

## CFDによる積雪の屋根形状係数の予測手法とその屋根雪荷重設計への適用に関する研究

Study on Prediction Method of Roof Shape Coefficient based on CFD Simulation and Its Application to Snow Load Design

新潟工科大学 教授 富永 禎秀

### (研究計画ないし研究手法の概略)

本研究では、日本建築学会・建築物荷重指針において用いられる「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）」のうち、屋根上の積雪偏分布を引き起こす大きな要因である「基本となる屋根形状係数」「風による偏分布に関する屋根形状係数」に着目し、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、これらの係数の分布を実務的に利用可能な精度で簡易に予測する手法を確立し、雪荷重設計の精度を向上させることを目的とする。

研究は、以下の3つの検討テーマからなる。

#### 1) 風による偏分布のCFDモデリング手法の検証

風による偏分布のCFDモデリング手法について、異なる設定風速での解析結果を地域の風速発生頻度特性に応じて重みづけ平均する方法を提案し、その精度を検証する。

#### 2) モデル評価のための風洞実験

数値シミュレーションモデルを確立するためには、モデルに現れる各種のパラメータを与条件に応じて最適化する必要がある。防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の低温風洞実験室を利用した実験を行う。

#### 3) モデル検証用データ収集のためのフィールド実測調査

モデリング精度の検証のためには、実現象との対応を見極めながら重要となるパラメータを選定やモデル係数のチューニング等を行う必要がある。屋根モデルを対象とした建物周りの積雪深及び屋根雪密度等の分布のフィールド実測調査を行い、基本的なデータを採取する。

### (実験調査によって得られた新しい知見)

#### 1. 風による偏分布のCFDモデリング手法の検証

##### 1.1 目的

申請者がこれまでの研究で採用してきた風による屋根雪偏分布の予測手法の有効性を、2段屋根建物モデルを対象に検討する。

##### 1.2 解析概要

###### ①対象建物

詳細な実測結果が過去に報告されている、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。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ケースを想定する。

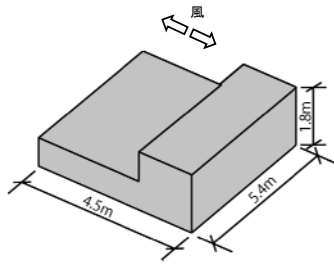


図1 対象建物モデル

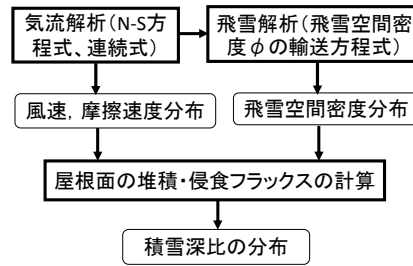


図2 解析フロー

## ②解析手法

ANSYS Fluent 14.5を使用して定常(Steady)解析を行った。図2に示す解析フローに基づいて積雪分布を求めた。乱流モデルはRealizable  $k-\epsilon$ モデルを使用した。解析結果から屋根面における正味の積雪フラックスを求め、基準となる地表面の積雪フラックスとの比を求めることで積雪深比を算出した。従来の研究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 $U_{ave}$ とすると、 $U_{ave}$ の解析結果を40%、 $U_{ave} \pm 1m/s$ の解析結果をそれぞれ25%、 $U_{ave} \pm 2m/s$ 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た。平均風速は観測時の風速を参考に決定した。

## 1.3 結果及び考察

### ①流れ場の予測結果

図3は各ケースの流線分布である。下段が風上側の場合では屋根上に比較的小さな2つの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には大きな渦が1つ形成される。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。

### ②積雪分布の予測結果

図4はCFDと観測の積雪深比を比較したものである。下段が風上側の場合、CFDの積雪分布はほぼ平らとなり、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。なお平均風速による違いはほとんど見られない。一方、下段が風下側の場合、平均風速による違いが見られる。下段屋根の風上側で積雪が増える傾向はCFDで再現されているが、 $X=0.6m$ 付近のピークは再現されていない。

