

建物周りの雪の吹きだまり予測に対する数値計算の適用 Application of Numerical Simulation to Prediction of Snowdrift around a Building

土谷 学, 鹿島技術研究所, 〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1, E-mail: tsuchiya@katri.kajima.co.jp
 苫米地 司, 北海道工業大学, 〒006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15-4-1, E-mail: tomabechi@hit.ac.jp
 本郷 剛, 鹿島技術研究所, 〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1, E-mail: hongo@katri.kajima.co.jp
 近藤 宏二, 鹿島技術研究所, 〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1, E-mail: kondokoj@katri.kajima.co.jp
 Manabu TSUCHIYA, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-shi, Tokyo, JAPAN
 Tsukasa TOMABECHI, Hokkaido Institute of Technology, 15-4-1, Maeda-7jo, Teine-ku, Sapporo, JAPAN
 Takeshi HONGO, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-shi, Tokyo, JAPAN
 Koji KONDO, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-shi, Tokyo, JAPAN

When planning a building in a heavy-snowfall area, the Hokkaido and the coastal areas on the Sea of Japan of Honsyu, it is important to estimate snowdrift on and around the building. The authors have clarified that there was a negative correlation between snow depth distributions and horizontal mean wind accelerations near the snow surface, using the results of field observations and wind tunnel tests. In this paper, snowdrift around a stepped flat roofs building was predicted by numerical simulation. And it was compared with the results of the wind tunnel test and the snow wind tunnel test.

1. はじめに

北海道や本州の日本海沿岸は、世界でも有数の豪雪地帯として知られている。風雪時に構造物の周囲にできる雪の吹きだまりは、交通障害や災害時の避難障害、屋根上の吹きだまりによる建築物の崩壊など、様々な障害をもたらす。しかし、吹きだまりが形成される位置やその形状は、風向、風速、雪質、気温、建物形状、周囲の状況などの様々な要因により左右されるため、一概には定まらず、予測することは容易ではない。

吹きだまり形成に関わるこれら多くの要因の中で、雪面近傍の気流性状が密接に関係することは、既往の研究において明らかにされており、両者の関連性について検討を行った研究^{(1)~(6)}が報告されている。竹内⁽⁷⁾は、障害物の風上側では、風速の減少に伴って、雪の跳躍粒子を発生させ運動を継続させる地表面に働くせん断応力が減少することで、吹きだまりが形成され、障害物の風下側の吹きだまりは、浮遊粒子の落下によって形成されることを示している。

筆者らは、吹きだまりと吹き払いの性状を顕著に示す吹きだめ型の防雪柵を対象とした野外観測と風洞実験を実施し、フェンス前後の雪の吹きだまりと風の流れの性状との関連性について検討を行ってきた^{(8),(9)}。そして、雪面に近接した位置における風の流れの加速度と吹きだまり性状に負の相関関係があることを示した⁽¹⁰⁾。

本研究では、改良k-εモデルを用いて得られた建物モデル周囲の流れの性状に、この関係を適用して吹きだまりの予測を試みた。更なる結果を、気流風洞実験結果および吹雪風洞実験結果と比較し、その有効性を検証したので、ここに報告する。

2. 吹雪風洞実験による吹きだまり性状測定の方法

模型雪を用いた吹雪風洞実験は、道路の防雪対策を検討する実験手法として発達してきた。1939年に Finney によって、模型雪として、のこくずや雲母粉を用いた風洞実験が始めて行われている。吹雪現象がもたらす道路上の吹きだまり現象は、雪質も乾雪で気温も低くかつ風が強いという比較的限定された条件下で発生するため、この手法によって比較的再現し易く、その後、多くの研究者により、吹雪風洞実験が実施され、防雪対策の面では多くの成果をあげている。更に、苫

米地らの研究⁽¹¹⁾から、活性白土を模型雪とした吹雪風洞実験は、乾雪地帯である北日本を対象とした積雪現象を十分に再現できることが明らかにされている。

本研究における吹雪風洞実験は、北海道工業大学所有の粉体専用大型風洞装置を用いた。風洞装置の概要をFig.1に示す。この風洞は、測定部断面が幅1.0m×高さ0.8mの回流型風洞装置である。実験では、雪に近似した安息角及び粘着性を示す含水率8.5%の活性白土を模型雪として使用した。模

