

超高層建築物の着雪対策に関する
基礎的検討とケーススタディ

Basic and case study on countermeasures for snow
accretion on high-rise building

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

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization
Building Research Department Northern Regional Building Research Institute

概要 Abstract

超高層建築物の着雪対策に関する基礎的検討とケーススタディ Basic and case study on countermeasures for snow accretion on high-rise building

堤 拓哉¹⁾、八代 直樹²⁾、辻岡 展宏²⁾

Takuya Tsutsumi*, Yasiro Naoki**, Tsujioka Norihiro**

キーワード : 超高層建築物、着雪、風洞実験、屋外曝露実験、ケーススタディ

Keywords : *High-rise building, Snow accretion, Wind tunnel experiment, Outdoor-exposure experiment, Case study*

1. 研究概要

1) 研究の背景

首都圏の超高層建築物では壁面に着雪した雪による落冰雪被害がこれまでも度々発生していたが、2014年2月に関東地方を襲った大雪以降、首都圏では超高層建築物の着雪対策が安全対策上の課題となっている。また、札幌市など積雪寒冷地の大都市においても超高層建築物による再開発計画が進められ、同様の問題が懸念されるが、超高層建築物を対象とした着雪対策に関する研究はこれまで行われていない。

2) 研究の目的

着雪発生位置、着雪発生条件、着雪した雪の経時変化など、着雪対策の検討に必要な基礎的知見を風洞実験および屋外曝露実験により明らかにし、ケーススタディにより着雪対策の具体例を示すことを目的とする。

2. 研究内容

1) 着雪に関する既往知見の整理 (H26年度)

- ・ねらい：文献および資料の調査により着雪に関する既往知見を整理する。
- ・試験項目等：文献および資料の調査

2) 縮小モデルを用いた風洞実験 (H26年度)

- ・ねらい：模擬雪を用いた風洞実験により着雪の発生位置に関する知見を得る。
- ・試験項目等：風洞実験

3) 実大モデルを用いた屋外曝露実験 (H26-27年度)

- ・ねらい：着雪と雪質の関係、気象条件などの着雪発生条件、着雪した雪の経時変化に関する知見を得る。
- ・試験項目等：着雪状況の観測、気象観測

4) 超高層建築物を対象とした着雪対策のケーススタディ (H26-27年度)

- ・ねらい：超高層建築物を対象としたケーススタディにより着雪対策を検討する。
- ・試験項目等：気象分析、風洞実験、屋外曝露実験

¹⁾ 環境研究部環境グループ主査 ²⁾ 鹿島建設株式会社

*Chief Coordinator. Environment Group, Environmental Research Division **KAJIMA Corporation

3. 研究成果

1) 着雪に関する既往知見の整理

首都圏における超高層建築物では、湿雪条件に加え高度による風速増速と気温低下が重なるため、着雪が発生しやすくなることを明らかにし、着雪発生条件を整理した（図1）。

2) 縮小モデルを用いた風洞実験

超高層建築物では、風の流線変形が、前方から起こるため雪粒子の衝突が建物端部で起こりやすく、着雪発生位置は外縁や上層階の割合が多いことを明らかにした（図2）。

3) 着雪に関する屋外曝露実験

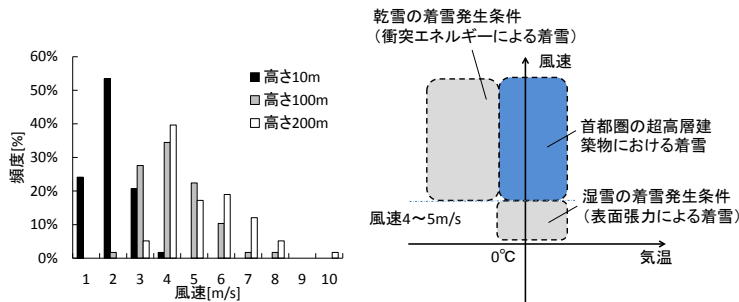
部材に着雪した雪は日射により融雪するが、外気温ならびに風による部材の冷却効果により氷結するなど、経時的に状態が大きく変化することを明らかにした（図3）。

4) 超高層建築物を対象とした着雪対策のケーススタディ

実際に計画されている4つの超高層建築物を対象に着雪対策の具体的検討を行い、検討結果を計画に反映した（図4）。

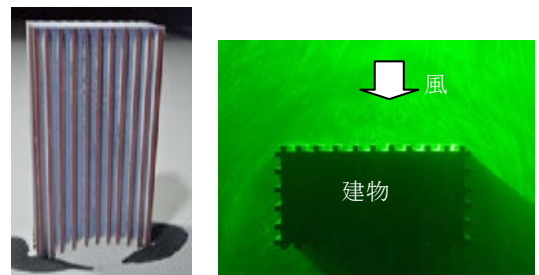
4. 今後の見通し

- ・共同研究先においては、4つの超高層建築物の実計画で反映すると共に設計資料として活用を図る。
- ・北総研においては、得られた知見を受託研究、依頼試験、技術相談等において活用を図る。
- ・研究成果は、主として積雪期間が極めて短い首都圏を対象に得られた知見であること、温暖地の多雪地では想定される着雪量がより多いこと、寒冷地では雪質の違いや氷結の影響があること、など気象条件の違いに留意する必要がある。



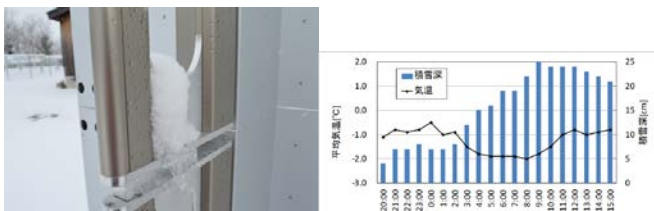
(a)降雪時の風速発生頻度 (b)着雪発生条件の整理

図1 首都圏の超高層建築物における着雪発生条件の整理



(a)実験モデル (b)雪粒子の衝突までの流線

図2 風洞実験による着雪発生位置の推定



(a)着雪および氷結状況 (b)着雪発生前後の気象データ

図3 屋外曝露実験による着雪後の状況変化の把握



図4 超高層建築物を対象としたケーススタディ

目 次

1.	はじめに1
2.	着雪に関する既往知見の整理2
3.	縮小モデルを用いた風洞実験5
4.	着雪に関する屋外曝露実験8
5.	超高層建築物を対象としたケーススタディ12
6.	まとめ21

1. はじめに

(1) 研究の背景

多雪地域ではない首都圏においても、超高層建築物の上層階からの落雪により下層階のアトリウムガラスが破損するなど、度々、雪による被害が発生している^{1,2)}。近年、建築物の高層化と共にルーバーやフィンといった多種多様な外装材が用いられるようになり、超高層建築物の外装材に付着した雪（着雪）の落下の問題が設計上の課題として取り上げられるようになってきている^{注1)}。

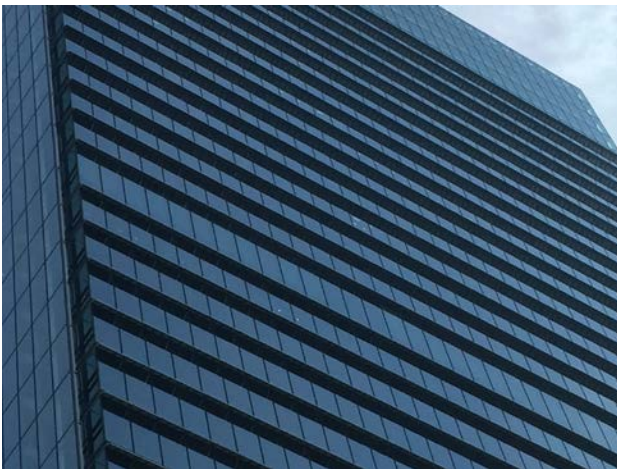


写真 1-1 水平ルーバーの例

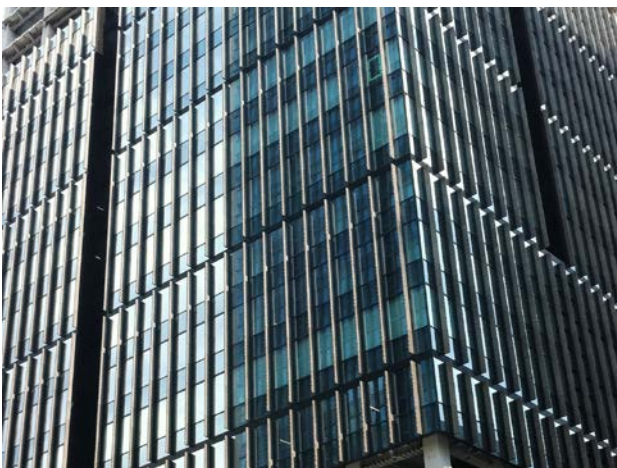


写真 1-2 縦フィンの例

2014年2月には関東甲信地方が大雪に見舞われるなど、首都圏において超高層建築物の着雪対策の関心が高まっているが、技術的資料は十分に整備されておらず、JASS14カーテンウォール工事に僅かな記

載があるのみである³⁾。

着雪による雪の問題は屋根雪荷重のような長期間に渡り累積された現象ではなく、1回の降雪でも発生する事象であることに特徴があるが、超高層建築物を対象とした着雪対策に関する研究はこれまで行われていない。

また、札幌市など積雪寒冷地の大都市においても超高層建築物による再開発計画が進められており、同様の問題が懸念される。

(2) 研究の目的

本研究は、着雪発生位置、着雪発生条件、着雪した雪の経時変化など、着雪対策の検討に必要な基礎的知見を風洞実験および屋外曝露実験により明らかにし、ケーススタディにより着雪対策の具体例を示すことを目的とする。

(3) 研究内容

研究内容は下記の4項目である。

1) 着雪に関する既往知見の整理 (H26年度)

- ・担当者：鹿島建設、北総研 堤
- ・ねらい：文献および資料の調査により着雪に関する既往知見を整理する。

2) 縮小モデルを用いた風洞実験 (H26年度)

- ・担当者：北総研 堤
- ・ねらい：模擬雪を用いた風洞実験により着雪の発生位置に関する知見を得る。

3) 実大モデルを用いた屋外曝露実験 (H26-27年度)

- ・担当者：北総研 堤
- ・ねらい：着雪と雪質の関係、気象条件などの着雪発生条件、着雪した雪の経時変化に関する知見を得る。

4) 超高層建築物を対象とした着雪対策のケーススタディ (H26-27年度)

- ・担当者：鹿島建設、北総研 堤
- ・ねらい：超高層建築物を対象としたケーススタディにより着雪対策を検討する。

[注記]

注1)：超高層建築物：現在では通常15階程度以上の建物、もしくは100m以上の建物をさすことが多い（日本建築学会編：建築学用語辞典）。本研究では、100m以上の建物をさす場合に本語句を用いる。

[参考文献]

- 1) 苔米地司, 千葉隆弘: 建築設計において考慮しなければならない着雪・冠雪について, 「建築設計と雪」の問題を考える, 日本建築学会構造運営委員会 (荷重・雪荷重) パネルディスカッション資料, pp18-21, 2006. 10
- 2) 日経B P : 検証アトリウム建築, 日経アーキテクチャー, pp. 156-159, 1995年10月9日号
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, JASS14 カーテンウォール工事, p124, 2012. 2

