単体切妻屋根建物を対象とした屋根上積雪深の予測手法の検証

CFD に基づく風による屋根雪偏分布の予測

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

富永 禎秀*, 大風 翼**, 持田 灯***

Yoshihide TOMINAGA, Tsubasa OKAZE and Akashi MOCHIDA

Computational fluid dynamics (CFD) simulations of unbalanced snow accumulation on roofs were conducted for an isolated gable-roof building with different roof pitches. Firstly, prediction accuracy of the present CFD method on the velocity and pressure fields around the building was confirmed by comparing their results with those obtained by wind tunnel experiment. Next, the unbalanced snow accumulation on the roofs was predicted with different wind velocities using the snowdrift model presented by the authors. The predicted results of drift load coefficients were examined by comparing them with the observational data, which was based in ISO code. It was confirmed that the observational data can generally be reproduced by the proposed CFD simulation method.

Keywords: Unbalanced snow distribution on roof, Wind, CFD, Gable-roof building, Validation

屋根雪偏分布, 風, CFD, 切妻屋根建物, 検証

1. 序

降雪中の雪や積雪した雪が風によって舞い上げられる効果によって、建物周辺や屋根上には、吹き払い・吹きだまり効果に起因する積雪の不均等な分布が生じる¹⁾。特に屋根上の偏分布は、落雪事故や建物利用上の各種障害、雪下ろし中の事故等につながる場合が多いほか、最悪の場合、建物の損壊や倒壊を引き起こすことがあり、設計段階で適切に推定する必要がある。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、降雪風洞実験である^{例えば 3-5)}。しかし相似則による制約や特殊な実験装置が必要となることなど困難な点も多い。

本研究では、CFD (Computational Fluid Dynamics ; 数値流体力学) に基づく数値シミュレーションによって、上述の屋根雪の偏分布を予測する方法について検討する。筆者らは、これまで、建物周辺の吹き払い・吹きだまり形成に関して、CFD による予測の精度や有効

性を検討してきた⁶⁻⁹⁾。しかしながら、屋根上の積雪分布については検討していなかった。CFD を屋根雪分布予測に適用した例は、国内外でも非常に少ないが、Thiis ら¹⁰⁾は、曲面屋根を有する大型スポーツ施設の屋根雪分布を予測し、観測結果と比較している。また筆者ら¹¹⁾は、実在の陸屋根戸建て住宅の屋根雪分布を予測し、観測結果と比較している。しかしながら、どちらも短期の降雪イベントでの屋根雪分布の再現を主眼としており、より普遍的な計画や設計へ適用する際の課題については、検討されていない。

CFD を屋根雪分布予測に適用する場合の課題として、従来の CFD による建物周辺気流の研究で主に扱われてきた直方体等の単純建物モデルに比べて、勾配や段差を有するなど形状が格段に複雑になる点が挙げられる。そのような複雑形状の屋根周辺の風速分布が正確に予測されていることが、正確な屋根雪分布予測の前提となるが、この点についての検証事例は少ない。本稿では、まず初めに、勾配の異なる切妻屋根住宅を対象とした風洞実験を行い、その結果との比較により、流れ場や風圧係数の CFD の予測精度を確認する。その精度を踏まえた上で、筆者らが提案してきた飛雪モデルを屋根雪分布の予測に適用し、ISO の雪荷重設計¹²⁾の基礎資料となっているノルウェーで実施された観測により得られた吹きだまり係数と比較す

* 新潟工科大学建築学科 教授・博士(工学)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻 准教授・博士(工学)

*** 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

Assoc. Prof., Department of Environmental Science and Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.

Prof., Dept. of Architecture & Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr.Eng.

る。これらの検証を通じて、CFDを屋根雪分布予測へ適用するための第一段階の検討として、その留意点を整理するとともに、現状の適用範囲と課題を明らかにすることを目的とする。

2. 検討方法

2.1 対象建物形状

対象とする建物モデルの概略を Fig. 1 に示す。切妻屋根を有し、勾配は、3 寸 (3:10=16.7°)、5 寸 (5:10=26.6°)、7.5 寸 (7.5:10=36.9°) の3種類とする。軒高 H_e は 6 m、幅 W は 6.6 m で各勾配において共通である。風向は、一般性を考慮し、棟方向に直交する向きとした。

2.2 風洞実験

1) 実験条件

新潟工科大学の大型境界層型風洞を用いた¹³⁾。縮尺は 1:30 を想定し、 $H_e = 200$ mm のモデルを使用した。平均風速の鉛直分布はべき指数 0.25 のべき乗則に従い、高さ H における流入風速 U_H は 2.6 m/s である。 H_e と U_H で定義される Re 数は約 35,000 である。実験に使用した接近流の主流方向平均風速 U_1 と乱流エネルギー k の鉛直分布を Fig. 2 に示す。

