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

INVESTIGATION OF REPRODUCTION OF SNOW DISTRIBUTION
ON A TWO-LEVEL FLAT-ROOF BUILDING

Prediction of unbalanced snow distribution due to wind on roofs using CFD

村山 唯^{*1}, 五十嵐 賢次^{*2}, 富永 禎秀^{*3}

Yui MURAYAMA, Kenji IGARASHI and Yoshihide TOMINAGA

Unbalanced snow accumulation on a two-level flat-roof building was predicted using computational fluid dynamics (CFD). 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.

Keywords: Wind, Snow load, Unbalanced distribution, CFD, Two-level flat-roof

風, 雪荷重, 偏分布, CFD 解析, 2 段屋根

1. はじめに

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¹⁾。日本建築学会・建築物荷重指針²⁾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^{例えば 3-5)}。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⁶⁻⁹⁾。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¹⁰⁾。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が、既報¹¹⁾では、異なる勾配を有する単体の切妻屋根建物を対象に、屋根雪の吹きだまり係数の予測精度を確認した。

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¹²⁻¹⁷⁾。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⁶⁻⁹⁾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。最近の研究では、Zhao ら¹⁸⁾は、2 段屋根建物を対象とした解析において、DEM (Discrete Element Method)によって個々の雪粒子の力学的性状をモデル化し、それを CFD とカ

^{*1} 研究当時 新潟工科大学大学院工学研究科
大学院生・修士(工学)

^{*2} 新潟工科大学工学部 准教授・博士(工学)

^{*3} 新潟工科大学工学部 教授・博士(工学)

Formerly Grad. Student, Graduate School of Engineering, Niigata Institute of Technology, M.Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

Prof., Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

ップリングすることで、雪面変化が風速場に及ぼす影響を考慮している。Zhou ら¹⁹⁾は、積雪分布の形成過程を3つのstageに分割し、それぞれの定常解析を組み合わせることで、非定常な雪面変化の影響を近似的に取り入れる方法を提案している。またZhu ら²⁰⁾は、adaptive-mesh 法に基づくメッシュの再生成を行うことで、非定常な雪面変化を計算上で再現しているが、この場合も、雪面の発達過程をいくつかのphaseに分割することで再現しており、その最適な分割数についても検討している。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。

2. CFD 解析手法

2.1 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^{16, 17, 21-23)}を比較対象とする。この実測では、Fig.1に示す2段屋根を有する試験体を屋外に設置^{注1)}、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ケースを採り上げる。これは既報文献^{16, 17, 21-23)}における風向がWNWのケースであり、Table1に示す3回の降雪イベントにおける測定結果が報告されている。

2.2 CFD 解析手法

1) 流れ場の解析

ANSYS Fluent 14.5 を使用して 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 ϵ の分布は、日本建築学会ガイドライン²⁴⁾に従って与えた。流入境界における主流方向風速 U 及び k の分布をFig.2に示す。風速は、観測にならな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¹¹⁾と同じ条件である。乱流モデルはRealizable型 k - ϵ モデル²⁵⁾を使用した。

2) 飛雪解析

解析フローをFig.3に示す。雪粒子の浮遊 (Suspension) による移動は、飛雪空間密度 Φ [kg/m³]をUser Defined Scalarとして定義し、その輸送方程式((1)式)を解いた。 W_f は雪粒子の落下速度である(本研究では0.5m/sを与えた)。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial U_i \Phi}{\partial x_i} + \frac{\partial W_f \Phi}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

Table 1の3つの観測の平均的降雪量として1.0cm/hを想定し、積雪密度100kg/m³と雪粒子の落下速度 W_f を用いて求められる飛雪空間密度 Φ_m (=0.00056 kg/m³)を流入及び上空境界に与えた。

Fig.1 Building model

Table1 Conditions of measurements

Conditions	U_b	U_{bmax}	S_d	T_d
A	2.9 m/s	4.8 m/s (NW)	7 cm	17 hours
B	2.3 m/s	6.0 m/s (W)	30 cm	7 hours
C	1.2 m/s	3.5 m/s (SSE)	11 cm	26 hours