2. 着雪に関する既往知見の整理

(1) 着雪に関する既往研究

着雪に関する代表的な既往研究として、電線着雪に関する一連の研究が挙げられる^{例えば 1)~3)}。電力施設では電線に着雪した雪が成長すると、ギャロッピング現象と呼ばれる自励振動が発生し、送電設備が破損する事故に繋がることから、その発生機構と発達防止に関する研究が古くから行われてきた。電線着雪の発生条件は季節風型着雪 (弱風時) と低気圧型着雪 (強風時) に分類され、季節風型着雪は風速 3m/s以下、低気圧型着雪は風速 10m/sとされ、その温度域は比較的高く、湿雪条件である $-1\sim 2^{\circ}\text{C}$ とされている⁴⁾。この温度域は本研究の対象とする首都圏の降雪時の気象条件と合致している⁵⁾。湿雪はその中に含まれる水分の表面張力により、物体に付着しやすい特徴を持つ (写真 2-1)。

松下らは⁶⁾、全国の気象データを用い、湿雪条件を対象に1冬期間に着雪が発生する日数の平均値を地域別に検討している。その結果によれば、首都圏における平均着雪発生日数は3日以内と少ないものの、着雪の程度を表す衝突降水強度が強いことが示されている。



写真 2-1 気温が高い条件で発生した着雪現象の例 (旭川市、撮影日 2014. 11. 4)

一方、着雪現象は気温の低い条件でも発生することが北海道における観測で示されている^{7), 8)}。気温が低い条件では、雪の中に含まれる水分量が少ないため、湿雪とは異なるメカニズムで物体に付着する。すなわち、強い風によって雪粒子が速い速度で物体に衝突し、運動エネルギーが熱エネルギーに変換され、その過程で融雪水が発生し、その再凍結により物体表面に凍着するものである (写真 2-2)。気温が低い条件での着雪は概ね風速 5m/s以上の条件とされている⁴⁾。

首都圏の超高層建築物では、高さが概ね 200m 以内であれば、その降雪時の温度条件から湿雪による着雪現象を念頭に対策を検討すればよいと考える。200m を超える超高層建築物の場合は、地表と建物頂部の温度差が 2°C 以上になるため、気温が低い条件での着雪現象も併せて考慮する必要がある。



写真 2-2 気温が低い条件で発生した着雪現象の例 (札幌市、撮影日 2009. 1. 6)

(2) 首都圏を対象とした気象データの分析

1) 風向風速

東京管区気象台の気象データを例に、首都圏における降雪時の気象的特徴を調べる。図 2-1 に過去 32 年間 (1984-2015) における降雪時 (日降雪量 1cm 以上) における風向頻度を示す。降雪時において最も多い風向は NNW の 49% であり、N~NW の範囲で 90% を占めることから、東京においては NNW の風を念頭に着雪対策の検討を行う必要がある。

図 2-2 に降雪時の風速頻度を示す。東京管区気象台が使用している風向風速計の設置高さが 2007 年より変更となったため、使用したデータは 1984-2006 の 22 年間を対象とした。この間の風速計の設置高さは 74. 5m であり、風速の値は (2-1) 式を用いて、10m、100m、200m に換算した。

$$U_z = U_{SDP} \left(\frac{Z}{Z_{SDP}} \right)^{\alpha_{SITE}} \quad (2-1)$$

ここで、 U_z は高さ Z における風速[m/s]、気象観測点における風速の測定高さ Z_{SDP} の風速 U_{SDP} 、対象地における風速の鉛直分布を表すべき指数 α_{SITE} である。ここでは地表面粗度区分をIV、べき指数 $\alpha_{SITE}=0.27$ とした。図2-2によれば、地表付近の高さ10mでは降雪時の風速は2m/sが過半を占めているが、高さ100mおよび高さ200mになると4m/sの頻度が最も多く、高さ200mでは風速8~10m/sに達する場合もある。

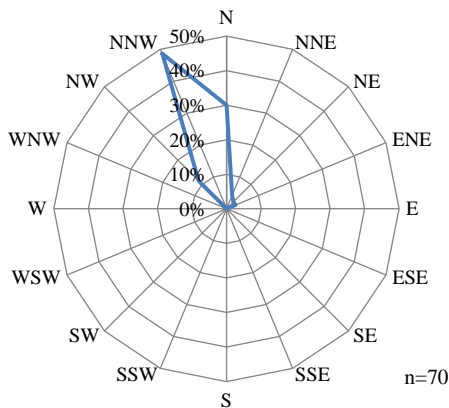


図2-1 降雪時の風向頻度
(東京管区気象台 1984-2015)

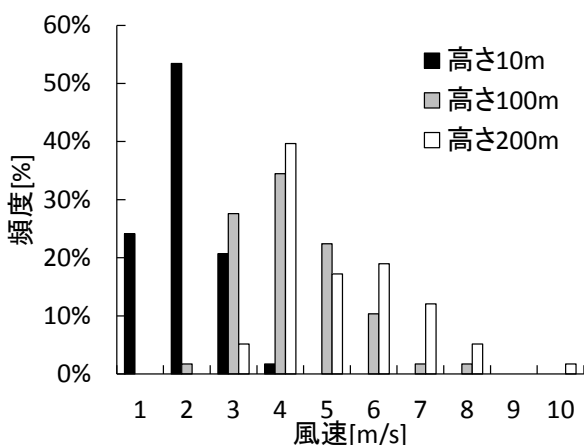


図2-2 降雪時の風速頻度分布
(東京管区気象台 1984-2006)

このように超高層建築物の上層階では風速が速くなり、雪は風により横から吹き付ける状態になる(図

2-3)。このため、上層階になるほど吹付ける飛雪流量(単位時間単位面積を通過する雪の質量)が多くなる。着雪の発生と発達には吹付ける雪の量が重要な指標となる。

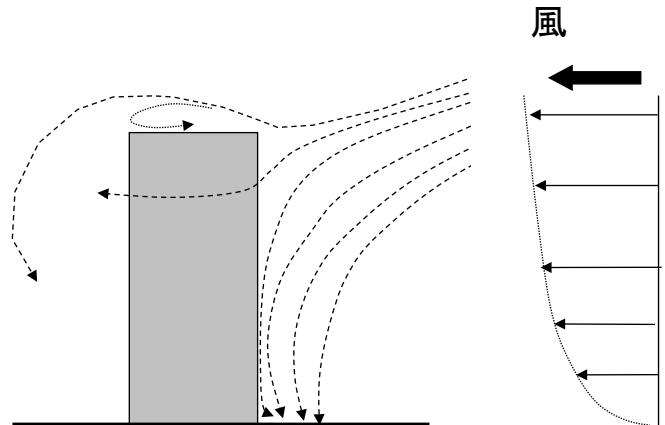


図2-3 超高層建築物と風速の関係⁹⁾

2) 衝突降水量

松下らによれば、吹き付ける降水量(降雪時には雪の量と同義)を表す衝突降水強度は(2-2)式で定義され、風速が増すと衝突降水強度が増える⁶⁾。すなわち、無風状態であれば雪は上空から鉛直方向に落下するため外壁に着雪することは無いが、横から強い風が吹く場合は、上空から落下する過程で風に流されて外壁に衝突する降水量(雪の質量)が増える。超高層建築物に本式を適用すると、上層階ほど吹き付ける風が強くなり、着雪量が増える可能性が高いことに対応している。

$$P_n = P \sqrt{(V/w)^2 + 1} \quad (2-2)$$

ここで、 P_n は衝突降水強度[mm]、 P は地上降水量[mm]、 V は風速[m/s]、 w は降雪粒子の落下速度(≒1m/s)である。

首都圏で大雪となった2014年2月8日における東京管区気象台の日平均風速および日降水量を用いて、衝突降水強度を高度別に求めると図2-4のようになる。図2-4に示すように、地表の降水量は30mmであるが上層階ほど風速が増すため衝突降水強度が大きくなり、上空100mでは、地上の約6.6倍(194mm)、上空200mでは地上の約8倍(233mm)に達する。

2014年2月8日の地上の最深積雪深は22cmであるので、地上100mの外壁では、地上の6.6倍に相当する雪が吹きつけていることになる。一方、「地面」

が空から落ちてくる雪を補足する割合（捕捉率）はほぼ 100%とみなせるが、建物周囲の風の流れは複雑であるため（図 2-3）、外壁の向きや位置によって衝突降水強度が変化し、外装材の形状によって捕捉率が異なる。すなわち衝突降水強度が大きくなる位置で捕捉率が高い部材形状にすると、着雪量が増えることに繋がる。これらの影響については 3 章以降で検討する。

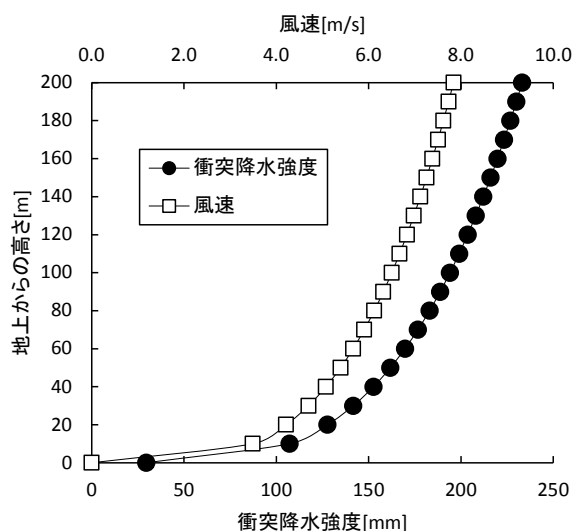


図 2-4 地上からの高さや風速ならびに衝突降水強度との関係

3) 気温と降雪現象

地上からの高さの影響は風速のみならず気温と降雪の有無にも影響を及ぼす。一般に降雪現象が雨になるか雪になるかは気温に依存する¹⁰⁾。気温は地上からの高さとともに下がるため、超高層建築物の上層階は地上よりも雪に見舞われる頻度が多くなることが予想される。仮に気温の低減率を高度差 100mあたり 1℃とすると¹¹⁾、上空 200mは地上よりも 2℃低いことになる。雨と雪の境界温度を 3℃とし¹⁰⁾、高度別に当該温度以下になる日数をカウントすると図 2-5 のようになる。各年における地上との比を平均すると、高さ 100mでは地上の 1.6 倍、高さ 200mでは地上の 2.1 倍になる。このように地上からの高度が高くなると降雪に見舞われ、着雪現象が発生する頻度が多くなる。

高度による気温の低下は降雪頻度の増加の他、着雪した雪の氷結にも影響を及ぼす。着雪した雪が融け残った場合、夜間になるなど気温が低下し氷点下を下回ると着雪した水分を多く含む雪は氷結する恐れが出てくるが、高度が高くなるほど、その恐れは

