

建物外壁着雪分布予測のための数値シミュレーション

田畑 侑一 大塚 清敏

Numerical Simulation for Predicting Snow Accretion Distribution on Building Wall

Yuichi Tabata Kiyotoshi Otsuka

Abstract

A numerical snow accretion prediction model was developed, where the equation of motion of snow particles in a Lagrangian formulation was employed to calculate the movement of snow particles in air flow fields. This was based on a computational fluid dynamics calculation in order to appropriately treat the effects of the snow's inertia. The model was applied to simulations of the snow accretion on objects of different sizes, ranging from the laboratory scale to real building scale. The results obtained from the simulation were consistent with the differences in the snow accretion on small and large objects observed outside.

概要

近年都市部において、環境配慮を目的として建物外壁面に庇やルーバー、縦フィン等の外装突起物が取り付けられ、外壁面が複雑な形状となった建物が増加している。これらの外装突起物には、降雪時に着雪が生じやすく、雪塊の落下による被害が懸念される。こうした落雪被害回避のためには、着雪が生じやすい箇所の把握が重要となる。そこで、建物外壁面への着雪範囲の予測を目的として、粒子法を用いた解析手法の構築を行った。次に、大きさの異なる物体を対象とした解析を実施し、屋外で観察される物体への着雪範囲の違いについて考察した。その結果、大きさの異なる物体間で雪粒子の流線に明確な差異が生じ、着雪範囲に影響を及ぼすことが確認された。

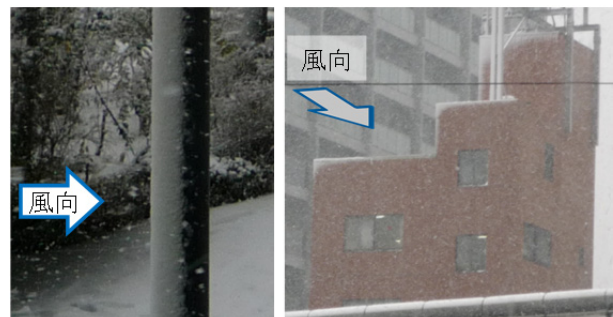
1. はじめに

近年、日射遮蔽等の環境配慮目的や意匠上の理由により、高層建築物の外壁にルーバーや縦フィン等の外装突起物が設置される事例が増加している。こうした突起物には、風を伴う降雪時に雪の付着(以下、着雪という)が生じることがあり、落雪被害が懸念される。このため、被害回避のための対策が求められるが、対策立案にあたっては着雪範囲の把握が重要となる。

着雪は有風時に起こりやすいことが既往の研究によって指摘されている(例えば、竹内¹⁾)。苔米地ら²⁾は、物体風上面の気流の淀み域で生じやすいことを指摘し、千葉ら³⁾は、流体計算と部材の着雪実験との比較から物体風上側の正圧部と着雪との相関を示している。また、土谷ら⁴⁾は物体風上側で物体表面近くの気流の減速域での着雪の発生を述べている。着雪が生じる最も基本的な前提は、雪粒子が物体に衝突することである。周辺に気流障害物がない場合、空気中の雪粒子は重力の効果を含めた上でほぼ終端速度となる。しかし、物体近傍では、空気の流れが物体を避けるように急変するものの、雪粒子は自身の慣性力のため気流変化に完全には追従できず、そのため物体への衝突が生じると考えられる。既往の研究は、そうした仕組みを示唆している。一方で、建築物への着雪発生メカニズムについては、研究成果の蓄積が未だ十分でなく、明らかにされていないことも多い。例えば、屋外で観察される着雪には、電柱や街路樹の幹などと建物の壁面全体との間で付き方の違いが認められる

ことから、物体の大きさにより着雪の仕方(物体に対する着雪の範囲)が異なる可能性がある(Photo 1)。外装突起物が設置された建築物は、こうした大きさの異なる物体の複合体であり、着雪範囲もより複雑になる。しかしながら、建物のような大きな物体を対象とした実物大の実験は困難なため、こうした大きさの違いに対する着雪性状の変化を把握するには、解析的な手法によることが必要と考えられる。