U_b : Mean wind velocity at the building height for T_d

U_{bmax} : Maximum 10-min averaged wind velocity for T_d

S_d : Increase of snow depth for T_d

T_d : Falling snow period

Fig.2 Inflow conditions

Fig.3 Outline of snowdrift calculation

Fig.4 Computational grids at center section for windward case

乱流シュミット数 σ_s は1.0とした。

雪面における堆積フラックス q_{dep} [kg/m²s]は、既報¹¹⁾と同様、Naaim ら²⁶⁾の提案による次式を用いた。

$$q_{dep} = W_f \Phi_p \left(\frac{U_{*t}^2 - U_t^2}{U_{*t}^2} \right) \quad (U_* < U_{*t}) \quad (2)$$

U_* : 雪面の摩擦速度, U_{*c} : 限界摩擦速度 (=0.25m/s)

Φ_p : 雪面に接するセルの飛雪空間密度

雪面のシアストレスによる侵食フラックス q_{ero} [kg/m²s]は次式でモデル化した。

$$q_{ero} = -A_e \rho_i U_* \left(1 - \frac{U_*^2}{U_{*c}^2}\right) \quad (U_* > U_{*c}) \quad (3)$$

A_e : 比例定数 (1.0×10^{-5}), ρ_i : 氷の密度

なお(1)~(3)式の飛雪モデルに現れるモデル係数については、既報¹¹⁾での感度解析によって値の妥当性を検討している。正味の積雪フラックス q_{total} [kg/m²s]は、次式で与えられる。

$$q_{total} = q_{dep} + q_{ero} \quad (4)$$

侵食が発生した場合($U_* > U_{*c}$)には、 Φ の輸送方程式の雪面境界条件として q_{ero} を与えた。 $q_{total} < 0$ の場合、 $q_{total} = 0$ とする。

以上の飛雪モデルを User Defined Function として CFD コードに組み込んだ。

3) 積雪深比の算出

実測結果^{16, 17, 21, 22)}の屋根上の積雪深は、建物の影響を受けない地上積雪深との比である積雪深比として表現されている。本研究では、境界条件として与えている飛雪空間密度 Φ_m と雪粒子落下速度 W_f の積を基準堆積フラックス q_{sta} として、(4)式で求められる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²⁾。

$$S_r = \frac{q_{total}}{q_{sta}} \quad (5)$$

なお後述する積雪深の変化を形状変化として再現する解析では、次式によって積雪深の増加分 Δh [m]を算出した。

$$\Delta h = \frac{q_{total} \Delta T}{\rho_s} \quad (6)$$

ρ_s : 積雪密度 (本研究では 100kg/m³と仮定)

ΔT : 経過時間[s]

2.3 雪面変化の考慮の方法

筆者らの従来の研究^{6-9, 11)}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³⁾。

- ①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。
- ②Phase 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。
- ③新たな形状ファイルに基づき、解析メッシュを作成し、①と同様の定常解析を行う (Phase II)。
- ④Phase 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。
- ⑤Phase の数だけ、②~④を繰り返す。

なお今回の解析では、既往研究^{19, 20)}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⁴⁾。

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 (Fig. 4(a))。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 (Fig. 4(b))。

3. 積雪分布変化を考慮しない解析 (Single 解析) の結果

3.1 流れ場の解析結果

実測^{16, 17)}を行った著者らによって、同一形状の建物モデルを対象として詳細な風速分布を計測する風洞実験が実施されている²³⁾。流れ場の予測精度を確認するために、風洞実験結果との比較を行う。Fig.5 は $U_b=3.0$ m/s の場合の両ケースの中心断面における CFD によって得られた流線と風洞実験によって得られた風速ベクトルの比較である²⁵⁾。実験結果では、下段が風上側の場合 (Fig.5(a))、下段屋根の風上端で剥離に伴う小さな循環流が発生し、さらに段差付近で衝突に伴う循環流が形成されている。これに対して下段が風下側の場合 (Fig.5(b))、上段屋根上に剥離に伴う循環流が生じている他、上段屋根背後に形成される大きな循環流が下段上に形成されて

Fig.5 Comparisons of velocity vectors by wind tunnel experiment²³⁾ and streamlines by CFD at the center section

