調査研究報告　　No. 464
RESEARCH REPORT 2026. 3

温暖化による雪質の変化に伴う住宅周辺の設備機器等に作用する雪の外力に関する研究

A Study on the Snow Load on Equipment and Facilities Around Residential Areas Under Changes in Snow Quality Caused by Global Warming

高島 将人 [1)]、堤 拓哉 [2)]、齊藤 隆典 [3)]
Masato Takashima[1)], Takuya Tsutsumi[2)], Takasuke Saito [3)]

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部
北方建築総合研究所
Northern Regional Building Research Institute
Building Research Department
Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

1) 建築研究部建築システム G 研究職員，2) 北海道教育大学・博士（工学）（令和 5 年当時北海道立総合研究機構建築研究本部に在籍），　3) 建築研究部建築システム G 主査・博士（工学）
1) Researcher of Building Engineering System Group, 2) Hokkaido University of Education, Dr. Eng.(Affiliated with Building Research Department, Hokkaido Research Organization in 2023), 3) Chief for Building Engineering System Group, Dr. Eng.

本書の全部および一部の無断での転載はご遠慮ください。

No unauthorized reproduction

概　要
Abstract

温暖化による雪質の変化に伴う住宅周辺の設備機器等に作用する雪の外力に関する研究
A Study on the Snow Load on Equipment and Facilities Around Residential Areas Under Changes in Snow Quality Caused by Global Warming

高島 将人[1)]、堤 拓哉[2)]、齊藤 隆典[3)]
Masato Takashima[1)], Takuya Tsutsumi[2)], Takasuke Saito[3)]

キーワード：雪荷重、衝撃力、側圧、沈降力
Keywords: *Snow Load, Impact Force, Lateral Pressure, Settlement Force*

１．研究概要

１）研究の背景

・近年、温暖化の影響により、大雪が頻発するほか冬期の降雨が生じるなど雪質が変化している。
・都市部では敷地の狭小化が進んでおり、隣接した住宅間の距離が十分にとれないため、大雪時に雪によるトラブルが多発している。
・また、住宅の省エネ機器等の普及拡大により、太陽光パネルや高効率機器など住宅周辺に設置される設備機器が増えてきている。さらに、既存住宅においては、敷地周辺での雪によるトラブル回避のため、住宅用雪止めフェンス等の防雪構造物が設置される場合がある。
・雪質の変化や敷地条件により住宅周辺で生じる落雪衝撃力や積雪の沈降力、側圧が従来よりも大きくなり、住宅周辺に設置される設備機器や防雪構造物に作用する外力が大きくなることが懸念される。
・そのため、雪質の変化を踏まえた戸建住宅周辺で生じる雪の外力を明らかにするとともに、住宅周辺に設置される設備機器と防雪構造物の設計の妥当性をあらためて検討する必要がある。

２）研究の目的

雪質の変化を踏まえた落雪の衝撃力、積雪の沈降力、側圧を明らかにする。それらの外力に基づき、住宅周辺に設置される設備機器への影響を評価し、防雪構造物における雪の外力に対する設計方法を明らかにする。

２．研究内容

１）雪質の変化を踏まえた落雪による衝撃力の実測（R5-R6 年度）

・ねらい：雪質の変化を踏まえて屋根から滑落する雪の衝撃力を明らかにする。ここでは、実測例が少ない水平方向の衝撃力を主な対象とする。
・試験項目等：落雪の衝撃力に関するモデル実験と実測

２）雪質の変化を踏まえた住宅間の積雪による沈降力、側圧の実測（R5-R6 年度）

・ねらい：雪質の変化を踏まえて住宅間の積雪による沈降力および側圧を明らかにする。ここでは住宅間の積雪を再現したモデル実験を行い、雪の密度など雪質の状態と合わせて沈降力、側圧を実測する。
・試験項目等：沈降力および側圧のモデル実験と実測

1) 建築研究部建築システム G 研究職員，2) 北海道教育大学・博士（工学）（令和 5 年当時北海道立総合研究機構建築研究本部に在籍），3) 建築研究部建築システム G 主査・博士（工学）
1) Researcher of Building Engineering System Group, 2) Hokkaido University of Education, Dr. Eng. (Affiliated with Building Research Department, Hokkaido Research Organization in 2023), 3) Chief for Building Engineering System Group, Dr. Eng.

３）雪の外力に対する設備機器の影響評価と防雪構造物における設計方法の検討（R6-R7 年度）

・ねらい：１）と２）の実測データから、構造計算を行うための外力を設定する。この外力が住宅周辺の設備機器に及ぼす影響と、防雪構造物における雪の外力に対する設計方法を明らかにする。

・試験項目等：理論的検討

３．研究成果

１）雪質の変化を踏まえた落雪による衝撃力の実測（R5-R6 年度）

・雪ブロックを勾配屋根から滑落させ、受圧板に衝突したときの衝撃力を計測した（図 1）。パラメータとして、雪塊の大きさ、雪質（自然積雪、散水した湿雪、氷化させた雪の 3 種類）、屋根勾配、屋根材の葺き方を設定した。衝撃力は雪塊密度、質量および衝突速度と相関関係があることを明らかにした（図 2）。

・落雪衝撃力の実験式を構築し、既往研究の実測結果と比較した結果、計算値は実測値よりも大きくなる傾向にあり、安全側の評価となった（図 3）。

２）雪質の変化を踏まえた住宅間の積雪による沈降力、側圧の実測（R5-R6 年度）

(i) 側圧について

・気温を一定（-5 ℃）にした低温室内で、内部にロードセルを設置した鋼製箱に雪質の異なる雪を投入し、作用する側圧を計測した（図 4）。その結果、雪密度が大きいほど側圧は増加する傾向が明らかになった。積雪深が 90 cm の場合、押し固めた雪（密度 0.28 g / cm^3）の側圧は最大で 1.5 kN/m^2 程度となった（図 5）。

・屋外環境における側圧の経時的な変化を明らかにするため、住宅周辺の堆雪状況を再現した試験装置を作成し、側圧の屋外計測を実施した。側圧は気温の上昇とともに増加し、融雪期に注意が必要となることが明らかになった。側圧の最大値は荷重指針の式による値と概ね合致した（図 6）。

(ii) 沈降力について

・桁状の沈降力測定装置を（図 7）を積雪中に埋没させ、自然積雪と散水を行った積雪の沈降力を計測した。R5 年度は、散水による沈降力増加のメカニズムを把握するため、散水した積雪層のサンプリングを行った。その結果、散水により積雪層に氷板が形成される場合、散水量 25 mm/m^2 で沈降力は 1.54 倍に増加することを明らかにした（図 8）。R6 年度は、散水量をパラメータとして沈降力を計測したが、散水量と沈降力の最大値は相関関係を示さなかった。これは散水により融雪が促進されたためと推察される。

・外壁に設置されたエアコン室外機を模擬した試験体に作用する沈降力を計測した（図 9）。積雪深が 1.8 m 程度で、沈降力の最大値は約 10 kN となった。

３）雪の外力に対する設備機器の影響評価と防雪構造物における設計方法の検討（R6-R7 年度）

・雪の外力の計測結果をもとに構築した実験式を用いて、防雪構造物に必要な断面寸法を算出できるようにした。また、屋根雪荷重のみを考慮した現状の設備用防雪フードは、沈降力に対して破損する可能性があり、補強が必要であることを示した。

＜具体的データ＞

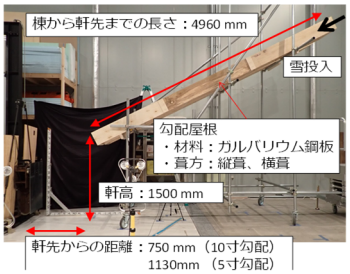


図 1　衝撃力試験装置

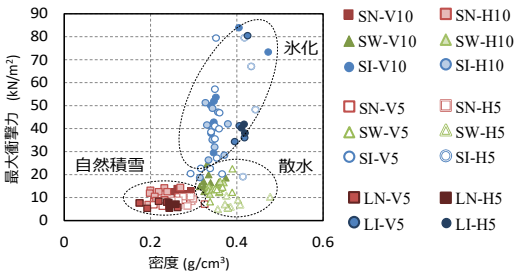


図 2　衝撃力－雪の密度関係

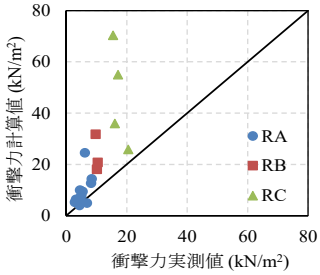


図 3　計算値と実測値の比較

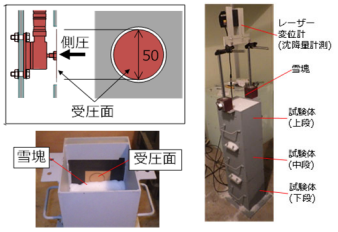


図 4　側圧試験装置

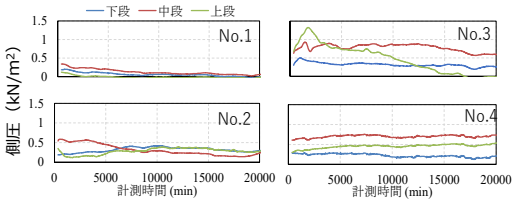


図 5　雪質の異なる雪の側圧計測結

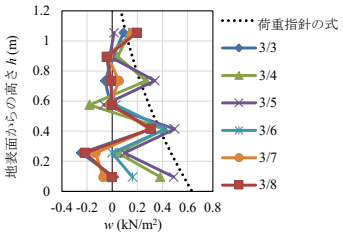


図 6　側圧の屋外計測結果

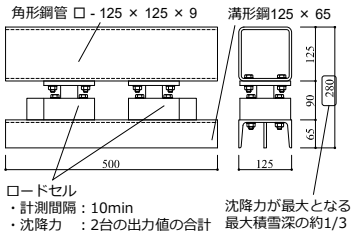


図 7　沈降力試験装置

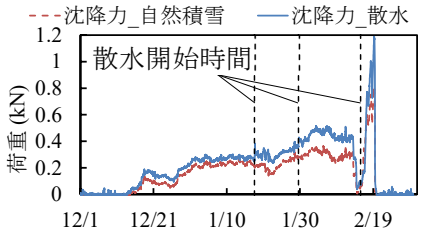


図 8　散水した沈降力計測結果

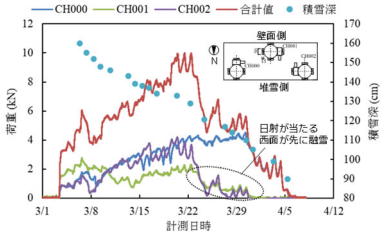


図 9　設備機器に生じる沈降力

4．今後の見通し

今後は、より実況を再現した雪荷重の計測を行う予定である。雪の外力に関する知見は、当研究所で発行している屋根雪対策に関する普及資料等に反映する。

目　次

１．研究の背景と目的 1
　１.１　研究背景 1
　１.２　研究目的 1

２．雪質の変化を踏まえた落雪による衝撃力 1
　２.１　実験の目的 1
　２.２　雪ブロックを用いた衝撃力の実測 2
　２.３　落雪による衝撃力計算式の構築 6
　２.４　まとめ 8

３．雪質の変化を踏まえた住宅間の積雪による沈降力 10
　３.１　実験の目的 10
　３.２　降雨を想定した散水を行った積雪の沈降力 10
　３.３　設備機器に作用する沈降力 15
　３.４　まとめ 16

４．雪質の変化を踏まえた住宅間の積雪による側圧 17
　４.１　実験の目的 17
　４.２　雪質が側圧に及ぼす影響 17
　４.３　気温の変動が側圧に及ぼす影響 19
　４.４　まとめ 23

５．雪荷重に対する設備機器と防雪構造物の必要部材寸法の試算 24
　５.１　設備機器に必要な部材寸法の試算 24
　５.２　防雪構造物に必要な部材寸法の試算 24

６．まとめ 26

１．研究の背景と目的

１．１　研究背景

近年、温暖化の影響で、短期間の大雪の頻発や、冬期の降雨による雪質の変化などが生じている。

都市部では敷地の狭小化が進んでおり、隣棟距離が十分にとれず、大雪によるトラブルが多発している。また、住宅の省エネ化に伴い、住宅周辺への太陽光パネルや空気熱源ヒートポンプの室外機といった設備機器の設置が増加し、これらに対する雪害リスクが上昇している。さらに、隣戸との雪によるトラブルを回避するため、住宅用雪止めフェンス等の防雪構造物が設置される場合がある。

雪質の変化により、住宅周辺で生じる落雪の衝撃力や積雪による沈降力、側圧などの雪荷重は、従来よりも増加する可能性がある。そのため、雪質変化を踏まえたこれらの雪荷重の大きさを明らかにするとともに、住宅周辺に設置される設備機器への影響と防雪構造物の構造設計の妥当性をあらためて検討し、雪荷重に対する合理的な設計方法を構築する必要がある。

１．２　研究目的

雪質の変化を踏まえた落雪による衝撃力、積雪による沈降力、側圧を明らかにする。それらの外力に基づいて、住宅周辺に設置される設備機器への影響を評価し、防雪構造物を設計できるようにする。

