

構造部材の着雪性状に関する実験的研究 —雪粒子の衝突率・着雪率について—

Experimental study on properties of snow accretion for structural members with buildings — Ratio of collision and accretion of snow particles—

佐藤 雄輝* 千葉 隆弘** 苫米地 司***
大塚 清敏† 田畑 侑一† 佐藤 研吾‡

Yuki Sato, Takahiro Chiba, Tsukasa Tomabechi,
Kiyotoshi Otsuka, Yuichi Tabata and Kengo Sato

Abstract

This study aims to be clarified properties of snow accretion on structural members used in buildings. The properties such as rate of snow collision and accretion were examined based on the experiment using wind tunnel facility. The experiment was performed using simple flat panels whose height is 50mm, 100mm, and 200mm. Both dry snow condition and wet snow condition were reproduced in the experiment. Misty water was added to the tunnel if wet snow condition was set. We measured the accretion weight and depth, and behavior of snow particles when collided to the panel. The ratio of snow collision and accretion was calculated based on PIV system and data obtained from the experiment.

As the results, for wet condition, weight and depth of snow accretion was greater than dry condition. Such difference could be seen also in progress that snow accretion is increasing. In addition, according to calculation of snow accretion ratio based on PIV system, the ratio decreased with snow particle velocity increase, and also decreased with the collision angle increase. Based on these results, we proposed multiple regression equation using snow particle velocity and collision angle in order to quantitatively estimate snow accretion.

1. はじめに

2014年2月、関東地方では記録的大雪に見舞われた。東京では、30cm弱の積雪が2度にわたって確認されたとともに、埼玉県熊谷市および山梨県甲府市では、過去最深積雪を記録した。この記録的な大雪の影響で建築物にも大きな被害が生じ、これまで雪が少ないといわれていた地域においても降積雪に対する備えの重要性が確認された。

一方、建築物における構造部材への着雪は、以前から関東地方でも見受けられている。一冬期間に1度でも降積雪が発生すると部材への着雪が確認され、雪氷塊となって地上へ落下することによって、人的・物的被害が発生している例も少なくない。特に、高層建築物の場合、高所からの落雪

となるため被害の拡大が予想される。また、地上が雨でも上空においては気温が氷点下となる場合があり、高層建築物の上部で着雪が発生する可能性がある。しかし、着雪対策に関する技術資料の蓄積は少なく、十分な対策が実行されていないのが現状である。

このようなことから本研究では、構造部材への着雪発達過程を明らかにすることを目的に、風洞施設を利用した着雪実験を行い、雪粒子における部材への衝突率や着雪率を分析した。

2. 研究方法

着雪実験は、山形県の防災科学研究所氷雪防災研究センター新庄支所の低温風洞施設を用いて実施した。本実験で対象とした平板部材の概要およ

* 北海道科学大学大学院建築工学専攻

** 北海道科学大学工学部建築学科

*** 北海道科学大学

† 株式会社大林組技術研究所

‡ 独立行政法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

び実験シリーズを表 1 に示す。表のように、横幅を 800mm と一定にし、部材高さ H を 50mm, 100mm, および 200mm の 3 種類とした。部材の下地は厚さ 12mm の合板とし、その表面には厚さ 3mm のアルミ板を張り付けた。実験では、乾雪と湿雪の両方を対象とし、湿雪の場合は、風路風上側で水噴霧を行った。なお、乾雪の場合は水噴霧を行わないが、初めの 10 分のみ水噴霧を行い、部材への着雪を発生させた。実験時間は、50mm および 200mm が 30 分、100mm が 40 分を基本とし、200mm においては 60 分のケースも行った。

