を明らかにできる可能性がある。また、計画的問題として挙げられている動線計画や堆雪エリアは、いずれも飛散距離が大きく関わっている。飛散距離は雪氷塊の衝突時のエネルギーによって決まるため、構造的問題である衝撃荷重により評価することができ、これまでも試み<sup>32)</sup>がなされている。このことから、計画的問題の課題は、構造的問題に含まれていると考えることができる。



表 1 - 1 に落雪現象における設計課題の関連度合について示す。本表では、表頭に並んだ設計課題に対し、表側の課題（要素）が大きく影響を受けている場合は◎、ある程度影響を受けている場合は○、少しは影響を受けている場合は△、影響を受けていない場合は－としている。本表を縦方向に見ることによって、各設計課題が、他の課題に対しどの程度の影響度を持っているかが分かる。これより衝撃荷重は他の課題に大きく影響を与えており、衝撃荷重に対する評価の重要性が伺える。

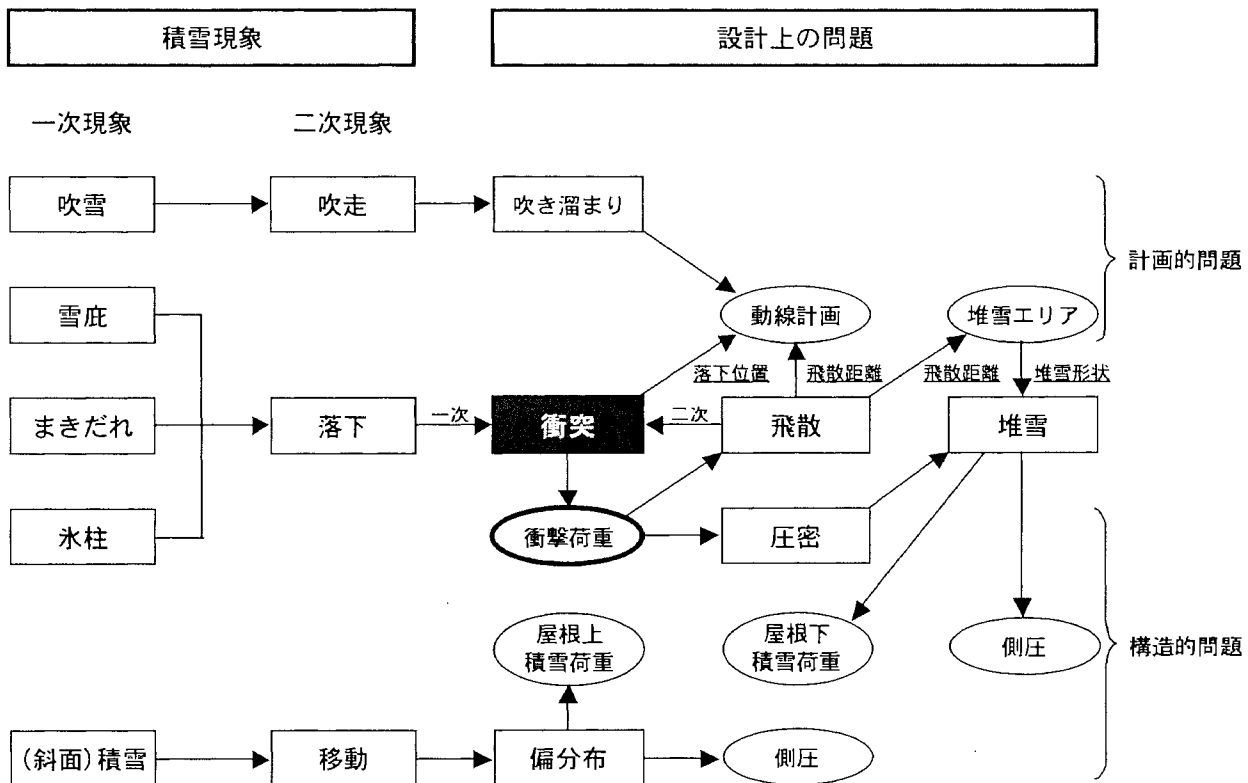


図 1 - 1 屋根上積雪現象の相関図（□囲い：現象 ○囲い：設計課題）

表 1 - 1 落雪における設計課題の関連度合

	設計課題				その他の項目			
	衝撃荷重	飛散距離	圧密	堆雪形状	雪密度	積雪深	屋根長さ	落下高さ
衝撃荷重	—	—	—	—	◎	○	○	◎
飛散距離	◎	—	△	—	◎	○	○	◎
圧密	◎	—	—	—	◎	○	○	◎
堆雪形状	◎	◎	◎	—	◎	◎	◎	◎

### 1.1.2 落雪に対する構造設計上の取組み

落雪現象による設計上の課題は、その衝撃荷重を適切に評価することにあることを前述した。しかし、多雪地域において頻繁に見られる落雪現象に対し、これまでは、屋根上の雪止めや雪庇防止ネットの設置等のように「雪を落とさない」という方針による対応をしてきたため、雪が落ちた後の十分な対応が取れていないという現状がある。また、屋根上積雪を落雪させる雪処理を行なっている建物は住宅規模のものが多く、落雪に対する構造的な対応や評価はあまり重要ではなかったといえる。むしろ、落雪屋根では堆雪エリアを確保したり、堆雪から壁面やガラス面を保護したりするような計画や運用的な対応が求められており、雪が落ちた後の構造的な対応はこれまでは殆ど必要とされなかった。また、多雪地域では東京都市部に建設されている超高層ビルのような高層建物がなく、比較的low層建物が多いため、設計的には落雪による荷重はあまり重要視されず、むしろ、都心部の方が数年に一度ある大雪によって落雪事故が発生し、それが問題となっている。これは設計上、落雪による衝撃荷重を考慮していないためであり、強化ガラス製の屋根で1メートルの積雪に耐える設計を行っていたが、ビル壁面上部に積もった雪が落下し、ガラスが割れたという事故例も報告されている<sup>33)</sup>。ここでいえるのは、たとえ積雪量が少なくとも高所から落下すれば、巨大なエネルギーを持った雪氷塊が衝突するということである。雪庇防止対策等を行っていない建物では、雪庇やまきだれが発生し、それらがある時に落下するということが十分想定できるが、殆ど雪の降らない都心部では多雪地域のような落雪対策も取られていないため、このような事故が発生している（写真1-7）。



写真1-7 雪氷塊の落下衝突により破損したガラス

このように落雪現象は、これまでは都市部で大きく問題となっている設計課題であるが、最近では多雪地域でも同様な問題が発生する条件が整ってきている。それは、ここ数年で大規模なドーム建築物が多雪地域に多数建設されたことにある<sup>34~35)</sup>。

図1-2に積雪地域におけるドーム建築物の計画に必要な検討事項を示す。ドーム建築物では屋根雪処理を滑雪により行なうのが一般的であり、屋根材料に透光性の高い膜材料を使ったドーム建築物では、より積極的に滑雪を促すような工夫がされている(次項参照)。つまり、高所からの落雪が頻繁に発生するため、それを前提とした設計が必要となってくる。また、集客性を上げるため市街地に建てられるケースもあり、付帯施設とドームとの間に十分なスペースが確保できず、落雪による衝突を考慮せざるを得ない状況も見られる。

また、巨大な屋根面積を持ったドーム建築物では、落雪後にドーム周辺に溜まる堆雪形状も大きな課題の一つである。ドーム屋根上での滑雪現象は、その滑雪開始高さや滑雪距離の長さから20m/s以上の速度で滑雪する場合がある。住宅規模であれば、滑雪速度も小さいため軒下付近に落下し堆雪するが、ドーム建築物では、滑雪飛距離も大きくなるため軒下から離れた位置に堆雪する等、これまでとは異なった現象をみせている。その他にも冬期動線を計画する上で、巨大なエネルギーを持った落雪による飛散を考慮することが重要である。

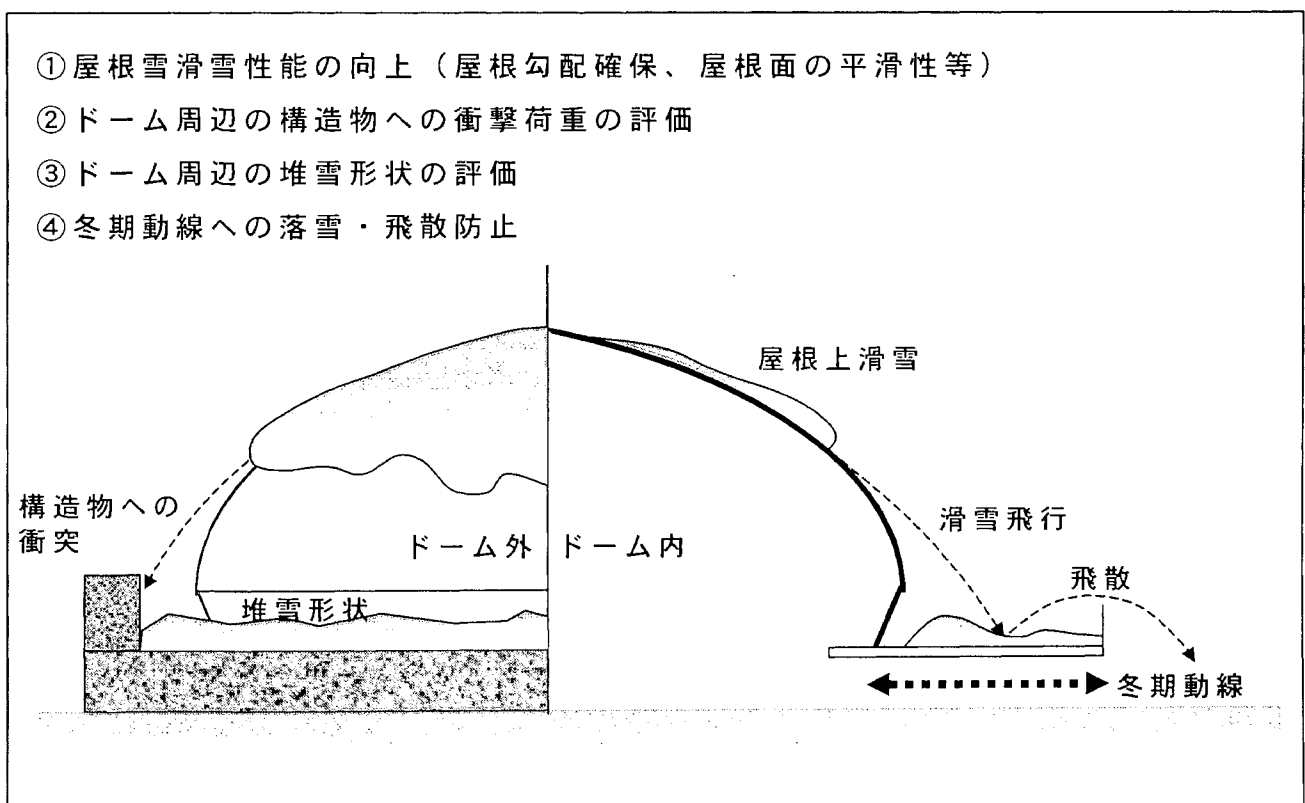


図1-2 ドーム建築物における主な雪対策項目

次に、大規模建築物における落雪被害の例をいくつか示す。写真1-8及び図1-3は落雪が壁面に取り付けられたアルミ製の笠木を直撃し破損した例である。大規模建築物の屋根頂部から滑雪した雪氷塊は衝突荷重も大きくなるが、飛距離も大きくなる。そのため、建築計画上、壁面位置を下げる事が出来ない場合等は取り付けディテールをもっと強固なものにする必要がある。

写真1-9及び図1-4は、段状の屋根において上段の屋根からの落雪が下段の金属屋根上に落下し、破損には至らないが変形させた例である。本例は上段屋根と下段屋根の最大高低差が十数メートルであるが、勾配を持った段屋根では上段の屋根からの落雪は下段の屋根上に衝突するため、特異なデザインをした高低差の大きな建物では材料強度を配慮した上で仕上げ材を選定する必要がある。

写真1-10及び図1-5は、高所からの落雪が地盤面に衝突し、その飛散塊が通路まで達したために、飛散防止用の柵を設けた例である。一次衝撃荷重が大きくなると飛散距離も大きくなるため、その範囲内に人の動線やガラスカーテンウォール等がある場合は、飛散対策が必要となってくる。

このように多雪地域において大規模建築物の設計をする場合は、多くのケースについて落雪に対する検討が必要となる。ただし、構造的に十分な強度を持った設計を行なうには、その適切な荷重設定が必要不可欠であるが、建築における衝撃荷重については特に基準もなく、参考となる資料も殆どないのが現状である<sup>36)</sup>。土木分野においては雪崩に関して幾つかの実験<sup>37~40)</sup>が行なわれ、その取り扱い<sup>41)</sup>についても示されているが、雪崩はその規模から衝突後の拡がり（下層になるほど）拘束された運動に対し、建築物からの落雪は衝突後に飛散という拡がりを持った運動であり、また各現象は発生する状況も全く異なっているため、その評価も異なったものになると考えられる。この点からも建築分野における衝撃荷重の評価方法の確立が必要である。



写真 1 - 8 落雪による笠木の破損

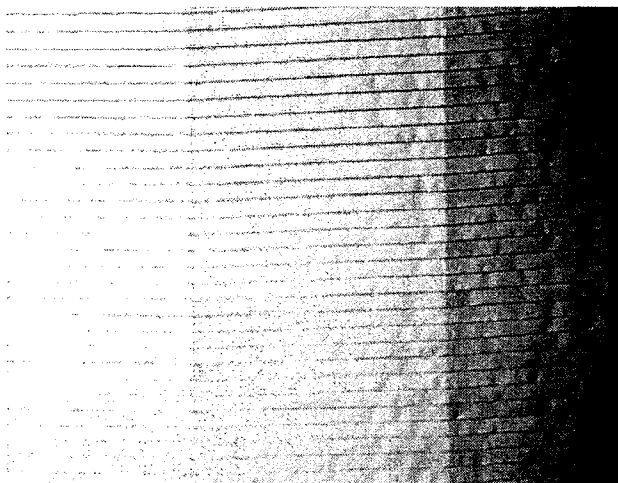


写真 1 - 9 落雪による金属屋根の変形



写真 1 - 10 落雪飛散防止柵

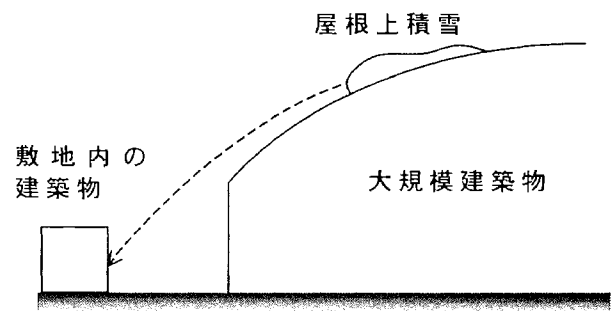


図 1 - 3 落雪の軌跡

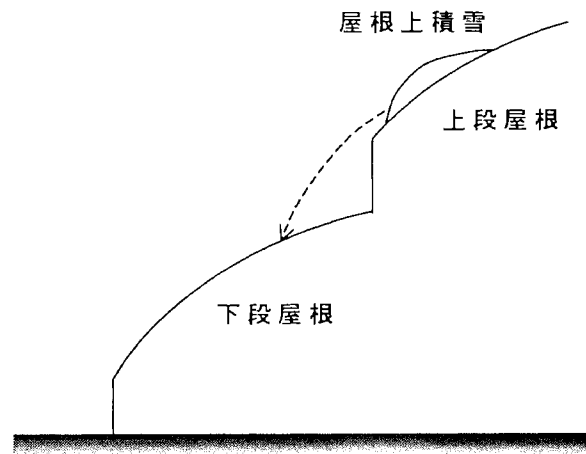


図 1 - 4 段差屋根における落雪現象

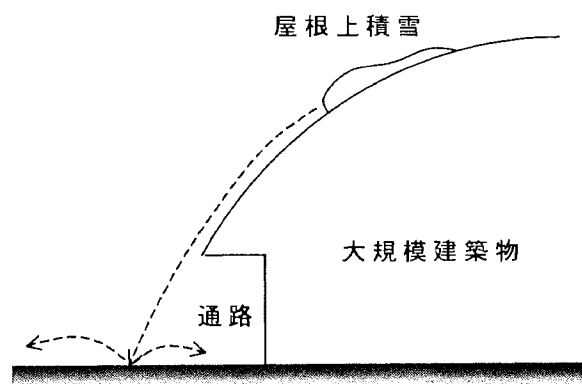


図 1 - 5 飛散塊の通路への侵入

### 1.1.3 多雪地域に建つドーム建築物

多雪地域において落雪による衝撃荷重という設計課題をクローズアップさせた大規模ドーム建築物であるが、ここでは多雪地域に建設された代表的なドーム建築物について紹介する。図1-6及び表1-2にその建設地と建物概要を示す。

近年、多雪地域において、ドーム建築物が建設されるようになった背景には、冬季には雪に閉ざされ、土のグラウンドや広場でスポーツやイベントが行なえないというこれまでの諦めに対し、ドーム建築物が技術的に実現可能となったことにより、冬季にもグラウンドが使えるようになったことと、その結果、これらの要望が更に高まり、市民ドームからスタジアムまで、多くのドーム建築物が建設されるようになったという現状がある。

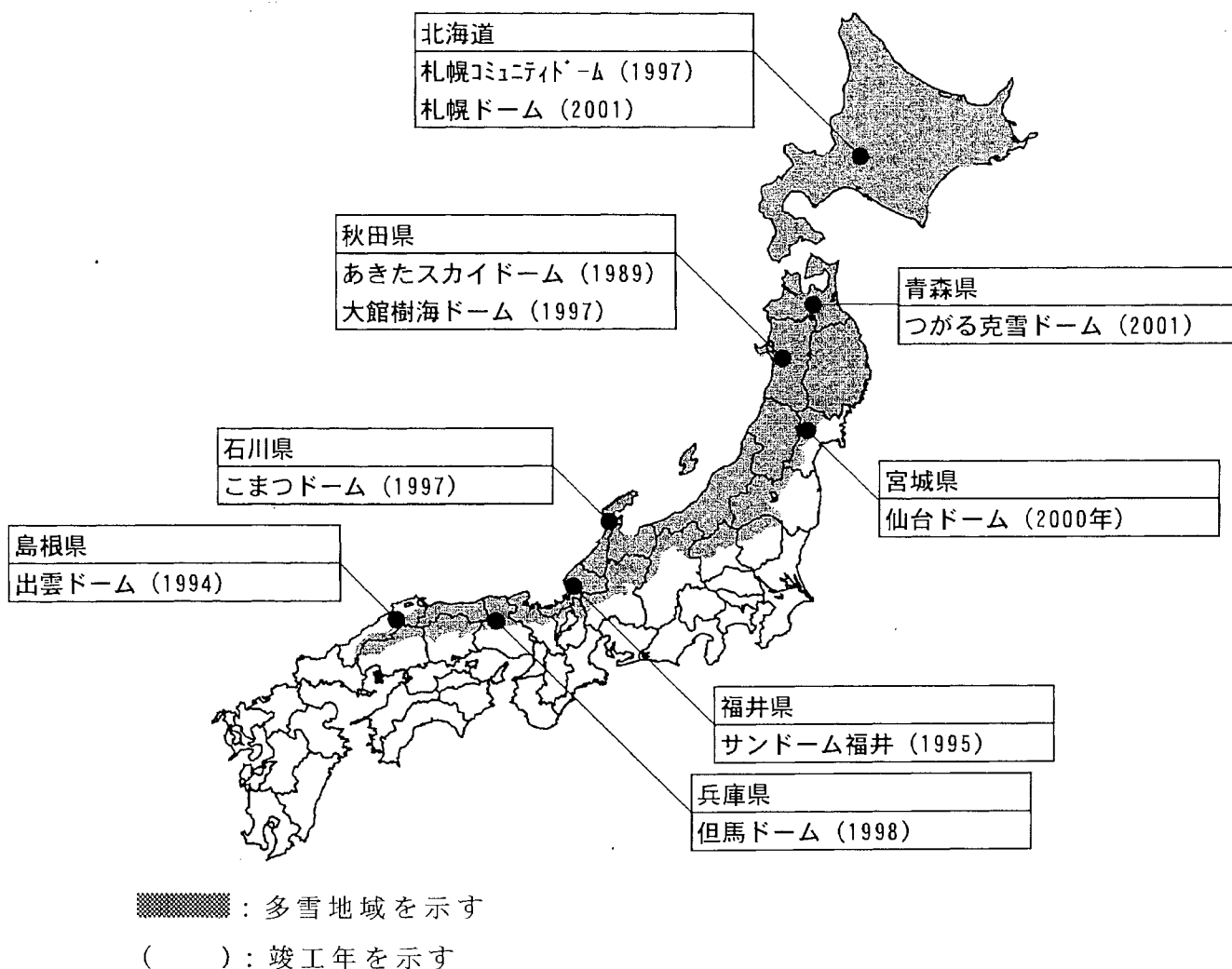


図1-6 多雪地域における主な大規模建築物（スパン100m以上）の建設分布図

表1-2 多雪地域における大規模建築物の概要(1/2)

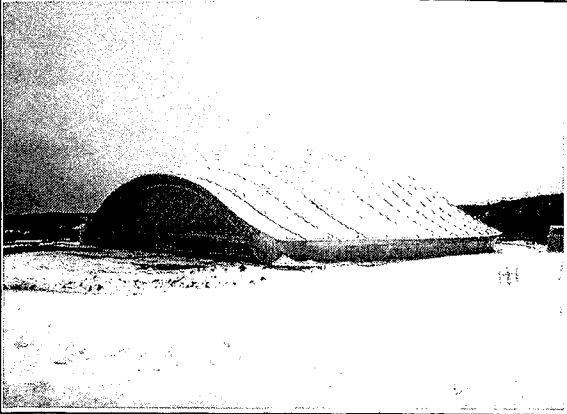
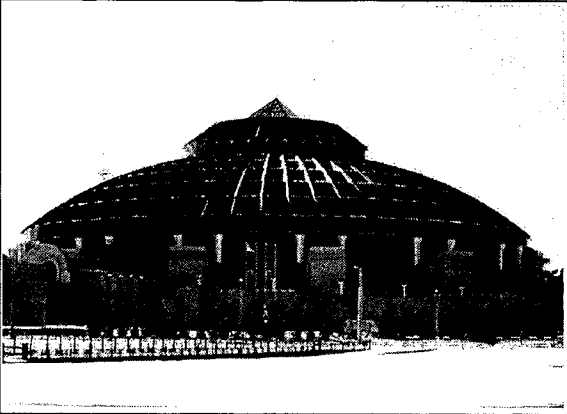

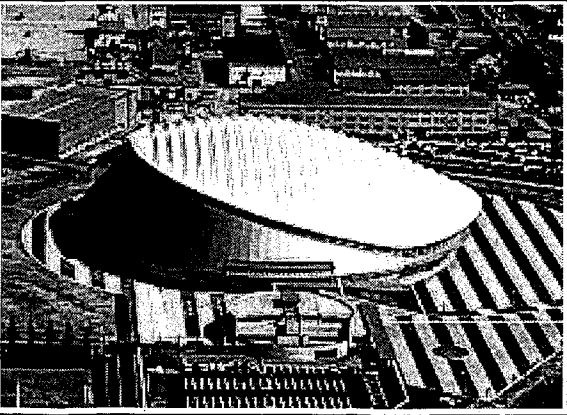

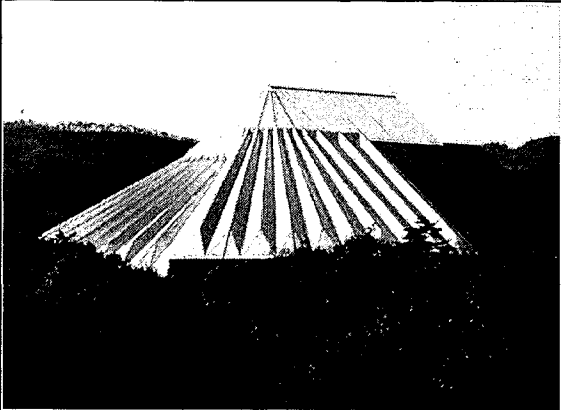
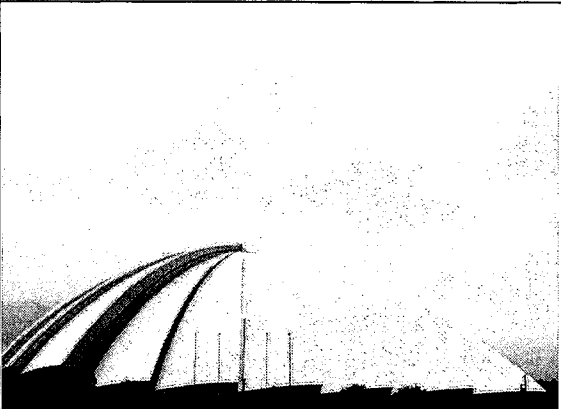
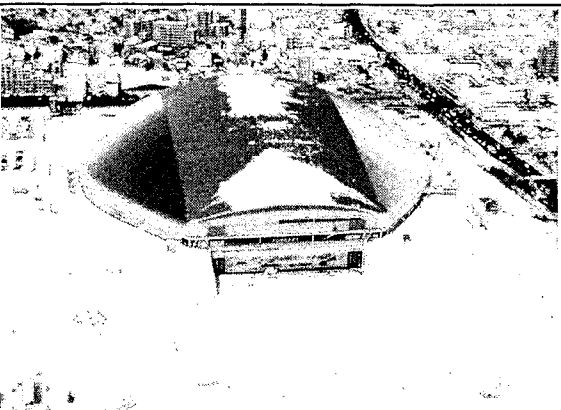
建築物の名称：あきたスカイドーム	
	<p>建設地：秋田県河辺郡雄和町</p> <p>主用途：多目的競技場</p> <p>建築面積：12,123.6m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：32.2m</p> <p>スパン：135m×101m</p> <p>屋根構造：鉄骨骨組膜構造</p> <p>屋根仕上：四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布</p>
建築物の名称：サンドーム福井	
	<p>建設地：福井県武生市</p> <p>主用途：展示施設、イベントホール</p> <p>建築面積：15,968m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：54.8m</p> <p>スパン：116m×116m</p> <p>屋根構造：スペースフレーム構造</p> <p>屋根仕上：耐候性鋼板パネル</p>
建築物の名称：こまつドーム	
	<p>建設地：石川県小松市</p> <p>主用途：スポーツ施設、集会施設</p> <p>建築面積：23,349m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：59.6m</p> <p>スパン：148m×160m</p> <p>屋根構造：鉄骨骨組膜構造</p> <p>屋根仕上：四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布</p>
建築物の名称：札幌コミュニティドーム(つどーむ)	
	<p>建設地：札幌市栄区</p> <p>主用途：スポーツ施設、観覧場、集会施設</p> <p>建築面積：17,865m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：43m</p> <p>スパン：140m×140m</p> <p>屋根構造：鉄骨骨組膜構造</p> <p>屋根仕上：四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布</p>

表1-2 多雪地域における大規模建築物の概要 (2/2)

建築物の名称：大館樹海ドーム	
	<p>建設地：秋田県大館市</p> <p>主用途：野球場および多目的競技場</p> <p>建築面積：21,910.7m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：52.0m</p> <p>スパン：178m×157m</p> <p>屋根構造：構造用集成材アーチ構造</p> <p>屋根仕上：四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布</p>
建築物の名称：但馬ドーム	
	<p>建設地：兵庫県城崎郡</p> <p>主用途：スポーツ施設、集会施設</p> <p>建築面積：20,387m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：59.8m</p> <p>スパン：150m×160m</p> <p>屋根構造：鉄骨造 亜鉛合金版</p> <p>屋根仕上：四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布</p>
建築物の名称：仙台ドーム	
	<p>建設地：宮城県仙台市</p> <p>主用途：スポーツ施設、観覧場</p> <p>建築面積：19,842m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：57.4m</p> <p>スパン：170m×150m</p> <p>屋根構造：鉄骨造フィーレンディール構造</p> <p>屋根仕上：四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布</p>
建築物の名称：札幌ドーム	
	<p>建設地：札幌市豊平区</p> <p>主用途：野球・サッカー主体のスポーツ施設</p> <p>建築面積：53,644m<sup>2</sup></p> <p>最高高さ：68m</p> <p>スパン：229m×218m</p> <p>屋根構造：鉄骨造直交格子アーチ構造</p> <p>屋根仕上：ステンレス</p>



1989年、秋田県雄和町に建設された「あきたスカイドーム（最大スパン122m）」は、土のグラウンドを持った膜屋根建築物であり、多雪地域の人々の要望を実現した最初の大規模建築物である。その後、青森屋内グラウンドサンドーム（青森県、1991年）や岩瀬スポーツ公園健康スポーツドーム（富山県、1991年）等が建設され、1995年から最大スパンが100mを超える大規模なドーム建築物が幾つか建設されている。これらには、サンドーム福井（スパン120m、福井県、1995年）、こまつドーム（スパン160m、石川県、1997年）、札幌コミュニティドーム（スパン132m、北海道、1997年）、大館樹海ドーム（スパン175m、秋田県、1997年）、但馬ドーム（スパン150m、兵庫県、1998年）、仙台ドーム（スパン150m、宮城県、2000年）、そして2002年のワールドカップ会場である札幌ドーム（スパン230m、北海道、2001年）がある<sup>34, 42)</sup>。これらの大規模建築物の特徴としては、スパン150m程度の市民ドームでは、膜構造建築物が多いことが挙げられる。これらの大規模建築物における屋根雪処理の方法を見てみると、サンドーム福井を除いた膜屋根建築物では滑雪または融滑雪による処理が行われている。これは、滑雪性と採光性の高い膜材料により冬季にも明るい内部空間を確保したいという要望によるものであり、膜構造建築物に用いられている膜材料の光の透過性状は、わずかな積雪でも損なわれるため、長期間屋根面に雪を積もらせない工夫が施されている。

屋根上に雪が残る原因としては、まず十分な屋根勾配が取れていないということが挙げられる。膜材料の場合、滑雪により屋根雪処理を行なうには、10°程度の屋根勾配が必要であることが実験により確認されている<sup>43)</sup>。従って屋根上に雪を残さないためには十分な屋根勾配を確保することが必要である。膜材料は滑雪性能の高い材料であるが、急勾配とすることでより確実な滑雪が可能となる。こまつドームでは、建設地近郊にドームと同じ屋根勾配25°の膜屋根試験体を設置し、24時間体制の観測を実施し、ドーム屋根勾配における滑雪状況について確認をしている<sup>27)</sup>（写真1-11）。

次に、屋根表面に滑雪の妨げとなるものを露出させないということが挙げられる。あきたスカイドームや青森サンドーム、岩瀬スポーツドーム等1990年代の前半に建設された膜構造建築物では、その張力導入を膜表面に配した押えケーブルで行なっている例が多々見られる。膜材料は滑雪性能が高いため、急勾配が確保されていれば滑雪は発生するが、円弧断面の建物の場合、屋根棟部に積もった雪は、屋根の低勾配と表面の押えケーブルへの付着により屋根上に滞雪する。これまでも表面のケーブルや軒先のボルトに付着した積雪により、滑雪が妨げられた例がいくつか報告されている<sup>44)</sup>（写真1-12～15）。最近では、表面には何も露出するものがないようにケーブル等を内側に配するような設計が行われている（写真1-16）。

その他には、切妻屋根等では屋根棟部で雪が繋がるため、滑雪を妨げる方向へ抵抗力が働き、屋根棟部に滞雪が見られる。そこで、最近では雪割や段差、V字溝型の屋根形状により、屋根上積雪を分断し連続性を絶ち、積雪の引張抵抗やせん断抵抗等による滑雪抵抗を除くような対応がよく見られる。(写真1-17)

このように大規模建築物では、滑雪処理がよく行われているが、この落雪現象において住宅規模の建物の場合と大きく異なるのが、衝撃と飛散である。数十メートルの高さから滑り落ちてきた雪氷塊は、巨大なエネルギーを持っており、地盤面や構造物への衝突が大きな問題となっている。落雪範囲に構造物を置かないことは勿論、地盤面に衝突した後の飛散対策も建築計画上の重要な検討要素となっている。

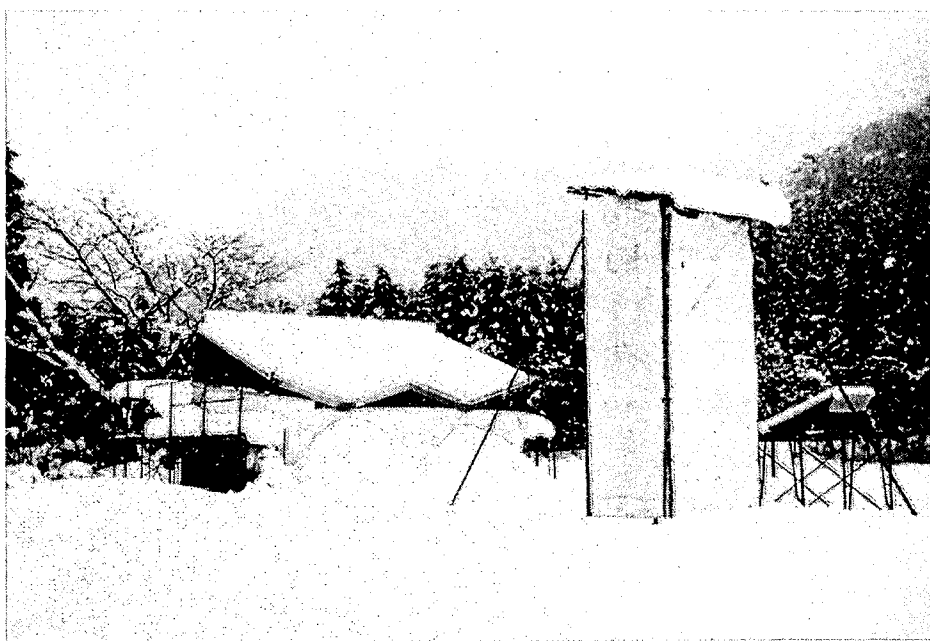


写真1-11 こまつドームの膜屋根滑雪実験

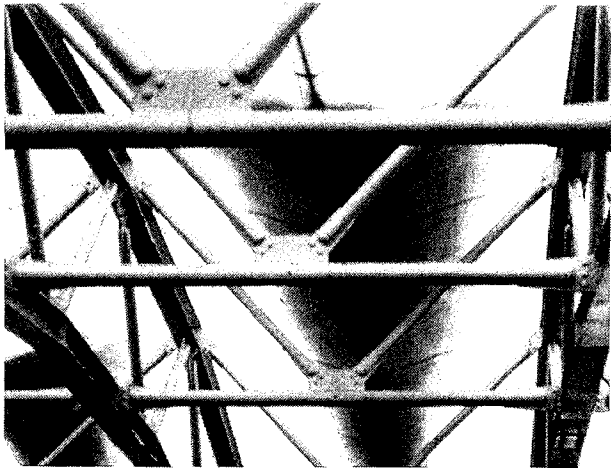


写真 1 - 12 ケーブルに付着した雪  
(サンドーム青森・内部)



写真 1 - 13 同左 (外部)

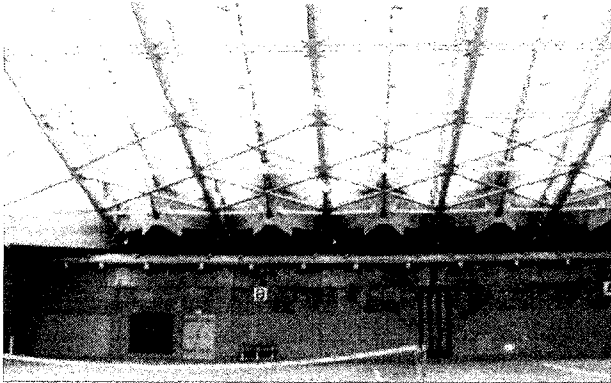


写真 1 - 14 軒先に残った雪  
(WAVE のと・内部)

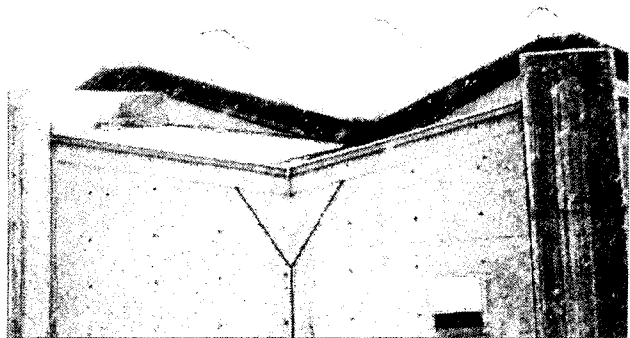


写真 1 - 15 膜のボルトに付着した雪  
(同左・外部)

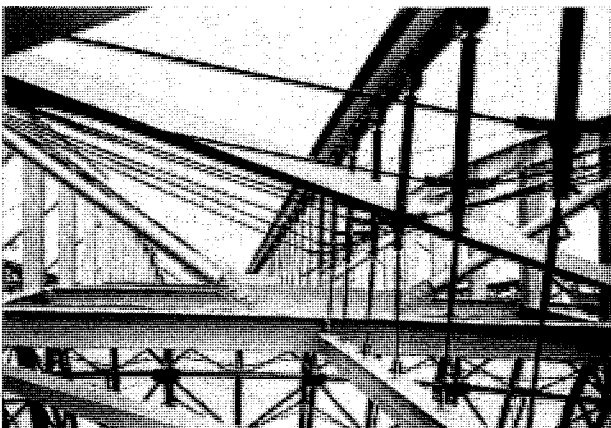


写真 1 - 16 内部からの張力導入  
(こまつドーム・内部)

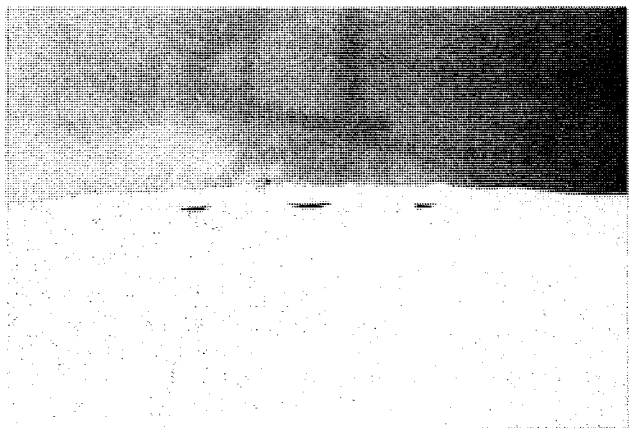


写真 1 - 17 V字溝型膜パネル  
(同左・外部)

## 1.2 現在の積雪荷重評価について

---

前節では、多雪地域において大規模建築物が多数建設されるようになり、それに伴い大規模落雪が発生し、構造的な設計対応が求められるようになってきたことを述べた。ここでは、国内外の規定における積雪荷重の評価内容について調査し、落雪に関する取り扱いについてその現状を報告する。

### 1.2.1 日本における積雪荷重評価の現状

#### (1) 建築基準法

建築基準法では、建築基準法第 20 条及び建築基準法施行令（以下、「令」という）第 86 条に屋根上積雪荷重の評価について規定されているが、それ以外の雪荷重に関する規定は全くなされていない。

#### (2) 日本建築学会建築物荷重指針

日本建築学会建築物荷重指針・同解説では、主に屋根上積雪荷重を定める方法が示されており、屋根上積雪荷重を制御する考え方が取り入れられている。また、局所的な屋根上積雪荷重として、「庇や多層屋根の建築物の下方の屋根で、上方の屋根から雪が落下する場合、状況によっては、飛距離や衝撃力も考慮しなければならない」旨が示されている。ただし、その評価方法については示されておらず、「衝撃力の評価については、参考となるデータが極めて少ないが、通常は重力の 2 倍程度を見ておけば良いであろう」<sup>36)</sup>という記述がされているに過ぎない。また、側圧や沈降力についても触れられているが、いずれも「考慮する必要がある」という記述のみで、具体的な評価方法については示されておらず、屋根上積雪荷重に関する評価に比べると、その評価方法は皆無に等しい。

### 1.2.2 ISO 及び諸外国における積雪荷重評価の現状

#### (1) ISO（国際標準化機構）

ISO における積雪荷重の規定<sup>45)</sup>も、屋根上積雪荷重に関するものである。屋根上積雪に影響を与える要因について係数値を定め、それを組み込むことによって屋根上積雪荷重を評価している。影響要因には、風（吹き溜まり、吹き払い）、熱（温度）、屋根材、屋根形状を挙げ、この中の屋根形状係数の項では、勾配低減係数、吹き溜まり係数、滑落係数について規定されている。この滑落係数とは、段差屋根等で上方の屋根から滑落した雪が下方の屋根上に堆雪する場合の評価係数であり、その荷重分布は、屋根形状に加え、雪質や上方屋根の滑落時の摩擦も考慮するとしている。また、この滑落荷重の大きさや分布は形状係数  $\mu_s$  に組み込まれ

ていおり、その分布は線形になると仮定されている。そして、最後に滑落による衝撃荷重について触れられているが、「段差屋根における滑落による衝撃荷重の効果については、設計者によって考慮すべきである。」の一文が記述されているだけであり、評価方法等については一切触れられていない。

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

アメリカの基準である本文献<sup>46)</sup>においても屋根上積雪荷重の考え方のみが記述されている。「Sliding Snow(滑雪)」に関する項が設けられているが、その内容は段差屋根において上方の屋根上積雪の滑雪により起こった下方屋根上の荷重の考え方についてのものであり、滑落時の衝突や衝撃に関しては全く触れられていない。なお、滑落による荷重についてはここでは、上方屋根上の全積雪が滑落したものと仮定して設計されるべきであり、既に積もっている下方屋根上の積雪によって上方屋根上の積雪の一部が滑落を妨げられたり、下方屋根上に上方から滑落した雪が残らないことが予測できる場合以外はその荷重を減じるべきではないとしている。

## (3) National Building Code of Canada

カナダにおける積雪荷重の規定<sup>47)</sup>は、アメリカの場合と同様に屋根上積雪荷重の考え方のみが記述されている。また、段差屋根における積雪荷重についても上方からの落雪や吹き溜まりを考慮することが述べられており、落雪による衝撃荷重や屋根下における積雪荷重に関しては一切触れられていない。

### 1.2.3 衝撃荷重に関する規定上の取り扱いについて

このように、各基準や規定で取り扱われている積雪荷重は、いずれも屋根上積雪荷重についてであり、それ以外の積雪荷重については、何も定められてない。唯一、日本建築学会の荷重指針においては、項目立てし、衝撃荷重についてもケースによっては検討すべきとしているが、その評価方法については、データ不足から実用的なものは示されていない。

また、諸外国の規定では、衝撃荷重について全く触れられていないが、ISOにおいて「衝撃荷重について設計者は考慮すべき」との記述があることから、積雪荷重としての衝撃荷重の重要性を認めてはいるが、日本と同様にその取り扱いについて明記するだけのデータがないため、規定できていない状況が伺える。

このような現状を鑑みると、衝撃荷重に関するデータを実験等により揃え、設計上の評価方法を提示することが、建築分野における積雪荷重に関する早急な課題であるといえる。

## 1.3 これまでのアプローチとその評価

---

### 1.3.1 衝撃荷重に関する既往の研究

これまでも落雪による衝撃荷重については、幾つかの実験が行なわれている。ここでは、これらの研究の概要を紹介し、その実験内容に対する課題について考察する。

阿部ら<sup>48)</sup>は、約 10kg の雪氷塊を長さ 3m の角パイプの梁の上に落下させて、そのたわみ量から衝撃荷重を求める実験を行っている。その結果、同じ大きさの静荷重と比較して、数十倍の荷重値となり、高さ 50cm からの落下でも 20 倍程度になることを報告している。また、同じ質量の鉄球との比較を行っており、雪氷塊の衝撃荷重は、鉄球の約半分となっている。

中村ら<sup>49)</sup>は、勾配可変式の屋根と 0.3m×1.0m の受圧板を縦方向に並べた測定壁を用いて、雪氷塊が壁に衝突したときの衝撃荷重を測定している。各受圧板は、水平方向の力に対して 4 つの支点で支えられており、このうち 2 つにはロードセルが設置されている。この実験結果より、落雪による最大衝撃荷重は、屋根勾配や壁面までの距離により異なるが、7~20kN/m<sup>2</sup> となることを示している。

古川ら<sup>50)</sup>は、断面積 0.45m×0.45m (0.2m<sup>2</sup>)、長さ 0.45~2.3m、密度 0.1~0.6g/cm<sup>3</sup> の雪氷塊を勾配 33° の樋状の滑り台で 6~16m/sec の速度まで加速し、3 個のロードセルで支持した 1.2m×0.9m の受圧板にぶつけて、支持点に作用した力をオシログラフに記録させる実験を行っている。この実験結果から、雪氷塊の衝撃波形は、最初の 100 分の数秒間にピークを示し、その後ほぼ一定の値を保ち、最後に 0 まで減衰することを示している。

阿部らの実験で得られた結果は衝撃荷重の最大値であり、衝撃荷重の評価もその最大値と静的荷重の比較により行なっている。高さ 50cm からの落下で 20 倍程度の差があるとする、例えば最大積雪量 1m、積雪荷重 30N/m<sup>2</sup>/cm の荷重状態と同じ積雪荷重で積雪量 5cm の雪氷塊が 50cm の高さから落下衝突した場合の荷重状態が同等になるということになるが、実際には二つの比較している荷重の間には時間的な差が存在しており、静的荷重が継続的な時間による荷重であるのに対し、衝撃荷重の最大値は一瞬の荷重であり、比較するには時間的な考慮が必要である。

中村らの実験は、その目的が防護壁の設計のため、受圧板を立てた状態で測定を行なっているが、もし汎用性を持たせるために、この結果から方向成分を取り出すとすれば、記録画像からの角度補正等を行なう必要がある。ただし、これは人的作業になるため誤差が生じる可能性がある。

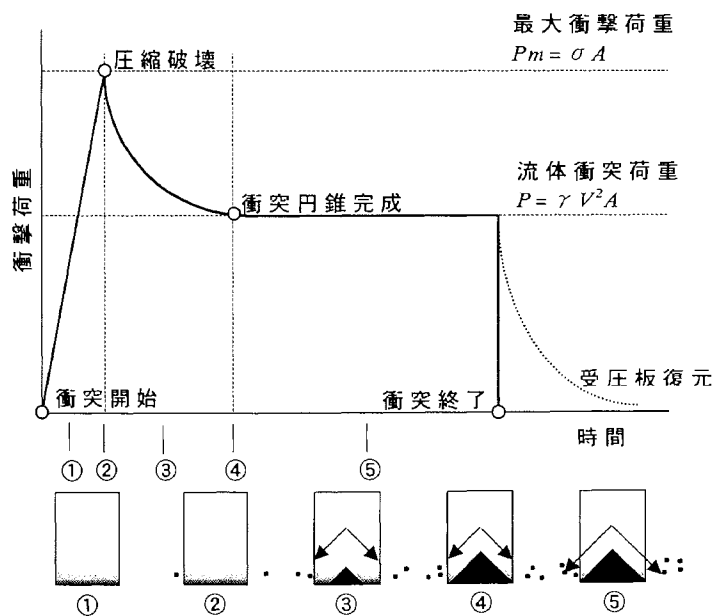
古川らの実験は、中村らの実験で挙げた課題に対し、受圧板を滑雪面に垂直に設

置することで解決できている。また、衝撃応答波形をオシログラフに記録することで、雪氷塊という物体の持っている衝撃特性を見出しており、衝突速度も実用的な範囲で行なっていることから、有効なデータが得られているといえる。ただし、衝撃荷重の評価方法が明確になっていないため、建築物の設計で使うには課題を残しているといえる。

### 1.3.2 雪氷塊による衝撃荷重のメカニズム

既往の研究における雪氷塊の衝撃実験から得られた衝撃応答波形をまとめると、図1-7に示したような模式図で表すことができる。これより雪氷塊衝撃荷重のメカニズムは、次のように説明することができる。

衝突の瞬間から圧縮破壊に達するまでの雪氷塊はほぼ弾性状態にあり（図1-7中①の状態）、圧縮破壊が起こってからは衝突断面を底面とした頂角約90°の円錐体を形成しながら（③の状態）、加力方向に対し90°の方向へ運動方向を転換する。ここでは、②～④の状況を衝突円錐形成過程、④～衝突終了の状況を流体衝突過程と呼ぶことにする。最大衝撃荷重  $P_m$  は、雪氷塊の破壊強度  $\sigma$  (N/m<sup>2</sup>)により求められ、雪氷塊の密度を  $\gamma$  (g/cm<sup>3</sup>)、衝突断面積を  $A$  (m<sup>2</sup>)とすると、 $P_m = \sigma A$  (N)で表され、流体衝突荷重は、ほぼ  $P = \gamma V^2 A$  (kN)で表されることが報告されている<sup>50)</sup>。



$\gamma$  : 積雪密度 (g/cm<sup>3</sup>)       $\sigma$  : 雪の破壊強度 (N/m<sup>2</sup>)  
 $A$  : 衝突断面積 (m<sup>2</sup>)       $V$  : 衝突速度 (m/sec)

図1-7 雪氷塊衝撃波形と雪氷状態の模式図

雪の破壊強度としては、密度  $\gamma=0.3\text{g/cm}^3$  で  $10\text{N/cm}^2$ 、 $\gamma=0.4\text{g/cm}^3$  で  $30\text{N/cm}^2$ 、 $\gamma=0.5\text{g/cm}^3$  で  $150\text{N/cm}^2$  となり、密度の増加に伴い破壊強度は急激に増加する傾向にあることが報告されている<sup>51)</sup>。ただし、これらのデータは、歪み速度  $10^{-4}\sim 10^{-3}/\text{sec}$  という非常に低い速度状態での結果であり、ドーム等の大規模建築物では、 $30\text{m/sec}$  もの速度で衝突する場合もあるため、その適応性に課題を残している。また、実現象としての落雪現象では、衝突した雪氷塊は、端部が破壊したり、雪粒が外へ飛ばされたりするため、最大衝撃荷重は、先の破壊強度とは異なったものになると考えられる。

### 1.3.3 衝撃荷重を評価するために（本研究の課題）

既往の研究を受けて、雪氷塊の衝撃荷重を評価するために、本研究でやるべきことについて整理する。まず、他分野における衝撃荷重の評価方法について調査する必要がある。建築の雪分野のように衝撃荷重が殆ど問題となっていなかった分野とは対照的に、その物体の衝突が前提となっている現象や状況に対して既に取り組んでいる分野では、すでに確立された評価方法や実験方法があり、雪氷塊の衝撃荷重を評価する上で大いに参考になる。

また、他分野との大きな違いとしては素材の違いが挙げられる。衝撃荷重というものが衝突速度、衝突面積、質量等から評価可能であれば必要ないが、応答波形等の素材独自の特性が評価上の項目としてあるのならば、その波形を適切に設定する方法を確立しなければならない。そのためには、十分な数のデータを実験等により得る必要がある。

そして、実験により得られた応答波形をどのように設計に組み入れるかが重要である。一般には、応答波形まで得られているのであれば、動的な解析により評価することが可能である。ただし、動的応答解析はデータ作成に多大な時間を要するため、より簡易な検討が可能な静的な荷重評価が望まれる。ここまでを本研究の成果目標とする。