２．雪質の変化を踏まえた落雪による衝撃力

２．１　実験の目的

屋根から滑落する雪塊は隣家の外壁などを損傷させる危険性がある。雪塊が衝突するときの衝撃力に関する研究は数多く実施されているが、その多くは雪塊を自由落下させた場合の鉛直方向の衝撃力[1)~8)]や雪崩[9)~12)]を対象としており、水平方向の衝撃力を実測した研究は非常に少ない。既往の落雪の水平方向衝撃力に関する実験[13)]では、屋外で勾配屋根に自然堆積した雪を使用しているため、雪質や雪密度の条件が限られており、これらが水平方向衝撃力に及ぼす影響は明らかになっていない。近年、温暖化の進行に伴い冬期の降雨が増加することが予想されており[14)]、降雨による雪質の変化が落雪の衝撃力に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

また、建築物荷重指針・同解説[15)]（以下、荷重指針）では、屋根雪の落下による鉛直方向衝撃力の計算式が(2-1)式、(2-2)式の通り示されているが、これらの式では雪塊の体積が考慮されておらず、雪塊の密度と衝突面積が同じであれば雪塊の大きさによらず衝撃力は一定となる。

$$F_{\mathrm{Imax}} = \sigma_s A \ (\mathrm{N}) \qquad (2-1)$$

$$F_{\mathrm{I}} = \rho_s {V_I}^2 A \ (\mathrm{N}) \qquad (2-2)$$

ここで、　F_{Imax}：衝突力後に発生する最大衝撃値

F_{I}　：流体的な状態での衝撃値

σ_s　：単位面積当たりの最大衝撃荷重（$\mathrm{N/m^2}$）[注1)]

ρ_s　：雪密度（$\mathrm{kg/m^3}$）

A　：衝突断面積（$\mathrm{m^2}$）

V_I　：衝突速度（m/s）

一方で、落雪塊の質量が大きいほど、雪塊が衝突した際に車のフロントガラスが破壊される可能性は高くなるという実験結果[8)]も報告されており、雪塊の体積は衝撃力に影響を与える可能性がある。

本章では、降雨による雪質変化と雪塊の体積が落雪の水平方向衝撃力に及ぼす影響を定量化し、設計で使用できる水平方向衝撃力計算式を構築することを目的とする。

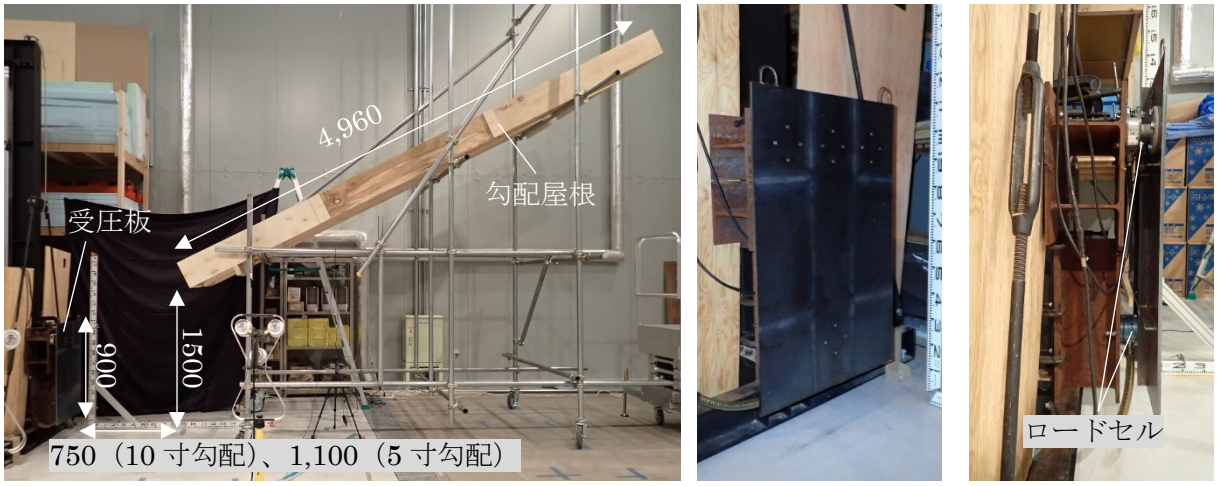
２．２　雪ブロックを用いた衝撃力の実測

（１）試験計画

1）試験装置のセットアップおよび測定条件

試験装置（勾配屋根および受圧板）のセットアップを図 2-1 に示す。屋根上部から初速度をつけずに滑落[注 2)]させた雪ブロックを受圧板に衝突させる。受圧板の上部は、2 台のロードセルとボルトを用いて緊結し、下部はロードセル 1 台と接触させた。ロードセルは H 形鋼を介して反力フレームに緊結した。軒先から受圧板までの距離は、5 寸勾配では、1,100 mm とし、10 寸勾配では 750 mm とした。

受圧板に作用する荷重は 3 台のロードセルの出力値を合計して算出した。単位面積あたりの最大衝撃力（以下、衝撃圧）の算定に用いた面積は、雪ブロックが受圧板に実際に接触した面積ではなく、雪ブロックの高さと幅の積で求めた衝突面の面積とした。計測間隔は 0.002 秒に設定した。受圧板側方に設置したカメラにより、雪ブロックが受圧板に衝突する瞬間を撮影し、衝突直前の雪塊の速度を算出した。

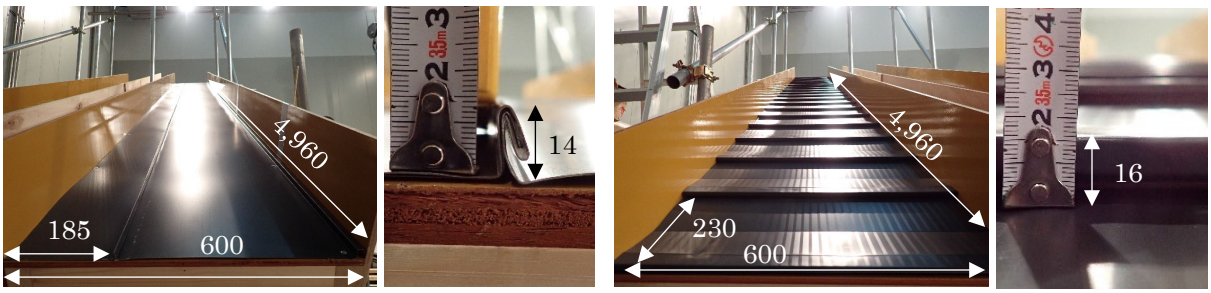


(a) 全景　(b) 受圧板前面　(c) 受圧板側面

図 2-1　セットアップ

2）勾配屋根

雪塊を滑落させる屋根面を図 2-2 に示す。屋根葺き材には、金属葺き屋根として広く普及しているマグネシウム添加 55%アルミ―亜鉛合金メッキ鋼板を使用した。鋼板表面には、フッ素樹脂ワックスを添加した塗料が塗布されている。屋根ふき材は吊り子を介してビスにより下地合板に固定している。



(a) 縦葺　(b) 縦葺のはぜ　(c) 横葺　(d) 横葺のはぜ

図 2-2　屋根面の詳細（単位：mm）

3）雪ブロック試験体

・雪質・屋根種類をパラメータとした試験体（試験体 A）

試験体 A（表 2-1）は、雪質変化が衝撃力に与える影響の把握を目的として、雪質・屋根勾配・屋根材の葺き方をパラメータに設定した雪ブロックの試験体とする。雪ブロックは、屋外の積雪に直方体容器を水平に挿入して採取した。雪ブロック寸法は高さ 20 cm×幅 20 cm×長さ 34 cm である（高さ×幅の面が衝突面）。雪質は、自然積雪状態の N シリーズ、降雨を想定し散水を行った W シリーズ、屋根上積雪の凍結を想定し散水後に凍結させた I シリーズの 3 種類とする。散水量は、既往研究[18]と同一の 26 mm/m² になるようにホースとノズルを用いて噴霧した。散水量は体積に換算すると 1.4 L となる。I シリーズは凍結過程で雪ブロックから水が流出し、散水前と凍結後の質量差から換算した実質の投入水量は、0.7 L 程度だった。屋根勾配は 10 寸勾配と 5 寸勾配の 2 種類とし、屋根の葺き方は縦葺と横葺とした。

表 2-1　試験体 A 一覧

試験体名	雪塊中の水の状態	屋根勾配	屋根の葺き方	試験体数量
N-V10	なし（N）	10 寸	縦葺（V）	8
W-V10	散水（W）			9
I-V10	凍結（I）			10
N-H10	なし（N）		横葺（H）	12
W-H10	散水（W）			9
I-H10	凍結（I）			11
N-V5	なし（N）	5 寸	縦葺（V）	8
W-V5	散水（W）			9
I-V5	凍結（I）			12
N-H5	なし（N）		横葺（H）	9
W-H5	散水（W）			9
I-H5	凍結（I）			4

N-V10
- 屋根勾配（10寸勾配、5寸勾配）
- 屋根の葺き方（V：縦葺、H：横葺）
- 雪質（N：散水なし、W：散水あり、I：散水後氷化）

・体積をパラメータとした試験体（試験体 B）

試験体 B（表 2-2）は体積が衝撃力に与える影響の把握を目的に、雪塊の長さをパラメータとして設定した雪ブロックの試験体とする。雪ブロックの寸法は高さ 20 cm×幅 30 cm とし、長さは 3 種類（約 30, 60, 90 cm）とした。雪質は、散水をしない N シリーズ（密度 0.40 g/cm³）と、散水後に凍結させた I シリーズ（密度 0.58 g/cm³）の 2 種類とする。N シリーズの雪ブロックは、屋外で採取した雪を直方体容器に目の粗さが 9.5 mm のふるいでふるいながら充填して作成した。I シリーズの散水量は、21 世紀末における冬期 3 か月間の予測増加降水量[14]である 50 mm/m² とした。屋根勾配は 5 寸で、葺き方は縦葺で統一した。

表 2-2　試験体 B 一覧

試験体名	雪ブロック寸法（cm）		雪塊中の水の状態	試験体数量
	高さ×幅	長さ		
90N-V5	20×30（衝突面）	90	なし（N）	2
55N-V5		55		1
30N-V5		30		2
90I-V5		90	凍結（I）	1
60I-V5		60		1
30I-V5		30		1

90N-V5
- 屋根勾配（5寸勾配）
- 屋根の葺き方（V：縦葺）
- 雪質（N：散水なし、I：散水後氷化）
- 雪塊の長さ

（２） 実験結果

1）雪質が衝撃力に及ぼす影響（試験体 A）

図 2-3 に衝撃圧－密度関係を示す。水平方向の衝撃圧は、密度増加に伴い上昇する傾向にあり、鉛直方向衝撃圧の実験結果の包絡線[2]よりは小さい。これは、既往実験[2]における雪塊の衝突速度が 7～14 m/s であり、本実験における衝突速度である 2～7 m/s（次節参照）よりも大きかったことが原因と考えられる。自然積雪の N シリーズと比較して散水した W シリーズでは、雪塊の含水により密度が増加しており、密度増加に対して衝撃圧は概ね線形に変化する。衝撃力を算定する際は、含水による雪質変化を密度の変化として扱ってよいと考えられる。一方、凍結させた I シリーズでは、N, W シリーズに比べ、密度増加に対してより大きな割合で衝撃圧は増加する。落雪の衝撃力は雪の硬度[注3)]に影響することが知られており[6]、I シリーズにおける衝撃圧の増大は、雪の凍結による硬度の増大に起因すると推察される。

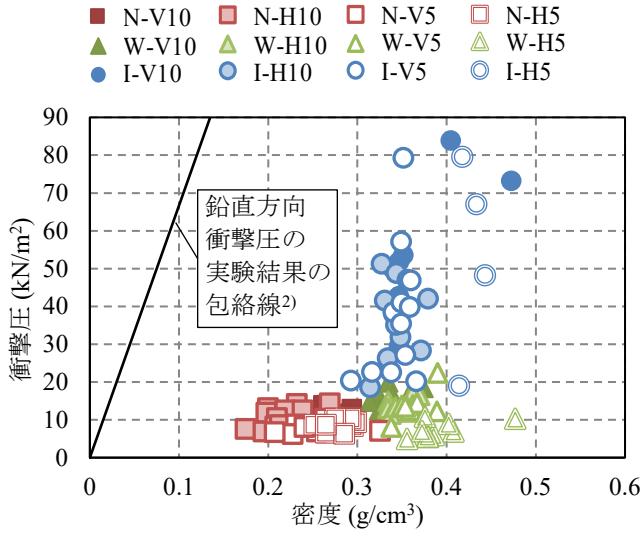


図 2-3　衝撃圧－密度関係

2）屋根勾配・葺き方が衝撃力に及ぼす影響（試験体 A）

図 2-4 に衝撃圧－水平衝突速度関係を示す。N, W シリーズでは、5 寸勾配よりも 10 寸勾配の方が、横葺よりも縦葺の方が、水平衝突速度と衝撃圧が大きく、屋根の勾配・葺き方は、雪ブロックの衝突速度を介して衝撃圧に影響を与えていることが確認された。一方、I シリーズでは、屋根勾配と衝撃圧に明確な関係は表れなかった。これは、屋根勾配・葺き方の影響よりも、氷板の受圧面への衝突角度や、氷板の壊れ方などの方が、衝撃圧に及ぼす影響が大きいためと推察される。