実験方法を図 1 に示す。図のように、風洞装置上部に取り付けられた回転ブラシで人工雪を攪拌させながら一定の割合で供給した。部材は、人工雪供給口から風下側に 4m の位置に設置するとともに、設置高さを風洞中央付近とした。実験環境は、室温 -2°C 、風速 U を 9.0m/s とした。着雪重量および着雪厚さは、10 分毎に計測した。着雪厚さの計測にはトラバース装置を用い、その計測間隔を 5mm とした。着雪時における雪粒子の挙動は、風洞上部からレーザースクリーンを部材へ照射し、ハイスピードカメラ（ $1/1200$ 秒モードおよび $1/60$ 秒モード）で撮影をした。なお、実験開始前に、部材高さ中央付近において飛雪流量を測定した。測定時間は 1 分間であり、ネット式吹雪計を用いた。

3. 実験結果

3.1 着雪状況

写真 1 に、部材への着雪状況を示す。写真のように、部材周辺における雪粒子の挙動をみると、 $H=50\text{mm}$ の場合は、飛雪が部材へ直進し、その表面に強く衝突する様子を観察した。これに対し、 $H=200\text{mm}$ の場合をみると、部材中央付近においては、飛雪が直進する傾向を示すものの、部材の風上側で気流が剥離しており、その剥離流に雪粒子が追従することにより、部材を避けようとする挙動となっていた。その傾向は、部材高さ H が大きいほど顕著であった。

写真 2 に、水噴霧無しおよび、水噴霧有りの着雪状況を比較した結果を示す。なお、実験時間は 60 分である。写真のように、水噴霧ありの着雪状況は、水噴霧なしの場合に比べて着雪量が多く、着雪厚さと写真に示す安息角が大きい。このように、乾雪と湿雪とで着雪量に違いが生じる。

表 1 平板部材概要および実験シリーズ

部材幅 H [mm]	水噴霧	風速 U [m/s]	実験時間 [min]
50	無し	9	30
100			40
200			30
200	無し	9	60
	有り		

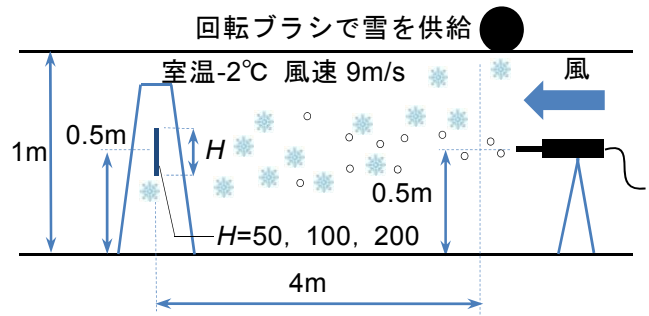


図 1 実験方法

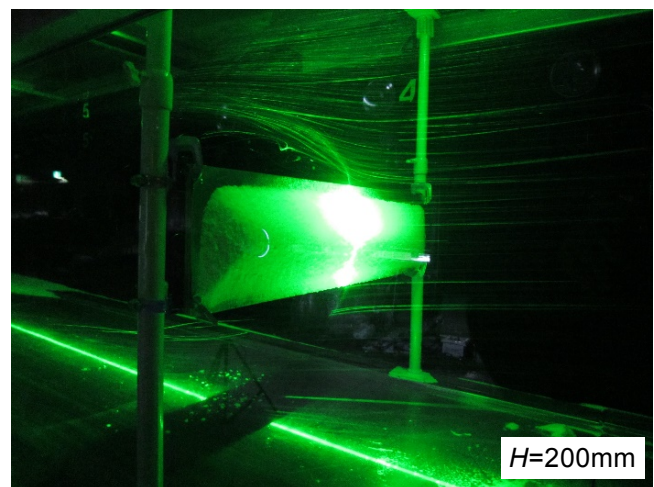
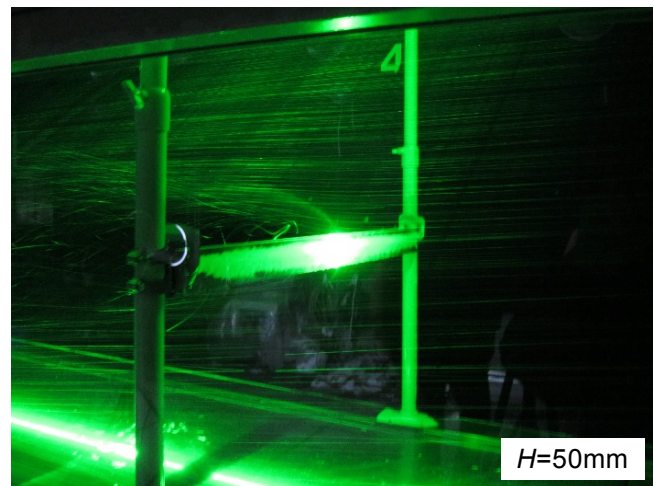


