戸建住宅の屋根雪荷重分布の数値予測手法に関する基礎的研究

-CFD・熱収支解析に基づく予測モデルの構成と検証用実測-

_{主查} 富永禎秀*1 _{委員} 持田 灯*2,深澤 大輔*3,山崎 剛*4,堤 拓哉*5

本研究では、住宅の屋根雪の積雪深や風による偏分布を高い精度で予測できる数値シミュレーションシステムを開発す るための基礎的研究を行った。まずこれまでに筆者らが開発してきた CFD に基づく雪の飛散・堆積モデルを屋根雪分布の 予測に適用し、その課題を明らかにするとともに、今後の精度検証に有効な実測データを収集した。さらに風による雪の 飛散・堆積シミュレーションに雪面の熱収支解析を加えた総合的な積雪シミュレーションの手法を示した。また雪粒子の 影響による浮力効果と乱流エネルギーの減衰を表現するために、k と ε の輸送方程式に付加項を組み込んだ飛雪モデルを提 案し、実験や実測結果との比較により精度を検証した。

キーワード: 1)屋根雪, 2) CFD, 3)数値予測, 4)熱収支, 5)実測調査, 6)風洞実験

NUMERICAL PREDICTION OF SNOW DISTRIBUTION ON DETACHED HOUSES

- Development of Coupled Simulation of CFD and Heat Balance Model and its Validation based on Field Measurement -

Ch. Yoshihide Tominaga

Mem. Akashi Mochida, Daisuke Fukazawa, Takeshi Yamazaki, Takuya Tsutsumi

In this study, a basic investigation to develop a numerical simulation system to predict snow distribution on a detached house with high accuracy was conducted. Firstly, the CFD model of snow erosion and deposition had been developed by the authors who conducted their examinations by comparing the results of field measurement. The revised type k- ε model which included the buoyancy effects due to density difference and the influence of snow particles on turbulent flow field was developed. Prediction accuracy of the numerical results obtained by the new model is examined by comparing with results obtained by the previous model and field measurements.

1. はじめに

我が国の面積の半分以上を占める豪雪地帯はもちろん のこと、それ以外の地域においても、毎年、多種多様な 雪氷災害が発生している。特に「平成18年豪雪」にお いては、雪害による死者が戦後2番目となる152名に 達し、深刻な被害が生じたことは記憶に新しい。この死 者数のうち、屋根の雪下ろしや屋根からの落雪など住宅 の屋根雪処理に係わる事故で死亡した数の割合が、全体 の90%を超えており、住宅の屋根雪処理に係わる安全 対策が極めて重要であることを示している。

またこの死亡者の大半は高齢者である。豪雪地帯にお ける人口減少,高齢化は全国平均に比べて進行しており, 特別豪雪地帯において特に顕著であることを考えると, その対策の整備は急務である。さらには今後の社会構造 の変化や地球規模の気候変化に伴い,従来雪害が問題に ならなかった地域での雪害発生や新たな形態の雪氷災害 の発現も予想される。

年々,建築構造技術や除雪技術は向上しているにも係 わらずこのような大きな被害が発生する要因として,屋 根雪荷重を精度良く予測することの困難さが挙げられる。 本研究では,住宅の屋根雪の積雪深及び積雪密度分布 を高い精度で予測できる数値シミュレーションシステム を開発するための基礎的研究を行う。

2. 風の影響を考慮した屋根雪分布の CFD 解析及び検証 のための実測調査

2.1 目的

筆者らがこれまでに開発を進めてきた雪の飛散・体積 のCFDモデルを屋根雪に適用し,風によって起こる屋根雪 の偏分布を予測するモデルを作成し,その精度を検証す る。

2.2 解析概要

1) 解析の流れ

図2-1に解析のフローを示す。まず雪を考慮しない速度 場を求めるため、乱流モデルとしてDurbin型k-εモデル を用いた気流解析を行い、その結果を用いて雪の飛雪空 間密度の解析を行う。その解析結果から積雪面上での雪 粒子の質量収支を求め、最終的な積雪深分布を求める。な

* 新潟工科大学 教授	*2東北大学	教授	*3新潟工科大学	教授
*4東北大学 准教授	* ⁵ 北海道立1	上方建築総合研究所	斤 研究職員	

おパラペット解析では堆積過程を2段階に分け,流れに対 する積雪の影響を考慮した解析を行った。



2) 雪面変化量のモデル化^{文1)}

老川等の検討^{x 2)}を参考にして,雪面に接する CV にお いて三次元的に雪粒子の収支を考えた。CV 上面では, suspension による正味の流入量 $M_{top}[kg/s]$, CV 側面にお いては,正味の流入量(流入-流出) $M_{side}[kg/s]$ を与えた。 ここで M_{side} については,地表面付近における水平方向の 雪粒子の移動は saltation が卓越していると仮定し, saltation による輸送のみを考慮し, (2)式から評価した。

$M_{top} = \Phi_{sus} \left(w + w_f \right) \Delta x \Delta y$	(1)
$M_{side} = (\Phi_{sal}Q)_{in} - (\Phi_{sal}Q)_{out}$	(2)

sure ($sure)_m$ ($sure)_m$ ($sure)_m$) ここで、 $<\Phi$ sal>は Pomeroy $S^{\chi 3}$ の式を用いて、次式

で求めた.

$$\left\langle \Phi_{sal} \right\rangle = \frac{0.68\rho_a}{c\left\langle u_{\star s} \right\rangle gh} \left(\left\langle u_{\star s} \right\rangle^2 - \left\langle u_{\star l} \right\rangle^2 \right) \tag{3}$$

積雪深変化量 $\Delta z_s[m/s]$ は, (1),(2)の総和を正味の堆積量 M_{total} として,積雪密度 $\rho_s[kg/m^3]$ と CV の水平断面積 $\Delta x \Delta y[m^2]$ で除することで得た((5)式).

$$M_{total} = M_{top} + M_{side} \tag{4}$$

$$\Delta z_s = \frac{M_{total}}{\rho_s \Delta x \Delta y} \tag{5}$$

 $M_{total} < 0$ となった場合には,suspension 層に雪が舞い上げられたと考え, M_{total} を CV の体積 $\Delta x \Delta y \Delta z$ で除した 値を< Φ >の輸送方程式の発生項として加えた.