本研究では、建物および建物外壁面に設置される外装部材への着雪分布を予測するための解析手法構築を最終的な目的とし、まず建築物の外装部材として使用される基本断面部材を対象として吹雪風洞実験を実施した。次に雪粒子の慣性の効果を陽に扱えるよう、仮想雪粒子の



(1) 電柱への着雪
Snow Accretion to
Concrete Utility Pole

(2) 外壁面への着雪
Snow Accretion to
Building Wall

Photo 1 屋外で観察された着雪の例
Examples of Snow Accretion Observed Outdoor

動きを直接追跡計算する手法(粒子法)を用い、物体の大きさに対する雪の衝突状況の違い、および外壁面に凹凸を有する建築物の着雪範囲について検討を行った。

2. 単純形状部材を対象とした着雪実験

2.1 実験概要

建物外装部材として多用される縦フィンに代表される平板部材を対象として、吹雪風洞実験を実施した。風洞実験の概要をFig. 1に示す。実験は防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄支所の低温風洞を用いた。測定胴の断面は1m×1mであり、風洞内部温度は-3℃に設定した。風路の風上側上部より人工雪を供給し、風下5mの位置に設置した試験体への着雪状況について計測した。また、風上側にて水の噴霧を行い、湿雪の初期段階の着雪性状を近似的に模擬している。

次に、実験ケースをTable 1に示す。試験体は見付け幅H=100~300mm、長さ800mmの平板部材を使用した。気流は一様流とし、風速u=5m/sおよび9m/sに変化させた各ケースについて実験を実施した。また、着雪の発達段階を観察するため、実験時間は各ケース30分とし、10分毎に試験体を取り出して、着雪重量およびレーザー変位計による着雪厚さの計測を行った。なお、実験では網状の袋に飛雪を捕集する方法で、各ケースの飛雪流量についても計測を行った。

2.2 実験結果

2.2.1 平板の見付け幅の違いによる比較 Fig. 2に各ケースにおける、単位面積あたりの10分毎の着雪重量の変化を示す。着雪量はいずれも時間的に直線的に増加しているが、Case3(H=300mm)以外のケースは、20分から30分にかけて10分間の着雪量の増分値がやや鈍くなる傾向が認められる。

次にCase1~3(H=100~300mm)の10分毎の着雪の断面形状をFig. 3(1)~(3)に、Case2(H=200mm)の着雪状況をPhoto 2にそれぞれ示す。なお、10分毎の断面形状については実際の着雪の形に合うようにするため、縦横の軸のレンジは図によって変えて示している。30分経過後の着雪形状は、いずれのケースにおいてもPhoto 2に示すような基本的に風上側に凸の三角に近い断面形状となった。また、Fig. 3よりCase1,2(H=100, 200mm)では、20分経過時点ですでにこうした三角形に近い断面形状の特徴が出ており、時間経過とともに淀み域が小さくなり、着雪量が少なくなっている様子が確認できる。一方で、Case3(H=300mm)は見付け幅に対する着雪の発達が他のケースに比べて遅く、30分経過時点でも単調な発達が継続しているように見える。

2.2.2 風速の違いによる比較 Fig. 3(4)にCase4(H=100mm, u=5m/s)の着雪断面形状を示す。同じ見付け幅で風速u=9m/sとしたCase1(Fig. 3(1))と異なって断面形状は全体的に丸みを帯びており、時間経過に対し一様に

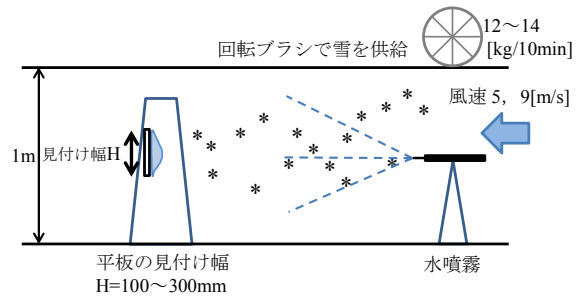


Fig. 1 風洞実験概要
Outline of Wind Tunnel Experiment

Table 1 実験ケース
Test Cases

Case No.	試験体見付け幅 H[mm]	風速 u[m/s]	実験時間 [min]
Case1	100	9	30
Case2	200		30
Case3	300		30
Case4	100	5	30

