

風による屋根雪偏分布の数値流体シミュレーション予測

—Dynamic mesh の適用—

富永 禎秀¹

(1:新潟工科大学)

1. 研究目的

屋根上積雪の風による再分配によって生じる偏分布は、過大な荷重や局所的な応力の原因となるため、これらを正確に予測することは、積雪地域における安全かつ合理的な構造設計のために重要である。筆者は、これまで CFD (Computational Fluid Dynamics; 数値流体力学) を用いた屋根上積雪の風による偏分布の予測手法の開発を進めてきた (富永ら, 2016; 村山ら, 2019)。本研究では, Dynamic mesh と呼ばれる手法を用いて屋根上積雪分布の時間的変化に伴う気流場の変化を連成して解析する手法の有効性を検討する。

2. 解析方法

2. 1 観測方法

解析手法の開発の第1段階として, 2次元解析を行った。過去に北海道で屋根上積雪深の観測が行われている建物モデル (苫米地ら, 1986) を 2 次元化した屋根勾配 26° の軒高と幅が 3 m の切妻屋根モデルを対象とした。建物モデルと積雪がない状態でのメッシュ分割を図1に示す。

2. 2 解析条件

ANSYS Fluent 19.2 を使用して RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) モデルに基づく CFD 解析を行った。解析領域は, 60 m(x) × 30 m(z) とした。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 (日本建築学会, 2020) に従って与えた。乱流モデルは Realizable $k-\varepsilon$ モデルを使用した。流入面・上空面では, 想定する降雪量に対応する飛雪空間密度を与えた。積雪密度は 100 kg/m^3 , 雪粒子の落下速度は -0.5 m/s で一定とした。

2. 3 非定常解析の流れ

解析のフローを図2に示す。基本的な解析モデルは既報 (村山ら, 2019) と同様である。気流解析より風速分布, 摩擦速度分布を求めるのと同時に, 飛雪空間密度 Φ の輸送方程式を解き, その分布を求める。その結果から屋根面の侵食, 堆積フラックスの収支を計算し, 単位時間当たりの積雪深の変化量を求める。既報²⁾では, 屋根上積雪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したが, 本報の手法は, Dynamic mesh を用いて, 各時間 step における積雪深変化に基づいてメッシュを自動的に再生成し, 次 step の気流解析及び飛雪解析を行う。これを非定常解析と呼び, 積雪がない状態の気流分布のみを用いて, 一定時間後の積雪分布を予測する定常解析の結果と

比較する。

3. 結果及び考察

3. 1 各種解析条件の感度解析

今回の解析の目的は, 特定の短時間の吹雪イベントによって形成される積雪深分布を予測するのではなく, 比較的長期の降積雪によって形成される積雪深比の偏分布 (すなわち荷重設計における屋根形状係数に相当) を得ることである。そのためには適当な標準的解析条件を設定する必要があるため, 各種の解析条件 (ここでは風速, 解析時間, 降雪量) の感度解析を行った。感度解析の結果は, 次式の吹き溜まり係数 C_d を用いて評価する。

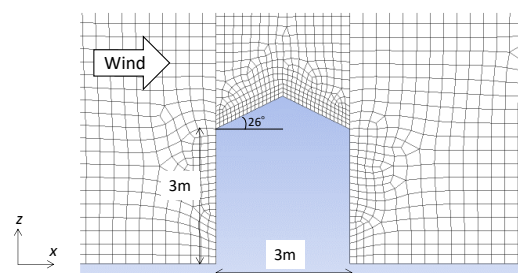


図1 解析対象。

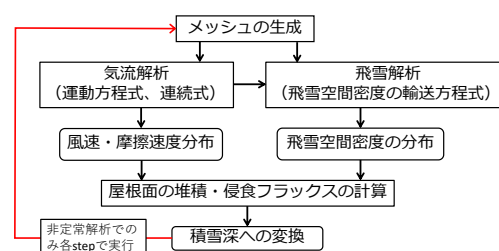


図2 積雪分布の CFD 解析のフロー。

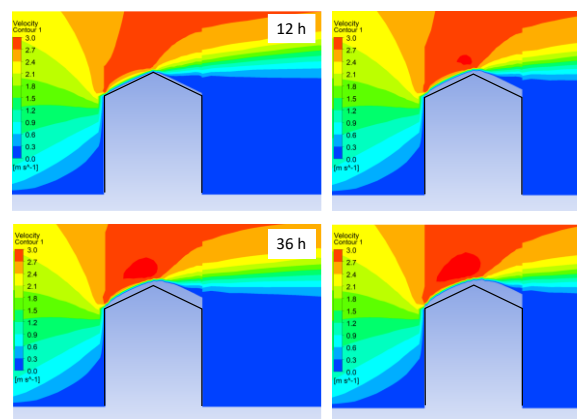


図3 時間経過による積雪と風速分布の変化。

$$C_d = \frac{S_l - S_w}{S_g} \quad (1)$$

S_l, S_w : 風下側, 風上側屋根の平均積雪深[m]

S_g : 地上積雪深[m]

