

一般財団法人新潟県建設技術センター研究助成事業

報告書

**建築・都市における
積雪偏分布の数値シミュレーションの
社会実装に向けた開発・検証**

2024年3月

新潟工科大学 富永禎秀

1. 研究の背景

新潟県では毎年、多種多様な雪氷災害が発生している。特に近年、平均的な降雪量自体は減少傾向であるにもかかわらず、雪害による死者・行方不明者数は増加している。死者数の中では屋根の雪下ろしや屋根からの落雪、除雪中の事故などの割合が極めて多い。さらには地球規模の気候変化に伴い、短期集中型の大雪の増加が指摘されており、雪害の形態は今後も変化していくものと予想される。従って都市・建築における雪害を減少させるためには、屋根からの転落防止などの短期的な事故対策だけでなく、事故につながる要因を事前に効果的に取り除く、すなわち建築や都市の設計段階において、建物周辺の積雪量（積雪深や雪荷重）を最小化したり、事前に危険箇所を予測し、それを回避するような対策が重要である。そのような検討を行うためには、雪氷物理に基づく数値シミュレーションが極めて有効であると考えられるが、現状では基礎的な研究は蓄積されているものの、社会実装に向けては解決すべき課題も多い。それらの課題を抽出し、社会実装を加速する必要がある。

2. 研究目的

申請者のこれまでの研究で確立した建築物屋根上や周辺における積雪の不均一分布を定量的に予測・評価可能な CFD（Computational Fluid Dynamics）や熱収支解析等の雪氷物理モデリングに基づくシミュレーションを基礎として、実在の都市・建築を対象とした複雑な形状における積雪分布を正確に予測・評価するシステムを構築する。そして、その有効性を新潟県内における実在の都市・建築を対象に検証する。

社会実装に向けての大きな課題の一つは、具体的な都市や建築物の形状をどのように正確にモデルとして取り込むかである。そのための解決策として、PLATEAU（国土交通省が主導する、日本全国の 3D 都市モデルの整備・活用・オープンデータ化プロジェクト）に代表されるような 3D 都市モデルと積雪分布シミュレーションモデルを融合することを目指す。これによって非専門家にも分かりやすい形でシミュレーション結果を共有することができ、その有効性は飛躍的に高まると予想される。

3. 研究方法

3-1 CFD 解析に基づく飛雪解析手法

3-1-1 雪粒子移動のモデル化

CFD では建物周辺の速度、圧力の 3 次元的な分布が得られるため、それらの情報を用いて、雪粒子の風による輸送をモデル化することになる。風によって運ばれる雪粒子の運動形態は *creep*（転動）、*saltation*（跳躍）、*suspension*（浮遊）の 3

つに分類することができる。図 3-1 に概要を示す。

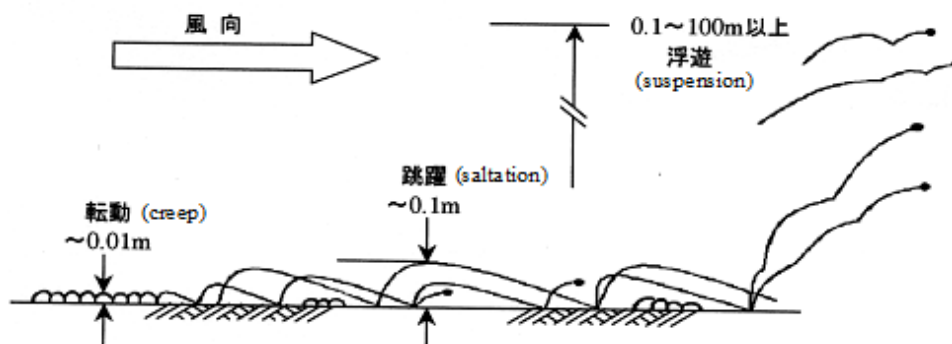


図 3-1 雪粒子の運動形態の概要

既往研究では、creep は saltation の初期段階であると考え、saltation に含んだ形で扱われることが多い。suspension のモデル化は、個々の雪粒子の挙動を解析対象とする Lagrange 的手法と、空気中に浮遊している雪粒子を 1 つの集団とみなし、気流によって単位空間に含まれる雪粒子の密度が輸送されると考える Euler 的手法の 2 つに大別される。地表面付近の影響が小さい建物上部への雪の吹き込み等を検討する場合は、suspension のみを考慮する解析で傾向を予測することが可能である。

saltation による吹雪輸送量については、砂粒子による実験結果や吹雪の観測結果等によって得られた様々な回帰式が提案されている。CFD によって得られる雪面の摩擦速度とこれらの回帰式を使って吹雪輸送量をモデル化する例が多いが、これらの回帰式は吹雪が平衡状態にあることを前提としており、建物周辺流れのような加速・減速を伴う複雑な流れ(非平衡状態)に適用する場合は注意が必要である。これらの雪粒子の各移動過程による輸送量の収支をとることによって、最終的な雪面の変化が求められる。

