

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04467

研究課題名（和文）雪処理事故を低減する克雪建築の設計支援のための建物周辺の不均一積雪分布モデリング

研究課題名（英文）Modeling of unbalanced snow distribution around buildings for aiding designs of snow-persistence buildings to reduce snow processing accidents

研究代表者

富永 禎秀 (Tominaga, Yoshihide)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：00278079

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：これまで筆者らが開発してきたCFDに基づく飛雪現象の予測手法を、建物周辺、特に屋根上積雪分布に適用し、その精度を検証した。特筆すべき成果としては、従来より筆者らが実施してきた雪面形状の変化が流れ場に影響を及ぼさない解析手法（Single解析）に対して、降雪イベントをいくつかのphaseに分け、形状変化が流れ場に及ぼす影響を考慮する解析手法（Phase解析）を提案し、Single解析に比べて全体的に積雪深が増加し、観測に近づく他、観測結果に見られる細部における積雪深分布の傾向も再現する傾向にあることを提示したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、申請者の有するこれまでの研究成果・蓄積を建築工学、理学などの各分野の知見と融合することによって、建築物周辺の積雪の不均一分布のモデリング技術を構築した点で学術的な意義がある。また研究者らの所属機関の立地性を最大限活用し、準実大スケールモデルを対象とした積雪分布及び気象条件の時系列変化を詳細に測定する実測調査を行い、モデリングの精度検証に使えるような観測データを整備した点にも社会的な意義がある。本研究成果により、建物周辺の不均一積雪分布のモデリング手法が確立されることで、設計段階において建築物周辺で発生する雪に関する各種の障害を事前に把握することが可能となると期待される。

研究成果の概要（英文）：Prediction method of unbalanced snow accumulation on building roof using computational fluid dynamics (CFD) was developed. First, the snow depth distribution on the roofs was predicted without considering the effects of snow depth change on the flow field. The observational data of snow depth on the lower roofs could generally be reproduced. However, the specific undulations of snow near the roof step were not well reproduced by this method. Next, the effects of snow depth change on the flow field were considered through phased calculations. The study confirmed that the prediction accuracy was improved by considering these effects.

研究分野：建築・都市環境工学

キーワード：モデリング 風 雪荷重 偏分布 CFD解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

冬季に多量の降雪や強い風が発生する地域では、風雪により雪粒子が移動し、構造物の周辺では吹き溜まりや吹き込み、吹き払いが発生する。このような不均一な積雪分布が屋根上で発生した場合、建物に不均一な外力を加えるため、建物の損壊を引き起こす可能性がある他、建物使用上の様々な障害や危険に繋がる場合があり、設計段階で適切に考慮する必要がある。

日本建築学会・建築物荷重指針は、M形屋根・のこぎり屋根およびセットバックのある屋根の吹きだまりに関する屋根形状係数（気象条件を考慮しながら屋根の形状や勾配によって変化する係数）を示しているが、大規模または特殊な屋根形状の建築物における屋根形状係数は、「建設地の気象条件および屋根形状に対応した適切な調査・実験などに基づいて定める必要がある」と記載されている。この方法として、従来より検討されてきたのが、模擬雪や人工雪を用いた風洞実験である。しかし相似則による制約や多様な気象条件を再現するには実験工数や実験コストが膨大になるなど困難な点も多い。

筆者らは、このような建物周辺で発生する積雪の風による偏分布を CFD (Computational Fluid Dynamics) を利用して予測する方法について、検討を行ってきた。また筆者らの研究も含め国内外で実施された CFD の建物周辺の積雪分布への適用については、詳細なレビューを行っている。これまでの筆者らの研究においては、既往の実測結果及び風洞実験結果との比較により、主に建物モデル周辺で形成される雪の侵食や吹き溜まり分布の再現性の検討を行ってきた。