強くなる。また前述のように風が強いため、風による冷却効果も相乗的に着雪した雪を氷結する方向に働く。

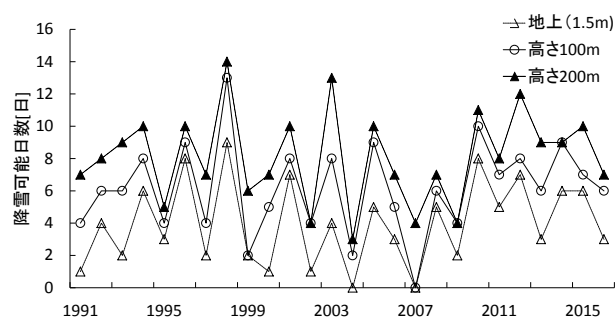


図 2-5 高度別の降雪可能日数（東京 1991-2016）

4) 着雪した雪の状態変化

庇を例に着雪した雪の状態変化の概念を図 2-6 に示す。庇などの傾斜部に積もった雪は水分を多く含むため水下側に水分が集まり、水下側先端部で氷結が生じやすくなる。また、材料がアルミ等の場合は気温と同程度まで部材温度が下がり、風を受けると冷却され、より氷結が生じやすくなる。気温上昇や日が当たるなどした場合に氷結した雪の塊が落雪する状況が生じる。図 2-7 より首都圏の大雪時の気象状況を見ると、降雪時の気温低下と、数日で気温が著しく上昇する状況が示されている。

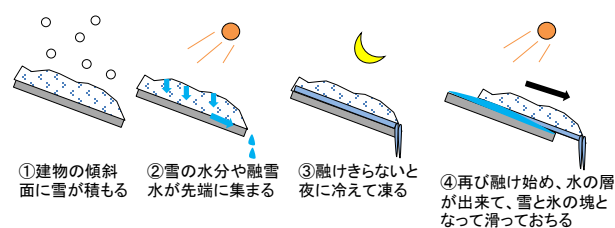


図 2-6 着雪した雪の状態変化⁹⁾

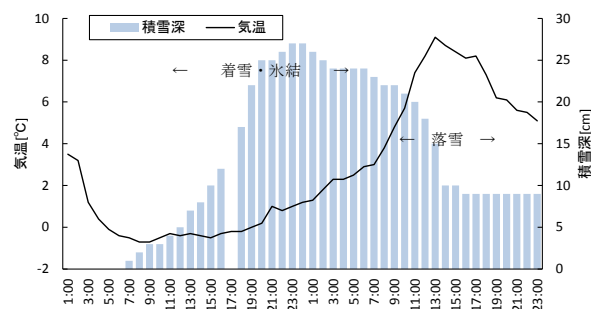


図 2-7 大雪時の気象状況（東京：2014/2/8-9）

(3) 首都圏の超高層建築物における着雪発生条件

既往研究における着雪発生条件、首都圏の気象データの分析結果を基に、首都圏の超高層建築物における着雪発生条件を整理すると図2-8ようになる。図2-8に示すように首都圏の超高層建築物における着雪現象は、衝突エネルギーによる着雪現象（強風による着雪）と表面張力による着雪現象（湿雪による着雪）が組み合わさるため、より着雪が発生しやすい条件になる。

また、超高層建築物は周辺建物よりも高く、強風に曝される条件であり、風速は高度と共に増加するため、上層階を中心に外壁に衝突する雪の量（衝突降水強度）が増え、着雪量が地上よりも多くなる。高度の影響は衝突する雪の量のみならず、降雪現象が発生する頻度にも影響を及ぼし、着雪した雪の氷結にも関わる。

以上のように、首都圏の超高層建築物は、主として高度がもたらす特殊性から、一般的な雪対策とは異なる視点で、着雪対策を講ずる必要がある。

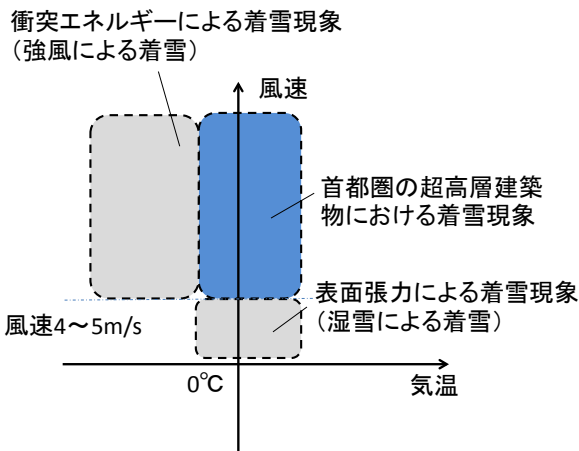


図2-8 首都圏超高層建築物における着雪発生条件⁹⁾

[参考文献]

- 1) 五島員雄, 黒岩大助: 北海道における電線着雪とその発達抑止に関する研究, 雪氷, No. 37, pp. 182-191, 1975
- 2) 若濱五郎, 小林俊一, 対馬数年, 鈴木重尚, 矢野勝俊: 電線着雪の風洞実験, 低温科学物理編, No. 36, pp. 169-180, 1979. 3
- 3) 屋値康平, 中間宏也, 渡邊真人, 坂田学, 高橋毅: 送電用がいしの着雪特性の検討-新潟下越におけるフィールド観測および風洞実験, 電力中央研究所報告, H11014, 2012
- 4) 前野紀一, 遠藤八十一, 秋田谷英次, 小林俊一, 竹内政夫: 雪崩と吹雪, 古今書院, pp. 207-232, 2000. 2

- 5) 日本建築学会編: 雪と建築, 技報堂出版, pp. 16-17, 2010. 8
- 6) 松下拓樹, 西尾文彦: 着雪を生じる降水の気候学的特徴, 雪氷, 68巻, 5号, pp. 421-432, 2006. 6
- 7) 竹内政夫: 道路標識への着雪とその防止, 雪氷, 40巻, 3号, pp. 15-25, 1978. 5
- 8) 苫米地司, 千葉隆弘, 佐藤威, 堤拓哉, 高橋徹, 伊東敏幸: 構造物の着雪対策に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 659, pp. 45-52, 2011. 11
- 9) 日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 I, pp. 174-182, 2016. 2
- 10) 菊地勝弘, 大畑哲夫, 東浦将夫: 降雪現象と積雪現象, 古今書院, pp. 157-158, 1995
- 11) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp. 32-33, 1994

3. 縮小モデルを用いた風洞実験

(1) 目的

2. 2) で述べたように、壁面に衝突する降水(雪)の強度は風速に依存するが、建物周囲の風の流れは複雑であるため、建物部位によって着雪量にも差が生じると考える。また外装部材の凹凸によっても、衝突する雪を捕捉する程度(捕捉率)が変化することが考えられる。以上の課題を明らかにするため、ここでは縮小モデルと模擬雪を用いた風洞実験により着雪する部位の傾向を実験的に検討する。本検討で得られた知見は着雪対策を検討する際、着雪注意箇所の抽出や平面計画に基づいた安全対策の検討に役立てることが出来る。

(2) 実験方法

試験には、図3-1に示す粉体風洞装置を用いた。風洞装置の仕様を表3-1に示す。風洞は回流型密閉式で、測定部断面は幅1.5m、高さ0.7m、長さ9.5m(ターンテーブル中心まで7.0m)である。送風機はベルト駆動の遠心送風機で、最大風速は10m/sである。模擬雪は、粉体供給装置のタンクに入れた後、コンプレッサーを使いタンクに圧力を加え、オートフィードにより所定の量と速度で測定部上流の供給ノズルから風洞内に供給する。ノズルから模擬雪を気流中に放出することにより測定部上流に吹雪を発生させ、モデルに着雪させる(図3-2)。測定部風下に運ばれた模擬雪は、風路風下側に組み込まれた捕集装置(バグフィルター)により回収し、風路内を模擬雪が回流しない仕組みになっている。

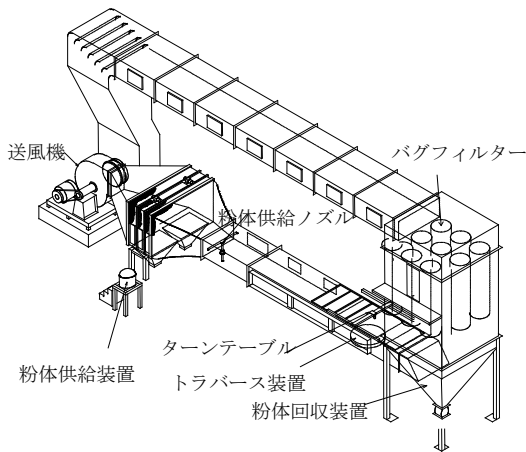


図 3-1 粉体風洞装置

表 3-1 粉体風洞装置の仕様

本 体	型 式	縦型密閉単一回流型
	測定胴断面	幅 1.5m×高さ 0.7m
	測定胴長さ	9.5m
	縮流比	1 : 5
	ターンテーブル	φ 1.2m
送風機	型 式	片吸込遠心送風機
	風 速	0.5~10m/sec
	風 量	630m ³ /min (max)
	風 圧	1960Pa

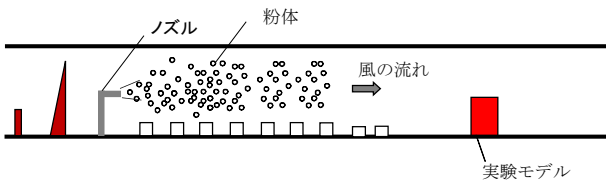


図 3-2 実験概要

(3) 実験モデル

実験モデルは縮尺 1/500 (高さ 100m 相当) の超高層建築物の形状を模擬したモデル (H200mm×W100mm×D50mm) とした。外装部材無しモデル (基準モデル)、外装部材をデフォルメした材を縦方向に取り付けたモデル (縦部材モデル)、横方向に取り付けたモデル (横部材モデル) の 3 種類 (写真 3-1) を実験に供した。外装部材は建物四周に等間隔で配置している。実験モデルの設置状況を写真 3-2 に示す。

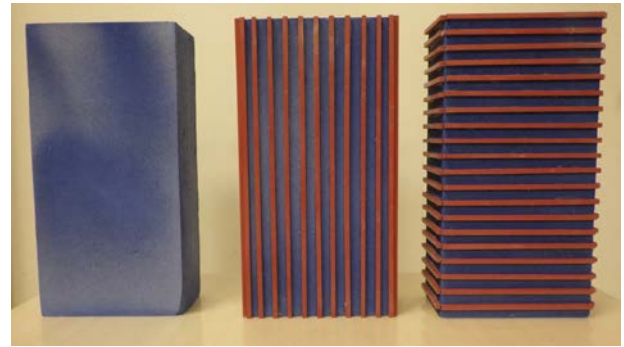


写真 3-1 実験モデル (左: 基準モデル、中: 縦部材モデル、右: 横部材モデル)

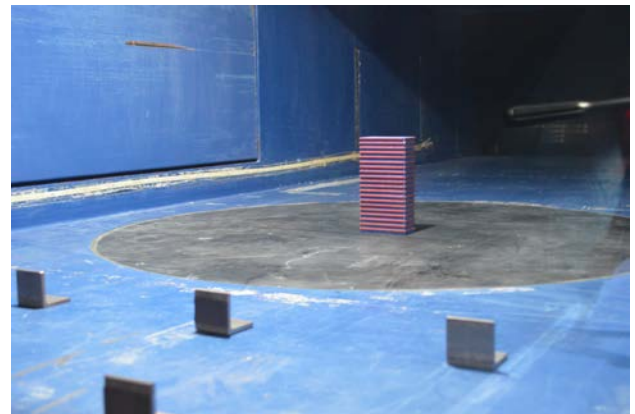


写真 3-2 実験モデルの設置状況

(4) 実験条件

対象地点は東京中心部を想定し地表面粗度区分Ⅳに近似した気流で試験を行う (図 3-2)。

実験風速は、Anno の提案による基準風速と粒子の臨界摩擦速度の比から求める換算式 (3-1) により求めた¹⁾。U は速度 (m/s)、A は定数、 U_{*c}^* は粒子が移動を開始する時の摩擦速度 (臨界摩擦速度)、P、m は実現象および風洞実験を示す。

