

陸屋根建築物における雪庇形成時の風速特性に関する実験的研究

Experimental Study on Relationship between Wind Speed Characteristics and Snow Cornice Formation on Flat Roofs

千葉隆弘 * イセンコ・エフゲニー ** 西田浩平 **
齋藤佳彦 ** 大槻政哉 **

Takahiro Chiba, Evgeny Isenko, Kohei Nishida,
Yoshihiko Saito and Masaya Otsuki

Abstract

To clarify the formation mechanism of the snow cornice formed on the eaves of flat roofs, the authors conducted wind tunnel test using natural snow and the field observations.

In the wind tunnel test, natural snow was loaded on the roof model before the test. The formation conditions of the snow cornice were measured in each wind speed. There were six wind speeds: 2.5 m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s, 4.0 m/s, 4.5 m/s, and 5.0 m/s. As the results, snow cornice was formed at wind speeds of 3.0 to 4.0 m/s, and the distance from the eaves increased with the wind speed increases. When the wind speed exceeded 4.5 m/s, the snow cornice was not formed due to the roof snow was blown off by strong wind.

The field observations were conducted at Building 8 of Hokkaido University of Science. The authors performed continuous observation of the snow cornice using a video camera, measurements of wind direction and velocity on the roofs, and photogrammetry using aerial images. As a result, it was clarified that the snow cornice was formed when the wind speed on the roof was 4.0 m/s or small.

1. はじめに

北海道における雪による人身事故が後を絶たない。北海道の2020年冬期は、記録的な積雪の少なさになったものの、2020年1月31日現在で死者が1名、負傷者が55名となっている⁽¹⁾。このように、北海道における雪による人身事故は、積雪深の大小に関わらず、毎年のように発生しているのが実情である。ここで、筆者らが実施した北海道岩見沢市での調査結果をみると、積雪深の増加に伴い雪下ろしの実施率が増加するが、軒先に形成された雪庇のみを除去する事例が多数確認されている。このような状況を見ると、雪による人身事故の主要因である雪下ろしの実施率を低減させるためには、雪庇対策が不可欠であると考ええる。

建築物の軒先に形成される雪庇に関する既往の研究をみると、苫米地らは、雪庇を防止するための対策工を開発している⁽³⁾。現在においてもこの対策

工が用いられているものの、雪庇対策を全く行わない建築物も多く存在しているのが現状である。一方、堤らは、単純な陸屋根建築物の軒先に形成される雪庇を調査し、雪庇形成時の屋根上積雪分布や軒先からせり出す距離などを明らかにしている^(4, 5)。しかし、陸屋根建築物の高さが様々な市街地において、雪庇の形成箇所や発達状況を推定する手法は構築されていないのが現状である。現在建設が進められている多くの高層建築物では、雪庇の形成・落雪箇所を計画・設計段階で推定することが必須となっており、数値シミュレーション等による雪庇の推定手法構築が望まれている。このような背景から筆者らは、雪庇対策を行うための雪庇推定手法の構築に必要な技術的資料を整備することを目的に、吹雪風洞装置を用いた雪庇の再現実験を行うとともに、雪庇の屋外観測を行った^(6, 7, 8)。その結果、雪庇は、吹きだまりと飛雪が軒先を通過する吹雪が同時に発

* 北海道科学大学工学部建築学科 (寒地未来生活環境研究所)

** 雪研スノーイーターズ

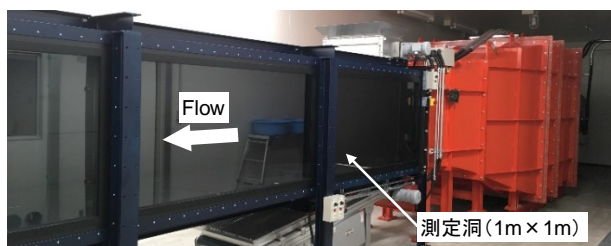


写真1 自然雪吹雪風洞装置の概要

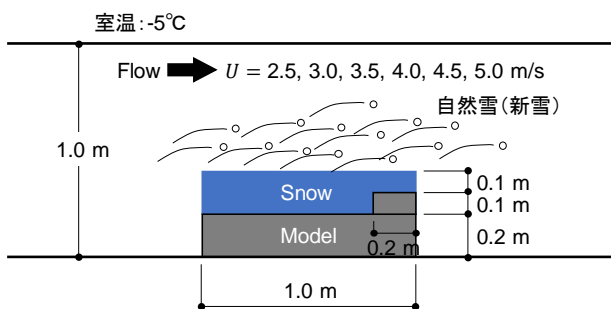


図1 実験方法

生する風速条件で形成され、吹雪風洞実験と屋外観測が概ね対応することを明らかにした。

本研究では、雪底形成時の風速条件に着雪し、吹雪風洞装置を用いた雪底の再現実験を行うとともに、実物大の建築物を対象とした屋根上の風向・風速および雪底形成状況の屋外観測を行った。

