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 －

Characteristics of Snowdrift and Wind Flow Around a Fence

－ The Measurements of Wind Flow in Snow Drifting by Wind Tunnel Test －

土谷 学^{*1}・苫米地 司^{*2}
Manabu Tsuchiya Tsukasa Tomabechi
本郷 剛^{*3}・上田 宏^{*4}
Takeshi Hongo Hiroshi Ueda

SYNOPSIS

A snowdrift around a structure or a micro-topography is closely related to the property of the wind flow around that. The purpose of this study is to clarify the relation between snowdrift and wind flow. In this paper, characteristics of snowdrift and wind flow around a two-dimensional type collector snow fence were investigated by wind tunnel tests and snow wind tunnel tests. First, the snowdrift around the fence was measured in a snow wind tunnel. Then the wind flow around the model which is simulated the snowdrift around the fence was measured in detail by means of a triple-split probe anemometer in a boundary layer wind tunnel. The test results yielded the change of snowdrift patterns around the fence with duration of snowfall and the change of flow characteristics, including vortices formed in front of and behind the fence, by the change of snowdrift.

Keywords : snow drift, wind flow, wind tunnel test, fence

1. はじめに

雪害の原因となる現象の1つに、吹きだまりがあげられる。構造物や局所的な地形周辺の吹きだまりによる交通障害や災害時の避難障害、あるいは、建築物の屋根上の吹きだまりによる積雪荷重の偏りなどである。この吹きだまりの対策や防止のためには、その性状を予測し、構造物の設計時に検討することが望ましい。

一方、構造物や局所的な地形の周辺における風は、その風上側からの剥離やそれに伴う渦など、複雑で

非定常な流れである。吹きだまりの形成には、この風の流れの性状が密接に関係する^{1,2)}。このことから、吹きだまりの予測手法として行われている吹雪風洞実験や、数値流体計算などの予測精度の向上には、吹きだまり性状と気流性状の関連性を詳細に把握することが重要である。

本研究では、吹きだまりと吹き払いが顕著に現れる下部に開口を持つフェンス（吹きだめフェンス）を対象とし、その周囲の吹きだまり性状と気流性状を調査した。調査では、まず、吹雪風洞実験により

※本研究の一部は、日本雪工学会大会³⁾及び日本建築学会大会⁴⁾で発表した。

*1 鹿島技術研究所 主任研究員

*2 北海道工業大学建築学科 教授・工博

*3 鹿島技術研究所 上席研究員 工博

*4 千葉工業大学建築学科 助教授・工博

[本稿受理：2001年3月12日，修正原稿受理：2001年5月18日，討論期限：2002年6月30日]

吹きだまり性状の形成過程を明らかにし、その形成過程毎の吹きだまり性状を模擬した2次元模型を作成し、気流風洞実験によってその周囲の流れの性状を把握した。

2. 調査方法

一般的に風速測定に用いられる熱線流速計は、吹きだまり性状を調査するための吹雪風洞内においては使用できないことから、吹きだまり性状と気流性状を同時に測定することは非常に困難である。このようなことから、本研究では、まず、模型雪を用いた吹雪風洞実験により積雪分布を調査し、次に、その積雪分布を再現した気流風洞実験により、風向風速の分布を測定した。

2.1 吹雪風洞実験

吹雪風洞実験には、北海道工業大学所有の粉体専用大型風洞装置を用いた。風洞装置の概要を図1(a)に示す。この装置は、測定部断面が幅1.0m×高さ0.8mの大きさを持つ回流式風洞である。

実験では、測定部の風上に10mm格子のスクリーンを3枚設置し、境界層乱流を作成した。作成した境界層乱流の平均風速及び乱れの強さの高さ方向分布を図2に示す。風速の測定は、ピトー管と微差圧計を用いて速度圧波形を測定(間隔:1/250秒、データ数:16,384)し、導圧管の伝達特性を用いて圧力変動の伝達歪みを補正した後、風速波形に変換した⁵⁾。模型雪には、安息角、限界摩擦速度、粘性などの諸性状が自然雪(北海道における新雪)に近似した特性を示す含水率8.5%の活性白土を使用した。活性白土は、表面に微細な孔を有した粒径 $10\mu\text{m}$ 程度の粉体で、その安息角は、自然雪が $45^\circ\sim 50^\circ$ 程度に対して、 $48^\circ\sim 53^\circ$ の値を示す。活性白土は、エアーコンプレッサーからの圧縮空気により、測定部上流のノズルから風洞内に噴出され、降雪及び吹雪現象を再現する。

吹きだめフェンスの模型は、高さ30mm(H)、下部開口5mm(H/6)である。またフェンス長さは、中央位置において積雪分布の2次元性が確保されると判断できる400mm(約13H)とした。高さ5~30mmの部分のフェンス充実率は100%である。