活性白土を模擬雪として用いた場合、 A_m/A_p は 1.375 となる。 U_p は東京の大雪時 (2014/2/8) の日平均風速 4.8m/s とし、表 3-2 より自然雪の移動臨界摩擦速度 U_{*c}^* を 0.2m/s、活性白土の移動臨界摩擦速度 U_{*c}^* を 0.18m/s とすると、実験風速 U_m は 3.2m/s となる。風向は見付面積が最も大きい面に対し、直交方向とした。

また、模擬雪の壁面付近における挙動をレーザーシート (日本レーザー社製 1.5W) により可視化した。

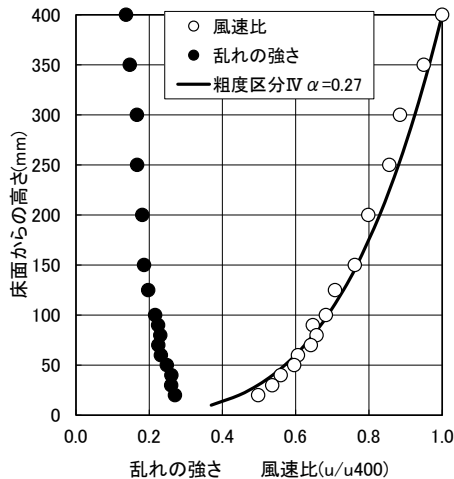


図 3-2 気流条件

$$\frac{U_p}{U_m} = \frac{A_m \cdot U^{*tp}}{A_p \cdot U^{*tm}} \quad (3-1)$$

表 3-2 自然雪と活性白土の物性

項目	自然雪	活性白土
平均粒子径 d(mm)	0.3~3	0.020
かさ密度(g/cm ³)	0.03~0.2	0.47
移動臨界摩擦速度 U [*] _t (m/s)	0.10-0.30	0.16-0.20
安息角(°)	45~50	46

着雪性状と関係のある粒子の粘着性は安息角で表され、活性白土と自然雪の安息角は等しい。粒径比については、自然雪の粒子径(d)は雪質や測定場所により異なるが、表 3-2 よりおよそ 1/10~1/100 であり、模型の大きさよりも十分に小さいため実験上の問題はない。模擬雪の供給量は 5kg とし、供給時間は 10 分とした。時間と長さの縮尺比の関係(3-2)から、本試験は実現象において 83 時間の降雪が続いた条件に相当する。

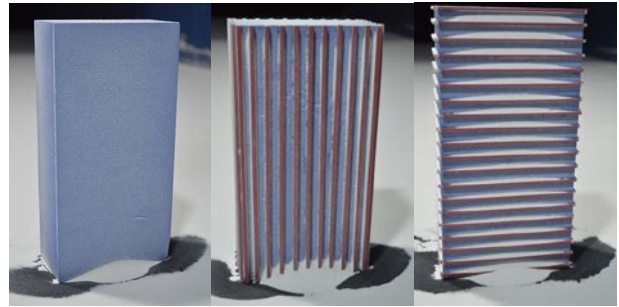
$$L_p/T_p = L_m/T_m \quad (3-2)$$

ここで L_p : 実現象の積雪深, L_m : 風洞試験の積雪深, T_p : 実現象の時間, T_m : 風洞試験での時間である。

(5) 着雪状況

写真 3-2 に実験後の各モデルの着雪状況を示す。標準モデルの着雪状況(写真 3-2(a))については、壁

面の着雪に明確な部位毎の差異はみられない。これは、表面に凹凸が無いいため、壁面に吹付けられた模擬雪が捕捉されないためと考える。一方、縦部材モデル(写真 3-2(b))の着雪状況を見ると、外縁部の部材に沿った着雪が確認できる。横部材モデル(写真 3-2(c))については、他のモデルに比べると着雪量が最も多く、上層階になるにつれ着雪量が増える傾向にある。



(a)標準モデル (b)縦部材モデル (c)横部材モデル
写真 3-2 着雪状況

(6) 着雪する粒子の挙動

レーザーシートで可視化した模擬雪の挙動を写真 3-3~3-5 に示す。写真 3-3 より標準モデルにおける粒子の挙動をみると、風によりモデルに吹付けられた粒子の一部は建物から離れた風上側より、モデルを避けるように流れている。モデルの中心付近では、モデルを避けられなかった粒子が壁面に衝突しているが、壁面に沿った流れによりモデルの外縁に向け移流し、最終的に風下側に流出している。

一方、縦部材モデルをみると(写真 3-4)、風上側でモデルを避けようとする流れは共通であるが、衝突後に縦部材により壁面に沿った流れが妨げられると共に、部材付近で小さな渦が発生している。壁面に沿った流れにのった粒子は、この縦部材により形成された小さな渦に取り込まれて着雪していると考えられる。モデル風上側では、モデルを避けようとする風の流れが主であるために、相対的にモデル外縁に流れる粒子の量が多くなり、外縁の縦部材において着雪量が相対的に多い傾向になったと考える。

横部材モデルの上層階における断面方向の可視化画像をみると(写真 3-5)、上層階風上側から壁面に吹付けられた粒子は、建物頂部に向かって流れており、この影響により上層階の部材において着雪量が相対的に多くなったと考えられる。また、壁面に衝

突した粒子は横部材により上下方向への移動が拘束されるため、他のモデルに比べて着雪量が多くなると考える。

以上から、壁面の着雪部位には建物全体の風の流れと外装部材により形成される小さな流れが影響している。建物全体の風の流れの傾向をみると、水平方向には建物を避けるような外縁部への流れ（写真3-3、3-4）が特徴的であり、この流れの影響で建物端部（外縁、上層階）での着雪量が多くなると考える。一方、部材が風に及ぼす影響は、局所的ではあるものの、壁面に沿って流れる粒子を拘束する働きを持つ。特に横部材（水平ルーバー等）は流れている粒子を堆積させやすい特徴を持っている。

着雪位置を踏まえて安全対策を検討する際には、このような風の流れの傾向を踏まえ、着雪発生位置を予測する必要がある。

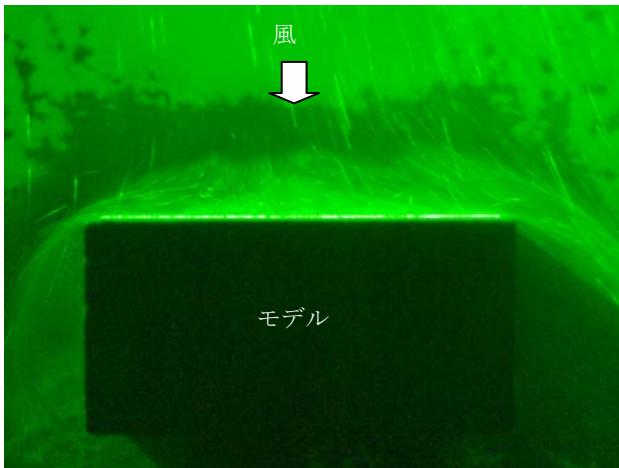


写真 3-3 標準モデルにおける粒子の挙動

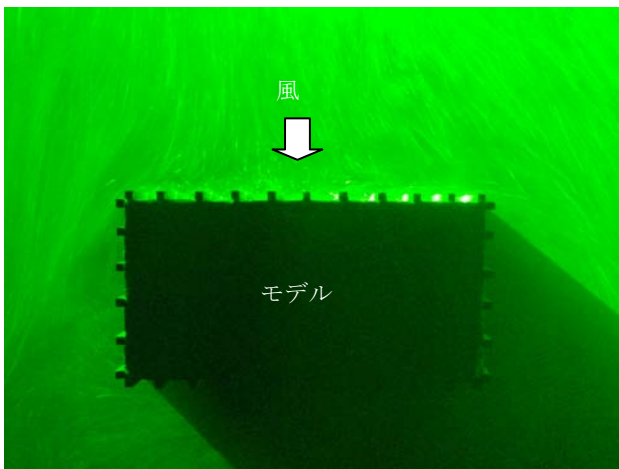


写真 3-4 縦部材モデルにおける粒子の挙動

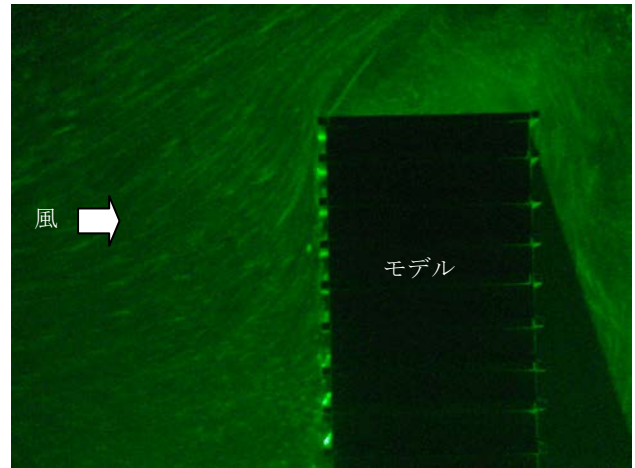


写真 3-5 横部材モデルにおける粒子の挙動

[参考文献]

- 1) Y. Anno : Requirements for modeling of a snowdrift, Cold Regions Science and Technology, Vol. 8, pp. 241-252, 1984.

4. 着雪に関する屋外曝露実験

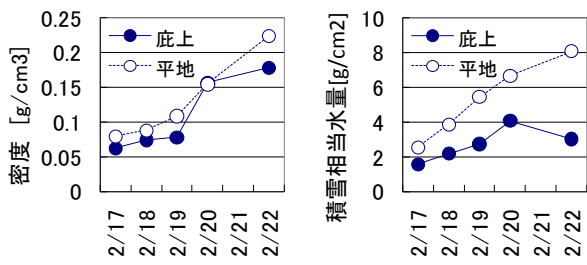
外装材に堆積した雪は地上に積もった雪と異なる融雪過程を経ることが既往研究より明らかとなっている（写真4-1、図4-1）¹⁾。写真4-1(b)に示すようにルーバー庇では部材の空隙から融雪による氷柱が形成されている。図4-1は、地上とルーバー庇上の積雪密度および雪の重量（積雪相当水量）の比較結果の例である。積雪密度の差については、庇上の積雪は融雪水が抜けやすいため、湿潤変態の進行が遅く、密度の増加が緩やかであったためと考える。積雪相当水量の差が大きいのは、庇の下面側が外気に曝されているため、庇上の融雪は上面のみでなく下面からも進行することと空隙からの雪の落下が影響しているためと考えられる。

本章では実物大の外装材を用いた屋外曝露実験により外装材に着雪した雪が変化する過程を把握する。



(a)旭川市(2009/01/08) (b)札幌市(2009/02/24)

写真 4-1 ルーバー庇の積雪状況の例



(a) 積雪密度 (b) 積雪相当水量

図 4-1 ルーバー底上の積雪と地上積雪の比較 (新庄市での測定例)

(1) 実験方法

実験には写真 4-2 に示す外壁に縦フィンを取り付けたモデル (高さ 2300×幅 1800) を使用した。外壁と縦フィンはアルミ材で構成されている。



写真 4-2 実験モデル (縦フィン)