2. 自然雪吹雪風洞装置を用いた雪底の再現実験

2.1 実験方法

雪底の再現実験は、写真1に示す北海道科学大学が所有する自然雪吹雪風洞装置を用いて行った。風洞装置の全長は15 m、測定洞の長さは7 m、測定洞の断面は1 m×1 mである。実験方法を図1に示す。屋根の長さが1.0 m、パラペットの幅が0.2 m、パラペットの高さが0.1 mの木製試験体を用い、あらかじめ深さ0.2 mの自然雪(新雪)を堆積させて雪底の再現実験を行った。実験室の温度は-5℃とし、実験風速は図中に示す2.5～5.0 m/sの範囲で6種類とし、写真2に示すように、測定洞における風上側上面から自然雪(新雪)を供給して実験を行った。実験風速と実験時間との関係を表す実験シリーズを表1に示す。実験時間は、原則として10 minとし、3 minと5 minのそれぞれで実験を中断し、形成された雪底の形状を測定した。なお、風速2.5 m/sの条件では、試験体への堆積量が多くなったことから、5 min以降の実験を行うことができなかった。雪底の形状は、写真測量に基づいて測定することとし、互いに重複する50～70枚の写真を撮影し、

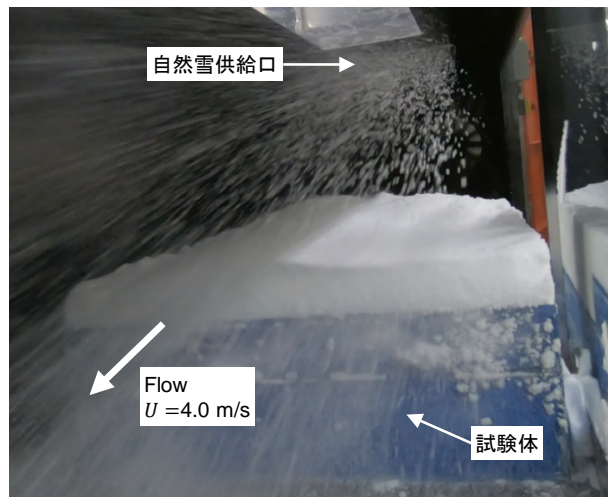


写真2 実験状況の一例

表1 実験シリーズ

風速 時間	2.5 m/s	3.0 m/s	3.5 m/s	4.0 m/s	4.5 m/s	5.0 m/s
3 min	○	○	○	○	○	○
5 min	○	○	○	○	○	○
10 min	—	○	○	○	○	○

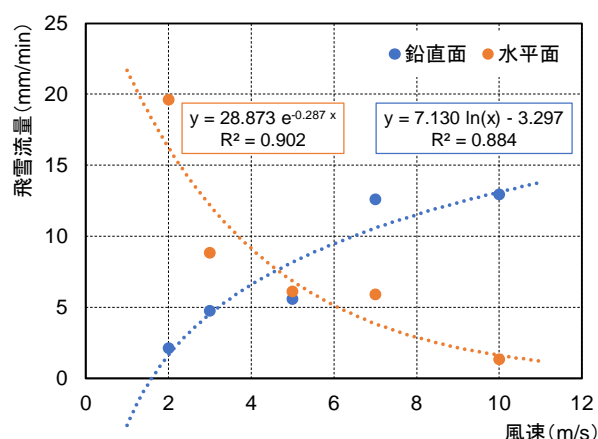


図2 風速と飛雪流量(降水換算)との関係

表2 風速および実験時間ごとの自然雪供給量

実験時間		風速					
		2.5 m/s	3.0 m/s	3.5 m/s	4.0 m/s	4.5 m/s	5.0 m/s
鉛直面	3 min	10mm	14mm	17mm	20mm	22mm	25mm
	5 min	16mm	23mm	28mm	33mm	37mm	41mm
	10 min	—	45mm	56mm	66mm	74mm	82mm
水平面	3 min	42mm	37mm	32mm	27mm	24mm	21mm
	5 min	70mm	61mm	53mm	46mm	40mm	34mm
	10 min	—	122mm	106mm	92mm	79mm	69mm

AgisoftのMetashapeを用いて雪底の3Dモデルを生成した。

本実験における自然雪(新雪)の供給量について

は、鉛直方向と水平方向に設置したネット式吹雪計を用いてあらかじめ測定した飛雪流量で捉えることとした。図2に、風速と鉛直面および水平面のそれぞれの飛雪流量との関係を示す。なお、飛雪流量は降水換算とし、1 min 当たりの降水量として示した。両者の関係をみると、鉛直面および水平面のそれぞれに当てはめた回帰式で評価することができ、これらの回帰式を用いて風速および実験時間ごとに自然雪供給量を計算すると表2のようになる。