2) 計測手法

風速は、逆流を検出可能なスプリットファイバースローブ (Dantec Dynamics; 55R55) と CTA モジュール (Dantec Dynamics; 90C10) を用いて、成分ごとの平均風速と乱れの標準偏差を計測した。風圧係数は、多点微風圧制御計測装置 (共和電業; F94-2206) を用いて、建物モデル表面に設けられた圧力タップの静圧を計測して求めた。風速、圧力ともに時間平均値は 100 Hz のサンプリングで 60 秒間の平均により求めた。

2.3 CFD 解析

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 (Steady) 解析を行った。なお今回対象とするような勾配屋根の建物を、仮に直方体の構造格子を用いて階段状に再現した場合、屋根面の摩擦速度およびそれに基づいて計算される積雪分布を正確に予測することは困難である。一方、形状再現性に優れた格子としては、テトラ (4 面体)、ピラミッド (5 面体) メッシュの使用が考えられるが、メッシュ分解能のコントロールが困難である他、壁面近傍の予測精度や計算の収束性に課題がある。本研究では、勾配屋根の形状をヘキサ (6 面体) メッシュを用いて正確に再現するメッシュを採用した。例として、5 寸勾配屋根の場合を例として、地表面及び建物表面、建物中心断面のメッシュ分割を Fig. 3 に示す。全ての屋根勾配のケースで屋根一辺を約 20 分割している。既報¹⁴⁾において、メッシュ依存性のチェックを行い、建物の分解能をこれ以上増しても解は殆ど変わらないことを確認している。解析領域の広さは、 $21.0H_e(x) \times 9.0H_e(y) \times 9.0H_e(z)$ とした。各種解析条件の設定は、日本建築学会のガイドライン^{15,16)}に従った。乱流モデルは Realizable 型 $k-\varepsilon$ モデルを使用した^{17, 注1)}。

流入条件は、3 章の風洞実験を対象とした解析では、風洞実験における接近流の U_1, k の鉛直分布を与え (Fig. 2)、4 章の実スケールの解析では、べき指数 0.20 の平均風速鉛直分布を仮定し、乱流エネルギー k は建築物荷重指針の式²⁾から乱れ強さを推定して与えた。いずれの解析もエネルギー散逸率 ε の分布は、日本建築学会ガイド

Fig. 1 対象建物の概要

Fig. 2 流入境界条件 (風洞実験スケール解析)

Fig. 3 建物近傍のメッシュ分割 (5 寸勾配屋根の例)

Fig. 4 流入境界条件 (実スケール解析)

Fig. 5 主流方向平均風速 U_l の風洞実験と CFD の比較

Fig. 6 乱流エネルギー k の風洞実験と CFD の比較

Fig. 7 風圧係数の風洞実験と CFD の比較

ライン^{15,16)}に従って、局所平衡を仮定し k の生産項を計算して与えた。実スケールを対象とした場合の流入境界条件を Fig. 4 に示す。

2) 飛雪解析

筆者らが提案している飛雪モデルを用いた⁷⁾。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、その輸送方程式を解いた。 W_f は雪粒子の落下速度 [m/s] である。

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

境界条件として、想定した時間降雪量と雪粒子の落下速度 W_f から換算した Φ_{in} を流入及び上空境界に与えた (本解析では、 7.5×10^{-4} kg/m³)。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、従来の筆者らが用い

てきたモデルである (2) 式と、摩擦速度の影響が考慮されている (3) 式¹⁹⁾を検討した^{注2)}。

$$q_{dep} = W_f \Phi_p \quad (U_* < U_{*t}) \quad (2)$$

$$q_{dep} = W_f \Phi_p \left(\frac{U_{*t}^2 - U_*^2}{U_{*t}^2} \right) \quad (U_* < U_{*t}) \quad (3)$$

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²⁰⁾。

$$q_{ero} = -A_e \rho_i U_* \left(1 - \frac{U_{*t}^2}{U_*^2} \right) \quad (U_* > U_{*t}) \quad (4)$$