いる。CFD による解析結果は、風洞実験による流れ場のパターンをよく再現している。

3.2 風速が積雪分布に及ぼす影響

1) 下段屋根が風上の場合

Fig. 6(a)に風速別の2つの屋根面上の積雪深比の比較を示す。色の濃い部分は、侵食が大きいことを表す。 $U_b=1.0\text{m/s}$ では、屋根上の積雪分布はほぼ平坦であるが、上段屋根の風上側でわずかに侵食が見られる。風速が大きくなるに従い、上段屋根の侵食は増加し、下段屋根上は外周部だけでなく、段差付近においても両脇から雪の侵食が進んでいる。これは、段差部分に衝突した風が、両端方向への吹きおろしとなって、この部分の風速が大きくなるために発生していると考えられる。このような段差付近の両脇からの侵食は、観測においても確認されている (Fig. 7(a)参照) ^{21, 注6)}。下段屋根の中心軸上における各風速別の積雪深比 S_r の分布を Fig. 8(a)に示す。屋根中央部においては、風速が増加するに従い、概ね均等に積雪深比が減少している。段差 ($x/H=0$) 付近においては、積雪深比の変化はほとんどなく、ほぼ 1.0 である。風上端において、風速 $U_b=3.0\text{m/s}$ を超えると、積雪深比はほぼ 0 になり、この部分の侵食が大きいことを示している。風上側 $x/H=-2.7$ 付近において、積雪深比のピークが見られ、風速とともにやや増加している。Fig. 5(a)で見られるように、この位置は屋根風上端付近で発生する循環流の手前であり、風速が周囲に比べて急激に弱くなるために、端部の剥離流によって

強く侵食された雪が、この部分の低風速によって堆積するように予測されるためである。

2) 下段屋根が風下の場合

Fig. 6(b)に風速別の2つの屋根面上の積雪深比の比較を示す。下段が風上側のケースと同様に、 $U_b=1.0\text{m/s}$ では、屋根上の積雪分布はほぼ平坦である。風速が大きくなるにつれ、上段屋根の侵食は増加するが、この部分の積雪深比は下段風上の場合に比べて大きい。これは Fig. 5(b)に見られるように、下段風上のケースでは下段屋根の風上端で発生する強い剥離流が直接上段風上端に到達しており、上段屋根上では循環流が発生していないが、下段風下の場合は上段屋根の風上端で剥離による循環流が発生することによって、風速が弱まり侵食量が減少したことによる。下段屋根上では、風速が増加するに従って中央付近において侵食が進んでいるものの、外周部や段差部分での強い侵食は見られない。これは下段屋根上は大きな循環流の中にあり、局所的な風速の速い部分が発生していないためと考えられる。下段風下の場合のこのような比較的平坦な侵食の状況は、観測結果 ²¹⁾と対応している (Fig. 7(b))。下段屋根の中心軸上における各風速条件別の積雪深比 S_r の分布を Fig. 8(b)に示す。屋根中央部においては、風速が増加するに従い、 $x/H=1.5$ 付近を負のピークとして、積雪深比が減少している。下段風上の場合と同様に、段差付近においては積雪深比の変化はほとんどなく、ほぼ 1.0 である。風下端において、いずれの風速でも積雪深比は最小となり約 0.3 で

Fig.6 Snow depth ratio on the lower roof predicted by CFD with different wind velocities

(a) Windward case (b) Leeward case
Fig.7 Photo of snow accumulation on the lower roof ²¹⁾

ある。

3.3 積雪深比の観測との比較

Fig.9は、下段屋根上の建物中心軸におけるCFDと観測の積雪深比を比較したものである。Table1の3つの条件全ての観測結果を示している。CFDは、 $U_b=3.0\text{m/s}$ を代表的な結果として比較する。また筆者らが既報において提案している風速の異なる条件の結果を重みづけ平均した結果（中央値 $U_{bave}=3.0\text{m/s}$ ）^{注8)}も併せて示す。また同じ形状の建物モデルを対象に模擬雪を使用して行われた風洞実験結果^{15,27)}を併せて示す。