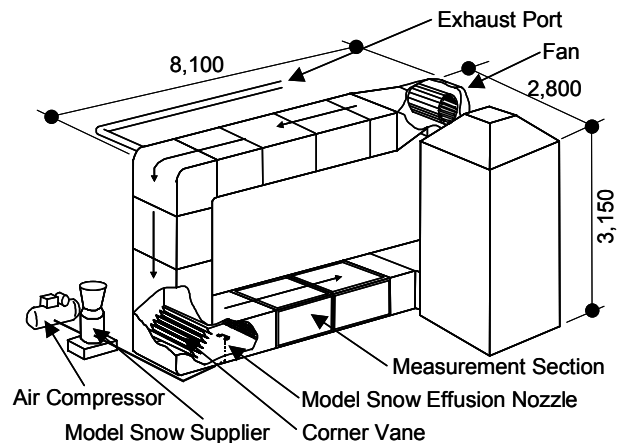


Fig.1 Outline of snow wind tunnel.

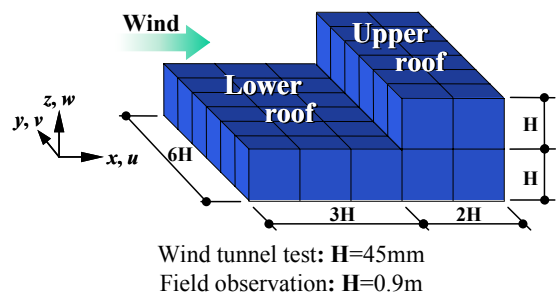


Fig.2 Outline of a stepped flat roofs building model.

型雪として使用する活性白土は、コンプレッサーの圧縮空気で測定部上流の吹き出しノズルから風洞内に噴出され、降雪および吹雪現象を再現する。

実験気流の作成は、スパイヤー（高さ：0.5m、5本）及び乱流格子（格子間隔：5mm、高さ0.2m及び0.1m各1枚）を模型の風上に設置し行った。作成した気流は、平均風速の高さ方向勾配がべき指数 $\alpha=0.1$ の勾配流で、模型高さ付近の平均風速は、7m/secである。

対象とする建物モデルをFig.2に示す。2つの異なる屋根高さを持つ2段屋根建物をモデル化したものである。吹雪風洞実験においては、モデルの基準高さHを45mmとした。実験風向は、建物の下段屋根側が風上となる方向とした。

風洞運転時間を2時間として吹雪現象を再現し、周囲に吹きだまりを形成させた後、3次元トラバース装置に取り付けたレーザー変位計（精度0.1mm）を用いて、模型雪の積雪深分布を測定した。測定範囲は、建物モデルを中心とした500mm四方で、10mm間隔に2601点測定した。吹雪風洞実験によるモデル周囲の吹きだまりの様子をPhoto 1に示す。

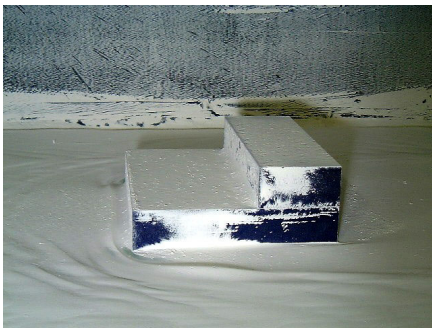


Photo 1 Snowdrift around model by snow wind tunnel test.



Photo 2 Field observation model for snowdrift.

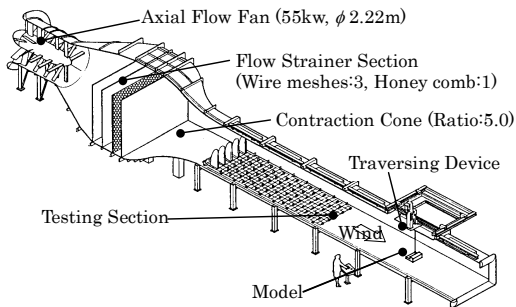


Fig.3 Outline of wind tunnel.

