

【2-1】

2 段屋根モデル上の風による雪荷重偏分布の CFD 解析

正会員 ○ 村山 唯*
正会員 五十嵐 賢次**
正会員 富永 禎秀***

風 雪荷重 偏分布
CFD 解析 2 段屋根

1. はじめに

建物の屋根雪荷重を推定する上で、風によって引き起こされる屋根上の雪の偏分布は予測が難しいものの一つである。本研究では、これを CFD (Computational Fluid Dynamics) で精度良く予測する方法について、既往の実測結果との比較により検討する。既報¹⁾では、異なる勾配を有する単体の切妻屋根建物を対象に、吹きだまり係数の予測精度を確認した。本報では、2 段屋根建物モデルを対象に検討した結果を報告する。

2. 解析概要

2.1 解析対象

詳細な実測結果²⁾が報告されている、2つの高さの平らな屋根面を持つ(2 段屋根)建物モデルを対象とする。概要を図 1 に示す。本実測調査では、本研究では、風向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。これは文献 2 における風向が WNW のケースであり、表 1 に示す 3 つ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) とした。メッシュ分割は、建物高さを均等に 18 分割しており、建物から離れるに従い、徐々に拡大させた。建物近傍のメッシュ分割を図 2 に示す。流入条件は、ベキ指数 0.20 の平均風速鉛直分布を仮定し、乱流エネルギー k 、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³⁾に従って与えた。その他の各種解析条件の設定も、同ガイドライン³⁾に従った。乱流モデルは Realizable 型 $k-\varepsilon$ モデルを使用した。

2) 飛雪解析

解析フローを図 4 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)。

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

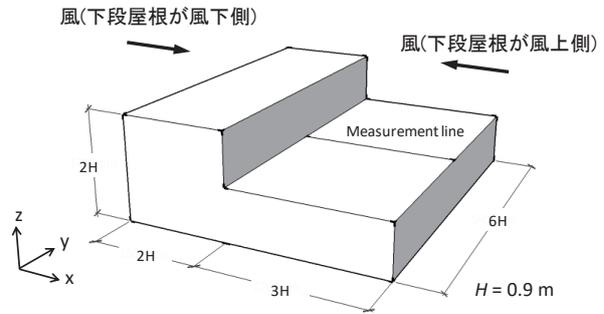


図 1 対象建物モデル

表 1 観測時の条件

Conditions	U_{Hmean}	U_{Hmax}	S_d
A	2.9 m/s	4.8 m/s (NW)	7 cm
B	2.3 m/s	6.0 m/s (W)	30 cm
C	1.2 m/s	3.5 m/s (SSE)	11 cm

U_{Hmean} : 降雪期間中の平均風速
 U_{Hmax} : 10 分間平均風速の最大値
 S_d : 基準積雪深の増分

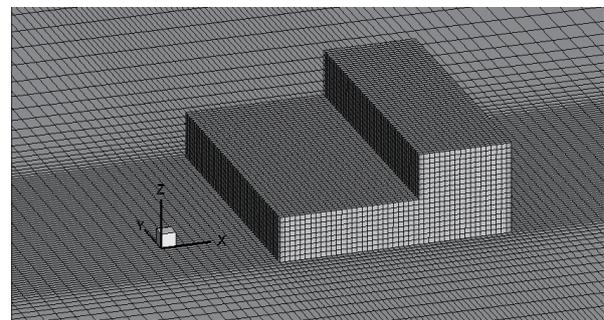


図 2 建物近傍のメッシュ分割

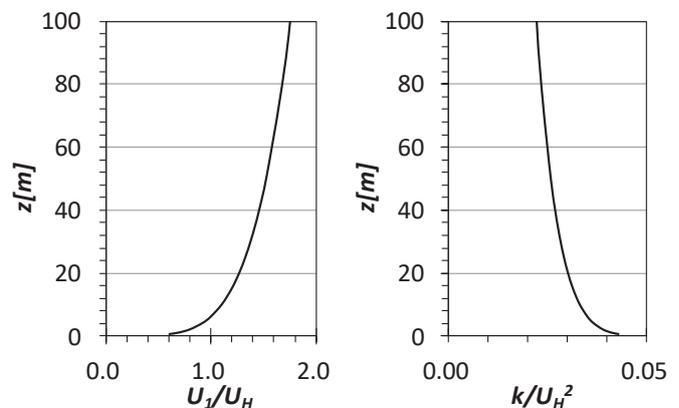


図 3 流入条件

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_m を流入及び上空境界に与えた（本解析では、 0.0015kg/m^3 ）。乱流シュミット数 σ_s は 0.7 とした。