2.3 解析対象

1) 風洞内のパラペットを用いたCFD解析

堤らが行った自然雪を用いた建物屋上の吹きだまりに 関する風洞実験の結果を対象とした^{文4)}。モデルの概要を 図2-2に示す。高さは0.1,0.2mの2通り,幅は0.2mの2次元 形状である。流入風は風洞実験を参考にし,基準風速 7.5m/sの一様流とし,飛雪空間密度は実験の飛雪流量鉛 直分布に基づき鉛直分布を与えた。雪の密度は250kg/m³ とした。



2) 屋外屋根模型を対象とした実測及びCFD解析

実際の屋根面に形成される雪の飛散・堆積,風や日射の 影響により変化する過程の詳細なデータを得ることを目 的とし,長岡市のNニュータウン内の空き地に屋根模型を 設置した。モデルの概要を写真に示す。高さは1.5m,屋 根面の大きさは2.2×2.1mである。表2-1に実測項目を示 す。まとまった降雪のあった2008年1月13~15日の長岡の アメダス気象データから平均風速2.8m/s,平均風向を南 風と与えた。屋根の影響を受けない基準降雪深は0.16m とした。



写真 屋根モデル

表2-1 屋根モデルを用いた実測の測定項目

項目	方法	位置	間腐	
風速		Land Brank	1971117	
風向		地上高さ約2m		
日射量	気象ステーション		10分	
気温		地上高さ約1.5m		
基準降雪深	定担	模型の影響を受けない地上	94時期	
屋根上の積雪深	AE AR	屋根上16点	2464.001	
屋根上の雪密度	容積と重量	屋根上9点	1降雪	
融雪量	電子天秤	雨どいからタンクへ貯水	24時間	

2.4 結果及び考察

1) パラペットモデルを用いた解析

パラペットの高さが0.1,0.2m時のモデル周辺の風速ベ クトル分布を図2-3に示す。雪解析後では雪が堆積した ことによりベクトル分布が変化している。またパラペッ トの近くでは小さな循環流が生じている。図2-4にパラ ペット近傍の飛雪空間密度の分布を示す。上空よりも地 表面付近の密度が大きい。パラペットが高いと地表面の 密度も大きくなる。図2-5にパラペット近傍の積雪深分 布と風洞実験結果との比較を示す。高さ0.1m時の600秒 後の結果を比較すると,解析では最大で0.07mの積雪深 があり,実験と近い結果が得られた。積雪の形状もパラ ペットから離れるにつれて減少し,なだらかな斜面が形 成されており,実験の傾向を再現している。一方,高さ0.2 mの場合には、解析600秒後では、パラペットから離れる に従い実験結果に比べ積雪が少なめであるが、1200秒後 ではパラペットから0.3m付近の積雪深分布を概ね再現 している。しかし、それより風上側では、風洞実験よりも 3倍近い雪が堆積している。これは解析で与えた流入面 の飛雪空間密度が地表面付近で非常に大きいため、流入 面で雪が堆積し、実験とは異なる気流分布となったため と考えられる。



2) 屋根模型を用いたCFD解析

図2-6に実測調査とCFD解析の屋根上の積雪深分布の比較を示す。屋根面での最大降雪は0.16mでほぼ両者は一致しており,屋根中央の積雪深分布は比較的になだらかである。実測結果では,屋根の中心部の積雪深が多く,CFD解析では中心部よりもやや風上側に雪が多く堆積する分布となった。これは,実測結果には,風だけでなく日射等の融雪の影響も含まれているためと考えられる。



2.5 屋根雪分布の CFD 解析のまとめ

- 1)CFD による,気流と飛雪空間密度の解析結果から 屋 根上の積雪深分布を求める解析手法を示した。
- 2)パラペットを対象とした解析を行い,モデル近傍に形 成される積雪深分布の状況が既往の実験に概ね対応す ることを確認した。
- 3)屋根模型を対象とした解析では、屋根上で形成される 全体的な積雪形状の傾向や積雪深が再現された。雪の 飛散・堆積モデルのさらなる精緻化と日射等の熱的な 影響の取り扱いが課題である。

3. CFD と熱収支モデルを組み合わせた総合的積雪分布 シミュレーションモデルの構築

3.1 目的

本研究では、CFDを用いた雪の飛散,堆積シミュレー ションに雪面の熱収支解析を加え,風雪や日射の影響を 総合的に考慮した積雪分布のシミュレーション手法に関 する基礎的検討を行う。

3.2 数値解析の概要

1) 解析手法

解析のフローを図3-1に示す。降雪期間の気象条件に基づき、CFDに基づく気流解析及び風による雪の飛散・堆積の解析を行い、市街地内の積雪深分布を求める。解析モデルは2.2で示した通りである。この結果からは吹き溜まりの発生箇所とその量が得られる。さらに融雪期間の条件に基づき、雪面での熱収支解析を行うことにより、降雪と融雪を経た後の残雪量の分布を求めることができる。

また放射計算のメッシュはCFDと同じものを用いた。熱 収支モデルの詳細は文献5参照。顕熱,潜熱輸送,上向 き長波長放射,天空放射を含む雪面の熱収支バランスか ら余剰分が融雪に使われると仮定した。日影の判別を行 い,日向では雪面への短波長放射も考慮している。雪面 のアルベドは0.7を与えた。計算負荷の関係から建物と雪 面の長波長放射の授受は,本解析では考慮していないが, 筆者らは文献5において考慮した解析も行っている。



2) 解析対象

新潟県長岡市のNニュータウンの街区面積や一街区の 住宅棟数を調査し,その平均値を基に戸建て住宅モデル を作成した。モデルの概要を図3-2に示す。この街区が均 等に連続して配置されているものと考える。戸建てモデ ルでは東西軸,南北軸の2種類の方位を考え,住宅が数棟 単位で連続するテラスハウスモデル(以降THモデル)も2 タイプ検討した。全ケースで街区内のグロス建ぺい率は 等しく39.5%である。