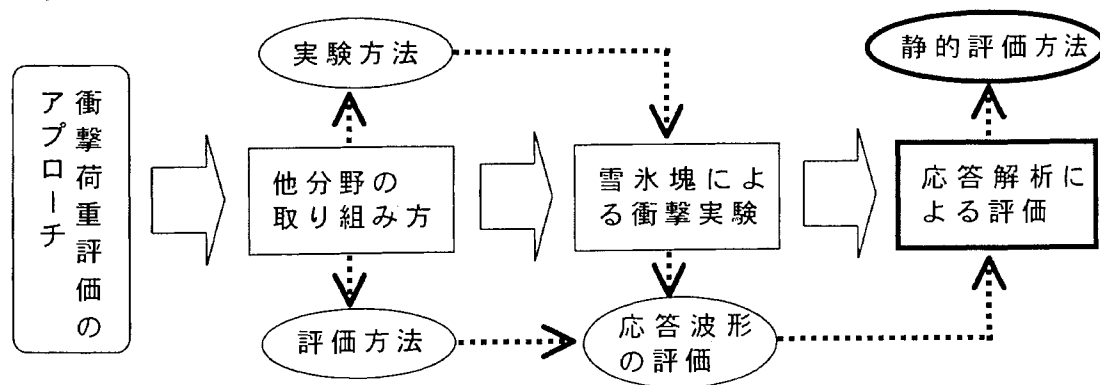


図 1 - 8 衝撃荷重評価の検討プロセス



## 1.4 本研究の目的

---

近年の多雪地域におけるドーム等の大規模建築物の建設ラッシュにより、多くの設計者たちは大きな難題に直面してきた。それは、屋根上積雪を滑雪により処理をする際に発生する「衝撃荷重」の評価方法である。最近の構造設計の分野では、コンピュータの目覚ましい発展と構造解析用ソフトの高機能化により、どんな複雑な構造物も設計可能となった。ただし、それは雪・風・地震といった設計荷重を適切に設定した上での話である。荷重設定が出来なければ、構造設計はできない。

前述したように、現在の基準では「衝撃荷重」を規定したものはなく、設計者が独自に評価する必要がある。しかし、十分な実験データもないため、これまでの設計者は、既往の研究や他分野の内容を参考に対応してきた。しかし、既往の研究では、1.3節で挙げたように、静的荷重とは異なった衝撃荷重の瞬間的に働く時間の評価や衝撃波形の設計的な評価について課題を残している。また、他分野の評価方法では、第5章で述べるが、その物性を考慮した動的応答による評価が必要であり、現状では雪氷塊という物体の特性が得られていないため、実験等によりデータを収集し、その物性を把握する必要がある。例えば、岩石等の衝撃については、土木分野における多くの実験から波形特性が得られているが、雪氷塊と岩石を比較した場合、岩石は固体であるが、雪氷塊は粘弾性を有した物体であり、気温や雪質によってもその物性が変化するため、両者の波形特性が大きく異なることは明白である。また、雪氷塊と同様な物性のものが存在しないため、雪氷塊による衝撃実験は必要不可欠である。

本研究では、設計者が建築物からの落雪現象による衝撃荷重に対して部材設計を行なうときに有効な資料を提供することを目的としている。そのため本研究では、以下の点を明らかにする。

(1) 衝撃荷重を評価する上で必要なデータを得る目的で、雪氷ブロックを用いた自由落下による衝撃実験を実施する。これにより雪氷塊における衝撃波形の表れ方の特徴とその原因、最大衝撃荷重と密度やエネルギー量との関係を調べ、衝撃荷重に関わる要因を明らかにする。

(2) 大規模建築物では屋根上での滑雪速度が大きくなるため、落雪後の衝撃荷重も大きくなる。屋根上積雪には滑雪時に空気抵抗、粘性抵抗、動摩擦抵抗等が働いており、滑雪速度はこれら滑雪抵抗の影響を受けている。そこで、実現象レベルでの滑雪現象を調査、実験し、衝撃荷重を評価する上での滑雪抵抗の影響度を明らかに

する。

(3) 落雪現象の最終現象は堆雪であり、その堆雪形状は衝撃荷重や落雪状況等により影響を受けているものと考えられる。そこで、衝撃荷重と堆雪形状の関係を把握するため、大規模建築物における堆雪形状を調査し、建築物の規模から衝撃荷重と堆雪形状の関係を求める。

(4) 上記の実験、調査より得られた知見を基に、雪氷塊の設計用波形モデルを提案し、動的応答解析による検討を行なう。ここで荷重設定の方法から解析までの一連の流れを示し、様々な異なった条件においても設計者が対応できるように、各数値の根拠が明確であるように配慮する。また、静的な検討にも対応可能なように、動的応答解析において想定される検討条件を増し、静的解析結果と比較することで、より一般解に近い評価値を求める。

## 1.5 本論文の構成

---

本論文は、図 1 - 9 に示すように全編 7 章で構成され、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章は、「序章」である。本章では、落雪現象に対する設計対応の現状を明確にし、既往の研究から得られた知見と落雪による衝撃荷重評価の重要性を示し、本研究の目的及び本論文の構成について述べている。

第 2 章は、「雪氷塊の落下衝撃実験」である。本章では、衝撃荷重を評価する上で必要なデータを得る目的で、雪氷ブロックを用いた自由落下による衝撃実験の内容について述べている。まず、他分野の衝撃実験方法について調査した上で、実験の目的に合った装置や方法を決定している。そして、雪氷塊の衝撃波形を把握するため、記録装置にはロードセルを用いて、時間 - 荷重曲線データを測定している。また、得られた波形データから、波形の表れ方の特徴、最大衝撃荷重と密度やエネルギー量との関係を求め、衝撃荷重に関わる要因について述べている。

第 3 章は、「大規模建築物における滑雪性状の検討」である。本章では、衝撃荷重に影響を与える主な要素である衝突速度に着目し、大規模建築物における屋根上での滑雪性状について述べている。滑雪性状を調べるため、大規模屋根のモックアップによる滑雪実験と実際のドーム建築物における滑雪調査を行なっている。ドーム建築物の調査では、これまでの実験レベルではない実際の屋根上積雪によって起

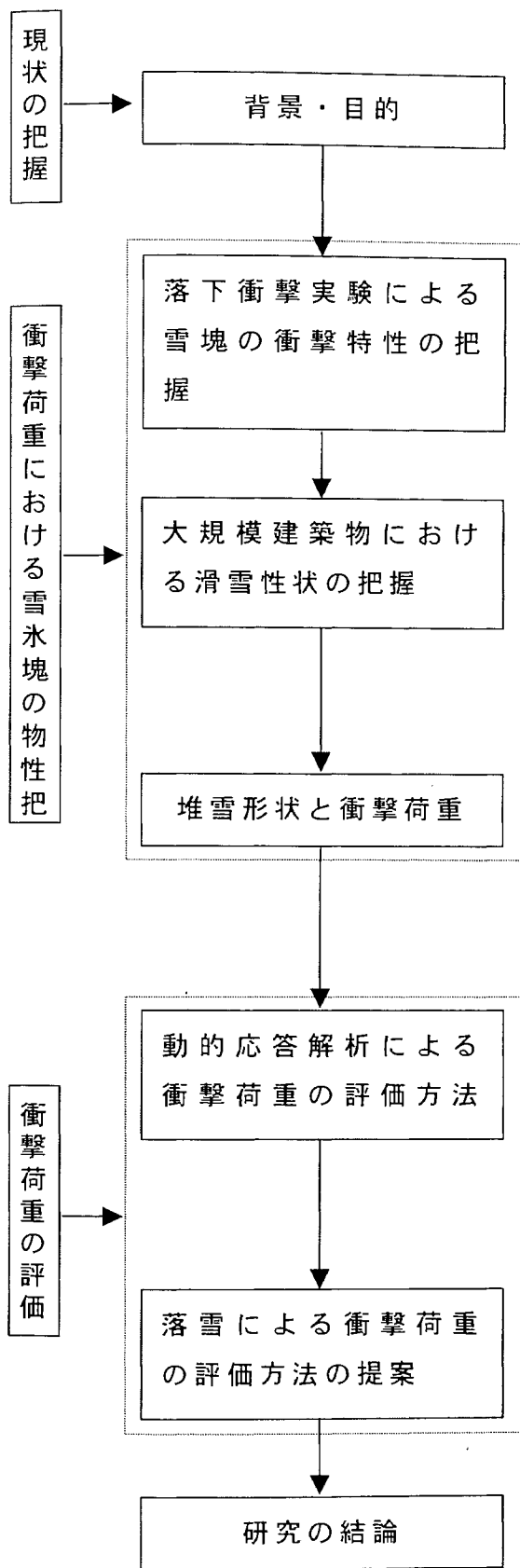
こる実滑雪現象を確認し、シミュレーションによる滑雪状況の検討結果と比較することで、その妥当性について示している。また、滑雪実験は、金属屋根と膜屋根について実施しており、曲面屋根におけるテイクオフ現象や摩擦抵抗、粘性抵抗、空気抵抗といった滑雪抵抗力の影響について述べている。そして、滑雪抵抗力が衝撃荷重には殆ど影響を与えないことを示している。

第4章は、「軒下堆雪形状による落下衝撃荷重の検討」である。本章では、落雪現象の最終現象である堆雪に着目し、堆雪形状と衝撃荷重の関係について述べている。まず、大規模建築物における堆雪形状を調査し、その形状的な特徴と形成過程を明確にしている。また、規模や屋根形状の異なる建築物を調査することにより、建物形状による影響を示している。

第5章は、「動的応答解析による落下衝撃荷重の検討」である。本章では、第2章の衝撃実験により得られた結果から雪氷塊の衝撃波形モデルを作成し、検討用構造物による動的応答解析を行なった結果について述べている。解析には汎用プログラムを用いており、構造物上の積雪荷重、衝突速度、最大衝撃荷重値等をパラメータにしたケーススタディを行なっている。その結果、最大応答値は載荷直後に発生し、その後は流体衝撃荷重による変位位置を軸に一次固有周期で振動することが述べられている。また、同じモデルで静的解析を行い、その結果と比較することで、応答解析による検討結果の荷重レベルを示している。

第6章は、「雪氷塊の落下衝撃荷重の評価」である。本章では、設計用衝撃荷重の設定方法について述べている。衝撃荷重の評価方法に2つの方向性を持たせており、動的応答による検討方法と静的な検討方法について示している。動的応答による検討では、既往の研究や衝撃実験により得られた知見から解析用波形モデルにおける破壊強度や衝突円錐形成時間等の設定方法と実際の解析の流れを示している。静的な検討では、第5章で行なった動的応答解析の想定される条件を増やし、静的解析結果と比較することによって、より一般解に近い評価値を求めている。

第7章は「結論」である。本章では、本研究により得られた大規模建築物における落雪の衝撃荷重の評価方法に関する考え方を総括して述べている。



第1章「序章」  
研究の背景及び目的  
衝撃荷重評価の現状

第2章「雪氷塊の落下衝撃実験」  
雪氷ブロックを用いた落下衝撃実験により衝撃波形データを記録し、雪氷塊の衝撃特性や衝撃荷重に与える要因について検討している

第3章「大規模建築物における滑雪性状の検討」  
実構造物や大規模モックアップによる滑雪実験、観測調査を行い、衝撃荷重に影響を与える主な要因である衝突速度の衝撃荷重に対する影響度について検討している

第4章「軒下堆雪形状による落下衝撃荷重の検討」  
大規模建築物の堆雪形状を調査し、落雪現象の最終事象である堆雪形状と衝撃荷重の関係について検討している

第5章「動的応答解析による落下衝撃荷重の検討」  
衝撃実験結果より設定した衝撃波形モデルを用いた動的応答解析を行い、最大衝撃荷重や時間等のパラメータが衝撃荷重評価に与える影響について検討している

第6章「雪氷塊の落下衝撃荷重の評価」  
前章までの結果をもとに、落雪による衝撃荷重の評価方法について検討し、動的応答による方法と静的な方法を提案している

第7章「結論」  
研究のまとめ  
今後の課題

図1-9 本論文の構成

## 第 1 章 参考文献

---

- 1) 国土庁地方振興局編：豪雪地帯の現状と対策、大蔵省印刷局発行、1991.8
- 2) 高橋博、他：雪氷防災（序章 雪氷災害とその特徴）、白亜書房、pp.2、1986.12
- 3) 日本建築学会編：建築教材 雪と寒さと生活 I 発想編、pp.64-67、1995
- 4) 小原誠、他：積雪寒冷地建築のディテール、ディテール No.50、彰国社、pp.99-122、1976
- 5) (社) 日本建築士事務所協力連合会：実務者のための積雪寒冷地建築技術資料 I、pp.63-81、1984.8
- 6) 高橋陽子、他：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 2 落雪による人身事故の発生状況）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.123-124、1997.9
- 7) 苫米地司：落雪氷に係る機能回復補償の取扱要領作成の資料に関する報告書、pp.2-1-2-14、1999.2
- 8) 中村秀臣：滑落した屋根雪の堆雪形状、日本雪氷学会、雪氷、第 40 巻、第 1 号、pp.37-41、1978
- 9) 高橋博、他：雪氷防災（第 4 章 雪氷害の実例とその技術対策）、白亜書房、pp.179-181、1986.12
- 10) (社) 日本建設機械化協会：新編 防雪工学ハンドブック（2.雪とその特性）、pp.44-45、1988.3
- 11) 苫米地司、他：屋根上で発生する吹雪量について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1023-1024、1993.9
- 12) 佐伯健一、他：模型雪を用いた風洞実験の適応性について（その 1～2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.111-114、1994.9
- 13) 野澤壽一、他：二段屋根上の吹き溜まりに関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.101-102、1995.8
- 14) 本郷剛、他：二次元フェンス周りの雪の堆雪に対する気流の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.105-106、1998.8
- 15) 土谷学、他：二段屋根上の雪の堆雪に対する気流の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.89-90、2000.9
- 16) 森晴勇、他：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
- 17) Thorburn H. J., et al., : Recent failures point out importance of snow loads on roofs, National Builder Vol.5, No.5, pp.18-21,1988
- 18) 大野和夫、他：札幌市内における積雪荷重の実態、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
- 19) 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

- 20)和泉正哲、他：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、pp.1025-1041、1984.10
- 21)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
- 22)三橋博三、他：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
- 23)新井覚、他：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
- 24)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
- 25)城攻、他：多雪地域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
- 26)川上俊一、他：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 回日本雪工学会大会論文報告集、pp.207-212、1994.11
- 27)小竹達也、他：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 回、pp.34-39、1996.10
- 28)倉橋勲、他：(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 回、pp.91-95、1997.12
- 29)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
- 30)渡辺正朋、他：屋根雪の滑雪制御に関する基礎的考察、日本雪工学会誌、Vol.13、No.1、pp.3-12、1997.1
- 31)(財)消防科学総合センター：地域防災データ総覧－危険物・雪害編、pp.199、1986
- 32)山口英治、他：膜構造物における滑雪時の性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.437、pp.91-96、1992.7
- 33)朝日新聞：平成 13 年 1 月 28 日社会面「大雪、交通網を直撃（ガラス割れる）」
- 34)日経アーキテクチャー：ドーム建築のすべて、日経 BP 社、1997.11
- 35)The Japan Institute of Architects：Nagano Winter Olympic Games Memorial International Seminar “Sports facilities in cold and snow-covered area”, 1998
- 36)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.212-213、1993
- 37)荘田幹夫：表層雪崩の秘密、雪氷 Vol.20、No.3、pp.31-32、1958
- 38)荘田幹夫：雪崩の運動、日本雪氷学会昭和 37 年度全国研究発表会講演概要、1962
- 39)斎藤外吉、他：雪崩防止工に関する研究、日本鋼管技法 No.24、1962

- 40) M. Shoda : An experimental study on the dynamics of avalanching snow, International Symposium on Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches, 1965.4
- 41) (社) 日本建設機械化協会 : 新編 防雪工学ハンドブック (3. 雪による障害発生とその機構)、pp.93-94、1988.3
- 42) 石井一夫 : 日本の膜構造・作品選集、SPS出版、1993.2
- 43) 苫米地司、他 : 膜構造物の屋根雪処理に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.426、pp.99-105、1991.8
- 44) 山口英治、他 : 多雪地域における膜構造建築物を対象とした屋根上積雪荷重の評価方法に関する研究、日本膜構造協会膜構造研究論文集'97、No.11、pp.55-60、1997.12
- 45) Kristffer Apeland : New Developments in Code Specifications and Standards for Snow Load, Summary Papers of 3rd International Conference on Snow Engineering, pp.385-402, 1988.7
- 46) American Society of Civil Engineers: ASCE7-95 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, pp.34-45, 1996
- 47) National Research Council Canada : User's Guide - NBC 1995 Structural Commentaries (Part 4), pp.54-71, 1996
- 48) 阿部宏侑、他 : 落雪による衝撃力について、北海道立寒地建築都市研究所調査研究報告書、pp.127-130、1977
- 49) 中村秀臣、他 : 滑落する屋根雪の壁面に及ぼす衝撃力. その 1、国立防災科学技術センター研究報告、第 25 号、pp.169-185、1981.3
- 50) 中俣三郎 : 雪塊衝撃の研究-I、鉄研中間報告 57-115、pp.1-39、1957
- 51) Mellor, Malcom : A review of basic snow mechanics. Proc. Int. Symp. on Snow Mechanics, Grindelwald. IAHS 114, pp.251-291,1975

◆◆◆◆◆ 第2章 雪氷塊の落下衝撃実験 ◆◆◆◆◆

2.1	はじめに	2- 1
2.1.1	衝撃荷重に関する既往の測定方法	2- 1
2.1.2	雪塊による既往の衝撃実験方法	2- 4
2.2	実験方法	2- 5
2.2.1	実験体制および実験装置	2- 5
2.2.2	計測装置（ロードセル）設置手順	2- 8
2.2.3	試験体（雪氷ブロック）	2-10
2.2.4	実験パラメータ	2-10
2.2.5	実験手順	2-11
2.3	実験結果	2-13
2.3.1	雪氷ブロックの密度	2-13
2.3.2	雪氷ブロックの状態と衝撃波形	2-13
2.3.3	エネルギー量と最大衝撃荷重	2-18
2.3.4	積雪密度と最大衝撃荷重	2-18
2.3.5	連続落雪による衝撃波形	2-21
2.4	まとめ	2-23
	参考文献	2-25



## 第2章 雪氷塊の落下衝撃実験

### 2.1 はじめに

第1章では多雪地域における近年建設された大規模建築物とその屋根雪処理及び設計上の考慮すべき点や現状の荷重評価<sup>1)~4)</sup>について述べた。その中から注目すべき項目としては、屋根上積雪荷重及び建物周辺に積もった雪の積雪荷重、側圧荷重の他に、屋根から落下する雪氷塊が下方の建築物に衝突する衝撃荷重及びその飛散対策等が設計時の大きな問題となっていること、及び雪氷塊の衝撃荷重については、土木分野の雪崩に関するものが幾つか文献に記述されているが<sup>5)</sup>、建築物で発生するような雪氷塊落下による衝撃荷重に関する記述は殆ど見られず、日本建築学会の建築物荷重指針・同解説においても積雪荷重として落雪の衝撃荷重をどう評価すべきか明確になっていないことが挙げられる。ここでは、設計用積雪荷重としての雪氷塊落下衝撃荷重の評価方法を確立するために、実験により雪及び氷ブロックが地面に衝突する時の衝撃荷重を実測し、衝撃荷重の定量化を図ることを目的とした実験を実施する。

#### 2.1.1 衝撃荷重に関する既往の測定方法

衝撃に関する実験は土木・建築の分野において、それぞれの目的に応じた衝突物、衝突速度、目標物を用いて行なわれている。その方法は様々であり、日々改良、開発が行なわれている。ここでは、雪氷塊の衝撃実験を行なうにあたり、既往の実験方法を調査し、本実験に有効な方法を検証する。

衝撃実験では、衝撃の程度（衝撃速度）によって、静的載荷、高速載荷、衝撃載荷に分類されている<sup>6)</sup>。しかし、実際には各載荷に明確な境界があるわけではなく、構造物の動的挙動は、載荷速度が速くなるにしたがって応力波による応答が卓越するとともに材料物性が変化するため、構造全体の応答から局所的な応答が支配的になり、歪速度効果による影響が大きくなっていくものと考えられている。したがって、衝撃実験を行なう場合には実験の目的を明確にし、載荷速度が速くなるほど現象が複雑になることを考慮して載荷装置や計測方法等を慎重に選定する必要がある。

使用される載荷装置や載荷方法はその載荷速度によって異なってくる。一般に $10^{-1}\text{sec}^{-1}$ 程度までは油圧またはギア式の載荷装置、 $10^{-1}\text{sec}^{-1}\sim 10^1\text{sec}^{-1}$ では高圧気体や機械による載荷、 $10^4\text{sec}^{-1}$ までは機械式または爆発力による装置等が使われており、土木・建築分野では、歪速度で $10^{-1}\text{sec}^{-1}\sim 10^1\text{sec}^{-1}$ 程度、衝撃速度では数 $\text{m/sec}\sim 300\text{m/sec}$ 程度の範囲と考えられている。以下、これらの速度範囲を主体に

各実験方法について紹介する。

(1) 衝撃実験装置

最も単純かつ安価な装置に自由落下式衝撃実験装置がある。衝撃エネルギーは重力加速度を利用するので、振り子式の実験装置と同一原理である。自由落下式の衝撃試験機は、例えば落石覆工等の実規模耐衝撃実験に用いる場合のように直接的な実験が可能であり、極めて有効な試験機であるといえる。ただし、自由落下による実験では、その衝突速度  $V$  は、重力加速度を  $g$ 、落下高さを  $H$  とすると、

$$V = \sqrt{2gH} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

となり、落下高さを大きくしても速度の増加は少ないため、効率よく速度を増加させるには他の工夫が必要となる。

図 2-1 に自由落下式衝撃実験装置の一例として送電用の鉄塔を利用した高さ 25m の落石実験装置<sup>7)8)</sup>を示す。この装置は上部にホイストクレーンが取り付けられており 30kN までの重錘を落下させることができる。また、同原理を利用した実験装置には実規模航空機の衝突実験装置<sup>9)</sup>があるが、これは高さ 70m、長さ 120m 以上もある非常に大掛かりなものであり、航空機の破壊状況や乗客にかかる加速度等の測定を行なうためのものである。自由落下式の衝撃試験機には大掛かりなものから小規模のものまで多種多様な試験装置が使用されている。自由落下式は重錘の落下高さや重錘質量を比較的簡単に変更することが可能であるが、重錘を所定の位置（計測部）に計画どおりの形状で衝突させることは困難であり工夫を要する。

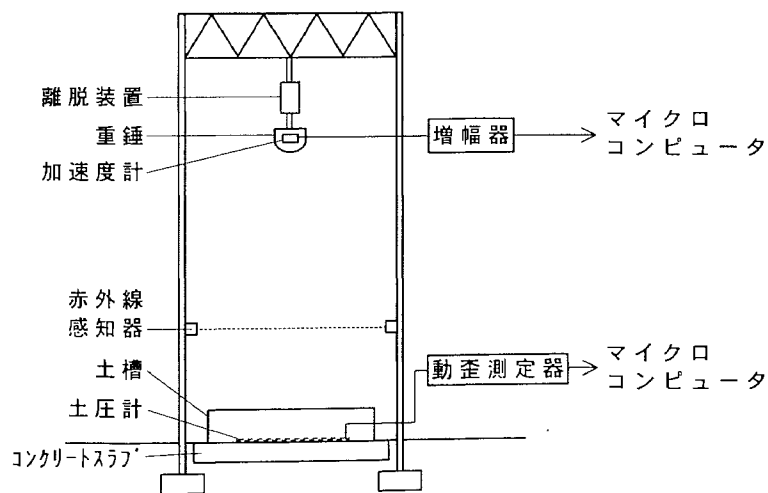


図 2-1 落石実験装置概要<sup>7)</sup>

その他の実験方法として衝撃実験にガンを使用する場合がある。これは主にコンクリートへの載荷物の貫入や貫通に関する実験に用いられる。速度的には 100～1000m/sec 程度の範囲の実験に用いられる。加速方式には空気や窒素ガスを用いる方式が一般的であるが、火薬を用いる場合もある。

## (2) 衝撃計測装置

ロードセルを使って衝撃を計測する場合、一般にはロードセルと衝突物の間に緩衝材を挿入する場合が多い。これは衝突物とロードセルの受圧部がともに金属等のように硬質なものの場合、その衝突により極めて大きな衝撃波が発生し、高周波の振動が観測されるためである。また、衝撃荷重を測定する場合には、その載荷物や載荷条件にもよるが、荷重が極めて大きくなる可能性があるため容量の大きなロードセルが必要となる。ロードセルには幾つかのタイプがあり、固有周期が短く大容量なものにはワッシャー型がある。また、応答性の高いものには歪ゲージタイプではなくピエゾタイプのロードセルがある。ただし、ピエゾタイプは容量が通常数十トン以下であり、実験の条件によって最適なロードセルを選定する必要がある<sup>6)</sup>。

その他の計測装置としては、加速度計や変位計がある。加速度計には歪ゲージ式と圧電素子式のものがある。歪ゲージ式の加速度計は、一般に固有振動数が小さく衝撃的な加速度測定には適していない。圧電素子式の加速度計は小型軽量であり、広帯域、高感度、位相特性に優れている等の特徴がある<sup>10)</sup>。

変位計は、加速度波形を積分して求めることが可能であるが、2回積分するため精度に問題がでてくる可能性がある。加速度記録に高周波成分がある場合には、積分すると発散することが多い。加速度波形積分による変位測定は、速度の小さい場合における概略的な変位を得る程度の場合と考えるべきである。高速の変位測定の場合、変位測定の範囲が比較的小さい場合には渦電流式の変位計がよく用いられる。これはターゲットのアルミや鉄に発生する渦電流の強弱によって変位を測定するもので、非接触で変位を測定できる。応答性もよく 50～100kHz 程度ある。また、レーザー光線を利用した変位計も開発されている。これはレーザーを被測定物に照射してレーザー光点とセンサーとの距離を測定するものである。応答性は 1～2kHz 程度である。レーザー型の変位計も非接触式であり、可視光線を用いているため目標点が見え測定が容易である。衝撃実験では、変位の応答周波数はそれほど高くないことにより、通常は 1kHz 程度の応答性があれば十分測定可能である。

### 2.1.2 雪塊による既往の衝撃実験方法

前項では、土木・建築分野で行なわれている衝撃実験についてその概要を紹介したが、ここでは1.3節で示した既往の研究内容から、その実験方法を主体に紹介する。ただし、雪塊による衝撃実験例は極めて少なく、ここでは新庄市で行なわれた中村ら<sup>11)</sup>の実験方法を取り上げた。この実験は、建築の雪工学の分野においては、雪塊の衝撃荷重を直接測定した代表的なものである。

この実験の目的は、勾配屋根における雪塊の遠方への飛び出し防止用の防護壁を設計するための衝撃荷重を得ることであり、そのため実験装置は図2-2のような形態をしている。なお、衝撃測定壁は基礎コンクリートにアンカーボルトで固定されている。ここで注目したいのは衝撃荷重測定部である受圧板の構成である。計測装置としてはロードセルを採用しており、1枚の受圧板(300mm×1000mm×4.5mm)に対し、水平方向の力に対しては2個のロードセルと2個の水平ロッド(計4点)、鉛直方向の力に対しては、1個のロードセルと1個のロッド(計2点)で支えられている。また、ロードセルやロッドの先端が受圧板に接する部分には、受圧板側に、厚さ6mmの鉄製の補強板を貼り付けている。つまり、この部分は厚み10.5mmとなっている。

ロードセルからの信号は、動歪測定器を通してデータレコーダーに記録している。記録されたアナログ信号を波形解析装置によって数値化している。そのときのA/D変換精度は7bit、サンプリング間隔は5msである。

また、雪塊の運動状況を16mm映画撮影機を用いて記録しており、その撮影速度は、50コマ/秒である。

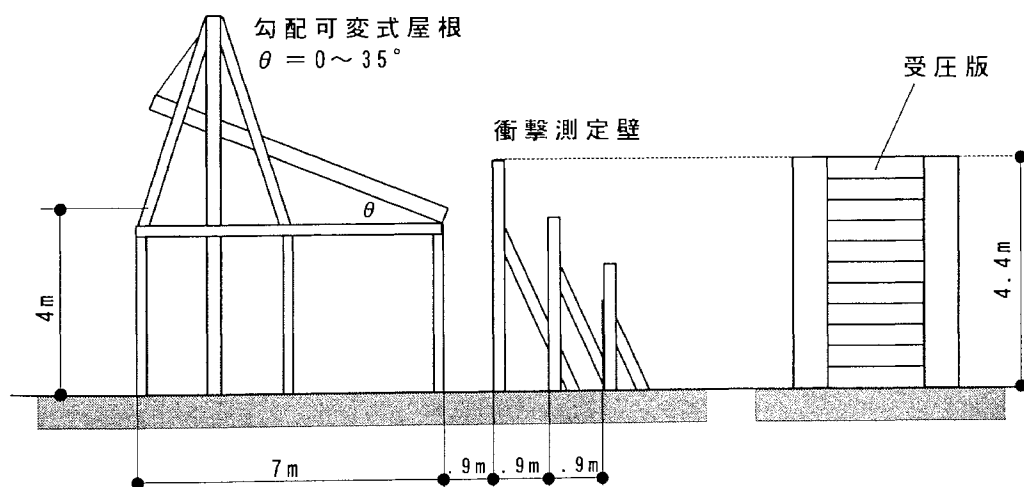


図2-2 中村らの実験装置概要<sup>11)</sup>

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験体制及び実験装置

先に述べた既往の実験方法を参考に、雪氷塊落下衝撃荷重に関する汎用性のある設計資料を得るために必要な実験計画を立案した。本論文の第5章で詳しく述べるが、衝撃荷重を受ける建物を設計するためには動的応答による検討が必要であることから、計測装置には直接衝撃波形を得ることができるロードセルを採用した。また、中村ら<sup>11)</sup>は実験目的が防護壁の設計のため、受圧板を立てた状態で測定を行なったが、もし汎用性を持たせるために、この結果から方向成分を取り出すとすれば、記録画像からの角度補正等を行なう必要がある。ただし、これは人的作業になるため誤差が生じる可能性がある。そこで、ここでは雪氷塊の鉛直自由落下による測定（受圧板との衝突角度  $90^\circ$ ）とし、ロードセル及び受圧板を地盤面に対し水平に設置することにした。実際の屋根上からの落雪現象では、真下に落下することは殆ど無く、ある角度を持って飛び出すため、衝突時もある進入角度で衝突する。しかし、衝撃波形を形成する最大衝撃荷重及び流体衝撃荷重のうち、流体衝撃荷重は衝突速度によって決まる荷重である。衝突速度はエネルギー量によって求められ、雪氷塊の落ち方には依存しない。つまり、同じ高さからの落下であれば、その落下方向は異なるが、速度は同じということである。最大衝撃荷重は雪氷塊の圧縮破壊強度によって決まる荷重であるが、雪氷塊の衝突形状は不確定であり、受圧板に計画通りの状態で衝突させることは困難である。これらの理由により実験方法として雪氷塊の鉛直自由落下式を採用した。

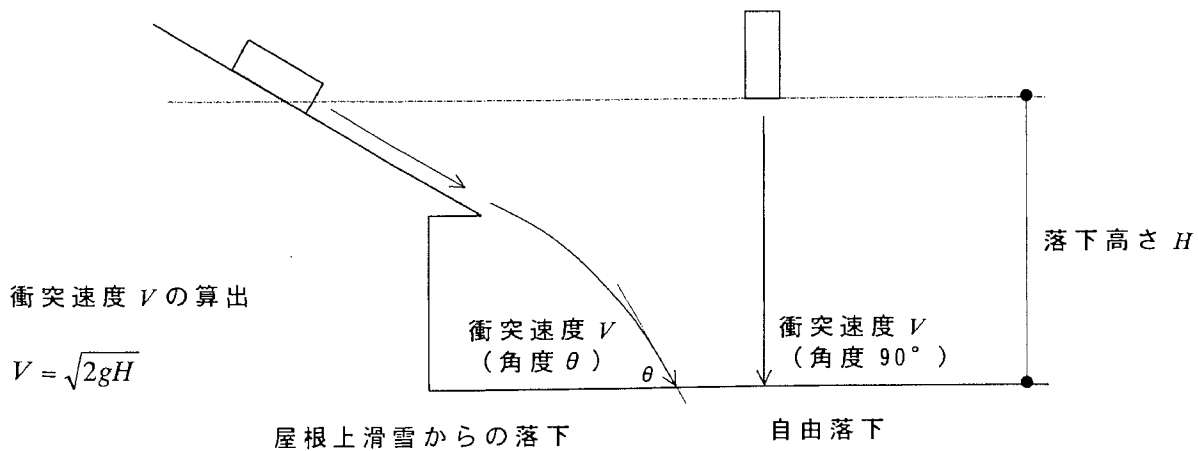


図 2 - 3 実際の落雪状況と実験による落雪状況の関係

また、雪氷塊の衝突状況や衝突後の運動状況を記録するための装置には、デジタルビデオカメラ（以下、DVカメラ）を採用した。これは記録目的が衝突速度や飛散状況を確認するためであり、高価な高速コマ撮りカメラ等は必要ないためである。最近のDVカメラには、コンパクトで取り扱い易く、パソコンを介してデータ処理も容易に行なえるという長所がある。また、その記録性能も30コマ/秒と16mm映画撮影機並みの精度を得ることができる。

波形データの記録は、ロードセル、動歪アンプ、データ収録装置により行なった。表2-1に実験で使用した測定機器の仕様を示す。データ収録装置の設定は、事前確認実験により、収集チャンネル数5ch、データ個数512、サンプリング振動数1000Hz、時間刻み0.001secとした。データ処理は、収集されたバイナリデータをアスキーデータに変換し、グラフ化等により評価する。

上記の実験計画に基づき、平成11年2月に札幌市手稲区の北海道工業大学内において雪氷塊の落下実験を行った<sup>12)</sup>。図2-3及び写真2-2に実験状況を示すが、雪氷塊の落下は高所作業車を用いて高さを変えて行った。なお、図2-3は写真2-2と方向性を合わせるため北方向を下側としている。

表 2 - 1 測定機器の仕様

機 種	形 式	仕 様
ロードセル (圧力計)	LUK-5TBS 4台	最大測定荷重 5tonf 測定振動数範囲 DC~2kHz
動歪アンプ	DPM-611A 3チャンネル	SN比1000で46dB、1000以外で52dB 測定振動数 DC~2.5kHz
データ収録 装置	SPC-35	測定チャンネル数 8チャンネル CPU部 98NOTE SX/E40M 分解能 16bit (80dB以上) 最大サンプリング振動数 1kHz

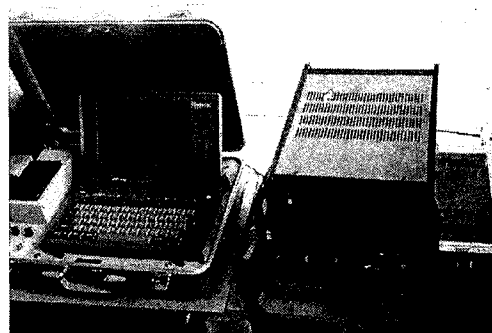


写真 2 - 1 測定機器類

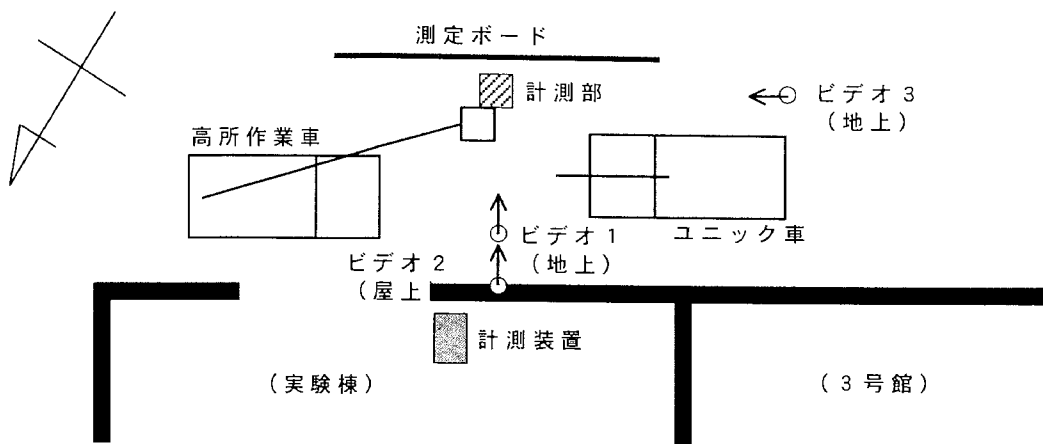


図 2 - 3 実験全体配置図

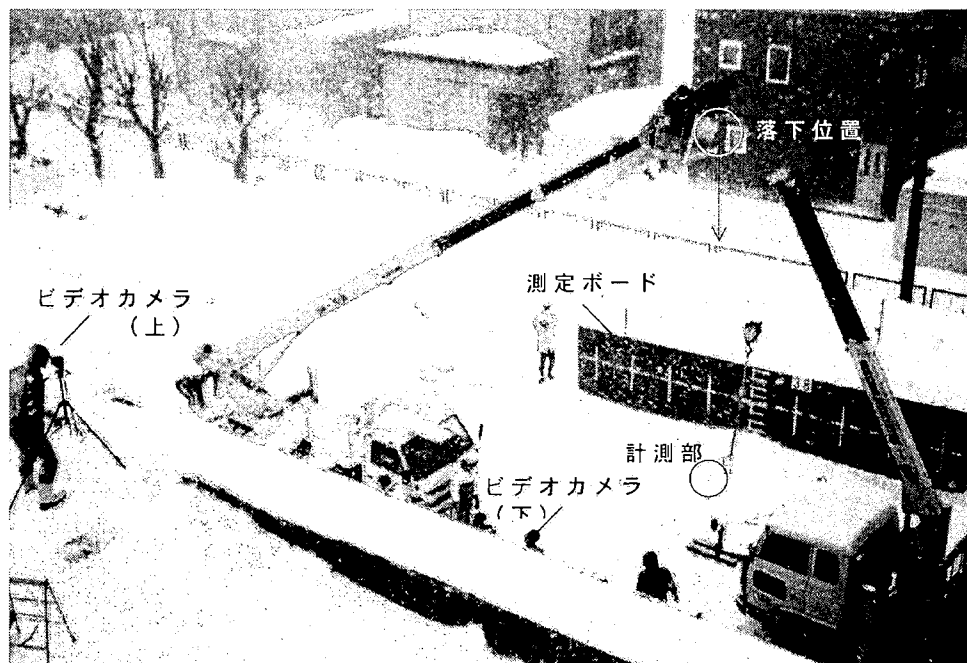


写真 2 - 2 実験状況

### 2.2.2 計測装置（ロードセル）設置手順

実験では、4台のロードセルを用いて衝撃波形の計測を行うが、あるロードセルに荷重が偏らないように全ロードセルを均等かつ水平に設置する必要がある。図2-4に計測部の概要図、写真2-3～写真2-6にロードセルの設置手順を示す。

ロードセルは、まず地上積雪を掘り起こし、レベル調整のために地面の地肌上に薄く砂を引いた。そして、ロードセルを設置する位置にコンクリートブロック（30cm×30cm×4cm）を設置し、レベル計を用いて縦、横、斜めの全方向が同一レベルとなるように調整を行った（写真2-3）。次にコンクリートブロックの上に厚さ19mmの鉄板を敷き、上下左右50cm間隔でロードセルを配置した。この段階でコンクリートブロックの場合と同様にしてロードセルのレベル調整を行った（写真2-4）。ロードセルを鉄板に固定した後、ロードセル上に同じ形状、同じ厚さの鉄板（受圧板）を載せ、強力両面テープによりロードセルと受圧板を固定した（写真2-5）。最後に、ロードセルに水滴や雪がかからないようにビニールシートで覆い、雪氷ブロックを落下するときの目印を表示した（写真2-6）。

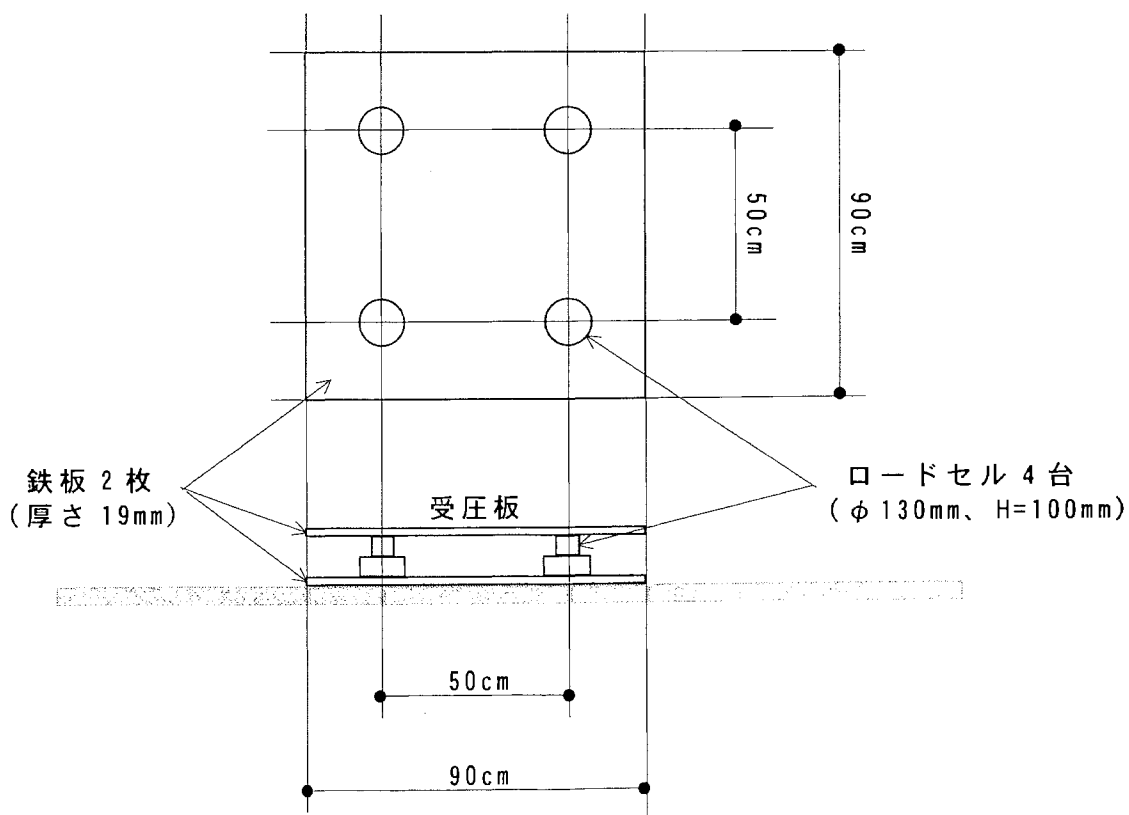


図 2 - 4 計測部概要図



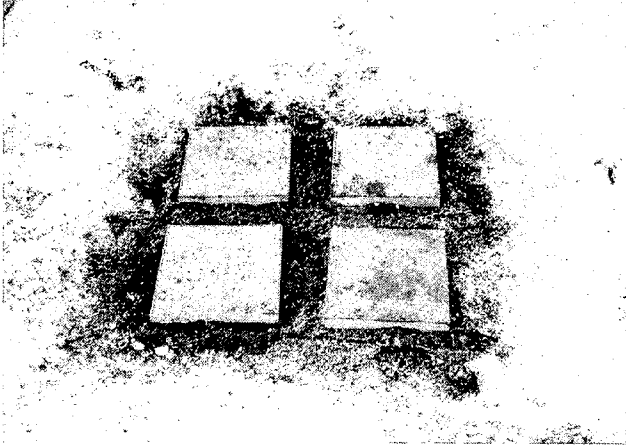


写真 2 - 3 ロードセル設置手順 1

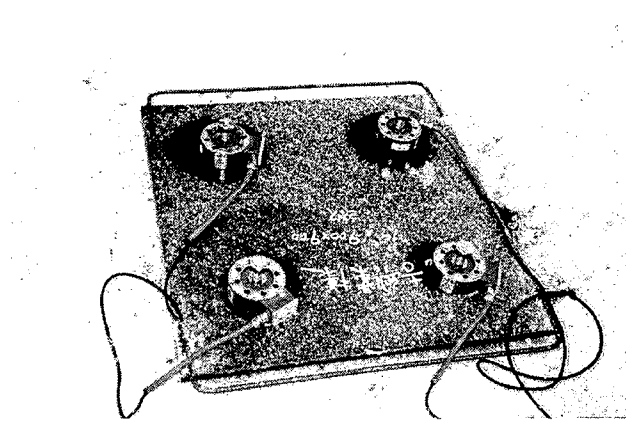


写真 2 - 4 ロードセル設置手順 2

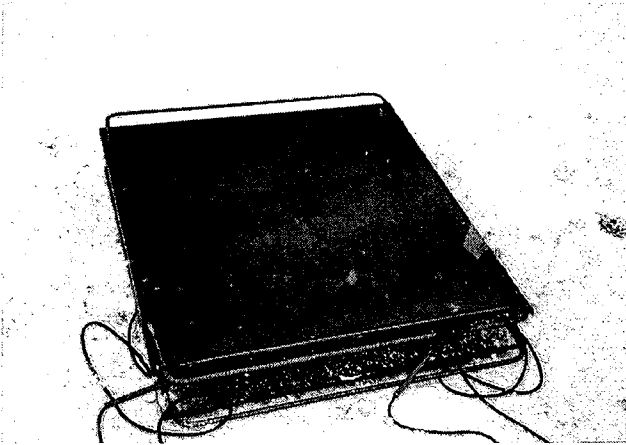


写真 2 - 5 ロードセル設置手順 3

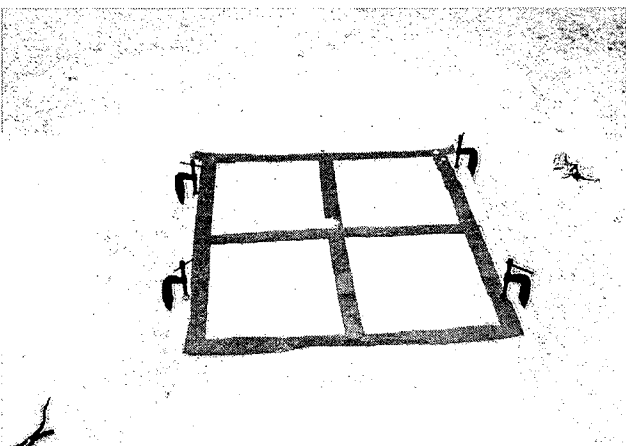


写真 2 - 6 ロードセル設置手順 4

### 2.2.3 試験体（雪氷ブロック）

実験には、正方形のブロックを用いることにした。ダイレクトな衝撃荷重から単位面積当たりの荷重を求めるときの受圧面積（受圧板と雪氷ブロックが接触した面積）を設定することは、落下時のブロックの状態が回転や揺れを伴う場合があるため、非常に困難である。そこで、試験体の方向性をなくし、各試験体が出来る限り同じような状態で受圧板に衝突するようにブロック形状を正方形とした。つまり理想的には、受圧面積は各ブロック一面の面積となる。

実験に用いた雪ブロックは、屋根上での圧密を考慮し、40cm角の型枠に降雪後2～3日経過した自然雪を圧密しながら充填し、氷点下の日に一昼夜屋外に放置したものを使用した。更に、屋根上積雪が凍結した場合を想定して氷ブロックを製作した。氷ブロックは40cm角の型枠に自然雪を圧密しながら充填した後、水道水を浸透させ、-15℃の低温室内で徐々に凍結させ、2日後に型枠内部に残った水分を取り除いて、更に1日低温室で保存した。なお、ここではこれらの雪氷ブロックをその密度によって以下のように分類する。

低密度ブロック：雪密度 0.3g/cm<sup>3</sup> 未満

中密度ブロック：雪密度 0.3g/cm<sup>3</sup> 以上 0.6g/cm<sup>3</sup> 未満

高密度ブロック：雪密度 0.6g/cm<sup>3</sup> 以上

### 2.2.4 実験パラメータ

実験は、落下高さ、ブロックの状態（密度）、ブロックの質量（寸法）をパラメータとし実施した。表2-2に実験シリーズをまとめておく。なお、表中には記載してないが、雪氷塊の衝撃性状を把握するために、比較用として砂袋による実験を行った。砂袋には、質量20kgの砂を詰め、砂の動きを抑えるように根本を締めたものと自由に挙動できるように袋口近くを締めたものを用意した。

表 2 - 2 実験シリーズ

落下高さ (m)	雪密度 (低・中・高)	ブロック寸法 (cm角)	実験回数 (回)
2.5	低		
	中	30~40	4
	高	30	4
5.0	低		
	中	30	6
	高	30	6
7.5	低	40	3
	中	20~40	6
	高	30	6
10.0	低		
	中	30	
	高	30	4



写真 2 - 7 砂袋

### 2.2.5 実験手順

実験に使う雪氷ブロックは、高所作業車のバケット内に設置された落下装置上にセットし、所定の高さから自由落下させるが、ブロック質量が 30kg 程度あるため、作業性を考え、高所作業車の他にユニック車を用意した。そして、最も効率よく実験を行なうため、同一高さからの実験を連続して行う計画とした。この結果、一度所定の高さにセットしたバケットを固定することができ、1 回の実験時間としてはデータ記録作業を除き、ユニック車で雪氷ブロックを吊り上げ、バケット上にセットするだけとなり、大幅な時間短縮が可能となった（写真 2-2）。ユニック車がなければ、雪氷ブロックを載せかえる度にバケットの上下移動と高さ設定作業が必要となり、多大な時間を要することになる。なお、落下装置は、2 本の単管パイプと 2 枚の木板から構成されており、根本部分のレバーにより固定され、これを引くことによりパイプが回転し、ブロックが真下に落下する仕組みになっている（写真 2-8）。

ブロックを落下装置上にセットした後、スケールの付いた下げ振りを用いて装置下面から受圧板までが所定の高さ及び位置になるようにバケットを移動させ（写真 2-9）、測定機器類の準備の完了及び周辺に人がいないことを確認した後にレバーを引き、ブロックを受圧板の中央を狙って落下させた（写真 2-10 及び写真 2-11）。

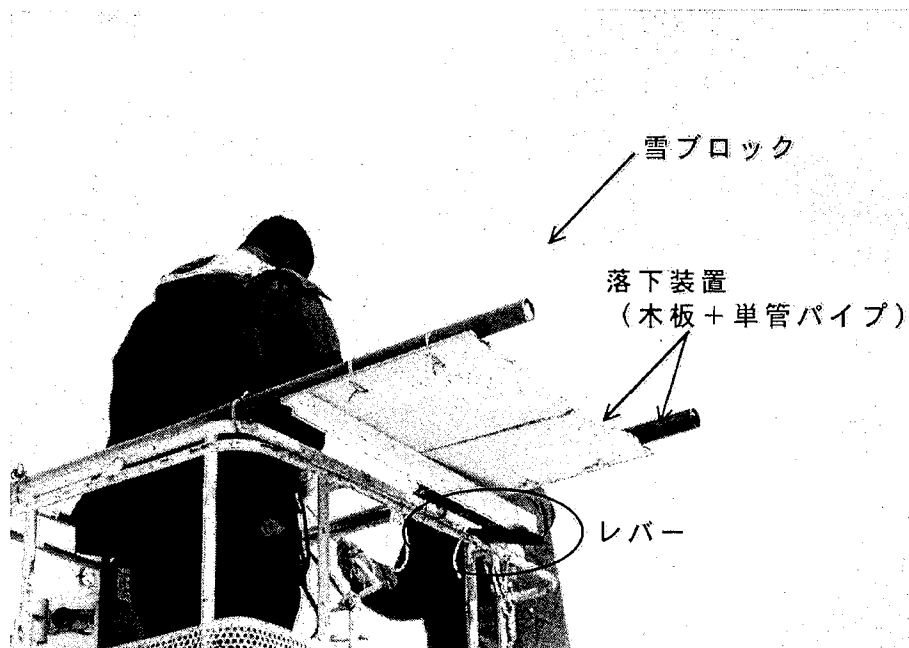


写真 2-8 落下装置上にセットされた雪ブロック

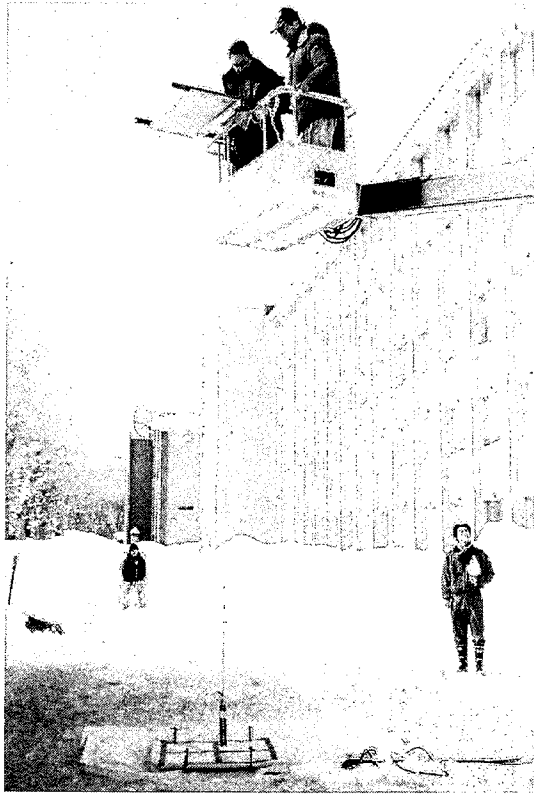


写真 2 - 9 落下前準備作業

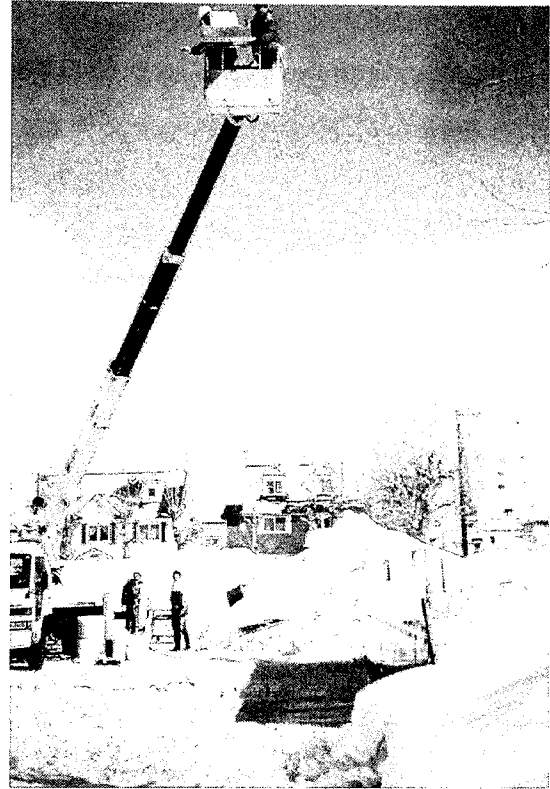


写真 2 - 10 落下高さ 10m の状況



写真 2 - 11 雪ブロックが計測部に衝突した瞬間

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 雪氷ブロックの密度分布

図 2-5 に今回の実験で使用した雪氷ブロックの雪密度分布を示す。全部で 31 ある試験体のうち、約 70% の試験体が密度  $0.5\sim 0.8\text{g/cm}^3$  に分布していることがわかる。これは地上積雪密度等と比較すると大きめの値であるが、筆者のこれまでの独自の調査（写真 2-12 参照）からは、大規模建築物の屋根上積雪では、地上積雪よりも密度を増す傾向にあり、表層から数十センチ程度下層は氷状となることが確認されているため、大規模建築物の屋根上積雪による落雪現象を想定した本実験においては、適切な状態の試験体が製作できたといえる。

