

雪庇の数値計算について

Development of simulation method for snow cornices

植松 孝彦¹

Takahiko Uematsu¹

Corresponding author: uematsu@snow-eaters.com (T. Uematsu)

¹株式会社 雪研スノーイーターズ

¹Yukiken Snow-Eaters Co.,Ltd.

In snowy regions, snow cornices form on mountain ridges and the eaves of houses. In recent years, falling snow cornices have become a problem as buildings become taller. This paper discusses the development of numerical simulations as a means of predicting snow cornices. aimed to improve driftFluxFoam in OpenFOAM, which has been under development recently, and put it into practical use. The author compared the simulation results with previous wind tunnel experiments. The author obtained good agreement in the shape of the snow cornice and the range of wind speeds over which it grows, but there was a large difference in the rate of growth. The author plans to continue making improvements in the future.

1. はじめに

雪庇は、大きいものでは山の尾根に、小さいものでは、家の屋根に成長する。¹⁾近年では、建物が高くなり、雪庇が小さくても、落下時の危険は大きくなった。このため、雪庇の落下予防策や雪庇を成長させない策が見られるようになったが、これらの策の有効性についての客観的な手段がない。

本論文の目的は、この客観的な手段として、数値計算を開発することを目的とする。

1. 1 開発方針

雪庇は、吹雪により運ばれた雪粒子により形成されると考えられているため、吹雪の数値計算が応用できると予想された。そこで、フリーの応用できそうなモデルの活用を考え、OpenFOAMのDriftFluxFoam²⁾を採用することにした。このモデルは、基本方程式の数が少なく、シンプルであるため、計算時間が短くて済む利点がある。一方、シンプルであるため、雪庇の形成の探求などには制限がある。

1. 2 開発にあたっての検証資料—風洞実験結果—

数値計算は、なんらかの方法によって、検証されなければならない。今回は、平成23年に実施した風洞実験の結果を用いることとした。この実験は、雪を風洞内に、上あるいは風上の下部から導入して行ったもので国立研究開発法人防災科学技術研究所極端気象災害研究領域雪氷防災研究センター雪氷環境実験室において実施した。その結果は、イセンコほか

(2012)³⁾にまとめられている。図1には、風洞のイラストを示す。風洞内の模型は、34cmの段差をもつバックステップ形状とした。結果を、表1に示す。

風洞で形成された雪庇は大きく分けて、2種類でいわゆる段差から庇状にのびた「薄板、吹きだまりタイプ」と段差に着雪した「着雪タイプ」となる。今回、数値計算の対象としたのは、「吹きだまりタイプ」である。

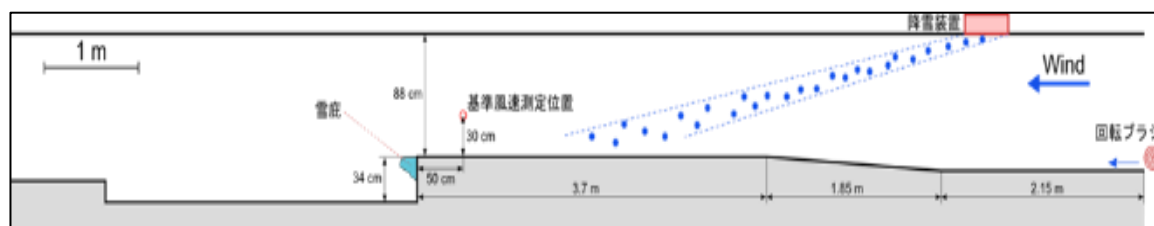


図1. 風洞のイラスト

表 1 風洞実験一覧

実験番号	風速 (m/s)	摩擦速度 (m/s)	雪底の長さ (cm)	雪底の厚さ (cm)	高さ3cmの 飛雪流量 (g/m ² /s)	雪底形成 タイプ
2	6	0.22	5.0	-	136.76	着雪
3	7	0.25	7.0	-	94.79	着雪
4a	5	0.17	22.0	4.0	49.28	吹きだまり
4b	5	0.17	3.0	-	49.28	薄板
4c	5	0.17	3.0	-	49.28	薄板
4d	5	0.17	9.0	-	49.28	着雪
6	6	0.22	3.0	-	133.69	着雪
7a	4	0.14	10.0	3.0	56.12	薄板
7b	4	0.14	10.0	-	56.12	着雪
8	8	0.29	1.5	-	-	着雪
9	5	0.17	12.0	-	128.19	着雪
10	5	0.17	9.0	-	-	着雪
11a	5	0.17	4.0	-	-	着雪
11b	5	0.17	18.0	2.4	-	吹きだまり
12	5	0.17	21.8	8.2	272.57	吹きだまり