3-1-2 雪粒子の移流・拡散のモデル化

Suspensionについては、単位体積中に含まれる雪粒子の質量として飛雪空間密度 $\Phi[\text{kg}/\text{m}^3]$ を定義し、その輸送方程式((2-2-1)式)を解くものとする。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi \langle u_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial w_f \Phi}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_t \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3-1)$$

ここで $\frac{\partial \Phi_{sus}}{\partial t}$ は第 1 セルの Φ_{sus} と地表面の Φ_{sal} (saltation 層の飛雪空間密度)を用いて算出する。 v_t も第 1 セルの値を用いる。

3-1-3 雪の堆積・侵食のモデル化

雪の堆積・侵食による積雪深の変化量をモデル化する。

- 雪面への堆積フラックス

$$M_{dep} = -\langle w_f \rangle \langle \Phi_p \rangle \left(1 - \frac{\langle u_t^* \rangle^2 - \langle u^* \rangle^2}{\langle u_t^* \rangle^2} \right) \quad (3-2)$$

- 雪面からの侵食フラックス

$$M_{ero} = -A_e \rho_i \langle u^* \rangle \left(1 - \frac{\langle u_t^* \rangle^2}{\langle u^* \rangle^2} \right) \quad (3-3)$$

- 雪面への正味の積雪フラックス

$$M_{total} = M_{dep} + M_{ero} \quad (3-4)$$

$\langle \Phi_p \rangle$: 雪面に接するセルの飛雪空間密度[kg/m³]

$\langle u^* \rangle$: 雪面における摩擦速度[m/s] , $\langle u_t^* \rangle$: 限界摩擦速度

$\langle w_f \rangle$: 雪粒子の落下速度[m/s] , ρ_i : 氷の密度, A_e : モデル係数

侵食が発生した場合($u^* > u_t^*$)には, $\langle \Phi \rangle$ の輸送方程式の雪面境界条件として M_{ero} を与えた。なお、本研究では M_{total} は負値をとらないものと仮定している。

3-2 熱収支解析に基づく融雪解析手法

3-2-1 積雪面熱収支の構成

積雪面での熱収支の構成は、図 3-2 のように表せる。融雪エネルギーの値は入力放射量, 顕熱輸送量, 潜熱輸送量の総和から, 大気中へと放出される長波放射量を差し引いた値であり、その値が正ならば融雪が起きる。

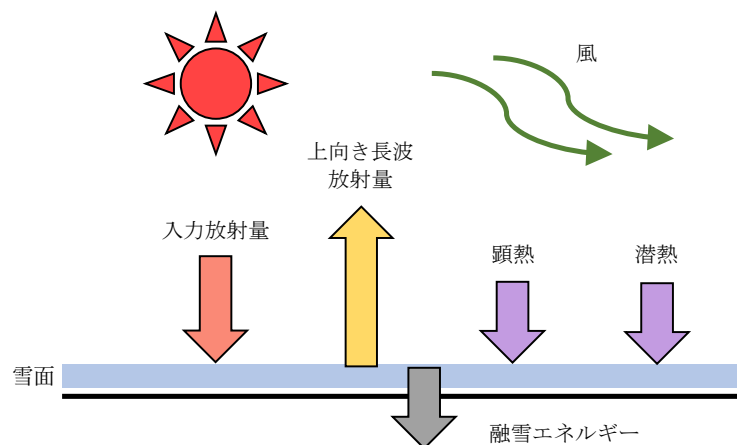


図 3-2 積雪時の屋外空間の熱収支構成

3-2-2 熱収支モデルの概要

(1) 基本熱収支式

融雪エネルギーは、入力放射量、顕熱輸送量、潜熱輸送量の総和から、大気中へと放出される長波放射量を差し引いた値であり、その値が正ならば融雪が起きる。積雪面の熱収支（図 3-2）は式 3-5 で表せる。

$$M = R - L + H + E \quad (3-5)$$

M : 融雪エネルギー[W/m²]