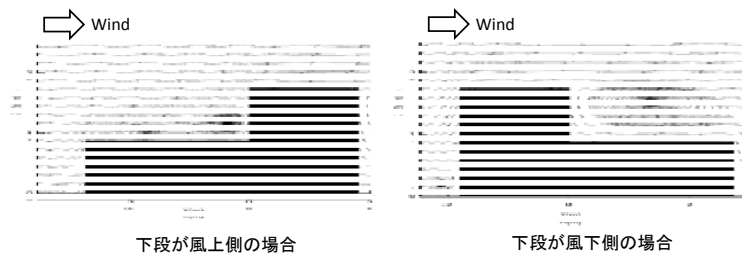


図3 建物周辺の流線 (中心鉛直断面)

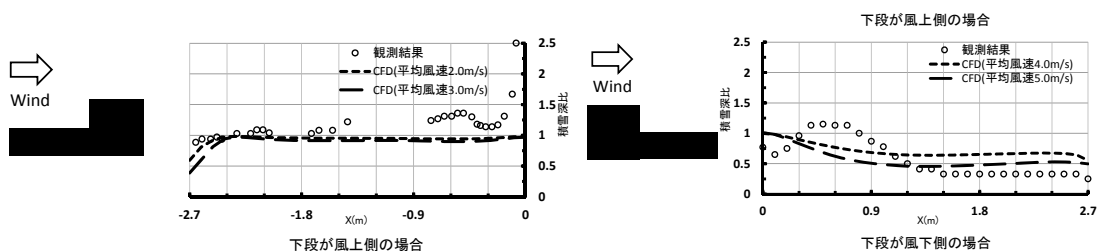


図4 建物中心の積雪深比のCFDと観測結果の比較

## 1.4 まとめ

2段屋根下段部における積雪分布の形状は観測結果と概ね近い傾向が得られたが、ピークの発生位置など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。

## 2. モデル評価のための風洞実験

### 2.1 目的

本研究では、CFDにおける飛散・堆積モデルの屋根上積雪への適用性を検討するため、人工雪を用いた低温風洞実験の概要とそれを再現した基礎的なCFD解析を実施した。

### 2.1 風洞実験の概要

#### ①風洞

実験の様子を図5,6に示す。実験は、防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の低温風洞装置を用いて行った。風洞は密閉型回流式で、測定部は長さ14m、幅1.0m、高さ1.0mである。実験には同実験所で作製した人工雪を使用した。風洞内の気温は-10℃とした。風速の測定には三次元超音波風速計を用い、積雪深分布の測定にはレーザー変位計を用いた。接近流の平均風速は、周壁近傍を除いてほぼ一様である。予備実験の結果から中心部の風速を8.4m/sとし、0.1m間隔の格子を上流に設置することで、乱れを大きくした。

#### ②対象模型

対象とする模型の概要を図7に示す。勾配は10°、15°、20°の3種類とする。模型の表面には雪粒子の滑落を抑えるために防風ネットを貼り付けた。風洞床面で発達する境界層の影響を排除するため、屋根模型の底面が風洞床面から0.15m離れるように設置した。

#### ③実験手順

実験の効率と流れ場の二次元性を考慮して、模型の中央約30cm幅の部分のみを測定対象とした。網目の幅が1mm程度のふるいを用いて、雪粒子が1cm程度の厚さで、できるだけ均等になるように敷いた。その状態で模型中心の積雪深を計測した後、10分間風を吹かせ、再度積雪深を計測することで(1)式より積雪の変化率Rを求めた。正は堆積、負は侵食を表す。