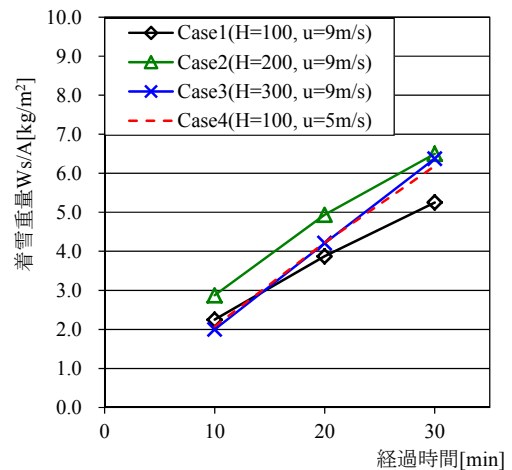


Fig. 2 単位面積あたりの着雪重量
Mass of Snow Accretion per Unit Area



Photo 2 着雪状況例 (Case2(H=200mm))
Example of Snow Accretion to the Flat Plate (Case2)

成長している。しかし、30分経過時点での着雪のピーク厚さやFig. 2に示す着雪重量はCase1と大きな差は見られない。ただし、風速u=5m/sとしたCase4の飛雪流量はu=9m/sの各ケースの平均値に比べて約4割程度となっており、飛雪流量の割に着雪の成長が大きい結果となったことが分かる。

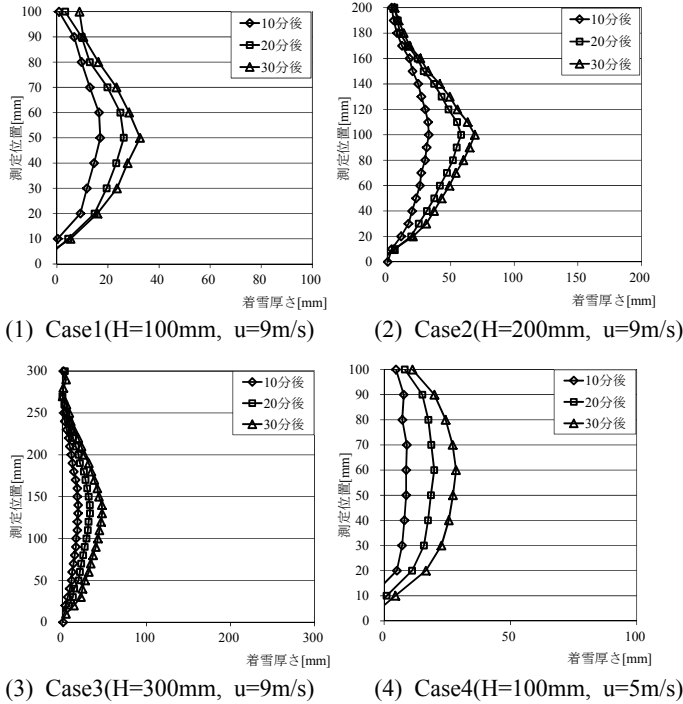


Fig. 3 着雪断面の時間的变化

Temporal Change in Cross Section of Snow Accretion

着雪の成長には、平板に衝突した雪粒子の付着の割合と着雪表面の接線風速による吹き払いのバランスが大きく寄与していると考えられる。このため、気流風速が小さいことに起因して、着雪表面の接線風速が小さいCase4のほうが、吹き払われる粒子より付着する粒子の比率が大きく、Case1に比べて着雪が成長したと推察される。

3. 実大建物サイズを対象とした着雪予測

前章では、建物外装として使用される小断面部材を対象として、吹雪風洞実験を実施した。本章では、Photo 1に示すような物体の大きさの違いに対する着雪性状の違いを明らかにするため、解析的手法を用いて物体の大きさに対する雪粒子の衝突状況の違いについて検討を行った。次に、外装突起物が配置された建物のように、大きさの混在する物体への着雪性状について考察するため、壁面に建物全体に比べると小さい凹凸を配置したモデル建物を対象とした解析を実施した。