写真 1 部材への着雪状況

3.2 着雪重量と着雪厚さ

図2に、部材高さ $H=200\text{mm}$ の場合における着雪重量の時刻歴を示す。図のように、水噴霧有りの場合をみると、時間の経過に伴い着雪重量が比例的に増加し、その傾向は60分まで継続している。従って、60分以上を経過した場合においても着雪重量が増加することが予想できる。これに対し、水噴霧無しの場合をみると、30分までは時間の経過に伴い着雪重量は比例的に増加するものの、水噴霧有りの場合に比べて着雪重量が小さく、30分以降の着雪重量はほぼ一定値である。これは、着雪表面に雪粒子が強く衝突した際、衝突した雪により付着と削剥が同時に発生しているため、着雪重量が均衡状態になったと考えられる。

図3に、部材高さ $H=200\text{mm}$ における10分毎の着雪断面を示す。図のように、水噴霧有りの場合をみると、部材中央付近の厚さが大きく、上下端部に向かうに従い厚さが減少する三角断面の形状をなしており、時間の経過に伴いその三角断面の形状を確保しながら厚さが増加している。これに対し、水噴霧無しの場合をみると30分までは水噴霧有りの場合と同様の傾向を示すものの、30分以降は着雪厚さに変化が見られない。

3.3 雪粒子の衝突率および着雪率

着雪時における雪粒子の挙動を撮影した映像を5秒間抜粋し、雪粒子が部材へ衝突した回数を整理した。なお、部材を高さ方向に5分割し、それぞれの領域ごとに雪粒子の衝突回数を数えた。その結果を、水噴霧を行わないケースとして図4に示す。図のように、いずれの部材高さ H においても、部材両端部の衝突回数は中央部に比べて少なく、衝突回数の鉛直分布は着雪の断面形状に近似した。また、部材高さ H が増加するに従い衝突回数が増加する傾向にあるが、これは、分割した

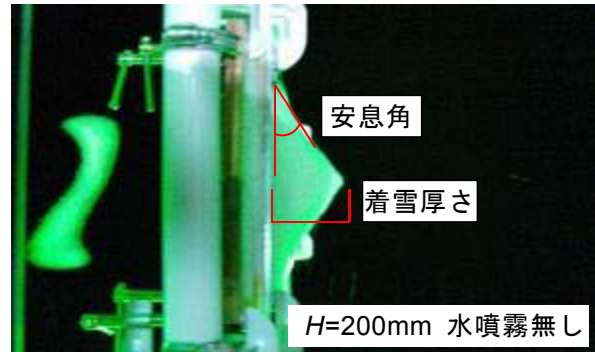
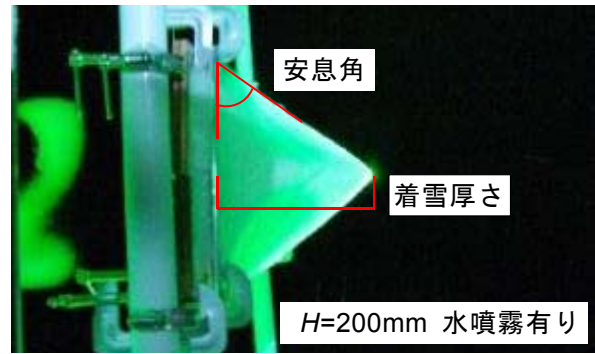