2. 研究の目的

本論文では、これまで筆者らが開発してきた CFD に基づく屋根雪分布予測手法を 2 段屋根建物モデル上で形成される積雪分布に適用し、その精度を検証する。本論文は、これまでの筆者らの検討に対して以下の 2 つの特徴を有する。第 1 に、2 段屋根モデルを対象とする点である。2 段屋根モデルは、屋根上の風による積雪の偏分布を検討するための代表的なベンチマークケースの一つとして、実験や観測による検討が国内外で行われてきた。この屋根モデルを対象とすることにより、様々な手法による予測結果と比較することが可能となり、CFD による屋根雪偏分布の予測精度をより多角的に検証することが可能となると期待される。第 2 に、積雪分布の変化が周辺の風速場に影響を及ぼし、その風速場の変化がさらに積雪分布形成に影響を及ぼすという interactive な効果を検討している点である。従来の筆者らの解析では、定常計算によって得られた流れ場に基づいて積雪分布を求めていたため、このような効果は考慮されていなかった。このような流れ場に対する形状変化の影響を考慮することは、積雪分布形状の再現性の向上に寄与すると考えられるが、当然、計算負荷（時間・手間）は増大する。工学的な観点からは、精度と計算負荷のバランスを考慮しながら、目的に応じた適切な方法を選択することが重要である。本論文では、以上の 2 点の検討を通じて、CFD の屋根雪偏分布予測への適用性に関する知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

3-1 解析対象

風向や風速などの気象条件と積雪偏分布形状の関係を調べることを目的に、土谷・苫米地らによって北海道において実施された実測結果を比較対象とする。この実測では、2 段屋根を有する試験体を屋外に設置し、一降雪イベント間の特定の風向・風速下における下段屋根上の積雪分布が観測されている。本研究では、降雪イベント中の再頻度風向角が段差に直交する条件における下段屋根が風下側の場合と下段屋根が風上側の場合の 2 ケースを採り上げた。

3-2 CFD 解析手法

RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) モデルに基づく定常解析を行った。解析領域は 50m (x) × 40m (y) × 30m (z) とし、流入境界面と建物中心との距離は 10m である。流入条件は、ベキ指数 0.15 の平均風速鉛直分布を仮定し、乱流エネルギー k 、エネルギー散逸率の分布は、日本建築学会ガイドラインに従って与えた。風速は、観測にならい上段屋根と下段屋根の中間高さ 1.3m における風速 U_b を 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0m/s の 5 段階に変化させた。その他の各種解析条件の設定は同ガイドラインに従っており、既報と同じ条件である。乱流モデルは Realizable 型 k -モデルを使用した。飛雪解析のフローを図 1 に示す。

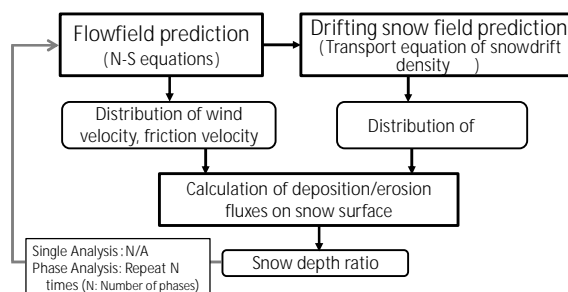


図 1 飛雪解析のフロー

雪粒子の浮遊 (Suspension) による移動は、飛雪空間密度 [kg/m³] を User Defined Scalar として定義し、その輸送方程式を解いた。積雪面における堆積フラックス、侵食フラックスをそれぞれモデル化し、その和を正味の積雪フラックスとした。本研究では、境界条件として与えている飛雪空間密度 ρ_{in} と雪粒子落下速度 W_f の積を基準堆積フラックス q_{sta} とし、正味の積雪フラックス q_{total} と q_{sta} との比を積雪深比 S_r と定義した。

3-3 雪面変化の考慮の方法

申請者らの従来の研究では、雪面を考慮しない流れ場の解析を行い、その結果に基づいて飛雪解析を行っていたため、積雪によって雪面形状が変化することによる流れ場の変化は考慮されていなかった。本論文では、この方法を「Single 解析」と称す。本論文では、積雪分布の発達過程をいくつかの段階 (phase) に分割して複数回の定常解析を行う方法を検討する。本論文では、この方法を「Phase 解析」と称す。すなわち以下の手順となる。

雪面を考慮しない流れ場及び飛雪の定常解析 (Phase I) を行い、その結果に対して、一定時間の時間経過を仮定し、積雪深を計算する。

Phase I で得られた積雪深を建物の屋根面に加算した座標点を算出し、建物と雪面が一体化した新たな形状 (geometry) ファイルを作成する。

新たな形状ファイルに基づき、解析メッシュを作成し、と同様の定常解析を行う (Phase II)。

Phase II の解析結果に対して、ある時間経過を仮定し、積雪深を得る。

Phase の数だけ、～ を繰り返す。

なお今回の解析では、既往研究を参考に、phase の数を 3 とし、各 phase の経過時間は、全体の経過時間を均等に分割した。

Single 解析及び Phase 解析の Phase I では、直交格子を使用し、建物は H/9 の均等メッシュとし、建物から離れるに従い、徐々に拡大させた。Phase 解析の Phase II 以降では、積雪分布を再現するため、物体表面に境界層セルを併用した非直交格子を使用した。