3.1 解析手法概要

対象となる領域について、CFDに基づく流体計算を実施し、得られた流れ場について、直接粒子の動きを追跡計算する手法である粒子法を用いて雪粒子の軌跡を計算した。(1)式に粒子の運動方程式をベクトル表記で示す。

$$m \frac{dV}{dt} = -mg - \frac{1}{2} \rho_{air} C_D A |V - V_{air}| (V - V_{air}) + f(V)_{stochastic} \quad (1)$$

V : 粒子速度[m/s], V_{air} : 風速[m/s], m : 質量[kg],

ρ_{air} : 空気密度(=1.2)[kg/m³], A : 雪粒子の投影面積[m²],

C_D : 抗力係数

Table 2 解析条件

Computational Condition

側面・上空境界	Free-Slip
地表面境界条件	z_0 型の対数則
建物壁面境界条件	滑面の対数則
流入境界	粗度区分 I ⁶⁾ ($\alpha=0.10$)に基づき風速, k の鉛直分布を与えた
流出境界	特性の方法 ⁵⁾ により境界の値を求めた
移流項スキーム	三次精度風上差分
乱流モデル	Durbinモデル

Table 3 雪粒子(球状氷粒)に関する諸条件

Parameters of Snow Particle

粒子半径 r	0.1[mm]
抗力係数 C_D	1.2[-]
氷の密度 ρ_{ice}	900.0[kg/m ³]

$f(V)_{stochastic}$ は風速の乱れに起因した粒子の揺動を表す確率的外力項である。解析領域の風上側より雪粒子を微細な氷球で模擬したパーティクルを発生させて、(1)式を用いて粒子の軌跡を計算し、物体の表面に衝突する粒子数をカウントすることで、雪粒子の衝突率およびその範囲を得る。時間積分には4次のRunge-Kutta法を使用した。その他の流体計算手法の詳細は文献5)を参照されたい。

3.2 大きさの異なる物体に対する着雪予測

3.2.1 解析概要 建物の外装などに使用される小断面の物体と外壁面のような実大建物を想定した物体それぞれについて解析を実施し、物体表面に衝突する粒子の衝突率について比較を行った。解析条件をTable 2に、雪粒子に関する諸条件について Table 3に示す。解析ケースは、小断面の物体として、実験を実施したケースと同様の見付け幅0.1,0.2,0.3m, 実大建物を想定したケースとして、見付け幅20,30,60mの計6ケース実施した。見付け幅60mのケースにおける解析領域をFig. 4に示す。解析領域および格子間隔については、解析対象である物体の大きさがケース間で大きく異なるため、小断面部材を対象としたケースと建物外壁面を想定したケースとで、異なる領域サイズ、格子間隔を用いた。なお、解析領域はそれぞれ2段階のネスティングを行い、物体周辺の格子間隔を細かくしている。風向は物体の面に対して正対する向きとし、風速は9m/sとした。雪粒子は解析領域の風上側境界面より面的に均一になるようにランダムに発生させ、粒子発生位置の物体の投影面積内での粒子発生個数に対する物体への衝突粒子個数の割合を衝突率として算出した。

3.2.2 解析結果 Fig. 5に物体の大きさと雪粒子の衝突率の関係、Fig. 6に建物外壁面を想定したケースにおける物体表面への粒子の衝突分布をそれぞれ示す。Fig. 5より、見付け幅が0.1~0.3mの小断面部材を対象としたケースでは衝突率が0.9前後と粒子はほぼ全て衝突しているのに対して、物体の見付け幅が大きくなるにつれて衝突率は急激に減少し、見付け幅60mのケースでは衝突率が概ね5%程度と、物体の大きさの違いにより大きな差が生じる結果となった。また、Fig. 6に示す実大建物サイズにおける壁面への粒子の衝突分布では、中央部分に比べて端部に多く衝突する傾向が見られた。