$$R = \frac{h_a - h_i}{h_i} \quad (1)$$

$h_i$ : 初期積雪深,  $h_a$ : 10分経過後の積雪深

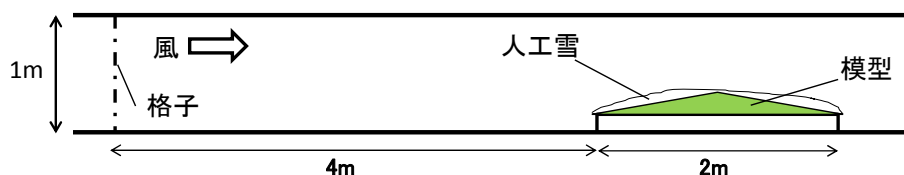


図5 風洞実験の概要（鉛直断面）



図6 風洞実験の様子

### 2.3 風洞実験結果

図8に各屋根勾配の積雪深の変化率Rの分布を示す。負は侵食、正は堆積を表す。棟の風上側の ( $-0.5 \text{ m} < x < 0$ ) と風下側の軒付近 ( $0.6 \text{ m} < x < 1.0 \text{ m}$ ) は変化率が負に大きくなっていることから、その部分の侵食が著しいことが分かる。特に勾配 $20^\circ$ の棟風上側 ( $-0.5 \text{ m} < x < 0$ ) は $10^\circ$ ,  $15^\circ$ に比べ侵食が大きい。 $10^\circ$ と $15^\circ$ の差は小さい。風上側のほぼ全面で侵食しているにもかかわらず、風下側への堆積はほとんど見られないため、模型より下流に飛散したと思われる。一方、風上側の軒付近 ( $-1.0 \text{ m} < x < -0.7 \text{ m}$ ) と風下側の棟付近 ( $0 < x < 0.4 \text{ m}$ ) は変化率は小さい。

### 2.4 風洞実験を再現したCFDシミュレーション

#### ①解析条件

実験を行った高さ $1.0 \text{ m}$ 、長さ $8.0 \text{ m}$ の風洞を2次元の解析領域として再現した。Realizable k- $\epsilon$ モデルを用いた定常のRANS解析をANSYS Fluent 14.5を用いて行った。メッシュは、流れの変化をより正確に捉えるため、棟付近は細かくし、屋根模型から風下側にかけては徐々に粗くなるように作成した。平均流入風速と乱流エネルギーは風洞実験で計測した上流での鉛直分布を与えた。

#### ②解析結果

図9はCFDによって得られた流線分布の比較である。 $10^\circ$ ,  $15^\circ$ では、風下で循環流の形成は見られないのに対し、 $20^\circ$ では循環流が見られた。これは過去に行われた切妻屋根建物の風洞実験及び解析結果と同様の傾向である。図10は屋根勾配別の屋根面上の摩擦速度を比較したものである。摩擦速度 $U_\tau$ は解析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ている。

$$U_\tau^2 = \frac{\kappa C_\mu R_p^2 U_P^2}{\ln\left(\frac{y_P}{y_0}\right)^2} \quad (2)$$

$U_P$ : 壁近傍ノードPにおける流体の平均速度,  $R_p$ : 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,  $\nu$ : 動粘性係数,  $E = 9.793$ ,  $\kappa = 0.4187$ ,  $C_\mu = 0.09$

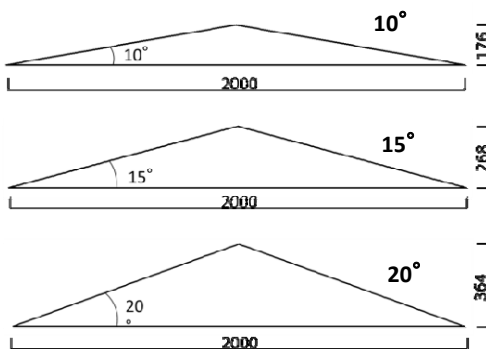


図7 勾配屋根模型の概要(単位:mm)

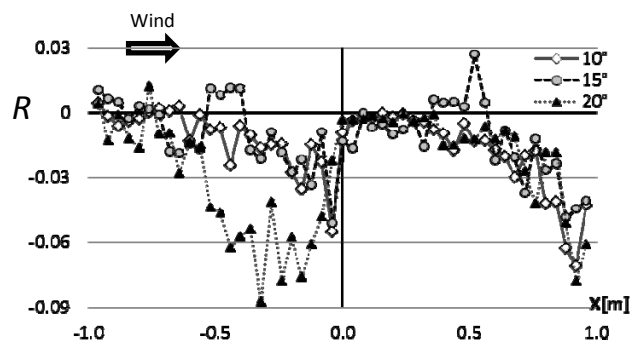


図8 変化率Rの分布

CFD解析で用いられる雪の飛散・堆積モデルでは、飛散・堆積量は摩擦速度の関数として表され、その閾値は限界摩擦速度によって規定される。摩擦速度が、一般的に用いられる限界値 $0.20\text{m/s}$ を超える $x=-0.5\text{m}$ より風下側では、図8に示した実験の変化率を見ても大きな侵食が見られる。しかし $0.20\text{m/s}$ を大きく下回っている $x=0.5\text{m}$ より風下側でも、実験の変化率をみると侵食が見られ、摩擦速度をパラメータとして積雪深の変化を表現することの限界が示唆される。この点は今後さらに詳細に検討が必要である。