着雪状況および着雪した雪の変化過程はインターバルカメラ (パイコム社製 TLC200) を用いて 10 分間隔で記録した。夜間についても外灯の照明により撮影した。曝露実験は首都圏の超高層建築物の高層階に相当する気象条件が見込める初冬期に行うこととし、2014 年 11 月から 2014 年 12 月にかけて実施した。試験体は降雪時の卓越風向側 (西) に向けて設置した。

曝露実験地である旭川市と首都圏 (東京都) との気象条件の対応方法については、降雪時の外気温を目安とし、図 4-2 に示す 2014 年 2 月 8 日の大雪時における気象条件 (平均気温 -0.4°C) を念頭に、高度の影響による温度低下を踏まえて -2°C 以上における着雪時のデータを用いることとした。

積雪深の対応については、旭川市の積雪深は累積

的な降雪により増え、首都圏の積雪深は 1 回の降雪で最深積雪深に達することから、実験モデルで着雪が発生した際の積雪深の前後差 (降雪量に相当) を東京の年最大積雪深の再現期待値 (図 4-3、表 4-1) と対応させた²⁾。

表 4-1 より曝露実験における着雪時の降雪量が 10cm であれば首都圏では平年並 (再現期間 1~2 年) の積雪深に相当し、着雪時の降雪量が 20cm であれば 10 年に一度の大雪 (再現期間 10 年) の積雪深に相当することとした。

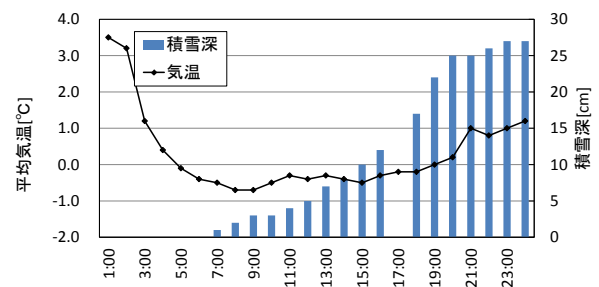


図 4-2 東京の大雪時 (2014 年 2 月 8 日) における降雪時間帯の気象状況

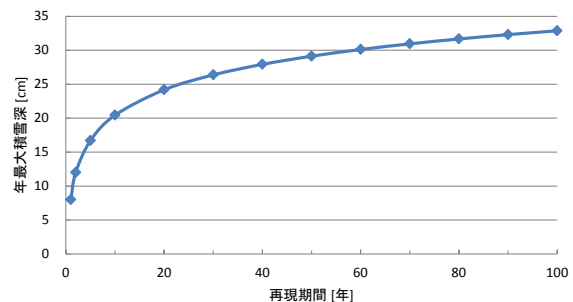


図 4-3 東京の年最大積雪深の再現期待値

表 4-1 東京の年最大積雪深の再現期待値

再現期間 (年)	最大積雪深 (cm)
1	8
2	12
5	17
10	20
20	24
50	29
100	33

(2) 実験結果

図 4-4 に実験期間中の気象状況を示す。 -2°C 以上での着雪現象は 3 回発生し、平年並みの降雪による着雪現象が 1 回、大雪相当の降雪による着雪現象が 2 回であった。

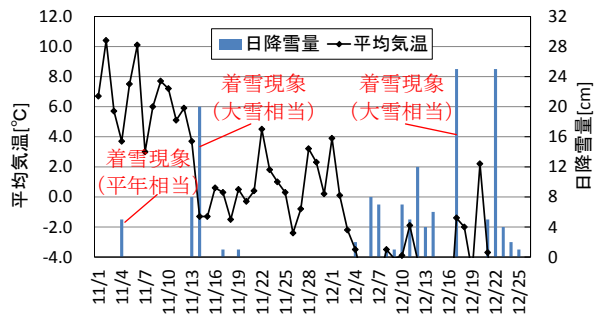


図 4-4 曝露期間中の気象状況

1) 2014 年 11 月 4 日に発生した着雪現象

着雪発生時の気象状況を図 4-5、着雪状況を写真 4-3 に示す。なお、図 4-5 に示す積雪深は降雪開始時の積雪深と降雪終了時の積雪深との差（降雪量に相当）である。着雪時の気象条件については、積雪深が 4cm、平均気温は 1.9°C、最多風向は西南西、降雪時の平均風速 7.3m/s である。東京の再現期間 1 年の最深積雪深は 8cm であるので（表 4-1）、11 月 4 日に発生した着雪現象は東京の平年並みの降雪で発生した着雪現象に相当する。

試験体の着雪状況をみると、試験体壁面に着雪が発生しているものの、縦フィンには殆ど着雪しておらず、実験モデルにおいては平年並みの降雪では安全上問題となる着雪現象が発生する可能性は低いと考える。

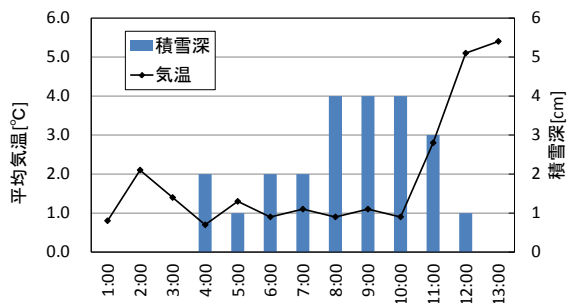


図 4-5 2014 年 11 月 4 日の着雪発生時の気象状況



写真 4-3 着雪状況

2) 2014 年 11 月 14 日に発生した着雪現象

着雪現象の発生前後の気象状況を図 4-6、着雪状況を写真 4-4 に示す。着雪時の気象条件については、増分積雪深は 21cm、平均気温は -1.2°C、最多風向は西南西、降雪時の平均風速 6.0m/s である。東京の再現期間 10 年の最深積雪深は 20cm であるので（表 4-1）、11 月 14 日に発生した着雪現象は東京の 10 年に一度の大雪で発生した着雪現象に相当する。

着雪状況（8:45）をみると、試験体壁面および縦フィンに着雪が発生している（写真 4-4）。昼間（13:15）の融雪状況をみると、縦フィンに着雪した雪は殆ど融雪して無くなっているものの、融雪水の流出経路となっている箇所では氷柱が発生している（写真 4-5）。これは着雪した雪が日射等の影響により融けて、融雪水が流れ込んだ影響と考える。

外装材に着雪した雪は 5 時間弱で融雪および氷結に至り、状態の変化が地上に積もった雪に比べ著しく早い傾向にあった。超高層建築物の着雪対策は、このような状態変化を念頭に検討する必要がある。

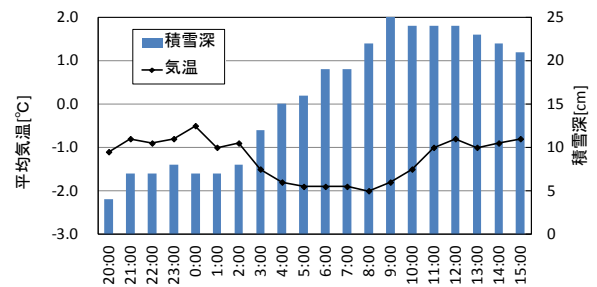


図 4-6 2014 年 11 月 14 日の着雪発生時の気象状況



写真 4-4 2014 年 11 月 14 日の着雪状況



写真 4-5 着雪した雪が融雪し形成された氷



写真 4-6 2014年12月17日の着雪状況

3) 2014年12月17日に発生した着雪現象

着雪現象の発生前後の気象状況を図 4-7、着雪状況を写真 4-6 に示す。着雪時の気象条件については、降雪により増えた積雪深は 20cm、平均気温は -1.1℃、最多風向は西-西南西、降雪時の平均風速 5.3m/s である。東京の再現期間 10 年の最深積雪深は 20cm であるので (表 4-1)、12 月 17 日に発生した着雪現象は東京の 10 年に一度の大雪で発生した着雪現象に相当する。

試験体の着雪状況をみると、概ね 11 月 14 日の着雪状況と同様の傾向にあり、試験体壁面および縦フィンに着雪が発生している (写真 4-6)。

また、着雪した雪が風により吹き払われる状況が確認された (写真 4-7)。この時の 10 分間平均風速は 7.6m/s と比較的強い風であった (図 4-7)。吹き払い発生は着雪発生直後であり、部材への凍着や雪粒子同士の結合は進んでいないために吹き払われたと考える。超高層建築物の高層階は強い風に曝されるため、着雪と共に吹き払いによる堆積した雪の減少が予想されるが、定量的に評価することは難しく、吹き払われる部位の形状によっては風切音の発生に注意する必要がある³⁾。



(a) 吹き払い前



(b) 吹き払い後

写真 4-7 着雪した雪が風により吹き払われた状況

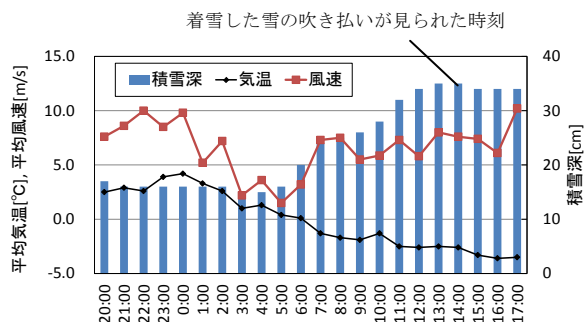


図 4-7 2014年12月17日の着雪発生時の気象状況

屋外曝露実験で示されたように、外装材に着雪した雪は地上に堆積した雪と異なり、融雪・凍結といった状態の変化が著しい。これは、フィンやルーバーなど外装部材の材料として主に用いられているアルミ材は、熱容量が小さく、熱伝導率が高い材料であるため、外気や日射、風の影響を受けて部材の温度変化が大きいことが要因として挙げられ、着雪した雪の落下対策等を検討する際の留意事項となる。

[参考文献]

- 1) 堤拓哉, 佐藤威, 苫米地司, 千葉隆弘: 建物外壁に設置されるルーバー庇の積雪性状に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, No. 32, pp. 59-62, 2010. 2
- 2) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, pp. 287-301, 2004
- 3) 日本風工学会編: 風工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 192-193, 2007

5. 超高層建築物を対象としたケーススタディ

2章では首都圏の気象条件および超高層建築物特有の着雪発生条件について整理し、3章では着雪が起きやすい部位について風洞実験により傾向を把握、4章では屋外曝露実験により外装部材に着雪した雪の経時変化について把握した。

本章では2～4章において得られた知見をベースに実際の超高層建築物を対象としたケーススタディを行い、着雪対策の要点を整理する共に、設計フローとしてまとめる。

(1) ケーススタディA

ケーススタディAでは、縮小模型と模擬雪を用いた風洞実験および実大の外装部材と実雪を用いた風洞実験により、外装部材の着雪傾向と着雪が起きやすい部位を把握し、平面計画および安全管理において注意する箇所の検討を行う。

1) 縮小模型と模擬雪を用いた風洞実験

実験で用いた縮小モデルを写真5-1、写真5-2に示す。実験モデルは対象建物の5フロア分の外装面を再現した部分模型(1/100)とカーテンウォールと縦フィンのディテールを再現したディテール模型(1/10)の二種類であり、外装に縦フィンが設置されている。実験モデルの設置状況を写真5-3に示す。実験に用いた装置および実験条件は3章と同一である。実験風向は北東面側を想定して行った。