### 2.3.2 雪氷ブロックの状態と衝撃波形

図 2-6 に実験で得られた衝撃波形の一例<sup>13)</sup>を示す。図 1-6 で示した衝撃波形模式図と比較すると実験結果の方には流体衝突過程が現れていないが、これは試験体寸法が小さいためであり、ある長さを持った連続的な衝突現象では、この流体衝突過程が現れてくる。落下高さ 7.5m からの衝突速度  $V$  は、 $V=\sqrt{2gH}$  より  $12\text{m/s}$  となる。ブロック寸法  $d$  が 30cm の場合、衝撃荷重継続時間  $t$  は、 $t=d/V$  より 0.025 秒となり、実験結果に一致する。

図 2-7～図 2-10 に中密度ブロックと高密度ブロックの衝突状況と衝撃波形の一例を示す。なお、ロードセルの特性から圧縮力はマイナス表示となっている。これによるとブロックが衝突する位置は面的な場合と隅角的な場合とがあり、中密度、高密度ブロックとも面的に衝突した方が最大衝撃荷重は比較的大きくなっている。

中密度ブロックと高密度ブロックの衝撃波形を比較すると、中密度ブロックより高密度ブロックの方が衝突直後の波形勾配が急になる傾向がある。これは、高密度ブロックは中密度ブロックに比べ剛性が高く、衝突後、破壊に至る時間が短いのに対し、中密度ブロックの場合はある程度の塑性変形を経た後に破壊変形に移行するため、このような差が現れると考えられる。また、本実験によって最大衝撃荷重到達後も連続的なカーブを描きピークをひとつしか持たないデータや細かなピッチで幾つもピークを迎えるようなデータが得られた。これは面的衝突と隅角的衝突による違いの他に、雪ブロックの状態のバラツキがその原因と考えられる。雪ブロックには固い部分と柔らかい部分が不規則に存在しており、各ブロック固有の状態があるため、1山の波形や2山以上の波形が現れると考えられるが、包絡した波形（図中破線）には共通の傾向が認められる。

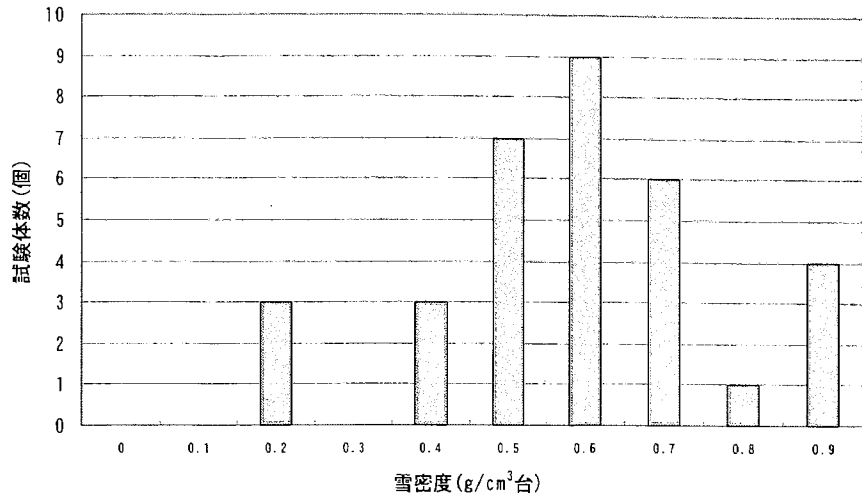


図 2 - 5 雪氷ブロック密度分布

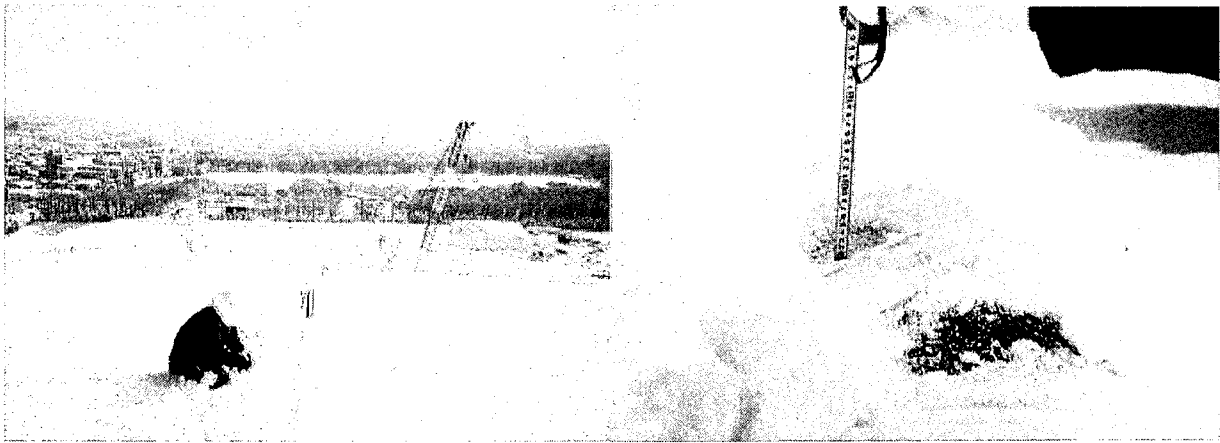


写真 2 - 12 大規模建築物の屋根上積雪調査の様子 (1999 年 1 月)

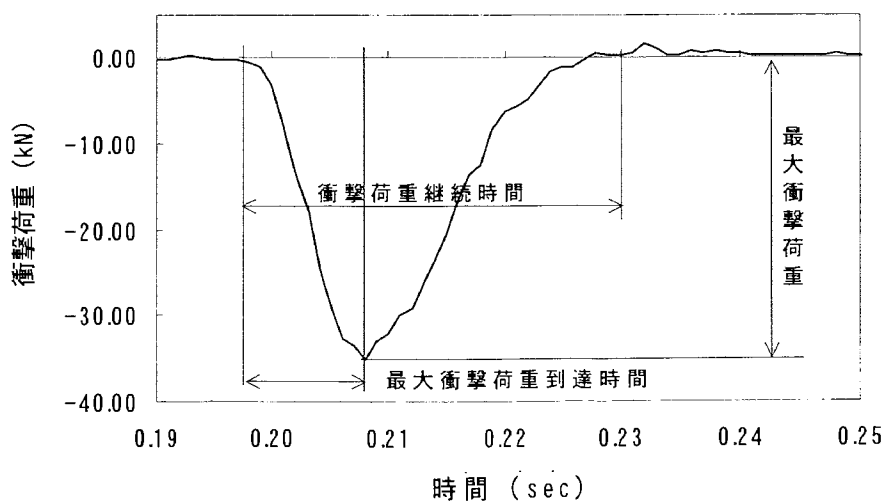


図 2 - 6 実験結果 (衝撃波形) の一例

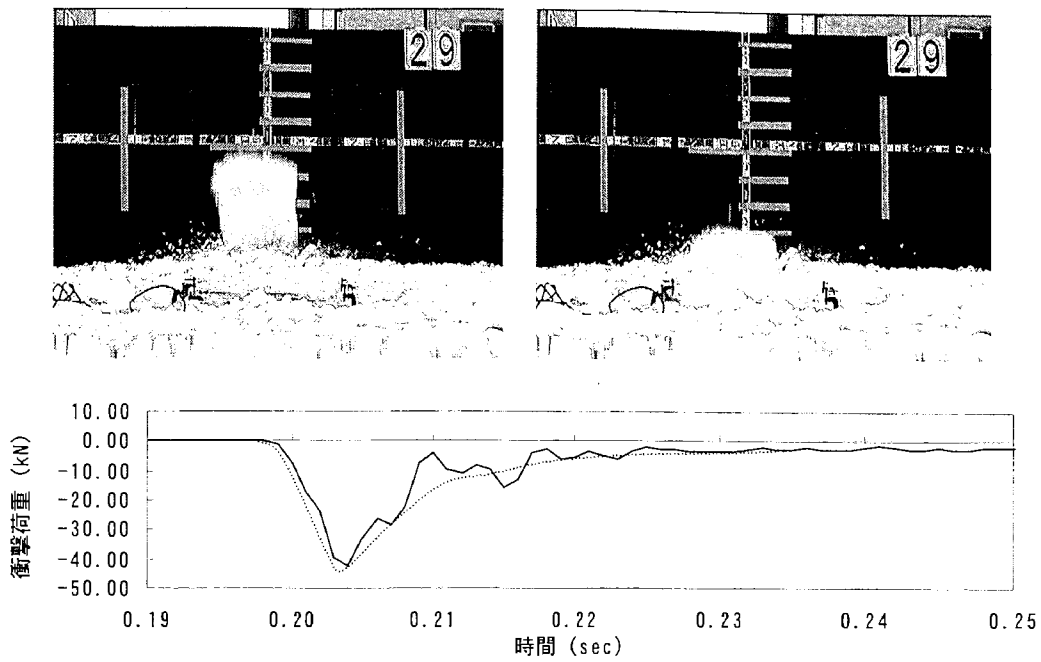


図 2 - 7 中密度ブロック面的衝突状況と衝撃波形  
 (形状 : 40cm 角、密度 : 0.50g/cm<sup>3</sup>、落下高さ : 7.5m)

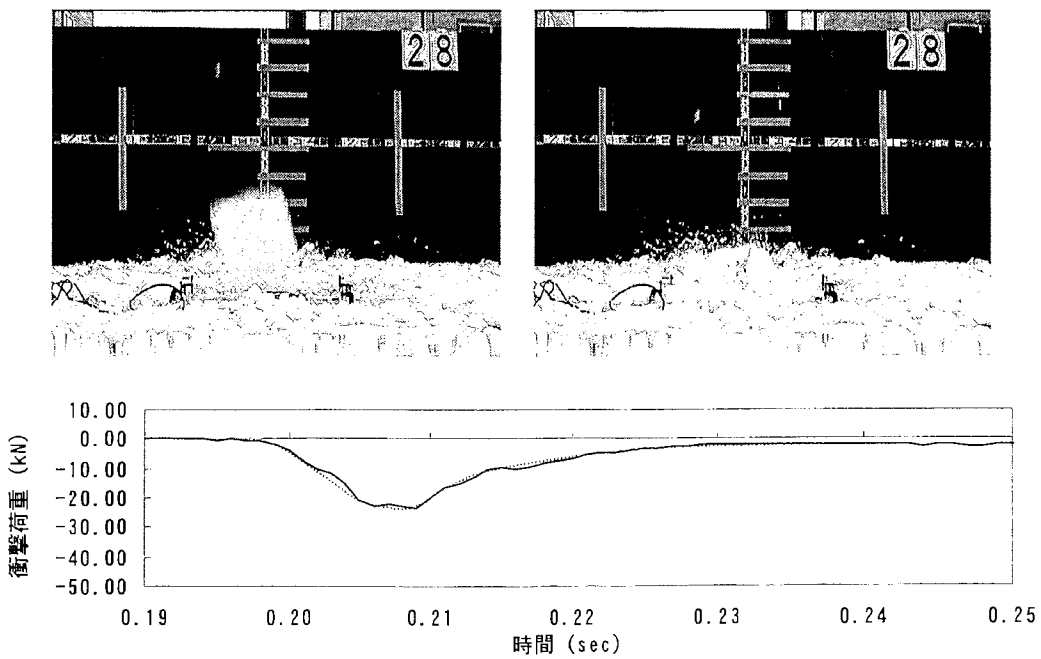


図 2 - 8 中密度ブロック隅角的衝突状況と衝撃波形  
 (形状 : 40cm 角、密度 : 0.48g/cm<sup>3</sup>、落下高さ : 7.5m)

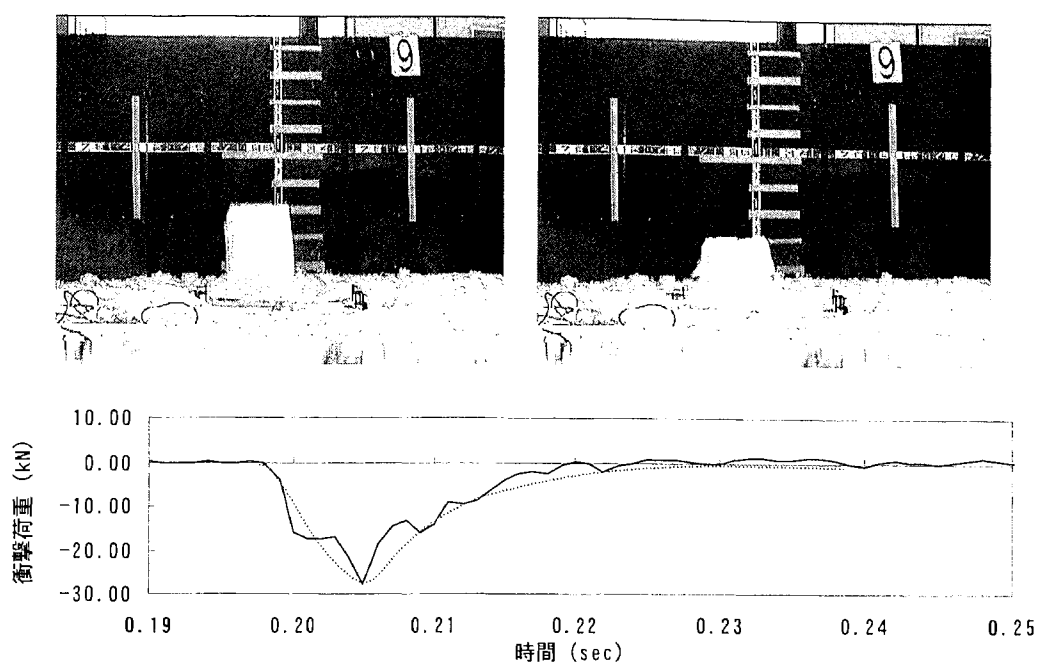


図 2 - 9 高密度ブロック面の衝突状況と衝撃波形  
 (形状 : 30cm 角、密度 : 0.94g/cm<sup>3</sup>、落下高さ : 5.0m)

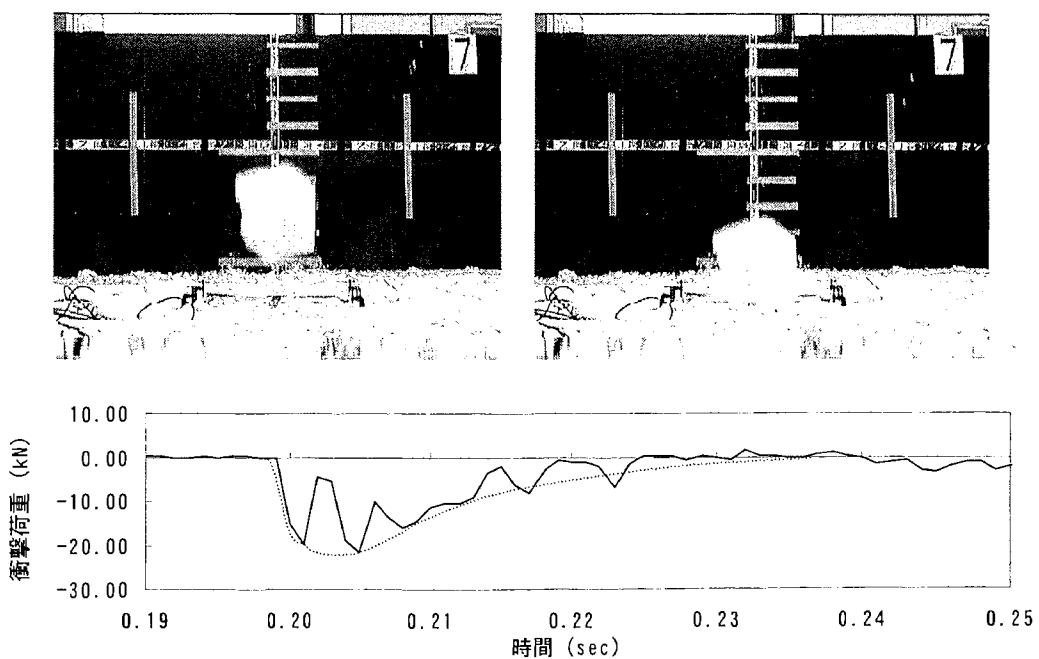


図 2 - 10 高密度ブロック隅角の衝突状況と衝撃波形  
 (形状 : 30cm 角、密度 : 0.97g/cm<sup>3</sup>、落下高さ : 5.0m)



表 2 - 3 実験結果一覽

実験番号	実験高さ (m)	フロック形 (cm)	雪質量 (kg)	雪密度 (g/cm <sup>3</sup> )	衝撃荷重 (kN)	衝突 状況
2	2.5	40角	28.3	0.44	17.1	面的
1	2.5	40角	30.2	0.47	24.9	面的
3	2.5	40角	31.7	0.50	18.2	面的
20	2.5	30角	15.2	0.56	8.5	隅角的
23	2.5	30角	17.6	0.65	12.8	面的
21	2.5	30角	19.2	0.71	12.3	隅角的
22	2.5	30角	20.2	0.75	11.9	隅角的
19	2.5	30角	20.9	0.77	21.1	隅角的
4	5.0	30角	17.9	0.66	11.8	隅角的
8	5.0	30角	17.9	0.66	22.1	面的
5	5.0	30角	18.1	0.67	12.1	隅角的
6	5.0	30角	18.3	0.68	11.1	隅角的
9	5.0	30角	25.4	0.94	27.5	面的
7	5.0	30角	26.3	0.97	21.7	隅角的
24	7.5	40角	15.0	0.23	8.3	面的
25	7.5	40角	15.0	0.23	8.6	面的
26	7.5	40角	15.0	0.23	9.3	面的
28	7.5	40角	30.7	0.48	23.3	面的
29	7.5	40角	31.7	0.50	42.7	面的
31	7.5	20角	4.3	0.54	10.2	面的
33	7.5	40角	34.5	0.54	35.5	面的
27	7.5	40角	34.7	0.54	35.4	面的
32	7.5	20角	4.4	0.55	6.3	面的
30	7.5	20角	4.8	0.60	6.0	面的
12	7.5	30角	16.7	0.62	15.2	隅角的
13	7.5	30角	17.8	0.66	30.7	面的
14	7.5	30角	20.9	0.77	34.8	面的
10	7.5	30角	21.0	0.78	19.5	隅角的
11	7.5	30角	21.7	0.80	18.9	面的
18	10.0	30角	18.4	0.68	33.2	面的
17	10.0	30角	20.8	0.77	32.1	面的
16	10.0	30角	25.0	0.93	30.4	隅角的
15	10.0	30角	25.1	0.93	21.6	隅角的

### 2.3.3 エネルギー量と最大衝撃荷重

質量と落下高さの積から求められる雪氷塊の持つ衝突直前の運動エネルギー量によって衝撃荷重を評価した。エネルギー量は、次式によって求められる。

$$E = \frac{1}{2}mV^2 = mgH \text{ (J)} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここに、 $m$ ：質量 (kg)、 $V$ ：衝突速度 (m/sec)、 $g$ ：重力加速度 (m/sec<sup>2</sup>)、 $H$ ：落下高さ (m) である。本実験結果における衝突速度について、図 2-7 等で示した画像より求めたところ、空気抵抗等の影響も殆ど無く、 $V = \sqrt{2gH}$  の関係が成立しており、ここでは  $mgH$  によりエネルギー量を算出した。

図 2-11 にエネルギー量と最大衝撃荷重の関係を示す。ばらつきはあるものの全体的な傾向として、エネルギー量が増加すると衝撃荷重も増加する傾向を示す。また、高密度ブロックの方が低中密度ブロックよりも大きめの値となると考えられるが、エネルギー量 1000J 以下においては低中密度ブロックにも高密度ブロックに近い値となっているケースもある。これは、製作されたブロックの状態にばらつきがあり、これら低中密度ブロックの衝突面の雪質が氷に近い状態であったためと考えられる。また、エネルギー量 2000J 以上において低中密度ブロックが大きな衝撃荷重を示しているのは、このブロックが寸法 40cm 角と大きく 30kg を超える質量であったことと、密度も 0.5g/cm<sup>3</sup> を超え、比較的高密度ブロックに近い状態であったためと考えられる。

### 2.3.4 積雪密度と最大衝撃荷重

図 2-12 に本実験データにおける積雪密度と最大衝撃荷重の関係を示す。ここでの衝撃荷重は、計測された値を落下ブロックの断面積（立方体一面の面積）で除したものであり、図中のラインは実験結果を包絡したものである。ただし、衝突状況は、面的な場合と隅角的な場合のように、様々存在しており、隅角的衝突における衝突面積を設定することは現状では不可能なため、ここでは全実験ケースのうち面的及び面的に近い衝突ケースのみについてプロットしている。これによると衝撃荷重の最大値としては、密度が 0.6g/cm<sup>3</sup> までは増加傾向にあるが、0.6g/cm<sup>3</sup> を越えると 40N/cm<sup>2</sup> 程度となり、全体的に低速圧縮における破壊強度よりも小さな値となっている<sup>14)</sup>。

なお、本実験における衝突速度は、7~14m/sec である（落下高さ 2.5~10m）。落下高さを更に上げた場合について考察を行なう。ここで、高密度ブロック（0.6g/cm<sup>3</sup> 以上）に注目すると最大衝撃荷重は 40N/cm<sup>2</sup> 程度で上限を向かえており、その近辺には落下高さ 7.5m のシリーズと 10m のシリーズによるプロット点が存在

している。このことから、落下高さ 7.5m 以上（衝突速度 12m/sec 以上）では、最大衝撃荷重は  $40\text{N}/\text{cm}^2$  程度が上限となると推測することができる。

これは、最大衝撃荷重が、雪氷塊の圧縮破壊強度に依存しているためであり、この圧縮破壊強度の上限が  $40\text{N}/\text{cm}^2$  ということに他ならない。なお、ここでは圧縮破壊強度を雪密度と関係付けられる係数として扱っているが、本実験は、落雪現象の実状を考慮して実施されたものであり、高速衝突が前提条件となっている。圧縮破壊強度  $40\text{N}/\text{cm}^2$  を超える衝撃荷重を落下高さの上昇によって得るには、流体衝撃荷重  $\gamma V^2 A$  が  $40\text{N}/\text{cm}^2$  を超えるということであり、雪密度  $\gamma = 0.6\text{g}/\text{cm}^3$  とすると衝突速度  $V$  は 26m/sec 以上必要となり、これは落下高さ 34m に相当する。雪密度  $\gamma = 0.8\text{g}/\text{cm}^3$  の場合は、落下高さ 26m が必要となる。つまり、落下高さが 26m 以下では、図 2-12 の関係が成立しているということになるが、落下高さが 26m を超えると、雪密度によっては、流体衝撃荷重の方が圧縮破壊荷重よりも大きくなり、これが最大衝撃荷重となる場合があると考えられる。

また、落雪現象には、本実験のようにある箇所集中して落下する場合だけでなく、体育館のように連続した軒先を持った建物の場合、横方向にある程度繋がった状態で衝突する場合もある。前者を点的な衝突ケース、後者を線的な衝突ケースとする。1.3.2 項で示した雪の衝撃メカニズムから考察すると、両ケースとも衝突して圧縮破壊を起こすまでは同じ状況とみなすことができる。圧縮破壊後は、横方向を拘束された線的な衝突ケースよりも四方がフリーな点的な衝突ケースの方が、破壊、飛散しやすいため、流体衝突過程に移行する時間、つまり衝突円錐形成時間が短くなると考えられる。第 5 章で詳しく説明しているが、衝突円錐形成時間が長いほど構造物の受ける応答値は大きくなる傾向にあり、実現象でも線的に落下した方が衝撃荷重値は大きくなると考えられる。

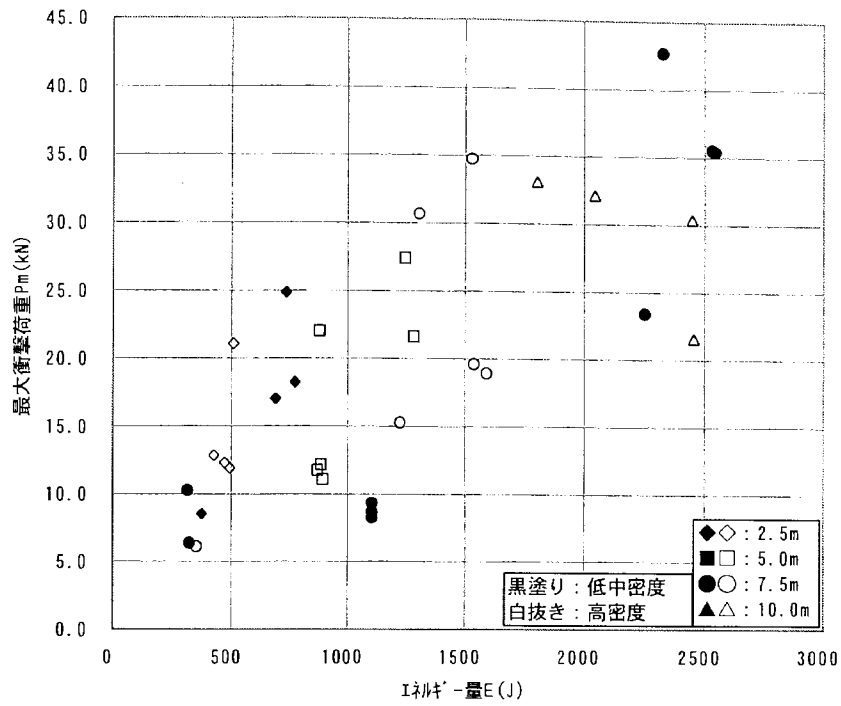


図 2 - 11 エネルギー量と最大衝撃荷重の関係

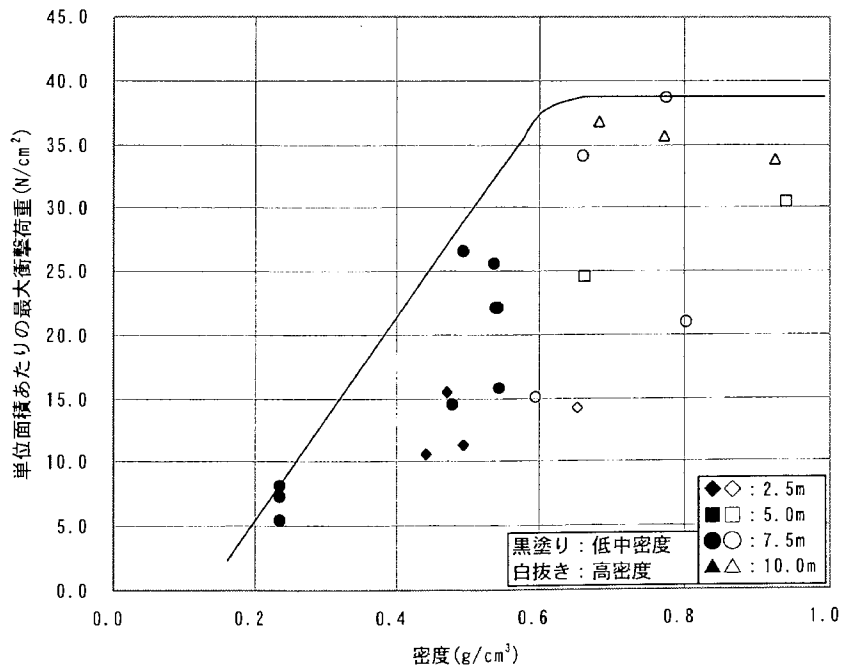


図 2 - 12 積雪密度と最大衝撃荷重の関係

### 2.3.5 連続落雪による衝撃波形

実際の落雪現象では、一体で滑雪した雪塊も軒先を飛び出すと幾つかの塊に分断され落下する。個々の衝突による衝撃荷重は、これまでの雪氷ブロックによる衝撃と同様であると考えることができる。ただし、一連の落雪衝突現象の傾向を掴むため、長さ 180cm×幅 40cm×深さ 20cm の雪ブロックを用いた実験を行なった（6 ケース）。なお、各ブロックの質量を測定することが困難なため、型枠に敷き詰めた雪の密度を計測し、 $0.5\text{g/cm}^3$  程度であることを掴んでいる。また、落下高さは 5m である。写真 2-13、14 に型枠設置状況及び連続雪落下状況を示す。

図 2-13 に記録された波形データの一例を示す。これによると落下時に分断された雪ブロックによる衝突が連続して見られる。また、全ケースにおいて第 1 衝突または第 2 衝突で最大衝撃荷重値を記録しており、第 3 衝突はいずれも最も小さなピーク値を示している。これは衝突が繰り返される度に衝突面に雪が残るため、その残雪による緩衝効果が表れたためと考えられる。

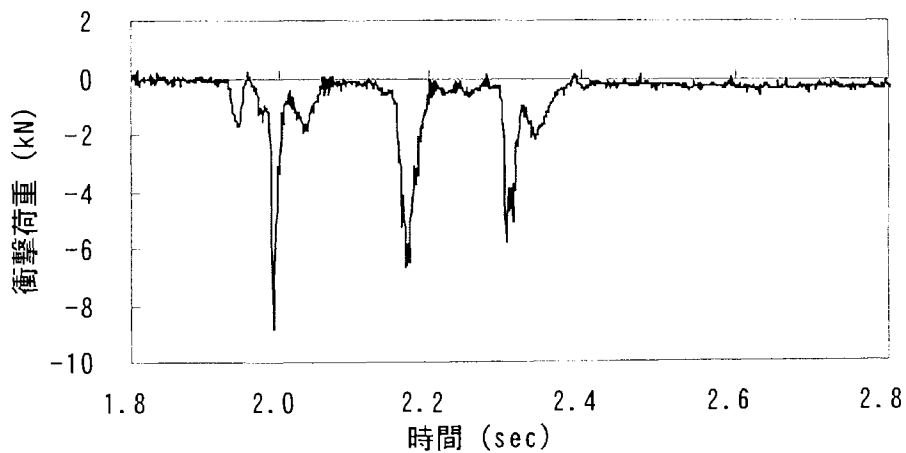


図 2-13 連続雪衝突波形の一例

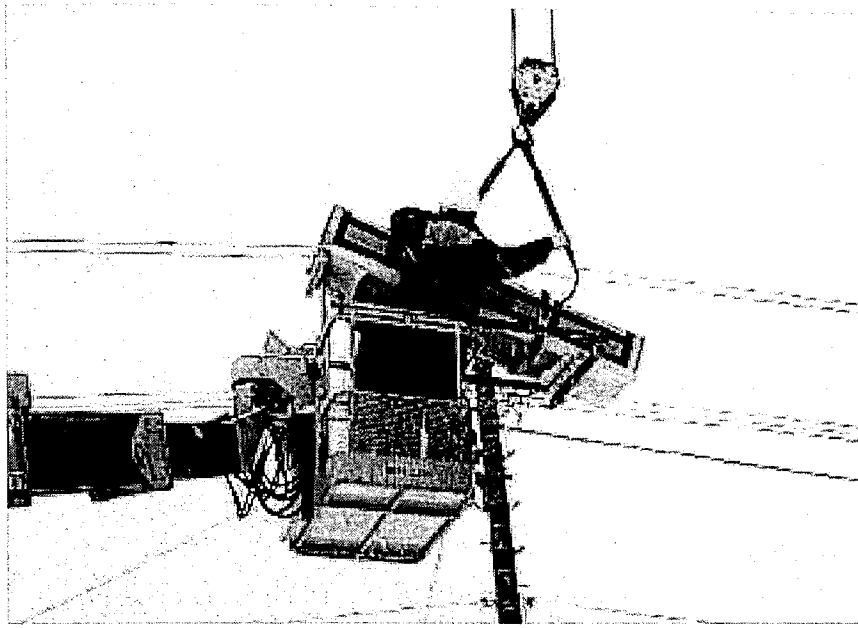


写真 2 - 13 型枠設置状況



写真 2 - 14 連続雪落下状況

## 2.4 まとめ

---

本章では、これまで評価方法が確立されていなかった雪氷塊の落下衝撃荷重について屋外実験によりその衝撃性状について検討した。この実験から得られた結果を整理すると、以下のようなになる。

(1)雪氷塊の衝撃波形は衝突直後にピークに達するような性状を示し、その最大衝撃荷重は、雪氷ブロックの密度や衝突状況によって大きく異なる結果が得られた。密度については、ブロック密度が大きくなるほど、衝突直後の波形勾配が急になる、つまり最大衝撃荷重到達時間が短くなる傾向にある。これは、高密度ブロックは中密度ブロックに比べ剛性が高く、衝突後、破壊に至る時間が短いのに対し、中密度ブロックの場合はある程度の塑性変形を経た後に破壊変形に移行するためと考えられる。

(2)衝突状況については、ブロック衝突面が面的な場合と隅角的な場合とでは、面的に衝突した方が最大衝撃荷重は大きくなる傾向にある。これは、隅角的な衝突では、オフセット状態での衝突になるため破壊しやすく、エネルギーが発散されやすいためと考えられる。つまり、鉛直方向のエネルギーが衝突後も維持されているのであれば、受圧面積の小さい隅角的衝突の方が面積当たりの衝撃荷重値は大きくなると考えられるが、雪氷は他の硬い物体とは異なった性質を有しており、衝突後に破壊し、その運動方向を主に水平方向へと転換させるため鉛直方向の荷重値は小さくなるものと考えられる。

(3)エネルギー量が増加すると最大衝撃荷重は増加する傾向を示すという結果が得られた。このことから最大衝撃荷重は、質量と衝突速度に大きく影響されることがわかる。ただし、2.3.4項で述べたように衝突速度による最大衝撃荷重の増加には上限が存在している。エネルギー量は質量と衝突速度（落下高さ）によって定義されており、質量によるエネルギー量の増加と衝突速度による増加では、エネルギー量が今回の実験レベルよりも更に大きくなった場合には、異なった傾向を示すと考えられる。つまり、質量によるエネルギー量増加は比例的な増加傾向を示すが、衝突速度による増加では、頭打ち傾向となると考えられる。

(4)単位面積あたりの最大衝撃荷重は、雪氷ブロックの密度に影響されており、密度が増加するほど衝撃荷重も増加傾向を示すが、密度  $0.6\text{g/cm}^3$  あたりから一定状態になるという結果が得られた。また、落下高さが  $26\text{m}$  以下であれば、衝突速度が  $12\text{m/sec}$  以上になっても図 2-12 に示した包絡ラインよりも大きな値を示すことはなく、最大衝撃荷重は積雪密度との関係で押さえることができる。

以上より、最大衝撃荷重には、雪氷塊の密度、質量、衝突速度、衝突状況が影響しており、これらの組み合わせによって決定される。また、屋根上積雪の落雪による衝突では、屋根上滑雪時の速度や屋根を離れた後の落下状態によって衝突速度が決まるため、各種抵抗力も衝撃荷重に影響を与える要素となりうる。



## 第 2 章 参考文献

---

- 1) 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.212-213、1993
- 2) Kristffer Apeland : New Developments in Code Specifications and Standards for Snow Load, Summary Papers of 3rd International Conference on Snow Engineering, pp.385-402, 1988.7
- 3) American Society of Civil Engineers: ASCE7-95 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, pp.34-45, 1996
- 4) National Research Council Canada : User's Guide - NBC 1995 Structural Commentaries (Part 4), pp.54-71, 1996
- 5) (社) 日本建設機械化協会：新編 防雪工学ハンドブック（3. 雪による障害発生とその機構）、pp.86-98、1988.3
- 6) (社) 土木学会：構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法、pp.35-55、1994.1
- 7) 吉田博、他：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究、土木学会論文集、第 352 号 / III-2、pp.61-70、1984.12
- 8) 内田孝、他：高速荷重および高速衝撃実験装置の開発、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.61-64、1991.3
- 9) Garden, H.D. : Full scale crash-test evaluation of two loads limiting subfloors for general aviation airframes, NASA Technical paper 2380, 1984
- 10) 三浦湊介、他：電圧型加速度センサーの効率的使用法、共和技報、No.412、1992.6
- 11) 中村秀臣、他：滑落する屋根雪の壁面に及ぼす衝撃力. その 1、国立防災科学技術センター研究報告、第 25 号、pp.169-185、1981.3
- 12) 小竹達也、他：雪氷塊の落下衝撃力に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.55-56、1999.9
- 13) 苫米地司、他：雪氷塊の落下衝撃力に関する実験的研究、日本雪氷学会全国大会大会講演予稿集、pp.58、1999.10
- 14) 高橋博、他：雪氷防災（第 2 章 雪の性質）、白亜書房、pp.108-110、1986.12

◆◆◆◆◆ 第3章 大規模建築物における滑雪性状の検討 ◆◆◆◆◆

3.1	はじめに	3- 1
3.2	大規模建築物の屋根材料について	3- 2
3.2.1	ステンレス材料概説	3- 2
3.2.2	膜材料概説	3- 2
3.3	大規模建築物における滑雪性状について	3- 6
3.3.1	札幌ドームモックアップによる滑雪実験	3- 6
3.3.2	札幌ドームにおける滑雪飛距離の測定	3-12
3.3.3	J R A新潟競馬場屋根モックアップによる滑雪実験	3-18
3.4	衝撃荷重に与える滑雪抵抗力の影響	3-30
3.4.1	検討の目的	3-30
3.4.2	実験結果の分析	3-30
3.4.3	屋根長さとの滑雪抵抗の関係	3-31
3.4.4	まとめ	3-33
	参考文献	3-34

## 第3章 大規模建築物における滑雪性状の検討

### 3.1 はじめに

第2章の雪氷塊による落下衝撃実験から衝突速度が衝撃荷重に大きく影響していることが明確となった。また、屋根上積雪の落雪による衝突では、屋根上滑雪時の速度や屋根を離れた後の落下状態により衝突速度が変化するため、摩擦抵抗や空気抵抗などの各種抵抗力も衝撃荷重に影響を与える要素となる。従って、屋根上での滑雪性状を把握することが衝撃荷重を評価する上で重要な課題であるといえる。

まず、これまでの研究をみると、苫米地ら<sup>1)</sup>は、表面に四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布（以下、膜材）を張った約1.8mの滑走面を持った勾配可変式の実験装置を用いて、雪質や積雪重量を変化させた滑雪実験を行っている。その結果、滑雪現象が起こる0℃近辺では動摩擦係数は0.05～0.1程度であることが報告されている。

山口ら<sup>2)</sup>は、滑走面長さが8mの勾配可変式の膜屋根を用いた屋外実験を行っている。実験では滑雪速度の他、滑雪飛距離の計測を行い、その結果と質点の運動法則に従った数値シミュレーション結果を比較し、滑走距離によっては二つの値に差が出てくることを指摘し、動摩擦抵抗力の他に粘性抵抗力を考慮する必要性があることを述べている。

伊東ら<sup>3)</sup>は、滑走面長さが7mの勾配可変式の塗装鋼板屋根を用いて、雪質、積雪重量、界面状態などをパラメータとした実験を行っている。実験では各条件下での滑雪速度の計測を行っており、その結果、いずれの条件においても重力に従った等加速の状態で滑走しており、積雪重量が大きいほど滑雪速度も大きくなり、二つの間に比例関係があることが報告されている。

このように滑雪性状に関する実験は幾つか行われており、その結果が報告されている。しかし、これらの実験は滑雪面が数メートル程度の装置によるものであり、ドーム建築物などのような大型施設の場合、静摩擦係数などの滑雪前の性状は一致すると考えるが、滑雪開始後の滑雪速度などについてのスケール効果が十分に検討されていない。本章では、実建築物やそのモックアップなどを用いて大規模建築物での実現象レベルにおける滑雪性状について検討した。今回、調査対象としたのは、JRA新潟競馬場スタンドのテラスプラザ膜屋根モックアップ及び札幌ドームとその屋根モックアップである。

## 3.2 大規模建築物の屋根材料について

第1章で記述したように、多雪地域に建設された大規模建築物では、その屋根上積雪処理を滑雪方式により行なっていることが多く、必然的に滑雪性能の高い材料が使われる。現在、最も多く用いられているのは、膜材料とステンレス材料である。ここでは、この二つの材料についてその概要を説明する。

### 3.2.1 ステンレス材料概説

ステンレス鋼<sup>4)</sup>は、鉄を主成分とし、これに10.5%以上のクロムを含有させることで、鉄の持っている錆易いという弱点を防止することを目的に改良された材料である。鉄にクロムを添加するとクロムが酸素と結合して鋼材の表面に保護皮膜（不動態皮膜）が形成され、これが錆や汚れの進行を防いでいる。この皮膜は、100万分の3mm程度の非常に薄い膜であるが、大変強く、破壊されても酸素があれば自動的に再生するという性質を有している。

ステンレス鋼には多数の種類があり、外装用には主にオーステナイト系のSUS304とSUS316が、内装用にはフェライト系のSUS430が使われる<sup>5)</sup>。また、材料性能として優れた特性を持っており、その中でも多雪地域での使用ということから低温特性に着目すると、普通鋼は低温になると急激に脆くなるという現象が見られるが、ステンレス鋼は低温下での性質が非常に安定しており、高い性能を維持している。

滑雪性能としては、動摩擦抵抗を表す量である動摩擦係数<sup>6)</sup>は広範囲の温度域で0.1以下を保っており、極めて滑りやすい材料であるといえる。また、凍着強度<sup>6)~7)</sup>については、膜材料に次いで小さな値を示しており、温度の上昇に伴って減少していく傾向を示している（温度-10℃：230kPa 5℃：130kPa 2℃：60kPa）。

### 3.2.2 膜材料概説

JRA新潟競馬場スタンドの膜屋根モックアップで使用されている屋根材料は、比較的新しい材料であり、他の屋根材料と異なり、特殊な構造をしている。ここでは、膜材料についてその概要を紹介する。

膜材料は、古くは遊牧民や狩猟民族の住居であるテントとして用いられ、動物の皮などが使われていた。その後、規模の大きなテントが指向されるようになり、1950年代には繊維織物にコーティング材を塗布した膜材料が開発された。この頃は繊維織物に絹や麻などの天然繊維が主流であったが、規模が大きくなるに伴い高強度で高品質な膜材料が要求されるようになり、1960年以降は高強度で耐候性や

加工安定性がよいことから合成繊維へと変遷していった。そして、恒久的な膜構造建築物への指向の高まりから、より高強度で防火性に優れたガラス繊維が用いられるようになった<sup>8)</sup>。

コーティング材については、1950年代は、天然ゴム、合成ゴム、PVC（軟質塩化ビニル）などが用いられていたが、1960年以降に合成繊維が主流となると、合成繊維との接着性のよいPVCがよく用いられるようになった<sup>8)</sup>。1970年代になると、四フッ化エチレン樹脂による耐候性、防火性、防汚性に優れた高機能なコーティング材が開発された。これによりガラス繊維に四フッ化エチレン樹脂をコーティングした防火性能が最も高い膜材料が完成した<sup>8)</sup>。

日本で使用される膜材料は、建設省の認定団体である（社）日本膜構造協会（以下、「膜構造協会」）に登録することになっている。膜構造協会では、膜材料をその防火性能によりA種、B種、C種の3つのグレードに分類している。その分類基準を以下に示す<sup>9)</sup>。

#### (1)膜材料A種

ガラス繊維織物に四フッ化エチレン樹脂を主成分とする樹脂（四フッ化エチレン樹脂の含有率が90%以上であるものに限る。）をコーティングしたもので、次の①から③までに適合するもの。

- ①ガラス繊維織物の重量が150g/m<sup>2</sup>以上であること。
- ②コーティング材の重量が400g/m<sup>2</sup>以上1100g/m<sup>2</sup>以下であること。
- ③膜材料の厚さが0.5mm以上であること。

#### (2)膜材料B種

ガラス繊維織物に塩化ビニル樹脂、クロロプレンゴム、クロロスルホン化ポリエチレンゴム、その他これらに類するものをコーティングしたもの（表面にフッ素樹脂フィルムを貼り合わせたものを含む。）で、次の①から④までに適合するもの。

- ①ガラス繊維織物の重量が150g/m<sup>2</sup>以上であること。
- ②コーティング材の重量が400g/m<sup>2</sup>以上1100g/m<sup>2</sup>以下であること。
- ③膜材料の厚さが0.5mm以上であること。
- ④難燃処理を施したものであること。

#### (3)膜材料C種

ポリアミド系、ポリアラミド系、ポリエステル系またはポリビニルアルコール系繊維織物に塩化ビニル樹脂、クロロプレンゴム、クロロスルホン化ポリエチレンゴム、その他これらに類するものをコーティングしたもの（表面にフッ素樹脂フィルムを貼り合わせたものを含む。）で、次の①から④までに適合するもの。

- ①合成繊維織物の重量が  $100\text{g}/\text{m}^2$  以上であること。
- ②コーティング材の重量が  $400\text{g}/\text{m}^2$  以上  $1100\text{g}/\text{m}^2$  以下であること。
- ③膜材料の厚さが  $0.5\text{mm}$  以上であること。
- ④日本工業規格の JIS A 1322（建築用薄物材の難燃性試験方法）に規定する防炎二級試験に合格するものであること。

日本の恒久膜構造建築物に用いられる膜材料の多くは、膜材料A種を用いており、恒久膜構造物としてはB種やC種に比べ、使用頻度が極めて多い状況にある<sup>10)</sup>。なお、JRA新潟競馬場スタンドの膜屋根モックアップでも、膜材料A種（以下、「膜材料」）を用いている。図3-1に膜材料の概要図、写真3-1に膜材料の断面図を示す。このように膜材料は、主として強度を負担するガラス繊維織物と耐候性、防火性などを高める四フッ化エチレン樹脂のコーティング層から構成されている。膜材料の厚さは、 $0.8\text{mm}$ （ガラス繊維織物の厚さ： $0.5\text{mm}$ 、コーティング層の厚さ： $0.15\text{mm} \times 2 = 0.3\text{mm}$ ）であり、ガラス繊維織物は、 $3.0\mu\text{m}$ の $\beta$ ヤーンで織られている。また、膜材料はガラス繊維で織られているため、光の拡散性が高く、柔らかい光が透過する特性を持っている。この可視光範囲の透過率は、全天空照度（ $10,000\text{Lx}$ ）において  $13.0\%$ あり、室内照度で  $1,300\text{Lx}$  を確保することができる<sup>11)</sup>。

また、コーティング材である四フッ化エチレン樹脂は、優れた滑雪性能を持っており、滑雪性状に最も大きな影響を与える凍着強度<sup>7,12)</sup>は、金属板やガラスなどの他の材料に比べ、 $1/10 \sim 1/100$ 程度であることが、実験などにより知られている。もちろん動摩擦係数などは、積雪寒冷地でよく用いられているステンレス鋼板などと同等な性能を有している。

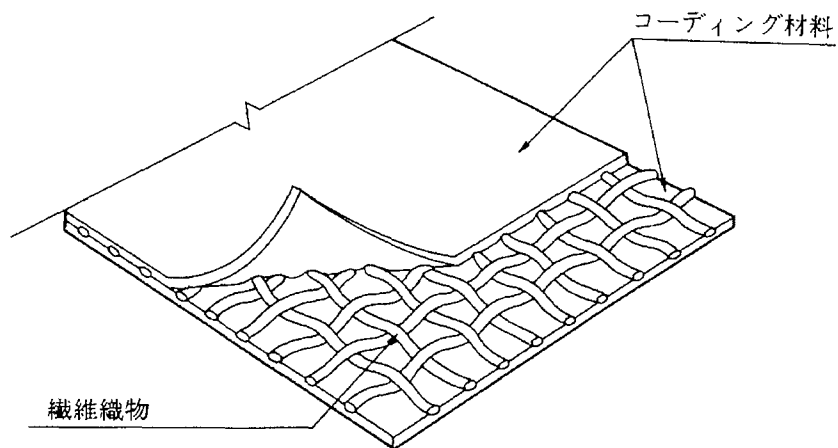


図 3 - 1 膜材料の概要

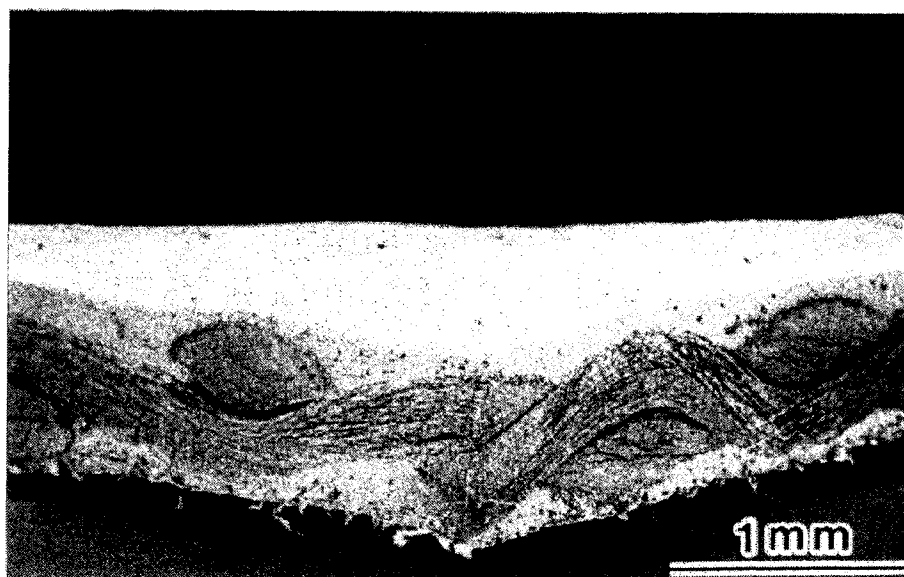


写真 3 - 1 膜材料の断面

### 3.3 大規模建築物における滑雪性状について

#### 3.3.1 札幌ドームモックアップによる滑雪実験

##### 3.3.1.1 実験の目的

本実験では、二つの項目について検証する。ひとつは大規模なステンレス屋根の滑雪性状を把握するため、滑雪時の速度と滑雪飛距離を計測すること。もうひとつは曲面を有する屋根では、滑雪時に遠心力が働くため軒先ではなくある地点で飛び出す（テイクオフポイント）ことが考えられる。その現象を確認し、曲面屋根における滑雪性状について検証することである<sup>13)</sup>。