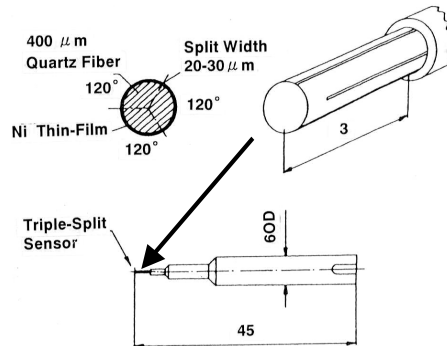


Fig.4 Triple-split fiber probe.

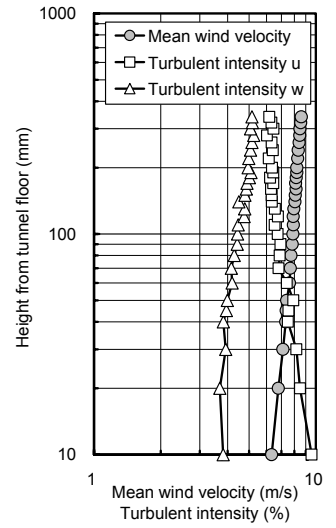


Fig.5 Wind Profiles.

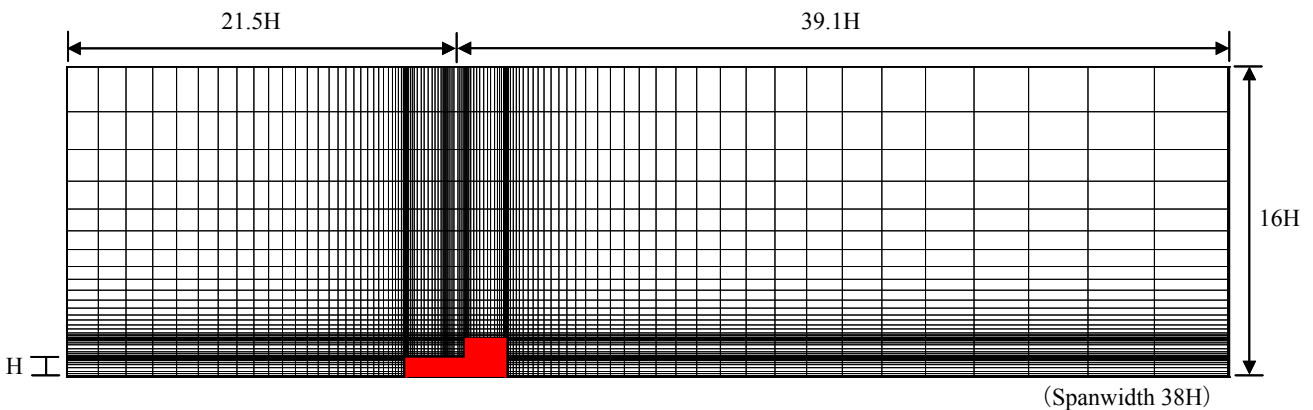


Fig.6 Computation grid (x-z plane).

なお、本吹雪風洞実験の結果は、同形状の試験体を設置した屋外観測を行い、その妥当性を確認した。観測の様子を、Photo 2に示す。試験体は、北海道工業大学（札幌市手稲区）のグラウンドに設置し、冬期の主風向に正対させた。試験体は、Fig.2のHを0.9mとした大ききで、試験体周囲の170m四方には、風を遮るものは何もない状態である。観測期間は、1998年から2001年の4冬期である。

3. 風洞実験による気流性状測定の方法

本来、雪の吹きだまり性状を測定した吹雪風洞装置を用いて、建物モデル周囲の気流性状を測定することが望ましいが、実験に用いた吹雪風洞装置は、回流型であり、実験後も模型雪が残留するため、熱線風速計やスプリット型風速計を使用することは難しい。従って本研究では、吹雪風洞実験とは異なる風洞装置を用いて、建物モデル周囲の風速及び風向の分布を測定した。

実験に使用した風洞装置は、鹿島技術研究所所有の可視化風洞である。この風洞の概要をFig.3に示す。測定部断面は、

幅 2.0m, 高さ 1.2m, 縮流洞吹出し口から模型設置部までの長さが約 11.0mの境界層風洞である。模型は、吹雪風洞実験と同じ大きさのものを使用した (Fig.2)。