2.2 実験結果

Metashapeで生成した実験時間5 minにおける各風速の雪庇形状を図3に示す。風速2.5 m/sをみると、軒先の積雪量が多く、軒先からせり出した距離も小さく、雪粒子が軒先を通過せずに積雪する傾向が強いことがわかる。風速3.0 m/sをみると、軒先の積雪量が多いと同時に、雪庇も大きく発達した。軒先での吹きだまりと飛雪が軒先を通過する吹雪が同時に発生した結果であると考えられる。風速3.5 m/sをみると、雪庇の大きさは風速3.0 m/sに

比べて小さくなり、薄い板状の雪庇が形成されるようになった。このような傾向は風速4.0 m/sにおいても同様であった。また、これらの風速では、試験体壁面の着雪量が多くなった。軒先の風下側に形成される気流の渦に雪粒子が追従するようになったことが要因の一つであると考えられる。次に、風速4.5 m/sをみると、雪庇は形成されなかった。軒先の積雪量については、吹きだまりに比べて吹き払いが卓越したことによって減少している様子がわかる。風速5.0 m/sをみると、極めて薄い板状の雪庇が形成されたものの、吹き払いや雪粒子の衝突によって落下する現象が頻繁に確認され、大きくは発達しなかった。以上の結果をみると、実験時間5 minの場合においては、風速2.5 m/s および4.5 m/s以上で雪庇が形成されず、風速3.0～4.0 m/sで雪庇が形成されたという結果となった。