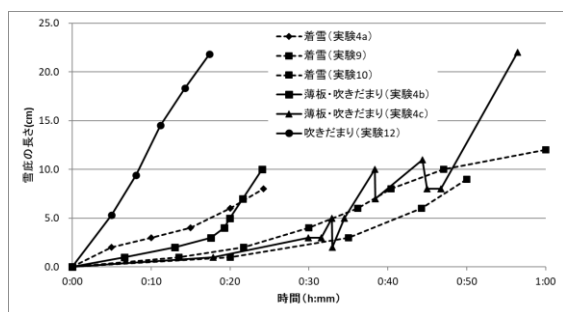


図 2 風洞実験の結果—雪底の長さ—

2 数値計算手法

2. 1 数値計算の地形、メッシュなど

数値計算の地形は、風洞実験に似せ、しかも、野外での実実験との比較を考慮して、風上から、5 m のところに高さ 4 m の段差を配置したバックステップとした。図 3 に、地形とメッシュを示す。メッシュは、風向に沿って 2 7 5 メッシュ、高さ方向に 5 0 メッシュ、風向直角方向に 3 メッシュとし、雪底部分を細かくした不等間隔とした。

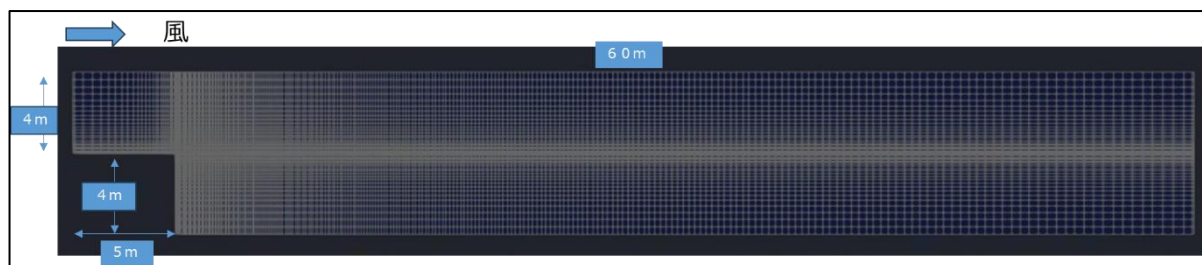


図 3 計算地形とメッシュ

2. 2 境界条件など

境界条件は、表 2 の通りである。

表 2 境界条件

風の境界条件	体積分率の境界条件
入力境界：一律風速 出口境界：0 左右境界：勾配 0 上面：0 下面：noSlip	入力境界： 地面から 1 m 範囲の一定値 風洞実験の結果から、0.03 とした。 出口境界：0 左右境界：勾配 0 上面：0 下面：slip

2. 2 基本方程式

基本方程式は以下のとおりである。(1) 式は、混相流の連続の方程式、(2) 式は、体積分率 α の保存の方程式、(3) 式は、混相流のナビエ・ストークスの方程式である。

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial \rho_P \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \{ \alpha \rho_P (u_m + u_d) u_m \} = 0 \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_m u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) = & -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_m \nabla u_m) - \\ & + \nabla \{ \alpha \rho_P u_d u_d + (1 - \alpha) \rho_f u_f u_f \} + \rho_m g_k \end{aligned} \quad \dots (3)$$

ここで、

$$\text{ドリフト速度： } u_d = u_p - u_m = \frac{\rho_f}{\rho_m} V_c 10^{-\alpha \alpha}$$

$$\text{流体速度： } u_f = \frac{\alpha \rho_P}{(1 - \alpha) \rho_f} u_d$$

$$\text{平均密度： } \rho_m = (1 - \alpha) \rho_f + \alpha \rho_P$$

$$\text{平均速度: } u_m = \frac{\alpha \rho_p u_p + (1 - \alpha) \rho_f u_f}{\rho_m}$$