U_* : 雪面の摩擦速度, U_{*t} : 限界摩擦速度

Φ_p : 雪面に接するセルの飛雪空間密度

A_e : 比例定数, ρ_i : 氷の密度

なお (2)~(4) 式の飛雪モデルに現れるモデル係数については、4.2 に示す感度解析によって、既往研究で使用した値の妥当性を検討し

た。正味の積雪フラックス q_{total} [kg/m²s]は、次式で与えられる。

$$q_{total} = q_{dep} + q_{ero} \quad (5)$$

侵食が発生した場合($U_* > U_{*i}$)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。なお摩擦速度 U_* は CFD コードの仕様により、一般化対数則を用いて次式により計算される^{注3)}。

$$U_*^2 = \frac{\kappa C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} U_P}{\ln\left(\frac{E C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_P}{\nu}\right)} \quad (6)$$

U_P : 壁近傍ノード P における流体の平均速度

k_P : 壁近傍ノード P における乱流エネルギー

y_P : ポイント P から壁に至る距離

ν : 動粘性係数, $E=9.793$, $\kappa=0.4187$, $C_\mu=0.09$

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

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」として表現するのが一般的である。本解析手法では、積雪密度が同一と仮定すれば、地上と屋根上の正味の積雪フラックスの比から積雪深比が算出可能である。しかし本研究で採用する定常解析では、地表面の摩擦速度が限界摩擦速度を超える高風速条件では地表面の積雪フラックスが 0 となり、積雪深比は定義できない。また風速条件による屋根上積雪性状の違いを直接比較する場合、同一の値で基準化した方が明快である。よって、計算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 の積を基準降雪フラックス q_{sta} として、それと正味の積雪フラックス q_{total} の比を「基準化積雪深」と定義し、「積雪深比」と使い分けた。ただし 4.4 節の「吹きだまり係数」については、地上での正味の積雪フラックスを基準として計算した。

なお本解析では、上述の通り、積雪深は直接計算しておらず、積雪による屋根形状変化が流れ場の計算に影響を及ぼさない one-way の定常解析である。すなわち本解析結果は、積雪が無い状態の建物形状に基づく速度分布によって決定される、ある場所の雪の積もりやすさ(積もりにくさ)を表現していると捉えることができる。雪面の形状に伴う周辺の流れ場の変化を計算に反映させる場合、CFD の非定常解析を行い、その解析 step 毎に積雪深を計算し、それに基づいて CFD 用解析メッシュを再作成し、再度速度場を計算する必要がある。その場合、計算負荷が膨大になるばかりでなく、妥当な速度場を計算可能なメッシュの質を確保することも困難である。本解析では、できるだけ計算負荷の小さい実用的な予測手法の検証を行う観点から、第一段階として、定常解析に基づき積雪面の形状変化の流れ場への影響を考慮しない予測手法の適用性を検討する^{注4)}。

3. 風洞実験との比較による流れ場の再現性の検討

3.1 風速、乱流エネルギーの分布

Fig.5 に、各屋根勾配における CFD の結果と風洞実験結果の U_1 をラインごとに比較したものを示す。全体的に両者はよく一致している。ただしいずれの屋根勾配でも、CFD では建物風下側($x/H=0.5$ 及び 1.0)の測定ラインで実験による逆流をやや小さめに評価している。これは既往の建物周辺気流の RANS 解析結果と同様の傾向である²¹⁾。次に乱流エネルギー k の分布の比較を Fig. 6 に示す。建物風上面上

Fig. 8 堆積モデルの違いが基準化積雪深に及ぼす影響

Fig. 9 雪粒子落下速度及び侵食モデル中の係数が基準化積雪深に及ぼす影響

Fig. 10 山形屋根 (5 寸勾配) における測定開始日および最大積雪深時の屋根上積雪分布の実測結果 (文献 24 の結果を改変)

Fig. 11 切妻屋根上の積雪偏分布の実例²⁶⁾

及び建物頂部上の測定ラインでは、風洞実験結果の値は、屋根勾配が急になるにつれてピークが上方に移動しており、この傾向は、CFD

Fig. 12 棟高風速の違いによる基準化積雪深の比較

でもよく再現されている。しかしながら、これらの領域では k の値を実験よりも過少に評価している。図は省略するが、文献 14 で可視化画像を示した通り、屋根上においては、屋根頂部で生成された渦が周期的に風下側に放出される大きなスケールの変動が観察される。このような変動は、今回行っている定常 RANS 解析では再現されないため、その分の変動が小さく評価されているものと考えられる。また風上側屋根の軒部及び棟部では、 k を大きめに評価している。これは今回用いている乱流モデルの性質として既往研究²²⁾でも指摘されている。