次に、各風速における実験時間ごとの雪庇断面形状を図4に示す。なお、これら雪庇の断面形状は、試験体の中央である。風速2.5 m/sをみると、実験

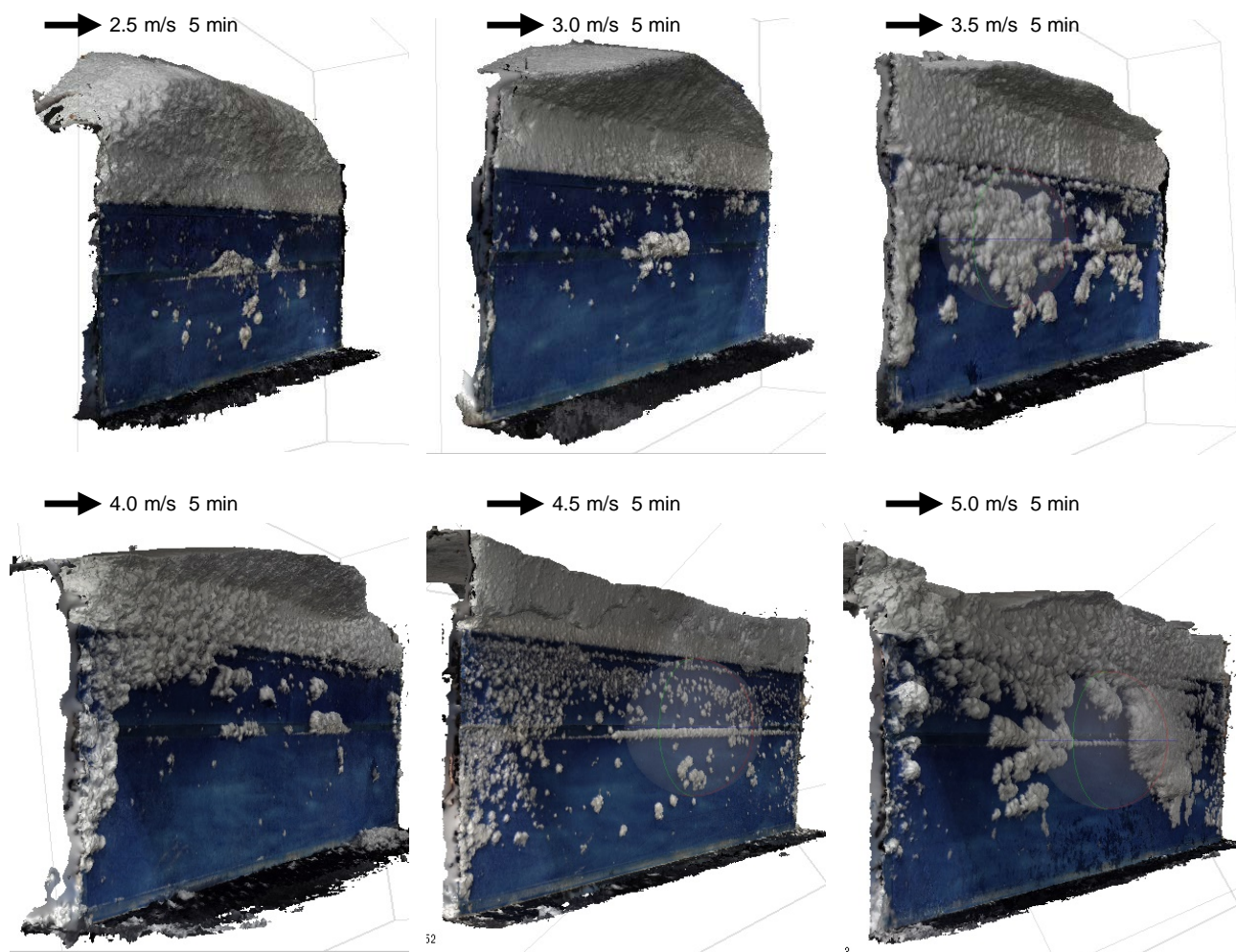


図3 各風速における測定した雪庇の形状（実験時間：5 min）

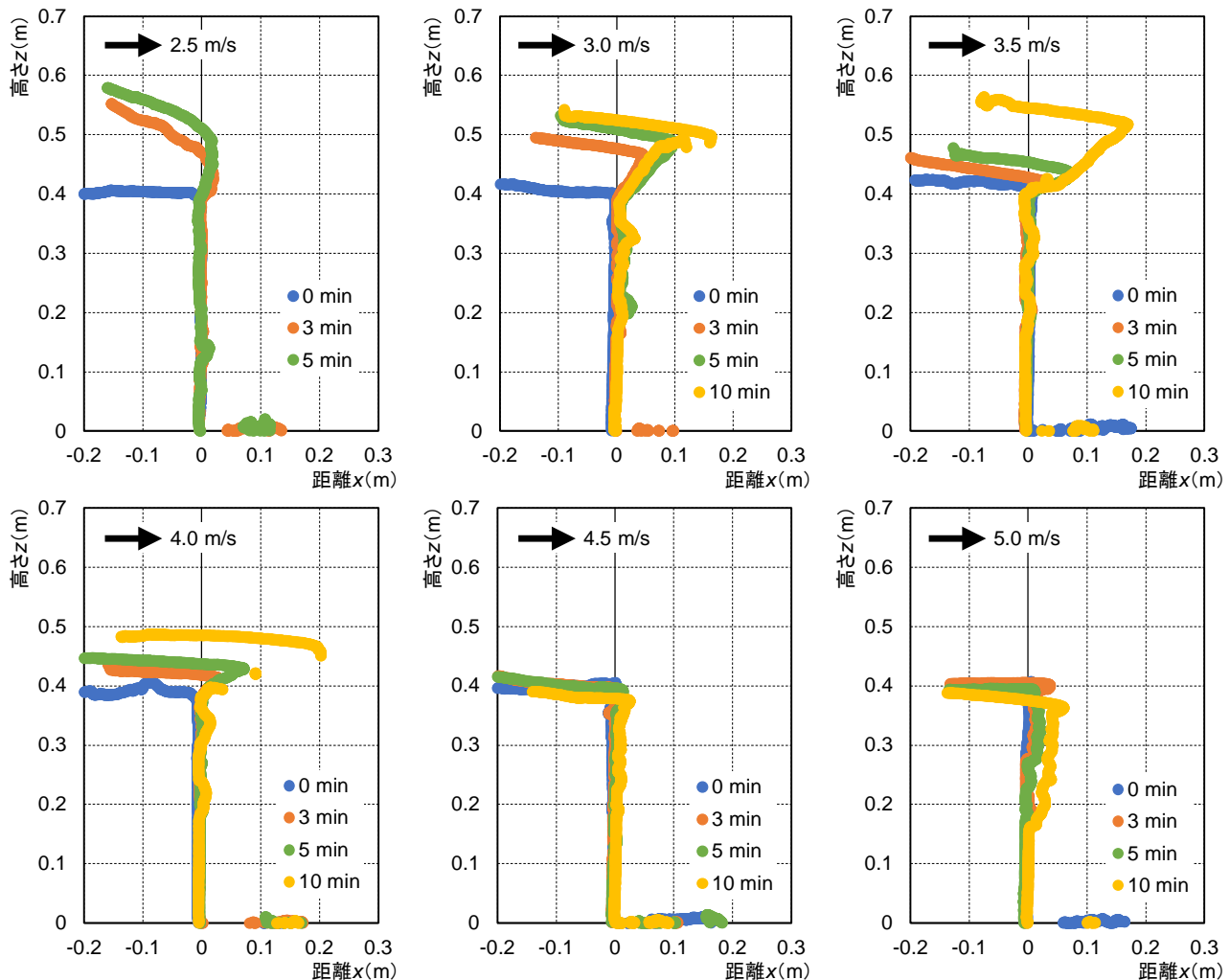


図4 各風速における実験時間ごとの雪庇断面形状

時間 3～5 min にかけて、雪庇が形成される様子は確認できない。風速 3.0 m/s をみると、実験時間 3 min までの軒先積雪量増加および雪庇の発達が目立ち、3 min 以降では雪庇の発達が顕著となり、軒先からせり出した距離は 0.15 m を超えた。風速 3.5 m/s をみると、実験時間 5 min までは薄い板状の雪庇が形成され、実験時間 10 min においては、雪庇が急速に発達した様子が伺える。軒先からせり出した距離は、風速 3.0 m/s に比べて若干大きく、0.19 m 程度であった。風速 4.0 m/s をみると、実験時間 5 min までは風速 3.5 m/s の場合と同様の傾向を示すものの、実験時間 10 min では、軒先の積雪量に比べて雪庇の発達が卓越しており、軒先からせり出した距離は 0.2 m を超えた。これらに対し、風速 4.5 m/s の場合をみると、雪庇が形成されずに軒先の積雪量が吹き払いによって減少しており、実験時間 5 min から 10 min の減少傾向が目立ち、風速 5 m/s をみると、軒先の積雪が吹き払われて減

少する傾向は風速 4.5 m/s と同様である。試験体壁面への着雪量は、風速 4.5 m/s に比べて増加しているものの、雪庇が大きく発達するまでには至っていない。

以上の結果をみると、雪庇が大きく発達する条件としては、軒先での吹きだまりと飛雪が軒先を通過する吹雪が同時に発生することであり、その風速は雪庇の再現実験において 3.0～4.0 m/s であった。

3. 屋根上の風向風速および雪庇の屋外観測

3.1 観測方法