3.2.3 大きさの異なる物体に対する着雪範囲の違いの考察 小断面部材への着雪に関して、着雪実験時に得られた平板の見付け幅 H=100mm における可視化写真をPhoto 3に示す。この写真の粒子の軌跡から部材への雪粒子の衝突率を推定すると、おおよそ0.9前後であり、小断

面部材を対象とした解析結果の傾向は概ね妥当な範囲内に収まっていると考えられる。一方で、建物サイズについては、実験等による確認はできないが、Fig. 6に示す結果の傾向は、屋外で観察される着雪範囲の傾向(Photo 1(b))と整合している。

物体の大きさに対してこれらの差が生じる要因として、Fig. 7に示すような物体の大きさに対する気流と雪粒子の流線の違いが生じることが挙げられる。小断面の物体の場合、物体の直前で流れが急激に変化するため、雪粒子は自身の慣性力に起因して流れの変化に追従できずに衝突する。一方で、建物のように大きな物体になると、より風上側で流れの変化が生じ始めるため、流れに乗った雪粒子は物体をより避けやすくなることに加え、重力によって壁面に到達せずに地表面へ落下する粒子も多くなるため、物体中央部分に到達する粒子数が減り、流線が集中する壁面端部への衝突が多くなると考えられる。

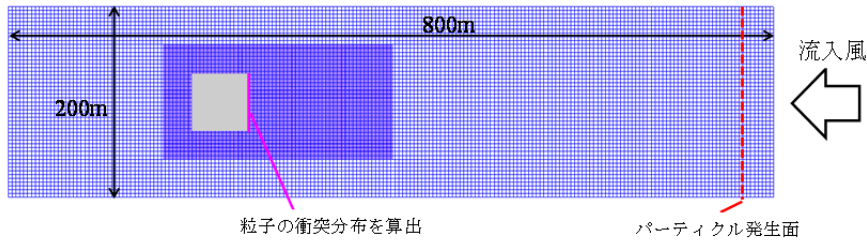


Fig. 4 解析領域(実大建物サイズの例)
Computational Domain (Example of Building Size)

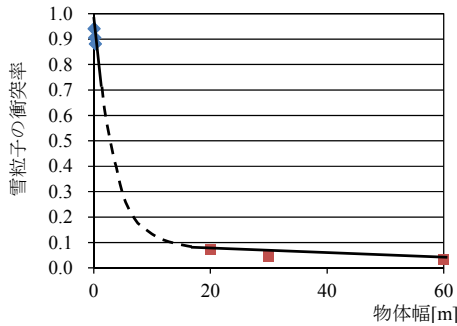


Fig. 5 物体の大きさと雪粒子の衝突率の関係
Relationships between Object Size and Collision Ratios

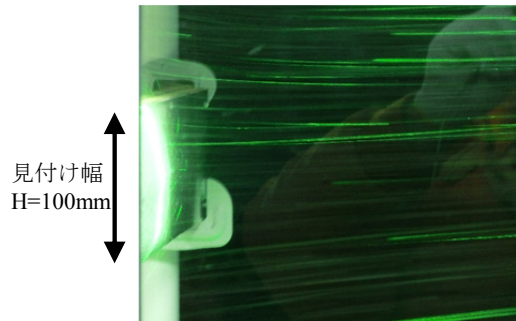


Photo 3 飛雪粒子の可視化写真(平板, H=100mmの例)
Visualization of Snow Particle Collision

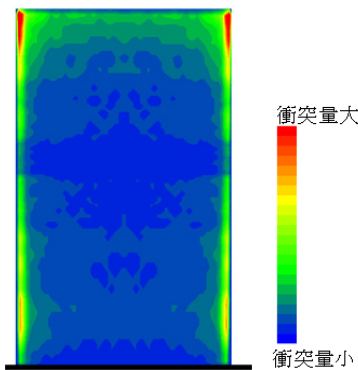


Fig. 6 物体表面への雪粒子の衝突分布(実大建物サイズ)
Distribution of Particle Collision Density on Building Wall (Building Size)