写真2 実験後の着雪の様子

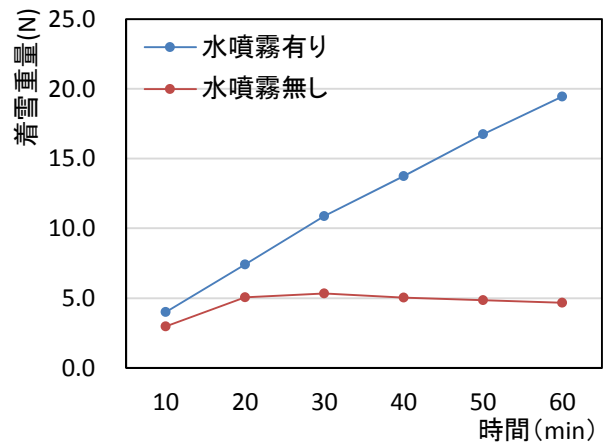


図2 $H=200\text{mm}$ の着雪重量

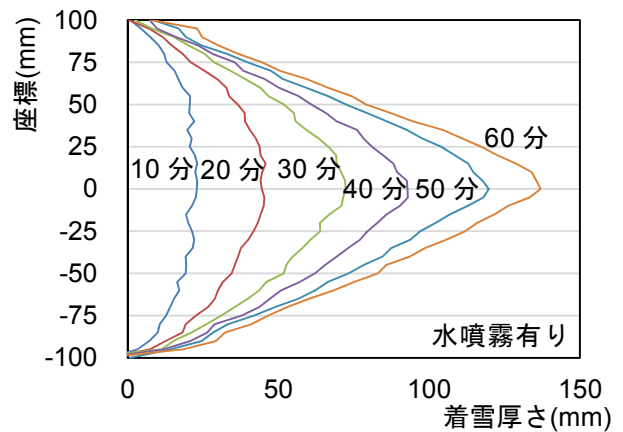
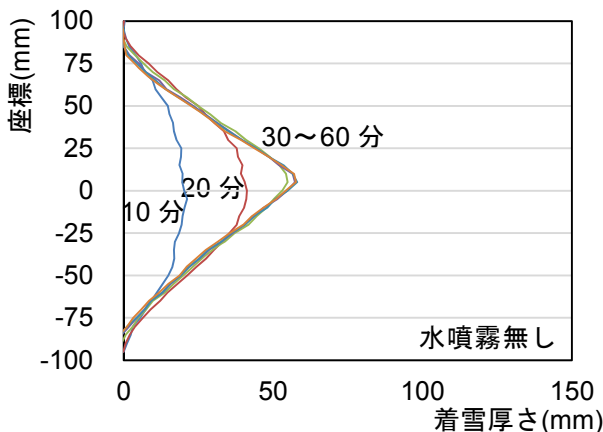


図3 $H=200\text{mm}$ の着雪厚さ

区間が部材高さ H の増加に従い大きくなるためである。次に、衝突回数から雪粒子の衝突率を算定した。算定方法は、写真 1 のように、 $H=50\text{mm}$ の部材中央付近の雪粒子が直進していたことから、その中央付近の衝突率を 100% と仮定した。そして、単位面積当たりの飛雪流量から雪粒子 1 個当たりの重量を求め、区間ごとの雪の総重量を飛雪流量で除した値とした。なお、雪粒子 1 個当たりの重量の算定結果は、約 $4.5 \times 10^{-6}\text{g}$ であった。衝突率の算定結果を図 5 に示す。図のように、 $H=50\text{mm}$ の場合をみると、部材中央から上端あるいは下端に向かうに従い衝突率が減少した。その傾向は、他の部材においても同様であった。これは、中央部より上下端部に向かうに従い、部材風上側で生じる剥離流の影響を受けやすくなり、雪粒子が部材を避けようとするためである。また、部材高さ H と衝突率との関係を見ると、 $H=50\text{mm}$ の場合は、衝突率が 1.0~0.4 の間に位置している。それに対し、 $H=200\text{mm}$ の場合は 0.4~0.2 の間に位置している。このように、部材高さ H の増加に伴い衝突率が減少する関係がみられた。これは、部材高さ H の増加に伴い、剥離流の発生個所がより風上側へ移動することから、部材を避ける飛雪が増加したと考えられる。