筆者らは、2019 年冬期において、北海道科学大学の 8 号館を対象に、空撮画像を用いた雪庇形成状況の屋外観測を行った⁽⁸⁾。その観測結果の一部を図 5 に示す。8 号館は、3 階建ての東棟と 2 階建ての西棟で構成されており、2 階建て屋根北東側の軒先で雪庇を観測した。これに対し、3 階建て屋根の軒先には雪庇が形成されなかった。このように、風速

が小さいほど雪庇が形成されやすいと考えられる。このようなことから本研究では、風向風速と雪庇形成との因果関係を明らかにすることを目的とした屋外観測を実施することとした。

観測方法を図 6 に示す。観測の対象は、既往の研究と同様に、3 階建ての東棟と 2 階建ての西棟で構成される北海道科学大学の 8 号館とした。3 階建ておよび 2 階建ての屋上には風向風速計を設置し、10 min 間隔で風向、風速、および気温を測定した。使用した風向風速計は VAISALA の WXT530 であり、屋根面から高さ 1.5 m の位置に設置した。また、既往の研究において雪庇を観測した 2 階建て北東側の軒先は、地上にタイムラプスビデオカメラを設置して連続観測を行った。さらに、雪庇が形成された後に小型 UAV を用いた写真測量を行い、雪庇の観測を行った。使用した小型 UAV は、dji の Mavic 2 Pro であり、20M pixel の空撮画像を 300~400 枚撮影し、Agisoft の Metashape で 3D モデル化した。

3.2 風向風速の観測結果

観測場所から最寄りの山口 AMeDAS と各屋上で観測した風向データを用いて作成した風配図を図 7 に示す。対象とした期間は、2019 年 12 月 24 日から 2020 年 2 月 28 日である。山口 AMeDAS の風配図をみると、今冬期の主風向は西北西であることがわかる。風向 I（3 階屋上）をみると、西北西および北西の頻度が大きく、山口 AMeDAS と同程度もしくはやや北寄りの主風向である。これらに対し、風向 II（2 階屋上）の場合をみると、主風向は南西あるいは西南西を示している。ここで、山口 AMeDAS の主風向と風向 I および II との関係を整理すると図 8 になる。3 階屋上では、山口 AMeDAS の主風向に従う、あるいは、7 号館および 8 号館の