1) 下段屋根が風上の場合 (Fig. 9(a))

観測結果は、観測条件によって比較的大きな差が生じており、平均風速の大きい条件Aでは、屋根中央より風上側で大きく侵食されている。本解析条件では、重みづけ平均をした結果は、 $U_b=3.0\text{m/s}$ だけの結果と殆ど変わらなかった。CFDによる風上端部付近における積雪深の分布は、比較的低風速の観測B、Cの傾向をよく再現している。しかしながらCFDの結果は、積雪深比が $x/H=-2.7$ 付近でピークとなり、そこから凹型にくぼんだ分布形状になっており、観測とは傾向が異なる上に積雪深比の値が全体的に観測よりも小さい。またCFDの結果は、風下側の段差に近づくにつれ積雪深比が少しずつ増加するが、観測結果は一旦減少して $x/H=-0.3$ 付近で窪みが生じ、さらに段差壁面に沿って増加する分布となっており、傾向が異なる。このような局所的な分布を形成する雪粒子の移動は、主として瞬間的に発生する高風速時に発生していると推定され、この不一致は、現在の定常解析ではこのような瞬間的な雪粒子の移動を考慮できない点に起因する部分が大きいと考えられる^{注8)}。さらには、このような急峻な積雪深分布の形成は、雪粒子と壁面や雪粒子同士の反発・付着の寄与も大きいと考えられるため、本解析のような個々の雪粒子の挙動を扱わないEuler的な手法の限界も示唆される。

2) 下段屋根が風下の場合 (Fig. 9(b))

下段風上の条件と同様に、平均風速の大きい条件Aでは、屋根風下側で大きく侵食されている。また本解析条件でも重みづけ平均を施した結果は、 $U_b=3.0\text{m/s}$ だけの結果と殆ど変わらなかった。CFDの結果は、中央付近でやや減少するものの分布はほぼ平坦で、風下端で急激に積雪深比が減少するという比較的低風速の観測B、Cの結果は再現されている。ただし下段風上側の場合と同様に、積雪深比が全体的にCFDの方が観測よりも小さい。また風上側の段差に近づくにつれて積雪深が徐々に増加する傾向は、観測結果を再現しているが、段差付近で積雪深比が減少するという観測A、Cの傾向は、下段風上側の場合と同様に再現できていない。

4. 積雪分布変化に伴う流れ場の変化を考慮する解析 (Phase 解析) の結果

(a) Windward case

(b) Leeward case

Fig.8 Influence of wind velocity on snow accumulations on the lower roof along the centerline of the building

(a) Windward case

(b) Leeward case

Fig.9 Comparison of snow depth ratios between measurements and CFD on the lower roof along the centerline of the building

4.1 流れ場と積雪分布の解析結果

$U_b=3.0\text{m/s}$ の条件でPhase解析を行った場合の各Phaseにおけ

Fig.10 Streamlines and snow accumulations obtained by phase analysis for windward case ($U_b = 3.0\text{m/s}$)

Fig.11 Streamlines and snow accumulations obtained by phase analysis for leeward case ($U_b = 3.0\text{m/s}$)

る中心断面の流線と積雪の3次元分布を Fig. 10, 11 に示す。

1) 下段屋根が風上の場合 (Fig. 10)

流線を見ると、Phase が進行するにつれて積雪が増加し、その影響で下段屋根風上端に積雪の傾斜面が形成される。そのため下段風上端で形成される剥離に伴う循環流が消滅し^{注9)}、段差付近で生じる循環流も徐々に小さくなっている。積雪深の3次元分布を見ると、Fig. 6(a)に見られたように、本条件では段差部分に衝突した気流が下段屋根上で屋根中央部から外周に広がるように流れるため、外縁部分の雪の侵食が大きく、積雪面が形成する角度は発達せず、比較的緩やかなままである。

2) 下段屋根が風下の場合 (Fig. 11)

上段屋根面で生じる剥離に伴う循環流は、Phase の進行に伴う積雪の傾斜面の発生により消滅する。しかしながら下段屋根上の循環流は積雪分布によって大きな影響を受けていない。積雪の3次元分布を見ると、Fig. 6(b)に見られたように、本条件では下段屋根上では段差背後の循環流が形成され、屋根外周から中央部に向かって流れるため、外縁部分の雪の侵食が小さく、屋根端部まで比較的均等