(1) 戸建て住宅モデル







(3) テラスハウスTH(6棟)図3-2 対象住宅地モデル

3) 解析条件

降雪期間と融雪期間の解析条件は、1998~2000年の拡 張アメダス気象データ^{文6)}から代表的な降雪日と融雪日 を抽出し、表3-1のように設定した。

	風向	南南東	
nte surà des sols	風速	高さ6.5m で2.3m/s	
[64: 7] (41] (11]	降雪量	8 時間で 0,32m	
	飛雪空間密度	1.7×10 ⁻³ kg/m ³	
	國前	南南東	
融雪期間	風速, 気温	典型的な障害後の晴天日の	
	日射、湿度	時刻変動を2日間分計算	

表3-1	降雪期間	•	融雪	期間	の	解析	条	Ľ
------	------	---	----	----	---	----	---	---

3.3 解析結果

1) 風雪解析結果

図3-3に降雪期間後の積雪深分布を示す。全てのモデル の風上側建物の西側角部で吹き払いにより,大幅に積雪 深が減少している。最も吹き払いの影響が大きいのは戸 建てモデル(南北軸)であった。図3-5の降雪期間後の積雪 深を比較すると,戸建てモデルでは,南北軸配置の方が 積雪の最小値が低くなっているが,これは強い風によっ てより多くの吹き払いが生じたためである。THモデル間 では積雪深に大きな差は見られない。



2) 融雪期間後の積雪深分布

図3-4に融雪期間後の積雪深分布を示す。戸建てモデル では東西軸,南北軸ともに建物南側の敷地は融雪が進み, 積雪深の値が小さくなっているが,建物の北側は積雪の 減少はほとんど見られない。一方,THモデルでは,4棟の方 が南北方向の建物間で多く融雪し,積雪深の減少がみら れる。図3-5の融雪期間後の積雪深の平均値では,戸建て モデルの東西軸,南北軸ともに降雪日直後からの減少量 が同じであるが,THモデルでは,戸建てモデルより融雪が 進み,積雪深がより減少している。すべてのモデルの中で THモデル(4棟)が最も多く融雪されており,積雪深の平均 値も最小値も最も小さい。これはTHモデル(4棟)が最も隣 棟間隔が広く,日射による融雪エネルギーの影響をより 多く受けたためと考えられる。



図3-4 降雪期間後の積雪深分布(単位:m)



図 3-5 住戸配置形態による積雪深の違い

- 3.4 CFD と熱収支モデルを組み合わせた総合的積雪分布 シミュレーションモデルについてのまとめ
- 1)風による雪の飛散・堆積シミュレーションに雪面の熱 収支解析を加えた総合的な積雪シミュレーションの手 法を示した。本手法は原理的に屋根上にも全く同様に 適用可能である。
- 2)今回の解析では、風雪解析だけでは住宅配置の違いに よって街区内の積雪深に大きな差はみられなかったの に対して、融雪を考慮した解析では、テラスハウスモデ ル(4棟)が最も融雪量が大きく、積雪深が小さかった。 隣棟間隔を広くすることでより日射による融雪量が多 くなり、積雪を少なくできる可能性が示された。

4. 建物周辺等の非平衡流中の飛雪現象の風洞実験

4.1 目的

これまでの解析で用いてきた建物周辺の飛雪現象の CFD モデルでは、saltation のモデル化には Pomeroy 等の 経験式^{x3)}を用いてきた。しかし、この式は平衡状態に達 した流れ場における観測結果に基づいて与えられており、 流れの性状が局所的に大きく変化する建物周辺の非平衡 流れ場にこれを適用すれば様々な誤差が生じることが避 けられない。本研究では、非平衡流れ場において発達す る saltation 層の特徴量を測定する基礎的な風洞実験を 行った。

4.2 実験概要

実験は(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 新庄支所の低温風洞装置を使用した^{文7)}。風洞は密閉型回 流式で,測定部は長さ14[m],幅1.0[m],高さ1.0[m]で ある。風洞の床の幅80[cm],深さ2.0[cm]の溝に人工雪 を平らに敷き詰めた。実験時の風洞施設内の気温は -10[°C]とした。本実験では防災科研新庄支所に保管され ているしまり雪を用いた。雪は実験開始前にクラッシャ ーで砕き,さらに網目の幅が1.0[mm]のふるいを用いて 風洞床に敷き詰めた。図4-1に実験の概要を示す。

本実験は loose な雪面上の飛雪現象を対象とした。測 定洞の風上側 1.0[m]は hard な雪面とし,残りの 13[m]は loose な雪を敷き詰め,非平衡状態の saltation 層を作成し た。なお loose な雪面とは,新雪のような柔らかい(粒子



図 4-1 実験概要

間結合がほとんど無い)雪を敷いた雪面のことで、風によ り雪粒子が飛び saltation が発生する。hard な雪面とは, loose な雪面に 0[℃]の水を噴き付け凍らせた雪面のこと で、雪面からの侵食による saltation が発生しない。雪面 を hard から loose に切り替えた位置を x=0[m]とし, loose な雪面上で飛雪流量と風速の鉛直分布を測定した。なお 測定位置は主流方向に x=1.0, 3.0, 6.0, 9.0, 11.5[m]の5 測線上で、それぞれ鉛直方向に z=0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.12, 0.20, 0.40[m]の7点で風速と飛雪流量の鉛直分布 を測定した。また、風速のみ x=0[m](流入面)の鉛直分布 も測定した。飛雪流量の測定には Snow Particle Counter(SPC)を用いた^{文 8),9)}。風速の測定には三次元超音 波風速計を用いた。プローブ幅は 3.0[cm] である。ただし, 超音波風速計の大きさの都合上,雪面上から 0.02[m]の高 さのみピトー管を用いて測定した。流入面の z=0.40[m] における設定風速 <u/>
を 5.0[m/s](Exp.1) と 7.0[m/s](Exp.2)の2段階に変化させた。