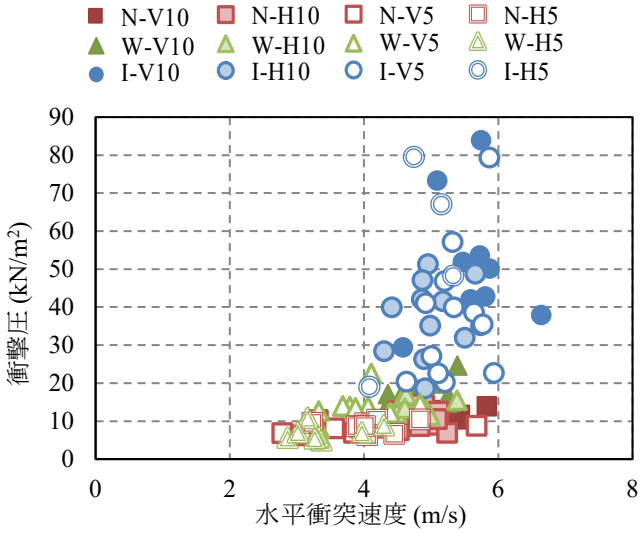


図 2-4　衝撃圧－水平衝突速度関係[注 4)]

3）雪塊の体積が衝撃力に及ぼす影響（試験体 B）

試験体 B の水平衝突速度－雪塊長さ関係を図 2-5 に、衝撃圧－雪塊長さ関係を図 2-6 に示す。雪塊長さが 30 cm から 90 cm に増加すると、水平衝突速度は N シリーズでは約 1.3 倍、I シリーズでは約 1.1 倍となり、雪塊長さが水平衝突速度に与える影響は小さい。雪塊長さが 30 cm から 90 cm に増加すると、衝撃圧は N シリーズでは約 1.6 倍、I シリーズでは約 2.0 倍となり、体積増加に対する衝撃圧の増加割合は N シリーズよりも I シリーズが大きい。

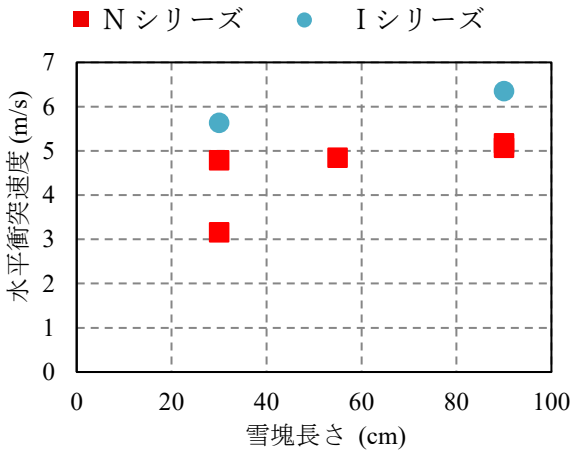


図 2-5　水平衝突速度－雪塊長さ関係[注 4)]

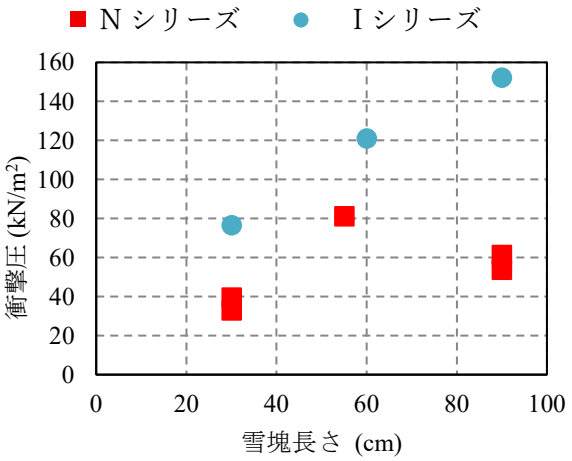


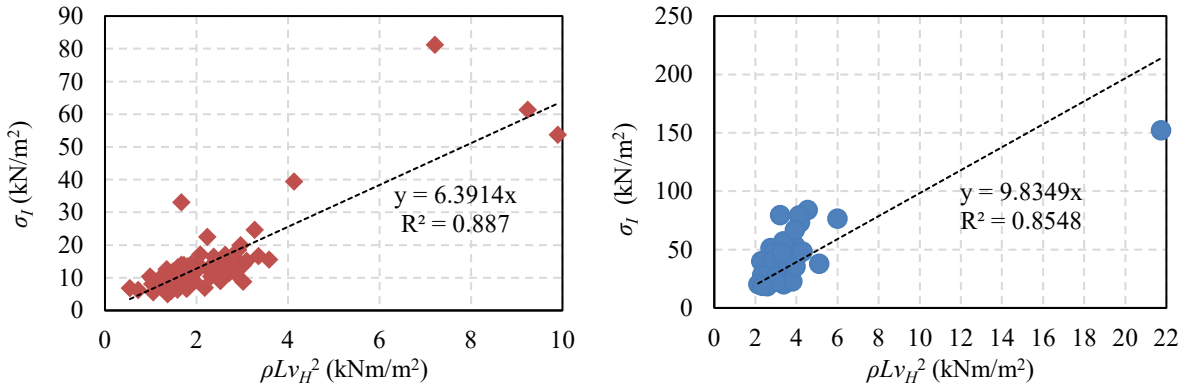
図 2-6　衝撃圧－雪塊長さ関係

２．３　落雪による衝撃力計算式の構築

実験結果をもとに落雪による水平方向衝撃力の実験式を誘導し、屋根雪が連続的に滑落する実況を再現した既往実験[13]の結果と比較する。

（１）落雪による衝撃圧の実験式の導出

前項の実験より、落雪の衝撃力には雪塊の密度 ρ (kg/m^3)、衝突速度v_H (m/s)、長さ L (m)が影響すると推定される。前項の試験体 A, B の実験で得られた衝撃圧σ_I (kN/m^2)と$\rho L{v_H}^2$の関係を図 2-7 に示す。雪ブロック長さが長い試験体 B は少数で、$\rho L{v_H}^2$が大きい範囲の結果が少ないため、全体的な傾向を十分にとらえられているとは言い難いが、N, W シリーズでは、概ねσ_Iと$\rho L{v_H}^2$は線形関係を示しているように思われる。凍結させた I シリーズでは、σ_Iと$\rho L{v_H}^2$の関係が明確に把握できていないため、今後は試験体数を増やし、両者の関係を明らかにする予定である。



(a) N,W シリーズ　　(b) I シリーズ

図 2-7　σ_I–$\rho L{v_H}^2$ 関係

N, W シリーズについて、$\sigma_I - \rho L{v_H}^2$関係を最小二乗法により原点を通る直線に近似すると次式が得られる。

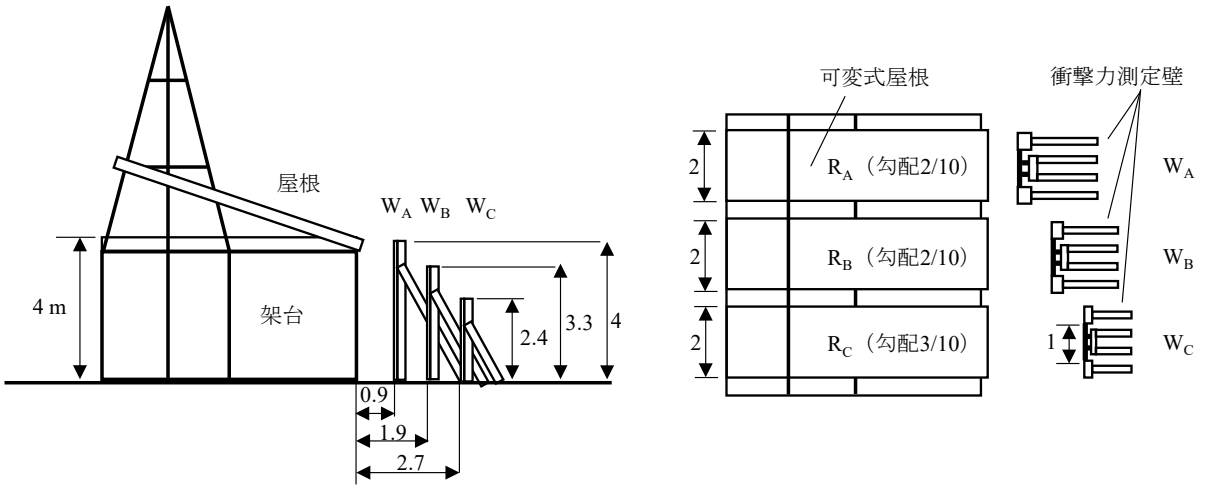
$$\sigma_I = 6.39\rho L{v_H}^2 \qquad (2-3)$$

(2-3)式では、衝撃圧は雪塊の密度と長さおよび衝突速度の 2 乗と比例しており、この関係は、衝撃力が運動エネルギーに比例することと対応している。既往の実験[2]では、雪塊の位置エネルギーの増加に伴い、落雪の衝撃力は増加する傾向があることが示されており、本試験で得られた結果と整合している。

（２） 本研究における実験式の計算値と既往実験結果との比較

1）滑落する屋根雪の実況を再現した既往実験

中村ら[13]は、図 2-8 に示す勾配可変式屋根（幅 2 m、長さ 7 m、長尺鉄板平葺き）に堆積した雪を滑落させ、壁面に連続的に衝突する雪塊の水平方向の衝撃力を測定している。実測値を一部編集して表 2-3 に示す。



(a) 側面（単位：m）　　(b) 平面（単位：m）

図 2-8　既往研究[13]の勾配屋根と測定壁（元文献を基に作成）

表 2-3　既往研究の実測値[13]（一部を編集）

屋根/壁の名称	積雪深 (m)	ρ (g/cm^3)	L (m)	v_H (m/s)	σ_I (kN/m^2)
R_A/W_A	0.33	0.41	0.76	1.81	3.21
			0.40	2.75	4.99
			0.59	2.14	4.40
			0.81	2.16	4.87
			0.52	2.66	5.46
			0.58	2.91	8.20
			0.32	2.46	6.89
			0.67	3.77	6.18
			0.30	3.60	4.51
			0.42	3.65	8.43
			0.56	2.00	4.75
			0.38	2.04	4.40
			0.35	2.43	2.85
R_B/W_B	0.38	0.41	0.65	3.29	10.11
			0.93	2.95	10.42
			0.91	3.68	9.70
R_C/W_C	0.43	0.33	0.91	6.11	15.50
			0.65	4.38	20.51
			0.73	4.87	16.09
			0.67	6.29	17.09

2) 実験式の算定値と既往研究の実測値の比較

(2-3)式に表 2-3 の ρ, L, v_H を代入して計算した値 σ_{Ical} と既往研究の実測値 σ_{Itest} の比較結果を図 2-9 に示す。計算式は、雪塊の質量・衝突速度の増加に伴う衝撃圧の増加は捉えられているものの、その値は実験値の 2 倍程度となっている。既往研究の実験では、屋根雪が連続的に壁面へ衝突し、先に衝突した雪塊の堆積や壁面への付着により、後続の雪塊は残った雪塊に衝突したため、壁面には個々の雪塊の衝撃力が作用しなかった可能性があることが指摘されている。この影響により、実験値は(2-3)式による計算値よりも小さくなったと考えられる。

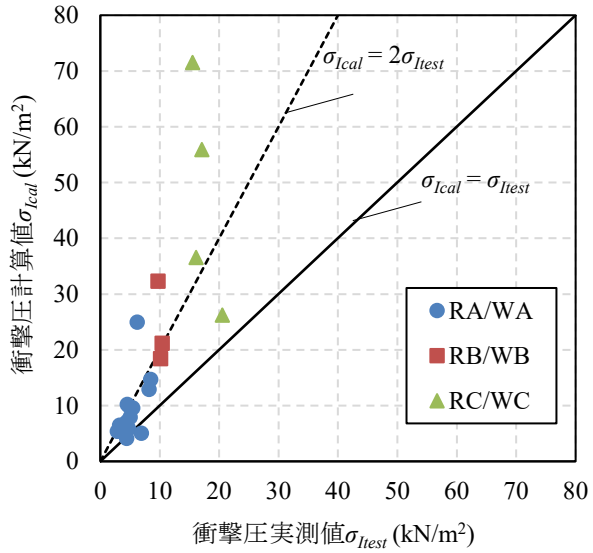


図 2-9 衝撃圧の計算値と実測値の比較

2．4 まとめ

本研究では、異なる屋根の条件において、降雨による雪質の変化と雪塊の体積が落雪の水平方向衝撃力に与える影響を実験的に検討した。実験結果を用いて誘導した衝撃力実験式の算定値と既往研究の実測値を比較した。得られた知見を以下に示す。

- 衝撃圧は雪塊の密度増加に伴い大きくなる。雪塊が凍結しない場合、含水による雪質変化は密度の増加として扱えるが、雪塊が凍結する場合、同一の密度増加に対して前者よりも大きな割合で衝撃圧は大きくなる。
- 屋根勾配・葺き方は雪塊の衝突速度に影響し、雪塊が凍結しない場合、5寸勾配よりも10寸勾配が、横葺より縦葺が、衝突速度と衝撃圧は大きくなる。
- 衝撃圧は体積の増加に伴い大きくなり、体積増加に対する衝撃圧増加の割合は、凍結しない雪塊より凍結した雪塊が大きい。
- 衝撃圧の実験式の算定値は既往研究の実測値よりも大きくなった。これは連続して落雪が壁面に衝突する場合では、個々の雪塊の衝撃力が十分に作用しないためと考えられる。