実験では、2次元の風速と風向を測定できるトリプルスプリットファイバー風速計 (Fig.4, DANTEC 55R92) ⁽¹²⁾ をトラバース装置に取り付け、建物モデル周囲の地表面から 5mm ($z/H=1/9$) 高さにおける u, v 成分の風向, 風速を測定した。ADサンプリングは、1測定点当たり 500Hz, 30秒間である。

模型が無い状態における模型位置での平均風速と乱れ強さの高さ方向分布を Fig.5 に示す。境界層流の作成には、ソー (高さ 0.2m) とスパイヤー (高さ 1.0m, 幅 0.09m, 5本) を用いた。下段屋根高さ H (45mm) における平均風速は、約 7.4m/sec, 乱れの強さは、 u 成分 (水平主流方向) が 7.5%, w 成分 (鉛直方向) が 4.0% である。平均風速の高さ方向分布は、 $\alpha=0.1$ のべき指数分布に近似でき、吹雪風洞実験に概ね一致する。

4. 気流数値計算の方法

計算には、改良型 Launder & Kato モデル⁽¹³⁾ を用いた (Table 1)。計算格子は、風方向が建物中心から風上 21.5H, 風下 39.1H, 風直角方向 38H, 高さ方向 16H の領域を $113(x) \times 82(y) \times 48(z) = 444768$ で分割した。計算グリッドを Fig.6 に示す。最小格子幅は、 x, y 方向が $H/20$, z 方向が $H/40$ である。レイノルズ数は $Re=23120$ である。境界条件を Table 2 に示す。計算時間間隔は 0.005 で、無次元時間 20 の時間平均値を求めた。

5. 雪の吹きだまりと加速度の関係

雪の吹きだまりは、雪面近傍の流れのせん断応力に密接に関係する。しかし、この関係は、既往の研究⁽⁷⁾ でも述べられているとおり、物体の風上側において認められているが、本研究で対象とする物体の風下側や側方、あるいは建物の屋根上のような剥離流れの中では、両者の相関性は乏しいことがわかっている。

この雪の吹きだまりとせん断応力の関係は、雪面からの雪粒子の飛散現象に着目してものである。これに対して、筆者らは、気流中の雪粒子が雪面に落下する現象について、雪粒子に加わる重力、慣性力、抗力及び揚力を Fig.7 に示すように仮定した。ここで、水平に飛行する雪粒子を考えた場合、雪粒子に加わる重力と揚力が釣り合っている。この状態から、風速が減少すると、空気に対して密度の大きい雪粒子は、慣性力によって風速の減少に即座に追従せず、雪粒子の速度は風速よりも大きくなり、相対的には雪粒子の移動方向と逆の抗力が作用する。同時に雪粒子に加わる揚力が減少し、雪粒子は下降する。風速が強くなる場合は、これとは逆の力が作用する。すなわち、Fig.7における位置 x_1 と x_2 では、風速は同じ値 u を示すが、その前後の風速の違いから、雪粒子に加わる力が異なり、雪面に落下する雪粒子の量に影響を与えと考えることができる。この点に注目して、風の水平方向の平均加速度と雪の吹きだまりの関係を検討した結果、両者の間には、負の相関関係があることを確認した⁽¹⁰⁾。以下では、この関係を用いて、流れの加速度分布を算定し、雪の吹きだまりを予測する。

6. 加速度分布の算定

風洞実験及び気流計算で得られた平均風速の分布を用いて、吹きだまり分布に対応する地表面近傍の水平方向の流れの加速度分布を算定した。 u 成分及び v 成分の加速度の算定には、次式(1)を用いた。

Table 1 Basic equations of revised Launder & Kato model.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(P + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ v_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} C_1 P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$P_k = v_t S \Omega \quad (\Omega / S \leq 1) \quad , \quad P_k = v_t S^2 \quad (\Omega / S > 1) \quad , \quad v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad , \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_1 = 1.0, \quad \sigma_2 = 1.3$$