次に、実験時間 10 分ごとの雪粒子の着雪率を算定した。算定方法は、衝突したすべての雪粒子の重量と着雪の密度から着雪率 100% の場合における深さを求め、さらに、測定した着雪深さを着雪率 100% の深さで除した。なお、着雪の密度は測定した着雪重量を用いて算定すると、 $H=100\text{mm}$ は 0.25g/cm^3 、 $H=200\text{mm}$ は 0.19g/cm^3 となった。ここで、着雪率の算定結果を図 6 に示す。 $H=50\text{mm}$ の場合をみると、時間の経過に伴い着雪率が減少しており、その傾向は、他の部材においても同様であった。さらに、部材の中央部分と上下端部を比べると、部材中央付近に比べて上下端部の着雪率が小さい傾向を示す。これは、剥離流の影響を受け上下端部では、雪粒子の速度と着雪面に対する角度が増加するためであると考えられる。

4. 雪粒子の衝突速度と角度

以上の結果をみると、雪粒子における部材への衝突角度と衝突速度が着雪率へ影響していると考えられる。ここで、流速計測システム (PIV/PTV システム) を用いて雪粒子の速度および角度を解

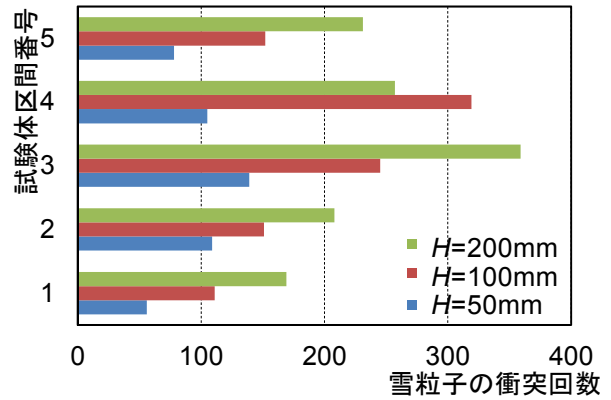


図 4 衝突回数

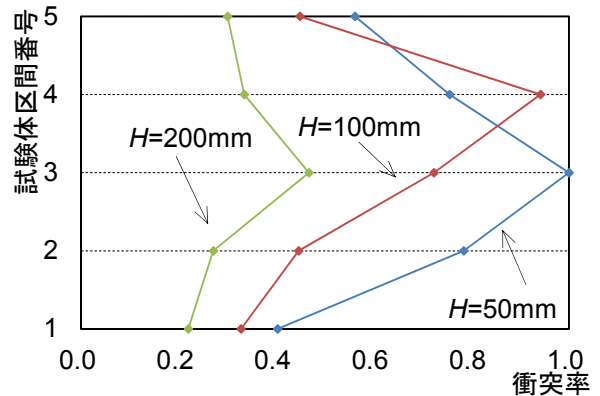


図 5 雪粒子の衝突率

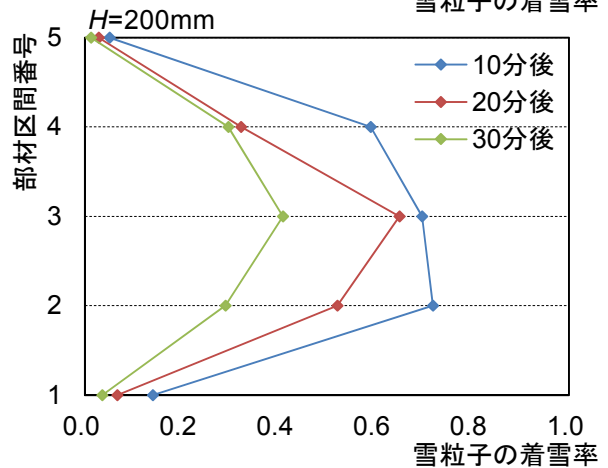
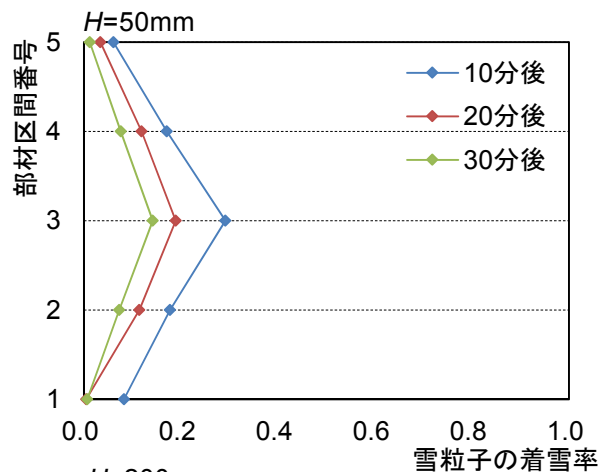