##### 3.3.1.2 実験装置概要

写真3-2及び図3-2に実験装置の形状を示す。全体形状は、滑雪面の最高高さが20mであり、長さ18.5m、幅7.35m、傾斜角 $30^\circ$ のフラット面と曲率半径9mの曲面から構成されている。屋根仕上げは、ステンレス製の金属屋根であり、2cmの立ちはぜを持ったシーム溶接工法となっている（写真3-3参照）。なお、実験装置には、実建物と同様に展望台や排煙パネルが付いているため、滑雪実験は装置の中央で行った。

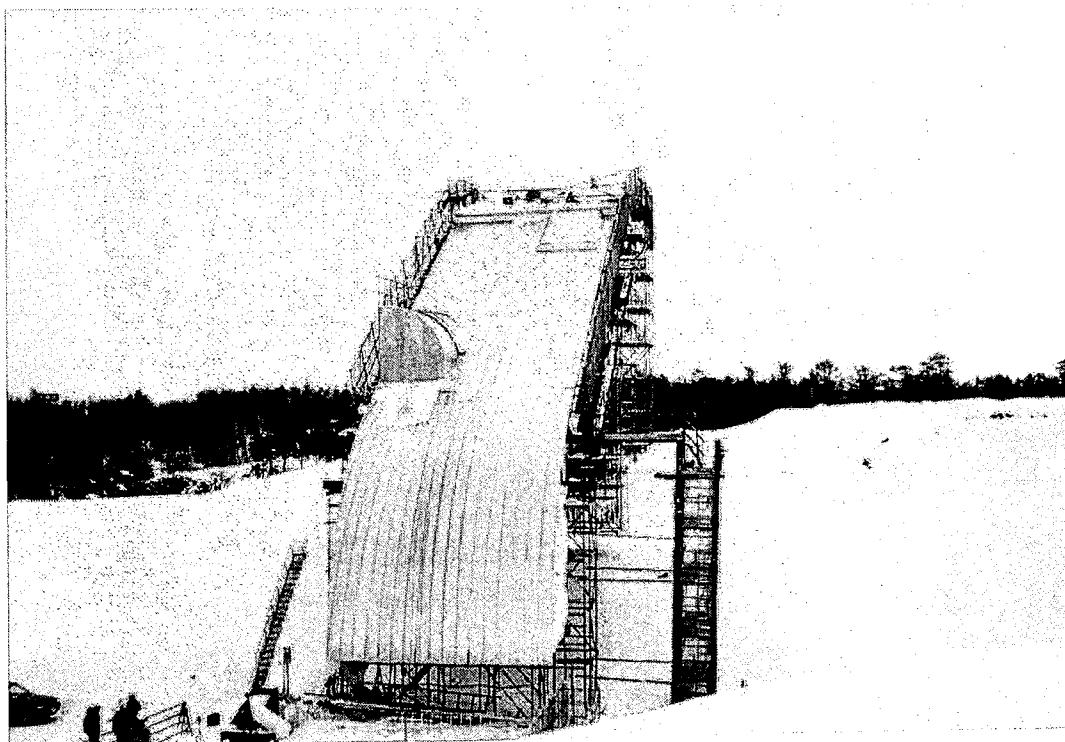


写真3-2 実験装置全景





写真 3 - 3 シーム溶接屋根の状況

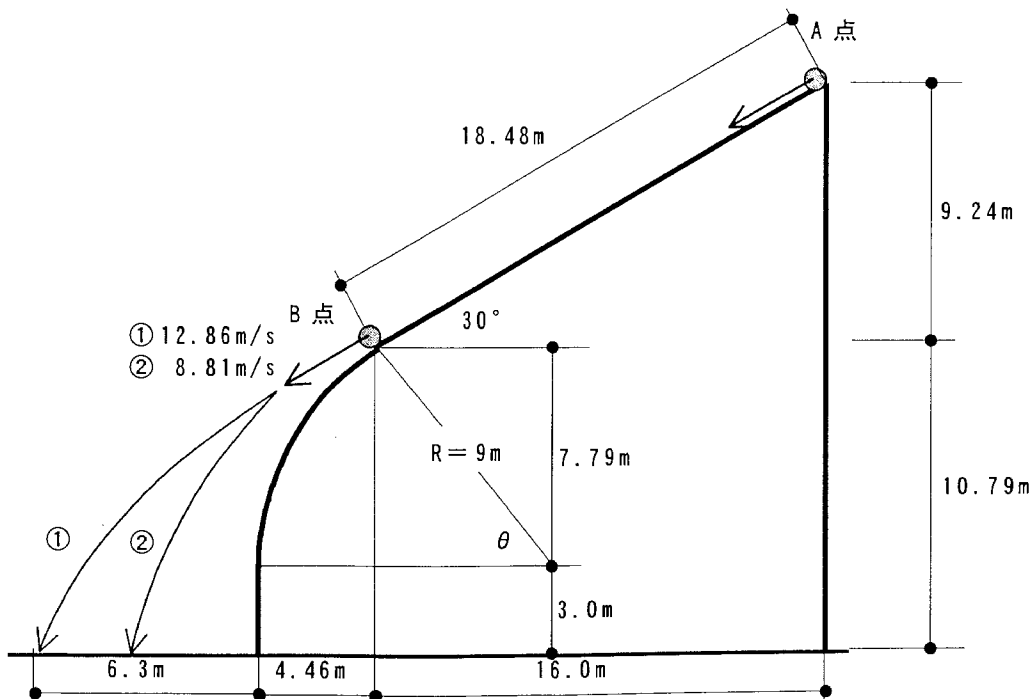


図 3 - 2 実験装置概要

### 3.3.1.3 実験方法

実験は平成11年1月19日(火)に札幌市内で行われた。実験に使用した雪ブロックは、実験装置の頂部に積もった雪からブロック状に切り出して製作した。滑雪飛距離の計測は、これらの雪ブロック寸法及び積雪密度を計測した後に滑雪させ、地上の落下位置から軒先までの距離を巻尺で測定した。

テイクオフポイントは、軒の曲面屋根付近にビデオカメラを設置して屋根雪が屋根面から離れる位置を観測した。なお、使用したカメラはデジタル方式で毎秒30コマの記録性能である。また、雪ブロックの飛び出し速度は、滑雪開始位置からテイクオフポイント間の滑雪状況をDVカメラで収録し、その映像から速度を算出した。表3-1に滑雪実験のシリーズを示す。初速度は、レベル1が自然滑雪状態、レベル2が人力により若干の初速度で押し出したものである。



写真3-4 切り出された雪ブロック

表3-1 実験シリーズ

ブロック寸法 (幅cm×長さcm×高さcm)	初速度	雪密度 (g/cm <sup>3</sup> )
60×60×30	レベル1	0.35
60×60×30	レベル1	0.34
60×60×30	レベル1	0.35
90×30×10 (氷)	レベル1	0.48
90×30×10 (氷)	レベル1	0.45
60×180×28	レベル1	0.33
60×180×25	レベル1	0.44
60×180×25	レベル1	0.37
70×30×10	レベル2	0.42
70×30×10	レベル2	0.49
70×30×10	レベル2	0.28
56×30×10	レベル2	0.44

### 3.3.1.4 テイクオフポイント及び滑雪飛距離の検証

テイクオフポイントと滑雪飛距離を数値シミュレーションにより検討する。図3-2に検討用寸法を示す。曲面屋根において雪塊に働く遠心力  $F_1$  及び重力方向成分  $F_2$  は、次式で表される。ここで、 $F_1 > F_2$  がテイクオフ条件となる。従って、 $R = 9\text{m}$ 、 $\theta = 60^\circ$  のとき、 $V = 8.74\text{m/s}$  以上でテイクオフが発生する。

$$F_1 = mV^2/R \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$F_2 = mgsin\theta \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

( $m$  : 質量、 $V$  : 速度、 $R$  : 曲率半径)

また、屋根積雪の滑雪飛距離は質点の運動法則により次式で求めることができる<sup>2)</sup>。

$$A = \frac{V \cos\theta_2 \sqrt{2gH + (V \sin\theta_2)^2} - V \sin\theta_2}{g} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$V = \sqrt{2gD(\tan\theta_1 - \mu_k)} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、  
 $A$  : 滑雪飛距離 (m)                       $\theta_1$  : 滑走角度 (deg)  
 $V$  : 飛出速度 (m/s)                       $\theta_2$  : 飛出角度 (deg)  
 $D$  : 滑走距離 (m)                           $H$  : 軒高 (m)  
 $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)                   $\mu_k$  : 動摩擦係数

ステンレス屋根の動摩擦係数を  $\mu_k = 0.05$  と仮定すると<sup>6)</sup>、 $A$  点から滑雪を開始した雪塊は、 $B$  点において  $V = 12.86\text{m/s}$  の速度まで加速される (図3-2中の①)。また、動摩擦係数としては比較的大きい値である  $\mu_k = 0.33$  のとき、 $V = 8.81\text{m/s}$  となり (図3-2中の②)、 $B$  点においてテイクオフが発生することが十分予測できる。

### 3.3.1.5 実験結果

写真3-5にテイクオフポイント観測結果を示す。写真のように雪ブロックは軒の曲面に沿って滑雪せず、屋根面からテイクオフして地上へと落下している。テイクオフポイントは、屋根面と軒の曲面との接合部 (図3-2中の  $B$  点) であった。なお、いずれの雪ブロックにおいても同様な位置でテイクオフした。これによりテイクオフ現象が実証された。この結果、滑雪速度によっては軒先角度の調整が機能しない場合が出てくるため、設計段階において本結果を十分考慮する必要がある。

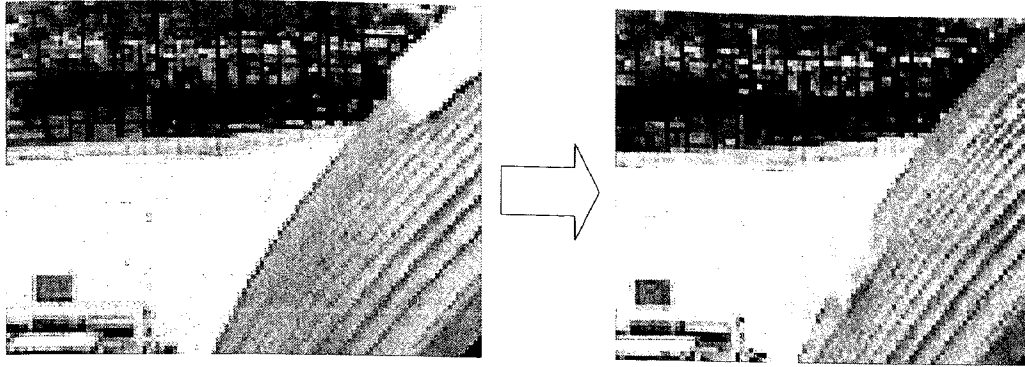


写真 3 - 5 テイクオフの状況

図 3 - 3 に雪ブロックの飛び出し速度と飛距離の関係を示す。これよりいずれのブロックにおいても飛距離は、飛び出し速度の増加に伴い大きくなる傾向を示すことがわかる。初速度がレベル 1 の場合、飛距離は  $60 \times 60 \times 30$  の雪ブロックで 3.5m 程度、 $60 \times 180 \times 30$  で 4m 程度、氷ブロック及びレベル 2 の雪ブロックで 4.5m 程度であった。

先と同様に滑雪シミュレーションを行うと、 $\mu_k = 0.05$  のとき B 点からの距離  $A = 10.76\text{m}$  (軒先から 6.3m) となり、実測値を大きく上回っている (図 3 - 2 参照)。写真 3 - 6 に滑雪後の屋根表面の状態を示すが、ハゼや表面に雪が付着していることがわかる。実験日は気温が氷点下であり、はぜ等の屋根形状の他、外気温が動摩擦係数に影響したものと考えられる。 $\mu_k = 0.3$  のとき  $A = 8.74\text{m}$  (軒先 4.28m)、 $\mu_k = 0.35$  のとき  $A = 8.15\text{m}$  (軒先 3.69m) であり、このことから実験時の動摩擦係数は、 $\mu_k = 0.3 \sim 0.35$  程度であると推測される。

### 3.3.1.6 まとめ

本研究では、大規模建築物における滑雪性状を把握し、曲面屋根におけるテイクオフ現象を確認することを目的に、札幌市において大規模な滑雪実験を行った。以下に研究の内容をまとめる。

比較的滑雪性能の高い材料であるステンレスでも、気象条件や屋根形状によっては、大きな抵抗を受ける場合がある。ただし、逆に高気温や強風により滑雪を促進し、より遠くへ飛ばす状況もあるため、様々な条件を考慮した上で計画する必要がある。

曲面屋根においては、滑雪した雪氷塊は軒先ではなく曲面上のある地点から飛び出すテイクオフポイントがあるため、設計時に考慮する必要がある。また、そのテイクオフポイントは、滑雪時に働く遠心力と重力成分との関係から求めることができる。

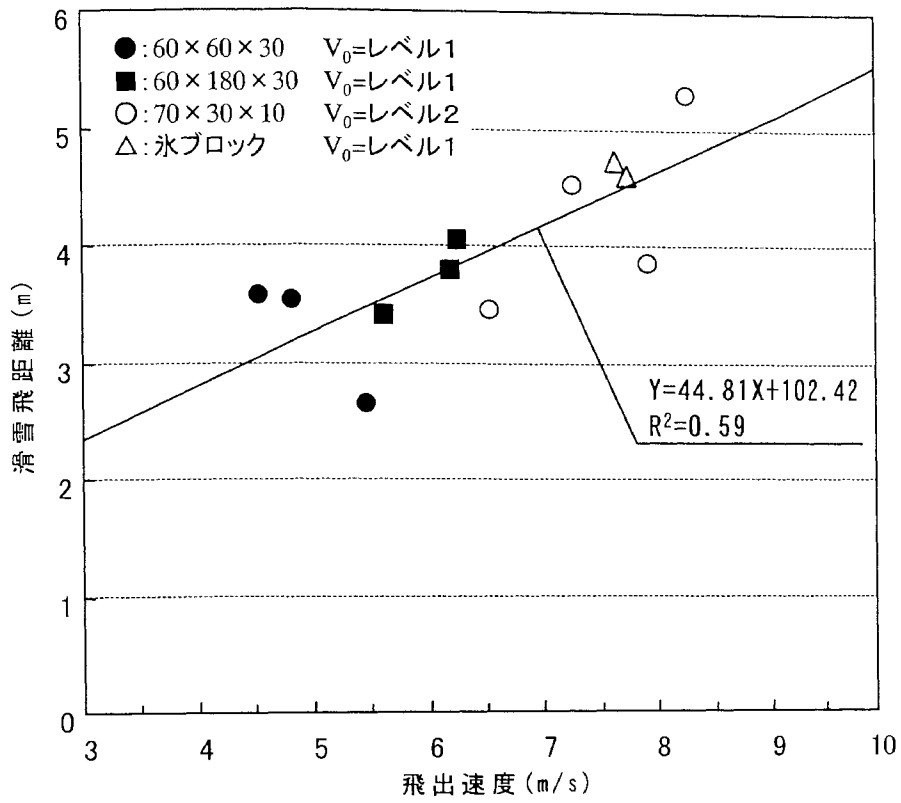


図 3 - 3 飛出速度と滑雪飛距離の関係



写真 3 - 6 滑雪後の屋根表面の状態

### 3.3.2 札幌ドームにおける滑雪飛距離の測定

#### 3.3.2.1 実験の目的

これまでの滑雪実験では、人工的に製作された雪ブロックを用いて、積雪のない滑走面上を滑らせるという実験方法が採られている<sup>1)~3)</sup>。雪ブロックの滑走面や実験温度等を変化させ、実際の滑雪現象を再現しようと試みており、多くのデータを蓄積している。また、実建造物の屋根上滑雪性状を把握、評価するには、実験データを適用する以外に実際に発生している滑雪状況を調査することが必要であると考えられる。ただし、雪ブロック等ではなく、実際の屋根上積雪による滑雪現象を実測することは、タイミングを合わせる事が非常に困難であり、調査中に落雪の可能性のある危険を伴う作業である。ここでは、札幌市に建設中の札幌ドームにおいて、これらの課題を考慮し、タイムラプスビデオによる滑雪飛距離の調査を行ったので、その方法と結果について報告する。

#### 3.3.2.2 調査対象建物概要

本ドームの屋根は、ステンレス製の金属屋根で滑らかな平滑面を持つ形状をしている。ドーム頂部をパーフェクトルーフ、その周りをシーム溶接屋根で構成されており、その境界には25cmの段差を設けている。シーム溶接屋根上の積雪が滑雪しやすいようにこの段差で積雪を分断し、パーフェクトルーフ上の積雪による引張抵抗が発生するのを防止している<sup>14)</sup>。

建設地	：札幌市豊平区羊ヶ丘1	建築面積	：55,157m <sup>2</sup>
主用途	：多目的競技場	最高高さ	：63.8m（71-ルーフ面より）
屋根構造	：直交2方向鉄骨アーチ構造	スパン	：245m×227m
屋根仕上	：ステンレス（シーム溶接屋根＋パーフェクトルーフ）		



写真3-7 調査対象建物

### 3.3.2.3 調査方法

ドーム西側の1断面について平成11年12月25日～平成12年3月25日に滑雪飛距離の調査を行った。測定方法は、ドーム屋根の調査対象部分が映せる所とその軒下にそれぞれタイムラプスビデオを設置し、調査期間中、24時間、屋根上の積雪・滑雪状況と軒下の落雪状況をビデオ記録し、その画像から落雪位置（滑雪飛距離）を読み取るという方法である。

#### 準備作業

写真3-8に示したようにビデオを軒下に設置した後、軒下位置からの距離を1mピッチでビデオに記録し、写真3-11のような滑雪飛距離読み取り図を作成する。

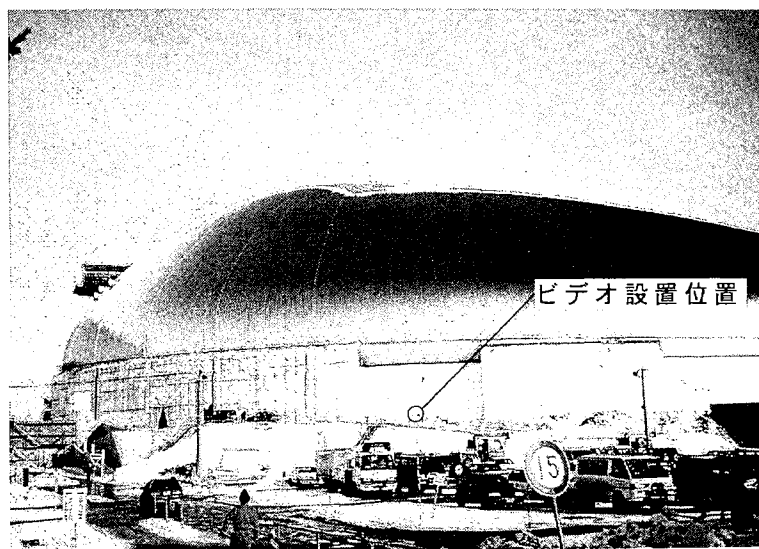


写真3-8 調査対象建物（平成11年12月時点）

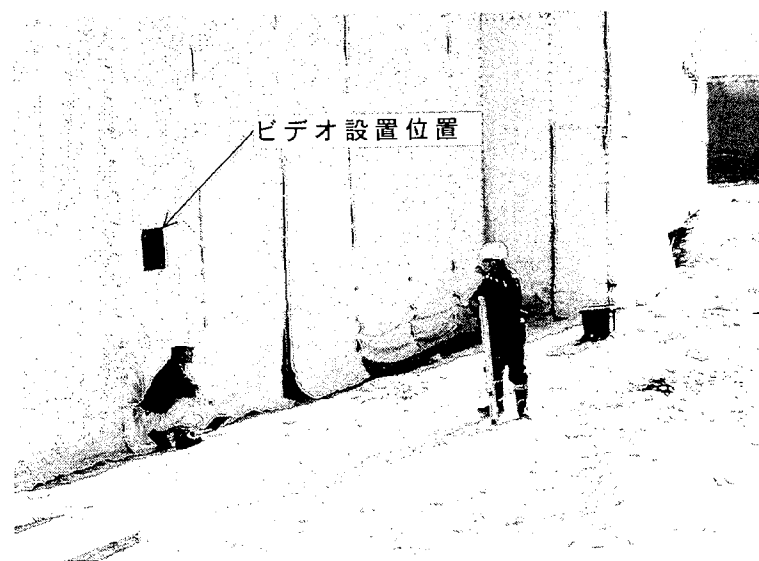


写真3-9 準備作業状況（軒位置からの距離測定）

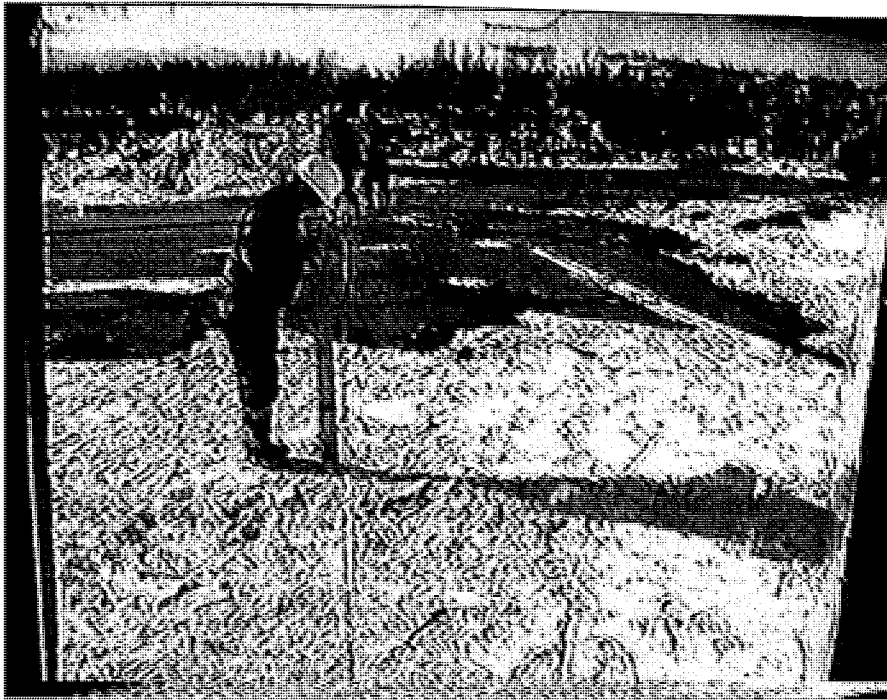


写真 3 - 10 ビデオ画像 (軒位置から 4m)



写真 3 - 11 滑雪飛距離読み取り図



### 3.3.2.4 調査結果

図3-12に今回の観測結果の一例を示す。これは平成11年12月26日に記録されたものであるが、雪面上の状況変化により雪塊の飛散位置を読み取ることができる。また、図中に同時刻のドーム屋根画像を示すが、これらを照らし合わせることで、滑雪開始位置を読み取ることができる。

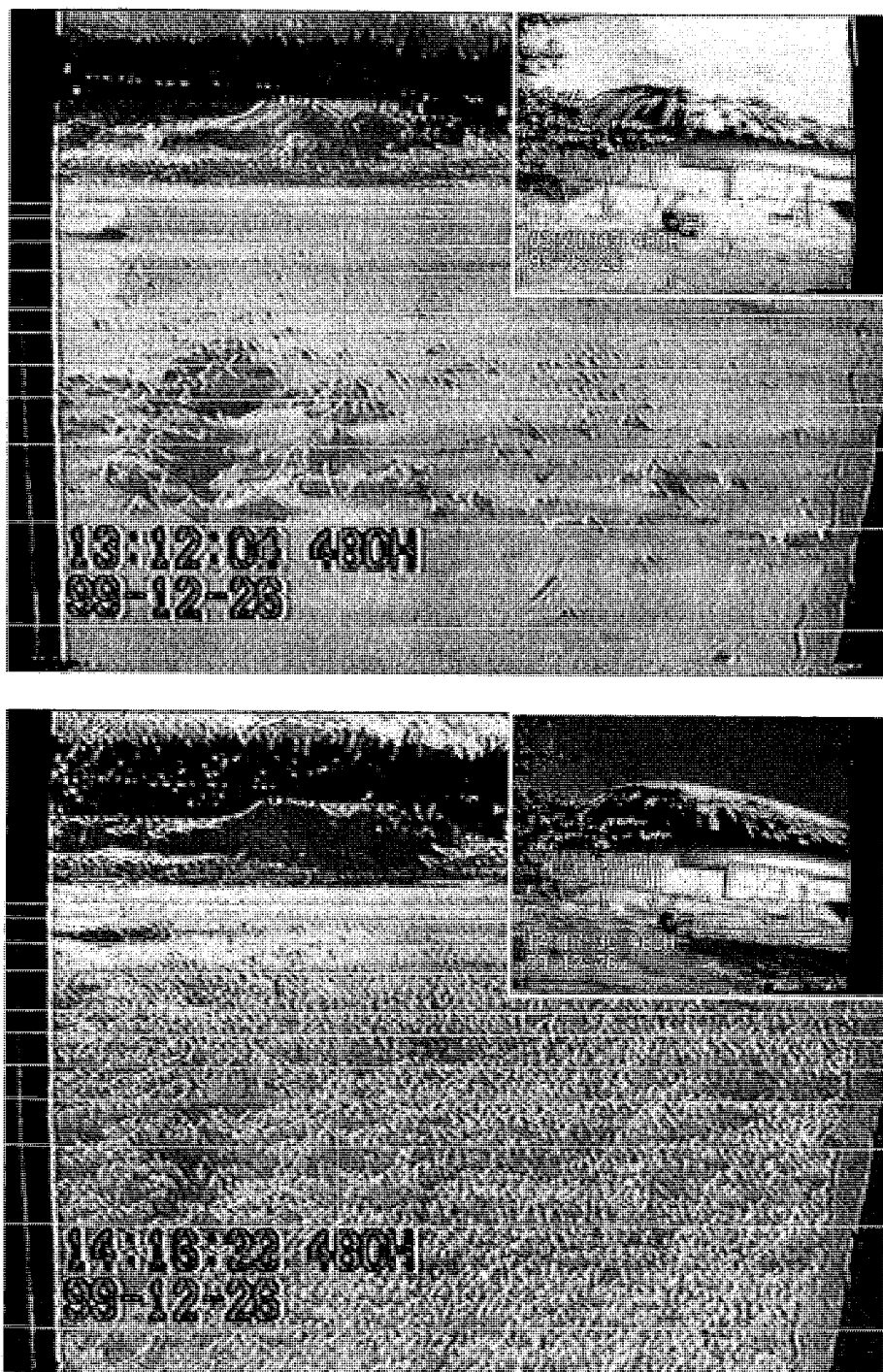


写真3-12 観測結果の一例（記録日：平成11年12月26日）

### ビデオ画像の読み取り方

図3-4に実際の落雪位置と読み取り図との関係を示す。このように画面上のラインと雪面上の落雪位置にはズレがあるため、その分を考慮する必要がある。

$$LS/(1.9-H)=LG/1.9 \rightarrow LS=LG \times (1.9-H)/1.9$$

### 12/26 記録画像の結果

- ・ 地上積雪深\* : 30cm 気温\* : 1.3℃
- ・ 時刻 14:16 画像 : LG=10.0m H=0.30m → LS=8.4m
- ・ 時刻 14:52 画像 : LG=15.0m H=0.30m → LS=12.5m

\* 札幌管区気象台データより

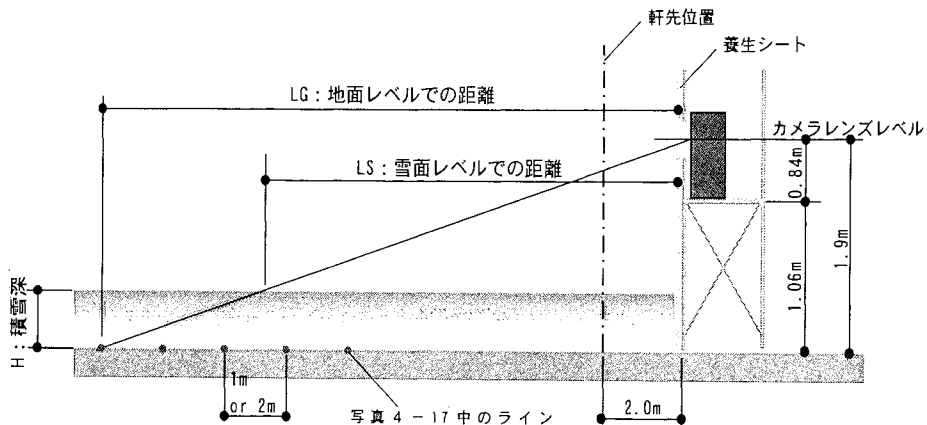


図3-4 カメラ位置とビデオ画像の関係



図3-5 滑雪開始位置

### 3.3.2.5 まとめ

図3-5に滑落雪が確認された時刻の屋根上積雪状況を示す。これより滑雪開始位置を推測することができる。ここでは本滑雪現象を屋根の曲面を考慮した滑雪シミュレーションにより検証してみた。検討条件は、動摩擦係数を0.05とし、空気抵抗等は考慮していない。図3-6にその結果を示すが、時刻14:16画像のLS=8.4mに対し8.76m、時刻14:52画像のLS=12.5mに対し11.79mといずれもほぼ近い値であった。このことから本測定方法は、滑雪の実現象における飛距離を測定する上で十分有効な方法であるといえる。

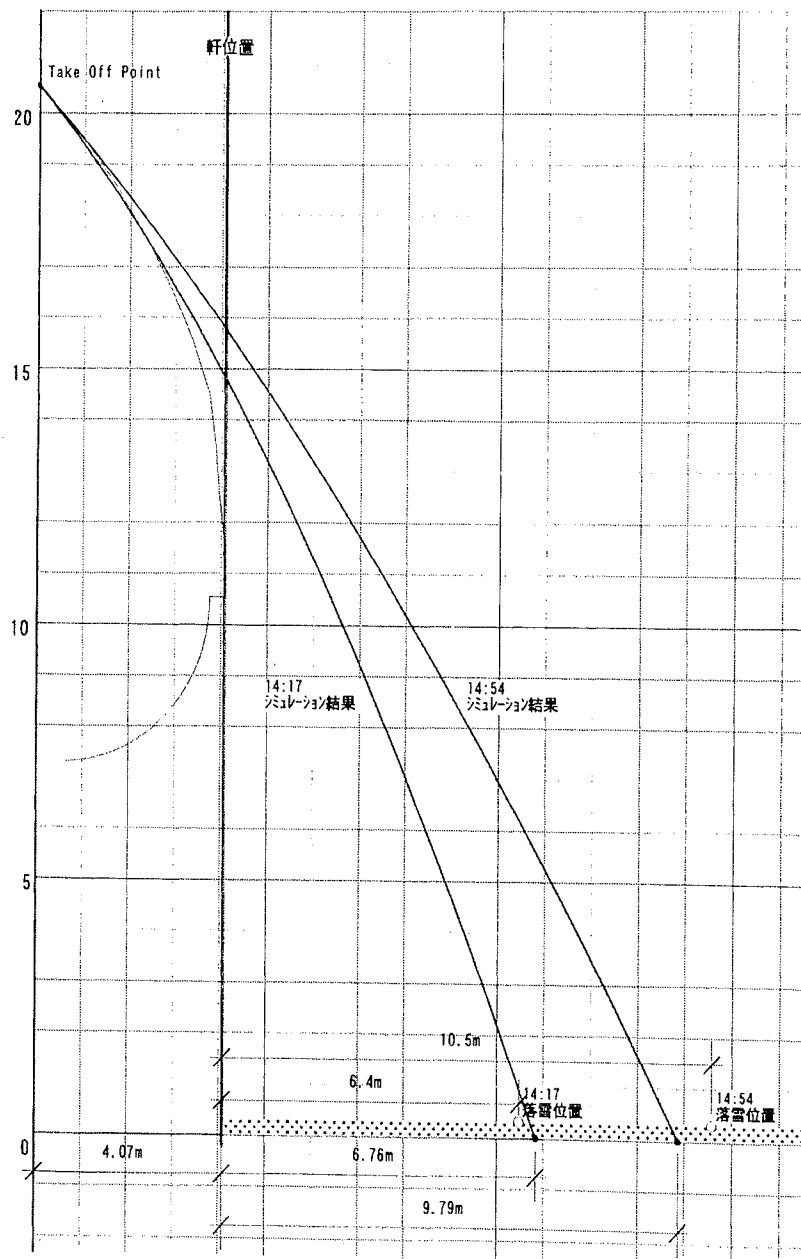


図3-6 調査結果とシミュレーション結果の比較

### 3.3.3 J R A新潟競馬場膜屋根モックアップによる滑雪実験

#### 3.3.3.1 実験の目的

これまでの研究により滑雪時の雪塊には動摩擦抵抗力の他に粘性抵抗力が働いていることが報告されている<sup>15~16)</sup>。しかし、最も一般的な抵抗力である空気抵抗力についてはあまり考慮されていない。これは実験規模が小さいため殆ど影響しないという考えによるものと思われるが、大規模建築物では滑雪速度も大きくなるため空気抵抗力は決して無視できない要素であると考えられる。ここでは、膜屋根の大規模モックアップを用いて滑雪実験を行い、実現象レベルにおける膜屋根構造物の滑雪性状について検討した。

#### 3.3.3.2 実験装置概要

写真3-13及び図3-8に実験装置の形状を示す。全体形状は、長さ36m、最高高さ22m、曲率半径59m、最大滑走距離41mの円弧形状をしており、膜パネルは、四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布を幅4.5mのV字溝型形状に張っている。張力導入は、膜面内側からの引き込みにより行っているが、実建物と同様にパネル中央には60φの押えケーブルが配置されている。このケーブルは下部軒下の堆雪エリアにアンカーされている。

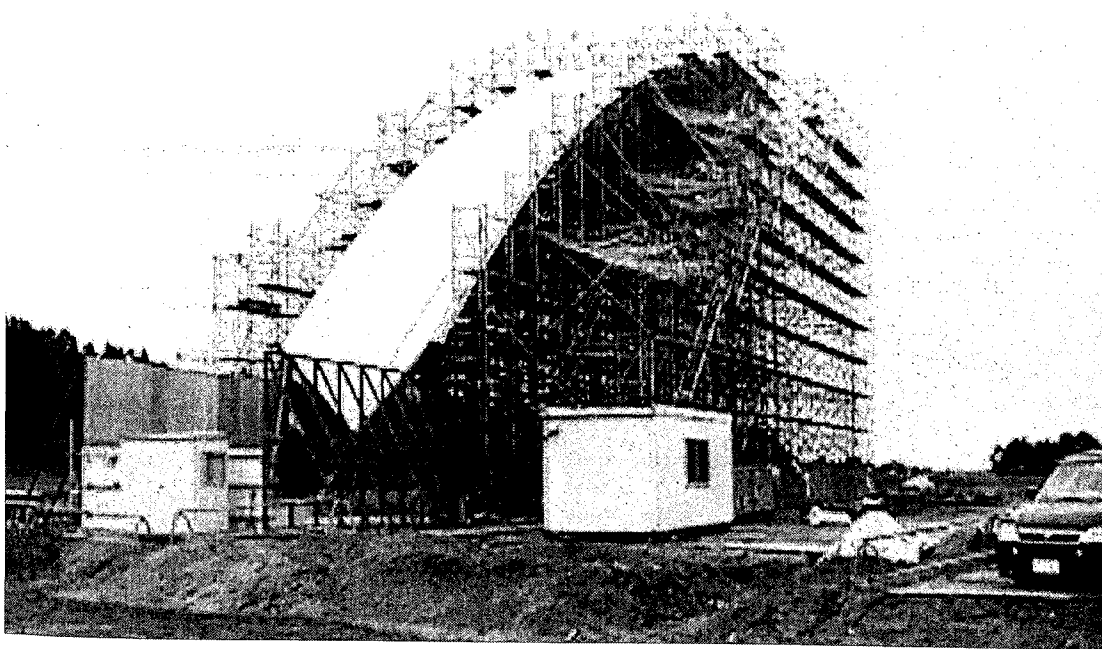


写真3-13 実験装置全景

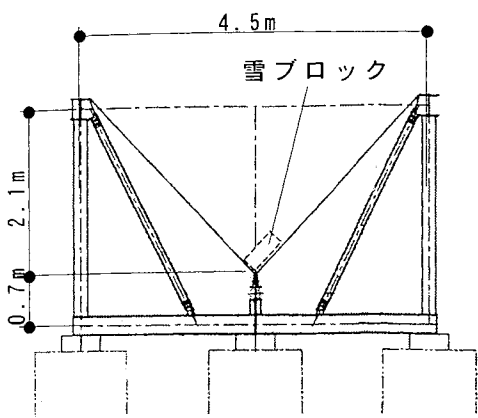


図 3 - 7 膜パネル断面図

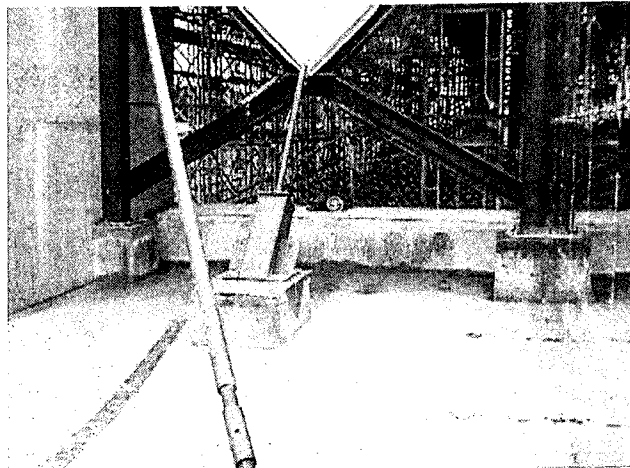


写真 3 - 14 ケーブルアンカー部

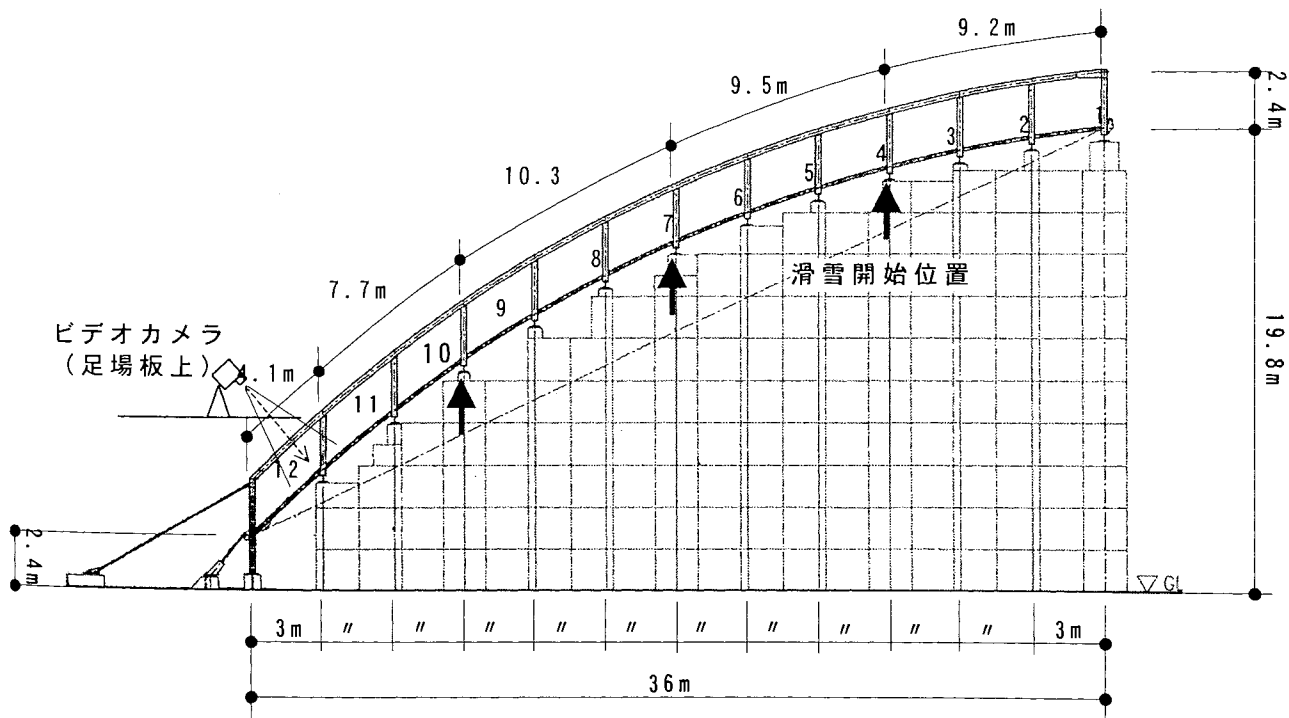


図 3 - 8 実験装置概要

### 3.3.3.3 実験方法

事前予備実験により実験条件を決定し、平成12年2月18日、新潟県北蒲原郡笹神村次郎丸にて本実験を実施した。当日の天気は曇り、気温は2~3.5℃であった。

実験は、図3-8に示した膜パネル谷位置3箇所(4,7,10)から雪ブロックを滑走させ、その滑走状況を軒先近辺に設置したビデオカメラ(位置12)により記録した。なお、使用したカメラはデジタル方式で毎秒30コマの記録性能である。また、記録画像から滑雪速度を読み取り易くするため、ケーブルには10cmピッチに目盛を入れている。

#### 雪ブロックの製作と設置方法

試験体である雪ブロックは、50cm×50cm×20cm及び50cm×50cm×10cmの2種類を用意した。雪ブロックの製作は、写真3-17に示したように同形の型枠を用いて、現地積雪を圧密しながら行った。その際、滑雪開始位置である膜パネル谷部へ雪ブロックを設置するための吊り下げ用ロープを埋め込んだ。なお、雪ブロックに使用した雪質は、ぬれ雪状態であり、雪ブロックの密度は、0.47~0.75g/cm<sup>3</sup>であった(密度0.6g/cm<sup>3</sup>以上のものが約80%を占めている)。

製作された雪ブロック(質量:30~40kg)は、クレーンを用いて所定の滑雪開始位置まで持ち上げた。写真3-18に示すように、持ち上げた雪ブロックは、その場で質量を測定し、吊り下げ用ロープを用いて膜パネルの谷位置まで持っていき、ロープを放して自然滑雪させた。

図3-7に膜パネル上の雪ブロック位置を示すが、滑雪時には雪ブロックは底面及び片側面が膜パネルと接しており、また、押えケーブル上面を覆いながら滑走している。なお、ここでは雪ブロックの底面+片側面を接触面とし、全滑雪中にこれが維持されているものとして検討を行なう。

#### 実験シリーズ

表3-3に実験の全シリーズを示す。各実験シリーズとも同じ条件で3回繰り返し行っている。

表3-3 実験シリーズ

実験シリーズ	滑雪開始位置	雪ブロック寸法(cm)	実験回数
1	4	50×50×20	9
2	4	50×50×10	3
3	7	50×50×20	3
4	10	50×50×20	3

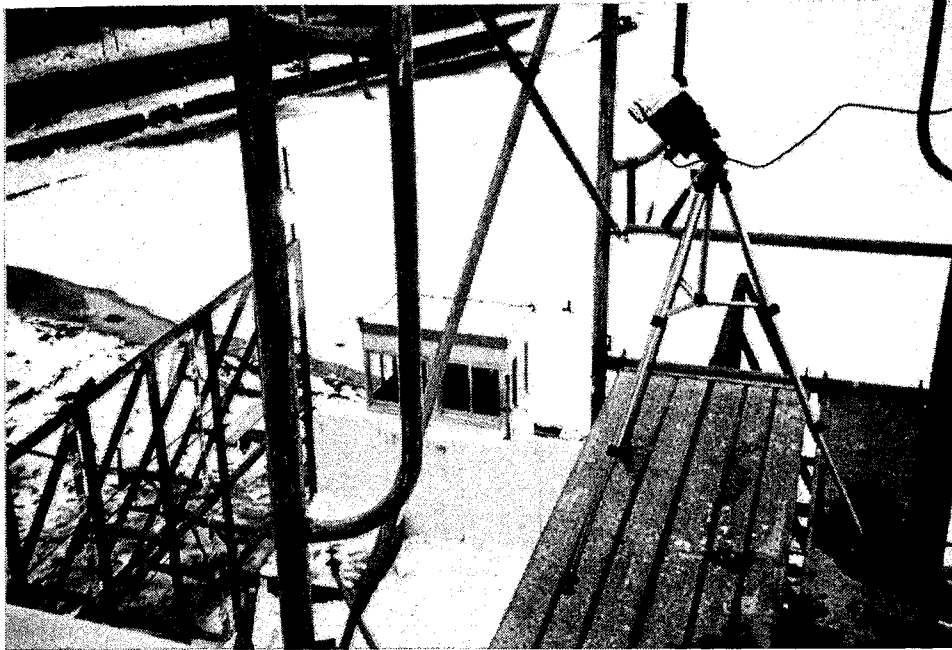


写真 3 - 15 ビデオカメラ設置状況



写真 3 - 16 カメラアングルとケーブル上の目盛

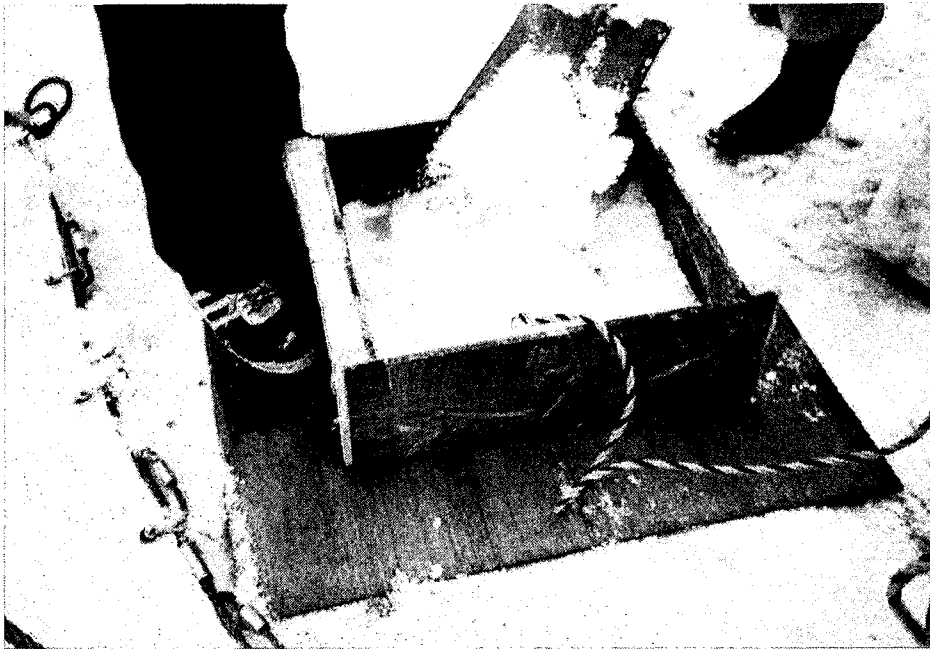


写真 3 - 17 雪ブロック製作状況

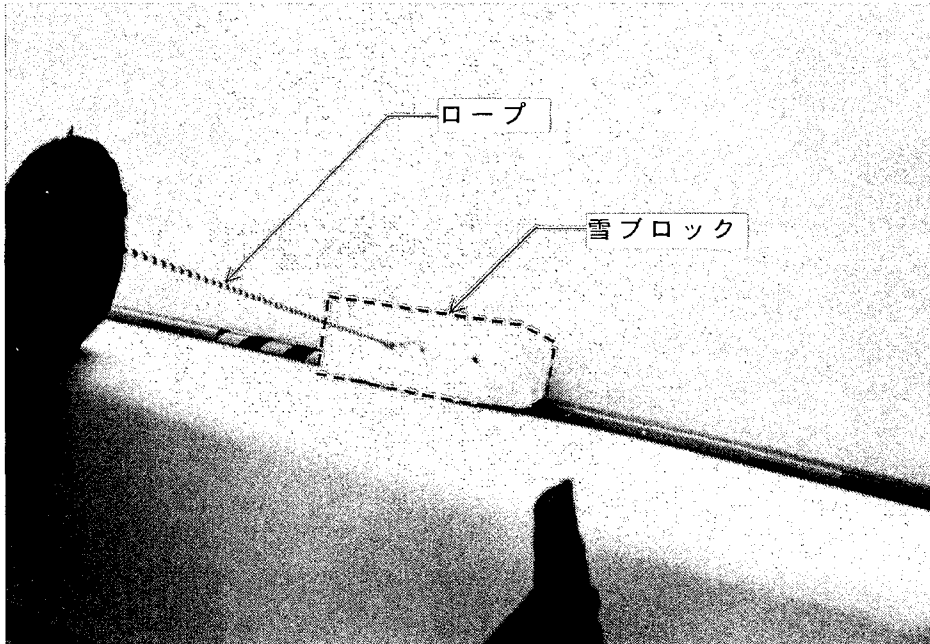


写真 3 - 18 雪ブロック設置状況



#### 3.3.3.4 実験結果

実験における滑雪速度は、ビデオカメラに記録した映像より、写真3-19に示したように、1/30秒ごとのコマ撮り画像から雪ブロックの位置を読み取り、速度換算した。

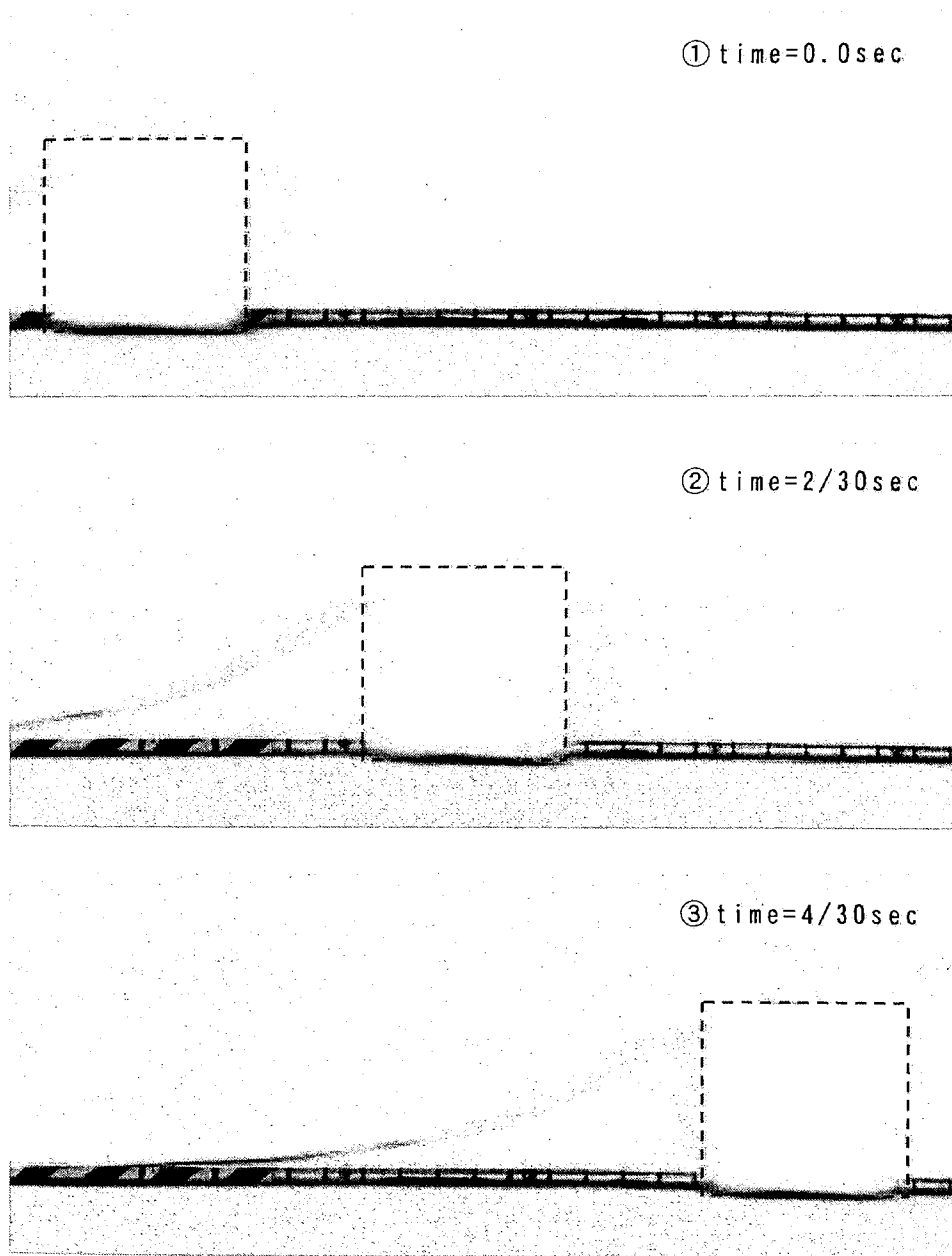


写真3-19 実験結果（実験ケース2のビデオ記録画像より）  
谷部ケーブルに記された10cmピッチの目盛から移動距離を測定し、  
速度を算出する。

### (1) 滑走長さと滑雪速度の関係

図3-9に滑走距離と滑雪速度の関係を示す。位置4(滑走長さ27.5m)からの滑走では、滑雪速度は12.6~14.1m/sec、位置7(滑走長さ18.0m)からは10.8~12.0m/sec、位置10(滑走長さ7.7m)からは7.5m/secであった。このように滑走距離が増加すると滑雪速度も増加する傾向にあることがわかる。また、本試験装置の形状的な特徴として、滑雪距離が増加するほど、その平均勾配は減少するため、直線的な増分傾向とはならないと考えられる。滑雪速度は、滑走距離の他に屋根勾配等にも影響され、動摩擦抵抗力のみを考慮した場合、滑雪速度は以下の式で求められる<sup>2)</sup>。

$$V = \sqrt{2gL(\sin\theta - \mu_k \cos\theta)} \dots \dots \dots (3.5)$$

ここに、 $V$ : 滑雪速度(m/sec)、 $L$ : 滑走距離(m)、 $\theta$ : 屋根勾配(deg)、 $\mu_k$ : 動摩擦係数、 $g$ : 重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)である。