Table 2 Boundary condition

inflow	$\langle u_1(x_3) \rangle$: wind tunnel test result ($\langle u_1(x_3) \rangle \cong x_3^{1/7}$), $\langle u_2(x_3) \rangle = \langle u_3(x_3) \rangle = 0$, $k(x_3)$: wind tunnel test result $l(x_3) = (C_\mu k(x_3))^{1/2} (\partial \langle u_1(x_3) \rangle / \partial x_3)^{-1}$ (at inflow boundary $P_k = \varepsilon$), $\varepsilon(x_3) = C_\mu k(x_3)^{3/2} / l(x_3)$, $v_t(x_3) = k(x_3)^{1/2} l(x_3)$
outflow	$\langle u_i \rangle, k, \varepsilon : \partial / \partial x_1 = 0$
upper and side faces of computational domain	$\langle u_n \rangle = 0, \langle u_t \rangle, k, \varepsilon : \partial / \partial x_n = 0$ $\langle u_n \rangle$: normal velocity component, x_n : spatial coordinate normal to the boundary plane $\langle u_t \rangle$: tangential velocity component
solid wall	$\frac{\langle u_i \rangle_p}{(\tau_w / \rho)} (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[E \frac{1}{2} h_p (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} / v \right]$ $\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa h_p} \ln \left[E h_p (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} / v \right]$ $\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa h_p / 2}$, $k : \partial k / \partial x_n = 0$, $\kappa = 0.4, C_\mu = 0.09, E = 9.0$

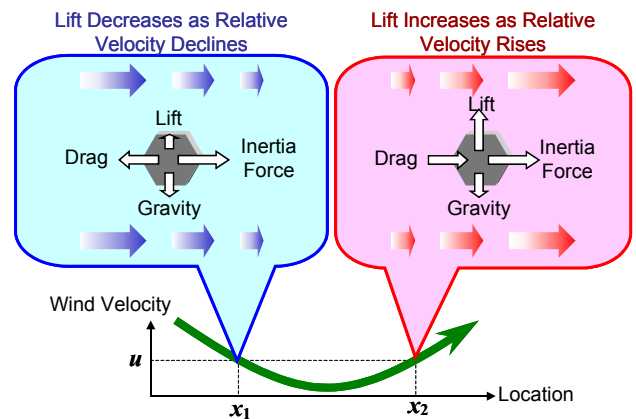


Fig. 7 How wind force acts on snow particles in the area of changing wind velocity.

$$a_u = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (1a)$$

$$a_v = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \dots\dots\dots (1b)$$

ここでは、加速度の時間平均値を対象とすることから、右辺第1項を0として算定した。更に風洞実験においては、w成分が測定されておらず、かつ、地表面近傍の流れであることから、w成分の平均値は0に近似できると考えられるので、右辺第4項を0として算定した。風洞実験及び気流計算における平均加速度 $\langle a_u \rangle$ 、 $\langle a_v \rangle$ は、次式(2)及び(3)を用いて算定した。

[風洞実験]

$$\langle a_u \rangle = \langle u \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} \dots\dots\dots (2a)$$

$$\langle a_v \rangle = \langle u \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} \dots\dots\dots (2b)$$

[気流数値計算]

$$\langle a_u \rangle = \langle u \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} + \langle w \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z} \dots\dots\dots (3a)$$

$$\langle a_v \rangle = \langle u \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial y} + \langle w \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial z} \dots\dots\dots (3b)$$

ただし、本研究において対象とする地表面近傍の流れにおいては、(2)式と(3)式による違いが小さいことを、気流数値計算結果で確認した。

水平2方向の平均加速度 $\langle a_u \rangle$ 及び $\langle a_v \rangle$ から、流れの水平主流方向の平均加速度 $\langle a \rangle$ の算定には、次式(4)を用いた。

$$\langle a \rangle = \frac{\langle u \rangle}{\sqrt{\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2}} \langle a_u \rangle + \frac{\langle v \rangle}{\sqrt{\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2}} \langle a_v \rangle \dots\dots (4)$$

7. 測定および計算結果の比較

計算による地表面近傍の加速度分布を Fig.8 に、風洞実験による加速度分布を Fig.9 に示す。ここで、加速度が負の領域 ($\langle a \rangle < 0$) を で示した。気流数値計算の加速度の算定位置は、風洞実験とほぼ同様の地上高さ ($z/H=1/9$) とした。