4.3 実験結果

1) 飛雪流量の空間分布の変化による風速への影響

図 4-2 に Exp.2 ($<u_0>=7.0$ [m/s])における z=0.02[m]にお ける飛雪流量[kg/m²s]と無次元風速 $<u>/<u_R>$ [-]の主流方 向の分布を示す。風速値は各測線における上空 z=0.40[m] の参照風速 $<u_R>$ [m/s]で無次元化した。比較のために hard な雪面上での佐藤等の既往の風洞実験結果^{x 10)}の無次元 風速も併せて示す。飛雪流量は x=1.0[m]から x=3.0[m]に かけて 10 倍程増加し, x=3.0[m]より下流ではほぼ一定と なった。飛雪流量が増加した x=3.0[m]より下流では loose な雪面上の方が hard な雪面上よりも風速が小さくなっ ている。すなわち、雪面付近を移動する雪粒子の存在に よって雪面付近における風速が低下している。



2) シアストレスの分布の変化

Exp.2(< u_0 >=7.0[m/s])の無次元シアストレス < $u'w'>/<u_R>^2$ [-]の鉛直分布を図4-3に示す。風速の時間 変動の波形を見ると全体的に長周期の変動があった。そ こで、風速の時間変動波形に対して数値的に high-pass filter を掛けて、0.3[Hz]以下の低周波数の変動成分をカ ットし、乱流エネルギーやシアストレスの各成分を求め た。シアストレスは負値を示すが、雪面付近で上流から 下流に向かうに従い、絶対値が増加している。すなわち、 運動量が下向きにより多く輸送されている。



3) 吹雪輸送量の測定結果

図 4-4 に吹雪輸送量<*Qsal*>[kg/ms]の主流方向の分布を 示す。吹雪輸送量は飛雪流量の測定値を鉛直方向に積分 して求めた。Exp.1(<*u*₀>=5.0[m/s])では、下流に向かうに 従って、吹雪輸送量は徐々に増加しているが、 Exp.2(<*u*₀>=7.0[m/s])では,*x*=1.0~3.0[m]にかけて吹雪輸送 量が急増し、*x*=6.0[m]で一度減少した後、*x*=9.0[m]で再度 上昇している。

次に,平衡状態の吹雪境界層に対して提案された Pomeroy等の経験式^{x3)}((6)式)から得られた吹雪輸送量の 予測値と測定値を比較する。

$$\langle Q_{sal} \rangle = \frac{0.68 \rho_a \langle u_l^* \rangle}{\langle u_s^* \rangle g} \left(\langle u_s^* \rangle^2 - \langle u_l^* \rangle^2 \right)$$
(6)

ただし、<u*s>は雪面上の摩擦速度[m/s]、<u*Pは限界摩 擦速度 (=0.21)[m/s], ρ_a は空気密度[kg/m³], gは重力加速 度[m/s²]である。以下では(6)式から< Q_{sal} >を求めるのに 必要なパラメータの推定法について述べる。河村[×]¹¹)は 飛砂の質量フラックスが高さとともに指数関数的に減少 することを示している。竹内等^{×12})は河村の理論を飛雪 現象に適用し、飛雪流量の鉛直分布が指数分布からそれ る高さを saltation 層の高さ h_s [m]と定義した。これらの研 究に従い、飛雪流量の鉛直分布から saltation 層高さ h_s [m] を見積もると、Exp.2 の x=11.5[m]における h_s は 0.04[m] 程度と推定された。Saltation 層の高さ付近で風速の鉛直 分布は変化するが、saltation 層内の風速分布もその上方 とは別の粗度長と摩擦速度で表現されると仮定し^{×13)}, i) 雪面の粗度長 z_0 , ii)saltation 層中を移動する雪粒子の空 気抵抗に対応する仮想の粗度長 z'_0 の2つの粗度長を定義 する^{x 14)}。これに対応して、摩擦速度も雪面の摩擦速度 $<u^*s>[m/s]と saltation 層の摩擦速度<math><u^*>[m/s]を考えると,$ $z_0 < <u^*s>$ は(7)式、 $z'_0 < <u^*>$ は(8)式でそれぞれ関係付け られる。

$\frac{\langle u(z)\rangle}{\langle u_{s}^{*}\rangle} = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{z}{z_{0}}\right)$	(7)
$\frac{\langle u(z)\rangle}{\langle u^*\rangle} = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{z}{z'_0}\right)$	(8)

(7)式から, Exp.1 及び Exp.2 の雪面の摩擦速度を求める とそれぞれ<u*s>=0.24, 0.34[m/s]であった。境界層が十 分に発達した x=11.5[m] における z=0.02, 0.04[m]の風速 鉛直分布から求めた雪面の粗度長z₀の値と雪面に最も近 い z=0.02[m]における風速<u>[m/s]を(7)式に代入して <u*s>[m/s]を求めた。これらの<u*s>を(6)式に代入して得 られる<Qsal>の予測値が図 4-4 中の横軸に平行な 2 本の 実線である。



図 4-4 吹雪輸送量の主流方向の分布

4) 吹雪輸送量の無次元化の方法の検討

次に, saltation 層発達過程の吹雪輸送量とその吹走距 離について普遍的な関係を導くために、諸量の無次元化 方法について検討する。図 4-4 中の吹走距離 x[m]は、そ れぞれの測定点における参照風速<u>>[m/s](z=0.40[m]の 平均風速)及び空気の分子動粘性係数u/m²/s]で無次元化 した((9)式)。一方、<Qsal>はそれぞれの測定点における saltation 層に働く抗力と限界摩擦応力の差($\rho_a < u^* > 2 - u^*$) $\rho_a < u^* >^2$)[N/m²]及び雪粒子の緩和時間 $t^* (= D_s^2 \cdot \rho_i / 18\mu)$ [s] で無次元化した((10)式)。 (8)式で与えられる<u*>から得 た摩擦応力($\rho_a < u^* > 2[N/m^2]$)は saltation 層に加わる抗力と も考えることができる。Saltation 層の粗度長 z'_{o} は, h_s=0.04[m]より上部の風速鉛直分布を用いて算出した。t* の算出に用いる雪粒子の粒径 D_xは x=11.5[m]の saltation 層内の測定点 z=0.02, 0.04[m]における粒径の平均値 150[µm]を用いた。Saltation 粒子は雪面との度重なる衝突 により結晶構造は破壊され、その形状が十分球に近いも のと仮定した。また、 $\rho_i[kg/m^3]$ は氷の密度である。

$$\operatorname{Re}_{x} = \frac{x \cdot \langle u_{R} \rangle}{v} \tag{9}$$

$$\langle Q_{sal} \rangle^* = \frac{\langle Q_{sal} \rangle}{\left(\rho_a \langle u^* \rangle^2 - \rho_a \langle u^{*}_I \rangle^2\right) \cdot \iota^*}$$
(10)