4. 研究成果

図 2 に建物中心軸上における下段屋根上における Phase 解析の最終的な積雪深比を観測及び Single 解析の結果 ($U_b=3.0\text{m/s}$) と比較して示す。また風速 $U_b=5.0\text{m/s}$ で同様の Phase 解析を実施した結果も併せて示す (この条件の最終的な積雪分布を図 3 に示す)。

4-1 下段屋根が風上の場合 (図 2 (a))

Single 解析の結果は積雪深比が凹型に分布しているのに対して、 $U_b=3.0\text{m/s}$ の Phase 解析では、分布が凸型に近く、これは観測結果と対応する傾向である。中央付近での積雪深比が Phase 解析の方が多いため、剥離流が弱くなったことで、この部分の風速が低下し、侵食しにくくなったものと考えられる。また風下側の段差付近を詳しく見ると、Phase 解析では、積雪深が段差直近で窪み状になるという観測結果の傾向がわずかながら再現されている。また Single 解析で見られた $x/H=-2.7$ 付近の積雪深のやや不自然なピークは、Phase 解析では見られない。また Phase 解析の結果は、風洞実験結果とよく一致している。 $U_b=5.0\text{m/s}$ の Phase 解析の結果は、風上側の侵食が大きくなり、風速の強い条件 A の観測結果に近づく他、段差近くの雪面の窪みもわずかに再現されている。

4-2 下段屋根が風下の場合 (図 2 (b))

下段が風上の場合に比べると、 $U_b=3.0\text{m/s}$ の Phase 解析の結果は、Single 解析の結果と分布の傾向は大きく変わらない。ただし屋根中央付近の積雪深は Phase 解析の方がやや多く、観測に近づく。また風上側の段差付近を詳しく見ると、Phase 解析では、積雪深が風上側にやや上昇し、さらに段差に向かって減少するという観測 A、C の結果と同様の傾向を示している。 $U_b=5.0\text{m/s}$ の Phase 解析の結果は、中央付近の侵食が大きくなり、積雪深比の値としては風速の強い条件 A の観測結果に近づくものの屋根風下側の分布の傾向は異なる。

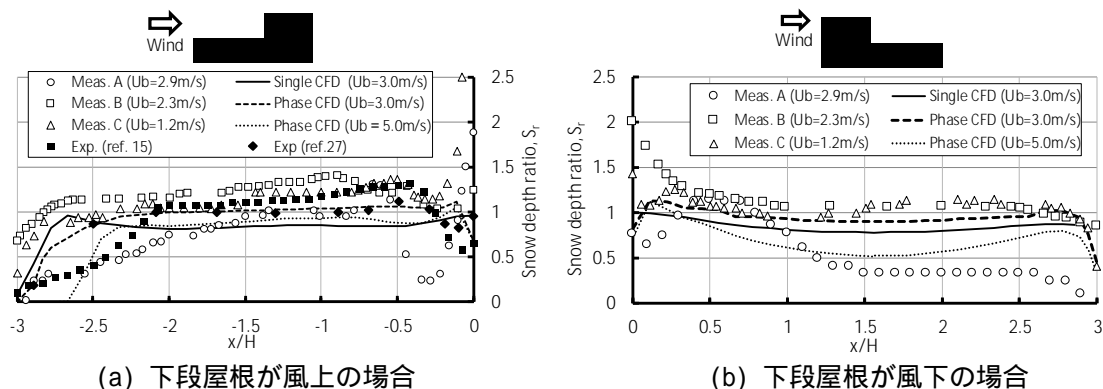
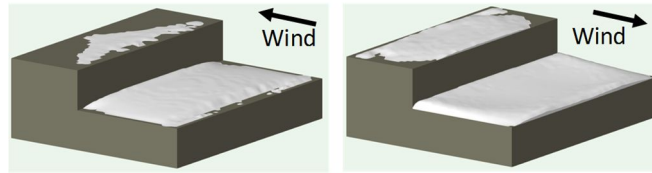


図 2 下段屋根上積雪分布の予測結果



(a)下段屋根が風上の場合 (b)下段屋根が風下の場合
 図3 Phase解析による屋根上積雪分布 ($U_b=5.0$ m/s)