吹雪風洞実験による積雪深の分布を Fig.10 に示す。ここでは、測定した積雪深 s (mm) を、測定範囲の平均積雪深 \bar{s} (mm) を用いて、次式(5)により基準化した吹きだまり係数 C_s を用いた。

$$C_s = (s - \bar{s}) / \bar{s} \dots\dots\dots (5)$$

この時、積雪深が平均積雪深よりも大きい場合は、吹きだまり係数が正の値 ($C_s > 0$) を示し、吹き払いなどの現象により、平均積雪深より小さい場合は、吹きだまり係数は、負の値 ($C_s < 0$) を示す。Fig.10 では、吹きだまり係数が正の領域 ($C_s > 0$) を、 で示した。

吹雪風洞実験による積雪深の分布 (Fig.10) を見ると、モデル風上側に大きな吹きだまりが形成されている。この吹きだまりのピークは、 $x/H=-4$ 程度に見られ、モデル近傍ではや

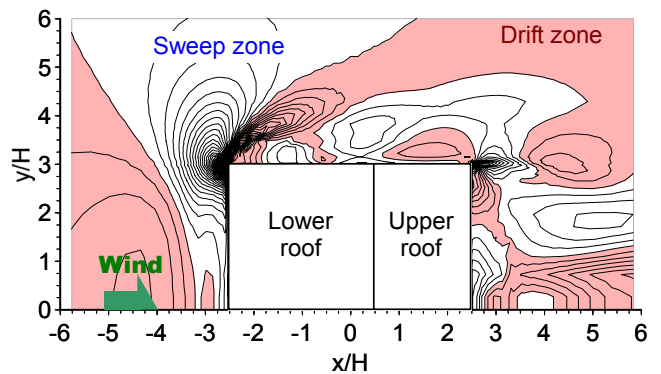


Fig. 8 Distribution of wind acceleration by revised k-ε model.

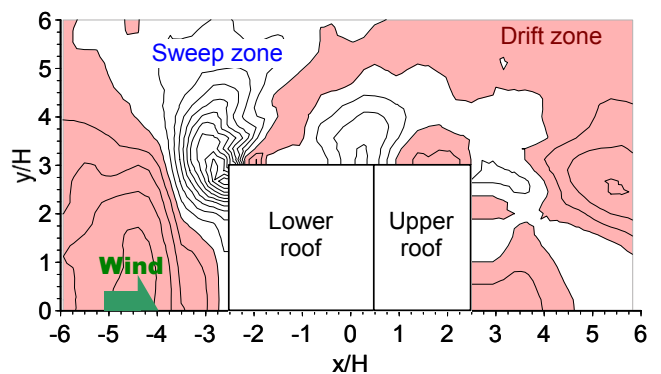


Fig. 9 Distribution of wind acceleration by wind tunnel test.

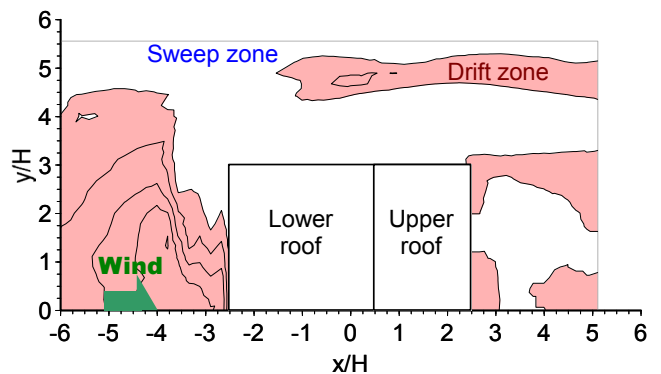


Fig. 10 Distribution of snowdrift by snow wind tunnel test.