(a) Windward case

(b) Leeward case

Fig.12 Comparison of snow depth ratios between measurements and CFD (Single and Phase analyses) on the lower roof along the centerline of the building

(a) Windward case

(b) Leeward case

Fig. 13 Snow accumulations by phase analysis with $U_b=5.0\text{ m/s}$

に雪が堆積し、積雪面が形成する角度は徐々に大きくなる。

4.2 中心軸上の積雪分布の観測との比較

Fig. 12 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3章で示した 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 Fig. 13 に示す)。

1) 下段屋根が風上の場合 (Fig. 12(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 解析の方が多いのは、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、文献 27 の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。

2) 下段屋根が風下の場合(Fig. 12(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。

5. 結論

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、観測に近づいた他、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²⁰⁾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^{注 11)}。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¹⁹⁾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。
- 本論文では、段差に直交する風向(風向 0°) のみの解析を行っている。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。

- 本論文では、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^{注 10)}について、さらに検討していく必要があると思われる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP 16H04467「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」の助成を受けたものです。また CFD 解析に際して、畠山美優氏(当時新潟工科大学学部生)のご協力を得ました。なお匿名査読者より重要ご指摘・ご示唆を頂きました。記して謝意を表します。

注

注 1) 観測では、同じ形状で向きが逆の試験体が 2 体平行に並んでいる。

注 2) 地表面における積雪分布を正確に予測するためには、地表雪面における saltation による雪の輸送過程を正確に予測する必要があるが、通常、適当な流入境界条件を与える情報が不足していることと、地表面付近で細かい解像度が必要になり解析負荷が増大することから、既報¹¹⁾と同様にこのような扱いとした。

注 3) 本研究では、一連のデータ変換操作は手入力によって行ったが、多くの商用ソフトでは、こうした操作もバッチ処理である程度自動化して行うことが可能である。

注 4) Zhou ら¹⁹⁾が行っているように phase 毎の気象条件を代表させて異なる境界条件(期間、風速、降雪量)を与えることも可能であるが、観測期間内の気象条件の変化が十分明らかでないことも考慮し、本研究では第一段階として最も基本的な条件設定とした。

注 5) 流れ場は、風速によらずほぼ相似であることを確認している。

注 6) Fig.7 の写真は、Table 1 に示した今回解析対象とした観測条件において撮影されたものではなく、類似の観測条件時のものである。

注 7) 吹きだまり形成過程においては、乱流による瞬時的な風速変動以外に、平均風速も時間によって変化しているため、常に一定の侵食・堆積が起こっている訳ではない。よって、期間全体の平均風速を与えた定常解析によってこの過程を正確に再現することには限界があると考えられる。定常解析でこの効果を再現するため、文献 11 では、平均風速の発生頻度が正規分布に従うと仮定し、平均風速を U_{ave} とした場合に、 $U_b=U_{ave}$ の解析結果を 40%、 $U_b=U_{ave}\pm\sigma$ の解析結果をそれぞれ 25%、 $U_b=U_{ave}\pm2\sigma$ の解析結果をそれぞれ 5% で重み付け平均して、 U_{ave} での積雪分布を求める方法を提案している。本解析では、 σ は 1.0m/s とした。

注 8) この点を改善するためには、LES (Large Eddy Simulation) のような瞬間的な風速変動を再現する非定常な解析手法を採用する必要があると思われるが、実用面では解析負荷が格段に大きくなる問題がある。今後の課題としたい。

注 9) 同様の結果を Zhou ら¹⁹⁾も報告しており、Zhou らは、雪の安息角を考慮し、 50° の傾斜を有する初期積雪分布形状を与えた CFD 解析により、より現実的な積雪分布が得られることを示している。