配列軸である北西が主風向となっている。一方、2 階屋上をみると、その周辺環境は、7 号館と 8 号館東棟との間に挟まれた状態となっており、その間を



図 5 既往の研究による雪庇の観測結果⁽⁸⁾



図 6 観測方法

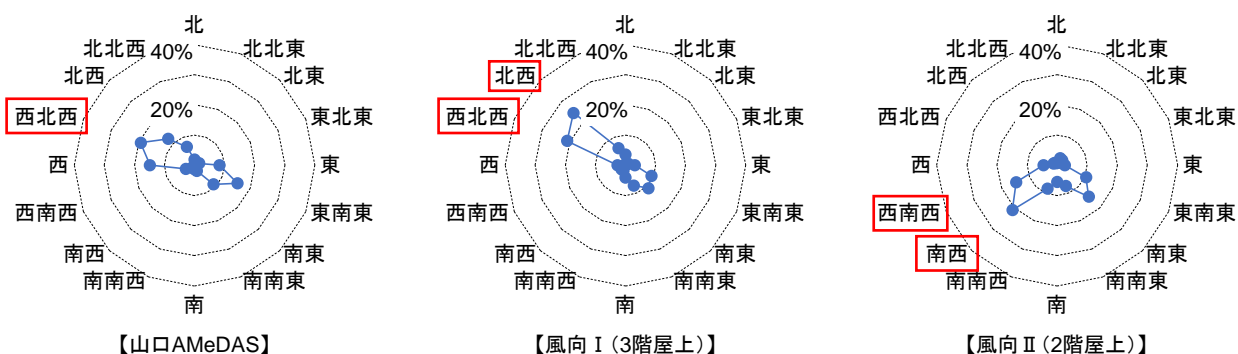


図 7 山口 AMeDAS および各屋上の風配図

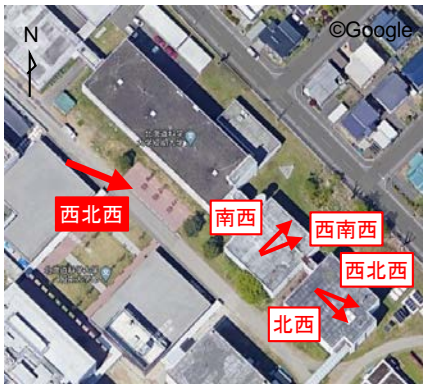


図 8 主風向を整理した結果

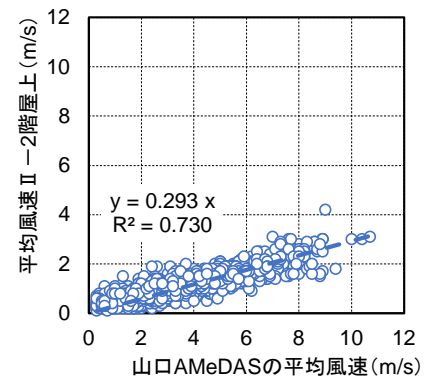
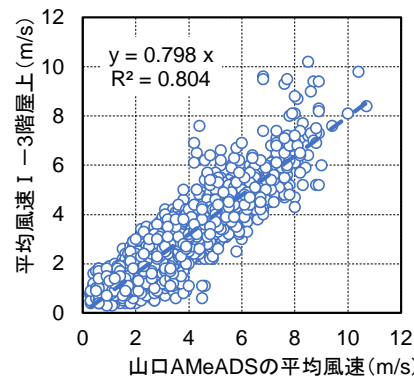


図 9 山口 AMeDAS の平均風速と各屋上の平均風速との関係



写真 3 8号館 2 階屋上における北東側軒先の雪庇形成状況

風が通過する風環境であると言える。次に、山口 AMeDAS の平均風速と 3 階屋上の平均風速および 2 階屋上の平均風速との関係を図 9 に示す。なお、図中の数値は、10 分間平均風速である。山口 AMeDAS の平均風速と 3 階屋上の平均風速との関係をみると、概ね比例関係を示し、3 階屋上の平均風速は山口 AMeDAS のおよそ 0.8 倍である。山口 AMeDAS の平均風速と 2 階屋上の平均風速との関係をみると、3 階屋上の場合と同様に比例関係を示し、2 階屋上の平均風速は、山口 AMeDAS のおよそ 0.3 倍であり、風が弱まる傾向が顕著である。以上の結果は、前掲図 5 に示した雪庇の形成箇所については、7 号館と 8 号館東棟の間を風が南西から北東に向かって通過することに起因し、風が弱まることによって北東側軒先に吹きだまりが形成されることから雪庇が発達したことを裏付けている。

3.3 雪庇形成状況の観測結果

地上にタイムラプスビデオカメラを設置し、8 号館 2 階建て屋根における北東側の軒先を観測した結果を写真 3 に示す。今冬期は、記録的な積雪の少なさであり、2020 年 2 月 28 日までの期間において、雪庇が形成されたのは 2020 年 2 月 6～8 日の間であった。既往の研究に示されている雪庇の大きさにまで発達しなかったものの、2 月 7 日に雪庇が形成

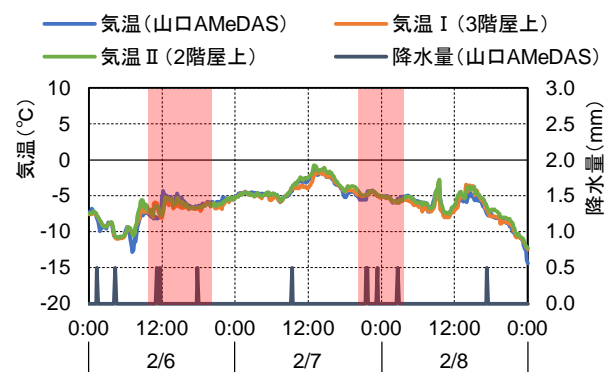


図 10 気温および降水量の推移 (2/6～2/8)