雪面における堆積フラックス q_{dep} [$\text{kg/m}^2\text{s}$] は、過去の検討結果¹⁾と同様、次式を用いた。

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

雪面のシアストレスによる侵食フラックス q_{ero} [$\text{kg/m}^2\text{s}$] は次式でモデル化した¹⁾。

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

U_* : 雪面の摩擦速度, U_{*t} : 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

A_e : 比例定数 (1.0×10^{-5}), 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、既報¹⁾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} [$\text{kg/m}^2\text{s}$] 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 ($U_* > U_{*t}$) 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。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。

$$U_*^2 = \frac{\kappa C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} U_P}{\ln \left(\frac{E C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\nu} \right)} \quad (5)$$

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

実測結果²⁾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。CFD 解析においても、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 (4式) の比から積雪深比が算出可能である。しかし今回の観測結果では、流入境界条件として与えるべき吹雪量についての情報がなく、そのことが地表面の積雪フラックスの不適切な予測を引き起こす可能性がある。本研究では、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、侵食・堆積の各フラックスを基準化するとともに、正味の積雪フラックス q_{total} と q_{sta} との比を積雪深比と定義した。

4) 結果の重ね合わせ

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

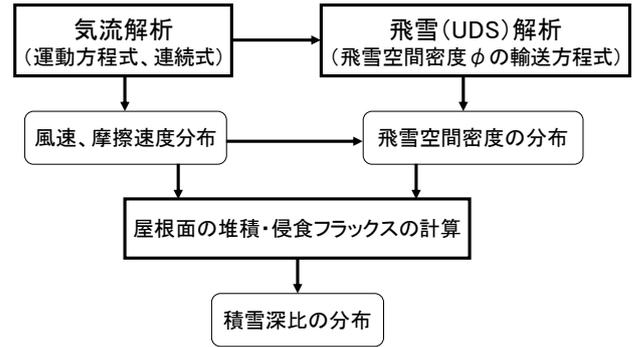


図4 解析フロー

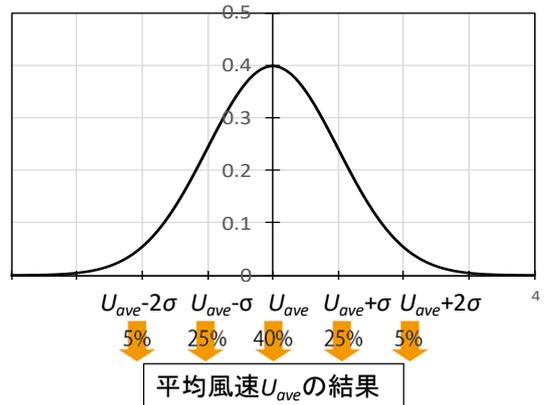


図5 正規分布を仮定した結果の重ね合わせ

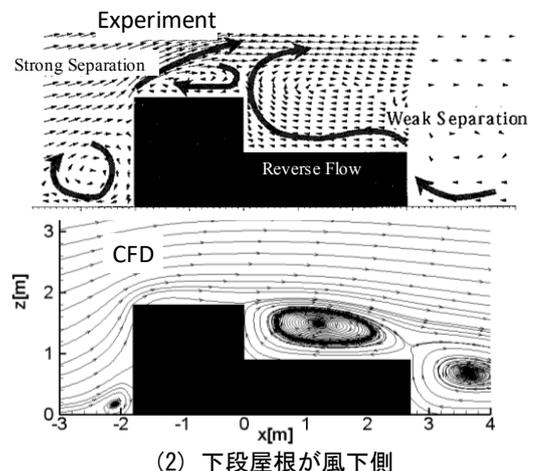
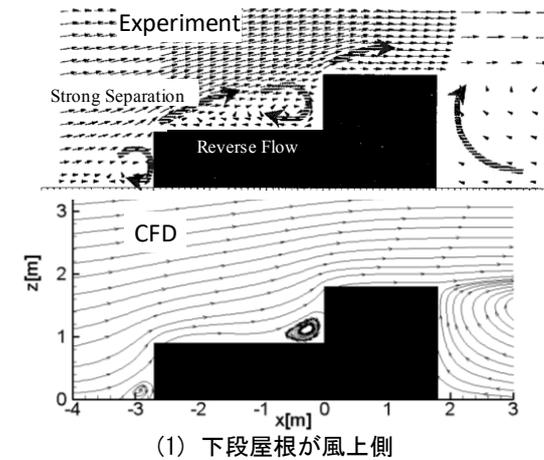