R : 入力放射量[W/m²]

L : 上向き長波放射量[W/m²]

H : 顕熱輸送量[W/m²]

E : 潜熱輸送量[W/m²]

(2) 各構成要素の計算式

①入力放射量

入力放射量 R [W/m²]は、次式 (3-6) により求められる。

$$R = (1 - ref)S^\downarrow + L^\downarrow \quad (3-6)$$

ref : アルベド

S^\downarrow : 全天日射量[W/m²] (気象データより)

L^\downarrow : 大気放射量[W/m²] (気象データより)

②上向き長波放射量

上向き長波放射量 L [W/m²]は、次式 (3-7) により求められる。

$$L = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (3-7)$$

ε : 積雪の射出率

σ : ステファン・ボルツマン定数[W/m²/K⁴] (設定値として与える)

T_s : 積雪表面温度[K]

③顕熱輸送量

顕熱輸送量 H [W/m²]は、次式 (3-8) により求められる。

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (3-8)$$

C_p : 空気の比熱[J/kg/K]

ρ : 空気の密度[kg/m³]

$\rho = P / \{R(t + 273.15)\}$ (P :大気圧 hPa, $R=2.87$, t :気温°C)

C_H : 顕熱輸送のバルク輸送係数 (設定値として与える)

U : 高度 1.0m での風速[m/s]

T : 気温[K]

④潜熱輸送量

潜熱輸送量 E [W/m²]は、次式 (3-9) により求められる。

$$E = \rho C_E U [(1 - rh)q_{sat}(T) + \Delta \cdot (T_s - T)] \quad (3-9)$$

- ι : 氷の昇華の潜熱または水の気化の潜熱[J/kg]
- C_E : 潜熱輸送のバルク輸送係数
- rh : 相対湿度
- $q_{sat}(T)$: 気温に対する飽和比湿[kg/kg]
- Δ : 飽和比湿の温度に対する変化率

3-2-3 融雪量の予測

上記の熱収支モデルに基づいて、降水量を重量換算し、融雪エネルギーから排水量を計算することで、積雪重量を推定できる。

3-3 CFD と熱収支モデルに基づく積雪分布予測解析の流れ

CFD と熱収支モデルに基づく積雪分布予測の流れを図 3-3 に示す。境界条件等の情報から風速分布や圧力などを算出し、雪粒子の移動を考慮した飛雪空間密度の輸送方程式を用いて飛雪解析を行う。飛雪後の積雪深分布で雪の堆積量や侵食量を反映した積雪深変化をモデル化し、雪面熱収支解析で日射や顕熱、潜熱など融雪に費やされるエネルギーの総量の解析を行う。

本研究では、これらのモデルをオープンソースの CFD ソフトウェアとして注目されている OpenFOAM に組み込んで解析を行った。

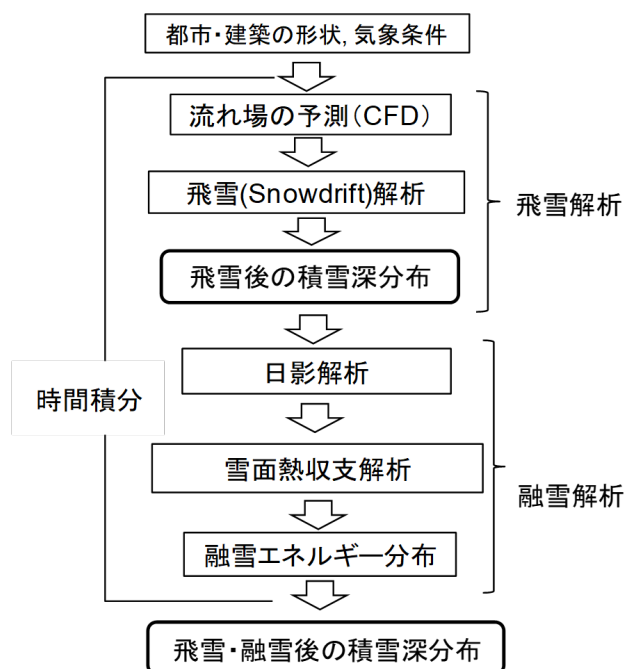


図 3-3 CFD と熱収支モデルに基づく積雪分布予測のフローチャート

4. 結果および考察

4-1 解析条件

4-1-1 解析対象・領域

豪雪地として知られる南魚沼市の3D都市モデルを、市役所を中心とする800m×800mの範囲で作成した。1階層ごとの高さを3mとする。地図に名称のない一般建物と思われる建物の高さを6mと仮定し、店や市役所など地図に名称が載っている建物を階層×3mとしてモデルを作成した。地形による高さの違いは無いものとする。解析モデルを図4-1に示す。