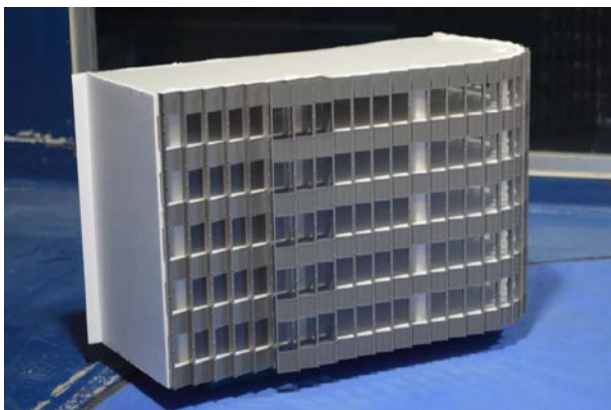


写真5-1 部分模型 (1/100)



写真5-2 ディテール模型 (1/10)



写真5-3 実験モデルの設置状況 (ディテール模型)

2) 縮小模型と模擬雪を用いた実験の結果

部分模型(1/100)の実験結果を写真5-4に示す。外装に縦フィンが設置されていることから壁面付近で風に対する抵抗が大きくなり、風速が遅くなるため、壁面に着雪が発生している。着雪量は壁面の段差が大きくなる部位で多くなっている。これは風の流れの淀み範囲を中心に着雪が発達する傾向があるためと考える(図5-1)¹⁾。

写真5-5にディテール模型(1/10)の実験結果を示す。縦フィンの継ぎ目にある水平材付近の着雪が多い傾向にある。これは水平材があることにより風がよどみやすく堆積する量が増えたためと考える。

縮小模型と模擬雪を用いた実験から、風のよどむ箇所を中心に着雪が生じることが予想される。

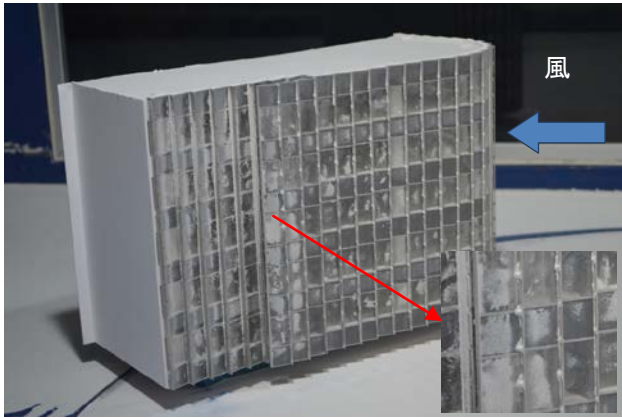


写真 5-4 部分模型の実験結果

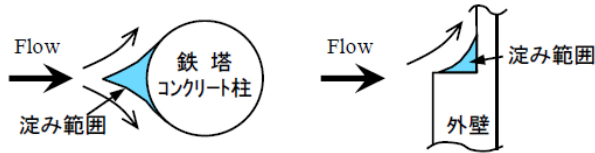


図 5-1 着雪が発達する部位¹⁾

試験体外観を写真 5-8 に示す。試験体の大きさは縦 1.5m×幅 0.9m であり、中央に縦フィンを取り付けている。試験体にはキャスターを取り付けており任意の風向に調整することが可能である。

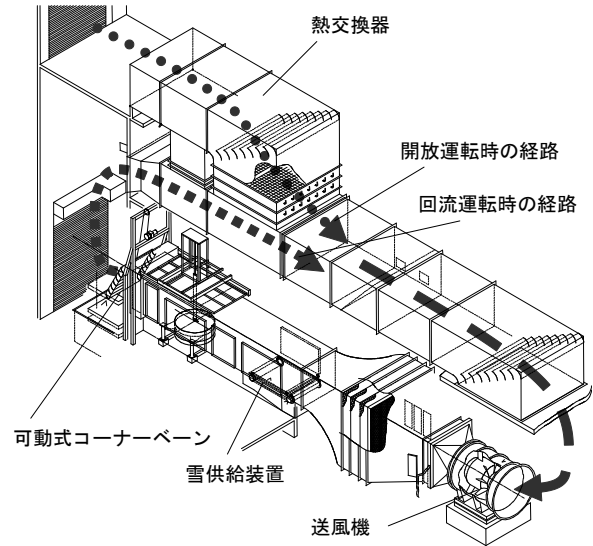


図 5-2 環境風洞装置

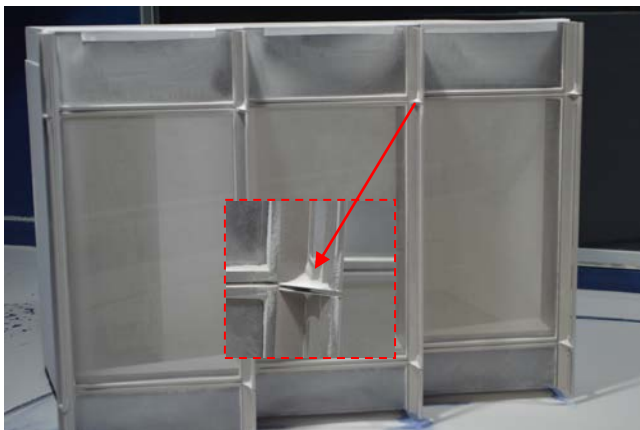


写真 5-5 ディテール模型の実験結果

表 5-1 環境風洞装置の緒元

風洞本体	型 式	縦型回流・押込開放切替型
	測定胴断面	幅 1.8m×高さ 1.8m
	測定胴長さ	10m
送 風 機	型 式	軸流送風機
	風 速	0.5~20m/sec
	風 量	3900m ³ /min (max)
	風 圧	830Pa
冷却装置	処理量	1950m ³ /min (風速 10m/s 時)
	冷却能力	209.3kw (180000kcal/h)

3) 実大の外装部材と実雪を用いた風洞実験

実験で使用する環境風洞装置を図 5-2、装置の諸元を表 5-1 に示す。測定部の大きさは幅 1.8m、高さ 1.8m、長さ 10m であり、装置の最大風速は 20m/s である。着雪実験を行う際は外気を取り入れる開放運転で使用するため、測定部の温度条件は外気温とほぼ等しい。雪を風洞内に供給する降雪装置は風洞上流部の天井に設置しており、回転ブラシにより雪を風洞内に供給する(写真 5-6、写真 5-7)。供給する雪は屋外の自然雪を用い、風路の上部から降雪装置に投入する。

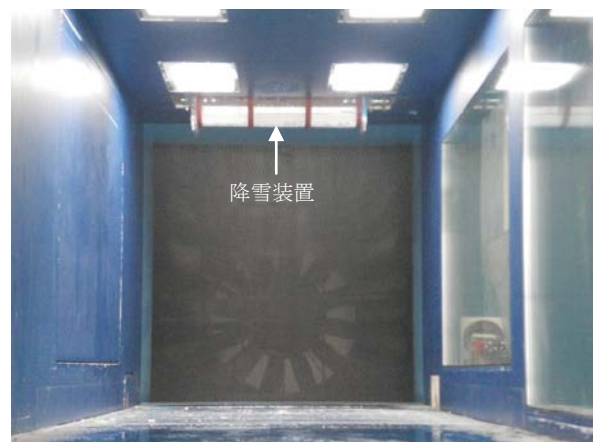


写真 5-6 風洞内部と降雪装置

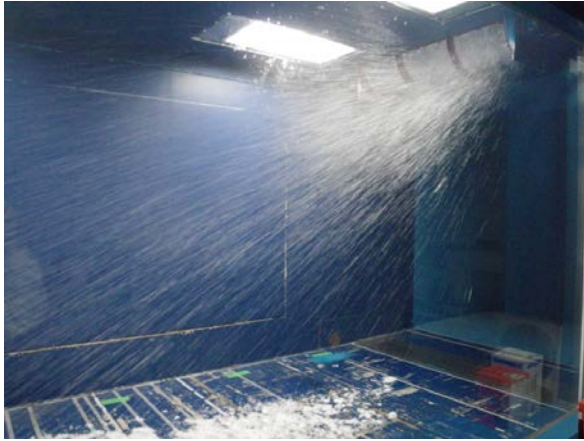


写真 5-7 降雪装置による雪の供給状況



図 5-4 試験体の設置状況



写真 5-8 試験体外観

試験体は風向別の着雪状況を把握するため、図 5-3 に示す 5 風向で実験を行った。試験体の設置状況を図 5-4 に示す。風速は上層階での強風時に想定し 7m/s とした。実験時の測定部の温度は $-1.3\sim -1.7^{\circ}\text{C}$ であり東京の大雪時の状況にほぼ等しい (図 2-7)。



写真 5-9 着雪状況 (風向 60°)

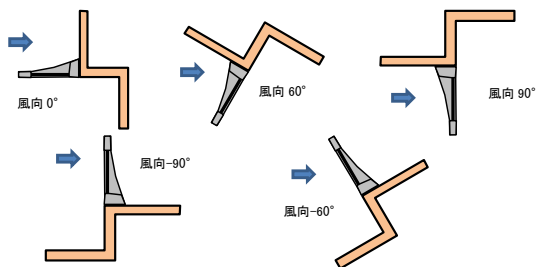


図 5-3 実験風向

以上から、降雪時の主風向に対し 60° の角度で縦フィンが設置されている部位において着雪量が増えることが予想されることから、フィンの配置と平面計画との対応を検討することにより、落雪対策が必要な箇所を抽出し安全対策を検討することが出来る。

(3) ケーススタディ B

ケーススタディ B では、対象建物および周辺建物を再現した風洞実験により、着雪発生個所を実験的に予測する。これは周辺建物の影響、建物形状の影響などにより着雪が発生する部位の予測が困難な場合を想定したケーススタディである。

1) 実験モデル

実験モデル（1/500）を写真 5-10 に示す。実験モデルの作成には 3D プリンタを用い、外装面等を忠実に再現した。写真 5-10 に示すように、対象建物（濃色）は降雪時の主風向に面しているが、風下側に対象建物より高い建物があるため、着雪する位置に影響を及ぼす可能性がある。また低層部は周辺建物と同程度の高さで風の流が複雑であるため、着雪部位を予測することが困難である。

実験に用いた装置および実験条件は 3 章と同一である。実験風向は北東面側を想定して行った。

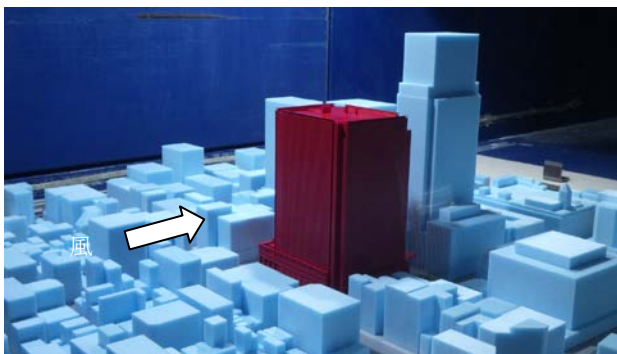


写真 5-10 実験モデル

2) 実験結果

写真 5-11 に風上側の着雪状況、写真 5-12 に風下側の着雪状況を示す。風上側の着雪状況については 3 章で得られた知見と同様、隅角部となった建物の外縁部に沿って着雪が多い傾向にある。