図 6 雪粒子の着雪率

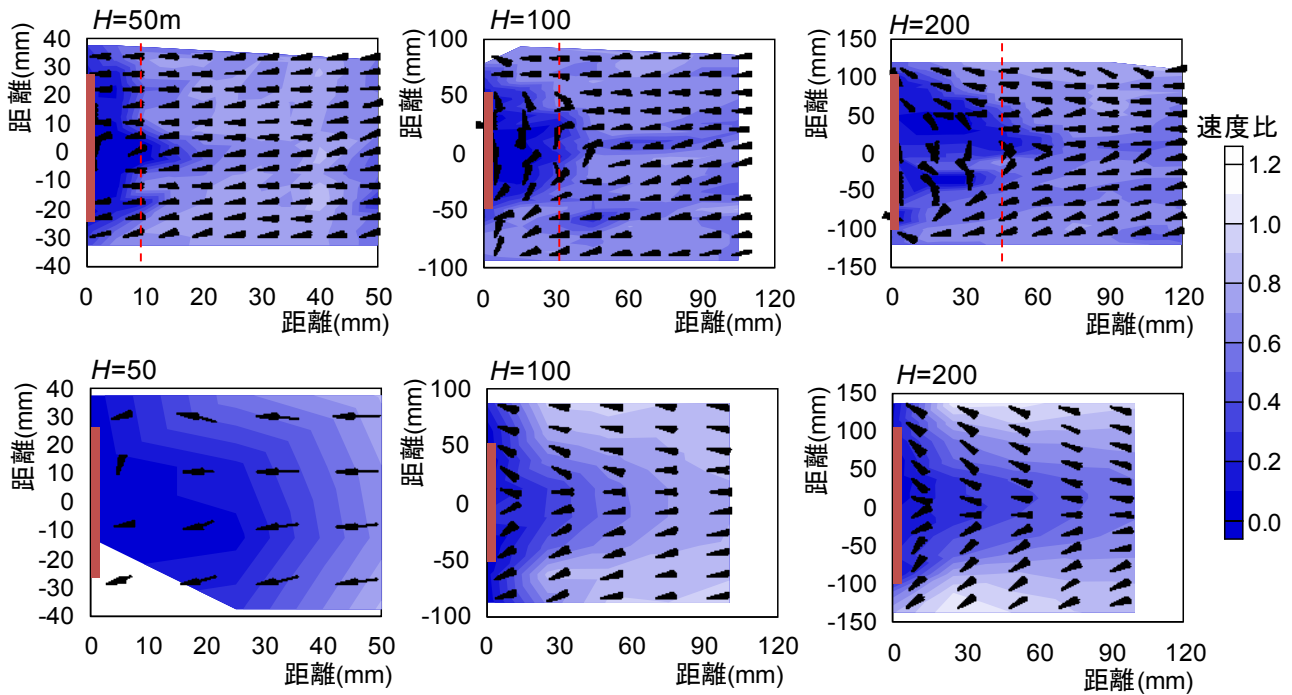


図7 雪粒子（上）および気流（下）の速度分布とベクトル図

析した。なお、雪粒子の挙動と気流の挙動とを比較するため、北海道科学大学が所有する風洞施設を用い、煙を用いた気流の可視化実験を行った。

図7に、部材高さ H ごとに示した雪粒子および気流のそれぞれの速度分布図とベクトル図を示す。なお、雪粒子のベクトル図においては、いずれの部材高さ H においてもその部材風上側で乱れた挙動をしている。これは、部材に衝突した雪粒子が跳ね返った挙動も含まれたベクトルとなっているためである。ここでは、雪粒子の跳ね返りの影響が小さい部材風上側から10~50mm離れた領域を対象とした。なお、図中の速度比は、任意点の速度を風洞施設の設定速度で除した値である。図のように、 $H=50\text{mm}$ の気流のベクトル図の場合、部材を避けるようにその中央付近から上下方向に向かって角度が増加している。それに対し、 $H=50\text{mm}$ 雪粒子のベクトルの場合、雪粒子は部材に向かって直進するような挙動を示している。このように、雪粒子は気流に依存せず慣性力の影響により直進する傾向が強いことがわかる。また、部材高さ $H=100\text{mm}$ の場合をみると、部材の上下端部においては、雪粒子が部材を避けるように角度が増加するものの、気流の挙動と比較すると、雪粒子の直進性が強いことがわかる。