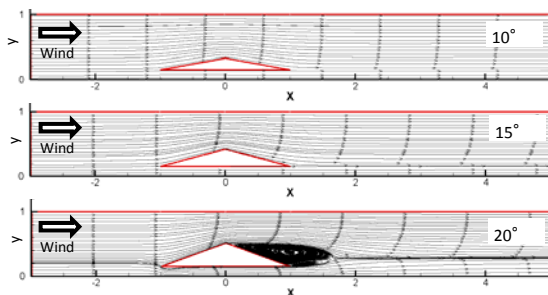


図9 CFDによる流線の分布

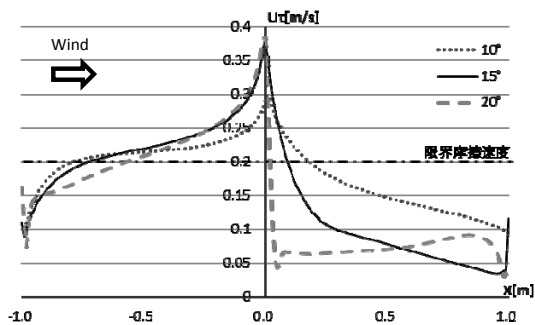


図10 CFDによる屋根上の摩擦速度 $U_t$ の分布

## 2.5 まとめ

- ・人工雪を用いた風洞実験の結果、屋根勾配にかかわらず棟の風上側で侵食が見られ、屋根の風下端でも比較的大きな侵食が見られた。
- ・風洞実験を再現したCFDの結果によれば、積雪深の変化は風上側では摩擦速度の大小と概ね対応しているが、風下側では必ずしも対応しなかった。

## 3. モデル検証用データ収集のためのフィールド実測調査

### 3.1 目的

- ・降雪後の融雪や降雨などによる積雪荷重の変動を把握することを目的として、屋根模型を使用した屋外実測調査を実施した。
- ・前述の風洞実験で使用した勾配屋根模型を使用して、実際の降雪状況における雪の偏分布形成を観測する実測調査を行った。

### 3.2 概要

#### ①風による屋根雪偏分布の観測

横 $1\text{m}$ ×縦 $2\text{m}$ 、傾斜 $15^\circ$ の切妻屋根模型を単管パイプで組んだ土台に取り付け、本学グラウンドに設置した。設置方向は、降雪時の卓越風向と考えられる西南西とした。積雪の滑動を防ぐために網目の生地を屋根上表面に張り付けた。実測調査の様子を図11に示す。



図11 風による屋根雪偏分布の実測調査の様子

## ②屋根雪重量測定

1m×1mの鋼板屋根試験体を冬期間大学内のグラウンドに設置した。屋根試験体は1/100勾配と3/10勾配の2体である。屋根は4本の柱で支えているが、柱下には荷重計を設置し、積雪による屋根の雪荷重を計測した。また屋根試験体には雨どいも設けており、これに流量計を取り付けることによって、降雨や融雪によって屋根から流れる水量の測定も行った。実測調査の様子を図12に示す。



図12 屋根雪重量測定実測の様子

## 3.3 まとめ

実際の降雪を対象としたモデルによる実測調査を行うことにより、貴重な観測結果が得られた。今後結果を分析し、モデルの改良や精度検証に役立てていきたい。

### (発表論文)

- 1) Tominaga, Y.: Numerical simulation of snowdrift around buildings: past achievements and future perspectives (Keynote lecture), 8th International Conference on Snow Engineering, 10-19, Nantes, France, June 14-17, 2016.
- 2) 富永禎秀, 五十嵐賢次: 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, 雪氷研究大会(2016・名古屋), B6-7, 2016.9.28-10.2.
- 3) 村山唯, 五十嵐賢次, 根本征樹, 富永禎秀: 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, 日本風工学会年次研究発表会, 2017.5.24-25 (投稿済み)
- 4) Murayama, Y., Igarashi, K., Tominaga, Y.: CFD Simulation of Unbalanced Snow Accumulation due to Wind on a Two-level Flat-roof Model, 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Auckland, New Zealand, 3-7 December 2017 (投稿済み)