### (2) 積雪質量と滑雪速度の関係

図3-10に実験ケース1~12(滑雪開始位置4)における積雪質量と滑雪速度の関係を示す。これによると、積雪質量の増加に伴い、滑雪速度も増加する傾向にあることがわかる。また、その分布は、 $V=0.054m+12.048$ で表すことができる。ここに、 $v$ : 滑雪速度(m/sec)、 $m$ : 積雪質量(kg)である。

### (3) 雪ブロックに働く滑雪抵抗力

本試験装置の円弧形状を考慮した質点の運動法則による滑雪シミュレーション<sup>13)</sup>を実施し、その結果と比較することにより、各実験ケースでの総合的な滑雪抵抗力を求めた。なお、ここでは滑雪抵抗力として動摩擦抵抗力、粘性抵抗力、空気抵抗力を考慮する。

一般に滑雪速度は、動摩擦抵抗のみを考慮した場合は、(3.5)式で求めることができる。ただし、曲面屋根上での滑雪では、その位置によって屋根勾配が変化するため、ここでは屋根を20分割し、上方のエリアから順に速度を算出し、次のエリアでは先に求めた速度を初速度として速度を算出する。これを分割数だけ繰り返すという手法を用いた(図3-11参照)。

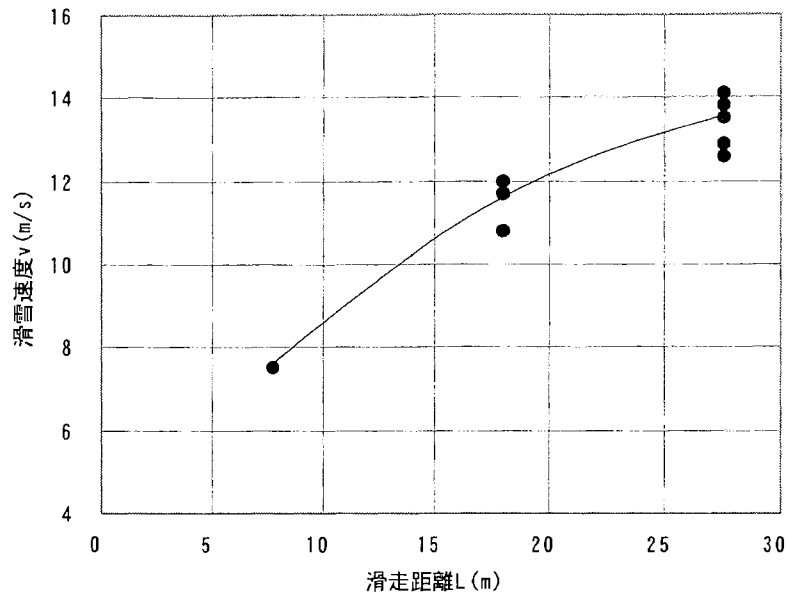


図 3 - 9 滑走長さと滑雪速度の関係  
(雪ブロック : 50cm×50cm×20cm)

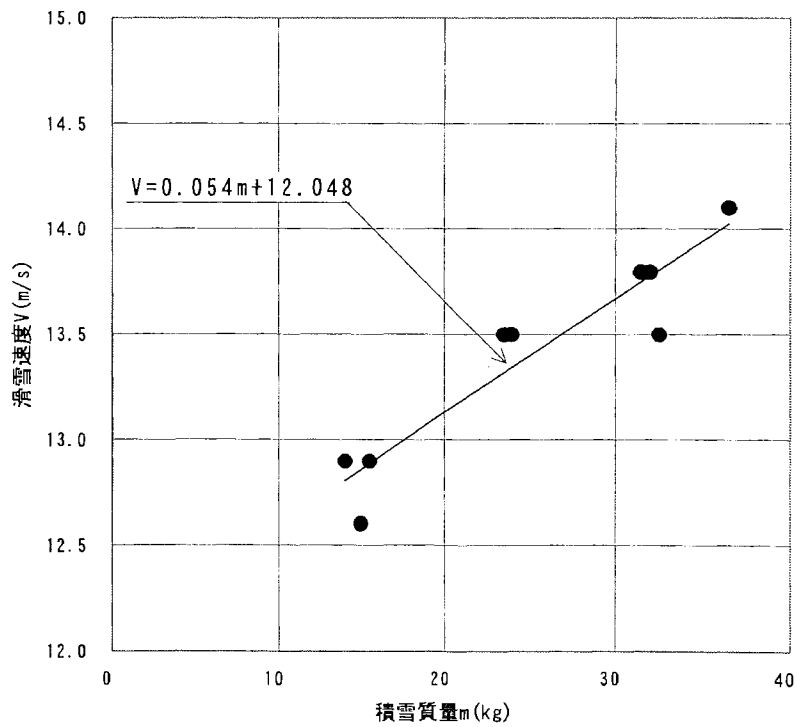
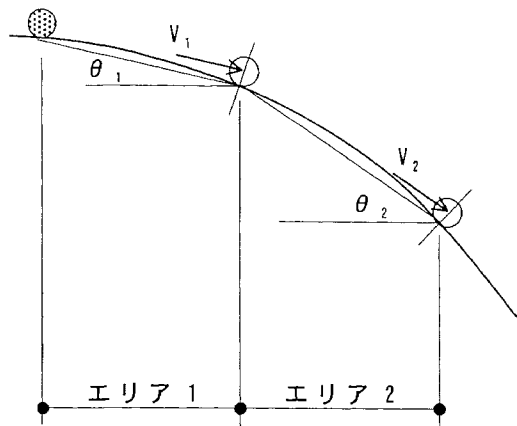


図 3 - 10 積雪質量と滑雪速度の関係



$$V_2 = V_1 + g \cdot (\sin \theta_2 - \mu_k \cos \theta_2) \cdot t_2$$

( $t_2$ : エリア 2 における滑走時間)

図 3-11 曲面屋根における滑雪シミュレーション

図 3-12 に滑雪シミュレーションによる動摩擦係数と滑雪速度の関係を示す。本シミュレーションでは、動摩擦係数のみ設定し、他の抵抗力は考慮していない。つまり、実験結果と図 3-12 を比較することにより、動摩擦抵抗力、粘性抵抗力、空気抵抗力という総合的な滑雪抵抗力を動摩擦抵抗力 ( $\mu mg \cos \theta$ ) に換算した形で求めることができる。なお、図中の直線及び関係式は、シミュレーション結果を直線近似したものである。また、表 3-4 にカメラ記録位置 12 より  $\theta = 41.68^\circ$  としたときの各実験シリーズの滑雪抵抗力  $R$  を示す。

次に実験ケース 1~12 についてこの滑雪抵抗力  $R$  に含まれている空気抵抗力  $F_a$ 、動摩擦抵抗力  $F_b$ 、粘性抵抗力  $F_c$  を求める。

まず、空気抵抗力  $F_a$  であるが、これは以下の式で表すことができる。

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho_a \cdot S \cdot V^2 \quad \dots \dots (3.6)$$

ここに、 $C_d$ : 抵抗係数、 $\rho_a$ : 空気密度 ( $1.3 \text{ kg/m}^3$ :  $0^\circ\text{C}$ )、 $S$ : 風の受圧面積 ( $\text{m}^2$ )、 $V$ : 滑雪速度 ( $\text{m/sec}$ ) である。抵抗力係数  $C_d$  は雪ブロックが矩形のため 1.2 とした。

また、滑雪抵抗力  $R$  から空気抵抗力  $F_a$  を引いたものを  $F_r$  とすると、次式になる。

$$F_r = F_b + F_c = \mu_k mg \cos \theta + F_c \dots (3.7)$$

ここに、 $\mu_k$ : 動摩擦係数、 $m$ : 積雪質量 ( $\text{kg}$ )、 $g$ : 重力加速度 ( $9.8 \text{ m/sec}^2$ )、 $\theta$ : 屋

根勾配(deg)である。実験シリーズにおける各抵抗力の平均値を表3-5に示す。

式(3.7)を  $F_r$  と  $mg\cos\theta$  の一次関数と捉えると  $\mu$  が傾きで  $F_c$  が切片に相当する。表3-5に示した実験結果から滑雪開始位置4における  $F_r$  と  $mg\cos\theta$  の関係を図3-13に示す。これより  $\mu$  及び  $F_c$  を求めると、動摩擦係数 0.03、粘性抵抗 11.1N が得られる。本試験体の平均勾配は  $26^\circ$  であり、この結果は、山口ら<sup>2)</sup>の実験結果とほぼ一致している。

以上より、雪ブロック寸法の異なる実験シリーズ1と2について、各抵抗及びその比率を表3-6にまとめる。空気抵抗及び動摩擦抵抗は、実験シリーズ1がシリーズ2の約2倍となっており、その形状に則したものとなっている。また、いずれのシリーズにおいても動摩擦抵抗の占める割合は小さく2割以下となっており、滑雪速度が大きくなると、その影響は小さくなることがわかる。つまり滑雪速度が大きくなる大規模建築物においては、動摩擦抵抗の占める割合は2割程度であり、空気抵抗や粘性抵抗の方が大きく影響していることがわかる。

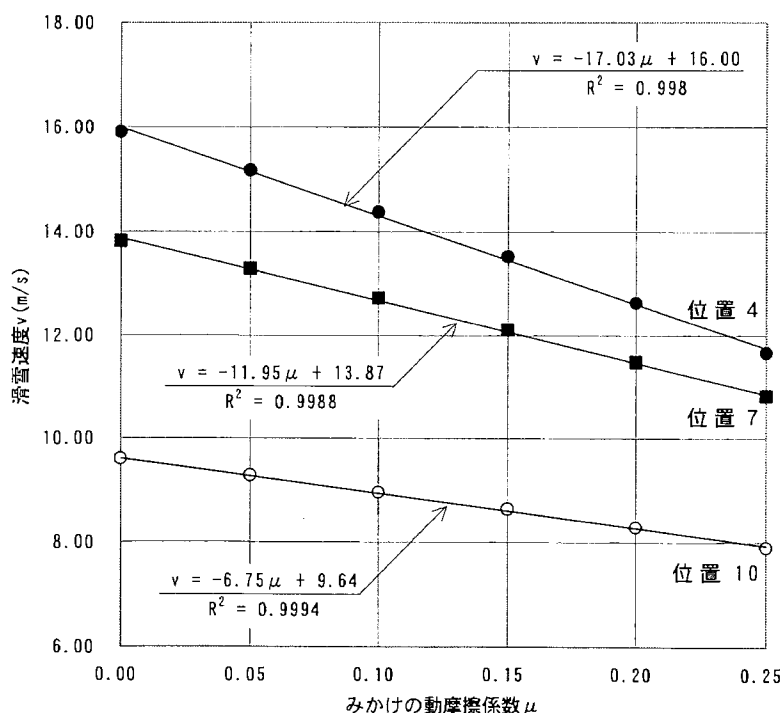


図3-12 動摩擦係数と滑雪速度の関係

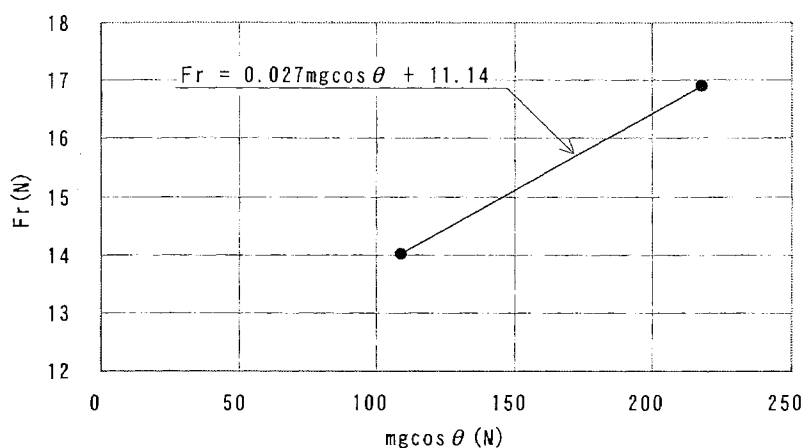


図 3 - 13 動摩擦係数及び粘性抵抗力の算出

表 3 - 4 動摩擦換算による滑雪抵抗力

実験 シリーズ	積雪質量 m (kg)	滑雪速度 v (m/s)	みかけの動 摩擦係数 $\mu$	滑雪抵抗力R $\mu mg \cos \theta$ (N)
1	27.0	12.90	0.18	35.98
	24.0	13.50	0.15	25.79
	23.5	13.50	0.15	25.25
	36.5	14.10	0.11	29.81
	31.5	13.80	0.13	29.79
	31.0	14.10	0.11	25.32
	32.5	13.50	0.15	34.93
	30.0	12.60	0.20	43.84
2	32.0	13.80	0.13	30.26
	14.0	12.90	0.18	18.65
	15.5	12.90	0.18	20.65
3	15.0	12.60	0.20	21.92
	35.0	12.00	0.16	40.03
	32.5	10.80	0.26	61.05
4	30.0	11.70	0.18	39.82
	32.0	7.50	0.32	74.13
	35.0	7.50	0.32	81.07
	37.5	7.50	0.32	86.87

表 3 - 5 実験シリーズにおける各抵抗力の平均値

実験シリーズ	滑雪開始位置	滑雪抵抗力 R(N)	空気抵抗力 Fa(N)	他の抵抗力 Fr(N)	$mg\cos\theta$ (N)
1	4	31.22	14.30	16.92	217.95
2	4	20.41	6.39	14.02	108.57
3	7	46.97	10.34	36.63	237.88
4	10	80.69	4.39	76.30	254.96

表 3 - 6 各抵抗力の比較

実験シリーズ ブロック寸法 (cm)	滑雪抵抗 R(N)	空気抵抗 Fa(N)	動摩擦抵抗 Fr(N)	粘性抵抗 Fc(N)
1	31.22	14.30	5.78	11.14
50×50×20	(100)	(46)	(18)	(36)
2	20.41	6.39	2.88	11.14
50×50×10	(100)	(31)	(14)	(55)

### 3.3.4.5 まとめ

本研究では、これまで殆ど報告されてなかった大規模構造物における実現象レベルでの屋根雪の滑雪性状を膜屋根試験体を用いた屋外実験により検討を行った。その結果、滑雪速度が大きくなると動摩擦抵抗力の影響は小さくなり、粘性抵抗力の他に空気抵抗力を考慮して検討する必要があることがわかった。今回は空気抵抗について一般式からその値を求めたが、その適正な評価を行うには今後パラメータ実験等による検討が必要である。

また、粘性抵抗力は、雪ブロックと滑雪面の界面における湿潤状況によって変化する抵抗力である。滑雪速度が上がれば、滑雪時の摩擦熱により水分量が増加し、粘性抵抗力も増加するが、抵抗力の増加は、滑雪速度を減じるように働くため、両者はお互いに影響を受けるという関係にあり、現状ではその適切な評価方法は分かっていない。そこで、本研究ではある限られた条件下であるが、定数として評価している。今後、粘性抵抗の評価方法の確立が望まれるところである。

### 3.4 衝撃荷重に与える滑雪抵抗力の影響

#### 3.4.1 検討の目的

3.3 節の実大実験及び調査により、屋根上滑雪時の雪塊には動摩擦抵抗、粘性抵抗、空気抵抗等の抵抗力が働いていることがわかった。これらの抵抗力は、屋根仕上げ材料の他に気象条件や屋根形状等により異なってくると考えられる。今回の滑雪実験では、滑雪速度が大きくなると動摩擦抵抗力は小さくなり、逆に粘性抵抗力や空気抵抗力が大きくなる傾向にあることが判明した。

ここでは、先の膜屋根モックアップ実験の結果から各抵抗力による減速分を調べ、その減速が衝撃荷重として、どの程度の緩和になっているのか検討する。それによりこれらの減速分を考慮せずに設計した場合、どの程度の安全率を見込むことになるのかがわかる。

#### 3.4.2 実験結果の分析

図3-8中の位置4からの実験シリーズ（実験シリーズ1及び2）について検討する。図3-11から雪ブロックに抵抗力が全く働かない場合は、軒先での滑雪速度は16m/sとなることがわかる。表3-4に各実験シリーズにおける軒先での滑雪速度を示しているが、その平均値を算出すると、実験シリーズ1では13.5m/s、実験シリーズ2では12.9m/sとなる。

まず、実験シリーズ1についてであるが、滑雪速度13.5m/sより滑雪抵抗力により2.5m/sの減速となる。雪ブロックの平均質量が29.8kgより積雪密度は $0.60\text{g/cm}^3$ （ $=29.8\text{kg}/50\text{cm}/50\text{cm}/20\text{cm}$ ）となる。1.3節で示した流体衝撃荷重 $P$ は、 $P=\gamma V^2 A$ により求められる。ここで、 $\gamma$ ：積雪密度( $\text{g/cm}^3$ )、 $V$ ：衝突速度( $\text{m/s}$ )、 $A$ ：衝突面積( $\text{m}^2$ )である。いま、雪ブロックが落下時に回転せず、正面から衝突したとすると、 $A=0.1\text{m}^2$ となり、 $P=375\text{N}$ （ $3.75\text{kN/m}^2$ ）となる。減速なく16m/sの速度で衝突した場合は、 $P=15,360\text{N}$ （ $153.6\text{kN/m}^2$ ）となり、減速による緩和率は2.4%となる。

同様にして、実験シリーズ2についても行くと、滑雪速度12.9m/sより滑雪抵抗力により3.1m/sの減速となる。雪ブロックの平均質量が14.8kgより積雪密度は $0.59\text{g/cm}^3$ （ $=14.8\text{kg}/50\text{cm}/50\text{cm}/10\text{cm}$ ）となる。衝突面積 $A=0.05\text{m}^2$ より $P=283\text{N}$ （ $5.67\text{kN/m}^2$ ）となる。減速なく16m/sの速度で衝突した場合は、 $P=7,552\text{N}$ （ $151.0\text{kN/m}^2$ ）となり、減速による緩和率は3.7%となる。

従って、抵抗減速による緩和率が2~4%とすると、それを考慮しない場合の安全率は1.02~1.04となり、殆ど影響がないことがわかる。これは、衝撃荷重が衝



突速度の二乗で効いてくるため、速度比率が 15% (16m/s に対する 2.5m/s) でも衝突荷重評価では二乗で 2%となるためである。この結果から、衝撃荷重を評価する場合は、滑雪抵抗力を特に考慮する必要はないといえる。

### 3.4.3 屋根長さ と 滑雪抵抗 による 影響 の 関係

先の条件による大規模屋根では滑雪抵抗による影響は 2~4%程度であることが分かった。次に、住宅等の小規模屋根の場合について検討する。ここでは滑雪面である屋根長さをパラメータとし、ある条件下における滑雪速度を求め、空気抵抗、動摩擦抵抗、粘性抵抗の影響について検証した。

#### 1) 検討条件

屋根長さ  $L$  : 滑雪位置から軒先までの長さ (パラメータ)

屋根勾配  $\theta$  :  $25^\circ$  (一定勾配屋根)

雪ブロック形状 : 幅 0.5m × 長さ 0.5m × 高さ 0.2m

雪ブロック密度  $\gamma$  :  $0.3\text{g/cm}^3$

動摩擦係数  $\mu_k$  : 0.027

粘性抵抗力  $F_c$  : 11.14N ( $\mu_c$  :  $11.14/217.95=0.05$ )

動摩擦係数及び粘性抵抗力は先の膜屋根実験結果より設定した。表 3-5 及び表 3-6 の実験シリーズ 1 より、動摩擦抵抗  $F_r$  を  $mg\cos\theta$  の値で除することにより動摩擦係数  $\mu_k$  は求められる。粘性抵抗による減速度を求めるために粘性抵抗力を動摩擦抵抗力に置き換え、見かけ上の動摩擦係数を求めることにした。先と同様に  $F_c$  を  $mg\cos\theta$  で除して見かけの動摩擦係数  $\mu_c$  を設定した。また、空気抵抗力は (3.5) 式で求めることができる。空気抵抗力は、滑雪速度によって決まり、速度が速くなれば抵抗も大きくなるという関係にある。ここでは屋根長さを分割し、分割エリア毎に滑雪速度を求め、次のエリアではその滑雪速度を初速度とすると同時に抵抗として働かせ、これを繰り返すことにより所定の屋根長さにおける空気抵抗を考慮した滑雪速度を求めた。分割数を大きくすればするほど精度は上がるが、ここでは 50 分割とし、精度上問題がないことを確認している。

#### 2) 検討結果

表 3-7 に各屋根長さにおける軒先での滑雪速度及び抵抗による減速度を示す。各抵抗における減速度は、全く抵抗が働かない状況における滑雪速度と各抵抗が個別に働いている状況における滑雪速度の差により求めた。

次に、軒先位置における流体衝撃荷重  $P(=\gamma V^2 A)$  について抵抗が働いていない場

合と各抵抗による減速分の衝撃荷重値を求めた。表3-8及び図3-12にその結果を示す。これより、屋根長さが大きくなるほど、衝撃荷重に対する滑雪抵抗の影響が大きくなる事が分かる。また、動摩擦抵抗及び粘性抵抗の比率は屋根長さに影響せず一定となり、空気抵抗の影響がそのまま全体の傾向に表れていることが分かる。ただし、ここでは粘性抵抗力を定数としているため、実状では、その傾向にある変化を見せるものと推測される。

表3-7 屋根長さによる滑雪抵抗の影響

屋根長さ L (m)	抵抗無し 速度 $V_0$ (m/s)	空気抵抗時 速度 $V_a$ (m/s)	摩擦抵抗時 速度 $V_b$ (m/s)	粘性抵抗時 速度 $V_c$ (m/s)	空気抵抗減速 分( $V_0-V_a$ ) (m/s)	摩擦抵抗減速 分( $V_0-V_b$ ) (m/s)	粘性抵抗減速 分( $V_0-V_c$ ) (m/s)	減速度 合計 (m/s)
5	6.43	6.35	6.25	6.08	0.08	0.18	0.35	0.61
10	9.10	8.87	8.83	8.61	0.23	0.27	0.49	0.99
15	11.14	10.73	10.82	10.53	0.41	0.32	0.61	1.34
20	12.87	12.24	12.49	12.16	0.63	0.38	0.71	1.72
30	15.76	14.63	15.30	14.89	1.13	0.46	0.87	2.46
40	18.20	16.49	17.67	17.20	1.71	0.53	1.00	3.24
60	22.29	19.27	21.64	21.06	3.02	0.65	1.23	4.90
80	25.74	21.26	24.99	24.32	4.48	0.75	1.42	6.65
100	28.77	22.76	27.94	27.19	6.01	0.83	1.58	8.42

表3-8 滑雪抵抗の衝撃荷重に対する影響

屋根長さ L (m)	抵抗無し時の 衝撃荷重 $P_0$ (N)	空気抵抗による 衝撃ロス $P_a$ (N)	摩擦抵抗による 衝撃ロス $P_b$ (N)	粘性抵抗による 衝撃ロス $P_c$ (N)	抵抗による ロス計 P(N)	$P_a/P_0$ (%)	$P_b/P_0$ (%)	$P_c/P_0$ (%)	$P/P_0$ (%)
5	124.03	0.02	0.10	0.37	0.48	0.02	0.08	0.30	0.39
10	248.43	0.16	0.22	0.72	1.10	0.06	0.09	0.29	0.44
15	372.30	0.50	0.31	1.12	1.93	0.14	0.08	0.30	0.52
20	496.91	1.19	0.43	1.51	3.14	0.24	0.09	0.30	0.63
30	745.13	3.83	0.63	2.27	6.74	0.51	0.09	0.30	0.90
40	993.72	8.77	0.84	3.00	12.62	0.88	0.08	0.30	1.27
60	1490.53	27.36	1.27	4.54	33.17	1.84	0.09	0.30	2.23
80	1987.64	60.21	1.69	6.05	67.95	3.03	0.08	0.30	3.42
100	2483.14	108.36	2.07	7.49	117.92	4.36	0.08	0.30	4.75

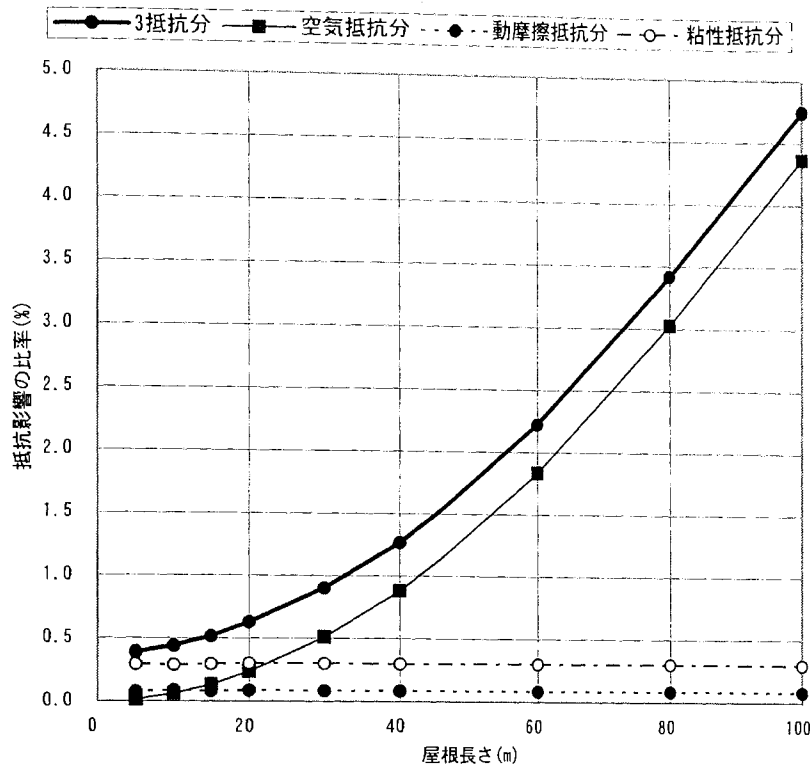


図 3 - 12 屋根長さによる衝撃荷重に対する滑雪抵抗の影響

#### 3.4.4 まとめ

大規模膜屋根のモックアップ実験の結果より、滑雪抵抗力の落雪衝撃荷重への影響を調べたところ、その影響度は滑雪抵抗力が働かない場合に比べ、わずか 2～4%の減少に過ぎず、落雪衝撃荷重を検討する上では、滑雪抵抗力は考慮する必要がないと考えられる。

また、建物規模が小さくなるほど、滑雪抵抗の影響は小さくなり、今回の検討条件においては住宅規模の建物ではその影響度は 0.5%以下となった。また、屋根長さが大きくなるほど滑雪速度は大きくなるため、滑雪速度の二乗で働く空気抵抗の影響が最も大きくなり、屋根長さが 40m 越える範囲では、空気抵抗が殆どを占めることが分かる。本検討条件では滑雪長さが 100m を越えると 5%程度の影響度となるため、(モックアップ実験では、屋根長さ 40m に対し 2～4%の影響度であったので) 条件によっては 10%程度の影響度となる可能性もあるといえる。

### 第3章 参考文献

---

- 1) 苫米地司、他：膜構造物の屋根雪処理に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第426号、pp.99-105、1991.8
- 2) 山口英治、他：膜構造物における降雪時の性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第437号、pp.91-96、1992.7
- 3) 伊東敏幸、他：屋根上積雪の滑落性状に及ぼす降雪界面の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.103-104、1996.9
- 4) 岸谷孝一：建築材料ハンドブック、技報堂出版、pp.557、1991.3
- 5) 松藤泰典：新建築学シリーズ4 建築材料・材料設計、朝倉書店、pp.137-138、1998.4
- 6) 絵内正道：積雪寒冷型アトリウムの計画と設計、北海道大学図書刊行会、pp.105-108、1995.2
- 7) 川上俊一、他：屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1015-1016、1993.9
- 8) (社)日本膜構造協会：膜構造－その現状と展望－、1991.3
- 9) (社)日本膜構造協会：膜構造建築物技術基準・同解説、1991.3
- 10) 石井一夫：日本の膜構造・作品選集、SPS出版、1993.2
- 11) 日東ケミファブ（株）：建築用恒久膜材料技術資料
- 12) 苫米地司、他：膜構造物における屋根上積雪荷重の制御に関する研究、日本膜構造協会膜構造研究論文集'93、No.7、pp.71-79、1993.12
- 13) 小竹達也、他：大規模建築物の軒下堆雪形状予測手法の提案、日本建築学会技術報告集、第10号、pp.25-28、2000.6
- 14) 札幌ドーム（仮称）新設工事監理室・特定共同企業体：札幌ドーム「クロープンシェル」仕上げ工事、建築の技術 施行、No.418、pp.133-152、2000.8
- 15) 前田博司、他：屋根の雪荷重に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.559-560、1975.10
- 16) 遠藤八十一、他：屋根雪の滑落条件と飛距離、寒地技術シンポジウム'88 講演論文集、pp.220-225、1988.11

◆◆◆◆◆ 第4章 軒下堆雪形状による落下衝撃荷重の検討 ◆◆◆◆◆

4.1	はじめに	4- 1
4.2	大規模建築物における堆雪形状	4- 2
4.2.1	札幌コミュニティドームにおける堆雪形状調査	4- 2
4.2.2	こまつドームにおける堆雪形状調査	4- 8
4.2.3	札幌ドームにおける堆雪形状調査	4-14
4.2.4	調査結果のまとめ	4-19
4.3	堆雪形状と衝撃荷重の関係	4-20
	参考文献	4-22

## 第4章 軒下堆雪形状による落下衝撃荷重の検討

### 4.1 はじめに

屋根上積雪の落下により起こる現象には、飛散と堆雪がある。いずれも雪氷塊が落下、衝突した後の現象であり、衝撃荷重と関係があるものと考えられる。これまでも飛散現象については、苫米地や山口らの実験<sup>1)</sup>等から飛散距離と衝撃力の関係を求める等の試みがなされており、日本建築学会の建築物荷重指針・同解説にも掲載されている<sup>2)</sup>。しかし、堆雪現象から衝撃荷重を評価しようという試みは、これまでなされてなく、現象の発生順序としては、衝突（衝撃）→飛散→堆雪というように堆雪現象は屋根雪落下現象における最終現象であり、全ての要素がそこに含まれている可能性がある。このことから堆雪形状と衝撃荷重の関係を検討することは、非常に興味深いテーマである。

軒下堆雪形状に関する既往の研究は、主に、滑雪、落雪、堆雪に分類される。滑雪や落雪については、多くの実験がなされ、屋根葺き材、屋根勾配、雪質による滑雪性状が解明されつつある<sup>1~5)</sup>。堆雪については、実測調査した結果が幾つか報告されている<sup>6~12)</sup>。中村ら<sup>12)</sup>は、新庄市における軒下堆雪形状を実測し、軒出50cmの場合の堆雪形状を算出する式を示している。また、滝田ら<sup>8)</sup>は、中村の経験式に含まれていない屋根勾配や軒高、屋根上積雪深、屋根葺材の摩擦係数等を考慮した堆雪形状の推定法を示し、堆雪形状算定図表を提案している。ただし、いずれも住宅規模のものであり、その堆雪形状における衝撃荷重の影響は、比較的小さいものと考えられる。

第2章でも述べたように、衝撃荷重は雪氷塊の密度や質量、衝突速度等に大きく影響されるため、建物規模が大きければ大きいほど、その影響が堆雪形状に表れてくると考えられる。ここでは、最も屋根面積の大きな建築物であるドーム建築物における堆雪形状を調査し、衝撃荷重と堆雪形状の関係について検証を行う。今回、調査対象としたのは、石川県小松市に建設されたこまつドーム、北海道札幌市の札幌コミュニティドーム（つどーむ）と札幌ドームの3物件である。

## 4.2 大規模建築物における堆雪形状

### 4.2.1 札幌コミュニティドーム（つどーむ）における堆雪形状調査

#### 4.2.1.1 建物概要

本ドームの屋根は、A種膜材料を用いた鉄骨骨組膜構造と鉄骨円錐チューブ構造の金属壁面から構成されており、膜屋根部分は屋根雪の滑雪性を考慮してV字型の膜面を形成している。外膜は押えケーブルを用いず、内部からカタナリー状の引き込みケーブルにより膜張力を与えるため、膜表面には何も露出するものがない状態となっている<sup>13~15)</sup>。

建設地 : 札幌市東区栄町 885 他

主用途 : スポーツ施設

竣工年月 : 1997年3月

建築面積 : 17,865m<sup>2</sup>

最高高さ : GL+43m

スパン : 140m×140m

屋根構造 : 鉄骨骨組膜構造

屋根仕上 : 四フッ化エチレン樹脂

コーティングガラス繊維布

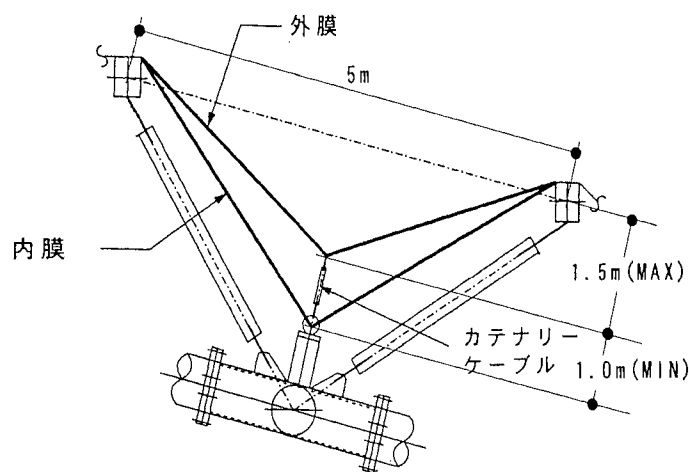


図4-1 膜パネル断面図

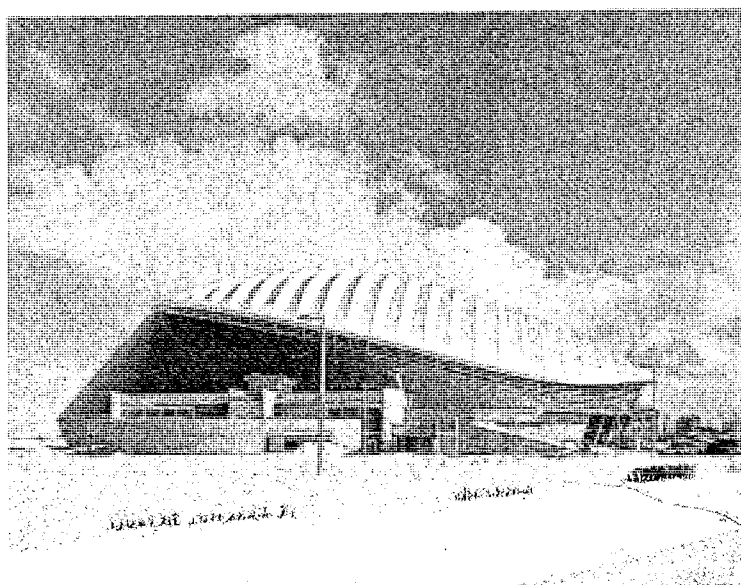


写真4-1 調査対象建物（札幌コミュニティドーム／つどーむ）

#### 4.2.1.2 調査方法

平成10年1月17日(土)、図4-2に示すドーム東側の2断面について堆雪形状の調査を行った。実測にはメジャー、カメラ、角度計を使用した。計測はその場での実測と写真撮影により行った。実測ができない場合には、写真4-2のように長さの基準となるもの(メジャー)を堆雪山の上に置き、写真撮影し、その画像から堆雪山の全体寸法を求めた<sup>17~18)</sup>。

図4-3及び図4-4に調査位置の断面形状を示す。屋根頂部は、曲率半径の大きな膜屋根で構成されているが、位置Bについては膜屋根軒先下方の広範囲を金属屋根が占めている。

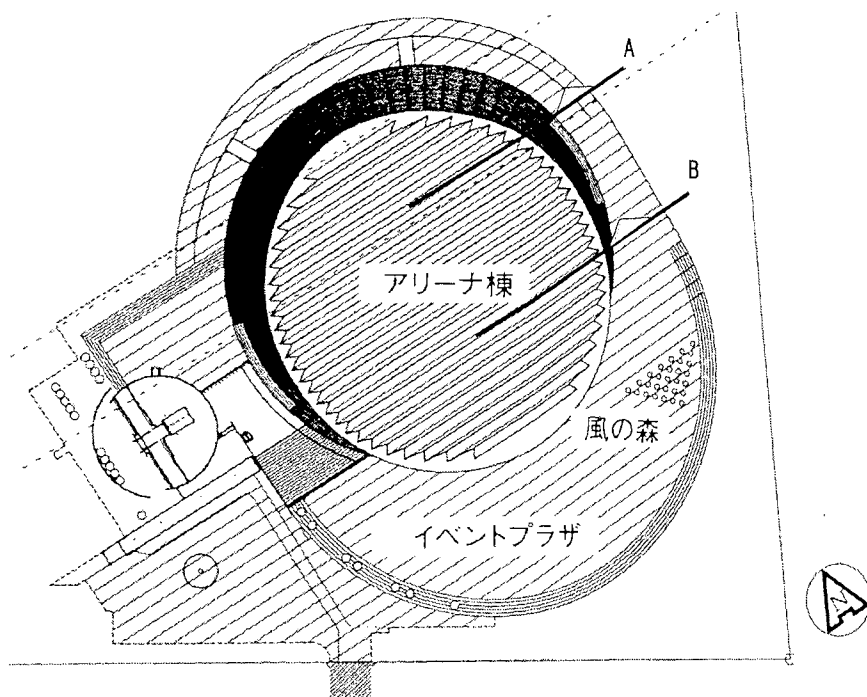


図4-2 配置図及び調査位置

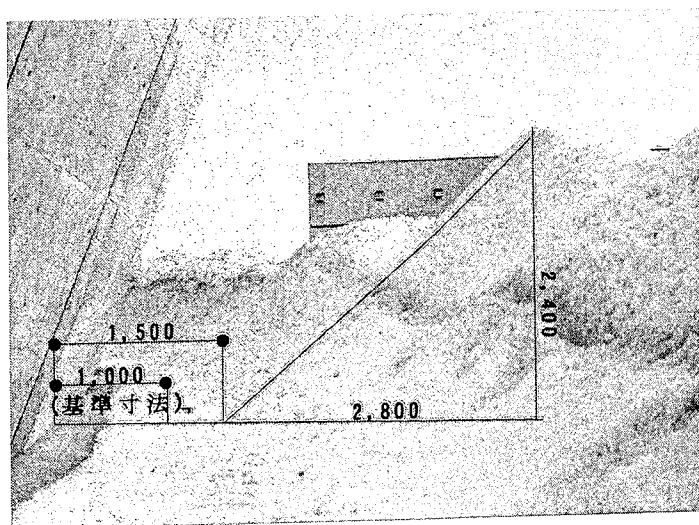


写真4-2 写真画像による寸法計測(位置A)



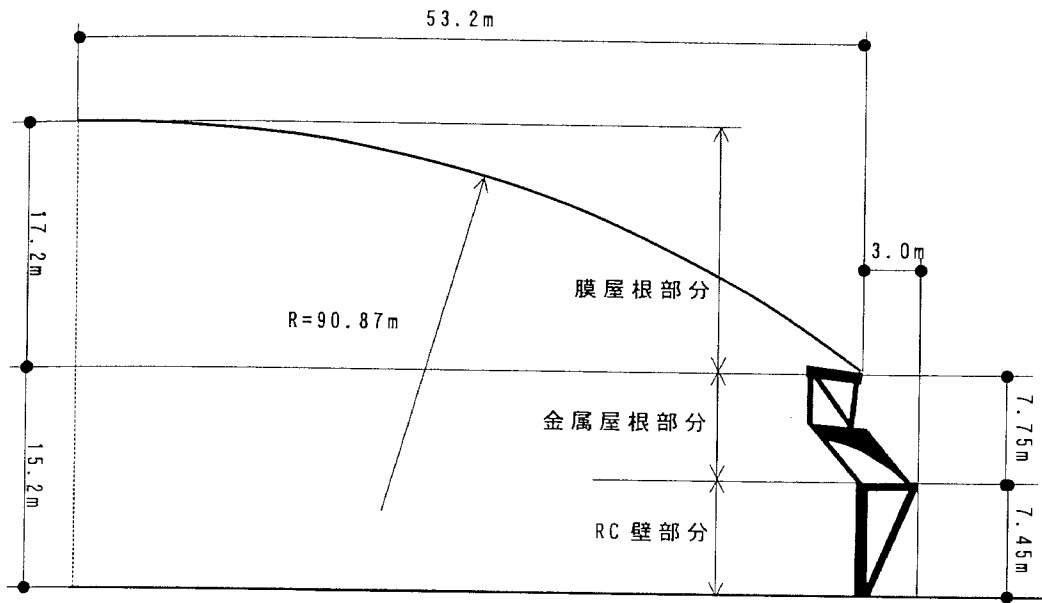


図 4 - 3 位置 A の断面構成

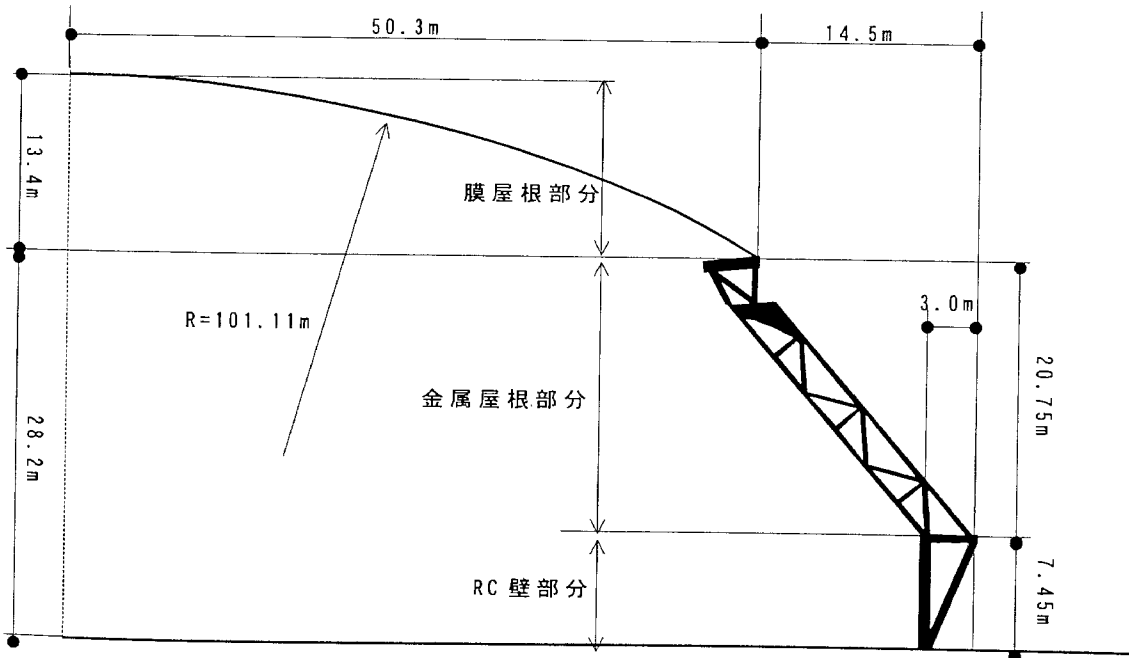


図 4 - 4 位置 B の断面構成

### 4.2.1.3 調査結果

図4-5及び図4-6に各堆雪形状の断面模式図を示す。堆雪山の形状は、1コブの三角形をしており、ドーム側(内側)の勾配は40度、その逆側(外側)の勾配は30度であり、他の堆雪山についても計測したが、殆どの箇所で同様な数値であった。また、堆雪山から更に離れた所に幾つもの氷塊が散らばっており、ドーム頂部で冷やされた積雪が凍り、一気に滑雪したものと推測される。最も離れた氷塊は、金属屋根軒下より13.7mの位置まで飛んでいた。

### 4.2.1.4 考察

今回、調査した堆雪形状について、その滑雪現象をシミュレーションにより推測してみる。屋根上積雪の滑雪飛距離は、先に示した(3.3)(3.4)式により求められる<sup>1)</sup>。

ここでは、位置Bでのシミュレーション結果について述べる。表4-1に検討条件を示す。ただし、膜屋根部分は円弧形状をしているため、屋根上積雪の滑雪開始位置については屋根長さを3分割して検討した。図4-7に屋根上積雪の滑雪開始位置と飛散距離の関係を示す。なお、今回設定した動摩擦係数0.05は、実験から求められた最も小さな値である<sup>2)</sup>。

B点付近から滑雪した雪は、金属屋根に接触することなく地面に達するが、それ

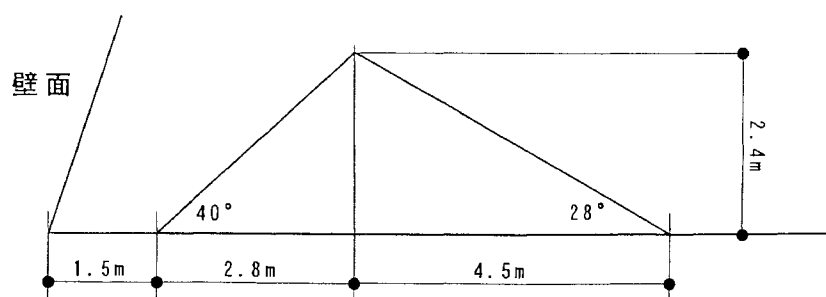


図4-5 位置Aの堆雪形状の模式図

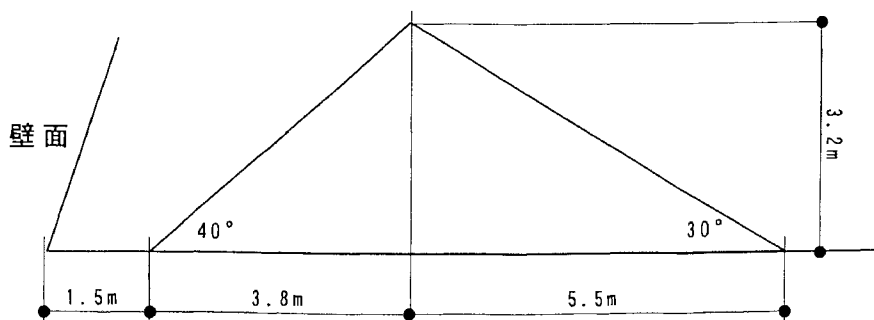


図4-6 位置Bの堆雪形状の模式図

表 4 - 1 滑雪シミュレーションの検討条件

	膜屋根	金属屋根
滑走距離	52.6m	22.6m
滑走角度	20deg	50deg
飛出角度	25deg	50deg
軒高	28.2m	7.45m
動摩擦係数	0.05	0.05

※膜屋根の滑走角度は円弧屋根の平均勾配を表している。

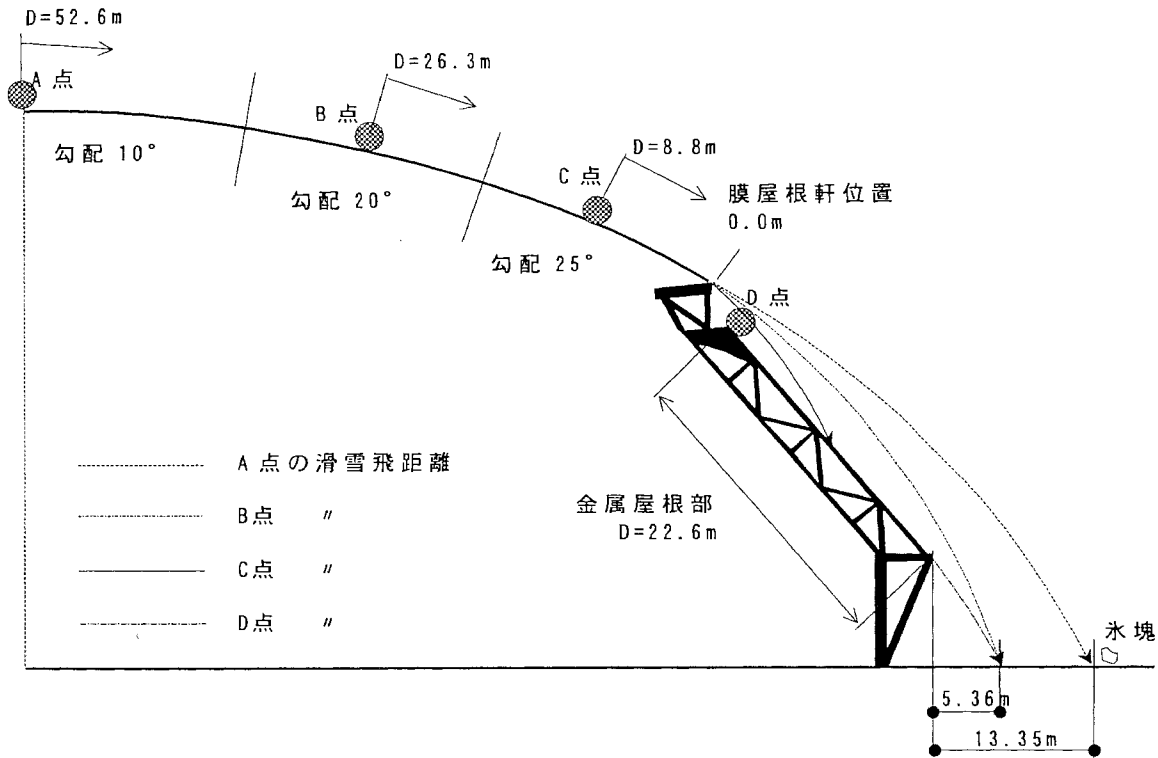


図 4 - 7 滑雪シミュレーション結果（位置 B）

よりも低い位置にある屋根上積雪は、殆どが金属屋根に一度接触し、金属屋根上を滑り、地面に達すると推測できる。また、今回設定した動摩擦係数以上の状態で滑雪する場合もあるため、B 点付近の積雪も金属屋根に接触していると考えられる。屋根頂部付近の積雪は、本ドームの冬期観測<sup>20~21)</sup>より B 点付近まで低速度で移動した後に滑雪することが確認されており、このことから膜屋根上の積雪の殆どが金属屋根上を滑雪したものと推測できる。