粘性係数:

$$\mu_p = \mu_f + \text{Coeff} \cdot (10^{\text{exponent} \cdot \alpha} - 1)$$

平均粘性係数: $\mu_m = (1 - \alpha)\mu_f + \alpha\mu_p$
である。

ここで、このモデルの特徴は、ドリフト速度と粘性係数である。両者とも、体積分率の指数関数で表現されている。粘性係数は、Nishimura(1986)⁴⁾など²⁾を参考とした。また、ドリフト速度のVCの値はBrito(2023)⁵⁾を参考にし、 α は1.0とした。

3. 計算結果と風洞結果との比較

計算結果の一例を図4、5に示す。

この計算は、流入風速 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の例である。このように、計算では、60秒付近から長さ、厚さ、ともに変化が少なく、安定形になっている。

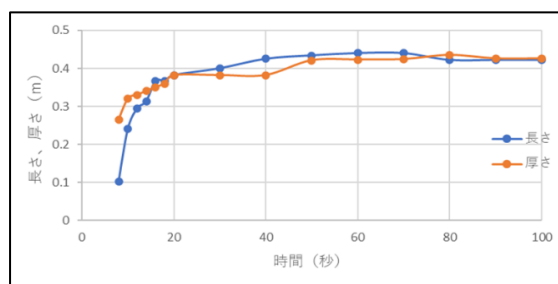


図4 計算結果 —雪底の長さ—

長さ、厚さともに60秒くらいで変化しない。

3. 1 形状の比較

図5に、計算による形状(安定形)と風洞実験による形状の比較を示す。楔状の形状はよく似ているが、風洞実験のほうが雪底先端に向けての上面の傾きが小さいように見える。雪底の下面の形状はよく似ている。

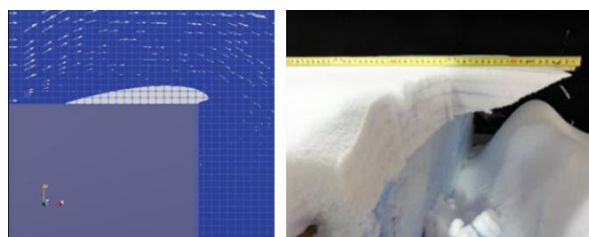


図6 数値計算の雪底と風洞の雪底の形状

左が数値計算結果(安定形)、右が風洞実験(12番)結果。

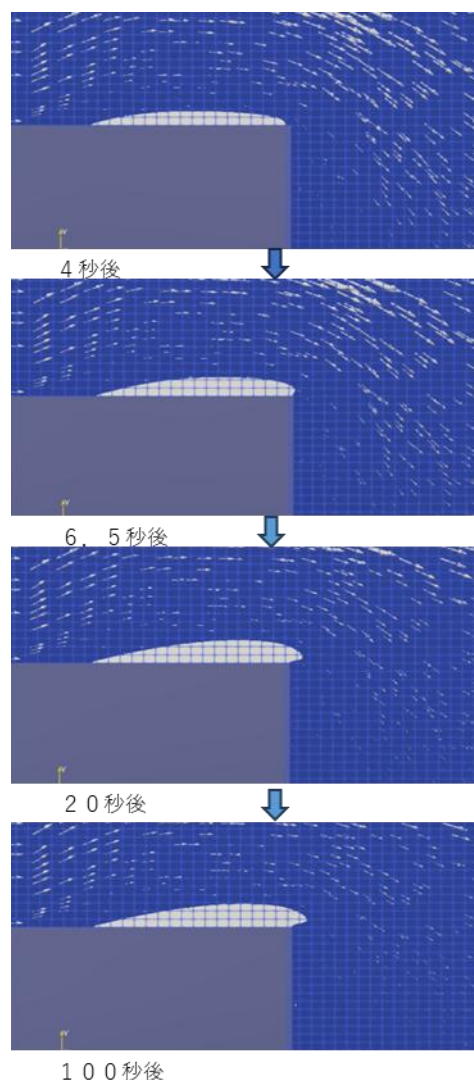


図5 計算結果—雪底の成長—

左の境界での風速 5 m/s 、流入体積分率は、地面から1 mまで、0.03。矢印は、風向風速、白色の部分が積雪。画面の格子間隔は20 cm。

3. 2 雪底ができる風速範囲

雪底ができる風速には範囲があることが知られている。内藤(1986)⁵⁾によれば、その範囲は $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ としている。そこで、数値計算で、入力風速を3, 4, 5, $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とかえて、計算を行った。安定形状の図を図6に示す。これによれば、やはり、 $4 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ が雪底の成長範囲となっており、過去文献を確認できた。