や減少している。またモデル隅角部では、吹き払いが生じている。モデル側面近傍では、吹き払いが生じ、やや離れた位置 ($y/H=5$) に、流れ方向の帯状の吹きだまりが形成されている。モデル風下側は、変化の度合いが比較的小さい。

風洞実験及び数値計算による平均加速度の分布 (Fig.8, Fig.9) をみると、両者は、概ね対応した結果を示しており、本計算結果の妥当性が確認できる。両気流分布において、モデル風上側に大きな負の加速度の領域が形成され、そのピークは、 $x/H=-4.5$ 付近にある。これは、Fig.10 に示したモデル風上側の吹きだまりと比較して、ピーク位置がやや異なるものの、全般的な傾向は概ね一致している。また、モデル風上隅角部では、正の強い加速度が見られ、Fig.10 の吹き払い位置と一致する。Fig.10 において見られたモデル側面の帯状の吹きだまりは、Fig.8 及び Fig.9 の加速度分布において、類似した負の加速度領域が形成されているが、Fig.10 では、モデルと吹きだまり領域が接していないのに対して、加速度分布では、モデルに接している違いが見られる。モデル風下側で

は、Fig.10においては、吹きだまりの凹凸が少ない（等高線が粗）状態であるのに対して、加速度分布においては、等値線が密な状態が見られるが、分布の傾向は類似する。

8. まとめ

筆者らが提案する地表面付近の流れの水平方向加速度と積雪分布との関係を用いて、建物モデル周りの雪の吹きだまり予測への気流計算結果の適用を試みた。計算結果による流れの加速度分布は、風洞実験による加速度分布と良い対応を示し、更に、吹雪風洞実験で得られた積雪深分布と比較した場合、建物風上側の吹きだまり領域、風上隅角部付近の吹き払い、建物横直下の吹き払いとやや離れた帯状の吹きだまりなどにおいて概ね良い対応を示した。

このように、流体計算で求めた風の加速度分布を用いることで、雪の吹きだまりや吹き払いの領域及びピーク位置を評価することが可能であることを示した。今後、定量的な積雪予測を可能とするためには、気流性状と雪の吹きだまりとの関連性を更に検討する必要がある。

参考文献

- (1) 遠藤明久, 苫米地司, "活性白土を用いた風洞実験による水平屋根, 山形屋根の屋上積雪形状", 日本建築学会構造系論文集, No.357, pp.20 - 28, 1985.11
- (2) Iversen J. D. , "Drifting snow similitude — transport rate and roughness modeling", *Journal of Glaciology*, 26, pp.393 - 403, 1980
- (3) Y. Anno and T. Konishi, "Modeling the effects of a snow fence by means of activated clay particles", *Cold Region and Technology*, 5, pp.43 - 58, 1981
- (4) R. A. Schmidt, "Properties of blowing snow", *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol.20, No.1, pp.39 - 44, 1982.2
- (5) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男, 福沢義文, "防雪柵の研究", 雪と道路, No.1, pp.96 - 100, 1984
- (6) 老川進, 苫米地司, 石原孟, "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, No.4, pp.3 - 11, 1999.10
- (7) 竹内政夫, "吹雪とその対策(3) 吹きだまりの発生機構と形", 日本雪氷学会誌, Vol.62, No.1, pp.41 - 48, 2000.1
- (8) T. Hongo, M. Tsuchiya, T. Tomabechi and H. Ueda, "Wind effects on snow drifts around two-dimensional fence", *Proc. 4th ICSE*, pp.397 - 402, 2000.6
- (9) 土谷学, 苫米地司, 本郷剛, 上田宏, "フェンス周辺の吹きだまりと風の流れの特性 —風洞実験による吹きだまり形成時の気流測定—", 日本雪工学会誌, Vol.17, No.3, pp.3 - 9, 2001.7
- (10) 土谷学, 苫米地司, 本郷剛, 上田宏, "フェンス周辺の吹きだまりと風の流れの特性 —積雪分布に影響を及ぼす気流性状—", 日本雪工学会誌, Vol.17, No.4, 2001.10
- (11) 苫米地司, "乾雪地帯における屋上積雪形状に関する研究", 東北大学学位論文, 1985.12
- (12) F. E. Jorgensen , "Characteristic and Calibration of Triple-Split Probe for Reversing Flows", *DISA Information*, No.27, pp.15 - 22, 1982.1
- (13) 近藤宏二, 村上周三, 持田灯, "改良k-εモデルによる建物モデル周辺気流の数値計算", 第8回数値流体力学シンポジウム, 1994.12, pp. 363-366.