3.2 圧力係数の分布

本研究では、従来検討されることが少ない勾配屋根モデルにおける風圧係数の CFD の予測精度についても検討した。各勾配の風圧係数の風洞実験結果と CFD による予測結果を Fig. 7 に示す。風上側及び風下側壁面の風圧係数の予測精度は比較的高い。一方、屋根面の予測精度は勾配による違いが見られる。勾配の小さい 3 寸勾配、5 寸勾配では、CFD は、棟付近で負圧ピークの過大評価が見られる。これは前述の乱流エネルギー k の過大評価と対応している²³⁾。

3.3 風洞実験結果のまとめ

以上のように、従来から指摘されている定常 RANS モデル特有の問題点は観察されるものの、平均風速の予測精度は、吹き払い領域の再現に重要な強風域での実験との誤差は最大約 10%、弱風域でも

最大約 30% であり、全体的に風洞実験との対応は良好と判断される。定量的な指標 (Metric) による評価は、文献 14 を参照されたい。本研究では、実用的な予測手法を確立するという立場から、計算負荷の小さい定常 RANS モデルを採用することとし、その適用性も含めた総合的な屋根雪分布の予測精度を検証することとする。ただし解析結果に見られる乱流エネルギーを大きめに評価する傾向は、摩擦速度を過大評価することにつながるため、摩擦速度がモデル化に直接係わる飛雪の解析においては、留意すべき点である。

4. 実スケール解析による飛雪シミュレーション

4.1 解析概要

5 寸勾配屋根を基準条件として、飛雪モデリングに係わる各種パラメータの積雪深分布に対する感度解析を行った。変化させたパラメータを Table 1 に示す。それ以外の解析条件は、2.3 で示した通りである。

Table 1 変化したパラメータ

	落下速度 W_f	侵食モデル係数 A_e	堆積モデル
ケース DM02	-0.5m/s	1.0×10^{-5}	Eq. (2)
ケース DM03	-0.5m/s	1.0×10^{-5}	Eq. (3)
ケース WF10	-1.0m/s	1.0×10^{-5}	Eq. (3)
ケース WF02	-0.2m/s	1.0×10^{-5}	Eq. (3)
ケース AE10	-0.5m/s	1.0×10^{-4}	Eq. (3)
ケース AE01	-0.5m/s	1.0×10^{-6}	Eq. (3)

4.2 飛雪モデリングに関する諸パラメータの感度解析

1) 堆積フラックスのモデル化

Fig. 8 には、 $U_H = 3.0\text{m/s}$ の条件における、堆積モデル式の違いによる積雪深分布への影響を基準化積雪深の比較で示したものである。この条件では、屋根面の摩擦速度が限界摩擦速度を超えるのは、風上側屋根軒部と棟近傍のみである。そのため、(2)式のモデルを用いた場合、殆どの領域で堆積のみが発生するため、屋根上の積雪深は概ね 1.0 となり、風上側屋根の上部棟近傍のみ侵食によって積雪深が急激に減少するため、分布としてやや不自然である。一方、(3)式のモデルは、堆積においても摩擦速度の影響が考慮されているため、特に風上側の積雪深比が上方に向かうにつれてなだらかに減少しており、従来の観測結果 (Fig. 10 及び 11 参照) から判断して現実的な分布と考えられる。よって本研究では(3)式のモデルを採用することとした。

2) 雪粒子の落下速度 W_f

既往の研究^{7, 25)}では、雪粒子の落下速度は、経験的に与えられていることが多いが、その積雪分布に与える影響を検討した例は少ない。式(3)のモデルで、落下速度を -0.2 、 -0.5 、 -1.0m/s と変化させた場合の基準化積雪深分布の比較を Fig. 9 中に示す。落下速度の屋根上の積雪深比分布への影響は小さい。よって本研究では、中間的な値である -0.5m/s を採用する。

3) 侵食フラックスのモデル係数 A_e

筆者らの検討結果⁹⁾によれば、侵食フラックスのモデル係数 A_e は結果に大きな影響を及ぼす。式(3)のモデル中の A_e を従来用いていた係数 (1.0×10^{-5}) の 10 倍 (1.0×10^{-4})、0.1 倍 (1.0×10^{-6}) に変化させた場合の基準化積雪深の比較を Fig. 9 中に示す。モデル係数を大きくした場合、棟風下側に不自然なピークが生じている。しかし小さくした場合には、影響は小さい、この結果から、本研究では、これまでの研究^{7, 9)}でも使用してきた $A_e = 1.0 \times 10^{-5}$ を採用する。