実験風速は約5m/秒とし、模型雪の堆積時間は、時間経過による吹きだまりの形成過程を把握するため、30~240分の範囲で8通りの測定を行った。積雪分布は、トラバース装置に取り付けたレーザー変位計を用い、模型中央断面位置を流れ方向に10mm(H/3)間隔で測定した。

(b) 境界層風洞装置
図1 風洞装置の概要

図2 気流の高さ方向分布の比較

写真1 気流実験における模型の設置状況

2.2 気流風洞実験

気流測定に使用した鹿島技術研究所所有の境界層風洞装置を図1(b)に示す。風洞の測定部は、幅2.0m、高さ1.2m、長さ14.1mの大きさである。

本実験の場合、吹雪風洞実験における流入部の気流性状と、気流風洞実験における流入部の気流性状を相似させることは、非常に重要である。それぞれの風洞装置におけるフェンス模型位置の平均風速及び乱れの強さの高さ方向分布の比較を図2に示す。図中の高さ Z は、フェンス高さ H で無次元化している。吹雪風洞実験においては、 $H=30\text{mm}$ としたのに対して、気流の高さ方向分布を一致させるために、気流風洞実験では、吹雪風洞実験の3倍である $H=90\text{mm}$ とした。気流風洞実験における境界層流の作成には、スパイヤー及びソーを用い、風速の高さ方向分布は、I型熱線風速計（KANOMAX 4186）を用いて測定した。

模型は、フェンス模型（高さ90mm（ H ））、下部開口15mm（ $H/6$ ）に加えて、吹雪風洞実験で得られた積雪分布を、堆積時間毎に再現した。この時、フェンス風下側のほぼ一定の積雪深と見なせる範囲を風洞床面とし、フェンス風上側は、 $X/H=-8.3$ 位置まで積雪分布を再現し、その風上側は、気流に影響を及ぼさない程度の緩やかな勾配を設けた。本実験では、フェンス及び積雪形状模型の幅を500mmとし、その両端には、気流の2次元性を確保するための端板（高さ1.2m×長さ3.25m×厚さ10mm）を設置した。模型の設置状況及び座標系を写真1に示す。

本測定のように、乱れの大きい流れや、逆流など

図3 トリプルスプリット風速計⁶⁾

を詳細に測定しようとする場合、従来の気流測定で用いるI型やX型熱線風速計では、風向角が測定できないか、あるいは、測定できる風向角が限定され、正確な測定が困難である。しかし、本研究においては、乱流、逆流中における風向風速分布などの正確な測定が必要不可欠であることから、トリプルスプリットファイバー風速計⁶⁾を使用した。この風速計の概要を図3に示す。この風速計は、直径0.4mmの円筒形のクォーツファイバーに120°毎に平行に並べられた3つのニッケルフィルムセンサーにより、2次元流れの風向風速の時間変動を測定することが可能である。

実験風速は、風洞及び風速計の性能を考慮して、フェンス風上480mm（ $X/H=-5.3$ ）、高さ90mm（ H ）において、約10m/秒とした。データの測定間隔は1/500秒、データ数は15,000である。水平方向の測定点間隔は、フェンス近傍（ $-1.33 \leq X/H \leq 2.0$, $0 \leq Z/H \leq 1.67$ ）では10mm（ $H/9$ ）間隔とし、その他の領域では、60mm（ $H \times 2/3$ ）間隔とした。高さ方向の測定点の最下点は雪面上10mm（ $H/9$ ）高さであり、地上付近（ $Z/H \leq 1.67$ ）では10mm（ $H/9$ ）間隔、その上部（ $1.67 \leq Z/H \leq 3.0$ ）では30mm（ $H/3$ ）間隔とした。測定点数は、765点である。

3. 調査結果

3.1 積雪分布

吹雪風洞実験によって得られた堆積時間別の積雪分布を図4に示す。ここで、距離 X 及び積雪深 S は、いずれもフェンス高さ H で無次元化した。また、積雪のピーク位置を↓印で示す。

図4 吹雪風洞実験による積雪分布と実測結果

各堆積時間の分布において、フェンスの風上側及び風下側に、それぞれ積雪のピークが生じている。風上側では、フェンスに近づくにつれて徐々に積雪深が大きくなり、 $X/H = -1.0 \sim -0.67$ の位置でそのピークが生じる。本実験の測定間隔では、詳細には捉えられていないが、風上側のピーク位置は、積雪が進むにつれてややフェンス側に近づく傾向を示す。その直後は急激に吹き払いが生じ、フェンス位置 $X/H = 0$ で積雪深 S/H はほぼ 0 となる。フェンスの風下側の積雪のピークは、全ての堆積時間で $X/H = 1.67$ に生じる。そのピークから $X/H = 5$ 程度の位置まで積雪深 S/H は減少し、それより風下側の $X/H > 5$ では、概ね一定の積雪深を示す。