図 4-5 に無次元化された吹雪輸送量<*Qsal*>*[-]と吹走 距離 *Re_x*[-]の関係を示す。上述した無次元化により,吹 走距離と吹雪輸送量の関係は一元的に表現することがで きた。<*Qsal*>*は *Re_x*と共に増加し, *Re_x*=5.0×10⁶[-]近辺で 平 衡 状 態 (≈ 0.1[-]) に 近 づ い て い る 。 風 上 側 の *Re_x*=1.0×10⁶[-]近辺では Pomeroyの式を用いると吹雪輸送 量を 10 倍程度過大評価してしまう。



(8) 式 で 与 え ら れ る $<u^{*>}$ か ら 得 た 摩 擦 応 力 ($\rho_a < u^{*>^2}$ [N/m²])は saltation 層に加わる抗力とも考えるこ とができる。Saltation 層の粗度長 z'_0 は、 $h_s=0.04$ [m]より 上部の風速鉛直分布を用いて算出した。

4.4 非平衡流中の飛雪現象の風洞実験のまとめ

- Saltation 発達過程の境界層流中において saltation 層が 発生し、飛雪流量が増加すると、雪面付近の風速が低 下する。
- 2) 同時に,雪面付近のシアストレスが下流に行くほど絶 対値が増加する。
- 3) Saltation 層が発達する吹雪境界層における吹走距離と 吹雪輸送量の関係を, saltation 層に働く抗力と限界摩擦 応力の差等を用いた無次元化により,一元的に表現す ることができた。

5. 雪粒子による浮力効果と乱れの消費機構を組み込ん だ新たな飛雪モデルの提案

5.1 モデル概要

雪粒子による浮力と乱れの消費の影響を付加した基礎 方程式を表 5-1 に示す。ここで、<>はアンサンブル平均 を、 ρ_a 、 ρ_s は、各々、空気密度と雪粒子の密度を表して いる。下線部 A は空気と雪粒子の混合気体の密度差によ る浮力効果の影響を表現している。ここで< $u_3'\Phi'$ >は表 5-2 中の(20)、(21)式に示すように、勾配拡散近似に浮力 の影響を加味したモデル^{×11)}を用いた。× ここで ε 方程式 の付加中の係数 C_{e3} は、 G_k >0(不安定時): $C_{e3} = C_{e1} = 1.44$ 、 G_k <0(安定時): $C_{e3} = 0.0$ とした^{×12)}。下線部 B は雪粒子の侵 食や跳躍、浮遊により乱流エネルギーが消費される影響 ^{は3)}を表現した。このモデルは Naaim 等^{×13)}の検討を参考 にして与え, 表 5-1 に示すように k の輸送方程式の付加 項 $S_k \varepsilon k$, < Φ >, 緩和時間 $t^* \varepsilon$ 用いて定義し((16)式), こ れを乱れのタイムスケール k/ε で除して, ε の輸送方程式 中の付加項 $S_c \varepsilon$ 与えた((17)式)。 f_s は減衰関数であり, C_{ks} , C_{ss} , A_s 及び α (>0)はモデル係数である。 S_k および S_c 中の モデル係数 C_{ks} , C_{ss} , A_s , α は事前に行ったパラメトリッ クスタディの結果から, 表 5-2 に示す値に定めた^{χ 14})。 雪粒子の緩和時間 t^* の算出に必要な雪粒子の粒径 D_s [m] には, 風洞実験の x=11.5[m]の saltation 層内の測定点の z=0.02[m]における雪粒子の粒径の平均値 150[μ m]を用い た。

表 5-1 流れの基礎方程式

運動方程式	
$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_i) \left\{ \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right\} \right] - g \frac{\rho_i - \rho_a}{\rho_i \rho_a} \langle \Phi \rangle \delta_{ij}$	a (11)
kの輸送方程式	
$\frac{\partial k}{\partial t} + \left\langle u_j \right\rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + \frac{G_k}{A} - \varepsilon + \frac{S_k}{B}$	(12)
<u>εの輸送方程式</u>	
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \left\langle u_{j} \right\rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\frac{v_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{\varepsilon 1} P_{k} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + \frac{C_{\varepsilon 3} G_{k}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) + S_{\varepsilon}_{B}$	(13)
$P_{k} = v_{l} \left(\frac{\partial \langle u_{i} \rangle}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \langle u_{j} \rangle}{\partial x_{i}} \right) \frac{\partial \langle u_{i} \rangle}{\partial x_{j}} (14) \qquad G_{k} = -g \frac{\rho_{i} - \rho_{a}}{\rho_{i} \rho_{a}} \langle u_{i}^{\prime} \Phi^{\prime} \rangle \delta_{i3}$	(15)
雪粒子による kの減衰項	
$S_{k} = -C_{ks}f_{s}\frac{k}{\rho_{i}t^{*}}\langle\Phi\rangle \qquad (16) \qquad S_{\varepsilon} = -C_{\varepsilon s}f_{s}\frac{\varepsilon}{\rho_{i}t^{*}}\langle\Phi\rangle$	(17)
$f_s = \left[1 - exp \left\{ -\frac{t^*}{A_s(k_{\ell})} \right\}^{\alpha} \right] (18) t^* = \frac{D_s^2 \rho_i}{18\mu}$	(19)