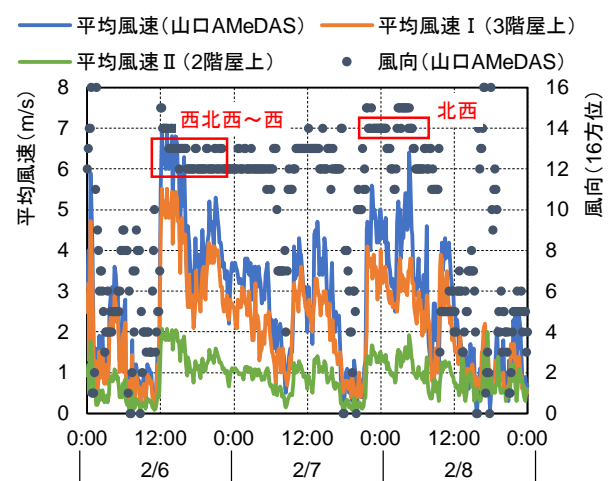


図 11 平均風速および風向の推移 (2/6～2/8)

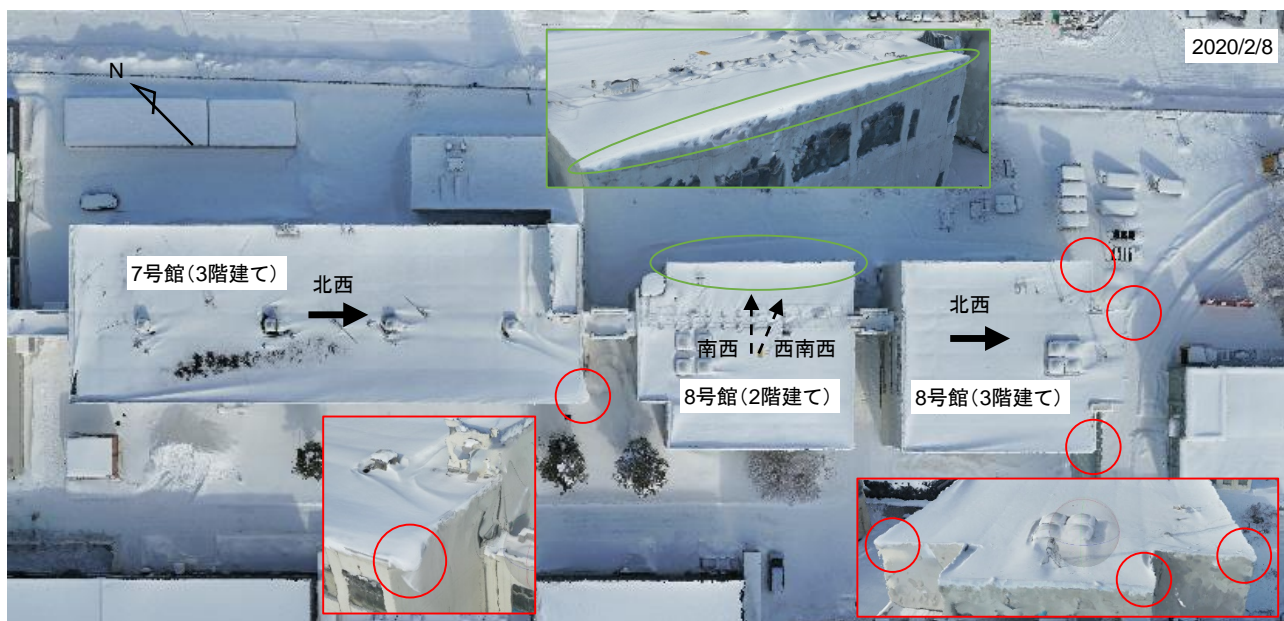


図 12 空撮画像を用いた写真測量による雪庇の観測結果（2020 年 2 月 8 日）

され始め、2月8日に雪庇が若干大きくなる様子が観測された。小型 UAV を用いた空撮画像を用いた雪庇の観測では、2月8日に、2階建て屋上北東側のみならず、その他の軒先に雪庇が形成されていることを観測した。ここで、2月6～8日における気温および降水量の推移を図 10 に、平均風速および風向の推移を図 11 に、空撮画像を用いた写真測量による雪庇の観測結果を図 12 に示す。なお、3階屋上の風向風速計 I および 2 階屋上の風向風速計 II では、センサー周りの冠雪が影響して風向が欠測となった。気温の推移をみると、いずれの観測箇所においても同程度で推移しており、2月6～8日の期間は、気温がプラスまで上昇しない真冬日となった。山口 AMeDAS で観測された降水量の推移をみると、2月6日の日中、および2月8日の未明にまとまった降雪が観測されている。次に、平均風速の推移をみると、降雪時に平均風速が増加し、降雪が止むと平均風速が減少するように推移している。降雪時における山口 AMeDAS の平均風速は 6～7 m/s であり、3 階屋上の平均風速は 4～5 m/s で推移している。これらに対し、2 階屋上の平均風速は 1～2 m/s で推移している。山口 AMeDAS で観測された降雪時の風向をみると、2月6日は西北西から西であり、2月8日は北西で推移している。ここで、雪庇の観測結果をみると、2 階建て北東側軒先の雪庇は小さいものの、7 号館南東側の軒先と 8 号館 3 階建て南東側の軒先に部分的に雪庇が形成されていた。これらの雪庇は、2月8日未明における北西か