本研究では、これまで筆者らが開発してきた CFD に基づく屋根雪分布予測手法を 2 段屋根建物モデル上で形成される積雪分布に適用し、その精度を検証した。得られた結論をまとめると以下の通りである。

- 従来より筆者らが実施してきた雪面形状の変化が流れ場に影響を及ぼさない Single 解析の結果は、屋根端部の積雪深の侵食などの基本的な形状は再現したもの、積雪深がやや過小であるほか、観測には見られないピークが発生するなど細部において違いが見られた。
- 降雪イベントをいくつかの phase に分け、形状変化が流れ場に及ぼす影響を考慮する Phase 解析の結果は、Single 解析に比べて全体的に積雪深が増加し、観測に近い他、観測結果に見られる細部における積雪深分布の傾向も再現する傾向にあった。
- しかしながら Phase 解析を行っても、段差付近で生じる窪み状の局所的積雪分布は観測に比べるとわずかにしか再現されなかった。これは既報と同様の結果であり、大きな要因としては、今回の定常解析では、このような局所的な雪面分布への寄与が大きいと推定される瞬間的に発生する高風速時の雪粒子の移動を考慮できない点が考えられる。また本研究で採用している Euler 的な方法では雪粒子と壁面や雪粒子同士の反発・付着の寄与を直接的に考慮していないこともさらなる要因として指摘される。
- 今回の計算条件での Single 解析と Phase 解析の結果の大きな違いは、下段風上ケースの風上端における剥離による循環流の有無である。既往文献でも指摘されている通り、風上端に形成される剥離に伴う循環流の再現は、積雪分布形状の再現に大きな影響を及ぼすため、解析時に正確に再現することが重要である。
- 風速を大きくした Phase 解析の結果は、屋根面上の侵食が大きくなり、風速の強い条件の観測結果に近づく他、段差付近の局所的な積雪分布の形成も再現する傾向にあった。