図6 流れ場の予測結果の風洞実験⁴⁾との比較

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、文献1と同様に、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%、 $U_H = U_{ave} \pm \sigma$ の解析結果をそれぞれ 25%、 $U_H = U_{ave} \pm 2\sigma$ の解析結果をそれぞれ 5% で重み付け平均して、 $\overline{U_{ave}}$ での積雪分布を求めた。本解析では、 σ は 0.74m/s と仮定した。

3. 結果及び考察

3.1 流れ場

図6は $U_H=3.7\text{m/s}$ の場合の両ケースの中心断面における流線である。文献4で報告されている同形状の建物モデルを使用した風洞実験結果を併せて示す。下段が風上側の場合、段差付近に比較的小さな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は、段差部分に大きな渦が形成されている。このような流れ場の違いによって雪粒子は移動プロセスが変化し、積雪分布の違いが生じるものと考えられる。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 摩擦速度

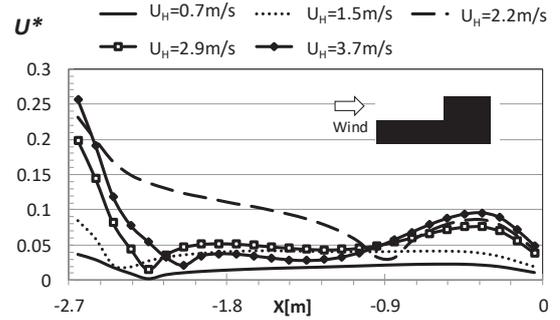
図7に下段屋根中心軸上の各風速条件における摩擦速度の分布を示す。下段屋根が風上側の場合、風上端で摩擦速度の大きい領域が見られる。その値は、当然ながら、 U_H が大きくなるにつれて大きくなるが、 $U_H=2.2\text{m/s}$ の条件で、全体的に値が大きい。これは、図は省略するが、この条件では、段差付近で発生する循環流が小さくなり、主流方向の風速成分が大きくなるためである。すなわち、下段屋根が風上の場合、摩擦速度の分布形状に風速依存性がある結果となった。限界摩擦速度を超えるのは、 $U_H=3.7\text{m/s}$ の屋根風上端のみである。一方、下段屋根が風下の場合、分布形状は風速条件によって変化せず、値が徐々に大きくなっている。限界摩擦速度を超える場所は現れない。

3.3 堆積フラックス

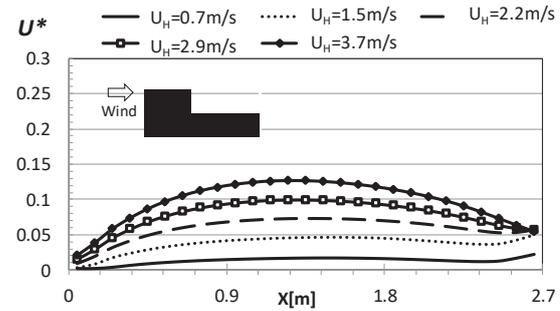
図8に、下段屋根中心軸上の各風速条件における堆積フラックスの分布を示す。(2)式から分かる通り、図6の摩擦速度を概ね反転させた形状となっている。摩擦速度が限界摩擦速度を超える部分では、堆積フラックスはゼロとなる。本来、堆積フラックスには、飛雪空間密度が移流・拡散される効果が含まれるが、後述するように、今回の解析条件では、侵食による飛雪空間密度の発生が限定的にしか起こらなかったため、ほぼ摩擦速度で決定される分布となっている。