一方、風下側の着雪状況を見ると、壁面と隅角部で着雪量が多い傾向にある。これは風下側の既存建物による逆流が影響していると考えられる。また、側面側となる低層階の積雪が多い傾向にある。これは風上面の風が側面に吹き降ろされているためと考える。これらの着雪等に影響を及ぼす風の流を整理すると図 5-5 のようになり、着雪する箇所は建物形状のみならず周辺建物の影響も大きいことが分かる。

以上から、着雪対策を検討する際、周辺に風の流に影響を及ぼす建物がある場合は、その建物の影響も考慮して着雪発生箇所を検討する必要がある。特に、形状が複雑であったり、周辺建物の数が多い場合は実験等を参考に、着雪発生箇所を検討することが有効である。

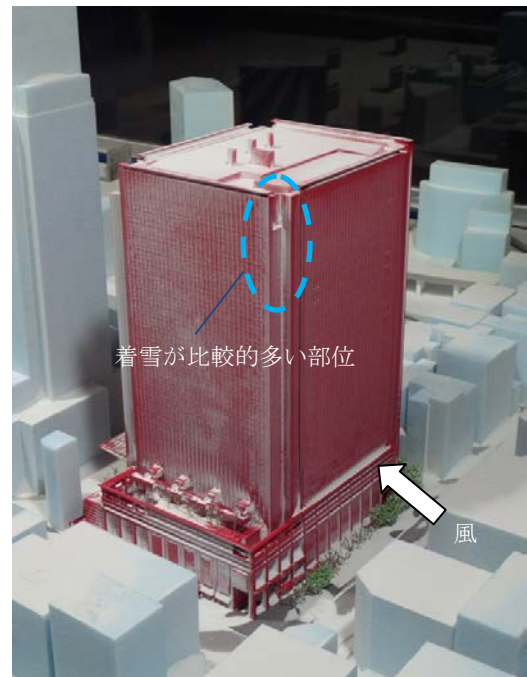


写真 5-11 風上側の着雪状況

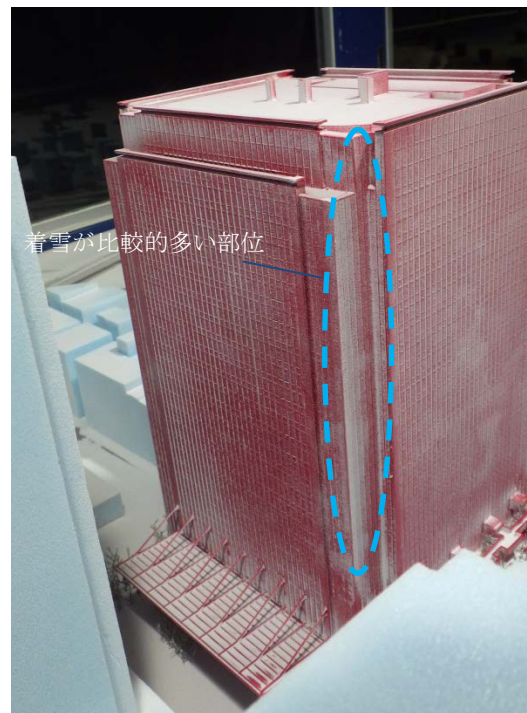


写真 5-12 風下側の着雪状況

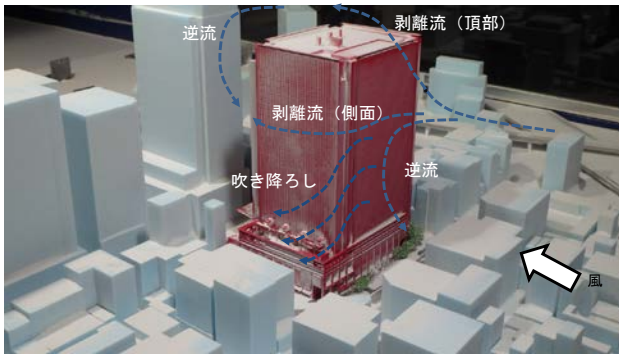


図 5-5 対象建物における風の流れ



写真 5-14 PC 小庇およびアルミ庇

(3) ケーススタディ C

一般に反射率の低い材料の場合、日射により表面温度が上昇するため、着雪により堆積した雪を融雪する効果が得られる可能性がある。また傾斜部に積もった雪の滑雪を抑え、落雪を防止するには雪止めが必要であるが、庇等の外装部材に雪止めを取り付けた際の有効性に関する知見は少ない。

ケーススタディ C では段上に庇が配置された壁を模擬した試験体を用いて屋外曝露実験を行い、外装面の色が庇上に堆積した雪の融雪状況に及ぼす影響、庇に設けた雪止めの有効性を検討する。

1) 実験モデル

実験では写真 5-13、5-14 に示す上部が PC 小庇、下部がアルミ庇の壁面を模した試験体（高さ 2140×幅 2000）を地上から 1m に設置した。外壁の材質は実物と同等し、上部は PC 板、下部はアルミパネルである。PC 小庇の先端には雪止めとして高さ 5cm の突起、アルミ庇には高さ 3cm の突起が設けられている。試験体は降雪時の卓越風向側（西）に向けて設置した。曝露期間は 2015 年 3 月 6～3/31 である。試験体の状況はインターバルカメラを用いて 10 分間隔で撮影した。



写真 5-13 試験体設置状況

2) 実験結果

曝露実験期間中の気象状況を図 5-6 に示す。曝露実験期間中は平年より気温が高く降雪が少ない条件であった。試験体を設置した 3 月 6 日以降は降雪が 2 度発生したが、着雪を発生させる規模の降雪は 3 月 11-13 日の降雪のみであった。

図 5-7 に着雪発生時の積雪深および気温の推移を示す。なお積雪深は 3 月 11 日 10 時を 0cm とした値である。降雪時の平均気温 -1.2°C であり、図 2-7 に示す 2014 年 2 月 8 日における東京の気温と概ね等しい。曝露実験中に増えた積雪深は 21cm であり、東京の年最大積雪深の 10 年再現期待値 20cm とほぼ同じであることから、曝露実験において発生した着雪現象は東京の 10 年に 1 度の大雪における着雪に相当する。

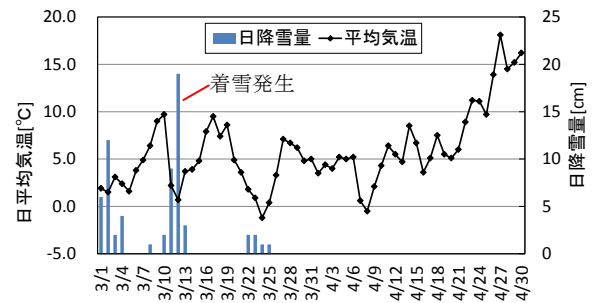


図 5-6 曝露実験期間中の気象状況

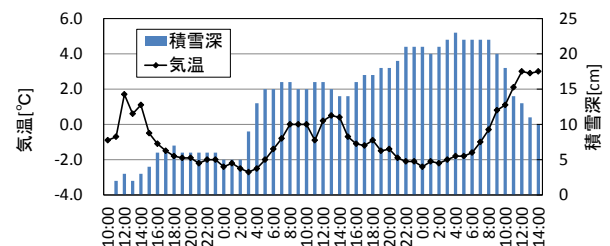


図 5-7 着雪発生時の気象状況

写真 5-15～5-17 に着雪発生時（3月13日9：00、積雪深 20cm）の状況を示す。庇先端にある雪止めの高さを超える積雪が庇上に生じているが、雪止めにより落雪は生じていない。

写真 5-18～5-21 に融雪時の状況を示す。AM9：00の段階で雪止めを超える程度の積雪があったが、日射の影響により融雪が急激に進み、13：00頃までに庇上の雪がほぼ消失した。融雪の進行に伴い雪の滑動と雪の小片が落ちる状況が見られたが、雪止めにより大量の落雪は生じなかった。

以上から、庇などの傾斜した部材に雪止めを付与することにより落雪を一定程度防止する効果があることが確認された。また外装を反射率の低い仕様により、融雪を促進する効果が得られることが分かった。

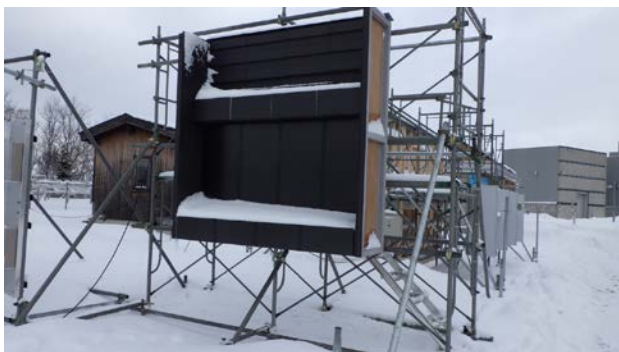


写真 5-15 着雪発生時の状況 (3/13/9：00)



写真 5-16 PC 小庇の着雪状況 (3/13/9：00)



写真 5-17 アルミ庇の着雪状況 (3/13/9：00)



写真 5-18 融雪状況 (3/13/10：04)



写真 5-19 融雪状況 (3/13/11：04)



写真 5-20 融雪状況 (3/13/12：04)



写真 5-21 融雪状況 (3/13/13 : 04)

(4) ケーススタディ D

ケーススタディ D では屋外曝露実験により、着雪対策における融雪ヒーターの有効性、雪止めの設置方法について検討を行う。

1) 実験モデル

実験には、雪止めの設置高さ、融雪ヒーターの有無で仕様を変えた下記の 4 体の底を模した試験体を用いた (写真 5-22、5-23)。

- 仕様① 雪止め設置高 50mm 融雪ヒーター有り
- 仕様② 雪止め設置高 100mm 融雪ヒーター無し
- 仕様③ 雪止め設置高 100mm 融雪ヒーター有り
- 仕様④ 雪止め設置高 50mm 融雪ヒーター無し

曝露期間は 2015 年 3 月 10～3/31 である。試験体の状況はインターバルカメラを用いて 10 分間隔で撮影した。



写真 5-22 実験モデル

2) 実験結果

実験時の気象状況についてはケーススタディ C と同様であり図 5-6、5-7 に示すとおりである。

写真 5-24 に最深積雪深後 (3 月 13 日 9 : 00、積雪深 20cm) の状況を示す。ヒーターが設置されている

試験体①および③では融雪ヒーターの効果により先端部の積雪が無い状況にある。

いずれの試験体でも雪止めの水平部にも積雪している。試験体②および④では、雪止め下部に傾斜面を滑った雪が入り込む状況が確認された (写真 5-25)。雪止め下部の空隙が大きい試験体②では入り込む雪が湾曲し、雪の塊も大きくなる傾向にあった。

写真 5-26 に融雪時 (3 月 13 日 16 : 00、積雪深 7cm) の状況を示す。試験体①および③では積雪は見られず、試験体④では雪止めにより降雪を防いでいるが、隙間の大きい試験体②では雪止め下部の空隙に雪が入り込み落雪する状況が確認された (写真 5-27)。