注 10) 例えば、建築物荷重指針・同解説²⁾においては、屋根形状係数を決定するための風速は、1 月と 2 月の屋根高さの平均風速を用いることとされている。

注 11) 観測の条件では、積雪時には雪面と下段屋根面が近くなるため、瞬間

的に地吹雪で跳躍した雪粒子が屋根面に到達している可能性も考えられる。

参考文献

- 1) Architectural Institute of Japan, Yuki to Kenchiku (Snow and Architecture), Gihodoushuppan, 2010 (in Japanese)
日本建築学会編: 雪と建築, 技報堂出版, 2010
- 2) Architectural Institute of Japan, AIJ Recommendations for Loads on Buildings, Architectural Institute of Japan, 2015 (in Japanese)
日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 3) Endo, A. and Tomabechei, T.: The Relation Between the Roof Inclination and the Forming Conditions of the Snow Depth, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.357, pp.20-28, 1985.11 (in Japanese)
遠藤明久, 司: 活性白土を用いた風洞実験による水平屋根, 山形屋根の屋上積雪形状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 357 号, pp.20-28, 1985.11
- 4) Sakurai, S. et al.: Study on the Estimation of Ununiform Snow Accumulations on Roofs Based on Wind Tunnel Tests Using Artificial Snow and Wind Pressure Coefficients, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.72, No.620, pp.9-16, 2007.10 (in Japanese)
桜井修次, 真田朋幸, 阿部 修, 城 攻: 人工雪を用いた降雪風洞実験および屋根面の変動風圧分布特性に基づく屋根雪分布形状の推定に関する開発研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 72 巻, 第 620 号, pp.9-16, 2007.10
- 5) Tsutsumi, T. et al.: Effects of Turbulence Intensity on Snowdrift Based on Wind Tunnel Experiment Using Model Snow, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.72, No.613, pp.29-34, 2007.3 (in Japanese)
堤 拓哉, 高橋章弘, 千葉隆弘, 苔米地司: 模擬雪を用いた風洞実験における乱れ強さの変化が吹きだまり性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 72 巻, 第 613 号, pp.29-34, 2007.3
- 6) Tominaga, Y. et al.: Basic Investigation of Modeling for Erosion and Accumulation on Snow Surface: Numerical Prediction of Snowdrift Around Building Using CFD, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No.643, pp.1083-1089, 2009.9 (in Japanese)
富永禎秀, 大風 翼, 持田 灯, 志田貴之, 吉野 博: 雪面の侵食・堆積のモデル化に関する基礎的検討—CFD による建物周辺の飛雪現象の数値予測, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 643 号, pp.1083-1089, 2009.9
- 7) Tominaga, Y., Okaze, T. and Mochida, A.: CFD Modeling of Snowdrift Around a Building: An Overview of Models and Evaluation of a New Approach, Building and Environment, Vol. 46, pp.899-910, 2011.4
- 8) Tominaga, Y., Mochida, A., Okaze, T., Sato, T., Nemoto, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Tsutsumi, T., Otsuki, M., Uamatsu, T. and Yoshino, H.: Development of a System for Predicting Snow Distribution in Built-up Environments: Combining a Mesoscale Meteorological Model and a CFD Model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 99, No. 4, pp.460-468, 2011.4
- 9) Okaze, T. et al.: Development of New Snowdrift Model Based on Two Transport Equations of Drifting Snow Density: Numerical Prediction of Snowdrift Around Buildings Using CFD (Part 2), Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.78, No.684, pp.149-156, 2013.2 (in Japanese)
大風 翼, 富永禎秀, 持田 灯: 2 つの飛雪空間密度の輸送方程式に基づく新たな飛雪モデルの開発—CFD による建物周辺の飛雪現象の数値予測, その 2, 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 684 号, pp.149-156, 2013.2
- 10) Tominaga, Y.: Computational Fluid Dynamics Simulation of Snowdrift Around Buildings: Past Achievements and Future Perspectives, Cold Regions Science and Technology, Vol.150, pp.2-14., 2018.6
- 11) Tominaga, T., Okaze, T. and Mochida, A.: Validation of Prediction Method of Roof Snow Depth for an Isolated Gable-roof Building: Prediction of Unbalanced Snow Distribution Due to Wind on Roofs Based on CFD, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.725, pp.1051-1059, 2016.7 (in Japanese)