[参考文献]

1) 川田邦夫：小さな円形受圧板に対する雪塊の衝撃力，雪氷，vol.45，pp.65-72，1983

2) 小竹達也，苫米地司，西川薫：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，vol.543，pp.31-36，2001

3) 横澤直幸，諏訪宗行，相茶日出海，細川和彦，苫米地司：雪氷塊の落下衝撃荷重について その２，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.37-38，2005

4) 庄司敦，和泉薫，河島克久，伊豫部勉：高密度雪塊の衝撃力特性と破壊過程，雪氷，vol.69，pp.471-480，2007

5) 松下拓樹，上田真代，坂瀬修，松澤勝，齋藤佳彦：新雪としまり雪の落下による衝撃力について，雪氷研究大会，2009

6) 松下拓樹，笠村繁幸，松澤勝，中村浩，上田真代：落雪による衝撃荷重と積雪硬度の関係について，北海道の雪氷，No.32，pp.30-33，2013

7) 上田真代，松下拓樹，松澤勝：道路構造物からの落氷雪を想定した衝撃荷重の計測，第 11 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，2014

8) 松澤勝，上田真代，小中隆範：落氷雪が与える影響の評価手法に関する研究，土木研究所成果報告書，No.29，2015

9) 古川巖：雪崩の衝撃力，雪氷，vol.19，pp.140-141，1957

10) 阿部修，中村秀臣，中村勉，佐藤篤司，沼野夏生：大型野外シュートを用いた雪崩実験，その 1－雪塊と杭の衝撃現象－，雪氷，vol.53，pp.11-20，1991

11) 阿部修，中村秀臣，佐藤篤司，中村勉：大型野外シュートを用いた雪崩実験，その 2－雪塊の衝撃特性－，雪氷，vol.59，pp.189-199，1997

12) 阿部修，小林俊一，佐藤篤司，中村秀臣，中村勉：大型野外シュートを用いた雪崩実験，その 3－低密度雪塊の衝撃波形予測－，雪氷，vol.64，pp.25-31，2002

13) 中村秀臣，阿部修，中村勉：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，vol.25，pp.169-189，1981

14) 札幌管区気象台：北海道の気候変化【第２版】（資料編），pp.60-63，2017

15) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2015），5 章 雪荷重，pp.242-243，2015

16) 社団法人　日本建設機械化協会新編：新防雪工学ハンドブック，1977

17) M. Mellor：A review of basic snow mechanics，IAHS-AISH pub.，114，99，pp.251-291

18) 堤拓哉：積雪期の降雨によって生じる建築物の雪害リスクとその評価，北方建築総合研究所研究概要，2018

[注釈]

注1) σ_sは雪塊の破壊強度となることが示されている[16]。一方で、小竹ら[2]の実験では、σ_sはρ_sの関数で表され、密度400 kg/m^{3}を超える範囲では、既往研究[17]で得られた雪の破壊強度よりも小さくなるという結果が示されている。

注2) Iシリーズについて、試験体Aでは衝撃力が過小評価とならないよう氷板層が受圧面に当たる向きで滑走させ、試験体Bでは屋根上積雪の実況を再現するため氷板層が屋根面と平行となる向きで滑走させた。

注3) 雪の硬度は、円錐または円板を雪面に貫入させ、そのときの貫入深さから計算する方法と、抵抗力を直接計測する方法がある。文献[6]では、デジタルフォースゲージに取り付けたアタッチメント（直径 30 mm）を雪面に貫入したときの抵抗力の最大値を、アタッチメントの面積で除すことで積雪の硬度としている。

注4) 速度が計測できなかった試験体は描画していない。

３．雪質の変化を踏まえた住宅間の積雪による沈降力

３．１　実験の目的

積雪の中に構造物が埋没すると、構造物には積雪の沈降力が作用する。沈降力による被害事例として、フェンスやブレースの塑性変形[19]や、屋根雪と地上積雪がつながったことによる軒先の破壊[20]などが報告されており、多雪地域の構造物の設計では沈降力への対応が必要となる。

既往の研究において実測にもとづく沈降力の算定式が提案されている[例えば 21), 22)]。一方、温暖化の進行に伴い、冬期の降雨が増加することが予想されるものの、降雨が雪の沈降力に及ぼす影響については明らかになっていない。そこで、本章では降雨を想定した積雪への散水を行い、降雨による雪質変化が積雪の沈降力に及ぼす影響を把握することを目的とする。

また、水平桁の全面に雪が堆積する場合の積雪の沈降力の計測例は多いが、建築物の外壁沿いに設置される設備機器のように、雪が構造物の片側にのみ堆積することが想定される場合の沈降力については、計測例が極めて少ない。そこで、本章では住宅の外壁に設置される設備機器が積雪に埋没する場合に作用する沈降力を実験的に把握する。

３．２　降雨を想定した散水を行った積雪の沈降力

（１）実験計画

1）計測場所と期間

北海道旭川市緑が丘の北方建築総合研究所構内で、2023/11/21～2024/02/29（以下、2023 年度）と 2024/12/01～2025/03/27（以下 2024 年度）の 2 冬期にかけて自然積雪と散水した積雪の沈降力を計測した。

2）沈降力計測装置

沈降力計測装置の形状を図 3-1 および写真 3-1 に示す。計測装置を積雪中に埋没させ、上面に作用する沈降力を計測する。試験体の長さは既往の実験[23]に合わせて 500 mm とし、幅はロードセルの大きさに合わせて 125 mm とした。高さは沈降力が最大となる最大積雪深の約 1/3 の高さに合わせて 280 mm とした。受圧部は融雪水の浸透により自重が変化しないように角形鋼管を用いて製作し、2 台のロードセルにより 2 点支持とした。ロードセルの下部は溝形鋼に固定し、側面は融雪水が侵入しないよう防水シートで覆った。上面に作用する沈降力は、10 分毎に計測される 2 台のロードセルの出力値を合計して算出した。

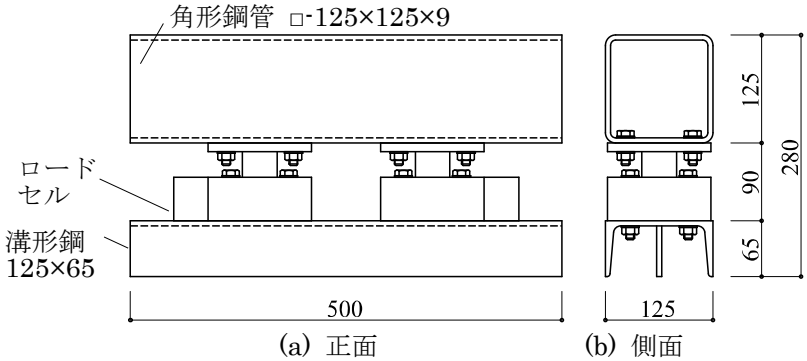


図 3-1　計測装置形状[注 1]



写真 3-1　計測装置外観

3）計測装置設置状況と散水計画

・散水が沈降力に影響を与えるメカニズムの把握（2023 年度の計測）

2023 年度は、散水が沈降力に影響を与えるメカニズムの把握を目的として、沈降力の計測と積雪層の観測を実施した。

計測装置の設置状況を図 3-2 に、散水計画を表 3-1 に示す。計測装置は t-0 と t-25 の 2 台とし、t-0 は自然積雪の沈降力を、t-25 は散水した積雪の沈降力を計測した。散水は図 3-2 の破線の範囲に、表 3-1 に示す日付で 3 回に分けて実施し、合計散水量は 25 mm/m² とした。この散水量は、21 世紀末における冬期 3 か月間の予測増加降水量 [24]である 50 mm/m² の半分に相当する。散水に使用する水は、ホースを用いて水道蛇口から供給し、ノズルからシャワー状にして散布した。

図 3-2 の一点鎖線の範囲で積雪深と積雪重量を 1 週間程度の間隔で計測した。積雪深の計測には折尺を使用し、積雪重量の計測には円筒形スノーサンプラーを使用した。積雪深は折尺による計測のほかに超音波積雪深計により 1 分間隔で計測した。気温は白金抵抗体温度計により 1 分間隔で計測した。

・散水量が沈降力に影響を与える影響の把握（2024 年度の計測）

2024 年度は、散水量が沈降力に影響を与える影響の把握を目的として、散水量をパラメータとした沈降力の計測を実施した。

計測装置の設置状況を図 3-3 に、散水計画を表 3-2 に示す。計測装置は 4 台とし、T-0 は自然積雪の沈降力を T-12.5、T-25、T-50 は散水した積雪の沈降力を計測した。散水は図 3-3 の破線の範囲に、表 3-2 に示す日付で実施した。散水範囲は受圧面が支持する積雪の領域（加重圏）よりも大きくなるように設定した。散水量は 2023 年度の計測と同様に 21 世紀末における冬期 3 か月間の予測増加降水量 [24]である 50 mm/m² を基準に設定した。散水に使用する水は、水道蛇口から供給し、スプリンクラーからシャワー状にして散布した。

積雪深は 4 つの測定装置の中央位置に設置した雪尺により 1 日程度の間隔で計測した。計測場所付近の積雪深と気温は 2023 年度と同様に超音波式積雪深計と白金抵抗体温度計を用いて 1 分間隔で計測した。

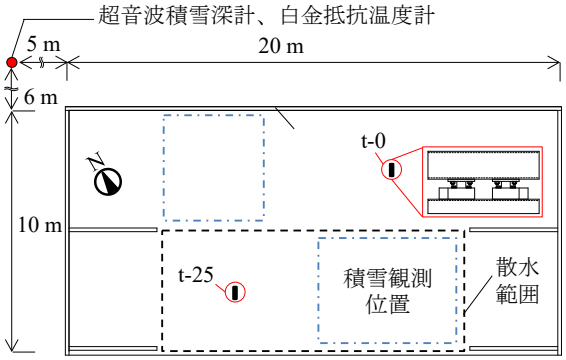


図 3-2　2023 年度の試験体設置状況（平面図）

表 3-1　2023 年度の散水計画

計測装置名称	散水日ごとの散水量（mm/m²）			
	1/17	1/29	2/15	計
t-25	8.3	8.3	8.3	25
t-0	-	-	-	0

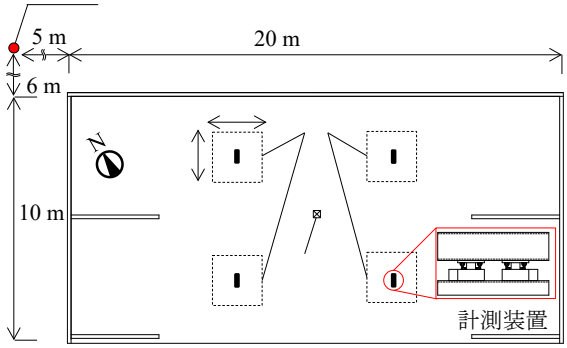


図 3-3　2024 年度の試験体設置状況（平面図）

表 3-2　2024 年度の散水計画

計測装置名称	散水日ごとの散水量（mm/m²）						
	1/10	1/16	1/20	1/24	2/25	3/6	計
T-50	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	50
T-25	8.3	8.3	8.3	-	-	-	25
T-12.5	8.3	4.1	-	-	-	-	12.5
T-0	-	-	-	-	-	-	0

（２） 実験結果

1）散水による沈降力増加のメカニズム（2023 年度実験結果）

図 3-4 に受圧面に作用する荷重の推移を、図 3-5 に積雪深と気温の推移を示す。荷重の計測値は 10 点（100 分間）の移動平均により平滑化している。

荷重の推移は、散水した積雪内の計測装置と自然積雪内の計測装置で同様の傾向を示した。12/13 の降雪により 2 つの計測装置は積雪に埋没し、沈降力が発生し始めた。その後、積雪深と荷重は連動して増減を繰り返すが、1 月末になると積雪深が減少する一方で荷重は増加しており、沈降力の作用が明確に表れるようになった。2/13～2/14 にかけては気温が 0℃を大きく上回り、受圧面上の雪が融け、沈降力は一時的に減少するが、2/15 に再び増加に転じ、2/19 にピークに達した。この増加の要因は、融雪による積雪の沈降の進行によるものと推察される。2/15 以降の沈降力は、日中に減少し、夜間に増加するというサイクルを繰り返している。これは、日中は融雪し、夜間は剛性・粘性係数の大きな積雪層が形成されたためと考えられる。2/19 の午後には気温が 10℃を超え、受圧面上の雪が融け荷重は 0 に戻った。

散水した積雪の荷重は、散水直後から増加しており、積雪層の含水による重量の増加が確認できる。沈降力の最大値は、散水した t-25 で 1.29 kN、自然積雪の t-0 で 0.84 kN であり、t-25 は t-0 の 1.54 倍に増大した。散水した後の積雪では、自然積雪には見られない氷板の層（写真 3-2、図 3-6）が形成されており、これは散布した水が積雪層内で凍結したものと考えられる。既往研究 [25]では、受圧面上のぬれざらめ雪の凍結による積雪層の硬化が沈降力の増大に影響することが報告されており、本論においても氷板の形成が沈降力の増加に寄与したものと推察される。