写真 5-23 実験モデル

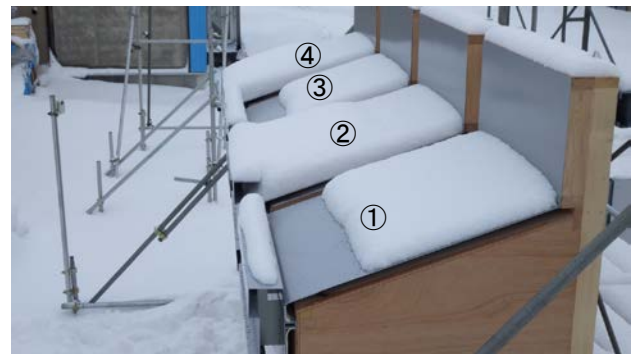


写真 5-24 最深積雪深 (20cm) 後の状況



写真 5-25 雪止め空隙に雪が入り込んでいる状況

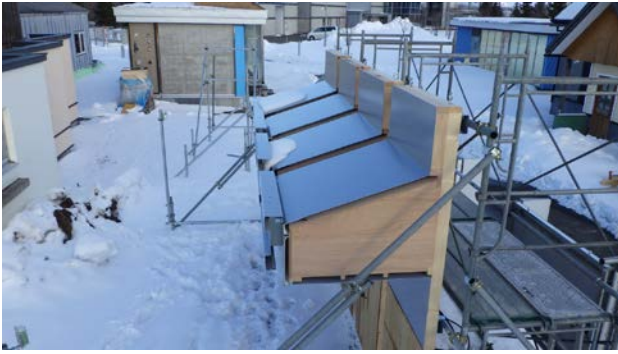


写真 5-26 融雪時の状況



写真 5-27 雪止めの空隙から落雪する状況

以上から、庇等の外装材における雪止めの設計の要点をまとめると以下ようになる。

①雪止めの高さ・空隙

雪止めの高さについては、高さ 50mm でも雪止め効果は確認されたが、雪止め下部の空隙が大きいと雪が入り込み落雪する危険性が生ずる。

②雪止めの水平面

水平面にも雪が積もるため、水平面を小さくする、内勾配をつけるなどして、落雪可能性を小さくする必要がある。

③融雪ヒーター

ヒーターによる熱が庇上部まで伝わり庇全面の融雪を促進する効果がみられ、先端部にまで設置することにより氷結防止にも効果がある。ヒーターの制御法、メンテナンス性、長期信頼性については別途検討する必要がある。

④雪止めの隙間

雪止めの隙間が大きいと、隙間に雪が入り込み、垂れ下がる雪の塊が大きくなる傾向にある。

⑤止め留め付け金具の間隔

雪止め留め付け金具の間隔が大きいと垂れ下がる雪の塊が大きくなる。

(5) 着雪対策のまとめ

ケーススタディにより検討した超高層建築物の着雪対策における留意点を設計時の検討フローとしてまとめると図 5-8 のようになる。

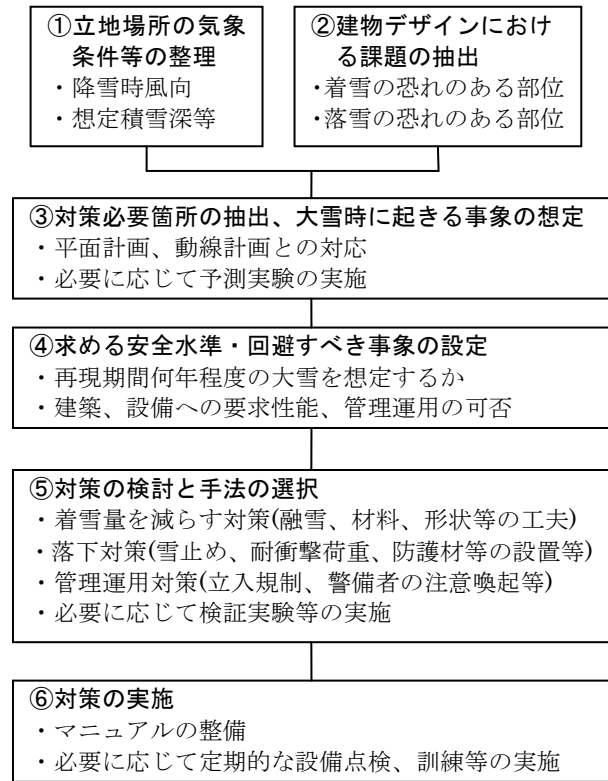


図 5-8 超高層建築物の着雪対策の検討フロー

最初に 2 章で整理した首都圏における降雪時の気象データ、着雪発生条件に示したように、立地場所の気象条件等の整理が必要である（フロー①立地場所の気象条件等の整理）。次に、隅角部や外装ルーバーなど着雪の恐れのある部位の抽出、傾斜部など落雪の恐れのある部位の抽出を行う（フロー②建物デザインにおける課題の抽出）。次に①と②の情報を突き合わせて、対策必要箇所の抽出、大雪時に起きる事象（着雪あるいは落雪の危険性）の想定を行う（フロー③対策必要箇所の抽出、大雪時に起きる事象の想定）。この際、エントランスや歩行動線上に落雪する恐れがあるかなど、平面計画における安全性にどう影響を及ぼすか整理する必要がある。建物形状が複雑、周辺建物の影響などにより着雪発生箇所の想定が困難な場合は、予測実験等により参考となる情報を整備する。

対策が必要な箇所が抽出された後、どの程度の積雪（平年並みの積雪か、10 年一度の大雪かなど）に

対応する仕様にするか、設定した積雪深に応じて回避すべき事象（着雪、氷結、落雪等）を検討し設定する。自然現象に起因する対策であるため、建築的対応、設備的対応には自ずと限界が生じるため、管理運用の対応がどの程度まで期待できるか、管理サイドと調整する必要がある（フロー④求める安全水準・回避すべき事象の設定）。

対策の必要な箇所の抽出、回避すべき事象の設定を踏まえ、具体的な対策を検討する（フロー⑤対策の検討と手法の選択）。着雪および落雪対策は大きく以下の3つに分類される。

1) 着雪量を減らす対策

a) 融雪設備による対応

ケーススタディDで示したように、外装部材に融雪ヒーターを付与することにより堆積する雪の量を大幅に減らすことができる。一方で、設置箇所が多くなると設備コストが大きくなり、信頼性確保に必要なメンテナンス対応の負担も大きい。また首都圏では10年程度の周期で大雪が発生するため、運用する機会が稀にしかない無く、適正な管理運用が出来る体制の維持が課題である。融雪対策を行う際は、融雪水の再凍結を避けるため、その排水経路まで熱が届くようにする必要がある。

b) 撥水剤など材料的対応

建材表面に撥水剤などを塗布すると、着雪防止に一定程度の効果があることが実験的に確認されている²⁾。しかしながら、長期的には汚れ等の影響による性能低下があり、補助的な対策となることから、その適用は比較的維持管理が容易な部位に限られる。

c) 形状工夫による対策

凹部など、風がよどむ形状を避け着雪量を減らすほか、庇等を内勾配にする、庇に雪止め状の凹凸を付けるなどの形状の工夫があるが、超高層建築物の外装材は風に曝されるため、形状の工夫にあたっては風切音に対する配慮が必要である。

2) 落下対策

a) 雪止めの設置

ケーススタディCで示したように傾斜部に雪止めあるいは、先端部に突起を設けることにより雪の滑動を抑制することができる。雪止めを検討する際は、積雪量および傾斜角度に応じた高さの設定、空隙から雪がすり抜けないような寸法上の配慮が必要であ

る。



写真 5-28 雪止めの設置例

b) 耐衝撃荷重の割増

着雪もしくは落雪が懸念される部位の下部にガラスのアトリウムやトップライトがある場合、落雪による衝撃荷重を想定した仕様にする。雪氷塊の落下による衝撃荷重は概ね 40kN/m^2 程度が実験での上限値となっている（図5-9）³⁾。

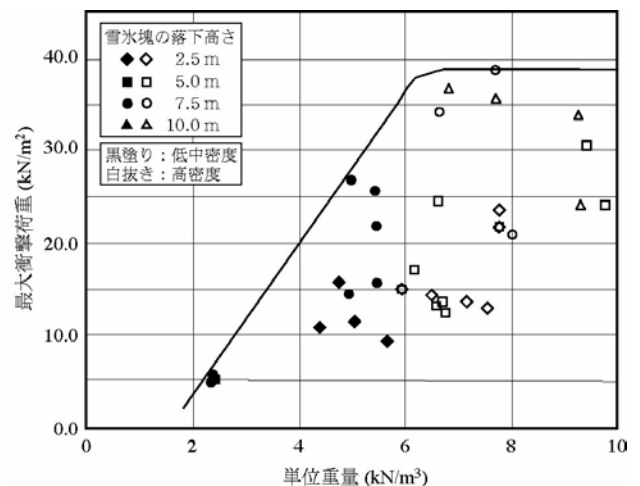


図 5-9 雪氷塊の単位重量と衝撃荷重の関係³⁾

c) 防護柵、防護ネット等の設置

落下した雪氷塊を防ぐための防護柵、防護ネット等を歩行動線などの上空に恒久的、応急的に設置する（写真 5-28）。また歩行路にカバードウォーク等の上屋を設けることは降雨降雪時の歩行路を確保する共に落雪による事故を回避する効果がある。



写真 5-28 防護ネットの設置例

d) 緩衝帯を設ける対策

落水雪が予想される地点に植栽等の緩衝帯を設けることにより、危険個所への人の侵入を抑制する。



写真 5-29 植栽による緩衝帯の例

3) 管理運用対策

当初想定していない部位での着雪の発生や要求性能を超える積雪に見舞われた場合には、落雪が起きそうな地点への立入規制、警備者の注意喚起が求められる。カラーコーン等必要な資機材の用意が必要である。この場合、見回るべき箇所、対応方法等が記載されたマニュアルの整備が有効である。また、融雪設備機器の動作確認など、必要に応じて定期点検や訓練等の実施も雪の少ない首都圏では管理運用上、重要であると考えられる。

[参考文献]

- 1) 苫米地司, 千葉隆弘, 佐藤威, 堤拓哉, 高橋徹, 伊東敏幸: 構造物の着雪対策に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 659, pp. 45-52, 2011. 11
- 2) 吉田光則, 吉田昌充, 金野克美: 着雪防止技術に関する研究 (第3報) - 滑雪と材料表面特性について -, 北海道立工業試験場報告, No. 299, pp. 14-17, 2000.
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, pp. 242-244, 2015

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下に要約する。

- 1) 首都圏における超高層建築物では、湿雪条件に加え高度による風速増速と気温低下が重なるため、着雪が発生しやすくなることを明らかにし、着雪発生条件を整理した。
- 2) 超高層建築物では、風の流線変形が、前方から起こるため雪粒子の衝突が建物端部で起こりやすく、着雪発生位置は外縁や上層階の割合が多いことを実験的に明らかにした。
- 3) 部材に着雪した雪は日射により融雪するが、外気温ならびに風による部材の冷却効果により氷結するなど、経時的に状態が大きく変化することを屋外暴露実験で明らかにした。
- 4) 実際に計画されている4つの超高層建築物を対象に着雪対策のケーススタディを行い、検討結果を計画に反映した。
- 5) 上記の検討結果をまとめ、超高層建築物における着雪対策の検討フローを作成した。

研究成果の活用については、共同研究先において4つの超高層建築物の実計画で反映すると共に設計資料として活用を図る。また当研究所においては、得られた知見を受託研究、依頼試験、技術相談等において活用を図る。本研究成果は、主として積雪期間が極めて短い首都圏を対象に得られた知見であり、寒冷地での適用には気象条件の違いに留意する必要がある。このため、今後、気象条件の影響等を整理する。