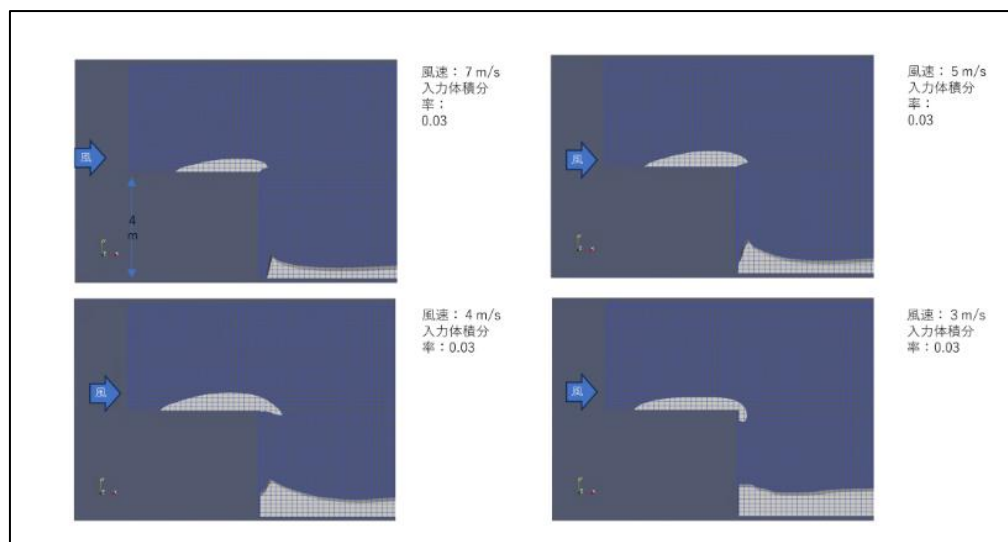


図6 風速を変えたときの雪庇の形状

4. 考察

数値計算において、風洞実験の「吹きだまりタイプ」の再現を試みた。形状に関しては、吹きだまりが風洞に比較して、厚かったものの、ほぼ再現できた。しかし、成長時間に大きな差がみられた。風洞実験では17分～56分で約20cmの長さに成長するのに対し、数値計算では1分位で安定形まで成長する。数値計算が粒子の沈着は考慮しているが、雪特有の変態に伴う圧密を考慮していないこと、雪粒子が雪面で静止するために必要な転動現象を組み込んでいないことなどが原因と考えられる。

また、数値計算では、形状が変化しない状態(安定状態)が現れたが、風洞においては確認されていないという相違が見られた。

5. まとめ

雪庇の数値計算手法の開発の中間報告である。driftFluxFoamを利用して、雪庇の数値計算を試みた。形状については過去にイセンコら(2012)に行った風洞実験の結果と似た結果を再現できたが、成長速度、密度に関しては、相違が見られた。今後は、雪の特性を顧慮した改良をする予定である。

【謝辞】

風洞実験のデータを提供いただきました齋藤佳彦様、イセンコエフゲーニー様、西田公平様に感謝します。

混相流ほかの論文の提供をいただきましたほか、内容につきまして、議論をいただきました西村浩一様に感謝します

OpenFOAMのdriftFluxFoamを利用させていただきました。感謝します。

【参考文献】

- 1) Seligman,G. et al.(1980)Snow structure and ski fields.I.G.S.pp555.
- 2) Amidu,A.M.,AbdulRaheem,K.K.,(2001) Numerical simulation of rectangular clarifier using drift-flux model in openFOAM. Research Square in print.
- 3) イセンコ・エフゲーニー, 齋藤佳彦, 根本征樹, 堤拓哉, 大槻政哉, 富永禎秀, 望月重人, (2012)雪庇近傍の気流状況: 雪庇形成への影響についての考察, 雪氷研究大会.
- 4) Nishimura,K. (1996) Viscosity of fluidized snow. Cold Regions Science and Technology, **24**, 117-127.
- 5) 内藤ほか(1986) 雪庇の発生に関する実験的研究. 低温科学, **44**,91-101.
- 6) Brito Melo,D.(2023)Snow transport in extreme environments:from small to large scale modeling.EPFL.pp130.