図4-1 解析モデル

4-1-2 使用メッシュ

通常メッシュには一辺が8.0mのメッシュを使用し、建物周りのメッシュには一辺が0.5mのメッシュを使用した。全体のメッシュ数は約40,000,000メッシュになる。メッシュを図4-2から図に示す。

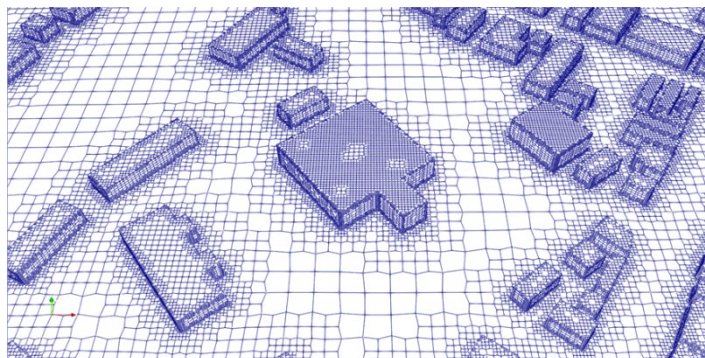


図4-2 市役所付近のメッシュ

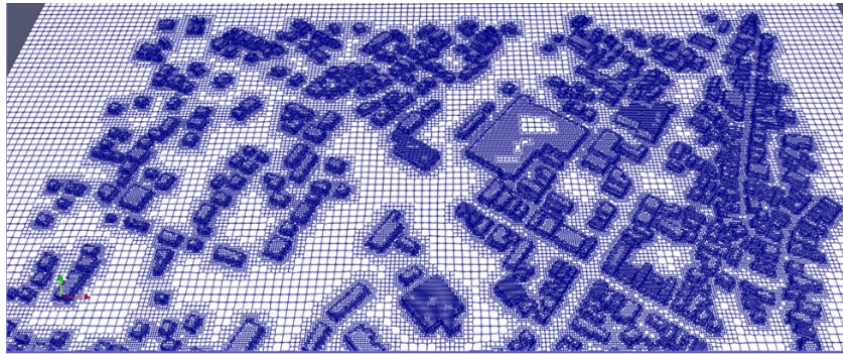


図 4-3 北半分のメッシュ

4-1-3 境界条件

関越自動車道において大規模な車両滞留が起きた 2020 年 12 月の気象条件を参考に決定した。風向きは北北西および西とし、風速は高さ 10m において 5m/s とする。

4-1-4 乱流モデル

乱流モデルは標準 k- ϵ モデルを使用した。

4-2 解析結果

4-2-1 風速分布

高さ 5m と 10m の風速分布を図 4-4、図 4-5 に示す。

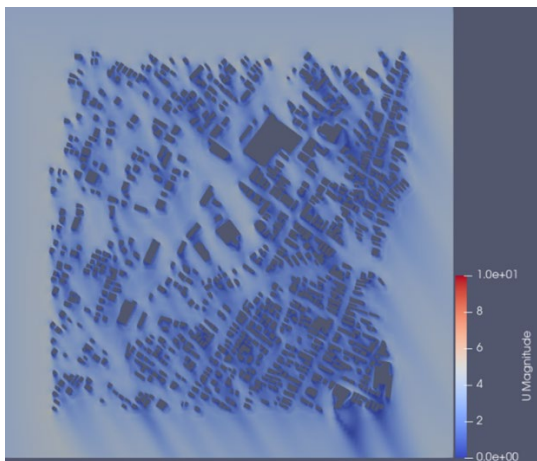


図 4-4 高さ 5m の風速分布

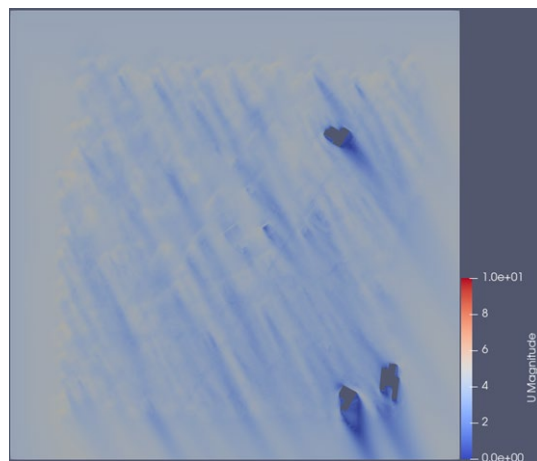


図 4-5 高さ 10m の風速分布

4-2-2 飛雪解析

1m² の範囲に雪が 0.00022m/s 積もるものと仮定し、1 日分の解析を行った高さ 10m/s において風速を 5m/s とした飛雪解析による積雪分布の西風時の結果と