4.3 棟高風速と屋根勾配による屋根雪偏分布の違いの検討

Fig. 12 は、棟高風速が変化した場合の基準化積雪深の分布を上空から見たコンター図として示したものである。当然ながら無風の場合は、積雪の偏分布は発生せず基準化積雪深はすべて 1.0 であり、また軒高風速 $U_H = 1.0\text{m/s}$ の解析は、実施したものの偏分布はわずかであったため、ともに図は省略する。いずれの勾配においても、 $U_H = 2.0\text{m/s}$ では棟付近でのみ侵食が発生し、 $U_H = 3.0\text{m/s}$ で風上側屋根面の中央付近において積雪深比の大きい領域が見られる。 $U_H = 4.0\text{m/s}$ を超えると、いずれの勾配においても風上側屋根面はほぼ侵食され積雪深は見られなくなる一方、軒風下側において吹き溜まりが発生し始める。5 寸勾配屋根のみにおいて、 $U_H = 4.0\text{m/s}$ および 5.0m/s において、風下側屋根面の棟部と両脇端部に積雪深の大きなピークが見られる²⁵⁾。風速が大きくなるに従い、および屋根勾配が大きくなるに従い、風下側屋根の積雪深比が増大する傾向は過去の観測結果に基づく知見³⁾や荷重指針²⁾の考えとよく整合する。また屋根面内における積雪深の偏分布を 3 次元的に捉えることが可能であり、従来手法に対する CFD の有効性が確認される。この結果を風向に沿った建物中心断面における屋根上の基準化積雪深として比較したものが Fig. 13 である。

ところで、ある程度長期の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する

Fig. 13 建物中心軸上の基準化積雪深の比較

Fig. 14 吹きだまり係数の実測結果及びモデル式との比較

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一つの試みとして、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、 $U_H = U_{ave}$ の解析結果を 40%、 $U_H = U_{ave} \pm 1 \text{ m/s}$ の解析結果をそれぞれ 25%、 $U_H = U_{ave} \pm 2 \text{ m/s}$ の解析結果をそれぞれ 5% で重み付け平均して、 $U_H = U_{ave}$ での積雪分布を求める方法を試みる。建築物荷重指針²⁾において考慮する風速 V が「1, 2 月の平均風速」という長期の平均風速のみで示されていることを踏まえると、このような平均化手法も有効であると考えられる。中心風速 $U_{ave} = 2.0 \text{ m/s}$ 及び 3.0 m/s として $U_H = 0 \text{ m/s} \sim 5.0 \text{ m/s}$ の結果に重み付け平均を施した基準化積雪深も併せて Fig.13 に示す。重み付け平均を施した結果は、より実際の積雪分布に近い分布形状を示しており、このような平均化手法の利用可能性が示された。

4.4 吹きだまり係数の予測結果の実測との比較

CFD 解析結果から、(7)式によって吹きだまり係数 C_d を求めた結果を Table 2 に示す。平均には風向に沿う建物中心断面上の値のみを用いている。

$$C_d = \frac{S_l - S_w}{S_g} \tag{7}$$

S_l, S_w : 風下側, 風上側屋根の平均積雪深 (計算上は屋根上の正味の積雪フラックス)

S_g : 地上積雪深 (計算上は地上の正味の積雪フラックス)

Table 2 各条件の吹きだまり係数 C_d

	3:10 pitch	5:10 pitch	7.5:10 pitch
$U_H = 1.0 \text{ m/s}$	0.02	0.05	0.04
$U_H = 2.0 \text{ m/s}$	0.15	0.27	0.23
$U_H = 3.0 \text{ m/s}$	0.41	0.79	0.74
$U_H = 4.0 \text{ m/s}$	0.90	2.07	2.00
$U_H = 5.0 \text{ m/s}$	*	*	*
$U_{ave} = 2.0 \text{ m/s}$	0.18	0.35	0.32
$U_{ave} = 3.0 \text{ m/s}$	0.39	0.82	0.77

*地上の正味の積雪フラックスが 0 のため算出不可能

ここでも、風速が大きくなるに従い、および屋根勾配が大きくなるに従い、吹きだまり係数が大きくなるという過去の知見と対応する結果が得られている。5 寸勾配の方が、7.5 寸勾配に比べてやや大きくなっているのは、前述²⁾の理由による。また風速条件が異なっても、各勾配における吹きだまり係数の相対的な大小関係はそれほど変化しない。