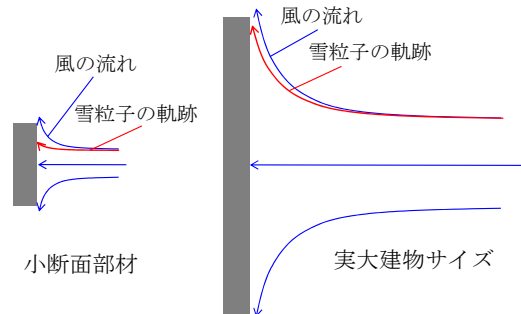


Fig. 7 物体の大きさに対する雪粒子の軌跡の違い
Difference of the Snow Particle Trajectory Between Object Sizes

3.3 凹凸を有する建物を対象とした着雪予測

3.3.1 解析概要 外装突起物が配置された建物のような、大きさの混在する物体に対する粒子の衝突分布を予測するため、都市部におけるモデル建物を対象として粒子法を用いた飛雪解析を実施し、建物壁面および外装突起部への雪粒子の衝突分布を予測した。Fig. 8に解析領域の一部を示す。解析領域の中心に高さ180mのモデル建物を配置した。モデル建物の北側及び南側には高さ150m程度の建物が存在する。解析領域は計画建物を中心とした2km四方の領域に対して4段階のネスティングを行っており、最内側領域における水平方向メッシュは等間隔で2.5m、鉛直方向は不等間隔で最小格子間隔は1.0mとした。流入気流はモデル建物頂部高さにおいて12[m/s]とし、学会指針⁶⁾の粗度区分IV(べき指数 $\alpha=0.27$)に基づく風速及び乱れの鉛直分布を与えた。風向は関東地方の冬季の卓越風向であるNW, NNW, N, NNEの4風向を対象とし、解析ケースとして、壁面に凹凸無しのケース、および凹凸有りのケース(Fig. 9)それぞれについて解析を実施した。なお、凹凸有りのケースについては、建物周面に沿って、出幅が2.5mの凹凸を12.5mの均等ピッチで配置した。

3.3.2 解析結果 Fig. 10に風向NNWにおけるモデル建物周辺の風速ベクトルの水平分布、Fig. 11にモデル建物北側の壁面における雪粒子の衝突分布を示す。なお、凹凸有りのケースの衝突分布については、突起部の各面の分布を見るため、展開図で示している。Fig. 10に示す風速ベクトルの水平分布より、上空の風はモデル建物と北側に位置する建物との間に流れ込み、モデル建物北側の面に沿って西から東に向かって流れている。これにより、凹凸無しのケースにおける北側壁面の雪粒子の衝突分布では、風上側にあたる西側の衝突量が多く、下流である東側に向かうに従って減少する分布形状となっている(Fig. 11(1))。また、建物の低層部に比べて高層部の方が衝突粒子の量が多く、特に屋上面付近に集中して衝突が見られる。単体建物のケースと同様に、実大建物サイズでは外壁面端部のような、風の流れが剥離し、流線が集中する部分において、雪粒子自身の慣性の影響により、壁面をよけきれずに衝突する粒子が増加する可能性が考えられる。一方で、凹凸有りのケースの場合(Fig. 11(2))、壁面部分への衝突の傾向は概ね凹凸無しのケースと同様であるが、加えて、突起部の風上側の面(西側の面)への衝突が多く見られる。また、突起部への粒子の衝突については、壁面と異なり、下流となる東側でも風上側と同様に多くの衝突が確認できる。マクロな視点で見ると、凹凸の有無にかかわらず、建物周辺の大きな気流の流れはほとんど変化しないが、小断面の物体周りの流れのようなミクロな視点で考えると、気流に対して直交する方向に配置された突起物には、壁面に沿って流れてきた雪粒子が下流でも衝突し易くなると考えられる。特に、外装突起物のように建物全体に対して小さな物体は、部材の直前で急激な流れの変化が生じるものの、雪粒子は自