表 5-2 検討 Case

	浮力の取り扱い	S _k 及びS,
Case 1	A 項なし	なし
Case 2-1	A 項あり: <w'φ'>の評価は勾配拡散近似に浮 力の影響を加味^{×11)}</w'φ'>	なし
Case 2-2	$ \langle w'\Phi' \rangle = -\frac{v_{t}}{\sigma_{s}} \cdot \frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial x_{3}} - \frac{k}{\varepsilon} C_{s3} g \frac{\rho_{t} - \rho_{a}}{\rho_{t} \rho_{a}} \langle \Phi'^{2} \rangle (20) $ $ \langle \Phi'^{2} \rangle = \frac{k}{\varepsilon} C_{s4} \frac{v_{t}}{\sigma_{s}} \left(\frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial x_{3}} \right)^{2} $ $ (21) $ $ C_{s3} = 0.25 C_{s4} = 1.6 $	$ \begin{array}{l} $

表 5-3 解析条件

解析領域	$13(x_1) \times 10(x_3)$ [m]
メッシュ分割	$127(x_1) \times 57(x_3)$
	<ui>:実験値を使用した</ui>
流入境界	<u2>=<u3>=0 とした</u3></u2>
	k: 実験値を使用した
	ε :局所平衡の仮定($P_k = \epsilon$)より与えた
側面·上空境界	slip 壁とした
流出境界	諸量に関して法線方向の勾配をゼロとした
地表面境界	ニ₀型の対数則を用いた(ニ₀=3.0×10 ⁻⁵ [m])
移流項スキーム	全輸送方程式の移流項に Quick を使用した
時間スキーム	一次精度後退差分を使用した

表 5-4 飛雪空間密度<Φ>の解析条件

流入境界	流入なしとした
上空·側面境界	Slip 壁とした
地表面·雪面境界	法線方向の勾配をゼロとした
建物壁面境界	法線方向の勾配をゼロとした
移流項スキーム	Quick を使用した
時間スキーム	一次精度後退差分を使用した

5.2 解析概要

表 5-2 に検討 Case を示す。また,解析条件を表 5-3, 表 5-4 に示す。本解析では飛雪空間密度<Φ>の輸送方程 式は解かず,<Φ>の分布を実験結果から図 5-1 のように 与えた。すなわち前節の風洞実験において得られた<Φ> の鉛直分布を水平方向には線形に,鉛直方向には指数分 布に従うように補間して<Φ>の空間分布を推定した。



5.3 解析結果

1) 浮力効果の組み込みの影響(Case1 と Case2-1)

図 5-2 に境界層が十分に発達した *x*=11.5[m]における *k* [m²/s²]の鉛直分布を示す。付加項を組み込んだ Case2-1 の値は, Case1 より小さくなったが, 差はわずかである。





 2) 雪粒子により k が消費される機構の組み込みの影響 (Case2-1 と Case2-2)

図 5-3 に平均風速と乱流エネルギーkの分布を示す。k の輸送方程式に付加項を組み込んだ Case2-2 の方が kの 分布が実験結果に近づいている。なおくいはモデルの組み 込み前後で大きな変化は無く, 概ね実験結果と対応して いる(図 5-3(1))。



5.4 saltation 層の発達過程の非平衡流れ場に適用可能な 飛雪モデルの提案

1) 飛雪空間密度の輸送方程式

本モデルでは, (22)式に示す飛雪空間密度< Φ >の輸送方 程式を suspension 層と saltation 層を区別することなく解 く(ここでは σ_s =1.0[-])。

$$\frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \Phi \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \Phi \rangle \langle w_j \rangle}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_i}{\sigma_s} \left(\frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial x_j} \right) \right]$$
(22)

この考えは saltation 層の雪粒子の平均移動速度の雪面に 平行な成分と風速の水平方向成分が等しいという仮定に 基づく。雪面上の雪粒子の落下速度 $\langle w_{\rho} \rangle$ [m/s]は有限値と して定義する(風速は 0)。従って,流体側から雪面へ単 位時間・単位面積あたり $\langle w_{\rho} \rangle \langle \Phi_{\rho} \rangle$ [kg/m²s]の雪が堆積す る。ここで $\langle \Phi_{\rho} \rangle$ は雪面第一セルの $\langle \Phi \rangle$ である。

雪面に接した Control Volume(以下 CV)底面における堆 積量 M_{dep} [kg/s]は, CVの水平断面積 $\Delta x \Delta y$ [m²]を用いて(23) 式から与えられる。

$$M_{dep} = -\left\langle \Phi_{p} \right\rangle \left\langle w_{f} \right\rangle \Delta x \Delta y \tag{23}$$

CV 内の雪面における摩擦応力による雪面からの侵食量 $M_{ero}[kg/s]$ は Anderson 等^{χ 15)}と Shao χ ¹⁶⁾に提案された saltation 粒子に関する運動量保存則に従って(14)式で与 える。

$$M_{ero} = -\frac{\pi \zeta}{6} \rho_i \langle u^*_s \rangle \left(1 - \frac{\langle u^*_t \rangle^2}{\langle u^*_s \rangle^2} \right) \Delta x \Delta y$$
(24)

但し、<u*,>:限界摩擦速度[m/s]、<u*,>:雪面の摩擦速度 [m/s]

これらの総和を正味の堆積量 M_{total} [kg/s]と定義する((25) 式)。積雪深の変化量 Δz_s [m/s]は M_{total} の値を雪粒子の密度 ρ_s [kg/m³]と水平断面積 $\Delta x \Delta y$ [m²]で除し, (26)式から与え る。

$$M_{total} = M_{dep} + M_{ero}$$
(25)

$$\Delta z_s = \frac{M_{total}}{\rho_s \Delta x \Delta y} \tag{26}$$

さらに侵食が生じるときは(<u*,>>><u*,>), <Φ>の輸送方 程式の雪面の境界条件を(27)式で与える。

$$-\frac{v_t}{\sigma_s} \left(\frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial z} \right) \bigg|_{surface} = \frac{\left| \mathcal{M}_{ero} \right|}{\Delta x \Delta y}$$