本実験結果の妥当性の確認として、同形状のフェンスの実測結果⁷⁾を図4に合わせて示す。この結果は、北海道工業大学のグラウンドに於いて、冬季の主風向に正対して設置した、高さ 3m、幅 18m の試験体によるもので、1997年3月5日に観測されたものである。

フェンス風上側の吹きだまり形状及びフェンス直下の吹き払い形状を比較すると、両者の対応は良い。実測の場合、フェンス風下側の積雪のピーク位置は $X/H = 1.33$ であり、実験結果とは僅かな差が見られるものの、概ね良い対応であると言える。実測と吹雪風洞実験の相違の一因として、実験では一定の風向風速における結果であるのに対して、実測値は12月初旬からの約3ヶ月間の累積した積雪の結果であり、その間の風速や風向が様々に変化した結果で

あることが考えられる。

この比較結果から、両者の間に僅かな違いが見られるものの、吹きだまり性状を検討する上での本吹雪風洞実験結果の有効性を確認した。

3.2 気流性状

基本的なフェンス周りの気流性状として、吹き止めフェンス周辺の平均風速ベクトル分布及び平均流線を図5に示し、吹きだめフェンス周辺の平均風速ベクトル分布及び平均流線⁸⁾を図6に示す。図6では、堆積時間0分時を図6(a)に、堆積時間120分時を図6(b)に、堆積時間240分時を図6(c)に示す。ここで平均風速ベクトルとは、水平方向の平均風速 $\bar{u}$ と鉛直方向の平均風速 $\bar{w}$ のベクトル合成値であり、平均流線は、各測定点における水平方向の平均風速 $\bar{u}$ を基に、式(1)により流れ関数 Ψ を算出し、その等値線を示したものである。

$$\Psi = \sum_0^z \bar{u} dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで z は、風洞床面からの高さを表す(写真1)。また図中には、概略の流れを太線矢印で示す。

吹き止めフェンスの場合(図5)、フェンス風上側下部に渦が確認でき、地上付近では $X/H = -1 \sim 0$ の範囲でこの渦による逆流が確認できる。フェンス上端からの剥離流れは、測定範囲である $X/H = 8$ 以遠まで伸びており、再付着位置は確認できない。フェンス風下側の地上付近では、 $X/H > 1$ の範囲で、逆流が観察される。なお本結果は、同様のフェンスを対象とした勝田、村上⁸⁾や、W. D. Baines ら⁹⁾

図5 吹き止めフェンス周辺の平均風速ベクトル分布及び平均流線

(a) 積雪なし

(b) 堆積時間120分

(c) 堆積時間240分

図6 吹きだめフェンス周辺における模型雪の堆積時間別平均風速ベクトル分布及び平均流線

の調査結果と良く対応しており、本実験の妥当性が確認できる。

これに対し吹きだめフェンスにおける模型雪の堆積時間0分（積雪なし）の場合（図6(a)）、下部開口から風が風下に流れ込むため、フェンス前面の渦と逆流域は観察されない。フェンス風下側には、S字の流れと更にその後方に大きな渦領域が見られ、その渦内の風速は比較的低い。フェンス上部から剥離した流れは、 $X/H=8$ より後方で再附着しており、その影響で $X/H=3\sim7$ 程度の地上付近では逆流が

みられる。この逆流とフェンス下部からの流れが $X/H=3$ 付近の地上付近で合流する。

堆積時間120分における気流分布（図6(b)）をみると、積雪なしの場合と比較して、大きな変化は見られないが、フェンス下部の開口からの流れと、その風下側の逆流との合流点は、積雪がない場合と比較して風上側に若干移動し、 $X/H=2.67$ 程度となっている。この流れの合流点と、積雪のピーク位置（ $X/H=1.67$ ）は、一致せず、風は積雪のピークを乗り越える流れとなっている。なお、流れの合流位

図7 堆積時間240分時の気流性状

置は、実験風速 ($U_0 = 5 \sim 12 \text{m/秒}$) に依存しないことを、可視化実験により確認した。

堆積時間240分における気流分布 (図6(c)) では、積雪がない場合及び堆積時間120分の場合と比較して、流れの性状に変化がみられる。フェンス風上側では、吹きだまりのピークからの剥離により吹きだまりのピークの風下側に渦が発生している。この渦により、 $X/H = -0.67 \sim 0$ の範囲では吹きだまりのピークに向かう流れが形成され、吹きだまりを成長させる方向であることがわかる。また、フェンス下

部の開口からの流れとその風下側の逆流は、吹きだまりによって、流れが拘束され、その合流点は、吹きだまりのピーク位置である $X/H = 1.67$ と一致している。この流れにより、吹きだまりは、更に成長するものと考えられる。