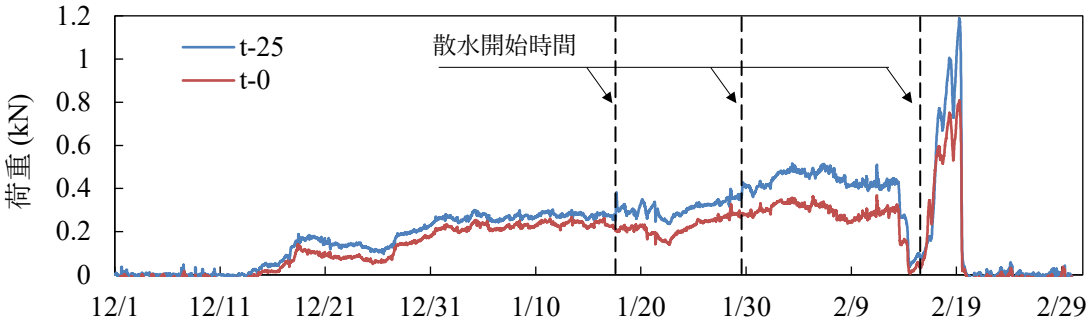


図 3-4　受圧面に作用する荷重の推移（2023 年度）

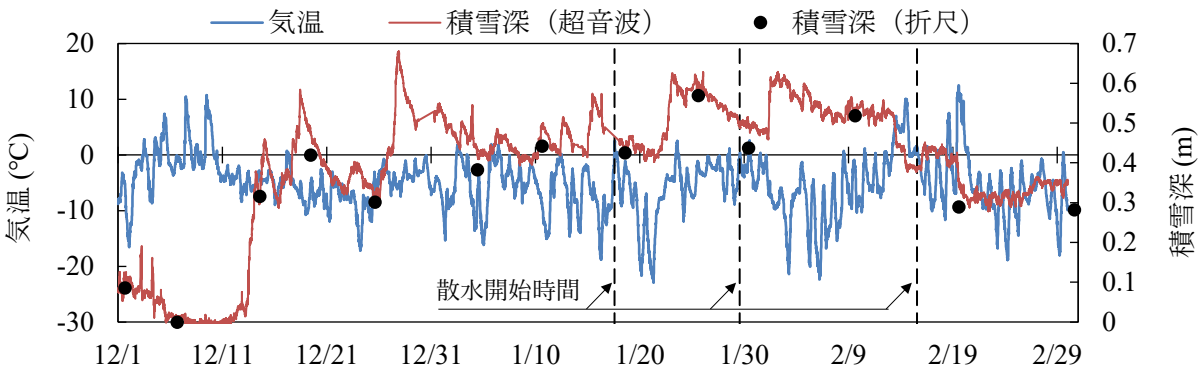


図 3-5　気温と積雪深の推移[注2]（2023 年度）



(a) 上面



(b) 側面

写真 3-2　形成された氷板

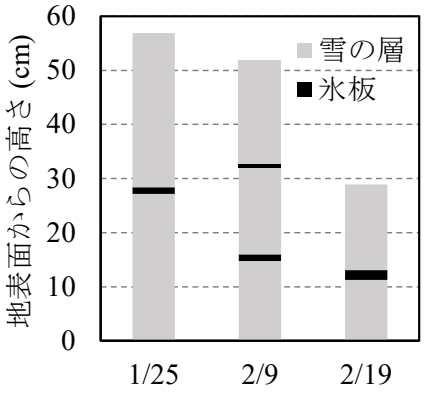


図 3-6　積雪層内の氷板

2）散水量が沈降力に与える影響（2024 年度実験結果）

受圧面に作用する荷重の推移（2024 年度）を図 3-7 に、気温と積雪深の推移（2024 年度）を図 3-8 に示す。荷重の計測値は 10 点（100 分間）の移動平均により平滑化している。荷重の推移は、散水した積雪内の計測装置と自然積雪内の計測装置で同様の傾向を示した。12/26 の降雪により計測装置は積雪に埋没し、沈降力が発生し始めた。2/13 まで積雪深は約 0.3~0.4 m の間を推移し大きく変化しないが、1/20 に気温が 5℃程度まで昇温したことで荷重は増加し、沈降力が明確に表れるようになった。その後、2/13 まで日中の気温が 0℃を超える日が増え、沈降力は日中に増加し夜間に減少するというサイクルを繰り返した。2/14 の降雪により荷重は増加し、積雪深の減少とともに 2/22 から減少に転じた。3/1 には日中の気温が 7℃を超え、融雪の進行に伴い沈降力は再び増加し、3/5~3/8 にかけてピークに達した。融雪期に沈降力が一時的に減少した後、増加に転じピークに達するという傾向は、2023 年度と同一である。

最大沈降力を表 3-3 に示す。散水量と最大沈降力は明確な相関関係を示さなかった。散水量が最も多い T-50 の最大沈降力が最小となった。これは、T-50 では 2/25 と 3/6 の散水の後に急激に荷重が減少しており、散水が融雪を誘発したものと推察される。以上より、沈降力は、降雨後に積雪内に氷板の層が形成される場合には増加するが、気温が高く降雨が融雪を促進する場合には増加しないと考えられる。

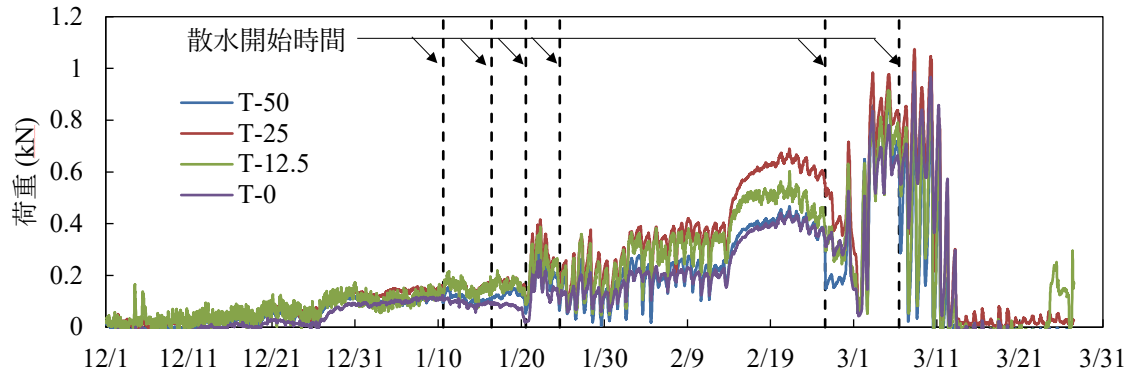


図 3-7　受圧面に作用する荷重の推移（2024 年度）

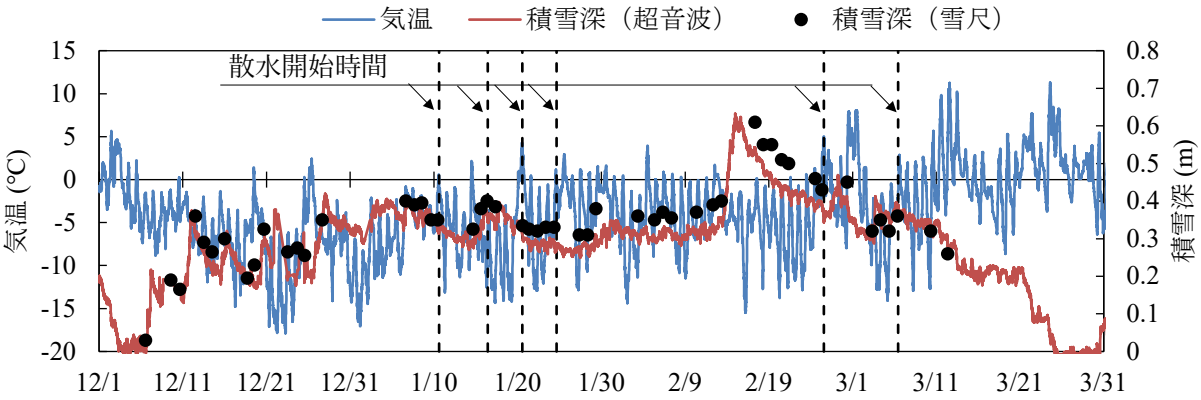


図 3-8　気温と積雪深の推移[注2]（2024 年度）

表 3-3　最大沈降力の比較

計測装置名称	最大沈降力（kN）
T-50	0.91
T-25	1.10
T-12.5	1.01
T-0	1.01

注1)　2024 年度の計測では、計測装置の基本構成は 2023 年度と同一としたが、一部のロードセルは寸法および最大容量の異なる別種のものに変更した。

注2)　超音波式積雪深計の計測値のうち、前後の時刻の計測値と比較して急激な変動を示した異常値は除外した。

３．３　設備機器に作用する沈降力

（１） 実験計画

1）試験体概要と計測方法

試験体形状を図 3-9 に示す。試験体寸法は一般的な室外機の寸法をもとに設定した。試験体は、コンクリート型枠用合板で作成した箱を H 形鋼の土台の上に設置した 3 台のロードセルで支持する構成とした。ロードセルには CH001~CH003 の番号を振っている。試験体下部の側面は融雪水が侵入しないよう防水シートで覆った。

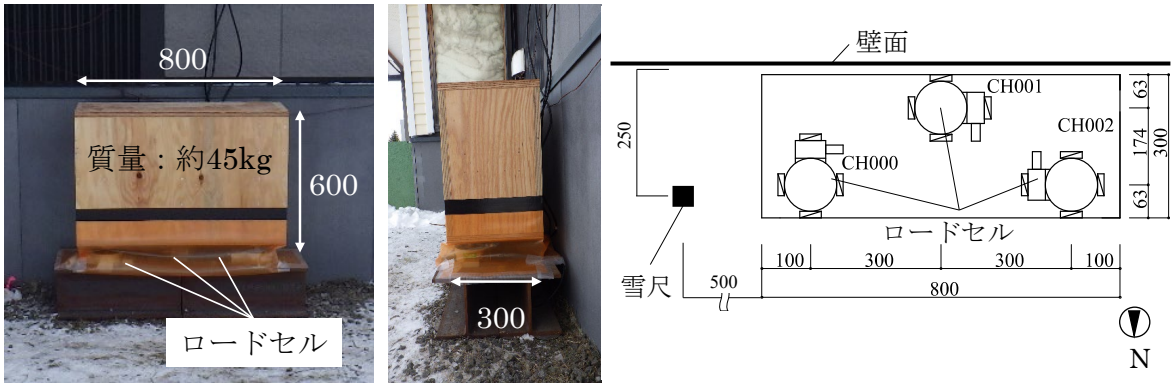
試験体を積雪中に埋没させ、上面に作用する沈降力を計測した。沈降力は、10 分毎に計測される 3 台のロードセルの出力値を合計して算出した。

2）試験体配置と計測期間

試験体設置状況を写真 3-3 に示す。計測は北海道旭川市緑が丘の北方建築総合研究所構内にある実験住宅で実施し、試験体は北面の外壁沿いに設置した。計測期間は 2023/03/01～2023/04/07 とした。

3）堆雪状況と積雪深の計測方法

3/3 に除雪機を用いて、壁面位置における積雪深が 180 cm となるように試験体上に雪を堆積させた。積雪深は、図 3-9 に示す位置に設置した雪尺を用いて 1 日程度の間隔で計測した。



(a) 前面　　(b) 側面　　(c) ロードセルの配置と番号

図 3-9　試験体形状



(a) 雪投入前　　(b) 雪投入後

写真 3-3　試験体設置状況

（２） 実験結果

試験体に作用する荷重と積雪深の推移を図 3-10 に示す。積雪深の減少に伴い荷重が増加しており、沈降力が発生していることが確認できる。最大沈降力は 10kN 程度となった。最大値に達した後は、日射による融雪により、西面と中央に設置した CH001 と CH002 の荷重が先に低下し、4/6 に荷重は 0 になった。

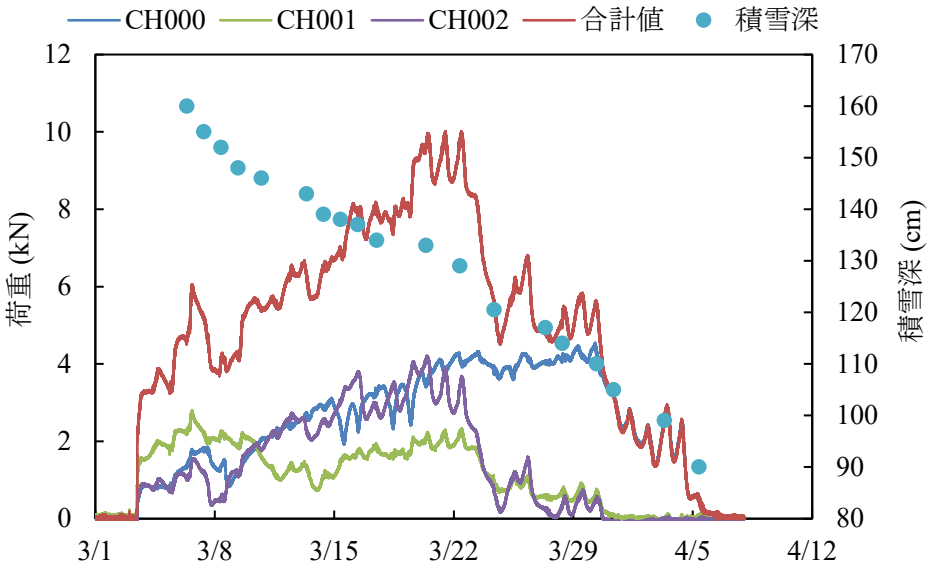


図 3-10　試験体に作用する荷重の推移

３．４ まとめ

- 桁状の沈降力測定装置を積雪中に埋没させ、自然積雪と散水を行った積雪の沈降力を計測した。2023 年度は、散水による沈降力増加のメカニズムを把握するため、散水した積雪層のサンプリングを行った。その結果、散水により積雪層に氷板が形成される場合、散水量 25 mm/m² で沈降力は 1.54 倍に増加した。2024 年度は、散水量をパラメータとして沈降力を計測したが、散水量と沈降力の最大値は相関関係を示さなかった。これは散水により融雪が促進されたためと推察される。
- 外壁に設置されたエアコン室外機を模擬した試験体に作用する沈降力を計測した。積雪深が 1.8 m 程度で、沈降力の最大値は約 10 kN となった。