3.4 侵食フラックス

図9に、下段屋根中心軸上の各風速条件における侵食フラックスの分布を示す。下段屋根が風上側の場合、風上端における摩擦速度の大きい領域に対応して、負の大きな侵食フラックスが見られる。一方、下段屋根が風下の場合、全ての領域で摩擦速度が限界摩擦速度を下回る

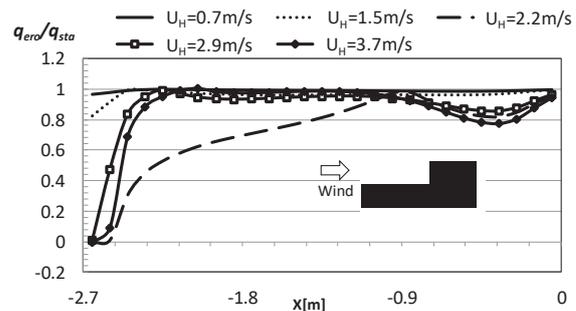


(1) 下段屋根が風上側

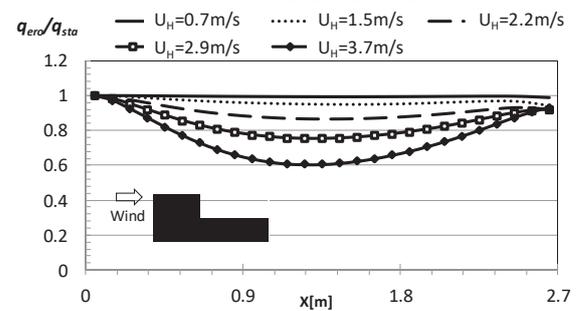


(2) 下段屋根が風下側

図7 屋根面上の摩擦速度の比較



(1) 下段屋根が風上側



(2) 下段屋根が風下側

図8 堆積フラックス q_{ero} の分布

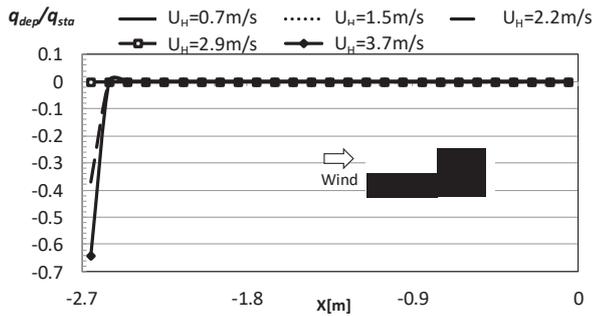
ため(図7参照)、屋根上における侵食フラックスは0である。

3.5 正味の積雪フラックス

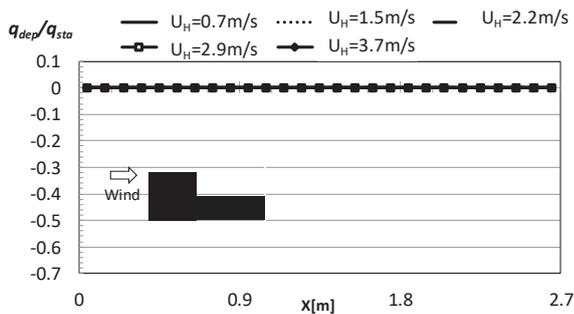
下段屋根中心軸上の各風速条件における正味の積雪フラックスの分布を図10に示す。両ケースにおいて、概ね堆積フラックス(図8)に対応する分布となっている。