今後の研究課題としては以下が挙げられる。

- 本研究では、段差に直交する風向 (風向 0°) のみの解析を行った。しかしながら、観測においては、再頻度風向角が 0° であっても、それ以外の風向もある程度の頻度で発生している他、風速最大値発生時の風向が再頻度風向角と異なる場合もある。当然ながら段差付近で形成される流れ場は風向角の影響を強く受けるので、風向角のずれが積雪分布に及ぼす影響については、さらに検討する必要がある。
- 本研究では、Phase 数は 3 と固定し、Phase 毎の風速や降雪量などの解析条件は同一としたが、これらの条件設定の違いが結果に及ぼす影響をさらに検討する必要がある。今回の phase 解析で、Phase II と III の流れ場の違いが小さいことを踏まえると、初期段階の積雪分布の流れ場への影響のみを考慮する方法も計算負荷を減らす上では一定程度有効であると期待される。
- 観測結果も CFD による解析結果も、積雪深比の分布は風速条件によって大きく異なる。ある観測結果を再現するために与える解析条件としてだけでなく、CFD を設計時に用いる場合の検討の目的にあった代表的な風速条件の与え方について、さらに検討していく必要があると思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tominaga, Y.	4. 巻 150
2. 論文標題 Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cold Regions Science and Technology	6. 最初と最後の頁 2-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coldregions.2017.05.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tominaga, Y., Okaze, T., Mochida, A.	4. 巻 182
2. 論文標題 Wind tunnel experiment and CFD analysis of sand erosion/deposition due to wind around an obstacle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 262-271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tominaga, Y., Stathopoulos, T.	4. 巻 131
2. 論文標題 CFD simulations of near-field pollutant dispersion with different plume buoyancies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 128-139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2018.01.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Tominaga, Y., Stathopoulos, T.	4. 巻 165
2. 論文標題 Steady and unsteady RANS simulations of pollutant dispersion around isolated cubical buildings: Effect of large-scale fluctuations on the concentration field,	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 23-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2017.02.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tominaga, Y., Stathopoulos, T.	4. 巻 0
2. 論文標題 CFD simulations can be adequate for the evaluation of snow effects on structures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Building Simulation	6. 最初と最後の頁 0
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12273-020-0643-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 村山唯, 五十嵐賢次, 富永禎秀	4. 巻 第84巻
2. 論文標題 2段屋根建物上の積雪分布の再現性の検討 - CFDを用いた風による屋根雪偏分布の予測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1055-1064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.1055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 富永禎秀, 五十嵐賢次, 本吉弘岐, 山口悟, 根本征樹
2. 発表標題 気象観測結果と熱収支モデルに基づく地上積雪重量の推定方法の検証 - アルベドの値が推定結果に及ぼす影響 -
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2018・札幌)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐賢次, 本吉弘岐, 富永禎秀
2. 発表標題 屋根雪荷重推定に関する研究 - 2017/18年冬に実施した屋根試験体を対象とした観測 -
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2018・札幌)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村山唯, 五十嵐賢次, 富永禎秀
2. 発表標題 風による積雪偏分布のCFD解析 2段屋根モデルを対象とした実測との比較
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tominaga, Y., Okaze, T., Mochida, A.
2. 発表標題 Wind tunnel experiment and CFD analysis of sand erosion/deposition due to wind around an obstacle
3. 学会等名 International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (WRDM), Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Murayama, Y., Igarashi, K., Tominaga, Y.
2. 発表標題 Numerical simulation of unbalanced snow load caused by snowdrift on a two-level flat-roof building
3. 学会等名 International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation (WRDM), Sendai, Japan, March 11-14, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Murayama, Y., Igarashi, K., Tominaga, Y.
2. 発表標題 CFD Simulation of Unbalanced Snow Accumulation due to Wind on a Two-level Flat-roof Model
3. 学会等名 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE9), Auckland, New Zealand, December 3-7, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村山唯, 五十嵐賢次, 根本征樹, 富永禎秀
2. 発表標題 風による屋根雪偏分布の数値予測: 切妻屋根モデルを対象とした人工雪低温風洞実験と予備的CFD解析
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2017・十日町)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村山唯, 五十嵐賢次, 根本征樹, 富永禎秀
2. 発表標題 風による屋根雪偏分布に関する人工雪低温風洞実験とCFD解析
3. 学会等名 日本風工学会誌
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tominaga, Y
2. 発表標題 Numerical simulation of snowdrift around buildings: past achievements and future perspectives
3. 学会等名 8th International Conference on Snow Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 富永禎秀, 五十嵐賢次
2. 発表標題 風による屋根雪偏分布のCFD予測: 2段屋根建物モデルにおける積雪分布の予測
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2016・名古屋)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 村山唯, 五十嵐賢次, 根本征樹, 富永禎秀
2. 発表標題 風による屋根雪偏分布に関する人工雪低温風洞実験とCFD解析
3. 学会等名 日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富永禎秀, 村山唯, 五十嵐賢次
2. 発表標題 2段屋根モデルを対象とした風による積雪偏分布のCFD解析
3. 学会等名 日本風工学会誌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十嵐賢次, 涌井将貴, 富永禎秀
2. 発表標題 観測用建物モデルを用いた屋根雪荷重の実測 (その1: 建物モデル及び計測の概要)
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 涌井将貴, 五十嵐賢次, 富永禎秀
2. 発表標題 観測用建物モデルを用いた屋根雪荷重の実測 (その2: 常時微動測定による屋根雪積雪重量推定の試み)
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺崎浩, 富永禎秀
2. 発表標題 粒子追跡機能を用いた風による屋根積雪深分布のCFD解析: 2段屋根を対象とした実測との比較
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富永禎秀, 五十嵐賢次, 本吉弘岐, 根本征樹
2. 発表標題 気象観測結果と熱収支モデルに基づく地上積雪重量の推定方法の検証 - 2つの観測点におけるアルベドモデルの適合性 -
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十嵐賢次, 涌井将貴, 本吉弘岐, 富永禎秀
2. 発表標題 観測用建物モデルを用いた屋根雪荷重の実測 - その1: 計測概要と推定値との比較 -
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 涌井将貴, 五十嵐賢次, 本吉弘岐, 富永禎秀
2. 発表標題 観測用建物モデルを用いた屋根雪荷重の実測 - その2: 常時微動測定による振動特性の評価 -
3. 学会等名 雪氷研究大会(2019・山形)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

新潟工科大学 都市環境・風工学研究室（富永研究室）
<http://www.ytomi.net/tomilab/>
新潟工科大学 風・流体工学研究センター
<https://www.niit.ac.jp/windcenter/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	五十嵐 賢次 (Igarashi Kenji) (20715180)	新潟工科大学・工学部・准教授 (33108)	
研究協力者	スタソポラス テッド (Stathopoulos Ted)	コンコルディア大学・教授	
研究協力者	本吉 弘岐 (Motoyoshi Hiroki)	防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・主任研究員	