北北西時の結果を図 4-6、図 4-7 に示す。風向きの違いで解析結果に大きな違いが出るのが分かる。図 4-7 で違いが大きく表れた箇所を赤丸で示す。

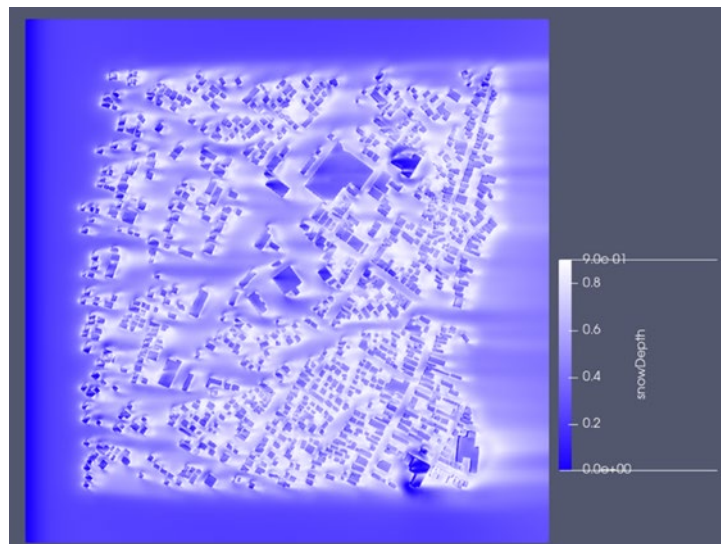


図 4-6 西風向時の積雪分布

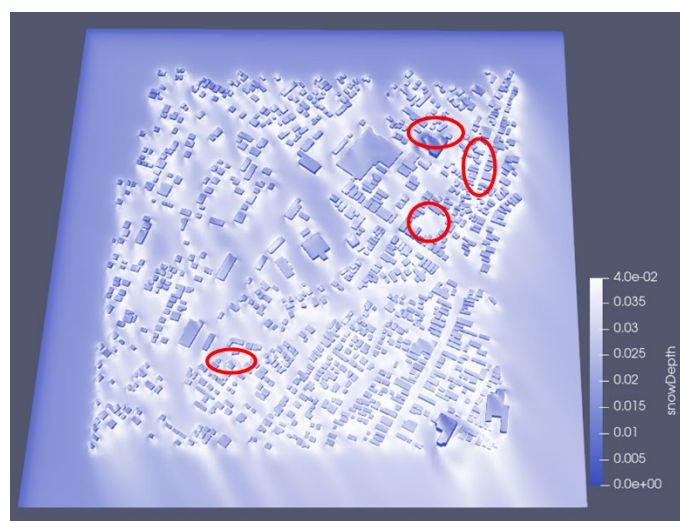


図 4-7 西風向時の積雪分布

4-2-3 融雪解析

2020年12月の気温、風向き、積雪量、風速を参考に、気温を0°C、風向きを南東、積雪量無し、風速1m/sとした。飛雪解析において風速5m/sを想定した融雪解析の結果を図4-8に示す。図4-8を見ると風下側の堆雪量が明らかに多いことがわかる。これは雪を含んだ風が障害物によって遮られ、その後ろに滞留することで雪が堆雪してしまう吹き溜まりという現象である。風上側は建物が点在しているためあまり積もっていないが、風下側は建物がかかなり密集して配置さ