Table 2 の結果から、 $U_H = 1.0 \text{ m/s}$, $U_H = 2.0 \text{ m/s}$ と $U_{ave} = 2.0 \text{ m/s}$ の結果を既往の実測結果を整理した Fig. 14²⁶⁾にプロットした。Fig. 14 中の実測結果は、Norway で行われた約 1300 の山形屋根の実測結果^{27, 28)}を整理したもので、ISO4355 (Snow loads on roofs) のモデル式の根拠になっている。 $U_{ave} = 2.0 \text{ m/s}$ とした計算 (▲) では、3 寸勾配及び 7.5 寸勾配における、実測値に基づくモデル式 (Exposed; 吹きさらしの条件で本解析条件に対応する) との誤差は 5% 以下、最も差の大きい 5 寸勾配屋根で 40% 程度であり、観測のばらつきの大きさを考慮すれば、よく一致する結果が得られた。一方、モデル式 (Normal; 周囲に低層建物や樹木がある条件) は、 $U_H = 1.0 \text{ m/s}$ (◆), $U_H = 2.0 \text{ m/s}$ (■) の中間的な値と対応する。なお軒高風速で 2.0 m/s は、一般的に考えられている吹きだまり発生風速としてはやや低い²⁾。これは、前述の通り、本解析では摩擦速度が乱流エネルギー k を用いて算出されており、乱流モデルの特性として実際よりも大きめに評価されている可能性があることや、勾配を有する雪面における限界摩擦速度 U_τ の現状の設定値の妥当性に検討の余地がある。この点については、今後さらに検討したい。

5. 結論

屋根雪の風による偏分布を CFD 解析によって予測する方法の精度を、単体の切妻屋根建物を対象に検証した。本検討によって得られた結論は以下の通りである。

- 1) これまで検討事例の少ない、単体勾配屋根建物モデル周辺の風速分布及び風圧係数分布の予測精度を、風洞実験との比較により確認した。定常 RANS モデルを使用すること起因する欠点が指摘できるものの、平均風速については、吹き払い領域の再現に重要な強風領域で最大約 10%、弱風域でも最大約 30% の精度で予測できることが確認できた。すなわち、屋根上の積雪分布を正確に予測する場合の前提となる正確な風速分布の予測が、本論文で示した手法によって、概ね達成可能であることを示した。
- 2) 筆者らが提案してきた飛雪モデルの屋根雪分布予測への適用性やモデルパラメータの感度解析を行った。摩擦速度の関数として堆積フラックスを変化させるモデルの方が、屋根雪の定性的な分布を再現できることが確認した。またモデルパラメータは、今回の解析条件においては、吹き溜まり積雪分布形状の予測には大きな影響を及ぼさず、筆者らがこれまで提案しているものの妥当性を確認した。
- 3) 筆者らが提案する飛雪モデルによって、勾配の異なる 3 種類の勾配屋根建物モデルの吹きだまり係数の分布を予測した。風速が大きくなるに従い、および屋根勾配が大きくなるに従い、風下側屋根の積雪深比が増大するという、過去の観測結果に基づく知見や荷重指針の考えとよく整合する結果が得られた。また風速の発生頻度の正規分布を仮定し、定常解析結果の重ね合わせを行うことによって、期間の平均風速には現れない一時的な高風速によって発生する侵食・堆積を考慮する方法を提案し、その可能性を示した。
- 4) 各条件の吹き溜まり係数の予測結果を ISO のモデル式の基礎となった観測結果と比較した結果、5 寸勾配屋根での過大評価が見られるものの、軒高風速 2.0 m/s とした結果が観測結果とよく対応した。3 寸勾配及び 7.5 寸勾配における、実測値に基づくモデル式との誤差は 5% 以下、最も差の大きい 5 寸勾配屋根で 40% 程度であった。設計時に想定する風速条件との関係や屋根面における摩擦速度及び限界摩擦速度の評価・設定方法等には検討の余地があり、今後さらに検討が必要である。
- 5) 本稿では、従来筆者らが提案してきた CFD による飛雪現象のシミュレーション手法を屋根雪分布の予測に適用した場合の基本的な検証結果を示した。ただし本解析手法は、定常 RANS モデルに基づいており、瞬間的な流れ場は再現されておらず、また積雪による屋根形状の変化を動的に扱っていない。これらの理由により、求められた積雪形状は現実の積雪形状とは必ずしも一致していない部分もある。今後は、2 段屋根などの異なる形状の建物を対象として適用範囲を確認する必要がある他、本研究では取り扱っていない風向の変動についても、検討する必要があると考えている。

謝辞

風洞実験及び数値解析の実施にあたっては、新潟工科大学建築学科学部生であった北原卓弥氏、須田直樹氏、荒川純也氏の献身的なご協力を頂いた。また本研究の一部は、(公財)セコム科学技術振興