[参考文献]

19) 苫米地司，田沼吉伸，大塚晶一，高倉政寛：外壁の外側に設置された鉄骨軸組ブレースの多雪地域における被害，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.78，pp.327-332，2005

20) 大浦浩文：積雪の沈降荷重による軒先の損傷について，低温科学物理編，16，pp.249-250，1957

21) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説（2015），5 章 雪荷重，pp.258-260，2015

22) ㈳日本建設機械化協会：新防雪工学ハンドブック，pp.38-46，1977

23) 天野一郎：積雪の沈降力，雪氷，vol.5，pp. 357-368，1943

24) 札幌管区気象台：北海道の気候変化【第２版】（資料編），pp.60-63，2017

25) 中村秀臣：積雪の沈降力の発生機構に関する研究（英文），国立防災科学技術センター研究報告，vol.41，pp.361-385，1988

４．雪質の変化を踏まえた住宅間の積雪による側圧

４．１　実験の目的

多雪地域の建築物は、雪によって生じる種々の荷重を考慮して設計する必要がある。その中でも積雪による側圧は、既往研究[26)~29)]が少なく、過去に計測事例[26)]はあるものの、圧痕計を使用しているため、積雪期全体における最大値しか計測できておらず、その経時的変化や雪質との関係は明らかになっていない。

本研究では雪質と側圧の関係を明らかにするため、温度を一定に保った室内で、雪質の異なる側圧の経時的変化を計測した。また、気温の変化が積雪の側圧に及ぼす影響を把握するため、屋外で人工的に堆積させた雪の側圧を計測した。

４．２　雪質が側圧に及ぼす影響

（１）試験計画

1）計測装置および計測条件

側圧の計測装置を図 4-1 と写真 4-1 示す。計測装置は内部にロードセルを設置した鋼製の箱（内法寸法：縦 20 cm×横 20 cm×高さ 30 cm）を縦に 3 段重ねた構成とした。計測装置の中に投入した雪によって生じる水平方向荷重を、円形受圧板を介したロードセルで高さ 30 cm ごと（最下部の計測高さ 15 cm）に計測し、受圧板の面積で計測荷重を除すことで側圧を算出した。

計測は室温を-5 ℃に設定した低温室内で実施した。計測期間は 20000 分とし、計測間隔は 10 分とした。

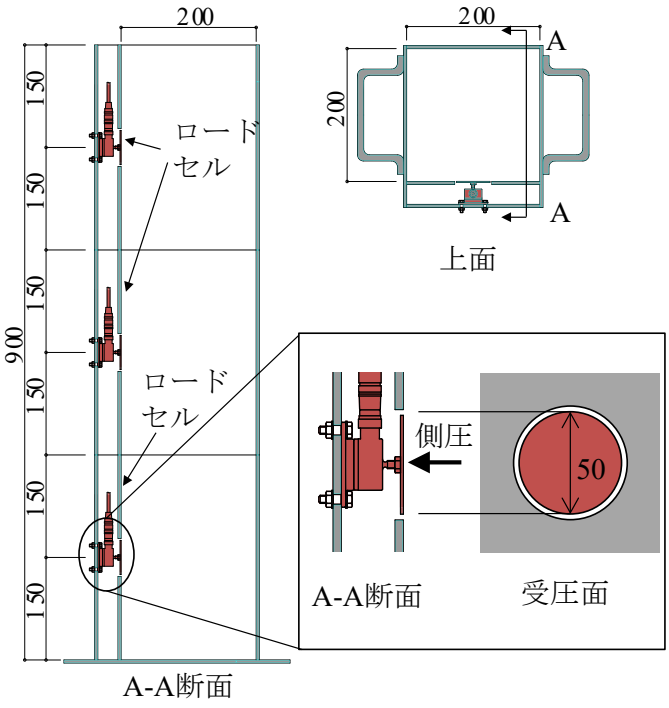


図 4-1　側圧計測装置の形状

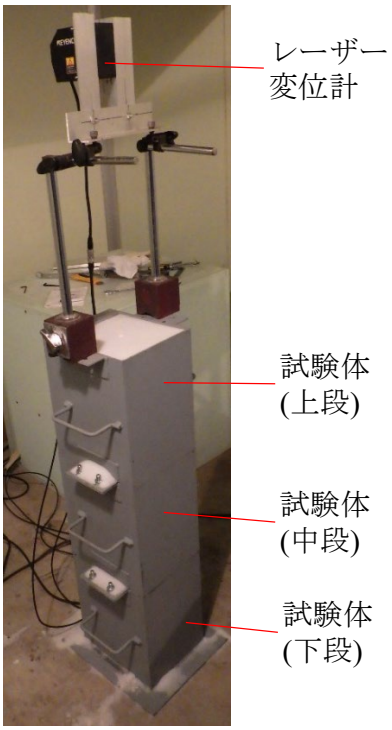


写真 4-1　セットアップ状態

2）計測した雪の状態

計測対象の雪の状態を表 4-1 に示す。実験パラメータは雪質と雪の投入方法とし、パラメータごとに No.1~4 の試験番号を設定した。No.1 は自然積雪状態の新雪を、No.2 は落雪塊を、No.3 は圧密状態の積雪を、No.4 は自然積雪状態のしまり雪を想定している。

表 4-1　計測した雪の状態

試験番号	雪質	全層密度 (g /cm³)	雪の投入方法※1	圧密の有無	想定する積雪の状態
No.1	新雪	0.145	ふるい (9.5mm)	無し	自然積雪
No.2	しまり雪	0.268	スコップ	無し	落雪塊
No.3	新雪	0.282	ふるい (9.5mm)	有り※2	圧雪
No.4	しまり雪	0.470	ふるい (2mm)	無し	自然積雪

※1 ( )はふるいの目の間隔を示す。　※2 圧密は測定装置の各段に雪を投入した後に実施した。

（２） 試験結果

側圧の経時的変化を図 4-2 に示す。計測データは温度影響を低減するため、低温室の温度周期である 6 時間分の 36 データで移動平均を取った。側圧は雪の密度が大きいほど増加する傾向がある。積雪深が 90cm 程度の場合、雪を圧密した No.3 で側圧が最大となり、最大値は 1.3 kN/m² 程度である。

自然積雪状態の新雪を想定した No.1 では、側圧の最大値は雪の投入直後に現れ、雪の沈降とともに側圧は減少した（図 3 (a)）。これは積雪の圧縮粘性ポアソン比が微小であり、圧縮時の側方への膨張は小さいという篠島 [30]の試験結果に整合している。自然積雪状態のしまり雪を想定した No.4 は雪の沈降が進行しないため、側圧の経時的変化が小さい。一方で、落雪塊と圧雪を想定した No.2 と No.3 では、時間の経過とともに側圧は増減したが、これは雪塊内部にスコップで投入した際に生じた空隙や圧密による高密度層があり、受圧面と雪の接触状態が繰返し変化したことに起因すると推察される。

側圧の高さ方向分布を比較すると、雪質に関係なく中段が最大となる傾向にあり、側圧の発生は積雪の弾性変形によるポアソン効果によるものではなく、積雪の破壊に起因している可能性がある。今後、積雪の側圧の発生メカニズムを明らかにするためには、積雪の側圧と内部摩擦角・粘着力の関係を把握する必要があると考えられる。

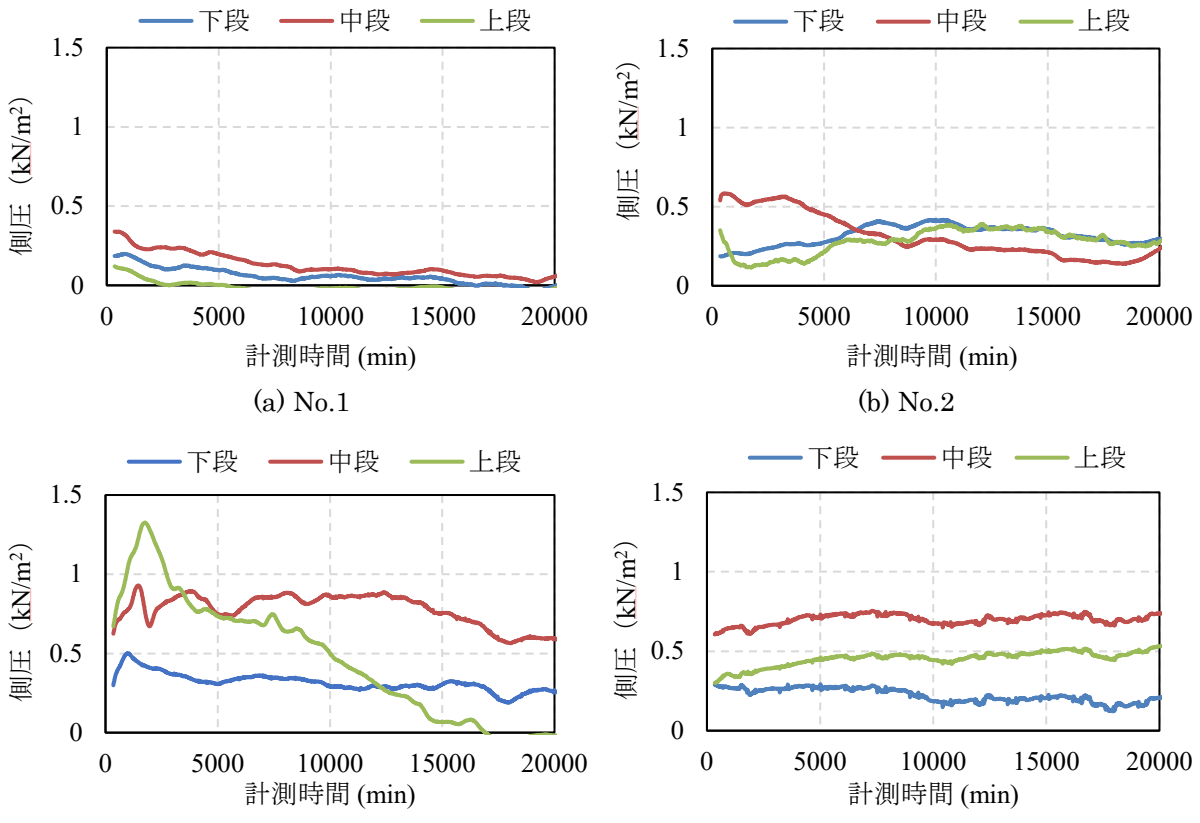


図 4-2　雪質の異なる積雪の側圧の経時的変化

４．３　気温の変動が側圧に及ぼす影響

（１）実験計画

1）試験体

試験体の形状を図 4-3 に、セットアップ状態を図 4-4 および写真 4-2 に示す。試験体はコンクリート型枠用合板（ラワン材）の下部を山形鋼で両面から挟んでボルト接合する構成となっており、山形鋼をあと施工アンカーで下面のコンクリートに固定することで自立させた。雪と接する面の裏側（非塗装面）に 3 線式単軸ひずみゲージと T 熱電対を図 4-3 の通り貼付した。ひずみの計測方向は合板の長辺方向とした。建物外壁を想定した反力壁は単管パイプと合板を用いて製作し、試験体の両隣と対向面に設置した。温度変化による見かけひずみを補正するため、荷重以外の条件を可能な限り同一とした部材（ダミー材）を、埋雪しない位置に設置し、T 熱電対とひずみゲージを貼付した。