れている。図 4-9、図 4-10 に見られるように、特に右上の裏路地と、市役所の右下側にある住宅街、ホテル周辺は多くの雪が堆雪している。



図 4-8 飛雪解析が風速 5m/s の融雪解析

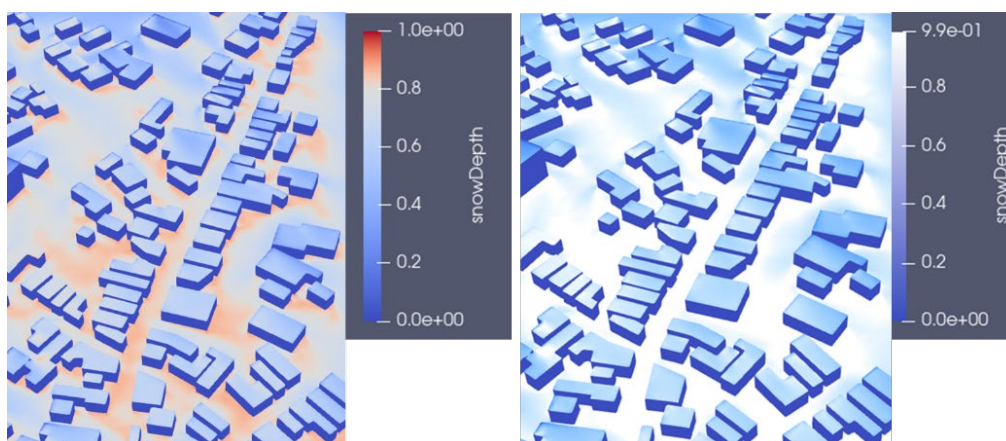


図 4-9 右上に位置する裏路地の融雪解析

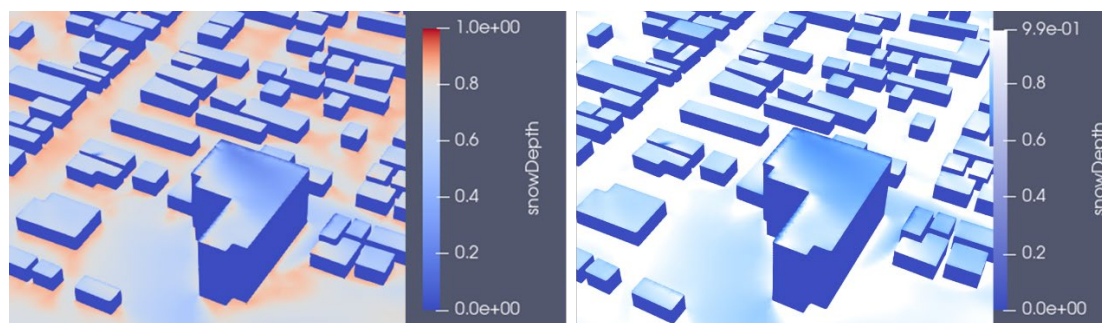


図 4-10 右下に位置するホテル周辺の融雪解析

5. まとめ

申請者のこれまでの研究で確立した建築物屋根上や周辺における積雪の不均一分布を定量的に予測・評価可能な CFD (Computational Fluid Dynamics) や熱収支解析等の雪氷物理モデリングに基づくシミュレーションを基礎として、実在の都市・建築を対象とした複雑な形状における積雪分布を正確に予測・評価するシステムを構築した。そして、その有効性を新潟県南魚沼市の市街地モデルを対象に検証した。

飛雪解析の結果から、住宅街や路地裏など建物が密集しているところや、ホテルなど高い建物の周りには風の淀みにより発生する吹き溜まりが確認できた。住宅街や路地裏は家同士が近いいため風通しが悪く、堆雪した後の除雪などが難しいのではないかと考えられる。高い建物の周りでは建物自体が大きな障害物となってしまうため多く堆雪したと考えられる。飛雪解析の時の風向きが西の場合、路地裏ではあまり雪が積もらなかったため、風向きに対して建物が平行でないことも関係していると考えられる。

防災対策としての視点で見た時、この地域の風向きが北北西に吹く風が多いのに対し、流れが悪くなるような建物配置をしている場所が見受けられる。北北西から南南東に向かって線を引いた時それに平行になる様に建物を配置することで雪の堆積に改善が見込めると考えられる。また、風速 5m/s で堆積した時と風速 1m/s で堆積した時の最終的な積雪量を見た時、風速 1m/s の時の方が積雪量は圧倒的に多くなった。このことから風があまり吹かず、降雪量が多い場合には、建物配置や風向きに関係なく雪の堆積による被害が発生する可能性が高いと考えることができ、事前に対策することが可能である。

今後の課題としては、2023-24 年冬期が予想外に小雪であったこともあり、数値シミュレーションで予測された積雪分布が実際の降積雪時の積雪分布をどの程度正確に再現しているかという検証はできなかった点が挙げられる。この点については、本研究で開発した手法を活用しながら、今後取り組んでいきたいと考えている。