財団による研究助成（代表者：持田 灯）を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

注

注 1) 既報¹⁴⁾の検討では、総合的に RNG 型 $k-\epsilon$ モデル¹⁸⁾の予測精度が高いという結論であった。しかしながら実スケールの風速の低いケースの一部において、解が十分に収束しない場合が見られたため、本研究では、ほぼ同等の予測精度を有しており、安定に解が得られた Realizable 型 $k-\epsilon$ モデルを採用した。

注 2) (2)式の場合、 $U < U_t$ においては、一定の堆積フラックスが発生するため、 $U = U_t$ において堆積・侵食フラックスが不連続に変化する。(3)式では、どちらのフラックスも $U = U_t$ において 0 に漸近するため、そのような不連続は生じない。

注 3) 筆者らは、既報¹¹⁾において、摩擦速度の推定方法が積雪分布の予測精度に及ぼす影響について検討している。その結果によれば、再現する積雪現象が長期か短期で最適な計算方法が異なり、長期の積雪現象を対象とした場合は、乱流エネルギー k も含めた一般化対数則から U^* を計算した場合の観測結果の再現精度が高かった。

注 4) 積雪面の形状変化を流れの計算に取り込まないことによる影響は、屋根形状に大きく依存すると予想される。すなわち、屋根に段差があったり、屋根スパンが長く、屋根上で再付着が起こったりする場合には、局所的な堆積の発生により、その影響は無視しえない可能性がある。この点は、今後、本手法を多様な屋根形状に展開する過程で検討していきたい。

注 5) 3 種類の勾配屋根の軒近傍の流れと主流方向風速のコンター図を Fig. 15 に示す。3 寸勾配の場合は、棟で剥離せず風下側屋根上は主流方向の流れとなっているが、5 寸勾配と 7.5 寸勾配の場合、棟で剥離し、風下側屋根面上は主流と逆方向の流れとなっている。5 寸勾配の場合、棟の風下側ごく近傍において、流れの到達しない領域があり、ある種のよどみ領域が生じていることが分かる。この部分では、棟風上側の大きな侵食フラックスによって、飛雪空間密度が発生し、それがこの領域での最大の堆積フラックスとなって計算された結果、積雪深の大きなピークが生じている。すなわち、前述のように、本来は非定常に変化する棟後流の渦が、RANS モデルでは定在してしまうという課題がこの屋根勾配で特異に顕在化した結果と解釈できる。

Fig. 15 棟近傍の流れと主流方向風速 U_1 のコンター

参考文献

- 1) 日本建築学会編：雪と建築，日本建築学会，2010.8
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015.2
- 3) 遠藤明久，吉米地 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) 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 620 号，pp. 9-16，2007.10
- 5) 堤 拓哉，高橋章弘，千葉隆弘，吉米地 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 613 号，pp. 29-34，2007.3
- 6) 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) 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) Thiis, T.K., Potac, J. and Ramberg, J.F.: 3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof, In 5th European & African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy, 2009.7
- 11) 大槻政哉，イセンコ・エフゲーニー，齋藤彦彦，富永禎秀，堤 拓哉，持田 灯，吉米地 司：CFD に基づく戸建住宅の屋根雪分布予測，第 23 回風工学シンポジウム論文集，pp. 529-534，2014.12
- 12) ISO 4355:2013: Bases for design of structures - Determination of snow loads on roofs, 2013
- 13) 赤林伸一，持田灯，富永 禎秀，吉田正昭，坂口 淳，新潟工科大学境界層型風洞の基本特性，日本風工学会誌，第 68 号，pp. 95-106，1996.7
- 14) Tominaga, Y., Akabayashi, S., Kitahara, T. and Arinami, Y.: Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches - Wind tunnel experiments and CFD simulations, Building and Environment, Vol. 84, pp. 204-213, 2015.1.
- 15) 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
- 16) Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M. and Shirasawa, T.: AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, No. 10-11, pp. 1749-1761, 2008.4
- 17) Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J.: A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows—Model Development and Validation, Computers Fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238, 1995.3
- 18) Yakhot V., Orszag S.A., Thangam S., Gatski T.B. and Speziale C.G.: Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, Physics of Fluids A, Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520, 1992.7
- 19) Naaim, M., Naaim-Bouvet, F. and Martinez, H.: Numerical Simulation of drifting snow - erosion and deposition model, Annals of Glaciology, Vol. 26, pp. 191-196, 1998.1
- 20) Shao, Y. and Li, A.: Numerical Modelling of Saltation in the Atmospheric Surface Layer, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 91, No. 2, pp. 199-225, 1999.5
- 21) 富永禎秀，持田 灯，村上周三，佐脇哲史：建物後方の周期的変動と再付着距離の予測精度に関する検討—LES による高層建物周辺気流の解析，その 1，日本建築学会環境系論文集，第 581 号，pp. 45~51，2004.7
- 22) Tominaga, Y. and Stathopoulos, T.: Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building - Comparison of various types of $k-\epsilon$ models, Atmospheric Environment, Vol. 43, No. 20, pp. 3200-3210, 2009.6
- 23) Murakami, S.: Comparison of Various Turbulence Models Applied to a Bluff Body. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 46&47, 21-36, 1993
- 24) 吉米地 司，和泉正哲，遠藤明久：屋上積雪の評価方法に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 32B, pp. 49-62，1986.3
- 25) Uematsu, T., Nakata, T., Takeuchi, K., Arisawa, Y., & Kaneda, Y.: Three-dimensional numerical simulation of snowdrift. Cold Regions Science and Technology, Vol. 20, 65-73, 1991
- 26) Thiis, T.K. and O'Rourke, M.: Model for snow loading on gable roofs, Journal of Structural Engineering, Vol. 141, No. 12, 2015.12
- 27) Hoibø, H.: Form factors for snow load on gable roofs - Extending use of snow load data from inland districts to wind exposed areas, 11th International Congress on Agricultural Engineering, Dublin, Ireland, Balkema, 1989.4
- 28) Hoibø, H.: Snow Load on Gable Roofs - Results from Snow Load Measurements on Farm Buildings in Norway, First International Conference on Snow Engineering, Santa Barbara, CA, USA, CRREL, Special Report 89-6, pp. 95-104, 1988.7