らの吹雪によって形成された雪庇であると考えられる。このときの 3 階建て屋上の平均風速は 3～4 m/s 程度で推移しており、前章で示した雪庇の再現実験で得られた風速条件と同様である。一方、2 階建て北東側軒先の雪庇が発達しなかった要因としては、平均風速が 1～2 m/s と小さかったためであると考えられる。

以上の結果をみると、記録的な積雪の少なさによって既往の研究と同様の雪庇形成状況とはならなかったものの、屋外観測から得られた雪庇が形成される風速条件は 3～4 m/s であり、前章に示した雪庇の再現実験と同様であった。

4. まとめ

本研究では、雪庇形成時の風速条件に着雪し、吹雪風洞装置を用いた雪庇の再現実験を行うとともに、実物大の建築物を対象とした屋根上の風向・風速および雪庇形成状況の屋外観測を行った。

雪庇の再現実験では、風速 2.5～5.0 m/s を対象とした。雪庇が形成された風速は、軒先での吹きだまりと飛雪が軒先を通過する吹雪が同時に発生する 3.0～4.0 m/s であり、風速の増加に伴い薄い板状の設置が軒先から大きくせり出した。風速 4.5 m/s 以上になると、非常に薄い板状の雪庇が形成されたものの、その雪庇はすぐに落下するとともに、軒先の積雪が吹き払われ、雪庇が形成されなかった。

実物大の建築物を対象とした屋根上の風向・風速および雪庇形成状況の屋外観測では、今冬期が記録

的な積雪の少なさであったものの、降雪時の風速が4.0 m/s程度で推移した場合に雪庇が形成されており、前述における雪庇の再現実験と同様の傾向がみられた。

以上に示すように、雪庇の形成箇所を風向および風速の条件を用いて推定するための有益なデータを得ることができた。今後は、屋外観測を継続して雪庇の形成に関する基礎資料を蓄積するとともに、数値シミュレーションを用いた雪庇の推定・評価手法を検討する予定である。

なお、本研究は、JSPS 科研費 JP19K04716 の助成を受けたものである。

【参考文献】

- (1) 北海道総務部危機対策課：雪による被害状況，入手先 < <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/bsb/yukihigaizyokyou.htm> >，参照 2020.03.02
- (2) 千葉隆弘，苫米地司，高橋徹，堤拓哉：北海道で発生した雪による人身事故と雪害対策に関する研究－大雪時における除雪状況の実態と人的被害関数に基づく雪害対応能力の分析－，日本建築学会構造系論文集，Vol.80，No.708，pp.197-206，2015.2
- (3) 苫米地司，小林敏道：屋上雪庇防止工法に関する基礎的研究，日本雪工学会誌，Vol.5，No.1，pp.3-9，1989.1
- (4) 堤拓哉，高倉政寛，苫米地司：陸屋根に形成される雪庇と気象要素との関係について，日本建築学会技術報告集，No.10，pp.113-116，2004
- (5) 堤拓哉，高倉政寛，高橋章弘，苫米地司：建築物における雪庇の成長過程について，日本雪工学会誌，Vol.22，No.1，pp.3-9，2006.1
- (6) イセンコ・エフゲニー，千葉隆弘，西田浩平，齋藤佳彦，大槻政哉：雪庇・着雪現象を考慮した吹雪数値シミュレーションの検討－その1 風洞による雪庇実験と数値シミュレーションモデルの検討－，雪氷研究大会（2019・山形）講演要旨集，P2-43，2019.9
- (7) 西田浩平，千葉隆弘，齋藤佳彦，イセンコ・エフゲニー，大槻政哉：雪庇・着雪現象を考慮した吹雪数値シミュレーションの検討－その2 建築物に生じた雪庇事例の再現と検証－，雪氷研究大会（2019・山形）講演要旨集，P2-44，2019.9
- (8) 千葉隆弘，イセンコ・エフゲニー，西田浩平，齋藤佳彦，大槻政哉：陸屋根建築物における雪庇の形成メカニズムに関する基礎的研究，寒地技術論文・報告集，Vol.35，pp.31-35，2019.11