- 12) Da Matha Sant'Anna, F. and Taylor, D.A.: Snow Drifts on Flat Roofs: Wind Tunnel Tests and Field Measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.34, pp.223-250, 1990.8
- 13) Isyumov, N. and Mikitiuk, M.: Wind Tunnel Model Tests of Snow Drifting on a Two-level Flat Roof, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.36, pp.893-904, 1990.10
- 14) O'Rourke, M.J. and Speck, Jr., R.S.: Drift Snow Loads on Multilevel Roofs, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.2, pp.290-306, 1985.2
- 15) Zhou, X., Hu, J. and Gu, M.: Wind Tunnel Test of Snow Loads on a Stepped Flat Roof Using Different Granular Materials, Natural Hazards, Vol.74, No.3, pp.1629-1648, 2014.12
- 16) Tsuchiya, M. et al.: Field Measurements on Snowdrift on Two-level Flat Roof Model, Journal of Snow Engineering of Japan, Vol.18, No.2, pp.123-131, 2002.4 (in Japanese)
土谷学, 苔米地司, 本郷剛, 上田宏: 2 段屋根建物試験体を用いた吹きだまり性状の屋外観測, 日本雪工学会誌, Vol.18, No.2, pp.123-131, 2002.4
- 17) Tsuchiya, M., Tomabechei, T., Hongo, T. and Ueda, H.: Wind Effects on Snowdrift on Stepped Flat Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.90, pp.1881-1892, 2002.12
- 18) Zhao, L., Yu, Z., Zhu, F., Qi, X. and Zhao, S.: CFD-DEM Modeling of Snowdrifts on Stepped Flat Roofs, Wind and Structures, Vol.23, No.6, pp.523-542, 2016.12
- 19) Zhou, X., Kang, L., Gu, M., Qiu, L. and Hu, J.: Numerical Simulation and Wind Tunnel Test for Redistribution of Snow on a Flat Roof, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.153, pp.92-105, 2016.6
- 20) Zhu, F., Yu, Z., Zhao, L., Xue, M. and Zhao, S.: Adaptive-mesh Method Using RBF Interpolation: A Time-marching Analysis of Steady Snow Drifting on Stepped Flat Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.171, pp.1-11, 2017.12
- 21) Tsuchiya, M.: Study on prediction method of snow load distribution using wind flow property, Ph.D thesis, Hokkaido Institute of Technology, 2002.3
土谷学: 気流性状を用いた積雪荷重分布の予測法に関する研究, 北海道工業大学学位論文, 2002.3
- 22) Tomabechei, T., et al.: Field Measurement of Snowdrift on a Two-level Flat Roof Model, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, Vol.65, No.3, pp.231-239, 2003.5 (in Japanese)
苔米地 司, 細川和彦, 土谷 学: 2 段屋根下段部における積雪分布に関する調査, 雪氷, 第 65 巻, 第 3 号, pp.231-239, 2003.5
- 23) Tsuchiya, M. et al.: Characteristics of Wind Flow Acting on Snowdrift on a Stepped Flat Roof, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.67, No.555, pp.53-59, 2002.5 (in Japanese)
土谷 学, 苔米地 司, 本郷 剛, 上田 宏: 階段状屋根の雪の吹きだまりに影響を及ぼす風の流れの特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 67 巻, 第 555 号, pp.53-59, 2002.5
- 24) Architectural Institute of Japan, Guidebook for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings, Architectural Institute of Japan, 2007 (in Japanese)
日本建築学会: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック—ガイドラインと検証用データベース—, 日本建築学会, 2007
- 25) Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J.: A New k-ε Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows, Computers and Fluids, Vol.24, No.3, pp.227-238, 1995.3
- 26) Naaim, M., Naaim-Bouvet, F. and Martinez, H.: Numerical Simulation of Drifting Snow: Erosion and Deposition Models, Annals of Glaciology, Vol.26, pp.191-196, 1998.1
- 27) Wang, W.H., Liao, H.L. and Li, M.S.: Wind Tunnel Test on Wind-induced Roof Snow Distribution, Journal of Building Structures, Vol.35, No.5, pp.135-141, 2014.5 (in Chinese)
- 24) Architectural Institute of Japan, Guidebook for Practical Applications