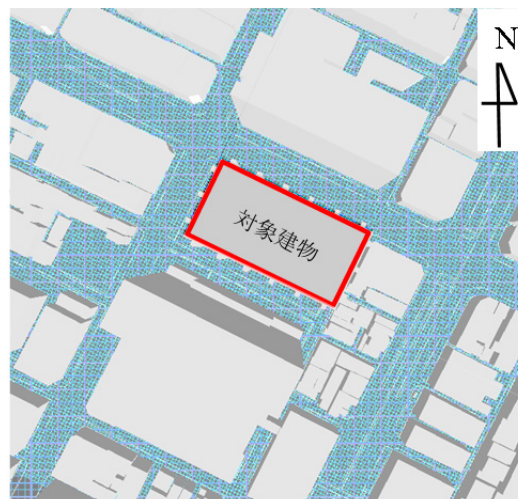


Fig. 8 解析領域 (赤枠が対象建物)
Computational Domain

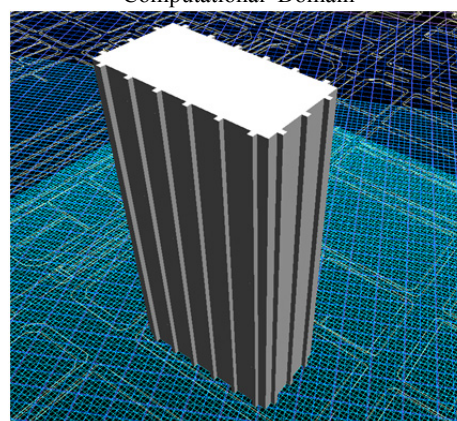


Fig. 9 モデル建物 (凹凸有り)
Model Building (With Surface Roughness)

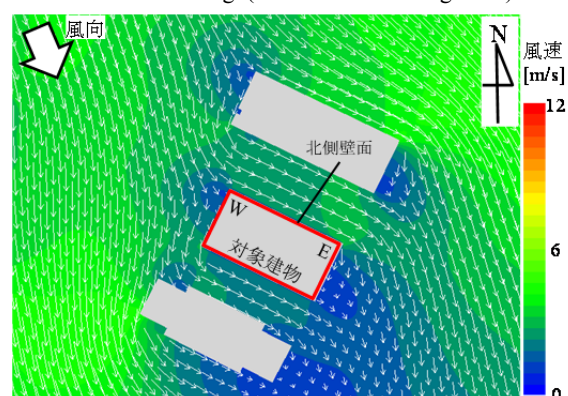
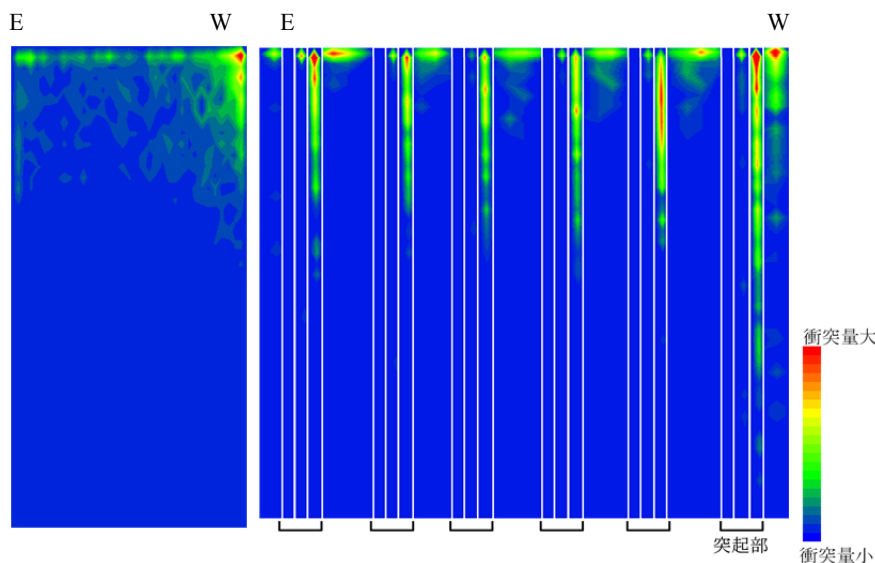


Fig. 10 モデル建物周辺の風速ベクトルの水平分布
(凹凸無しのケース、風向: NNW, 高さ50m)