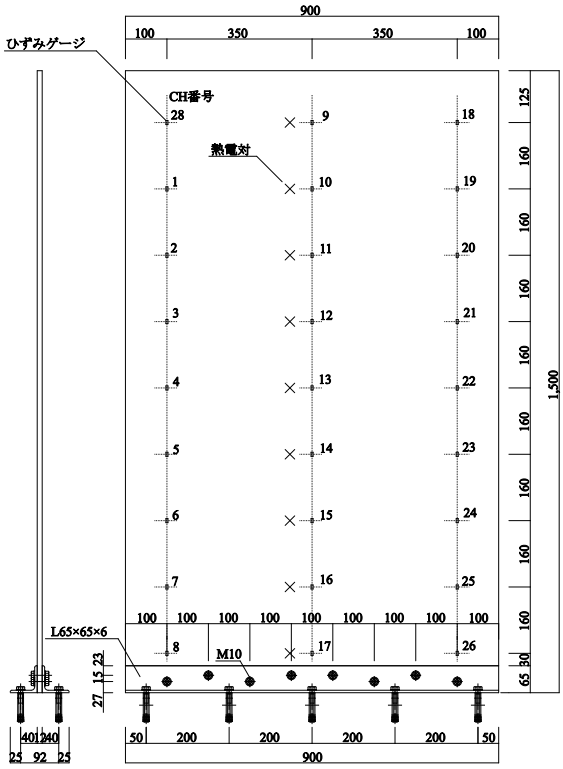


図 4-3　試験体形状

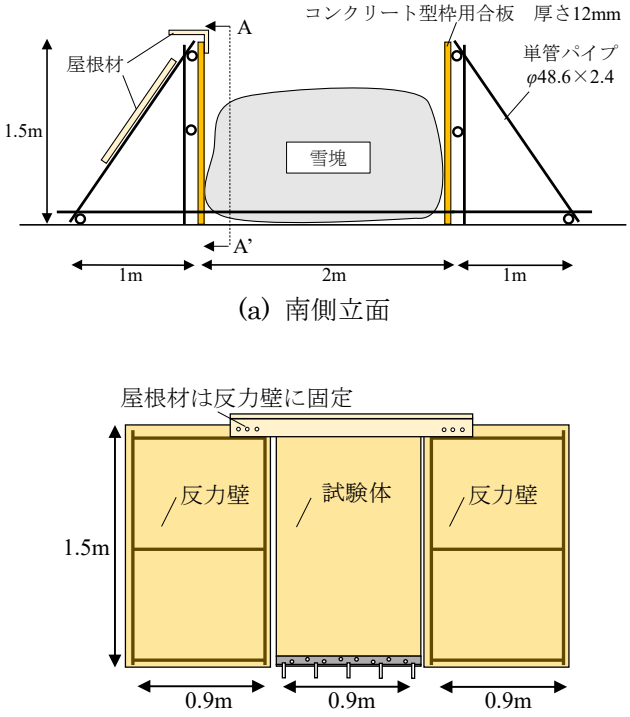
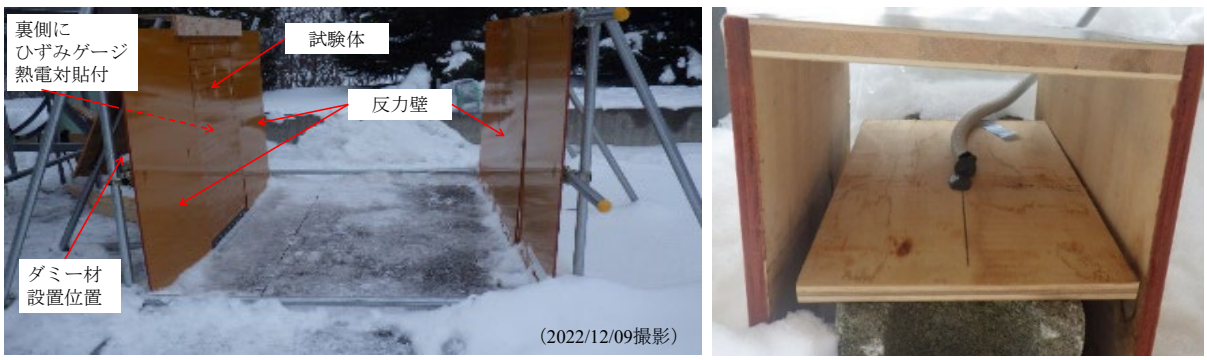
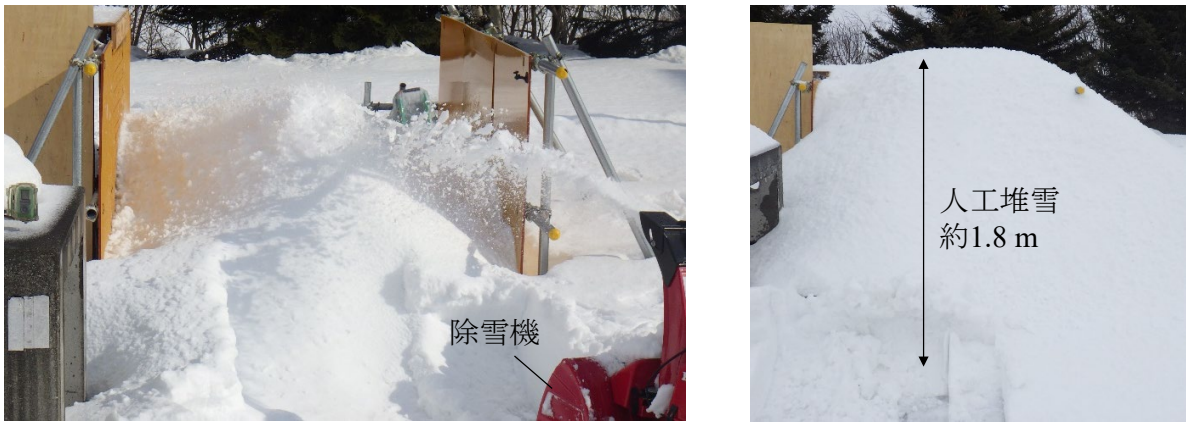


図 4-4　セットアップ状態



(a) 試験体と反力壁　　(b) ダミー材

写真 4-2　試験体設置状況



(a) 雪投入前　　(b) 雪投入後

写真 4-3　雪投入前の試験体（2022/3/3 撮影）

2）計測方法

2 つの壁面の間に堆雪させ、その側圧によって試験体に生じるひずみを 1 分毎に計測する。側圧によって生じたひずみは、試験体のひずみから同一時間におけるダミー材のひずみを減じることで算出した。同一高さに貼付した 3 点のひずみの平均値を各計測高さのひずみとした。試験体に生じる曲げモーメント分布は計測したひずみを用いて次式により算出した。

$$M = \frac{Ebt^2\varepsilon}{6} \qquad (4-1)$$

ここで、M: モーメント、E: 試験体のヤング率、b: 試験体幅、t: 板厚、ε: ひずみを示す。側圧の分布はひずみゲージの貼付間隔ごとの曲げモーメント勾配から算出した。

3）計測期間

2022/12/14～2023/3/2 の期間※は降雪により自然に雪が堆積した状態のひずみを計測し、2023/3/3～2023/3/8 の期間は除雪機を用いて人工的に約 1.8m の高さまで雪を堆積させた状態のひずみを計測した（写真 4-3）。表面温度の計測は 2023/2/10 から開始した。

※本実験は研究開始前の事前検討として実施した。

（２） 実験結果

1）ひずみの経時的変化

図 4-5 に自然積雪状態の期間におけるひずみと外気温の推移を示す。試験体のひずみは試験体中心部である CH13 の出力値を代表例として示す。ダミー材と試験体のひずみは、外気温に連動して 1 日周期で極大値と極小値を示すという同様の挙動を呈し、前項で示したダミー材によるひずみの算出方法の妥当性が確認できる。

2022/12/14～2023/3/2 の期間は、温湿度によるひずみの変動が、積雪の側圧によって生じるひずみよりも大きく、側圧の傾向を把握することができなかった。

2023/3/3～2023/3/7 の期間における計測高さごとのひずみの推移を図 4-6 に示す。人工的に雪を載せ始めた午前 9:15 からひずみ出力値に変動が生じている。荷重の増加とともに試験体中央部のひずみは引張側に増大し、最下部ではひずみが圧縮側に増大している。2023/3/5 の正午付近から正負に増加していたひずみが減少に転じており、気温・日射によって試験体に接していた雪が融けたものと推察される。ひずみの増大方向が上部と下部で異なるのは、セットアップ前の試験体が雪に接する方向に初期たわみ（図 4-7 (a)）を有していたことに起因する。試験体の両隣の反力壁に屋根材をねじ止めした際に、試験体には頂部変位を抑制する方向に力が作用しており、試験体は図 4-7(b)に示すような下

端固定・上端ピンの状態であったと考えられる。この図 4-7 (b)の状態のひずみをイニシャル値としてゼロ点に合わせたため、ひずみゲージを貼付した側では、側圧によって試験体上部に引張応力が生じ、下部には圧縮応力が生じている（図 4-7 (c)）。

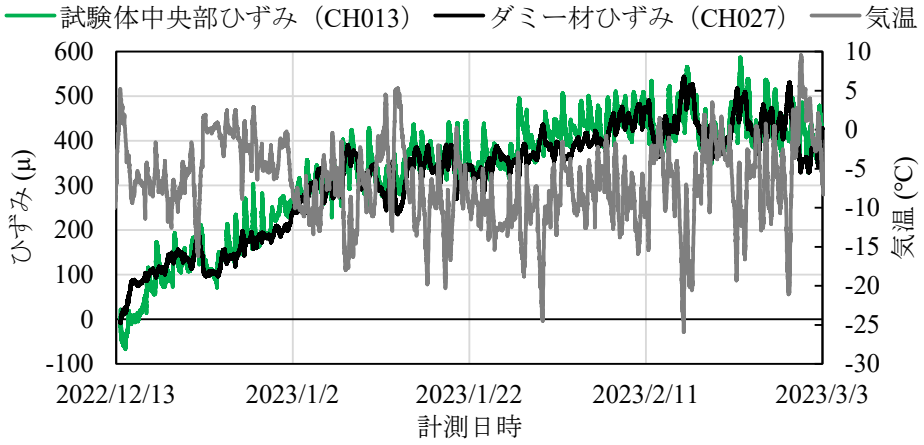


図 4-5　雪追加前のひずみと気温の推移

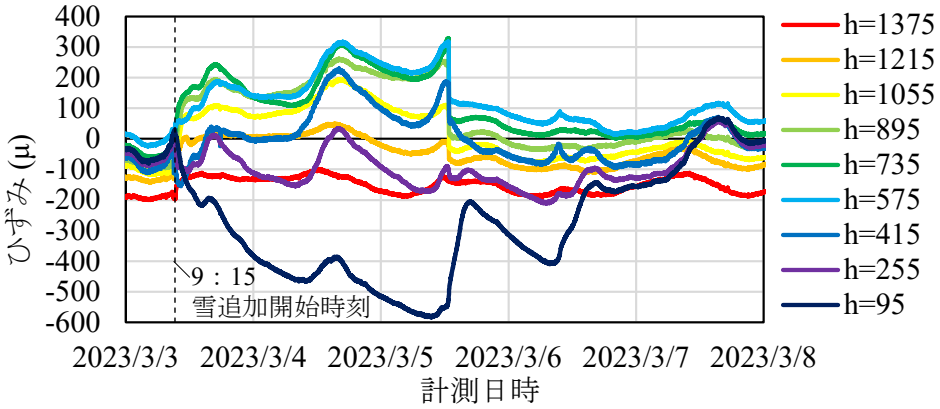


図 4-6　雪追加後のひずみの推移（h：計測点高さ（mm））

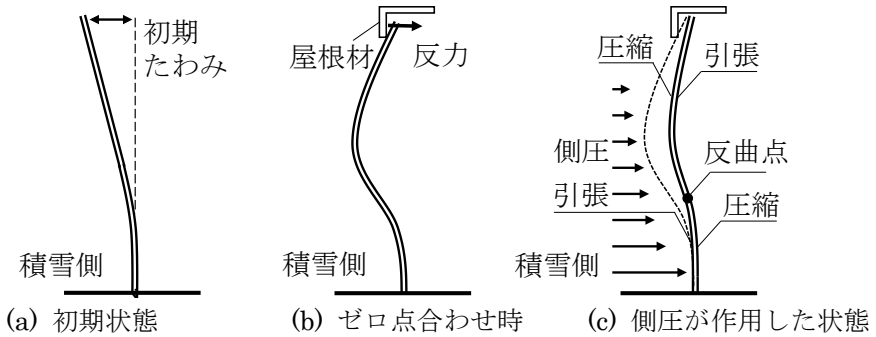


図 4-7　試験体の変形状態

2) モーメント分布

2023/2/24～2023/3/2 における試験体とダミー材の表面温度の推移を図 4-8 に示す。温度の周期的変動による影響が少なく、かつ試験体とダミー材の温度が概ね同じであり両者のひずみへの温度影響が同程度であると考えられる午前 7:00 のひずみ出力値を用いてモーメントを算出した。なお、人工的に