- of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings, Architectural Institute of Japan, 2007 (in Japanese)
- 日本建築学会: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー, 日本建築学会, 2007
- 25) Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J.: A New k- ϵ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows, Computers and Fluids, Vol.24, No.3, pp.227-238, 1995.3
- 26) Naaim, M., Naaim-Bouvet, F. and Martinez, H.: Numerical Simulation of Drifting Snow: Erosion and Deposition Models, Annals of Glaciology, Vol.26, pp.191-196, 1998.1
- 27) Wang, W.H., Liao, H.L. and Li, M.S.: Wind Tunnel Test on Wind-induced Roof Snow Distribution, Journal of Building Structures, Vol.35, No.5, pp.135-141, 2014.5 (in Chinese)

INVESTIGATION OF REPRODUCTION OF SNOW DISTRIBUTION ON A TWO-LEVEL FLAT-ROOF BUILDING

Prediction of unbalanced snow distribution due to wind on roofs using CFD

Yui MURAYAMA^{*1}, *Kenji IGARASHI*^{*2} and *Yoshihide TOMINAGA*^{*3}

^{*1} Formerly Grad. Student, Graduate School of Engineering, Niigata Institute of Technology, M.Eng.

^{*2} Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

^{*3} Prof., Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

Unbalanced snow accumulation resulting from wind flow represents a difficult problem when predicting snow loads on building roofs. Accumulation occurs because of the complex interaction between snow particle motion and fluid flow, which is affected by building geometry. Recently, computational fluid dynamics (CFD) was applied to the prediction of snowdrift around buildings in several studies. However, few studies have applied CFD to the prediction of roof snow. In this study, the CFD simulation method of the snowdrift around buildings as previously proposed by the authors was applied to the prediction of roof snow accumulation on a two-level flat-roof building. The performance of the prediction model was validated by comparing the results of field observations and wind tunnel experiments. In particular, the importance of the effects of snow distribution change on the flow field was investigated.

The snowdrift model was implemented in ANSYS FLUENT 14.5 as a user-defined function. To model the suspension of snow, the transport equation for drifting snow density was solved. The deposition and erosion fluxes on the snow surface were determined as functions of the friction velocity at the snow surface. The proposed snowdrift model was applied to the prediction of snow distribution on the two-level flat-roof building placed perpendicular to the approaching wind flow. The building model used in this study was adopted from the detailed field measurements obtained in Hokkaido, Japan. In this study, the following two cases were considered: (a) lower roof located on the windward side (windward case) and (b) lower roof located on the leeward side (leeward case).

First, the velocity vectors obtained from the wind tunnel experiment for the same configurations as well as the streamlines obtained by the present CFD were compared for each case. For the windward case, two vortices, i.e., a recirculation flow resulting from separation at the upwind corner and a standing vortex near the roof step, were observed on the lower roof. For the leeward case, considerable recirculation flow on the lower roof was present. The general patterns of the flow field were very similar between the experiment and CFD. Next, the snow depth ratios obtained by a single CFD, in which the effects of snow distribution change on the flow field were not considered, were compared with the field measurements. For the windward case, the peak of the snow depth near the upwind edge of the lower roof, which was not observed in the measurements, was observed in the CFD results. This peak appeared in CFD and was attributed to the recirculation flow at the windward corner of the lower roof. The snow depth on the lower roof was generally underestimated in CFD because of the large erosion caused by the strong separation flow. Furthermore, a large undulation near the roof step, which was observed in the measurements, was not reproduced in CFD. For the leeward case, CFD also underestimated the snow depth and failed to reproduce a large undulation near the roof step. Finally, a phased CFD, in which the snowdrift calculations were conducted stepwise by considering snow depth change on the flow field, was applied to the same target. The underestimation of snow depth observed in the single CFD was clearly improved by the phased CFD. The prediction accuracy of the large undulations near the roof step was also improved, and it was confirmed that reproducing the separation flow near the upwind corner of the building correctly by considering the snow depth distribution on the roof is essential.

(2019年3月9日原稿受理, 2019年4月26日採用決定)