屋根頂部の氷塊が滑走した場合、その動摩擦係数は 0.05 に近くなると考えられる。シミュレーションでは、金属屋根軒下から 13.35m まで飛んでおり、現地実測した氷塊の位置 13.7m とほぼ一致しており、滑雪現象は実証できたといえる。

次に堆雪形状の形成過程を考えてみる。図4-8に位置Bにおける金属屋根からの滑雪飛行ラインと実測された堆雪形状を示す。屋根上滑雪現象では、軒部の積雪は加速されないため真下に落下し、最上部の積雪は最も加速されるため、最も遠くへ落下する。

屋根上積雪量が比較的少ない段階では、この範囲に堆雪山は形成されることになる（落下後の飛散は考慮していない）。調査結果より堆雪形状は内側40°、外側30°の三角形となり、山の頂部位置は、堆雪幅を約4:6に分割する位置となる（図4-8中の破線の堆雪山）。写真4-3に堆雪山の積層断面を示すが、山頂部の位置は殆ど変化していないことがわかる。降雪が続き、滑雪量が増えてくると、図4-8中の一点鎖線のように、落雪は堆雪山の内外に流れ込みながら堆雪し、堆雪山の頂部が滑雪飛行ラインと接する位置まで成長した後は、滑雪飛行ライン上に頂部位置を移行するものと推測される。

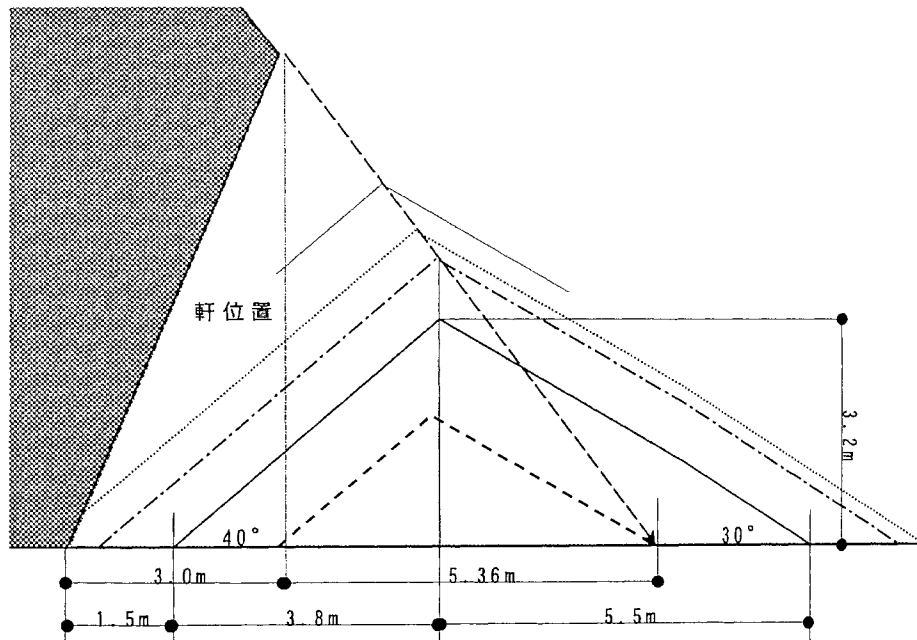


図4-8 堆雪形状の形成過程概念図

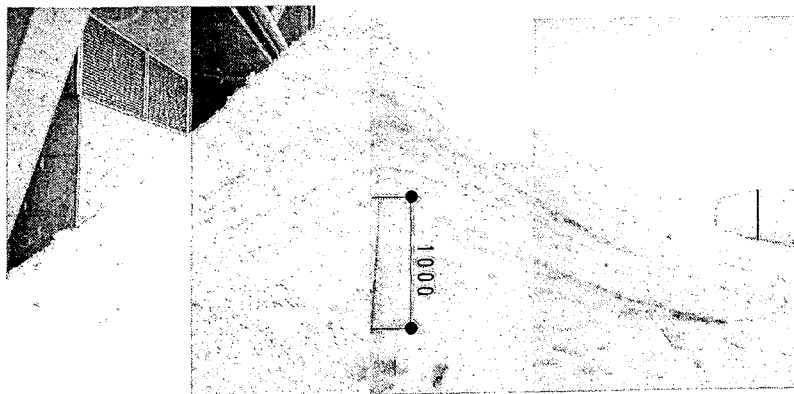


写真4-3 堆雪積層断面（記録日：平成11年1月20日）

## 4.2.2 こまつドームにおける堆雪形状調査

### 4.2.2.1 建物概要

本ドームの屋根は、70m×55mの開口部を持つ開閉式屋根構造であり、A種膜材料を用いた鉄骨骨組膜構造である。膜屋根部分は、屋根雪の滑雪性を考慮してV字型の膜面を形成している。また、内部からテンションロッドによる引き込みにより膜張力を与えるため、膜表面には何も露出するものがない状態となっている（写真1-8及び写真1-9参照）<sup>13,16)</sup>。

建設地 : 石川県小松市林町ほ5

主用途 : スポーツ施設

竣工年月 : 1997年4月

建築面積 : 23,394m<sup>2</sup>

最高高さ : GL+59.6m

スパン : 148m×160m

屋根構造 : 鉄骨骨組膜構造

屋根仕上 : 四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布



写真4-4 調査対象建物（こまつドーム）

#### 4.2.2.2 調査方法

平成10年1月30日(金)、図4-9に示すドーム北側の2断面について堆雪形状の調査を行った。実測にはメジャー、カメラ、角度計を使用し、札幌コミュニティドームの調査と同様にして実施した<sup>18)</sup>。

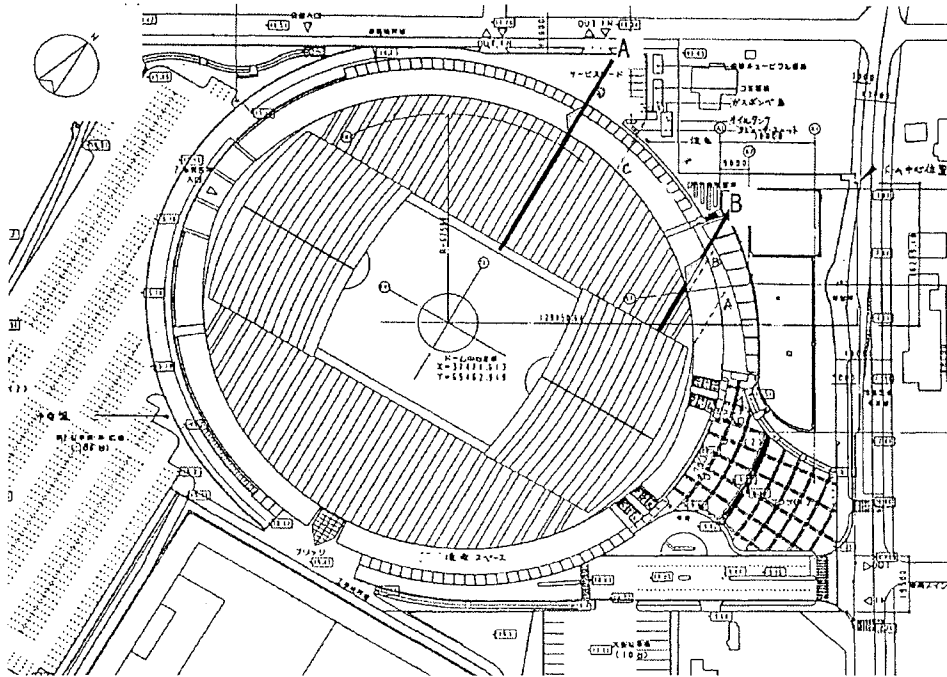


図4-9 配置図及び調査位置

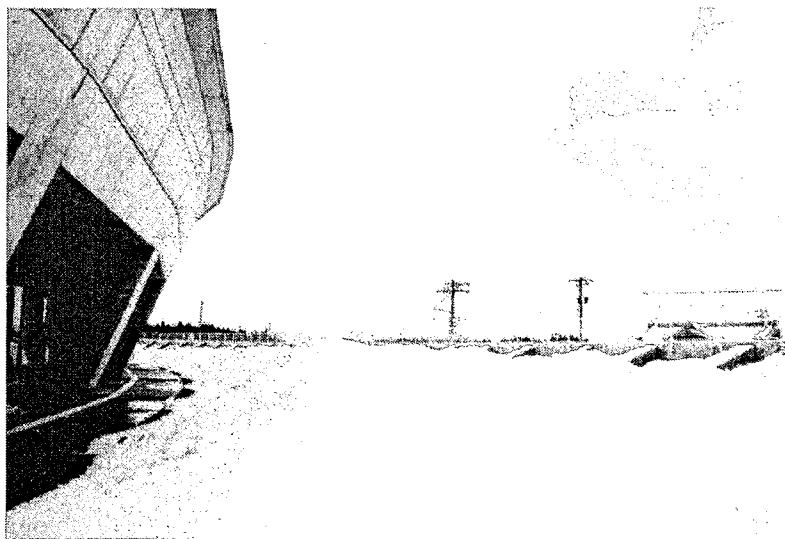


写真4-4 ドーム周辺の堆雪状況(ドーム北側)

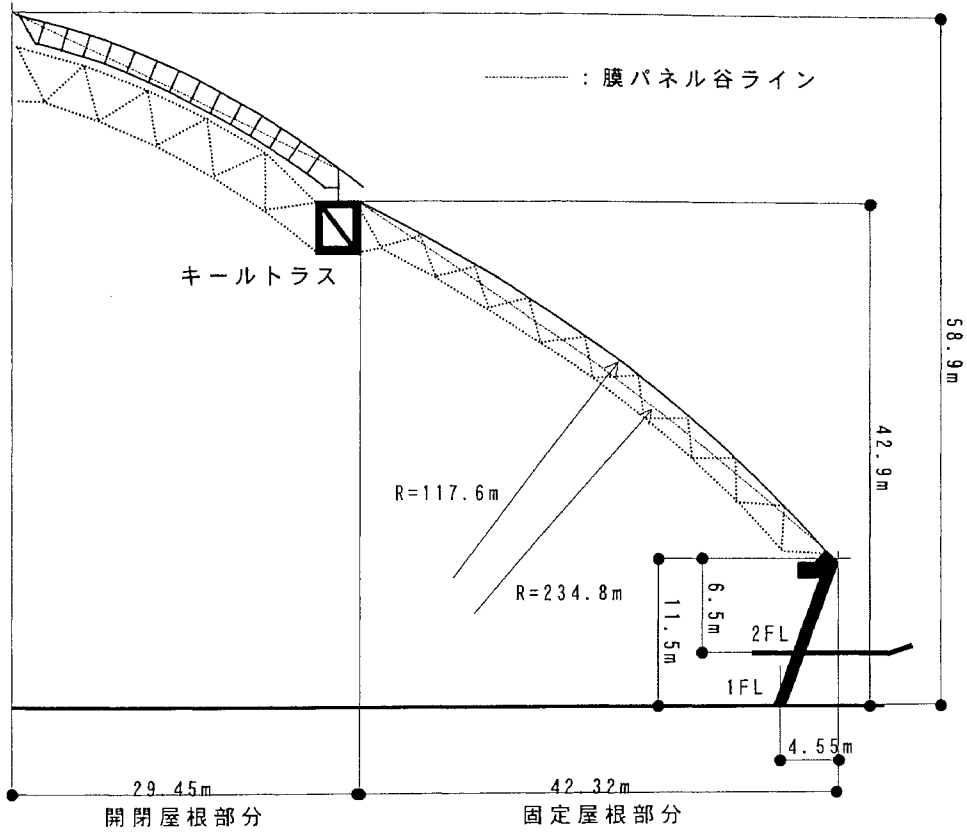


図 4 - 10 位置 A の断面構成

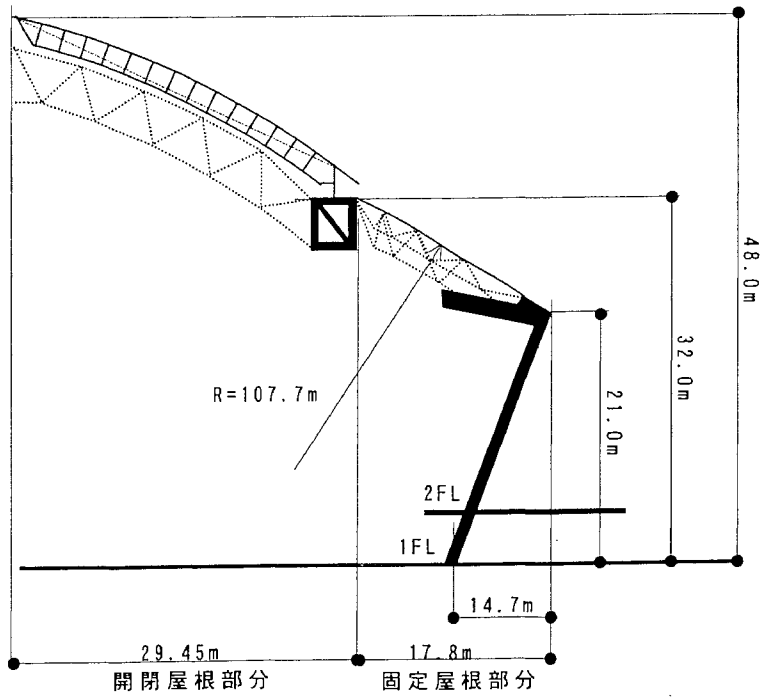


図 4 - 11 位置 B の断面構成

#### 4.2.2.3 調査結果

図4-12及び図4-13に各堆雪形状の断面模式図を示す。こまつドームの堆雪形状は、札幌コミュニティドームの場合と異なり、2コブ以上の山が形成されていることが大きな特徴である。これはドーム屋根が固定屋根部分と開閉屋根部分から構成されており、その境界で雪が分断されるため、固定屋根と開閉屋根で異なった速度状況となるためと考えられる。

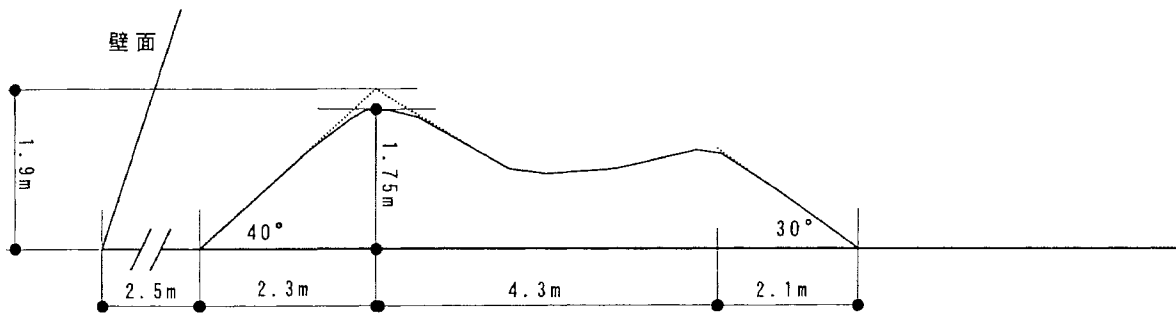


図4-12 位置Aの堆雪形状の模式図

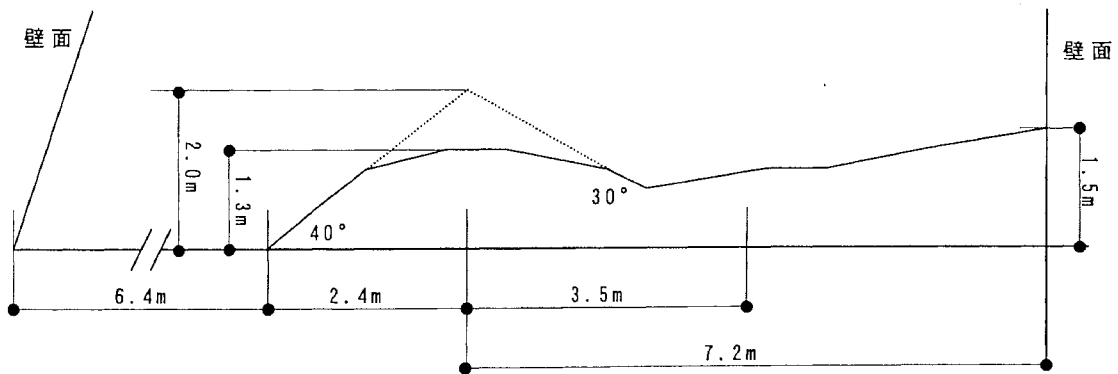


図4-13 位置Bの堆雪形状の模式図



#### 4.2.2.4 考察

札幌コミュニティドームと同様にして、調査した堆雪形状についてその滑雪現象をシミュレーションにより推測してみる。

表4-2に検討条件を示す。ただし、固定屋根部分は円弧形状をしているため、屋根上積雪の滑雪開始位置を屋根長さを2分割して検討した。

ここでは、位置Aの結果について述べる。図4-14に屋根上積雪の滑雪開始位置と飛散距離の関係を示す。

B点及びC点近辺から滑雪した雪は、軒位置から5.5~6mの所に落下する。図4-15に調査結果とシミュレーション結果の比較図を示すが、調査結果では4.8mの位置に落ちており、シミュレーション結果の方が若干大き目に出ている。これは北陸地方の気温レベルが高いため雪質がぬれ雪状態となっており、滑雪時の摩擦抵抗が大きくなったためと考えられる。

また、開閉屋根上のA点近辺の雪は、B点付近では滑雪速度が15.5m/sまで増加し、その状態で固定屋根上を滑雪するため軒位置では39m/sにまで加速されることになる。そのため、軒先の勾配では制御できず、その手前から飛び出したものと推測される。この場合、軒先手前の膜勾配36~37°の角度でテイクオフし、滑雪飛距離は8.2~8.5mとなり、調査結果と近い値となっている。

表4-2 滑雪シミュレーションの検討条件

	開閉屋根	固定屋根
滑走距離	32.5m	52.8m
滑走角度	25deg	35deg
飛出角度	(45deg)	45deg
軒高	(6.5m)	6.5m
動摩擦係数	0.05	0.05

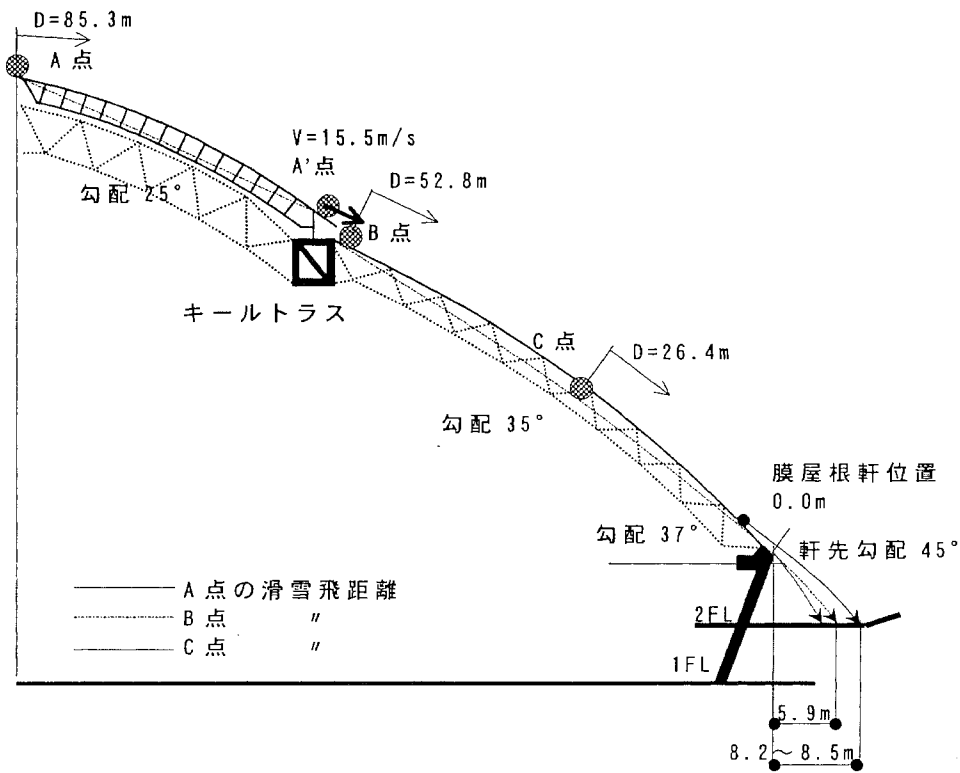


図 4 - 14 滑雪シミュレーション結果 (位置 A)

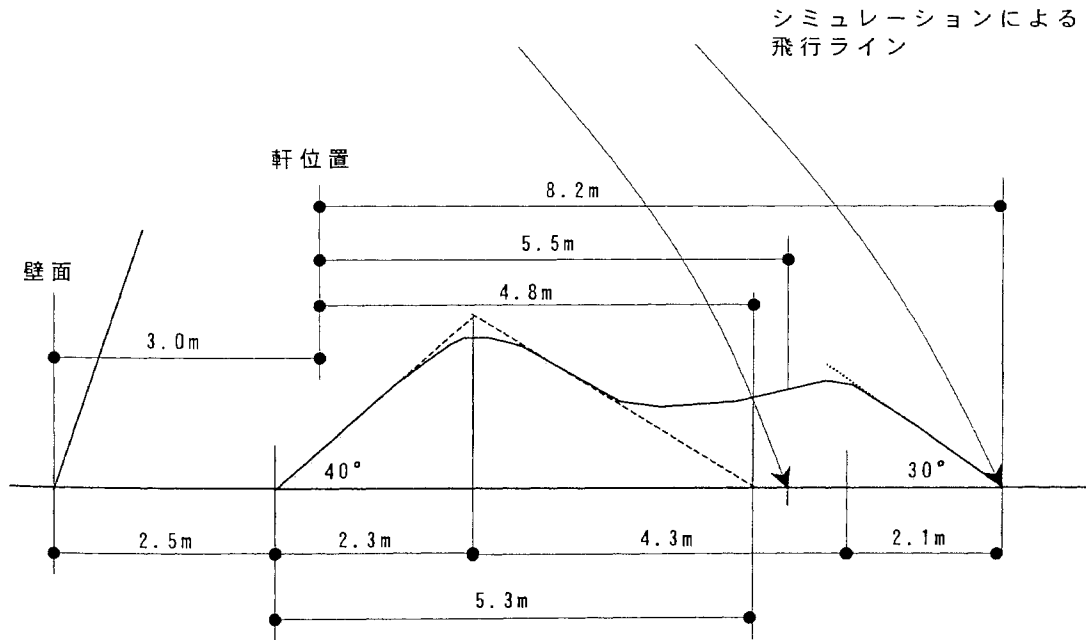


図 4 - 15 調査結果とシミュレーション結果の比較

#### 4.2.3 札幌ドームにおける堆雪形状調査

##### 4.2.3.1 建物概要

本ドームの屋根は、ステンレス製の金属屋根で滑らかな平滑面を持つ形状とし、その平滑面を卓越風向と平行に配置することで屋根面の積雪が卓越風で吹き払われやすいように計画されている。ドーム頂部をパーフェクトルーフ、その周りをシーム溶接屋根で構成されており、その境界には 25cm の段差を設けている。シーム溶接屋根上の積雪が滑雪しやすいようにこの段差で積雪を分断し、パーフェクトルーフ上の積雪による引張抵抗が発生するのを防止している<sup>22)</sup>。

建設地 : 札幌市豊平区羊ヶ丘 1

主用途 : 多目的競技場

竣工年月 : 2001 年 5 月

建築面積 : 53,644m<sup>2</sup>

最高高さ : GL+68m

スパン : 229m×218m

屋根構造 : 鉄骨直交格子アーチ構造

屋根仕上 : ステンレス (シーム溶接屋根 + パーフェクトルーフ)

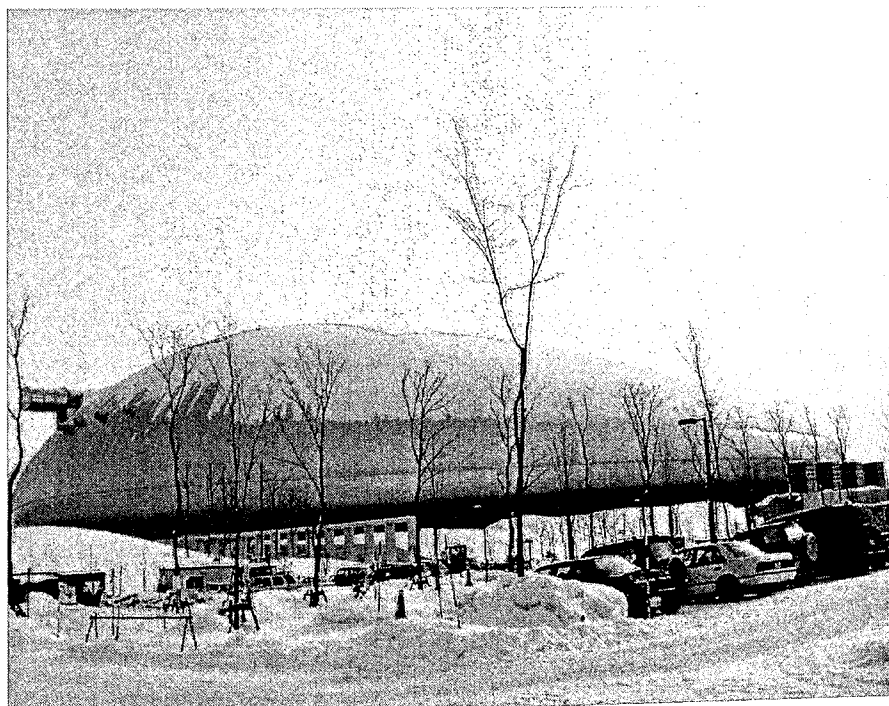


写真 4 - 5 調査対象建物 (札幌ドーム)

#### 4.2.3.2 調査方法

平成13年3月9日(金)、図4-16に示すドーム北側の3断面について堆雪形状の調査を行った。実測には、堆雪形状測定用バー(最長長さ6m)と角度計を使用した(写真4-6及び写真4-7参照)。なお、検討断面については、パーフェクトルーフ部は屋根勾配による流線、シーム溶接屋根部ははぜ葺き方向を滑雪ラインとし断面を取った。図4-17に断面形状を示す。

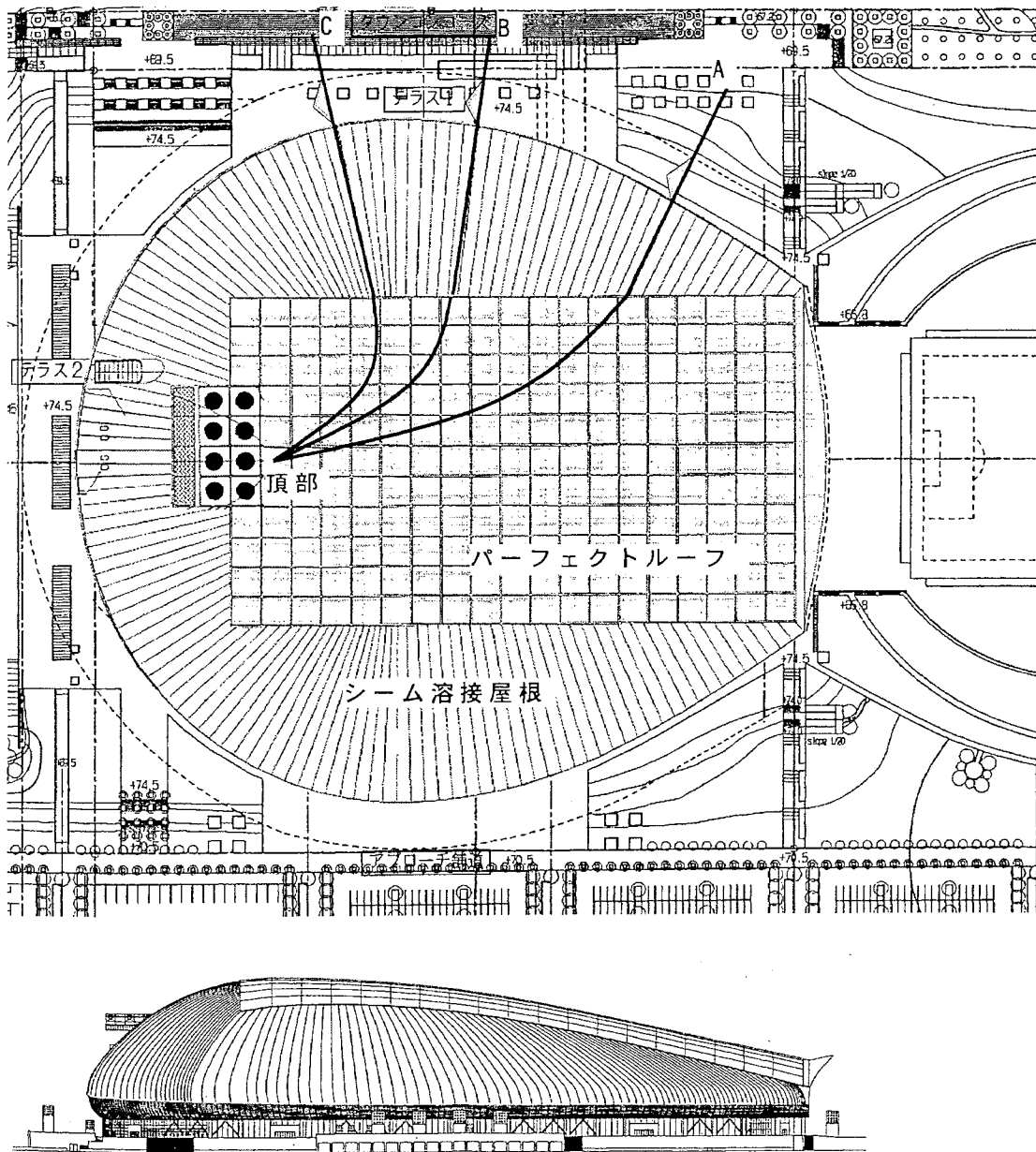


図4-16 配置図・立面図と調査位置

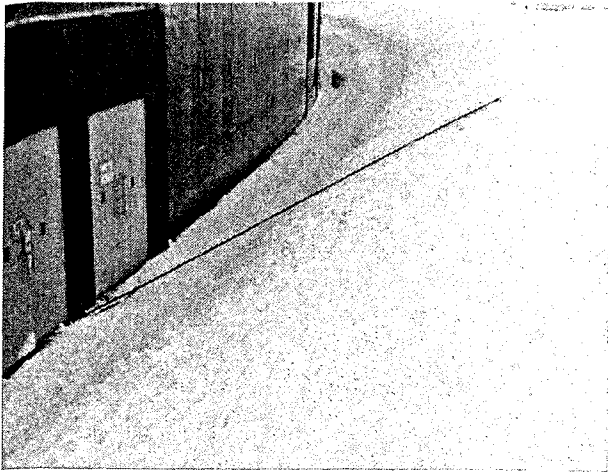


写真 4 - 6 堆雪形状測定用バー

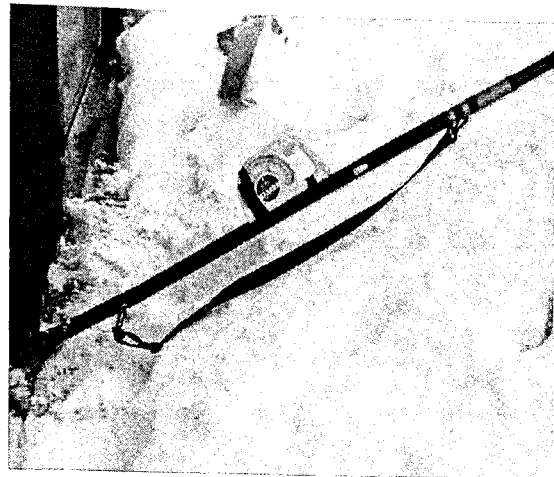


写真 4 - 7 角度計

(測定バーに取り付け)

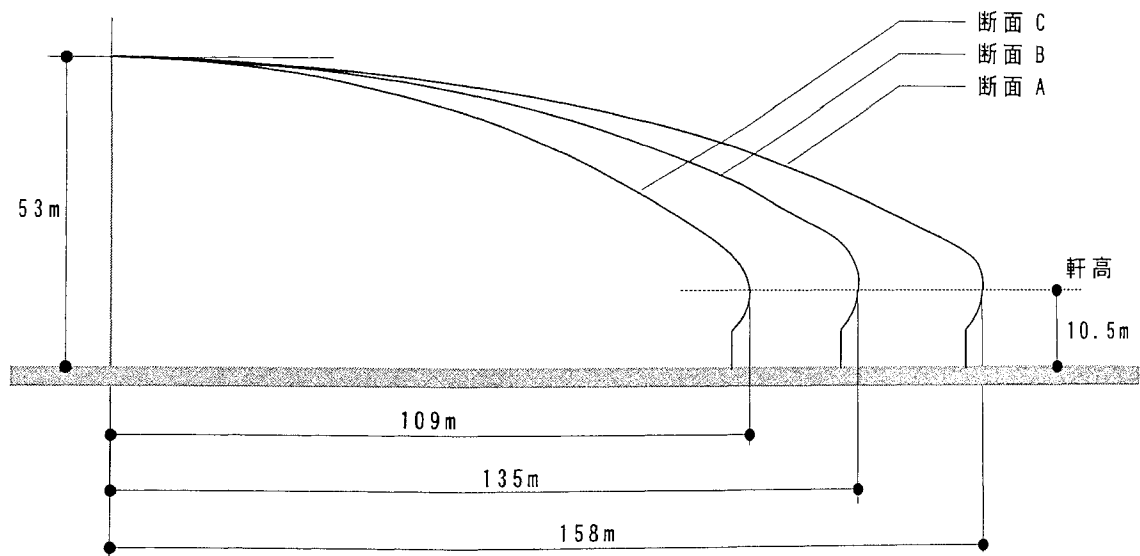


図 4 - 17 調査位置の断面形状

#### 4.2.3.3 調査結果

以下に各調査位置の断面模式図を示す。堆雪山の形状は、こまつドームでの形状に似ており、2コブ以上の山が形成されていた（台形に近い形状）。堆雪山の傾斜は位置 A を除いて内側 25~30° 程度であり、札幌コミュニティドームやこまつドームよりも小さい値となっていた。

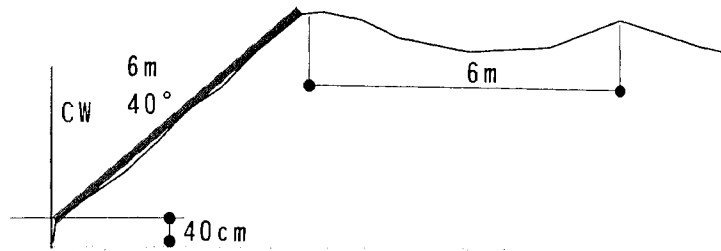


図 4 - 18 位置 A の堆雪形状の模式図

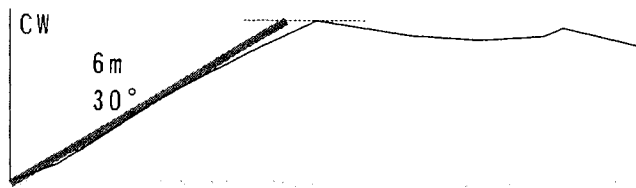


図 4 - 19 位置 B の堆雪形状の模式図

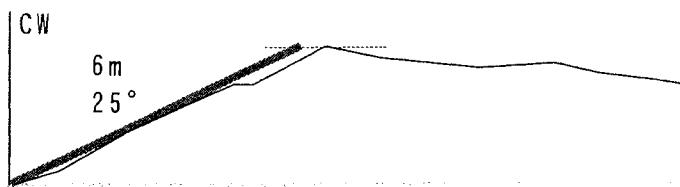


図 4 - 20 位置 C の堆雪形状の模式図

#### 4.2.3.4 考察

滑雪シミュレーション結果及び札幌コミュニティドームとこまつドームの調査結果より予測した形状と今回実測した堆雪形状を比較する。比較は、先に示した実測結果の図に予測形状を当てはめる形で行う（破線：予測形状）。ただし、その形状は内側 40°、外側 30° となる三角形形状として表現し、堆雪量は考慮していない。なお、本ドーム屋根は曲面形状をしており、その曲率も位置によって大きく変化するため、屋根面の曲率を考慮したシミュレーションが必要となる。ここでは、先の

3.3 節で説明したシミュレーション方法を用いて滑雪飛距離の検証を行なった。

図4-21及び図4-22に調査結果とシミュレーション結果の比較を示す。堆雪山の頂部位置は、シミュレーション結果に比べ、実測結果の方がドーム寄りに形成されている。また、当初予測していた堆雪山の勾配よりも緩やかな勾配となっている。この理由としては、山頂部がドーム寄りなのは、本ドーム屋根の軒先が急勾配のため、屋根上方からの滑雪以外の殆どの屋根上積雪は、軒先勾配の影響を受けたためと考えられる。また、堆雪山の勾配が緩やかなのは、堆雪形状には雪の安息角等が影響していると考えられているが、本ドームのような最高高さが50mを越え、100m近い滑雪長さを持った屋根からの落雪では、衝突時の衝撃による圧密や飛散の影響が大きくなり、低勾配で広がりを持った形状となったためと考えられる。ただし、これも屋根上からの落雪量が増えてくれば、内側40°、外側30°前後の勾配に近づくものと推測される。

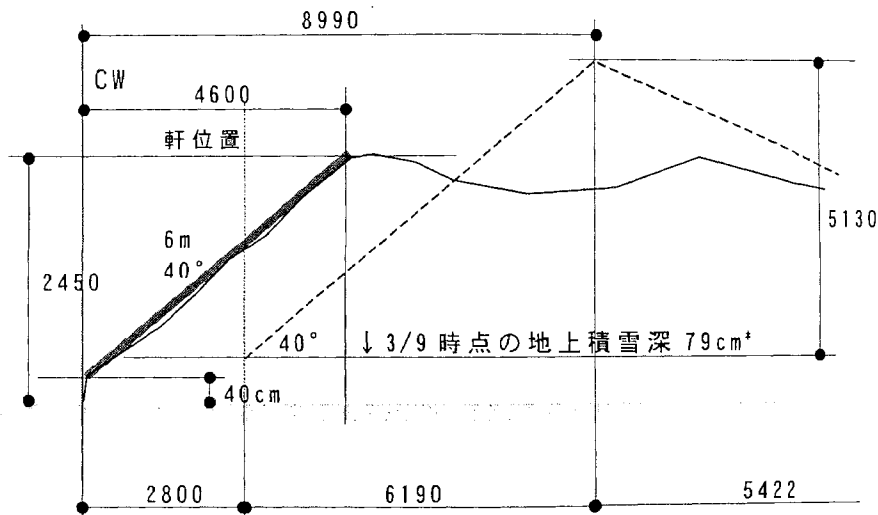


図4-21 位置Aにおける実測とシミュレーションの比較

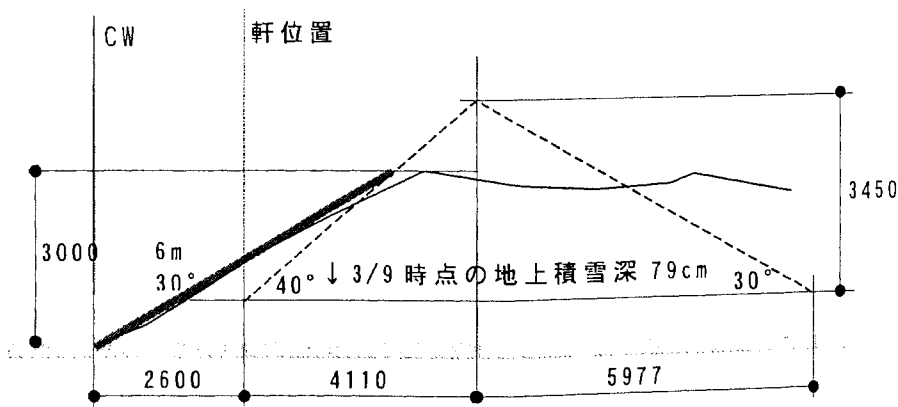


図4-22 位置Bにおける実測とシミュレーションの比較

#### 4.2.4 調査結果のまとめ

前述では、屋根形状の異なる大規模建築物における堆雪形状の調査結果について述べた。その結果、以下のことが分かった。

(1)大規模建築物における堆雪形状は、基本的に三角形状をしており、屋根がほぼ一定勾配であれば、一コブの山を形成し、屋根が曲面形状や段差形状をしている場合は、複数のコブを持った山を形成する。

(2)堆雪形状の基本形状である三角形状は、内側  $40^\circ$  前後、外側  $30^\circ$  前後で、山頂部位置は堆雪幅を  $4 : 6$  に分割する位置に形成される。

(3)堆雪山の頂部の水平位置は殆ど変化しないが、滑雪最大飛行ラインに接する位置まで成長した後は、頂部位置をそのライン上に移しながら成長する（水平位置は内側へ移動する）。

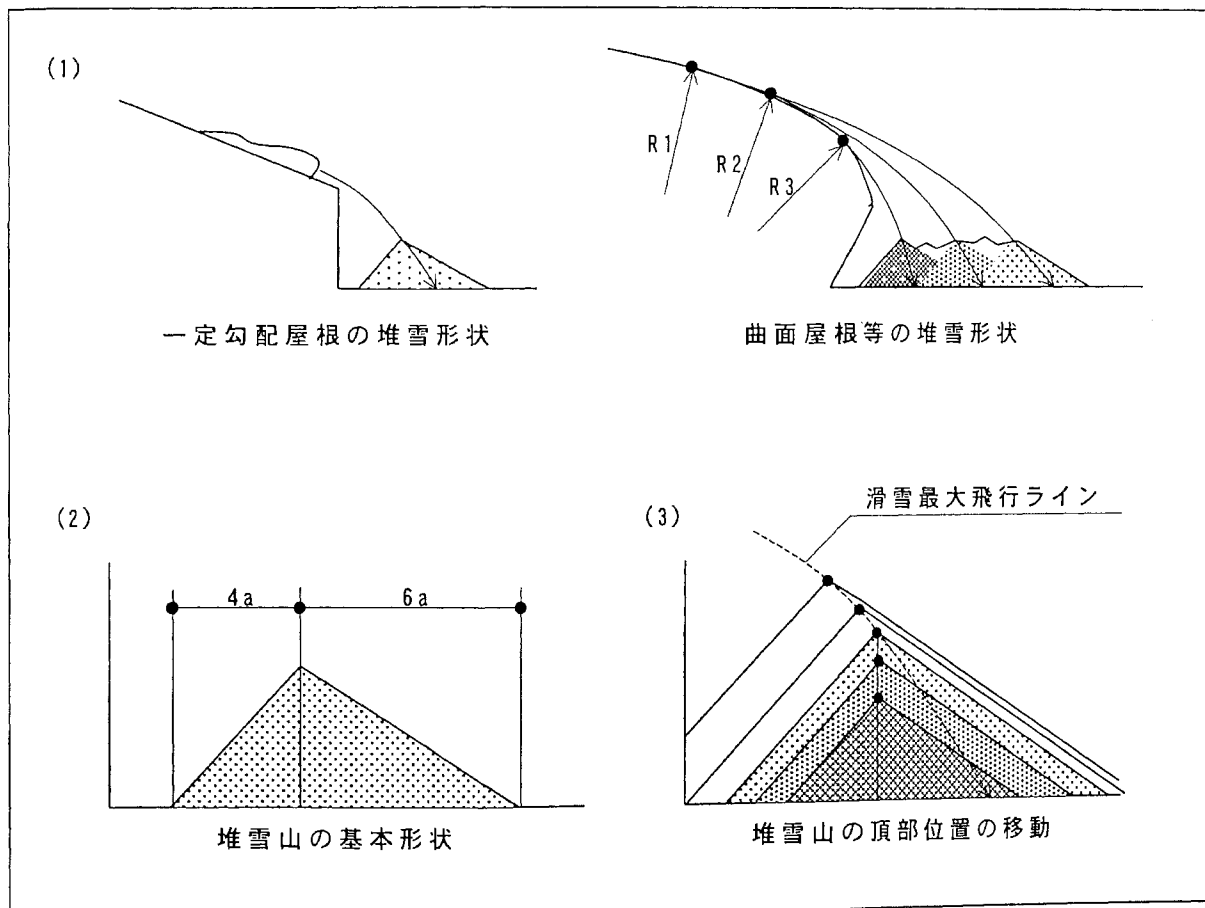


図 4 - 23 堆雪形状調査結果の整理



### 4.3 堆雪形状と衝撃荷重の関係

5.2 節における調査結果をもとに、衝突時の衝撃荷重と堆雪形状の関係について検討する。1.3.2 項より衝撃荷重は衝突速度の二乗及び積雪密度、衝突面の面積に比例するという関係があることが分かっている。調査した堆雪山を形成させた落雪現象における衝撃荷重を求めるにあたり、衝突速度や積雪密度は、建物規模や形状から算出、想定することは可能であるが、衝突面積を想定することは困難である。ただし、第2章の落下衝撃実験において落下する雪塊のエネルギー量の増加に伴い、衝撃荷重も増加する傾向にあることが分かっている。そこで、ここでは直接、衝撃荷重との関係を求めるのではなく、エネルギー量と堆雪形状の関係を求めることにより、衝撃荷重との関係を推測することにする。

5.2 節の調査結果より、大規模建築物における堆雪形状は、建物形状により山の数や形状は異なるが、基本的に三角形状をしており、内側勾配  $40^\circ$ 、外側勾配  $30^\circ$  前後の山を形成することが分かった。そこで、堆雪形状の評価項目を、その堆雪幅とし、落雪のエネルギー量を堆雪幅について検討する。堆雪山の幅をその調査結果からそのまま評価できない場合は、前述した三角形状であることを前提とし、堆雪幅を決定する。例えば、内側の形状ははっきりと勾配  $40^\circ$  を表しているが、外側の形状が積雪の影響等ではっきりしない場合等は、内側形状から読み取った堆雪山高さから外側形状を勾配  $30^\circ$  として算出し、外側堆雪幅とする。

エネルギー量の算出方法は以下のようにする。

①単位幅あたりの屋根上積雪質量  $m$  を求める。このとき、積雪密度を  $\gamma = 0.3 \text{ g/cm}^3$  と仮定し、これに屋根長さ  $L$ 、調査時点での地上積雪深、屋根形状係数  $0.7^*$  を乗じたものとする。

\* 屋根の平均勾配  $20 \sim 30^\circ$ 、屋根上平均風速  $3 \sim 4 \text{ m/s}$  より設定

②落下高さ  $H$  は、屋根平均高さとする。(最高高さと軒高さの中間高さ)

③エネルギー量を  $E = mgH$  により算出する。(  $g$  : 重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$  )

表4-3及び図4-24に今回の調査から得られた大規模建築物における落雪エネルギー量と堆雪幅の関係を示す。こまつドームとつどーむにおける調査結果の範囲では、エネルギー量と堆雪幅には、ほぼ線形に近い関係が見られる(図中破線)。これは、エネルギー量  $2000 \text{ J}$  以下の状態であり、これに札幌ドームの調査結果を合わせると対数的な増加傾向となり、エネルギー量が  $2000 \text{ J}$  を超えた状態では、堆雪幅は緩慢な増加傾向を示す。ただし、今回の調査データ数ケースによる考察のため、より正確な傾向を掴むには、もっと多くのデータが必要である。いずれにしろ、衝撃荷重と堆雪幅には、ある関係が成立しており、堆雪形状からその建物における

落雪の衝撃荷重を予測することは可能である。逆に、衝撃荷重を設定することにより、耐雪幅を予測することができ、堆雪エリアの設計に活かすことが可能であるといえる。

表 4 - 3 落雪エネルギー量と堆雪幅の数値

調査建物および 調査位置	屋根長さ L (m)	積雪量 (m)	最高高さ $h_{max}$ (m)	軒高さ $h_{min}$ (m)	平均高さ h (m)	エネルギー量 E (J)	堆雪幅 $L_r$ (m)	堆雪幅 $L_f$ (m)
こまつドームA	42.3	0.20	37.9	6.5	22.2	386.7	2.3	3.3
こまつドームB	47.3	0.20	43.0	16.0	29.5	573.7	2.4	3.5
つどーむA	56.2	0.44	32.4	7.5	19.9	1014.0	2.8	4.5
つどーむB	64.8	0.44	41.7	7.5	24.6	1442.0	3.8	5.5
札幌ドームA	158.0	0.79	53.0	10.5	31.8	8155.9	4.6	6.69

※ 調査位置 A, B は本章で示した各建物の調査位置に対応

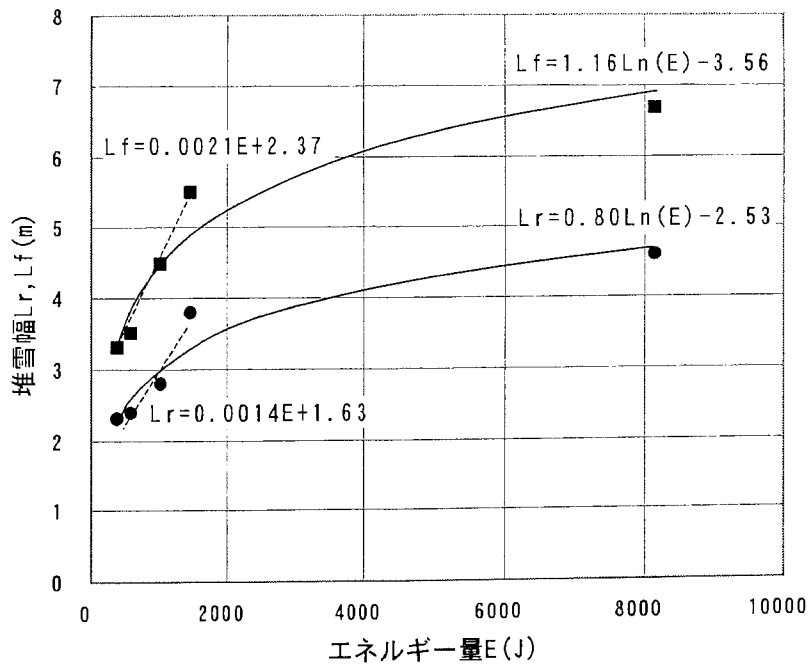


図 4 - 24 落雪エネルギー量と堆雪幅の関係

## 第4章 参考文献

---

- 1) 山口英治、他：膜構造物における降雪時の性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第437号、pp.91-96、1992.7
- 2) 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.212-213、1993
- 3) 渡辺正朋、他：屋根葺材と雪氷の摩擦に関する研究（その2）、日本雪工学会誌、第9号、pp.4-14、1988.12
- 4) 遠藤八十一、他：屋根雪の滑落条件と飛距離、寒地技術シンポジウム'88 講演論文集、pp.220-225、1988.11
- 5) 伊東敏幸：積雪地域における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) 大野和男：軒下堆雪量の算定、北海道建築センターレポート、No.11、pp.3-4、1975
- 7) 滝田貢、他：屋根雪の滑落・堆雪シミュレーション、第10回日本雪工学会大会論文報告集、pp.155-158、1994.1
- 8) 滝田貢、他：滑落した屋根雪の堆雪形状算定図表、日本雪工学会誌、Vol.14、No.2、pp.126-132、1998
- 9) 滝田貢、他：屋根雪の滑落・堆雪シミュレーション（その2. 粘性抵抗の効果）、第11回日本雪工学会大会論文報告集、pp.39-42、1994.11
- 10) 阿部修、他：大型傾斜屋根の軒下落雪の堆雪形状（測定と予測）、第13回日本雪工学会大会論文報告集、pp.159-164、1996.11
- 11) 阿部修、他：大型傾斜屋根の軒下落雪の堆雪形状、その2（傾斜方位依存性）、第14回日本雪工学会大会論文報告集、pp.45-48、1997.11
- 12) 中村秀臣：滑落した屋根雪の堆雪形状、雪氷、40巻1号、pp.37-41、1978.1
- 13) 日経アーキテクチャー：ドーム建築のすべて、日経BP社、1997.11
- 14) 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
- 15) 山口英治、他：多雪地域における膜構造建築物を対象とした屋根上積雪荷重の評価方法に関する研究、日本膜構造協会膜構造研究論文集'97、No.11、pp.55-60、1997.12
- 16) 小竹達也、他：膜屋根構造物の屋根上積雪荷重評価について、日本膜構造協会膜構造研究論文集'95、No.9、pp.79-86、1995.12
- 17) 小竹達也、他：大規模建築物の軒下堆雪形状予測手法の提案、日本建築学会技術報告集、第10号、pp.25-28、2000.6
- 18) 小竹達也、他：大規模膜屋根構造物における堆雪形状について、日本膜構造協会膜構造研究論文集'99、No.13、pp.57-61、1999.12