雪を堆積させた 3/3～3/7 の期間は温度計測に問題が生じたため結果を示していないが、この期間においても表面温度は図 4-8 と同様の傾向を示すと考えられる。

3/3～3/7 の期間の曲げモーメント分布を図 4-9 に示す。側圧の増加に伴い、試験体中央部のモーメントが増加し、反曲点が下向きに移動している。

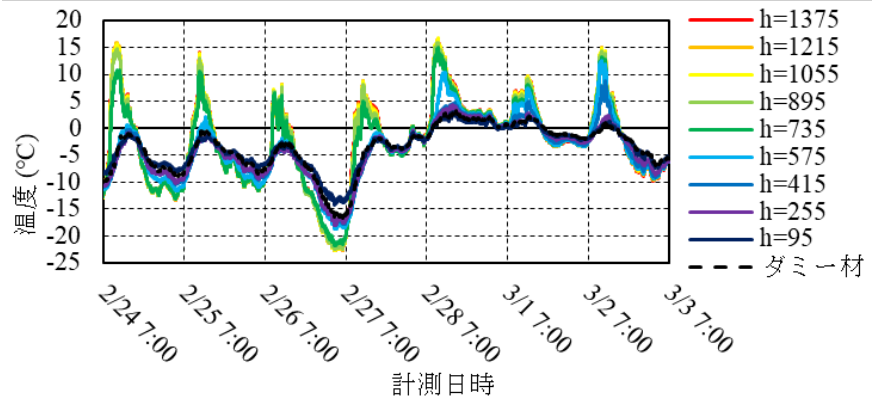


図 4-8　雪追加殿試験体とダミー材の表面温度の推移

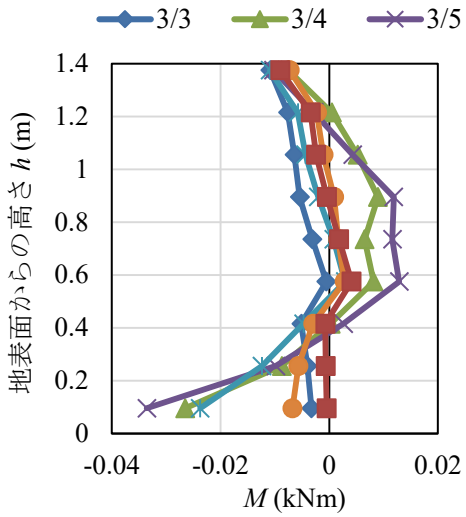


図 4-9　モーメント分布

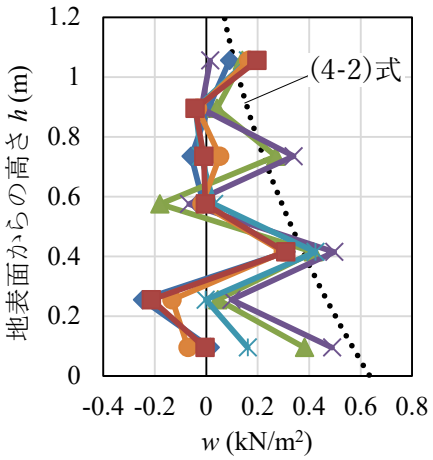


図 4-10　側圧の分布

3）側圧の分布

計測値から算出した側圧を図 4-10 に示す。既往の計測結果の包絡線である次式 [31]を図中に示す。

$$F_l = 9.8 \times 10^{-3} \times 20 \times {d_s}^2 \qquad (4-2)$$

ここで、F_l : 側圧、d_s : 積雪表面からの深さを示す。本計測で得られた側圧の最大値と既往の計測値は概概ね整合し、室内試験より小さい傾向にある。側圧は、雪を追加した 3/3 以降から経時的に増加する傾向を示した。これは融雪により雪の密度が上昇するためと考えられる。側圧は 3/5 に最大となった後、減少に転じ 3/7 には雪を追加する前と同程度の大きさに減少した。以上より、側圧に起因する被害のリスクは、雪質が変化する融雪期において特に高まると考えられる。側圧の算定値がゼロに近い計測点があるが、この理由として積雪に空隙があり、雪が試験体表面に接していないことなどが考えられる。

４．４ まとめ

- 気温を一定（-5 ℃）にした低温室内で、内部にロードセルを設置した鋼製箱に雪質の異なる雪を投入し、作用する側圧を計測した。その結果、雪密度が大きいほど側圧は増加する傾向が明らかになった。積雪深が 90cm の場合、押し固めた雪（密度 0.28 g/cm^3）で側圧は最大となり、最大値は 1.5 kN/m^2 程度となった。
- 住宅周辺の堆雪状況を再現した試験装置を作成し、側圧の屋外計測を実施した。側圧は気温の上昇とともに増加し、融雪期に注意が必要となることが明らかになった。側圧の最大値は荷重指針の式による値と概ね合致した。

[参考文献]

26) 松下清夫，中島一史，和泉正哲：積雪による側圧の調査研究，日本建築学会論文報告集，Vol.89，p.82，1963

27) 松下清夫，和泉正哲：建築物に加わる外力及び荷重に関する資料(その 8)：積雪密度及び側圧に関する一考察，日本建築学会研究報告，vol.40，pp.49-52，1957

28) 松井源吾：積雪の側圧について，日本建築学会研究報告，vol.14，pp.463-65，1951

29) 木村幸一郎，高橋喜平，古川巌：積雪の屋上處理並に側圧に関する実験，日本建築学会論文集，vol.38，pp.25-28，1949

30) 篠島健二：雪の粘弾性的取扱い，鉄道技術研究報告，No.328，pp.1-56，1962

31) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説（2015），5 章 雪荷重，pp.258-259，2015

５．雪荷重に対する設備機器と防雪構造物の必要部材寸法の試算

前章までの実験結果にもとづいて、設備機器および防雪構造物に作用する荷重を算定し、必要となる部材寸法を試算した。

５．１　設備機器に必要な部材寸法の試算

3 章の計測結果を用いて沈降力が室外機の防雪フードに及ぼす影響を評価する。計算対象とする防雪フードの寸法を図 5-1 に示す。天板の x, y 方向の長さは、一般的な防雪フードの寸法をもとに決定した。天板は単純支持の格子梁にモデル化する。作用する受圧面積あたりの沈降力は、3 章の計測結果より 10 kN / (0.8 m×0.3 m) = 41.7 kN/m² とする。天板は鋼製とし、降伏応力度は f_b = 235 N/mm² とする。沈降力により作用する曲げモーメントにより格子梁中央部が降伏しないように板厚を決定する。

板厚を t = 6 mm とした場合の計算結果を表 5-1 に示す。検定比は 1 未満になっており、天板が降伏しないためには 6 mm の板厚が必要であることがわかる。この板厚は一般的な防雪フードの製品で使用される板厚よりも大きく、沈降力に対する損傷を防ぐためには補強が必要となる可能性がある。

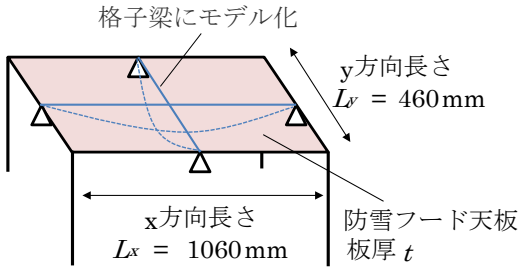


図 5-1　計算対象とする防雪フード

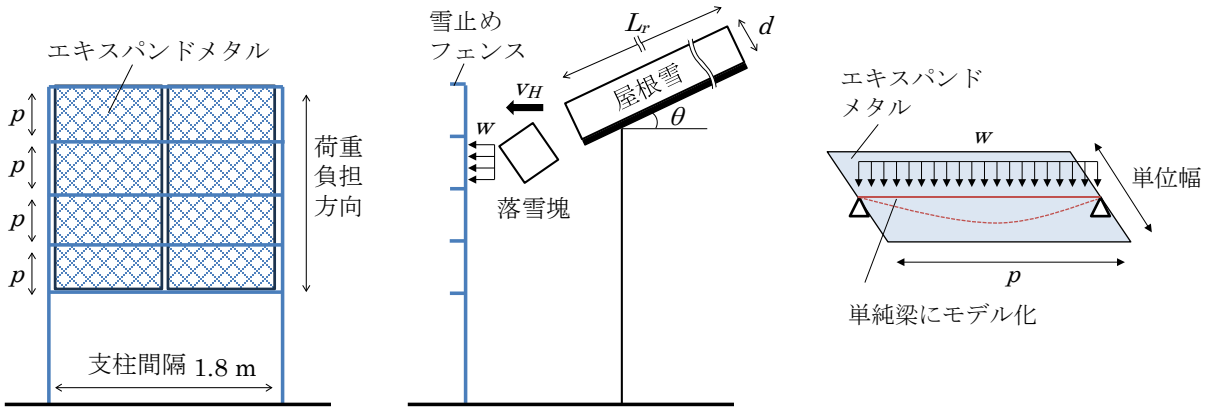
表 5-1　沈降力に対する防雪フードの計算結果

x 方向単位幅あたり荷重	w_x	=	1.4	kN/m
y 方向単位幅あたり荷重	w_y	=	40.2	kN/m
x 方向モーメント	M_x	=	0.2	kNm
y 方向モーメント	M_y	=	1.1	kNm
単位幅あたり断面係数	Z	=	6	mm³
x 方向検定比			0.14	
y 方向検定比			0.75	

５．２　防雪構造物に必要な部材寸法の試算

2 章の衝撃力計算式を用いて衝撃力に対する雪止めフェンスに必要な部材寸法の検討を行う。計算対象は、落雪衝撃力に起因すると思われる変形が多く生じている金網部分とする。計算する雪止めフェンスモデルを図 5-2 に示す。金網はスパン p の単純梁にモデル化し、衝撃力により作用する曲げモーメントにより梁中央部が降伏しないように部材寸法を決定する。衝撃力と雪止めフェンスの計算条件をそれぞれ表 5-2 と表 5-3 に示す。金網の使用部材にはエキスパンドメタル XG14 を仮定する。

衝撃力の計算結果を表 5-4 に、衝撃力に対するエキスパンドメタルの計算結果を表 5-5 に示す。設定した計算条件では、p = 0.45 m という比較的短いピッチで胴縁を配置する必要がある。



(a) 前面　　(b) 側面　　(c) 単純梁へのモデル化

図 5-2　雪止めフェンスモデル

表 5-2　衝撃力の計算条件

雪の密度	ρ	=	0.4	g/cm^3
地上積雪深	d_0	=	130	cm
屋根勾配	θ	=	11.3	°
屋根形状係数	μ_b	=	0.98	
屋根上の積雪深	d	=	1271	mm
雪の引張破壊強度	σ_t	=	0.071	N/mm^2
雪のせん断破壊強度	σ_s	=	0.035	N/mm^2
軒から棟までの長さ	L_r	=	5000	mm
屋根と雪の間の動摩擦係数	μ	=	0	

表 5-3　雪止めフェンスの計算条件

胴縁間隔	p	=	0.45	m
エキスパンドメタルの 1 m あたりの断面係数	Z	=	4.55	cm^3
鋼材の許容応力度	f_b	=	235	N/mm^2

表 5-4　衝撃力の計算結果

雪が引張破壊するときの長さ	${}_tL_2$	=	2547	mm
雪がせん断破壊するときの長さ	${}_sL_2$	=	9127	mm
雪の長さ※	L	=	2547	mm
雪の滑走距離	s	=	3727	mm
水平衝突速度	v_H	=	3.7	m/s
衝撃圧	σ_I	=	88.1	kN/m^2
単位幅あたり衝撃力	w	=	41.2	kN/m

※軒先から飛び出した雪塊が自重で破壊する条件から算出した。

表 5-5　エキスパンドメタルの計算結果

作用する曲げモーメント	M_e	=	1.0	kNm
エキスパンドメタル検定比			0.94	

６．まとめ

・衝撃力の計測

- 衝撃圧は雪塊の密度増加に伴い大きくなる。雪塊が凍結しない場合、含水による雪質変化は密度の増加として扱えるが、雪塊が凍結する場合、同一の密度増加に対して前者よりも大きな割合で衝撃圧は大きくなる。
- 屋根勾配・葺き方は雪塊の衝突速度に影響し、雪塊が凍結しない場合、5寸勾配よりも10寸勾配の方が、横葺より縦葺の方が、衝突速度と衝撃圧は大きくなる。
- 衝撃圧は体積の増加に伴い大きくなり、体積増加に対する衝撃圧増加の割合は、凍結しない雪塊より凍結した雪塊が大きい。
- 衝撃圧の実験式の算定値は既往研究の実測値よりも大きくなった。これは連続して落雪が壁面に衝突する場合では、個々の雪塊の衝撃力が十分に作用しないためと考えられる。

・沈降力の計測

- 桁状の沈降力測定装置を積雪中に埋没させ、自然積雪と散水を行った積雪の沈降力を計測した。2023 年度は、散水による沈降力増加のメカニズムを把握するため、散水した積雪層のサンプリングを行った。その結果、散水により積雪層に氷板が形成される場合、散水量 25 mm/m2 で沈降力は 1.54 倍に増加することを明らかにした。2024 年度は、散水量をパラメータとして沈降力を計測したが、散水量と沈降力の最大値は相関関係を示さなかった。これは散水により融雪が促進されたためと推察される。
- 外壁に設置されたエアコン室外機を模擬した試験体に作用する沈降力を計測した。積雪深が 1.8 m 程度で、沈降力の最大値は約 10 kN となった。

・側圧の計測

- 気温を一定（-5 ℃）にした低温室内で、内部にロードセルを設置した鋼製箱に雪質の異なる雪を投入し、作用する側圧を計測した。その結果、雪密度が大きいほど側圧は増加する傾向が明らかになった。積雪深が 90cm の場合、押し固めた雪（密度 0.28g/cm^3）の側圧が最大となり、最大値は 1.5 kN/m^2 程度となった。
- 住宅周辺の堆雪状況を再現した試験装置を作成し、側圧の屋外計測を実施した。側圧は気温の上昇とともに増加し、融雪期に注意が必要となることが明らかになった。側圧の最大値は荷重指針の式による値と概ね合致した。

・雪荷重に対する設備機器と防雪構造物の必要部材寸法の試算

- 雪の外力の計測結果をもとに構築した実験式を用いて、防雪構造物に必要な断面寸法を算出できるようにした。また、屋根雪荷重のみを考慮した現状の設備用防雪フードは、沈降力に対して破損する可能性があり、補強が必要な可能性があることを示した。

[謝辞]

本研究の実施にあたり、多大なるご協力をいただいた株式会社佐川建設の佐川貴康氏、ならびに令和 5 年まで当研究所に在籍し、北海道教育大学へご転出後も引き続きご尽力いただいた堤拓哉氏に、深く謝意を表する。