2) 新しいモデルによる飛雪流量の予測

前節で示した風洞実験結果と比較し、新たなモデルの 精度を検討した。前節同様、解析条件は表 5-3、表 5-4 のように与えた。雪粒子の物性に係わるパラメータは表 5-5に示すように実験結果や既往の研究結果^{×0}によって 与えた。〈 $u_3'\Phi'$ 〉は表 5-2中の(20)、(21)式により与えた。 流れ場が定常状態に達した後、雪面から雪の飛散がある 非定常解析を行った。図 5-4に飛雪流量の鉛直分布の主 流方向の変化を示す。下流の x=6.0[m]と11.5[m]では解 析結果は実験結果とよく対応する。また、雪面付近の分 布は x=1.0[m]を除いて実験結果とよく一致しているが、 x=1.0[m]と 3.0[m]の上空では飛雪流量を過小評価して いる。これは、ここで用いた $k-\varepsilon$ モデルが〈 Φ 〉の乱流拡 散を過小評価したものと考えられる。

雪粒子の落下速度 <w></w>	0.2[m/s]	積雪密度ps	361.3 [kg/m ³]
雪の粒子径 Ds	1.5×10 ⁻⁴ [m]	雪面の粗度長 <i>こ</i> 0	3.0×10 ⁻⁵ [m]
限界摩擦速度 <u*,></u*,>	0.21[m/s]		

表 5-5 雪粒子の物性に係わるパラメータ



5.5 新たな飛雪モデルの提案についてのまとめ

 雪粒子の影響による浮力効果と乱流エネルギーの減 衰を表現するために、kと cの輸送方程式に付加項を組 み込んだ。

2)さらに,saltation 発達過程の非平衡流れ場に適用可能な 新たな飛雪モデルを提案した。新しい飛雪モデルによ る飛雪流量の予測結果は雪面付近の下流部において実 験結果とよく対応した。

6. 立方体建物モデル周辺の飛雪観測との比較に基づく 予測モデルの検証

6.1 はじめに

今回提案した新しい飛雪モデルを,より複雑な建物モ デル周辺の雪の飛散・堆積現象に適用し,既往の屋外観 測結果と比較する。

6.2 解析の概要

1) 解析対象

既報^{文1)}で解析を行った,老川等^{文17)}によって詳細な観

測結果が報告されている立方体建物モデル周辺の雪の飛 散・堆積を対象とする。立方体の一辺の長さは H=1.0[m] であり,建物高さの流入平均風速<uH>を5.0[m/s]とした。 なお諸量は H と<uH>で無次元化されている。ただし積 雪深は基準積雪深 D[m]を用いて無次元化している。基準 積雪深とは、建物による流れの変化を受けない解析領域 最後方の積雪深である。また飛雪空間密度[kg/m³]は、積 雪密度 ρ_{s} [kg/m³]を用いて無次元化した。

2) 解析ケース

(27)

表 6-1 に検討ケースを示す。限界摩擦速度<u*t>と流 入面の<Φ>をパラメータとして変更した3ケースの解析 を行った。各ケースの流入面の<Φ>の分布を図 6-1 に示 す。



図 6-1 流入面の<Φ>の分布

3) 解析条件

乱流モデルは Durbin 型の改良 k- ϵ モデルを使用. 解析 領域及び各種の境界条件は既報^{x1}と同じである. 飛雪空 間密度< Φ >に関する解析条件を表 6-2 に示す. 雪の物性 に係わるパラメータは,対象とする実測結果^{x17}及び前 報で示した実験等を参考にして表 6-3 のように与えた. まず雪のない定常流れ場の解析を行い,流れ場が安定し た後,その結果を初期条件とし雪の飛散・堆積の非定常 解析を行った. 雪の解析を始めた時刻を t*=0 とし (t* は H と<uH>で定義される無次元時間), t*=100 まで計 算を行った結果を示す.

表 6-1 検討ケース

	流入面の<Φ> [kg/m³]	限界摩擦速度 <i><u*,></u*,></i> [m/s]		
Case C-1	0.05	0.21		
Case C-2	0.05	0.15		
Case C-3	Saltation を考慮(上空 で 0.05 ; 図 6-1 参照)	0.15 ⁽²¹		

表 6-2 飛雪空間密度 < Φ>の解析条件

流入境界	表6-1参照
側面境界	Slip 壁
上空境界	流入面上空部の値を用いる
地表面·雪面境界	法線方向の勾配をゼロ
建物壁面境界	法線方向の勾配をゼロ
移流項スキーム	QUICK スキーム
時間スキーム	一次精度後退差分

雪粒子の落下 速度 <w<sub>f></w<sub>	0.2[m/s]	積雪密度ps	361.3[kg/m ³]
限界摩擦速度 <u*<sub>i></u*<sub>	表6-1参照	雪面の粗度長 _{Z0}	3.0×10 ⁻⁵ [m]

表 6-3 雪粒子の物性に係わるパラメータ

6.3 解析結果及び考察

1) 限界摩擦速度<u*.>の違いが積雪深に及ぼす影響

図 6-2 に Case C-1 と C-2 の t*=100 における積雪深比 の水平分布を示す。なお Case C-2 の場合は,建物周辺で しか積雪が見られず基準積雪深が 0[m]になるため,流入 面の< Φ >と境界条件から仮想的に定まる積雪深(t<wp> $<\Phi$ >/ ρ_s)で無次元化している。Case C-1 の結果は,限界摩擦 速度が 0.21[m/s]と大きいため,雪の吹き払いは建物風上 角のはく離域でのみで発生し,その風下側にわずかに堆 積が見られる。これに対し Case C-2 では,広い領域で雪 面の摩擦速度が限界摩擦速度 0.15[m/s]より大きくなるた め,建物の影響で風速の弱まる風上側と風下側以外の領 域の雪はすべて浸食により吹き払われている。



(1) Case C-1(<u*t≥=0.21)
 (2) Case C-2(<u*t≥=0.15)
 図 6-2 限界摩擦速度<u*t≥の違いによる積雪深比の比較

この結果から< Φ >の流入境界条件について以下のよう な結論が得られる。Case C-1 のように流入面での摩擦速 度より限界摩擦速度が大きい場合は、saltation が発生し ないので、流入面では< Φ >を高さ方向に一定で与えるべ きである。一方、Case C-2 のように流入面での摩擦速度 より限界摩擦速度が小さい場合は、saltation が発生する. 従って本解析のように saltation と suspension を区別せず に< Φ >の輸送方程式を解く際には、< Φ >の流入境界条件 として雪面付近で大きくなる saltation の影響を考慮した 分布を与えないと、Case C-2 の結果に見られるように流 入する飛雪空間密度が小さすぎ、積雪性状を正しく評価 できない可能性がある.