- 19) 苫米地司、他：膜構造物の屋根雪処理に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 426 号、pp.99-105、1991.8
- 20) 苫米地司：雪国と膜構造、(社) 日本膜構造協会講演会、1997.3
- 21) 苫米地司：膜構造建築物における屋根上積雪荷重評価について、日本建築学会技術報告集、第 5 号、pp.31-36、1997.12
- 22) 札幌ドーム（仮称）新設工事監理室・特定共同企業体：札幌ドーム「クロープンシエル」仕上げ工事、建築の技術 施行、No.418、pp.133-152、2000.8

◆◆◆◆◆ 第5章 動的応答解析による落下衝撃荷重の検討 ◆◆◆◆◆

5.1	雪氷塊の衝撃荷重の評価方法	5- 1
5.1.1	構造物に対する耐衝撃設計法の現状	5- 1
5.1.2	雪氷塊の衝撃波形特性	5- 3
5.2	雪氷塊の落下衝撃荷重による動的応答解析	5- 4
5.2.1	動的応答解析概要	5- 4
5.2.2	解析モデルおよび衝撃荷重の設定	5- 6
5.2.3	静的解析	5- 9
5.2.4	動的応答解析	5-10
5.3	まとめ	5-15
	参考文献	5-16

## 第5章 動的応答解析による落下衝撃荷重の検討

### 5.1 雪氷塊の衝撃荷重の評価方法

#### 5.1.1 構造物に対する耐衝撃設計法の現状

構造物に対する耐衝撃設計法については、衝撃荷重を静的な荷重に置き換え、許容応力度法により行うのが基本的な方法となっているが、実際に設計を行う場合、衝撃荷重をどのような方法で静的な荷重に置き換えるかについての具体的な方法は確立されていないのが現状である<sup>1)</sup>。ここでは、様々な物体による衝突現象に対する評価方法について紹介する。

##### 1) 自動車の衝突

自動車の衝突のおそれのある橋脚柱には、コンクリート壁等の十分な防護施設を設けるものとする。これらの防護施設が設けられない場合には、次の衝突荷重のいずれかが路面から 1.8m の高さに水平に働くものとして設計を行わなければならない<sup>2)</sup>。

車道方向について 1000kN

車道と直角方向について 500kN

##### 2) 流木等の衝突

流木その他の流送物の衝突のおそれがある場合には、次式により衝突力を算出する。その作用高さは水面とする<sup>2)</sup>。

$$P=0.1 \cdot W \cdot v$$

ここに、 $P$ ：衝突力(N)、 $W$ ：流送物の重量(N)、 $v$ ：表面流速(m/sec)

##### 3) 航空機の衝突

航空機は、エンジンのような剛な部分や主翼のような柔な部分等剛性が異なる部材により構成されている。また、航空機は衝突体としては比較的規模が大きい。このため、航空機が衝突した場合の被衝突体に作用する衝撃荷重は、被衝突体の剛性にもよるが他の衝突体の場合に比べて継続時間が長く、しかも大きさが時間とともに変動する。従って、航空機の衝撃荷重を静的な荷重に置き換えて設計を行うことは現実的ではないと考えられる。このようなことから、航空機の衝突を対象とした耐衝撃設計においては、衝撃荷重-時間曲線を用いた動的な構造解析の結果にもとづいて行われる場合が多い。図5-1にドイツ基準に示された衝撃荷重-時間曲線を示す<sup>3)</sup>。この曲線に見られる衝撃荷重レベルの変動は、剛性の異なる航空機の各部位が順次衝突していくことに対応している。すなわち、曲面の衝撃荷重レベルが高い部分は剛性の高い部分が衝突する時間に対応している。

#### 4) 落石の衝突

土木構造物の中で、設計の際に衝撃的な荷重を想定するものとして落石覆工が挙げられる。落石覆工は、道路上への落石から人命を守る重要な構造物である。覆工の版上には、一般には落石によって発生する衝撃荷重を低減させるためと、荷重継続時間を延長させ、準静的に構造設計を可能にするために緩衝材が設置されている。従来までは緩衝材として敷砂が用いられてきたが、その後、軽量化や高緩衝性等を目的として、新素材である発泡スチロール（以後、EPS<Expanded Polystyrol.>と呼ぶ）の積層構造、敷砂-R C版-EPS材から構成される三層緩衝構造等が開発され、各種実験により性能評価が行われてきた<sup>4-9)</sup>。

また、覆工のより合理的な断面設計を行うためには、覆工に作用する衝撃荷重の時間的分布の適切な評価と衝撃荷重載荷時における覆工の挙動に則した断面算定法の確立が重要となる。このように落石覆工においても先の航空機の場合と同様に各構造モデルに対する動的応答解析による検討がなされている。図5-2に岸・中野らや吉田らの報告をもとにした衝撃荷重の時間方向分布を示す<sup>5,9)</sup>。なお、荷重の継続時間を変化させる場合には各時間構成比を等しくするようにしている。

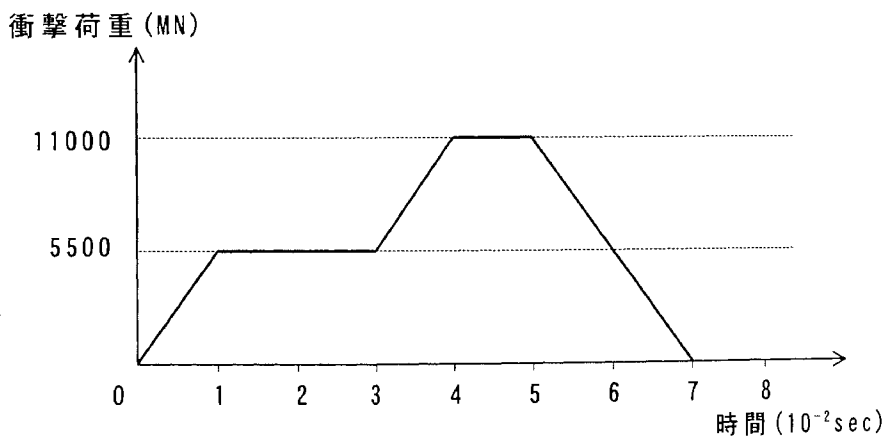


図5-1 航空機衝突の衝撃荷重-時間曲線（ドイツ基準）

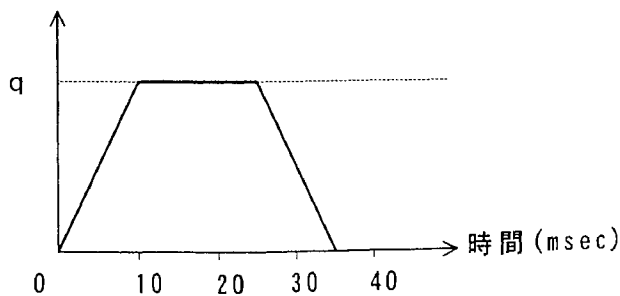


図5-2 落石衝突の衝撃荷重-時間曲線

### 5.1.2 雪氷塊の衝撃波形特性

ここでは、他の物体の衝撃波形と比較することにより、雪氷塊の衝撃レベル及び衝撃特性を明らかにする。比較対象としたのは、砂袋と落石である。図5-3に各衝撃波形の比較図を示す。図中に示してある雪氷塊の波形は、密度  $0.78\text{g/cm}^3$ 、質量  $21\text{kg}$ 、落下高さ  $7.5\text{m}$  のものである。

砂袋の波形は、第2章の雪氷塊の落下衝撃実験において、質量  $20\text{kg}$  の砂袋を用い、雪塊と同様に落下高さを変えて行ったものである（高さ  $3.5\text{m}$ ：4ケース、高さ  $5.0\text{m}$ ：4ケース、高さ  $7.5\text{m}$ ：2ケース、高さ  $10.0\text{m}$ ：4ケース）。なお、図中の波形は落下高さ  $7.5\text{m}$  のときのものである。砂袋と雪氷塊の波形を比較すると、その形状的な特徴も異なり、衝撃荷重も砂袋の方が大きくなっていることがわかる。また、他の実験ケースにおいても同様な傾向を示した<sup>10)</sup>。

落石の波形<sup>7)</sup>は、ロードセルの上に厚さ  $2\text{cm}$  のEPS材を緩衝材として設置し、質量  $100\text{kg}$  の重錘を速度  $3\text{m/sec}$  で衝突させたものであり、運動量としては雪氷塊や砂袋と同程度のものである。また、緩衝材がない状態では、衝撃時間はもっと短く、最大衝撃荷重はもっと大きくなると予測される。

なお、図中には、雪氷塊と同密度の流体の衝撃荷重を示したが、これらから、雪氷塊の衝撃荷重は、流体と固体の間に位置することがわかる。また、落石等のように硬度の大きい物体は、衝撃時間が短く、大きなピーク値となるが、雪氷塊のような粘弾性的な物体は、衝撃時間が比較的長く、緩やかなカーブを描く。このように、雪氷塊にはそれ特有の衝撃特性があることがわかる。

また、雪質は気温等の条件により変化するものである。高温になり雪の含水率

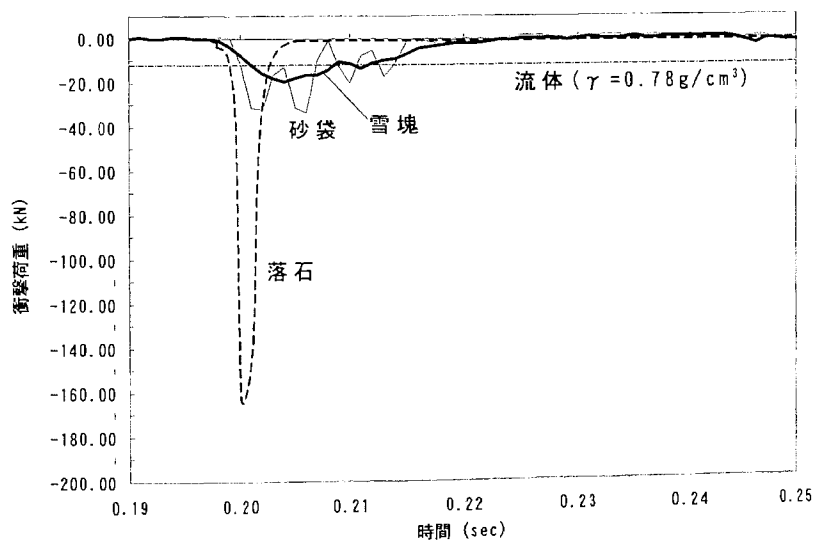


図5-3 衝撃波形の比較（雪氷塊実験ケース：実験番号10）



が大きくなった場合は、より流体に近づくため衝撃荷重値は小さくなる傾向を示すものと推測される。逆に極低温状態では、雪塊は硬度を増し、その性状は固体に近づくと考えられるが、実現象としてみれば、そのような状況では、凍着し落雪現象が発生しないため、特に考慮する必要はないといえる。

## 5.2 雪氷塊の落下衝撃荷重による動的応答解析

前節では、衝撃荷重に対して構造設計を行う場合、一般には各物体の衝撃波形を評価し、その波形を用いた動的応答解析を行っていること及び雪氷塊には他の物体とは明らかに異なった衝撃特性があることを示した。これらから雪氷塊の落下衝撃荷重に対する評価を行うには、同様に雪氷塊の衝撃波形を評価、設定し、構造物をモデル化した動的応答解析が必要であるといえる。ここでは、スラブ上に滑落した雪の衝撃荷重を、図 1—6 に示した衝撃波形をベースに、今回の実験結果を踏まえて定量化し、動的応答解析を行った。

### 5.2.1 動的応答解析概要

動的応答解析は、有限要素法解析プログラム MSC/NASTRAN を用いて行った。ここでは、NASTRAN の解析機能より今回使用した直接過渡応答解析の理論について、その概要を説明する<sup>11)</sup>。

過渡応答解析は、強制応答を計算するための最も一般的な方法であり、その目的は、時間変化する加振が作用する構造物の挙動を計算することである。また、構造物と荷重の性質に応じて、直接法及びモーダル法という二つの異なる数値解法が用いられる。直接法は、完全に連成している運動方程式に対する数値積分を実行するものである。(cf. モーダル法：運動方程式を縮約して非連成とするため構造物のモーダル形状を利用して解を求める方法)

直接過渡応答においては、構造物の応答は直接数値積分を用いて一連の連成方程式を解くことによって得られる。一般に自由振動の方程式は、d'Alembert の原理から次式で与えられる(図 5—4 参照)<sup>12)</sup>。

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [B]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

ここに、 $M$  は質量、 $B$  は減衰、 $K$  は剛性の各マトリクス、 $U$  は変位、 $P$  は荷重ベクトルであり、 $[M]\{\ddot{u}(t)\}$  は慣性力、 $[B]\{\dot{u}(t)\}$  は減衰力、 $[K]\{u(t)\}$  は復元力、 $\{P(t)\}$  は外力となる。

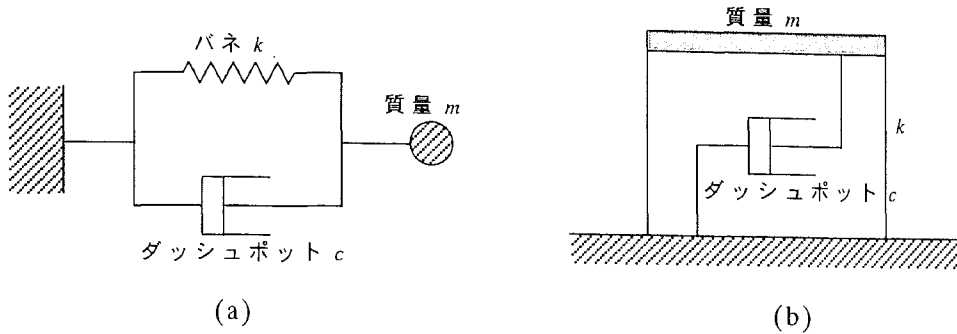


図 5 - 4 粘性減衰を有する一自由度系モデル

基本的な構造物の応答（変位）は、通常は一定の積分時間刻み  $\Delta t$  を用いて離散化した時間において解かれる。離散化時間における速度  $\{\dot{u}(t)\}$  及び加速度  $\{\ddot{u}(t)\}$  に関して、次式のように中央差分表現を用いて、

$$\{\dot{u}_n\} = \frac{1}{2\Delta t} \{u_{n+1} - u_{n-1}\} \quad \{\ddot{u}_n\} = \frac{1}{\Delta t^2} \{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}\} \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

また、作用力を隣接する 3 つの時点にわたって平均すると、運動方程式を次式のように書くことができる。

$$\left[ \frac{M}{\Delta t^2} \right] (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) + \left[ \frac{B}{2\Delta t} \right] (u_{n+1} - u_{n-1}) + \left[ \frac{K}{3} \right] (u_{n+1} + u_n + u_{n-1}) = \frac{1}{3} (P_{n+1} + P_n + P_{n-1}) \quad \dots \dots \dots (5.3)$$

項を集めて整理すれば、運動方程式は次式の形になる。

$$[A_1] \{\dot{u}_{n+1}\} = [A_2] + [A_3] \{\dot{u}_n\} + [A_4] \{\dot{u}_{n-1}\} \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

ここで、

$$[A_1] = \left[ \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} + \frac{K}{3} \right]$$

$$[A_2] = \frac{1}{3} \{P_{n+1} + P_n + P_{n-1}\}$$

$$[A_3] = \left[ \frac{2M}{\Delta t^2} - \frac{K}{3} \right]$$

$$[A_4] = \left[ -\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} - \frac{K}{3} \right]$$

マトリクス  $[A_1]$  は動的マトリクスと呼ばれ、またマトリクス  $[A_2]$  は隣接する 3 つの時点にわたっての平均作用力である。過渡求解は、 $[A_1]$  を分解し、それを(4.4)式の右辺に適用することにより得られる。

減衰マトリクス  $[B]$  は、構造物のエネルギー消散特性を表すために用いられる。一般的な場合、減衰マトリクスは次式のように数個のマトリクスで構成される。

$$[B] = [B^1] + \frac{G}{W_3} [K] + \frac{1}{W_4} \sum G_E [K_E] \quad \dots \dots \dots (5.5)$$

ここで、

- $[B^1]$  : 減衰要素
- $G$  : 全体構造減衰係数
- $W_3$  : 全体構造減衰を等価粘性減衰への変換に関する対象周波数  
(単位時間あたりのラジアン)
- $[K]$  : 全体剛性マトリクス
- $G_E$  : 要素構造減衰係数
- $W_4$  : 要素構造減衰を等価粘性減衰への変換に関する対象周波数  
(単位時間あたりのラジアン)
- $[K_E]$  : 要素剛性マトリクス

第 1 項は、粘性減衰をモデル化するのに用いられる。また、第 2・3 項は、構造減衰 (変位に直線的に比例する材料エネルギーの消散効果を表す) をモデル化するためのものである。

### 5.2.2 解析モデル及び衝撃荷重の設定

今回、新潟県下越地方に建設されているスタンド屋根下の堆雪床に適用した (3.3.3 項参照)。図 5-5 に解析モデルを示す。柱梁は全て剛接の線材要素、スラブは 20cm 角の面材要素としている。質量は部材断面に応じて各節点に振り分けており、梁の質量はスラブ厚分を差し引いて算出している。また、境界条件は、基本的には 3 辺固定であるが、鉛直方向変位は拘束していない。また、スラブ上の積雪荷重については、以下に示すような 3 つのケースで解析を行った。なお、積雪荷重は床質量に換算し、床荷重として評価している。

CASE0 : 積雪なし

$$\rightarrow \text{床荷重} = DL = 775 \text{ kg/m}^2$$

CASE1 : 最大の積雪荷重を考慮

$$\rightarrow \text{床荷重} = DL + LL1 = 775 + 4.5 \text{ kg/m}^2 \text{ cm} \times 300 \text{ cm} = 2125 \text{ kg/m}^2$$

CASE2 : 通常の積雪荷重を考慮

$$\rightarrow \text{床荷重} = DL + LL2 = 775 + 3.0 \text{ kg/m}^2 \text{ cm} \times 120 \text{ cm} = 1135 \text{ kg/m}^2$$

落雪による衝撃荷重は、時刻暦の外力として与える。今回の解析では、雪密度  $\gamma = 0.3\text{g/cm}^3$ 、半径  $R=25\text{cm}$ 、長さ  $L=5.0\text{m}$  の円筒形の雪塊が落下し、3.2.3節の実験結果より衝突時の速度が  $V=15\text{m/sec}$  となるケースを想定した。図5-6に解析用衝撃荷重の荷重-時間曲線を示す。

最大衝撃荷重  $P_m$  は、図2-12の実験結果より密度  $\gamma = 0.3\text{g/cm}^3$  の場合は圧縮破壊強度（最大衝撃荷重） $\sigma = 10.0\text{N/cm}^2$  程度であり、 $P_m$  は以下のように求められる。

$$A = \pi \times (0.25\text{m})^2 = 0.2\text{m}^2$$

$$P_m = 100\text{kN/m}^2 \times 0.2\text{m}^2 = 20.0\text{kN}$$

衝突後には衝突円錐が形成されて一定荷重となるが、このときの荷重  $P$  は流体衝突荷重として以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} P &= \gamma V^2 A = 0.3\text{t/m}^2 \times (15\text{m/sec})^2 \times 0.2\text{m}^2 \\ &= 13.5\text{kN} \end{aligned}$$

衝突円錐が形成されるのに要する時間  $t_1$  は、径方向の円錐形成速度  $V_c$  によって求められる。 $V_c$  は雪の終密度  $\gamma_c$ （衝突後の密度）と受圧面の後退速度  $V_p$  によって以下のように求められる<sup>13)</sup>。

$$V_c = \gamma / (\gamma_c - \gamma) \times (V - V_p)$$

ここで、衝突時の圧密係数を 0.7 とすると、 $\gamma_c = \gamma / 0.7 = 0.43\text{g/cm}^3$  となる。従って、いま  $V_p = 0\text{m/sec}$  とすると、

$$V_c = 0.3 / (0.43 - 0.3) \times 15 = 34.6\text{m/sec}$$

よって、衝突円錐が半径 25cm に達するまでの時間  $t_1$  は、

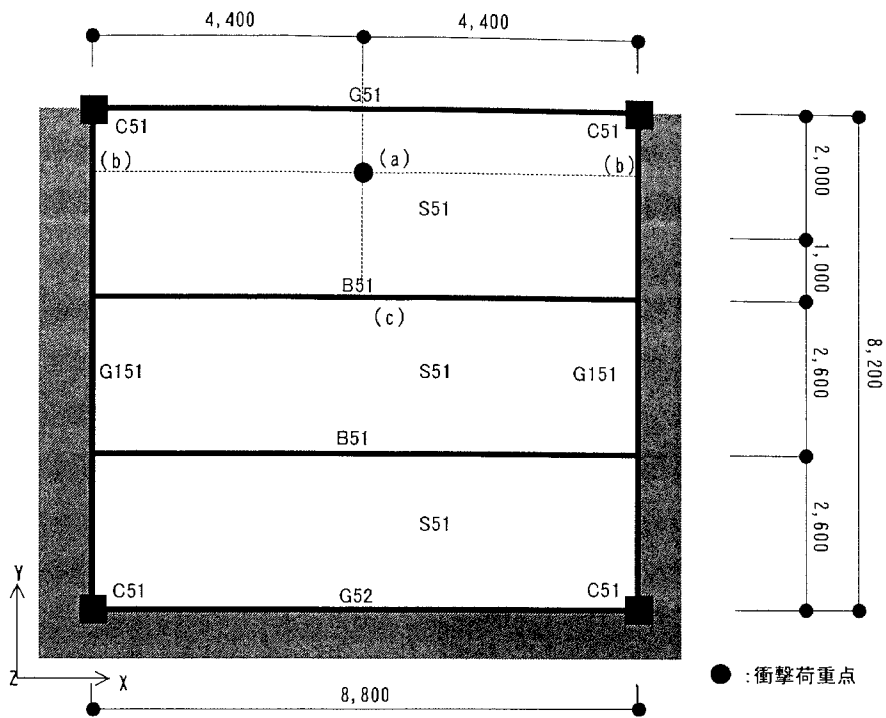
$$t_1 = R / V_c = 0.25 / 34.6 = 0.0072\text{sec}$$

雪塊が完全に落下し、荷重 0 となる時間  $t_2$  は、

$$t_2 = L / V = 5 / 15 = 0.333\text{sec}$$

となる。

なお、衝突円錐形成過程における曲線については、その形状を放物線と仮定し、最大衝撃荷重 20.0kN と流体衝撃荷重 13.5kN の 2 点間を均等に時間分割し、各中間値を設定した。



G51 : 40cm×200cm      G52 : 45cm×100cm  
 G151 : 70cm×100~130cm      B51 : 45cm×100cm  
 C51 : 80cm×80cm (L=5.6m)      S51 : t=15cm

図 5 - 5 解析モデル

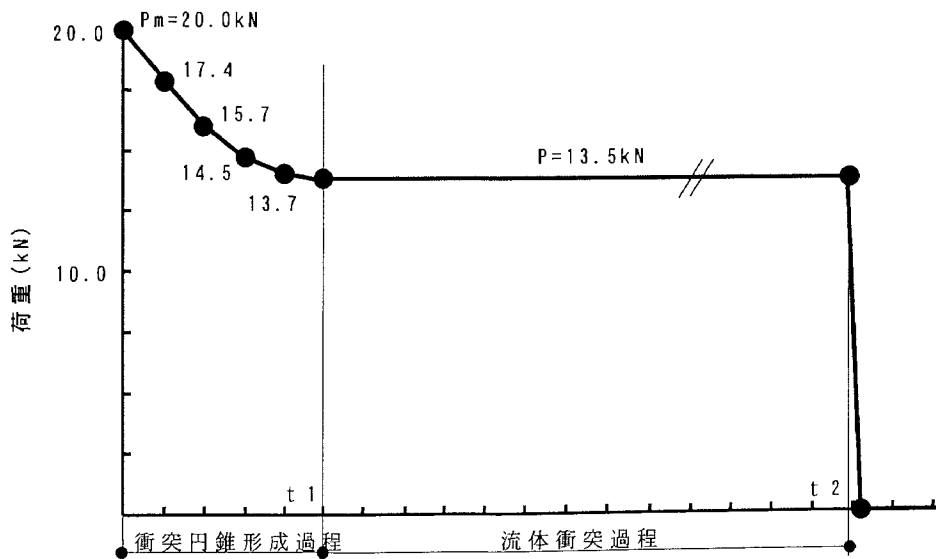


図 5 - 6 解析用衝撃荷重

### 5.2.3 静的解析

同じモデルを用いて、最大衝撃荷重  $P_m=20\text{kN}$  を静的に加える解析を行った。結果的には、加力点において鉛直変位は最大となり、その値は、 $\delta=-0.3\text{mm}$  であった。また、スラブに生じる曲げモーメントは、加力点(a)と大梁側スラブ端部(b)及び小梁側スラブ端部(c)で最大となった。(図5-5参照)

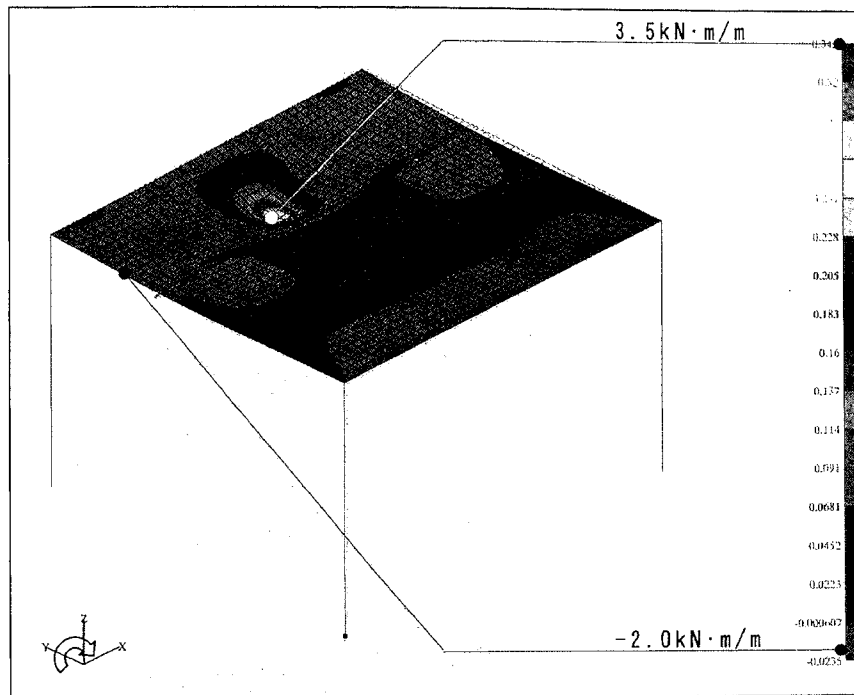


図5-7 静的解析結果 (X方向曲げモーメント図)

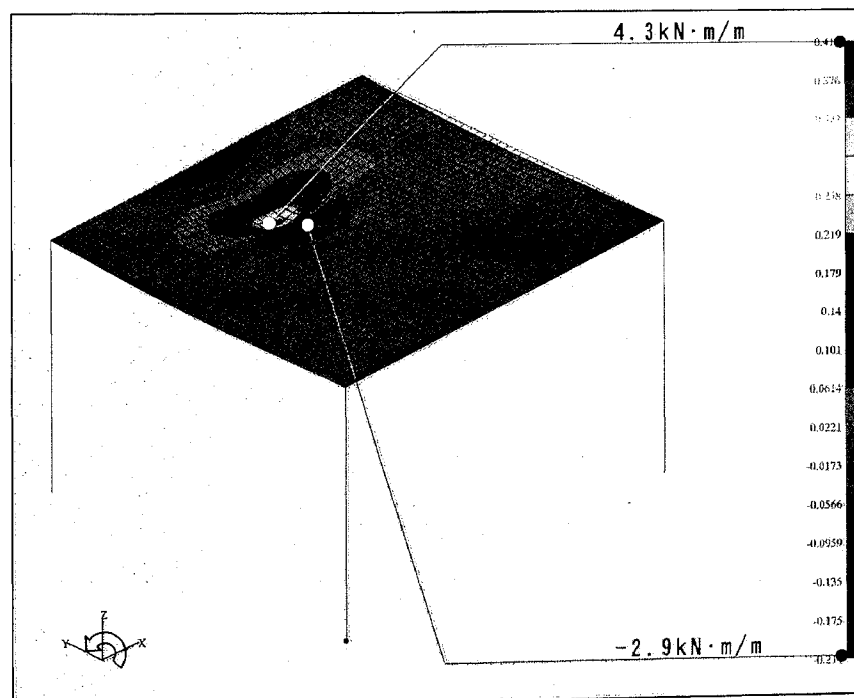


図5-8 静的解析結果 (Y方向曲げモーメント図)

#### 5.2.4 動的応答解析

落雪の密度や速度によって、 $P_m$  や  $t_l$  等の値は変動する。この影響を検証するため、CASE0 のモデルを用いて、 $P_m$  及び  $t_l$  をパラメータとした解析を行った。表 5-1 に今回の解析ケースを示す。解析番号①～③は床荷重、④⑤は  $P_m$ 、⑥～⑧は  $t_l$  が異なった場合である。なお、表 5-2 に各解析モデルの固有周期を示すが、1 次固有周期は 0.1sec 前後である。図 5-9 に CASE0 における固有モードを示すが、1 次モードはスラブ中央付近に凹凸ができるモードとなった（図中は下に凸）。また、他の解析モデルにおける固有モードも同様な傾向であった。なお、減衰定数は RCスラブの 1 次モードに対し 3%としている。

表 5-1 解析ケース

解析番号	解析モデル	$P_m$ (kN)	$t_l$ (sec)	V換算 (m/sec)	$t_2$ (sec)	L換算 (m)
①	CASE0	20.0	0.0072	15	0.333	5
②	CASE1					
③	CASE2					
④	CASE0	31.8	0.0072	15	0.333	5
⑤		50.0				
⑥	CASE0	20.0	$0.0072 \times 0.5 = 0.0036$	30	0.333	5
⑦			$0.0072 \times 2.0 = 0.0144$	7.5		
⑧			$0.0072 \times 30 = 0.216$	0.5		

表 5-2 各解析モデルの固有周期

固有周期T(sec)			
CASE	CASE0	CASE1	CASE2
L.L(kg/m <sup>2</sup> )	0	1350	360
1次	0.0897	0.1309	0.1023
2次	0.0547	0.0779	0.0617
3次	0.0478	0.0731	0.0555
4次	0.0384	0.0597	0.0450
5次	0.0299	0.0476	0.0352
6次	0.0295	0.0427	0.0335
7次	0.0283	0.0417	0.0327
8次	0.0247	0.0397	0.0294
9次	0.0240	0.0369	0.0276
10次	0.0222	0.0329	0.0258

図 5 - 9 CASE0 における固有モード (1~4 次)

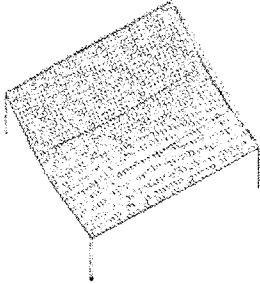
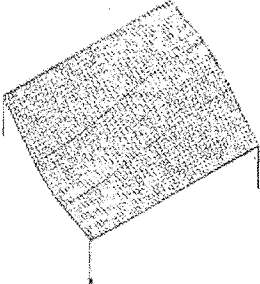
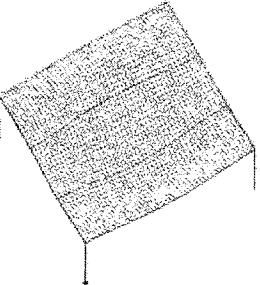
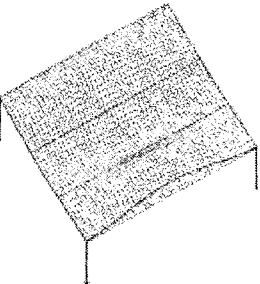
	モード図	固有値 (sec)
1次		0.0897
2次		0.0547
3次		0.0478
4次		0.0384



図5-10～図5-12に加力点の鉛直変位の時刻歴推移の状況を示す。なお、プロット間隔は0.002秒である。これよりどの解析ケースでもほぼ1次固有周期で振動しているのがわかる。

床荷重をパラメータとした解析ケース（解析番号①②③）では、最大衝撃荷重が発生した後はすぐに荷重一定(13.5kN)になり、ある変位を軸に減衰しながら時刻 $t_2$ まで自由振動が続く。このときの軸となるのは、鉛直変位-0.2mmであり、これは静的に13.5kN加力したときの変位と一致している。その後、荷重が0となった後は、変位0を軸として減衰自由振動が続く。また、この結果より床荷重による変位量の差は殆ど無いといえる。

最大衝撃荷重 $P_m$ をパラメータとした解析ケース（解析番号①④⑤）では、最大衝撃荷重が大きくなると初期の変位のピーク値が大きくなるが、その後すぐに同様な振動性状となる。

衝突円錐形成時間、つまり最大衝撃荷重20.0kNから流体衝突荷重13.5kNになるまでの時間 $t_1$ をパラメータとした解析ケース（解析番号①⑥⑦⑧）では、 $t_1$ が大きくなると、初期の変位が若干大きくなる傾向が見られる。これは $t_1$ が大きくなるということは、衝突速度が小さくなるということであり、荷重が20.0kNからゆっくりと13.5kNに低下することになる。このため $t_1$ が大きくなると、加力初期の変形が若干大きく生じるようになってくる。なお、 $t_1=0.216\text{sec}$ は速度に換算すると1.2m/secということになり、非現実的な値ではあるが、静的に20.0kNを加力した場合の鉛直変位 $\delta=-0.3\text{mm}$ に相当するものとして示した。

なお、流体衝突過程の時間 $t_2$ を変化させた場合、例えば $t_2$ が大きくなった場合、つまり雪塊の長さが長くなった場合には、-0.2mmを軸に自由振動する時間が延びるだけであり、その後は変位0を軸として減衰自由振動が続くだけであり、その他に差異はみられない。

表5-3にスラブの面材要素に生じた最大曲げモーメントを示す。 $M_x, M_y$ はそれぞれY軸及びX軸まわりのモーメントを示している(X,Yの符号が逆)。なお、その発生位置は、静的加力時と同様であった。基本的には、最大変位が大きくなるほど最大曲げモーメントも大きくなる傾向があり、床荷重が異なる解析番号①～③で比較すると、変位、曲げモーメントともCASE0>CASE2>CASE1となっており、床荷重の関係と合っている。ただし、その差はごく僅かである。なお、最大変位及び最大曲げモーメントは加力直後に発生している。表中の括弧内の数値は、その最大曲げモーメント及び最大変位が発生した時刻を示している。これを見ると、加力点(a)点における最大曲げモーメントと最大変位の発生時刻には、ズレがあり、最大曲げモーメント発生後に最大変位が発生していることがわかる。

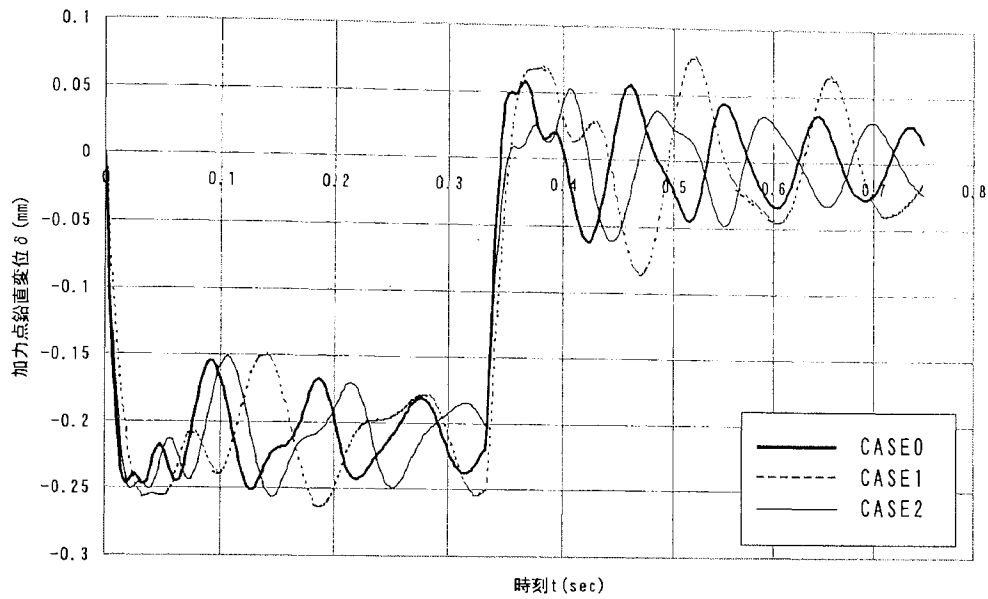


図 5 - 10 加力点における鉛直変位の時刻層推移 (床質量比較)

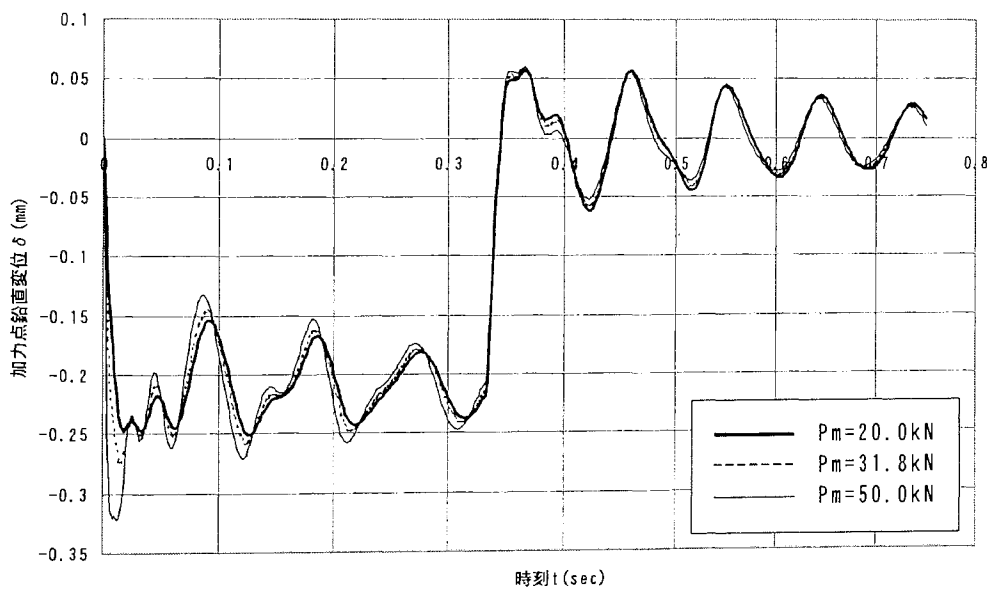


図 5 - 11 加力点における鉛直変位の時刻層推移 (最大衝撃荷重  $P_m$  比較)

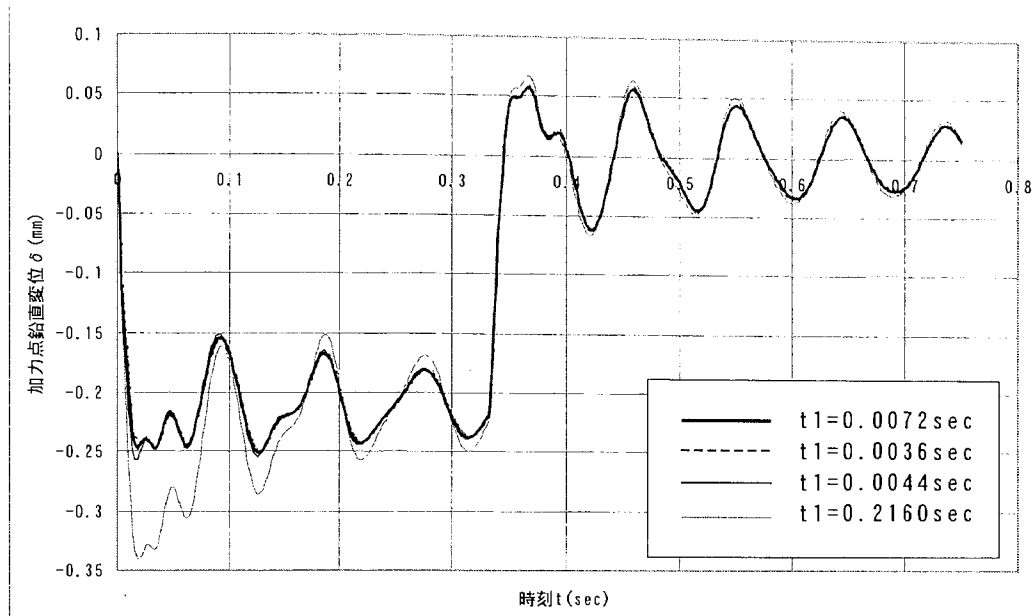


図 5 - 12 加力点における鉛直変位の時刻暦推移（円錐形成時刻  $t_1$  比較）

表 5 - 3 スラブの最大曲げモーメント

解析 番号	解析 モデル	Pm (kN)	t1 (sec)	Mx (kN·m/m)		My (kN·m/m)		δ (mm)
				max (a)点	-max (b)点	max (a)点	-max (c)点	
①	CASE0	20.0	0.0072	2.7 (0.006)	-0.6 (0.022)	3.4 (0.016)	-2.5 (0.014)	-0.25 (0.126)
②	CASE1			2.6 (0.018)	-0.6 (0.036)	3.4 (0.026)	-2.5 (0.022)	-0.26 (0.186)
③	CASE2			2.6 (0.006)	-0.6 (0.026)	3.4 (0.018)	-2.5 (0.016)	-0.26 (0.144)
④		31.8		4.1 (0.004)	-0.9 (0.020)	4.4 (0.004)	-3.4 (0.006)	-0.27 (0.016)
⑤		50.0		6.0 (0.004)	-1.3 (0.020)	6.5 (0.004)	-4.8 (0.006)	-0.32 (0.012)
⑥	CASE0	20.0	0.0036	2.6 (0.012)	-0.5 (0.022)	3.3 (0.016)	-2.5 (0.014)	-0.25 (0.126)
⑦	0.0144		3.0 (0.006)	-0.7 (0.022)	3.5 (0.014)	-2.7 (0.012)	-0.26 (0.018)	
⑧	0.216		3.7 (0.012)	-0.7 (0.024)	4.7 (0.016)	-3.5 (0.014)	-0.34 (0.018)	
静的解析 (Pm=20.0kN)				3.5	-0.2	4.3	-2.9	0.30

※括弧内：発生時刻（秒）

### 5.3 まとめ

本章では、これまで評価方法が確立されていなかった雪氷塊の落下衝撃荷重について動的応答解析により検討を行なった。雪氷塊には、特有の衝撃特性があり、衝撃荷重の継続時間が 0.02~0.03sec と構造物の 1 次固有周期（本解析ケースでは 0.1sec 前後）と大きく異なるため、静的解析結果とは異なる挙動を示すと考えられ、動的な応答解析による検討が必要であるといえる。

床スラブ等への落雪による衝撃荷重を評価する場合、落雪寸法や衝突速度等の設計条件を考慮した衝撃波形を作成し、構造モデルによる動的応答解析を行うことで評価することができる。表 5-4 に本解析ケースにおける静的解析結果との比較表を示すが、最大変位と最大曲げモーメントについては、最大衝撃荷重  $P_m$  による静的加力と比較して 80% 程度の値となる結果が得られた。なお、解析番号⑧については衝突円錐形成過程である  $t_1$  が非現実的な値であるということから表記していない。また、流体衝撃荷重  $P$  による静的加力と比較した場合は 120% 程度の値であるが、 $P_m=50\text{kN}$ （解析番号⑤）の場合は、250% の値となり、最大衝撃荷重  $P_m$  との差が大きくなるにつれて、その差も大きく異なる傾向にある。つまり、衝撃荷重評価においては、流体衝撃荷重  $P$  よりも最大衝撃荷重  $P_m$  の影響の方が大きいということになる。

日本建築学会の建築物荷重指針・同解説において「衝撃力の評価については、参考となるデータが極めて少ないが、通常は重力の 2 倍程度を見ておけば良いであろう。」という記述がある。流体衝撃荷重  $P = \gamma V^2 A$  に  $V^2 = 2gh$  を代入すると ( $h$ : 落下高さ)、 $P = 2g \gamma Ah$  (N) となる。即ち、 $g \gamma Ah$  (N) は静止状態での積雪荷重で、衝撃荷重は、その 2 倍の荷重となるが、この値を用いる場合、先にも述べたように、 $P_m$  と  $P$  の関係によっては、大きく異なった値となるため注意が必要である。

表 5-4 静的解析結果との比較

解析条件				P <sub>m</sub> (20kN)との比較			P(13.5kN)との比較			
解析番号	解析モデル	P <sub>m</sub> (kN)	t <sub>1</sub> (sec)	M <sub>x</sub> (%)	M <sub>y</sub> (%)	δ(%)	M <sub>x</sub> (%)	M <sub>y</sub> (%)	δ(%)	
①	CASE0	20.0	0.0072	77	79	83	114	117	123	
②	CASE1			74	79	87	110	117	128	
③	CASE2			74	79	87	110	117	128	
④	CASE0	31.8	0.0036	74	64	57	174	152	133	
⑤		50.0		69	60	43	254	224	158	
⑥		20.0		0.0036	74	77	83	110	114	123
⑦				0.0144	86	81	87	127	121	128
⑧				0.216						

## 第5章 参考文献

---

- 1) (社) 土木学会：構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法、pp.121-123、1994.1
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、1990.2
- 3) KTA 2202 : Schutz von Kernkraftwerken gegen Flugzeugabsturz, Grundsätze und Lastannahmen, Entwurf, Kerntechnischer Ausschuss(KTA), Koeln, 1980
- 4) 吉田博、他：敷砂上への落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究、土木学会論文集、第 352 号 / III-2、pp.61-70、1984.12
- 5) 吉田博、他：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について、土木学会論文集、第 362 号 / I-4、pp.461-470、1985.10
- 6) 吉田博、他：発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究、土木学会論文集、第 427 号 / VI-14、pp.143-152、1991.3
- 7) 岸徳光、他：三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1577-1586、1992.3
- 8) 岸徳光、他：芯材を RC スラブとした場合の三層緩衝構造の衝撃特性、土木学会北海道支部論文報告集、第 48 号、pp.155-160、1992.2
- 9) 岸徳光、他：野外実験による敷砂の緩衝性能、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1587-1597、1993.3
- 10) 小竹達也、他：屋根上積雪の落雪による衝撃荷重に関する一考察、日本建築学会構造系論文報告集、第 543 号、pp.31-36、2001.5
- 11) 日本エムエスシー株式会社：MSC/NASTRAN ユーザーガイド 基礎動解析 (V68)、pp.6-1-6-6、1994.12
- 12) 柴田明徳：最新建築学シリーズ 9 最新耐震構造解析、森北出版、pp.1-54、1986.12
- 13) (社) 日本建設機械化協会：新編 防雪工学ハンドブック (3.雪による障害発生とその機構)、pp.91-93、1988.3

◆◆◆◆◆ 第6章 雪氷塊の落下衝撃荷重の評価 ◆◆◆◆◆

6.1	はじめに	-----	6- 1
6.2	動的応答解析による評価方法の提案	-----	6- 2
6.2.1	解析用波形モデルの設定	-----	6- 2
6.2.2	破壊強度の設定	-----	6- 3
6.2.3	衝突円錐形成時間の設定	-----	6- 4
6.2.4	動的応答解析の流れ	-----	6- 4
6.3	静的解析による評価方法の提案	-----	6- 6
6.3.1	静的解析の必要性	-----	6- 6
6.3.2	検討条件	-----	6- 6
6.3.3	解析結果	-----	6- 8
6.3.4	積的荷重解析による評価式	-----	6- 9
6.4	まとめ	-----	6-11
	参考文献	-----	6-12

## 第6章 雪氷塊の落下衝撃荷重の評価

### 6.1 はじめに

積雪荷重に関しては、地上積雪及び屋根上積雪については、これまでの研究者達による多くの研究成果によって評価方法が確立しつつある<sup>1)~12)</sup>。最近では制御積雪荷重について更なる研究が行なわれている<sup>13)</sup>。ただし、沈降力や側圧等のその他の雪荷重については実測からの経験式によるところが多く、評価理論が確立されているわけではない。特に屋根上落雪による雪塊の衝突現象は、人命を損なう恐れがあり、その荷重値の大きさからこれまでに多くの設計者を悩ませてきた課題である。そして、設計者達は十分な設計資料がないために、個別に実験を行ったり、他の報告内容から推測したりして対応してきた。

これまでの建築分野における雪氷塊の落下衝撃荷重に関しては、日本建築学会の建築物荷重指針・同解説において「衝撃力の評価については、参考となるデータが極めて少ないが、通常は重力の2倍程度を見ておけば良いであろう。」という記述がある程度である<sup>12)</sup>。これも設計条件によっては大きく異なった値となる可能性があるため、その取り扱いには注意が必要であることは、第5章でも述べた。

ここまでの研究結果から、落雪衝撃について精密に構造設計を行なうには、落雪寸法や衝突速度等の設計条件を考慮した衝撃波形と構造モデルによる動的応答解析が必要であることが分かった。最近では、コンピュータの発展により複雑な構造物も汎用解析プログラム等を用いて静的解析から動的解析まで対応可能であり、設計手法としてはすでに一般的なものとなっている。したがって、解析用の衝撃波形をどのように評価するかということが最も重要な課題であるといえる。

そこで、本研究では既往の研究や他分野の衝撃実験方法を参考にし、実状に即した実測方法を検討、実施し、雪氷塊の衝撃波形モデルを定義することを試みた(第2章)。ここでは、氷状雪塊の衝撃レベル、高歪速度での衝突状況、汎用的な衝撃波形の確認に重点をおいて実験を行なった。氷状雪塊と高歪速度というのは、大規模建築物の屋根上では、積雪の一部が氷状となることや落雪衝突時の衝突速度、衝突後の飛散状況等屋根上落雪の実状を考慮したものである。汎用的な衝撃波形というのは、衝撃波形モデルを定義する上では、ある代表的な波形があった方が望ましく、条件により幾つも波形が存在するのでは、一般解を導くのが困難となるためである。

そして、ひとつの波形モデルを提案し動的応答解析により検討を行なった。その結果、雪氷塊の落下衝撃荷重に対する設計上の結果を導くことができた<sup>14)</sup>。本章

では、更に幾つかの異なった設計条件による検証を行い、設計者が容易に利用できる評価式の提案を行なう。

## 6.2 動的応答解析による評価方法の提案

### 6.2.1 解析用波形モデルの設定

雪氷塊の衝撃波形は最大衝撃荷重から流体衝撃荷重に至るまでの衝突円錐形成過程と流体衝突過程から構成されている。既往の研究成果をまとめた衝撃波形の模式図（図1-6）及び本研究による実験結果より導いた解析用波形モデルを図6-1に示す。解析用波形を設定するには(a)点から(d)点の各時間と荷重値を設定すればよい。なお、(a)点と(b)点の間は放物曲線としている。各点の時間と荷重値は、以下の式により求められる。

	時間(sec)	荷重値(kN)
(a)点	0	$P_m = \sigma A$
(b)点	$t_1 = R/V_c$	$P = \gamma V^2 A$
(c)点	$t_2 = L/V$	$P = \gamma V^2 A$
(d)点	$t_2 = L/V$	0

ここで、 $\sigma$ ：破壊強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $A$ ：雪塊の断面積(m<sup>2</sup>)、 $\gamma$ ：雪密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $V$ ：衝突速度(m/sec)である。また、時間  $t_1$  及び  $t_2$  は、雪塊の形状が円筒形（断面半径： $R$ 、長さ： $L$ ）と仮定すると、 $V_c$  は円錐形成速度であり衝突後の雪密度を  $\gamma/k$  とすると、以下のように求められる。

$$V_c = \gamma / (\gamma/k - \gamma) \times (V - V_p) \quad \dots \dots \dots (6.1)$$