このような傾向は $H=200\text{mm}$ の場合においても同様であった。一方、雪粒子の速度をみると、いずれの部材高さ H においても、部材中央付近の速度が小さく、その上下方向に向かうに従い速度が増加する傾向があり、速度の小さいよみ領域と着雪形状が対応

していることがわかる。

以上の結果をみると、雪粒子の挙動はその慣性力により直進する傾向が強いものの、剥離流の影響により、一つの部材においても衝突角度および速度に差が見られる。よって、着雪率は、雪粒子の速度および衝突角度に依存するものと考えられる。ここで、水噴霧有りと水噴霧無しのそれぞれで雪粒子の速度および角度と着雪率の関係を図8に示す。なお、衝突角度は、水平軸を 0° とし、その軸から時計方向および反時計方向の角度とした。図のように、水噴霧有りの場合をみると、雪粒子の速度の増加に伴い着雪率が減少する関係がみられた。さらに、衝突角度の増加に伴い着雪率の減少する傾向もみられ、その角度が 30° 以上になると小さい速度の場合においても着雪率が減少した。水噴霧無しの場合は、 $0\sim 0.4$ の間に集中しており、衝突角度が小さい場合でも着雪率が低い傾向にある。このことから、水噴霧無しの場合水噴霧有りに比べ、雪粒子の速度が着雪率に大きく影響してくることが予想される。

ここで、着雪率 P_s を目的変数に、雪粒子の速度 V_s と衝突角度 θ_s を説明変数として、水噴霧有りと水噴霧無しのそれぞれで重回帰分析を行った。得られた重回帰式は、水噴霧無しが式1)、水噴霧有りが式2)である。