堆積時間240分における流れについて、水平方向及び鉛直方向の平均風速、変動風速の分布を図7に示す。図7(a), (b)に示す平均風速は、それぞれの風速成分の平均値 $\bar{u}$, $\bar{w}$ を、フェンス風上側の基準点 ($X/H = -5.33$, $Z/H = 1.0$) における水平方向

の平均風速 U_0 で無次元化した値であり、図 7(c), (d) に示す変動風速とは、それぞれの風速成分の標準偏差 u' , w' を、基準点における水平方向の平均風速 U_0 で無次元化した値である。

水平方向の平均風速分布 (図 7(a)) をみると、フェンス風上側の $X/H < -0.67$ の範囲では、フェンスに近づくにつれて平均風速は徐々に弱まる。この平均風速の弱まりにつれて、積雪深が徐々に大きくなる。フェンス風下側では、フェンス下部開口からの流れと上部からの剥離の流れは、局所的に速い値を示し、フェンス風下の吹きだまりのピーク位置より風下側の逆流領域では、その風速値は小さい値を示す。

鉛直方向の平均風速分布 (図 7(b)) では、フェンス下部開口の風上側の部分、フェンス上部からの剥離領域及びフェンス下部開口からの流れが風下の吹きだまりに沿って流れる領域においてのみ、比較的大きな値が観察されるが、その他の領域においては、鉛直方向の流れは小さく、水平方向の流れが支配的であることがわかる。

水平方向及び鉛直方向の変動風速分布 (図 7(c), (d)) をみると、フェンス風上の吹きだまりピーク位置より風上側の領域には、変動風速が大きな領域はみられない。変動風速が最も大きい領域は、フェンス上部からの剥離領域である。積雪面上においては、吹き払いが顕著にみられるフェンス下部開口近傍で大きい値を示す。フェンス風下側では、広範囲に渡って変動風速が大きい。雪面に働く風の力は、風速の垂直勾配に比例するが、風速の垂直勾配の大きい領域では、乱れが生成される。つまり、変動風速が吹きだまりに与える影響は大きい。

4. まとめ

下部に開口を持つ 2 次元の吹きだめフェンスを対象として、その周囲の吹きだまり性状と気流性状を風洞実験により調査した結果、以下のことが得られた。

- (1) 吹きだまりの形成に従って、雪面付近の流れの性状は変化し、その流れの変化は、吹きだまりを更に大きくする方向に働く。
- (2) フェンスの風上側では、フェンス直下の吹き払い領域を除き、平均風速が小さいほど積雪深は大きい値を示す。

- (3) 顕著な吹き払いが発生するフェンス近傍の領域では、変動風速は大きな値を示す。

5. おわりに

2 次元の吹きだめフェンスを対象として、吹きだまりの堆積過程を測定し、それぞれの吹きだまりの堆積過程における気流性状を詳細に調査した。その結果、吹きだまり性状と気流性状のそれぞれの特性を把握した。今後も引き続き、この両者の関連性について検討を進めたい。

参考文献

- 1) Iversen, J. D. : Drifting snow similitude—transport rate and roughness modeling, *Journal of Glaciology*, 26, pp.393-403, 1980.
- 2) Anno, Y. and Konishi, T. : Modeling the effects of a snow fence by means of activated clay particles, *Cold Region and Technology*, 5, pp.43-58, 1981.
- 3) 本郷 剛, 苫米地司, 上田 宏, 土谷 学 : 2 次元フェンス周りの雪の吹きだまりに対する気流の影響, 日本雪工学会大会論文報告集, Vol. 16, pp.27-28, 1999.12
- 4) 本郷 剛, 土谷 学, 苫米地司, 上田 宏 : 2 次元フェンス周りの雪の堆積に対する気流の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.105-106, 1998.09
- 5) 上田 宏 : 変動圧カシステムにおける動的応答特性とその補正方法について, 清水建設研究所報, No.53, 1982
- 6) F. E. Jorgensen : Characteristic and Calibration of Triple-Split Probe for Reversing Flows, *DISA Information*, No.27, pp.15-22, January 1982
- 7) 苫米地司ほか : 2 次元フェンス周辺の吹きだまり性状について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.107-108, 1998.09
- 8) 勝田高司, 村上周三, 正田良次 : 建築周囲気流に関する実験的研究 (IV) —外壁面突起物周辺における気流の性状に関する風洞実験—, 日本建築学会論文報告集, No.180, 1971.2
- 9) W. D. Baines : Effects of Velocity Distribution on Wind Loads and Flow Patterns on Buildings, *Proc. of Wind effects on Buildings and Structures*, Vol.1, pp.197-225, 1963