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

Yoshihide TOMINAGA^{}, Tsubasa OKAZE^{**} and Akashi MOCHIDA^{***}*

^{*} Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D.

^{**} Assoc. Prof., Department of Environmental Science and Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.

^{***} Prof., Dept. of Architecture & Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr.Eng.

In the prediction of roof snow loads on buildings, unbalanced snow distribution due to wind flow on roofs is a problem. Although some experimental research has been carried out using wind and water tunnels, till date, only a few attempts have been made to apply computational fluid dynamics (CFD) to this issue. In this study, a method based on CFD was applied to the prediction of roof snow depth for an isolated gable-roof building. By comparing the results with data from observations, the accuracy of prediction using CFD simulations was investigated.

An isolated gable-roof building, with the height of the eaves $H_e = 6$ m and width $W = 6.6$ m, was considered (Fig. 1). It was placed such that it was perpendicular to the approaching wind flow. The model could be given one of three different roof pitches, specifically, 3:10 ($=16.7^\circ$), 5:10 ($=26.6^\circ$), and 7.5:10 ($=36.9^\circ$). ANSYS Fluent 14.5 commercial software was used to perform the steady-RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations model) computations based on a control volume approach for solving the flow equations. The computational grid consisted of 2,355,280 cells for the domain for the 5:10 roof pitch case (the other roof pitches had similar number of grids). Special care was taken to allocate an adequate number of hexahedral cells along the oblique roof so as to avoid the tetrahedral and pyramid cells. The computational conditions used in this study were set based on the guidelines of the Architectural Institute of Japan. The realizable k - ϵ model was used as the turbulence model. The snowdrift model proposed by the authors was implemented in the CFD code as the User Defined Function. For modeling suspension, the transport equation of snowdrift density Φ was solved.

Figs. 5-7 compare the mean streamwise velocity U_1 , turbulent kinetic energy k and the pressure coefficient obtained by CFD with the measured values obtained by the wind tunnel experiment for the all roof pitches. The agreement between the results of the CFD analyses and those obtained by the experiment is generally good. The model parameters appeared in the snowdrift model were examined by the sensitive analysis on the predicted snow accumulation as shown in Figs. 8 and 9. Figs.12 and 13 shows the normalized snow depth with different wind velocities. The well-known tendency that snow is eroded on the windward side and accumulates on the downwind side was reproduced. Furthermore, the drift coefficient C_d obtained by the CFD result was compared with the observational results, as shown in Fig. 14. The observational data consisted of approximately 1,300 examples of snowdrift formation on gable roofs in Norway, which are also the basis of the model equation in ISO 4355. The CFD result obtained with $U_{ave} = 2.0$ m/s and $U_H = 2.0$ m/s is very close to the observational data and the model.

It was confirmed that the observational data can generally be reproduced by the proposed CFD simulation. The prediction accuracy for different roof geometries will be examined in future studies.

(2015 年 12 月 9 日原稿受理, 2016 年 3 月 23 日採用決定)