$$P_s = -0.204V_s - 0.016\theta_s + 1.479 \dots\dots\dots 1)$$

$$P_s = -0.133V_s - 0.015\theta_s + 1.247 \dots\dots\dots 2)$$

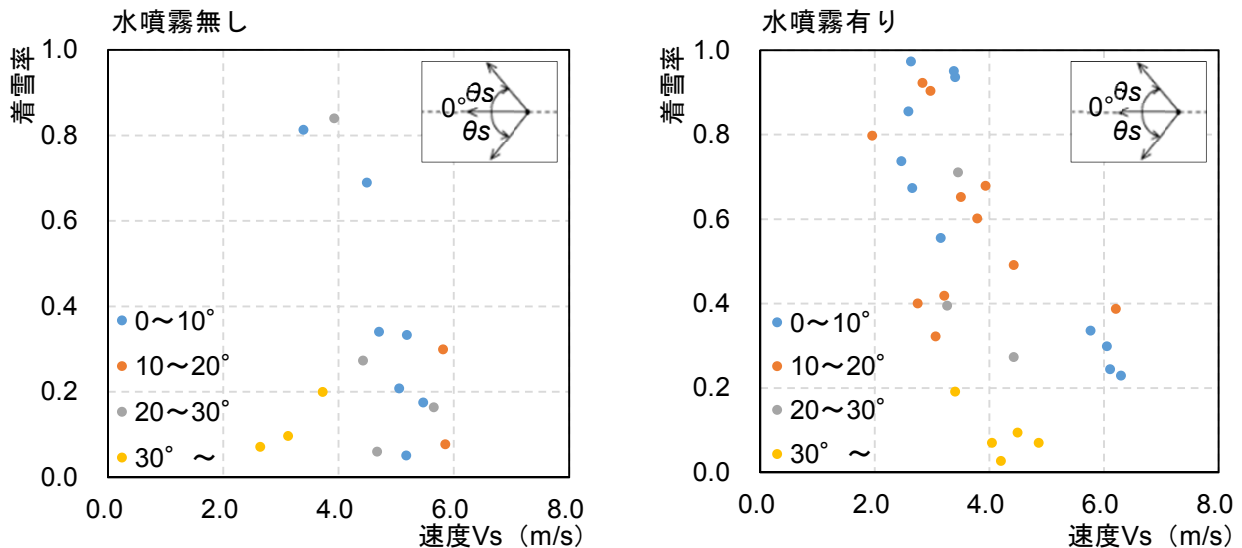


図8 角度ごとに分類した速度と着雪率の関係

表2 重回帰分析で得られた諸係数

	相関係数 R	決定係数 R^2	標準偏回帰係数	
			速度	角度
水噴霧無し	0.6259	0.392	-0.7692	-0.7911
水噴霧有り	0.8062	0.650	-0.5454	-0.5394

これらの重回帰式をみると、水噴霧無しの場合における雪粒子の速度の偏回帰係数が水噴霧有りに比べて小さく、水噴霧無しの場合の着雪率が水噴霧有りに比べて小さくなる。また、重回帰分析で得られた諸係数を表2に示す。表のように、水噴霧無しの場合のデータが少なく決定係数が小さい数値であるものの、標準偏回帰係数は、水噴霧無しと水噴霧有りのいずれにおいても速度と角度の値がほぼ同程度であり、これらのパラメータが着雪率に及ぼす影響は、大きいことがわかる。

以上の結果をみると、着雪現象は、雪粒子の部材への衝突速度と角度に大きく依存し、速度が大きいほど、あるいは角度が大きいほど着雪し難くなる。また、着雪率は、雪の含水率においても影響する可能性が高く、乾雪であるほど着雪し難くなる傾向がある。これらの結果は、部材への着雪量を定量的に評価するための重要な知見の一つになるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、構造部材への着雪発達過程を明らかにすることを目的に、風洞施設を用いた着雪実験を行い、雪粒子における部材への衝突率や着雪率を検討した。

その結果、飛雪の挙動は、部材高さ H の違いで変化しており、違いが大きいほど部材の上・下端で飛雪が部材を避けようとする挙動を確認した。また、乾雪と湿雪で着雪量に差が生じた。さらに、雪粒子における部材への衝突回数を整理し、その回数に基づいて衝突率および着雪率を分析した。その結果、着雪率は、雪粒子の速度および角度の影響を受けることを明らかにした。目的変数を着雪率、速度と角度を説明変数とした重回帰式を提案した。また、乾雪と湿雪での雪粒子の速度および角度が着雪率へ与える影響力に差が見られた。

今後は、数値シミュレーションに基づいた着雪量評価手法を構築することが重要であると考えられる。また、着雪の落下条件を導くことも重要となり、着雪箇所およびその落下状況を評価し、着雪の危険性を事前に把握するための設計手法を構築することが課題である。

【参考文献】

- (1) 日本建築学会編：雪と建築，技法堂出版，2010.8
- (2) 千葉隆弘，苫米地司，田畑侑一，大塚清敏，佐藤健吾，佐藤威，望月重人：単純形状をした構造部材への着雪性状に関する実験的研究—雪粒子の部材への衝突率と着雪率について—日本雪氷学会北海道支部機関誌 北海道の雪氷 第32号 pp34-37