ここに、 $k$ ：圧密係数  $V_p$ ：受圧面の後退速度

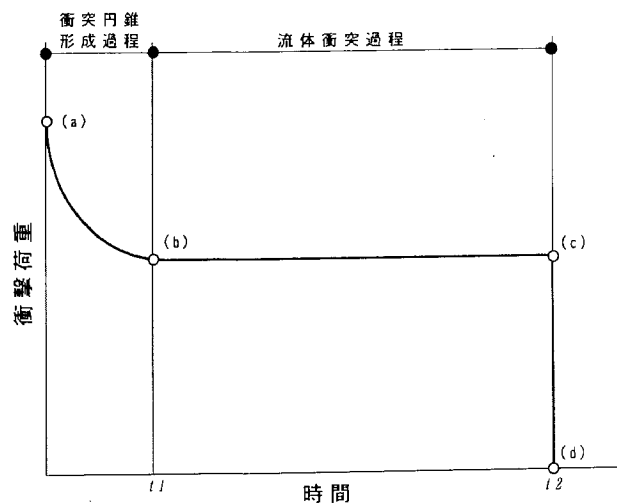


図6-1 解析用波形モデル（衝撃荷重－時間曲線）



### 6.2.2 破壊強度の設定

波形モデルの(a)点は雪氷塊の破壊強度によって決まる。その破壊強度については、これまでに木下、吉田、Mellor らによって実験、研究がなされてきた。そして、圧縮速度や歪速度によってその強度は異なってくるということが報告されている<sup>15)~17)</sup>。ただし、本研究が対象としているような高速衝突による圧縮強度（破壊強度）については明確になっていない。図6-2に本研究による実験結果とその結果を考慮したモデルライン（図中実線）を示す。これは雪密度 $\gamma$ と最大衝撃荷重（破壊強度） $\sigma$ の関係を示した実験結果であるが、図中のラインは実験結果を包絡するように設定している。これより、破壊強度 $\sigma$ は雪密度 $\gamma$ によって以下のように表される。

$$\begin{cases} \sigma = 66.67 \gamma \text{ (N/cm}^2\text{)} = 666.7 \gamma \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.0 \text{g/cm}^3 \leq \gamma < 0.6 \text{g/cm}^3) \\ \sigma = 40.0 \text{ (N/cm}^2\text{)} = 400.0 \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.6 \text{g/cm}^3 \leq \gamma < 1.0 \text{g/cm}^3) \end{cases}$$

また、同図中に Mellor(1975)が示した圧縮強度のラインを破線で示す<sup>17)</sup>。これは歪速度 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{s}^{-1}$ での実験結果である。この Mellor の結果と本実験結果との大きな違いは、Mellor の結果は雪密度 $0.4 \text{g/cm}^3$ を超えたところから破壊強度が急激に上昇しているのに対して、本実験結果は $40 \text{N/cm}^2$ 程度に収束している点である。このことから屋根上落雪現象における雪氷塊は、低歪速度での雪物性とは大きく異なった性状を示すことが伺える。なお、グラフでは $45 \text{N/cm}^2$ までしか表示していないが、Mellor の結果は密度 $0.5 \text{g/cm}^3$ で $150 \text{N/cm}^2$ 、密度 $0.6 \text{g/cm}^3$ で $250 \text{N/cm}^2$ 、密度 $0.8 \text{g/cm}^3$ で $750 \text{N/cm}^2$ という値を示している。

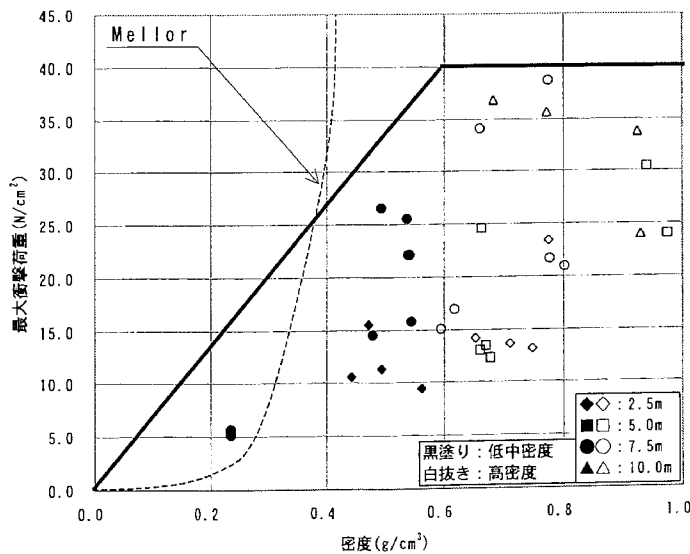


図6-2 実験結果及び設計用破壊強度ライン

### 6.2.3 衝突円錐形成時間の設定

衝突円錐形成時間  $t_I$  を設定するには、受圧面後退速度  $V_p$  や圧密係数  $k$  を設定する必要がある。圧密係数  $k$  は、これまでの経験値から 0.7 程度を設定すればよいであろう。受圧面後退速度  $V_p$  を実験等から求めることは困難であり、現状ではその正確な値を捉えることはできていない。(6.1)式から  $V_p$  は円錐形成速度  $V_c$  の算出に用いられる係数であるが、その関係についてみると、 $V_p$  が大きくなれば  $V_c$  は小さくなる。つまり、 $t_I$  は大きくなる関係にある。また、 $V_p$  の値の範囲は、0 以上  $V$  (衝突速度) 未満である。

第 4 章の動的応答解析の解析ケース①、⑥、⑦、⑧による  $t_I$  をパラメータとした比較結果 (図 4-12 参照) より、 $t_I$  が大きくなれば構造物の変形量等も大きくなる傾向があることが分かっている。ただし、その差は変形量においても 1,000 分の 1 ミリから 10,000 分の 1 ミリ単位でのものであり、実用上は殆ど意味を持たないものといえる。したがって、 $V_p$  の値は 0、つまり受圧面後退を考慮しないものとして差し支えないと考える。

### 6.2.4 動的応答解析の流れ

図 6-3 に動的応答解析による評価を行なう場合の一連の流れを示す。大きくは二つの流れがあり、解析用の波形モデルと構造モデルをそれぞれ作成する流れである。

波形モデルは、建設地及び屋根形状から設定されるが、本提案手法によれば破壊強度  $\sigma$ 、衝突速度  $V$  までは機械的に求めることができる。ただし、落雪形状については設計者の判断が介入する部分である。例えば、フラットな屋根であれば、断面積  $A$  は高さを積雪深  $h$ 、幅を単位長さで設定する。また、落雪長さは屋根勾配や静摩擦係数、引張強度による釣り合い式から落雪時の分断長さを算出する等して設定する。屋根が V 字溝型形状をしていれば、屋根雪は V 字の谷側へ集まるように堆雪するので、積雪深が決まれば V 字溝内の積雪断面形状は決まる。滑雪方向と垂直な方向に凹凸があった場合は、その位置での分断を考慮して落雪長さを設定する。

構造モデルは、落雪を受けるスラブや柱、梁等を面材、線材でモデル化したものである。応答解析では  $m a s s$  (質量) が必要となるため、各部材の質量を算出して、その部材を構成する節点に振り分け、部材のばね定数や減衰係数を設定する。

このようにして作成された波形モデル及び構造モデルを用いて  $M S C / N A S T R A N$  等のソルバーを用いて解析を行ない、解析結果の最大応力に対して断面算定を行なうという流れである。

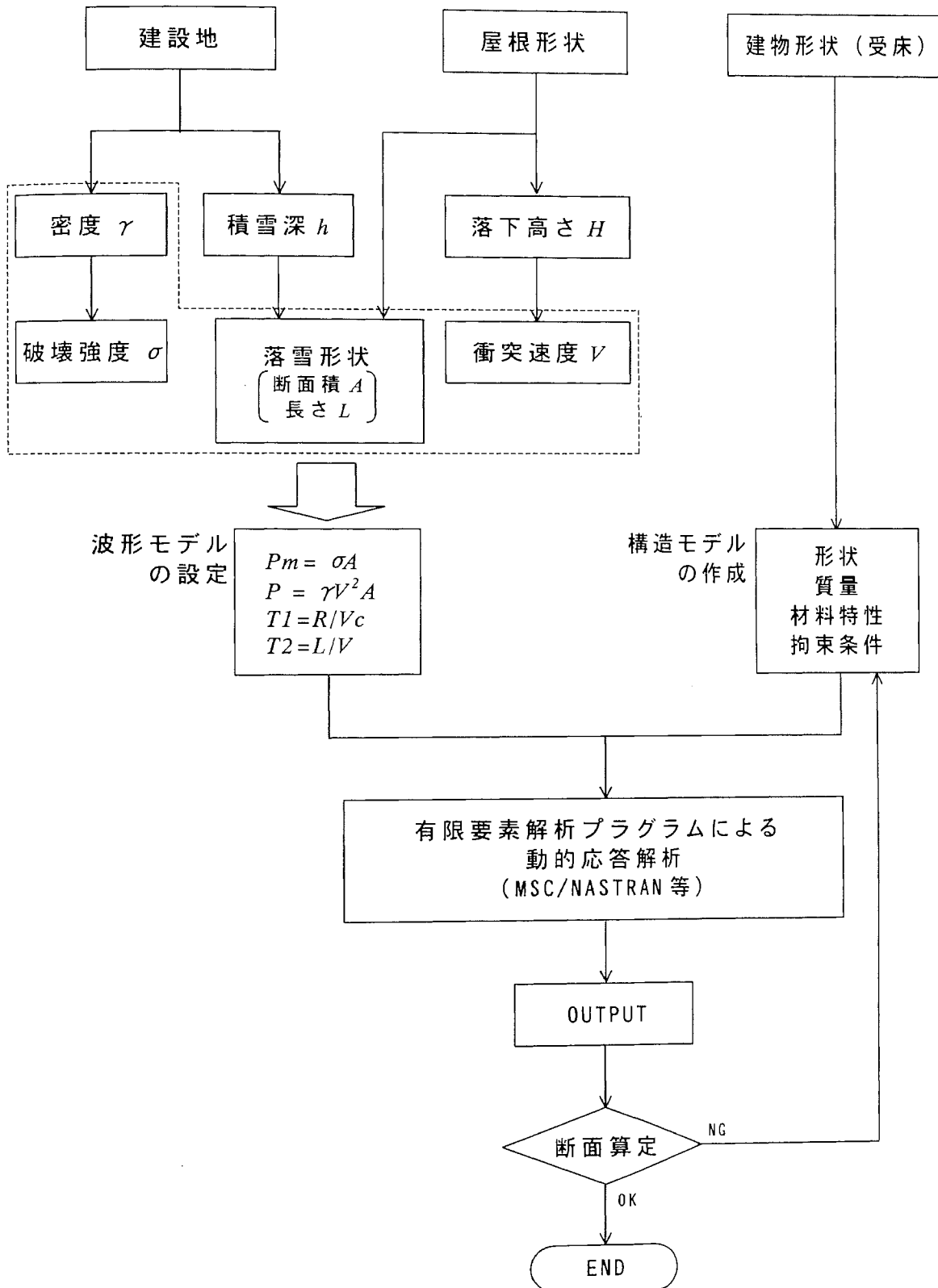


図 6 - 3 動的応答解析による検討の流れ

## 6.3 静的解析による評価方法の提案

---

### 6.3.1 静的解析の必要性

前節に示した方法により落雪衝撃に対する構造検討を行なうことはできる。ただし、動的応答解析は、非常に細かな時間ピッチによる計算の繰り返しのため、構造モデルが複雑になれば、より多くの計算時間を要することになる。また、逆に非常にシンプルな構造モデルで、手計算での検討が可能であれば、わざわざ解析データを作成してコンピュータで解析する方が手間と時間を要する場合もある。このように設計者にとっては、静的解析や手計算レベルでも検討可能であることが望ましい。

そこで、ここでは第4章で行なった動的応答解析に更に条件を追加することによって応答波形を静的荷重に置き換えるときの評価方法について検証する。

### 6.3.2 検討条件

第4章での検討結果からは、静的荷重は動的応答の約80%という結果が得られているが、これはある限られた条件下での結果であり、これを一般解とみなすのは危険である。ここでは、更に検討パラメータを増やし、想定される条件下での妥当な値を探る。

既に(1)床質量による比較、(2)最大衝撃荷重による比較、(3)衝突円錐形成時間による比較、については検討がされている。ここでは更に(4)床剛性(床厚さ)による比較、(5)支持条件による比較、(6)衝撃荷重点による比較、(7)流体衝撃荷重による比較、について検討を行なう。

#### 床剛性による比較検討

表4-1で示した解析ケースのうち、解析番号①に対して床スラブ厚さのみ変更したモデルを作成した。なお、解析モデルCASE0は、積雪なし、床質量 $775\text{kg/m}^2$ 、床厚さ150mmのモデルである。ここでは、床厚さ100mmのモデル(解析番号⑨)と200mmのモデル(解析番号⑩)について解析を行なった。ただし、本来であれば床厚さが変化すれば、質量も変化するが、既に解析番号①②③の結果より床質量の影響は検証済みであり、ここでは床剛性の影響度を把握するために質量は一定としている。

#### 支持条件による比較検討

解析番号①の解析モデルは、図4-5に示したように三辺のXY方向を拘束している。ここでは、図6-4のような二辺拘束モデル(解析番号⑪)と四辺拘束モデル(解析番号⑫)を作成した。なお、その他の条件は解析番号①と同じである。

### 衝撃荷重点による比較検討

解析番号①に対して衝撃荷重点のみ変更したモデルを作成した。CASEO では、解放された辺から 2m 位置のスパン中央に衝撃荷重点があったが、スラブ中央を荷重点としたモデル（解析番号⑬）について解析を行なった。図 6-5 に荷重点を示す。なお、その他の条件は解析番号①と同じである。

### 流体衝撃荷重による比較検討

図 4-6 に示した解析用衝撃荷重において流体衝撃荷重の値を変更したモデルを作成した。これまでは、最大衝撃荷重  $P_m$  でピークを迎え、流体衝撃荷重  $P$  まで減少するような波形を考えていたが、最大衝撃荷重  $P_m$  は雪の破壊強度  $\sigma$  によって決まるため、衝突速度  $V$  が増してくれば流体衝撃荷重  $P$  の方が大きくなる。つまり、流体衝撃荷重  $P$  が最大衝撃荷重となるが、このケースでも最大衝撃荷重による静的載荷の 80% 程度の値となるか検討を行なう。ここでは、 $P_m$  は一定で  $P$  を 26.5 kN としたモデル（解析番号⑭）と  $P$  を 33.0 kN としたモデル（解析番号⑮）について解析を行なった。図 6-6 に波形モデルの概要図を示す。なお、その他の条件は解析番号①と同じである。

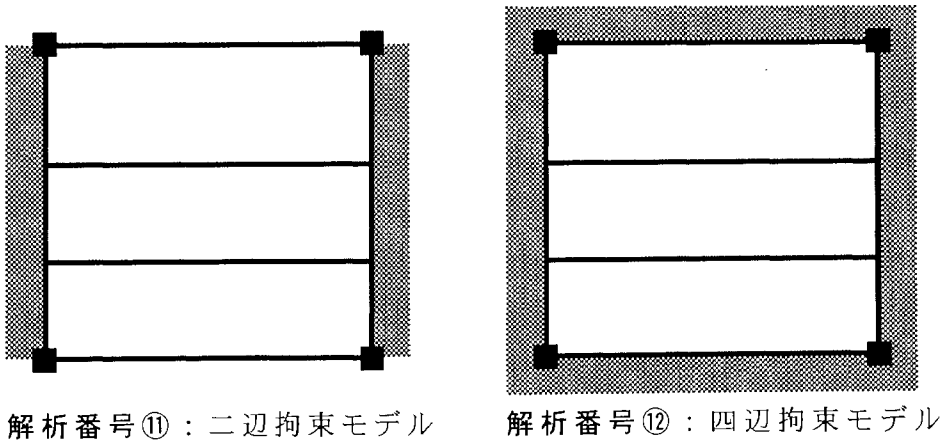


図 6-4 支持条件による比較モデル

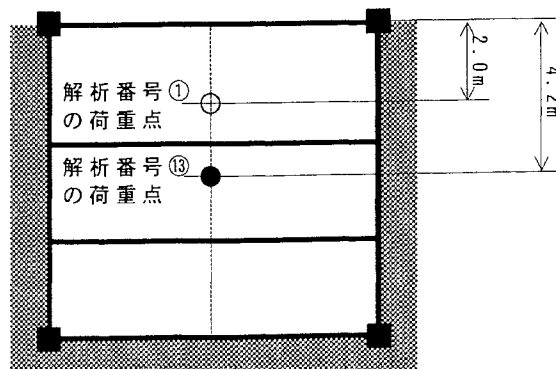


図 6-5 衝撃荷重点による比較モデル

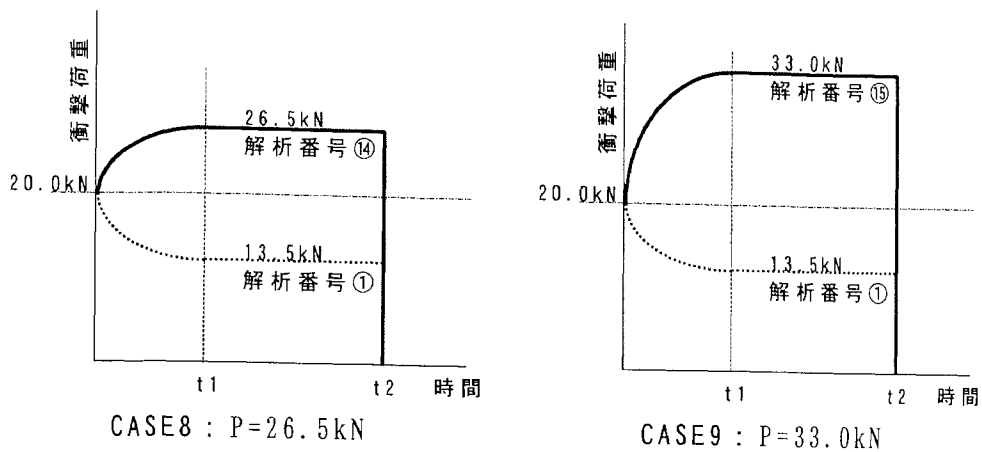


図 6 - 6 流体衝撃荷重による比較モデル

表 6 - 1 追加解析ケース

解析番号	解析モデル	スラブ厚 (mm)	拘束条件	衝撃荷重点	P (kN)	Pm (kN)	t1 (sec)	t2 (sec)
①	CASE0	150	3辺拘束	偏載荷	13.5	20.0	0.0072	0.333
⑨		100						
⑩		200						
⑪		150	2辺拘束					
⑫			4辺拘束					
⑬		150	3辺拘束	中央載荷	26.5			
⑭				偏載荷				
⑮				偏載荷	33.0			

### 6.3.3 解析結果

表 6 - 2 に解析結果の一覧を示す。最大変位発生位置は、いずれも載荷点であるが、最大曲げモーメント発生位置はそれぞれ異なっているため、図 6 - 7 にその発生位置を記号で表し、対応できるようにしている。各解析番号に対して拘束条件や載荷位置等同じ解析条件で衝撃荷重を静的に載荷した場合の解析結果を表 6 - 3 に示す。また、同表中にクリティカルとなる曲げモーメント及び変位量について動的応答解析結果の静的解析結果に対する比率を示す。最大曲げモーメントの発生位置が異なる場合については、静的解析に対する比率を求めることと、同じ位置であれば曲げモーメントはもっと小さくなるという理由から、ここでは最大値による比較とした。なお、静的解析の解析番号①及び⑨～⑬は、最大衝撃荷重  $P_m$  による静的載荷としたが、解析番号⑭⑮については、流体衝突荷重  $P$  が最大衝突荷重  $P_m$  を上回っているため、流体衝突荷重による静的載荷とした。

結果をみると、解析番号⑨～⑬の最大衝撃荷重による検討では、動的応答解析の静的解析に対する比率は、変位量では 80～100%と幅があるが、曲げモーメントに関しては、いずれの場合も静的解析結果の約 80%となっている。解析番号⑭⑮の流体衝撃荷重による検討では、解析番号①の荷重  $P(=13.5\text{kN})$  の静的載荷結果（表 5-4 参照）を考慮しても、動的応答解析結果は、静的解析結果の 120%程度とみることができる。

#### 6.3.4 静的荷重解析による評価式

以上の結果より、落雪衝撃荷重は以下の式で推定することが可能である。なお、流体衝撃荷重  $P$  が最大衝撃荷重  $P_m$  を超えるケースも想定されるので、ここでは最大衝撃荷重を圧縮破壊荷重と呼ぶことにする。

1) 圧縮破壊荷重  $P_m \geq$  流体衝撃荷重  $P$  の場合

$$F = 0.8P_m = 0.8 \sigma A \text{ (kN)}$$

$$\begin{cases} \sigma = 666.7 \gamma \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.0\text{g/cm}^3 \leq \gamma < 0.6\text{g/cm}^3) \\ \sigma = 400.0 \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.6\text{g/cm}^3 \leq \gamma < 1.0\text{g/cm}^3) \end{cases}$$

2) 圧縮破壊荷重  $P_m <$  流体衝撃荷重  $P$  の場合

$$F = 1.2P = 1.2 \gamma V^2 A \text{ (kN)}$$

ここに、 $\sigma$  : 破壊強度 ( $\text{N/m}^2$ )、 $\gamma$  : 雪密度 ( $\text{g/cm}^3$ )、 $V$  : 衝突速度 ( $\text{m/sec}$ )、 $A$  : 断面積 ( $\text{m}^2$ ) である。なお、破壊強度  $\sigma$  については 6.2.2 項を参照のこと。

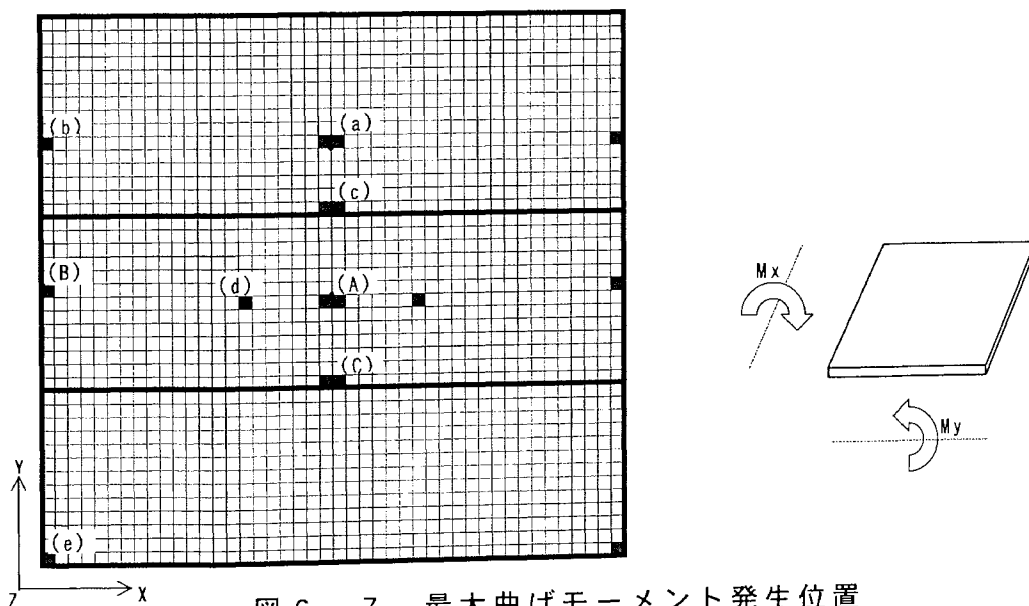


図 6-7 最大曲げモーメント発生位置

表 6 - 2 解析結果一覧

解析 番号	解析 モデル	スラブ厚 (mm)	拘束 条件	衝撃 荷重点	P (kN)	Mx (kN・m/m)		My (kN・m/m)		$\delta$ (mm)	
						max	-max	max	-max		
①	CASE0	150	3辺拘束	偏載荷	13.5	2.7 (0.006)	-0.6 (0.022)	3.4 (0.016)	-2.5 (0.014)	-0.25 (0.126)	
						(a)	(b)	(a)	(c)	(a)	
⑨		100					2.6 (0.010)	-0.6 (0.036)	3.4 (0.026)	-3.2 (0.024)	-0.68 (0.026)
						(a)	(b)	(a)	(c)	(a)	
⑩		200					2.8 (0.004)	-0.5 (0.016)	3.4 (0.012)	-2.1 (0.006)	-0.16 (0.052)
						(a)	(b)	(a)	(c)	(a)	
⑪		150	2辺拘束			2.7 (0.006)	-0.6 (0.022)	3.4 (0.016)	-2.5 (0.014)	-0.26 (0.064)	
						(a)	(b)	(a)	(c)	(a)	
⑫			4辺拘束			2.7 (0.006)	-0.5 (0.004)	3.4 (0.014)	-0.2 (0.038)	-0.23 (0.016)	
					(a)	(b)	(a)	(e)	(a)		
⑬	中央載荷			2.8 (0.006)	-0.6 (0.004)	3.5 (0.010)	-2.3 (0.008)	-0.31 (0.042)			
				(A)	(d)	(A)	(c)	(A)			
⑭	3辺拘束	偏載荷		26.5	4.9 (0.014)	-1.0 (0.024)	6.3 (0.016)	-4.7 (0.014)	-0.47 (0.128)		
				(a)	(b)	(a)	(c)	(a)			
⑮				33.0	6.1 (0.014)	-1.1 (0.024)	7.8 (0.018)	-5.7 (0.016)	-0.59 (0.128)		
					(a)	(b)	(a)	(c)	(a)		

※括弧内：発生時刻（秒）

表 6 - 3 静的解析結果及び動的解析結果との比率

解析 番号	P (kN)	Mx (kN・m/m)		My (kN・m/m)		$\delta$ (mm)	動的結果/静的結果		
		max	-max	max	-max		Mx (%)	My (%)	$\delta$ (%)
①	13.5	3.5	-0.2	4.3	-2.9	-0.30	77	79	83
		(a)	(b)	(a)	(c)	(a)			
⑨		3.4	-0.4	4.1	-3.4	-0.72	76	83	94
		(a)	(c)	(a)	(c)	(a)			
⑩		3.7	-0.4	4.6	-2.3	-0.19	76	74	84
		(a)	(b)	(a)	(c)	(a)			
⑪		3.5	-0.3	4.3	-2.9	-0.31	77	79	84
		(a)	(c)	(a)	(c)	(a)			
⑫		3.5	-0.3	4.2	-2.8	-0.23	77	81	100
		(a)	(C)	(a)	(e)	(a)			
⑬	3.5	-0.3	4.3	-2.4	-0.32	80	81	97	
	(A)	(d)	(A)	(c)	(A)				
⑭	26.5	4.6	-0.3	5.6	-3.8	-0.39	107	113	121
	(a)	(b)	(a)	(c)	(a)				
⑮	33.0	5.7	-0.3	7.0	-4.7	-0.49	107	111	120
	(a)	(b)	(a)	(c)	(a)				



## 6.4 まとめ

---

本章では、第2章で記述した雪氷塊の落下衝撃実験から得られたデータを用いて落雪現象の実現象レベルにおける衝撃特性を定量化し、数値解析が可能な関係式を提案することができた。これにより動的応答解析及び静的解析による検討を行い、その結果を分析することによって、これまで評価方法が確立されていなかった雪氷塊の落下衝撃荷重の評価方法について一応の成果を導き出すことができた。

落下衝撃荷重の検討を動的応答解析によって行なうには、建設地の気象条件を調査し、屋根上から落下してくる雪氷塊の大きさを想定する。また、質点の運動法則による滑雪シミュレーション等から衝突速度を算出し、これらから解析用波形モデルを設定する。これと建築物の解析用構造モデルと合わせて動的応答解析を行なうことにより一応の結果を得ることができる。

ただし、衝撃荷重の検討が動的応答解析に依らなければならないとすると、概検討や手計算といったレベルでの検討には不向きであり、この場合は静荷重として定義されていることが望ましい。そこで、様々な検討条件のもとで動的応答解析と静的解析結果を比較することによって、静的解析で動的応答解析に相当する結果を得るための評価係数を導き出した。本手法によれば建設地や屋根形状等の設計条件から設定した圧縮破壊荷重と流体衝撃荷重の値を算出し、その大小関係によって評価係数が選定できるので、衝撃荷重を静荷重として設定することが可能である。

静荷重による提案式は、第5章で用いた構造モデルをベースに検討条件を変更し、比較検討した結果によるものである。想定される一連の条件についての検討結果であり、その各比較値がいずれも近い値を示していることから、今回の構造モデルと大きく条件が異ならない限りは、本手法による評価係数は有効であると考えられる。ただし、本研究で対象とした構造モデルは、S造やRC造等の十分に靱性のある構造物であり、ガラス等の異材料について検討を行なうには、適切な材料（構造）モデルを作成し、動的応答解析による検討を行なう必要がある。

## 第6章 参考文献

---

- 1) 和泉正哲、他：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、pp.1025-1041、1984.10
- 2) 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
- 3) 三橋博三、他：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
- 4) 新井覚、他：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
- 5) 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
- 6) 城攻、他：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
- 7) 川上俊一、他：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回日本雪工学会大会論文報告集、pp.207-212、1994.11
- 8) 小竹達也、他：積雪地帯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回、pp.34-39、1996.10
- 9) 倉橋勲、他：（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回、pp.91-95、1997.12
- 10) 小竹達也、他：屋根上積雪の落雪による衝撃荷重に関する一考察、日本建築学会構造系論文報告集、第543号、pp.31-36、2001.5
- 11) 渡辺正朋、他：屋根雪の滑落制御に関する基礎的考察、日本雪工学会誌、Vol.13、No.1、pp.3-12、1997.1
- 12) 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.169-239、1993
- 13) 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
- 14) 小竹達也、他：屋根上積雪の落雪による衝撃荷重に関する一考察、日本建築学会構造系論文報告集、第543号、pp.31-36、2001.5
- 15) 木下誠一：積雪に於ける変形速度と二つの変形形式（塑性変形、破壊変形）との関係、低温科学、A16、pp.139-166、1957
- 16) 吉田順五：積雪のレオロジー、応用物理、第34巻、第2号、pp.70-79、1965
- 17) Mellor, Malcom : A review of basic snow mechanics. Proc. Int. Symp. on Snow Mechanics, Grindelwald. IAHS 114, pp.251-291, 1975

◆◆◆◆◆ 第7章 結論 ◆◆◆◆◆

7.1 研究の総括	-----	7- 1
7.2 今後の課題	-----	7- 6

## 第7章 結論

### 7.1 研究の総括

落雪による衝撃荷重は、積雪荷重としては、これまであまり重要な課題として扱われてこなかった。それは、屋根雪を落下させる場合は建物周辺に十分な堆雪エリアを設けていたため落雪現象を荷重的に検討することは必要なかったためであり、また、落雪による衝撃が大荷重となるような高層建築物や大規模建築物が多雪地域に殆ど建設されていなかったこともその理由と考えられる。しかし、ここ数年における多雪地域でのドーム建設ラッシュにより、この衝撃荷重は大きな問題となっている。ドーム建築物は、殆どが滑雪による屋根雪処理を行なっているため、高さ数十メートルに積もった雪が、一気に滑り、落下してくる。また、屋根面積も巨大なため、落下する雪のボリュームもこれまでの落雪現象のレベルを超えている。ドーム周辺に十分な堆雪エリアを確保し、そこには一切構造物を置かないのであれば問題にはならないが、計画上堆雪エリア内に給排気塔やフェンス等が配置されるケースもあり、設計上、この衝撃荷重の設定が必要不可欠となっている。ただし、現状では衝撃荷重を規定するものは一切無く、設計者の独自の評価により設計が行なわれており、衝撃荷重の評価手法の確立が望まれている。

そこで、本研究では、落雪による衝撃荷重の評価手法を提案することを目的とし、雪氷塊の衝撃特性を把握するため屋外での雪氷ブロックを用いた落下衝撃実験を実施した。また、実験から衝突速度が衝撃荷重に大きく影響していることを掴み、滑雪性状が衝撃荷重に与える影響度を把握するため、実大規模の実験装置による滑雪実験や実建築物による観測調査を実施した。更に、落雪現象の最終現象である堆雪に着目し、堆雪形状から衝撃荷重を推測することを試みた。これらの実験、観測調査より得られた知見より、衝撃荷重の解析用波形モデルを提案し、このモデルを用いた動的応答解析を行なった。また、静的解析を合わせて行い、動的応答解析との比較検討を行ない、これにより動的応答解析による評価手法と静荷重による評価手法について提案している。

本研究により得られた結果をまとめると以下のようなになる。

#### (1) 雪氷塊の衝撃特性

様々な寸法及び密度の雪氷ブロックを用いた落下衝撃実験から以下ことを明らかにした。なお、本実験では、ロードセルによる衝撃波形の直接的な記録を行なっている。

1) 雪氷塊の衝撃波形は、衝突直後にピークに達するような性状を示し、その最大衝撃荷重は、雪氷ブロックの密度や衝突状況によって異なってくる。ブロック密度が大きいほど、衝突直後の波形勾配が急になる傾向を示す。つまり、最大衝撃荷重に達するまでの時間が短くなる傾向にある。また、面的な衝突になるほど最大衝撃荷重は大きくなる傾向にある。

2) 雪氷塊が持っているエネルギー量と衝撃荷重の関係について、エネルギー量が増加すると最大衝撃荷重も増加する傾向を示す。このことから、衝撃荷重は質量と衝突速度に大きく影響されていることが分かる。ただし、衝突速度の増加によるエネルギー量の増加では、最大衝撃荷重はある所で頭打ち傾向となる。

3) 雪氷塊の密度と衝撃荷重の関係について、密度が増加すると最大衝撃荷重も増加する傾向を示す。ただし、密度  $0.6\text{g/cm}^3$  あたりから一定（定常）傾向を示す。また、衝突速度  $12\text{m/sec}$  以上では、それ以上の増加傾向を示さないため、最大衝撃荷重は、密度との関係によって押えることができる。

## (2) 大規模建築物における滑雪性状

衝撃荷重に影響を与えている衝突速度について実大規模の実験装置による滑雪実験や実建築物による観測調査から以下のことを明らかにした。

1) 曲面屋根における屋根上滑雪では、雪質や滑雪速度によるが、軒先に達する前に屋根面から飛び出す現象（ここでは、テイクオフ現象と呼ぶ）が起こる。テイクオフ現象は、滑雪する雪塊に働く遠心力  $F_1$  と重力の方向成分  $F_2$  によって決まる。いま、雪塊の質量  $m$ 、滑雪速度  $V$ 、屋根勾配  $\theta$ 、曲率半径  $R$  とすると、 $F_1$ 、 $F_2$  は以下の式で表され、 $F_1 > F_2$  のときテイクオフが起こる。

$$F_1 = mV^2/R$$

$$F_2 = mg \sin \theta$$

2) 実構造物による実現象における屋根上滑雪についても、その滑雪開始位置を確定できれば、質点の運動法則によるシミュレーションでその飛距離を推測することができることが確認できた。

3) 滑雪長さが増加すると、重力加速度の働きで、滑雪速度は増加し、雪塊の質量が増加すると、滑雪速度は増加する傾向にある。そのとき雪塊に働く滑雪抵抗力として動摩擦抵抗力、粘性抵抗力、空気抵抗力を考慮した場合、滑雪速度が大きくなる大規模建築物における滑雪現象では、動摩擦抵抗力の占める比率は 2 割以下と小さくなり、空気抵抗力や粘性抵抗力の割合が大きくなる。また、空気抵抗力と粘性抵抗力の大小関係は、滑雪する雪塊の形状によって変化する。

4) 滑雪抵抗力による減速は、衝撃荷重には殆ど影響を与えない。

### (3) 堆雪形状と衝撃荷重の関係

屋根形状の異なる大規模建築物における堆雪形状の調査から以下のことを明らかにした。

- 1) 大規模建築物における堆雪形状は、基本的に三角形状をしており、屋根がほぼ一定勾配であれば、一コブの山を形成し、屋根が曲面形状や段差形状をしている場合は、複数のコブを持った山を形成する。
- 2) 堆雪形状の基本形状である三角形状は、内側  $40^{\circ}$  前後、外側  $30^{\circ}$  前後で、山頂部位置は堆雪幅を 4 : 6 に分割する位置に形成される。
- 3) 堆雪山の頂部の水平位置は殆ど変化しないが、滑雪最大飛行ラインに接する位置まで成長した後は、頂部位置をそのライン上に移しながら成長する（水平位置は内側へ移動する）。
- 4) 衝撃荷重をその雪塊が持っているエネルギー量として考えた場合、エネルギー量が 2000J 以下では、エネルギー量と堆雪幅には線形的な関係が成立している。また、エネルギー量が 2000J を超えると、その増加傾向は緩慢な状況となる。これらの結果より衝撃荷重やエネルギー量を設定することができれば、その建築物における堆雪形状を予測することができ、堆雪エリアの設計に活かすことができる。

### (4) 動的応答解析による衝撃荷重の評価

他分野における衝撃設計法をみると、対象物体の衝撃特性を考慮した解析用波形モデルを作成し、動的応答解析を実施している。雪氷塊の落下衝撃実験より雪氷には特有の衝撃特性があり、他の物体とは異なった特性を持っていることが判明したため、雪氷独自の波形モデルを作成する必要があった。これまでの調査観測や既往の研究内容、衝撃実験等から雪氷の解析用波形モデルを設定し、ある構造モデルについて動的応答解析を実施した。その解析結果から以下のことが明らかになった。

- 1) 床荷重をパラメータとした解析では、いずれも同様な結果を示し、殆ど差はみられず、解析結果としては、最大衝撃荷重が発生した直後には流体衝撃荷重による自由振動が続き、その後、荷重が 0 となった後は、変位 0 を軸とした減衰自由振動となる。
- 2) 構造物の応答は、ほぼ 1 次固有周期で振動するが、雪氷塊の衝撃荷重の継続時間は 0.02~0.03 秒と構造物の固有周期と異なるため、単純に衝撃荷重により静的な検討を行なった場合とは異なる挙動を示す。従って、静的な検討により実用的な結果を得るには、動的応答解析結果との比較により、両者の結果の関係性を明確にする必要がある。

3) 動的応答解析と静的解析の結果を比較すると、最大変位と最大曲げモーメントについては、動的応答解析では、最大衝撃荷重による静的解析結果の 80% 程度の値となる結果が得られた。また、流体衝撃荷重による静的解析結果との比較では、解析用波形モデルにおける最大衝撃荷重と流体衝撃荷重の値によって 120~250% のばらつきが見られる。

4) 日本建築学会の建築物荷重指針・同解説にある「(雪氷塊の落下) 衝撃力については、(中略) 通常は重力の 2 倍程度を見ておけば良いであろう。」という記述内容は、流体衝撃荷重  $P = \gamma V^2 A$  を変形すると  $P = 2g \gamma Ah$  ( $h$ : 落下高さ) となり、ここで  $g \gamma Ah$  が静止状態での積雪荷重に相当することから、重力の 2 倍程度の荷重というのは、流体衝撃荷重程度と言い換えることができる。ただし、上述したように流体衝撃荷重を用いた静的な検討では、ばらつきが見られるため、その値を用いる場合は注意が必要である。

#### (5) 雪氷塊の落下衝撃荷重評価に関する提案式

雪氷塊の落下衝撃荷重による構造設計を行なうには、屋根上から落下してくる雪氷塊の大きさを想定し、質点の運動法則による滑雪シミュレーション等から衝突速度を算出する。そして、これらから解析用波形モデルを設定し、建築物の解析用構造モデルと合わせて動的応答解析を行なうという手順を踏むことにより一応の結果を得ることができる。また、概検討や手計算といった検討レベルであれば、解析データを作成してコンピュータに入力するよりも静荷重により計算できることが望ましい。以下に、動的応答解析用の波形モデルの設定と衝撃荷重を静荷重として評価した場合の提案式を示す。

1) 動的応答解析用の波形モデル (衝撃荷重-時間曲線) は、時間 0 から  $t_1$  までは、放物線状のカーブを描き、時間  $t_1$  から  $t_2$  までは直線状 (一定) で、時間  $t_2$  で荷重 0 になる形状を示す (図 6-1 参照)。ここに、時間 0~ $t_1$  を衝突円錐形成過程、 $t_1$ ~ $t_2$  を流体衝突過程という。各時刻における荷重値は、時間 0 のとき  $P_m$ 、時間  $t_1$ ~ $t_2$  のとき  $P$ 、時間  $t_2$  のとき 0 となり、各値は以下の式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_m = \sigma \cdot A \\ P = \gamma \cdot V^2 \cdot A \\ t_1 = \frac{R(\gamma/k - \gamma)}{V \cdot \gamma} \\ t_2 = L/V \end{array} \right.$$

ここに、 $P_m$ ：圧縮破壊荷重 (kN)、 $P$ ：流体衝突荷重 (kN)、 $\sigma$ ：雪塊の破壊強度 (kN/m<sup>2</sup>)、 $A$ ：雪塊の断面積 (m<sup>2</sup>)、 $\gamma$ ：雪密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $V$ ：衝突速度 (m/s)、 $L$ ：雪塊の長さ (m)

また、破壊強度  $\sigma$  は、実験結果より以下のように定義される。

$$\begin{cases} \sigma = 66.67 \gamma \text{ (N/cm}^2\text{)} = 666.7 \gamma \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.0 \text{ g/cm}^3 \leq \gamma < 0.6 \text{ g/cm}^3) \\ \sigma = 400.0 \text{ (N/cm}^2\text{)} = 400.0 \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.6 \text{ g/cm}^3 \leq \gamma < 1.0 \text{ g/cm}^3) \end{cases}$$

2) 衝撃荷重を静荷重として評価するため、動的応答解析において波形データや構造データの定義要素をパラメータとし、全 15 ケースの解析を行い、同じ条件による静的解析との比較を行なった。その結果から静荷重として妥当な荷重係数（動的解析／静的解析）を求めた。なお、静的解析での載荷荷重は、 $P_m$  及び  $P$  の最大値を採用している。

#### 圧縮破壊荷重 $P_m \geq$ 流体衝撃荷重 $P$ の場合

$$F = 0.8 P_m = 0.8 \sigma A \text{ (kN)}$$

$$\begin{cases} \sigma = 666.7 \gamma \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.0 \text{ g/cm}^3 \leq \gamma < 0.6 \text{ g/cm}^3) \\ \sigma = 400.0 \text{ (kN/m}^2\text{)} & (0.6 \text{ g/cm}^3 \leq \gamma < 1.0 \text{ g/cm}^3) \end{cases}$$

#### 圧縮破壊荷重 $P_m <$ 流体衝撃荷重 $P$ の場合

$$F = 1.2 P = 1.2 \gamma V^2 A \text{ (kN)}$$

ここに、 $\sigma$ ：破壊強度 (N/m<sup>2</sup>)、 $\gamma$ ：雪密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $V$ ：衝突速度 (m/sec)、 $A$ ：断面積 (m<sup>2</sup>) である。

設計段階での検討レベルにより、これらの提案式を使い分けることによって、落雪現象における落下衝撃荷重に対する検討が可能であると考えられる。



## 7.2 今後の課題

---

本論文では、実際の落雪現象を想定した屋外実験により雪氷塊の衝撃特性を示し、雪氷塊の落下衝撃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。また、衝撃荷重に関連する現象として、屋根上滑雪性状及び軒下堆雪形状について実現象レベルでの調査、実験により衝撃荷重との関連性を示すことができた。これらの結果は、衝撃荷重を予測する上で重要なデータとなり得ると考える。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) 雪氷塊の落下衝撃実験では、落下高さ 10m までの実験を行い、その実験結果を分析したところ、落下高さ 7.5m (衝突速度 12m/sec) 以上では、最大衝撃荷重は  $40\text{N/cm}^2$  程度が上限となることが判明したため、これ以上の実験を行なわなかった。また、落下高さ 26m 以下では、流体衝撃荷重が圧縮破壊荷重を上回ることがないため最大衝撃荷重は  $40\text{N/cm}^2$  が上限と考えられるが、実験によりその検証を行えば、より確実な事象として扱うことができる。

2) 滑雪性状に関する実験により、滑雪速度が大きくなる大規模建築物においては、滑雪抵抗力としては動摩擦抵抗力の影響は小さく、粘性抵抗力や空気抵抗力の影響が大きいことが分かった。ただし、この見解は、限られた実験データから得られたものであり、更に多くの実験結果を加味することによって、より正確な見解を得ることができる。また、粘性抵抗力の速度依存性や空気抵抗力の実測方法等について更なる研究が望まれる。

3) 大規模建築物における堆雪形状の調査結果より、堆雪形状と衝撃荷重の間に関係式が成立しており、一方から他方を推測することが可能であることが分かった。ただし、本論文の提案式は、数ケースの調査結果によるものであり、より正確な傾向を掴むには、もっと多くのデータが必要である。特に、こまつドーム、つどーむと札幌ドームの規模に大きな差があるため、その間のデータが得られていないのが現状である。中間規模のドームが建設されていないため、現段階では必要なデータを得ることは困難であるが、今後機会が得られれば、押えておくべきである。

4) 雪氷塊の落下衝撃荷重の評価式では、動的応答解析と静的解析という二つの方向性を示した。静荷重による評価式を用いる場合、本論文で実施した構造モデルと近いモデルについて採用することが望ましい。ガラス等の異材料の場合は、本ケースとは異なった傾向を示すと考えられる。より適用範囲の広い一般解を得るには、もっと多くの構造モデルについて、同様な検討を行ない、適切な評価係数を求める必要がある。

謝辞	-----	X- 1
研究発表の目録	-----	X- 2

## 謝辞

本論文は、筆者が大成建設株式会社設計本部在籍中に携わった業務において実施した大規模建築物における調査、観測、実験結果を基に屋根上からの落雪による衝撃荷重についての研究成果をまとめたものであり、多くの皆様のご指導、ご支援、ご理解により完成したものです。ここに厚くお礼申し上げます。

北海道工業大学 苫米地司教授には、石川県小松市のこまつドームから、北海道札幌市のつどーむ（札幌コミュニティドーム）、札幌ドーム建設までの7年間に渡り、各ドームの雪対策について熱心なご指導とご助力を頂きました。また、本論文をまとめるにあたり、教授には研究手法、論文の構成および論点の整理など、きめ細かなご指導を頂きました。筆者が本研究をまとめることができましたのは、ひとえに教授のご指導とご配慮の賜に他なりません。この感謝の気持ちは、言葉では言い表せません。

大成建設株式会社こまつドーム工事作業所 前田洋所長、松崎重一課長、札幌ドーム工事作業所 森勉所長、朝川和憲担当所長、今憲昭課長には建設中の現場内での調査に特別な配慮とご協力を頂きました。JRA新潟競馬場スタンド工事 小川嗣雄主任には膜屋根モックアップ実験の準備から実施まで筆者と一緒に取り組んで頂きました。

小松市立大杉青年の家 山田茂所長をはじめ職員の方々には、こまつドーム膜屋根滑雪実験のために敷地をご提供くださった他、観測期間中の観測ビデオのテープ交換から採暖実験時の暖房器具の管理まで多大なご協力を頂きました。こまつドーム、つどーむの職員の方々には筆者の行なう冬期調査に寛大なご理解を頂き、ご支援下さいました。

更には、松本建工株式会社 高倉政寛氏（当時、北海道工業大学大学院博士後期課程）、株式会社日江金属 千葉隆弘氏（当時、同大学院修士課程）、同大学院博士後期過程 中村祐一郎氏をはじめとする苫米地研究室の生徒諸君には、落下衝撃実験と札幌ドーム冬期観測調査において実験・観測準備から測定までお手伝いして頂き本当にありがとうございました。

本論文の執筆にあたりまして、大成建設株式会社 横沢国夫設計本部長、可児才介副本部長、奥津則夫グループリーダーには、本研究に対し特別なご支援とご理解を賜りました。西川薫氏には、筆者が本論文に取り組む機会を与えて頂きました。また、論文執筆中も論文内容に対する熱意あるご指導の他、研究姿勢のあり方についてご助言を頂きました。細沢治氏、佐伯正尚氏には動的応答解析のデータ作成から解析結果評価までご協力頂きました。（社）日本膜構造協会 濱田浩一常務理事事務局長、太陽工業株式会社 丸尾博氏には、論文内で使用する図表や写真をご提供頂きました。横浜国立大学 石井一夫名誉教授には、機会あるごとに激励を頂き、研究に対して勇気づけられました。ここに本論文にご協力くださいました皆様に対し、記して感謝の意を表します。

最後に、本論文の主査であり、本研究の機会を与えて頂き、最後まで温かく且つ厳しく見守ってくださった苫米地司教授に重ねて心から感謝を申し上げます。

平成 14 年 3 月

小竹 達也

## 研究発表の目録

### ■査読論文

[本論文に直接関係するもの]

- 1)小竹達也, 伊東敏幸, 苫米地司, 1995: 膜屋根構造物の屋根上積雪荷重評価について. 日本膜構造協会膜構造研究論文集'95, No.9, 79-85
- 2)小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 伊東敏幸, 荒島裕重, 1996: 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, 34-39.
- 3)小竹達也, 菊嶋誠, 西川薫, 1996: 膜材の織布特性を考慮した縮小率の設定方法. 日本膜構造協会膜構造研究論文集'96, No.10, 71-78
- 4)小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 1997: 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. 日本雪工学会誌 Vol.13 No.1, 82-87
- 5)小竹達也, 苫米地司, 1999: 大規模膜屋根構造物における堆雪形状について. 日本膜構造協会膜構造研究論文集'99, No.13, 57-62
- 6)小竹達也, 苫米地司, 2000: 大規模建築物の軒下堆雪形状予測手法の提案. 日本建築学会技術報告集, 第10号, 25-28.
- 7)Tatsuya Kotake, Tsukasa Tomabechi : An Experimental Study on Impact Loads of the Sliding Snow from the Roof of the Large-Scale Membrane Structures, The Membrane Structures Association of Japan, Reseach Report on Membrane Structures 2000, December 2000, 17-22
- 8)小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 2001: 屋根上積雪の落雪による衝撃荷重に関する一考察. 日本建築学会構造系論文集, 第543号, 31-36.
- 9)小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 大植哲, 小川嗣雄, 2001: 大規模膜屋根構造物における滑雪抵抗力に関する実験的研究. 日本雪工学会誌, (Vol.17 No.4 掲載予定)

[本論文に間接的に関係するもの]

- 10)西川薫, 石井一夫, 小竹達也, 1989: 織布特性を考慮した膜構造の応力・変形解析. 日本膜構造協会膜構造研究論文集'89, No.3, 41-55
- 11)小竹達也, 1991: 線材置換による膜構造解析法. 日本膜構造協会膜構造研究論文集'91, No.5, 23-32
- 12)布川安彦, 小竹達也, 1993: 空気膜構造の形状測定. 日本膜構造協会膜構造研究論文集'93, No.7, 65-70

### ■学会学術講演等

[日本建築学会]

- 13)西川薫, 石井一夫, 小竹達也, 1989: 織布特性を考慮した膜材料の構造モデル. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1179-1180
- 14)小竹達也, 石井一夫, 1991: 線材置換による膜構造解析法. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1179-1180

概集, 1319-1320

- 15) 西川薫, 小竹達也, 岡本隆之祐, 長進, 1995: 開閉機構を持つ膜屋根構造物の開発(その4) 開閉システム. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 771-772
- 16) 小竹達也, 菊嶋誠, 西川薫, 1996: 膜材のリラクゼーションについて(その1) 織布特性を考慮した膜パネルの縮小率の設定. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 881-882
- 17) 菊嶋誠, 小竹達也, 西川薫, 1996: 膜材のリラクゼーションについて(その2) モックアップ試験体における実験報告. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 883-884
- 18) 細沢治, 小竹達也, 原田公明, 小堀徹, 篠田泰蔵, 1998: さいたまスーパーアリーナの設計と施工(その2) 極低降伏点鋼を用いたムービングブロックの設計. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 733-734
- 19) 小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 1999: 雪氷塊の落下衝撃力に関する実験的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 55-56
- 20) 小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 2000: 大規模建築物の軒下堆雪形状予測手法の提案. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 103-104
- 21) 小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 田中聡, 2001: 大規模建築物における滑雪飛距離調査方法の提案. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 75-76

[日本雪氷学会]

- 22) 苫米地司, 小竹達也, 西川薫, 1999: 雪氷塊の落下衝撃力に関する実験的研究. 日本雪氷学会全国大会講演予稿集. 58