2)既往の解析結果及び屋外観測結果との比較による新しい飛雪モデルの評価

限界摩擦速度 0.15[m/s]で流入面での<Φ>に saltation の 影響を考慮した分布(図 6-1)を与えた解析(Case C-3) の積雪深比の予測結果を,既報^{×1)}の解析結果と屋外観測 結果^{×17)}と比較して図 6-3 に示す。既報の解析結果で問 題となっていた建物風上側の吹き払い域の外側や建物側 方領域の大きな吹き溜まりは解消され,吹き払い域や建 物前方の吹き溜まりの大きさや位置が観測結果に大きく 近づいた。建物前面に接する領域をみると、観測では積 雪が吹き払いによって積雪が全く無いのに対して、本解 析では堆積がみられる。本解析では雪面からの雪の侵食 を水平摩擦応力による寄与しか考慮していないが、建物 前方のような吹き下ろしが大きい領域においては、 impinging flow による浸食への寄与も考えられる。



2.0

図 6-4 に建物中心軸上の積雪深比の比較を示す。既報の解析結果に見られた建物周辺の過大なピークは観察されず,全体的な分布の傾向は,観測結果とよく一致している。既報の結果に見られる過大なピークは,本来非平衡状態である建物周辺の流れ場に,平衡状態を前提とした Pomeroy らのモデル式^{x3)}を適用していたことに起因すると考えられる。

6.4 新たな飛雪モデルのまとめ

新しい飛雪モデルを用いた建物周辺の積雪深の予測結 果は,既報の解析結果で見られた建物周辺の過大なピー クが解消され,屋外観測結果の吹き溜まりや吹き払いの 分布の傾向をよく再現した。

7. 研究全体のまとめ

住宅の屋根雪の積雪深及び積雪密度分布を高い精度で 予測できる数値シミュレーションシステムを開発するた めの基礎的研究を行う。具体的な成果としては以下のこ とが挙げられる。

- これまでに筆者らが開発してきた CFD に基づく雪の 飛散・堆積モデルを屋根雪分布の予測に適用し、その 課題を明らかにするとともに、今後の精度検証に有効 な実測データを収集した。
- 2)風による雪の飛散・堆積シミュレーションに雪面の 熱収支解析を加えた総合的な積雪シミュレーションの 手法を示した。
- 3)雪粒子の影響による浮力効果と乱流エネルギーの減 衰を表現するために、 κと ε の輸送方程式に付加項を 組み込んだ飛雪モデルを提案し、実験や実測結果との 比較により精度を検証した。
- 4)今後は、この新しい飛雪モデルを熱収支モデルと組み合わせた総合的な屋根雪シミュレーションモデルを 構築し、さらなる予測精度の向上を目指す所存である。

<参考文献>

- 富永,持田,吉野,志田,大風:CFD による建物周辺の雪の吹きだまりの数値予測に関する研究 地表面の雪の飛散・ 堆積のモデル化に関する検討,第19回数値流体力学シンポジ ウム C1-6, 2005.12
- 2) 老川,苫米地:モデル建物近傍における雪の堆積と浸食の形成 プロセス,雪氷,65 巻,3 号,207-218,2003.5
- 3) Pomeroy, J. W., and Gray, D, M. : Saltation of snow, Water Resource Research, Vol.26, No.7, pp1583-1594, 1990.7
- 4) 堤拓哉,高倉政寛,高橋章弘,苫米地司:自然雪を用いた建物屋 上の吹きだまりに関する風洞実験,第 22 回雪工学大 会,75-76,2005.9
- 5) Akashi Mochida, Yoshihide Tominaga, Hiroshi Yoshino, Kiyoshi Sasaki, Makio Ohba, Numerical Study on Thermal Effects of Cold and High-albedo Surfaces Coverd with Snow in Outdoor

Environments, Journal of Asian Architecture and Building Enginerring, 175-182, 2002.3

- 6) 日本建築学会, 拡張アメダス気象データ 1981-2000,2005
- Sato, T., Kosugi, K and Sato, A.: Saltation-layer structure of drifing snow observed in wind tunnel, Annals of Glaciology, 32, pp203-208, 2001
- 8) 木村,丸山,石丸:第9回寒地技術シンポジウム,pp665-670, 1993
- 9) 佐藤,望月,小杉,根本:スノー・パーティクル・カウンター(SPC) による飛雪流量測定に及ぼす飛雪粒子の形状の影響、雪氷,67巻6号,pp493-503,2005.11
- 10) 佐藤,小杉,佐藤:第15回寒地技術シンポジウム,pp50-54, 1999.11
- 野口,村上,持田,富永:都市の温熱環境の数値シミュレーション(その3) k-&モデルの流熱フラックスの評価への浮力効果への組み込み、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、 pp65-66,1994.9
- 12) Viollet P. : The Modeling Turbulent Recirculating Flow for The Purpose of Reactor Thermal-Hydraulic Analysis, Nuclear Engineering and Design, Vol.99, 1987
- 13) Naaim, M., Naaim-Bouvet, F. and Martinez, H. : Numerical Simulation of drifting snow: erosion and deposition model, Annals of Glaciology, 26, pp191-196, 1998
- 14) Okaze et al. : 6th Snow Engineering Conference, Whistler B.C., Canada, June 1-5, 2008
- 15) Anderson, R. S. and Haff, P. K. : Simulation of eolian saltation, Science, vol.241, pp820-823, 1988
- 16) Shao, Y. and A. Li. : Numerical modelling of saltation in the atmospheric surface layer, Boundary-Layer Meteorology 91, pp199-225, 1999
- 17) 老川, 苫米地, 石原: モデル建物近傍における積雪深の日 別観測, 日本雪工学会誌, Vol.15, pp283-291, 1999.10

<研究協力者>

大風翼	東北大学大学院生(当時	导)
志田貴之	新潟工科大学大学院生	(当時)

- 井村沙哉子 新潟工科大学学部生(当時)
- 金子優太 新潟工科大学学部生(当時)