地上 3 m 高さの風速を 1~3 m/s, 降雪量を 0.5, 1.0 cm/h, 解析時間を 12~48 h の範囲で変化させた。結果の一例として, 風速 2 m/s, 降雪量 1.0 cm/h の時間経過に伴う積雪分布の時間変化を図 3 に示す。時間の経過とともに積雪が増加し, 特に風下側屋根の積雪の増加が大きい。積雪分布の変化に追従して風速分布も変化している。各条件によって得られた吹き溜まり係数と解析時間の関係を図 4 に示す。風速が大きくなるに従い, 吹き溜まり係数が大きくなっている。また降雪量は吹き溜まり係数の予測結果に大きく影響しない。風速 3 m/s, 降雪量 1 cm/h の条件を除くと, 解析 24 時間以降の吹き溜まり係数の変化は小さいことから, 48 時間の計算時間は十分であると考えられる。次に, 非定常解析の 48 時間後と定常解析の吹き溜まり係数を風速との関係で比較したものが図 5 である。吹き溜まり係数は概ね風速の 2 乗に比例して増加している。非定常解析は定常解析に比べて吹き溜まり係数が約 3~4 割大きい。全体に吹き溜まり係数が風速に対して過敏に思われるが, 2次元 RANS による風速分布の計算精度の限界に関係している可能性がある。

Thiis and O'Rourke (2015)は, ノルウェーでの実測結果に基づき切妻屋根の吹き溜まり係数の推定式として次式を提案している。

$$C_d = \left(\frac{\beta}{45} 0.12 + 0.05 \right) (-6.67 C_e + 7.67) \quad (2)$$

今回対象とする屋根勾配 $\beta=26^\circ$ の場合, $C_e=0.85$ (exposed condition)とすると, C_d は 0.24 となる。観測(苫米地ら, 1986)における最大積雪深時の屋根上積雪分布の測定結果とそのときの地上積雪深から吹き溜まり係数を求めると, 3冬期の平均で 0.22 となり, (2)式の結果と概ね対応する。本解析結果では, 風速 1.5 m/s の結果がこの値に近い。

非定常解析の屋根上の積雪深比(地上積雪深との比)分布の予測結果(48 時間後)と定常解析, 観測(苫米地ら, 1986)の比較を図 6 に示す。定常解析では風上, 風下屋根ともに積雪深比が観測より過大に評価されているのに対して, 非定常解析の結果は, 風上面での積雪深の減少をよく捉えており, 観測に近い。しかしながら風下側屋根の下流側の積雪深を過大に評価している。

4. 結論

- 1) 積雪面の変化による速度場の変化を考慮できる屋根上積雪分布の非定常解析手法を構築し, 2次元の切妻屋根モデルに適用し, その有効性を検討した。
- 2) 非定常解析の結果は, 定常解析に比べると, 風上屋根面における積雪深の減少を正確に捉えており, 積雪面の時間変化を考慮することで, より観測結果に近い積雪分布の予測が可能となる。

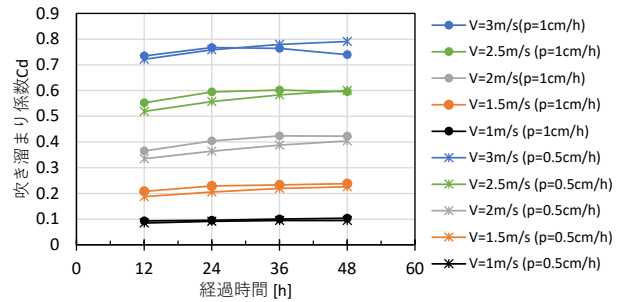


図4 非定常解析における吹き溜まり係数の変化。

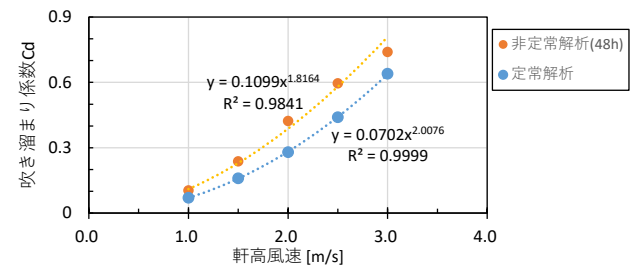


図5 風速と吹き溜まり係数の関係。

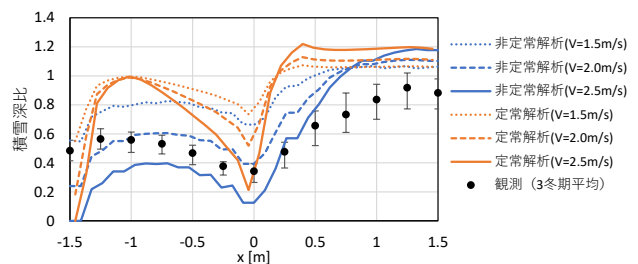


図6 屋根上の積雪深比の比較。

- 3) 今後は本手法を3次元問題に拡張し, さらに有効性や適用範囲の検討を進める予定である。

謝辞

科学研究費(20H02315)による助成を受けた。

文献

- 村山唯, 五十嵐賢次, 富永禎秀(2019): 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。日本建築学会構造系論文集, **84** (762), 1055-1064.
- 日本建築学会, 都市の風環境予測のための CFD ガイドブック。日本建築学会, 2020.1.
- Thiis, T. K. and O'Rourke, M. (2015): Model for snow loading on gable roofs. *J. Struct. Eng.*, **141**(12), 04015051-1-9.
- 苫米地司, 和泉正哲, 遠藤明久(1986): 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 B, 49-62.
- 富永禎秀, 大風翼, 持田灯(2016): 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。日本建築学会構造系論文集, **81**(725), 1051-1059.