3.6 積雪深比の観測結果との比較

図11はCFDと観測の積雪深比を比較したものである。下段屋根が風上側の場合、CFDの積雪分布は風上側コーナー付近で侵食が大きく、それ以外は平坦な分布となり、

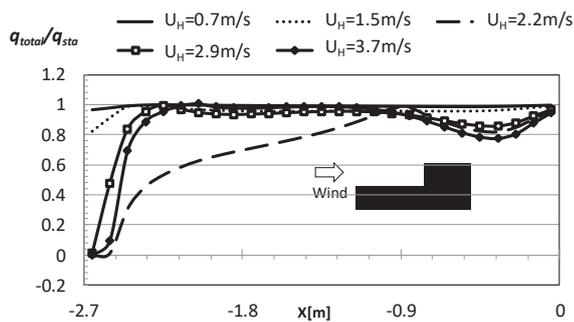


(1) 下段屋根が風上側

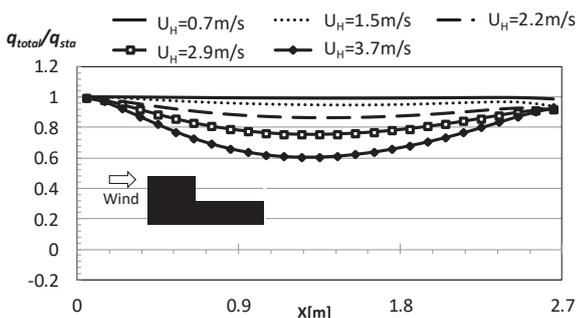


(2) 下段屋根が風下側

図9 侵食フラックス q_{dep} の分布



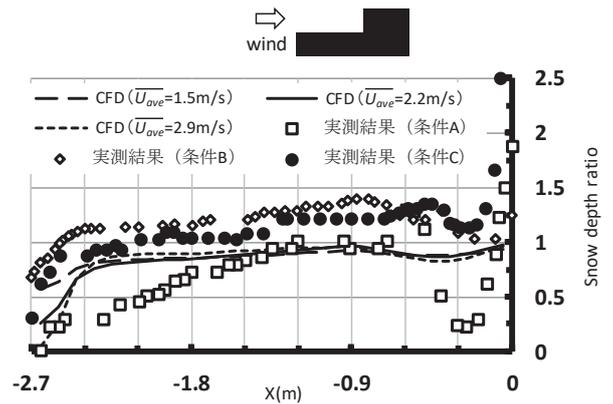
(1) 下段屋根が風上側



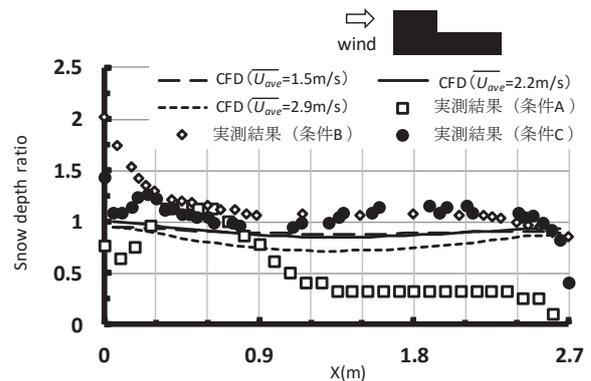
(2) 下段屋根が風下側

図10 正味の積雪フラックス q_{total} の分布

比較的低風速の観測結果と近い。しかし、観測結果の段差 ($X=0m$) 付近にみられる風下側の堆積ピークは CFD では再現されていない。なお風上端部付近を除くと風速条件による違いは小さい。一方、下段屋根が風下側の場合、CFD の下段屋根の分布はほぼ平坦で、こちらも比



(1) 下段屋根が風上側



(2) 下段屋根が風下側

図11 積雪深比の観測との比較

較的低風速の観測結果と近い。ただし比較的高風速の観測結果とは大きく異なる結果となった。

4. まとめ

2段屋根下段部における積雪分布の形状は、比較的低風速の観測結果と概ね近い傾向が得られたが、段差付近のピークの位置や大きさに異なった部分も見られた。さらに精度を向上させるには、非定常な雪面の変化を気流解析に反映させる等の改良が必要であると考えられる。

謝辞 本研究は科学研究費(16H04467)の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 富永禎秀, 大風翼, 持田灯, 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, 第81巻, 第725号 (2016), pp. 1051-1059.
- 2) 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, 65 (3) (2003), pp.231-239.
- 3) 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, 2007.7
- 4) 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, 67巻 555号, (2002), pp. 53-59.

*新潟工科大学大学院・大学院生
**新潟工科大学・准教授
***新潟工科大学・教授

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Niigata Institute of Technology
Associate Professor, Niigata Institute of Technology
Professor, Niigata Institute of Technology