Horizontal Distribution of Wind Velocity Vector around Model Buildings

身の慣性力に起因して流れの変化に追従できず、衝突量が壁面に比べて増加したと考えられる。Fig. 12に示したように、屋外で多く観察される縦フィンへの着雪は上端付近に多く見られ、解析によって得られた結果の傾向は概ね屋外で観察される特徴を捉えている。



(1) 凹凸無し (2) 凹凸有り (展開図, 白枠内は突起部の各面を示す)

Without Surface Roughness With Surface Roughness
 Fig. 11 北側壁面への粒子の衝突分布 (風向: NNW)
 Distributions of Particle Collision Density on the North Building Wall

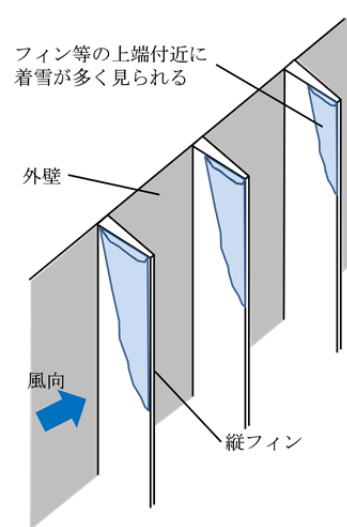


Fig. 12 屋外で観察される外装縦フィンへの着雪の特徴
 Characteristics of Snow Accretion to Vertical Fins Observed Outdoor

4. まとめ

建物および建物外壁面に設置される外装部材への着雪性状について把握するため、縦フィンに代表される平板部材を対象とした着雪実験を実施するとともに、実大建物の着雪範囲を予測するための解析手法を構築し、以下に示す知見を得た。

- 1) 実験における平板部材への着雪は、部材幅や風速の違いに関わらず、風上方向に凸の三角形状に発達する。ただし、風速の低い $u=5\text{m/s}$ のケースでは、 $u=9\text{m/s}$ のケースに比べ、少し丸みを帯びた形状となった。
- 2) 着雪による形状変化の進行に伴い、淀み域が小さくなり、着雪量の増分値は時間経過とともに減少する。
- 3) 大きさの異なる物体を対象とした数値解析では、物体の大きさの違いに対して、雪粒子の衝突率、および衝突範囲に大きな差異が生じる結果となった。
- 4) 建物の外装部材等に使用される小断面の物体の場合、雪粒子は流れの変化に追従できずに多く衝突するが、建物のような大きいサイズの物体では、小断面の物体と比べて雪粒子が流れに追従しやすいため、端部に多く衝突する傾向が見られた。
- 5) 凹凸の有無による雪粒子の衝突分布の結果から、凹凸有りのケースでは、無しのケースに比べて雪粒子の衝突量が多くなり、特に凹凸の風上側上端部付近に多くの衝突が確認された。

今回得られた知見は、今後、雪の対策範囲の絞り込みや対策手法の選定に活用していく予定である。

謝辞

本研究の一部は、北海道科学大学、防災科学技術研究所との共同研究として実施された。研究遂行にあたり、北海道科学大学 苫米地司教授、千葉隆弘准教授、防災科学技術研究所 佐藤研吾氏には貴重なご助言を頂きました。ここに記して、深謝致します。

参考文献

- 1) 竹内政夫：道路標識の着雪とその防止，雪氷，40，pp.117-127，1978
- 2) 苫米地司，他：構造部材への着雪性状に関する基礎的研究 屋外観測と風洞実験による部材形状と着雪性状との関係について，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.659，pp.45-52，2011.1
- 3) 千葉隆弘，他：構造部材における着雪性状に関する研究，北海道の雪氷，No.30，pp.31-34，2011
- 4) 土谷学，他：2段屋根上の吹きだまり形成に影響を及ぼす気流特性，日本雪工学会大会論文報告集，Vol.18，pp.81-82，2001
- 5) 片岡浩人，他：電子地図情報を用いた街区の風環境シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.791-792，2001.9
- 6) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説，丸善，2004.