

モデル建物近傍における積雪深の日別観測

One-day Observations of Snowdrifts Around a Model Cube

老川 進^{*1}・苫米地 司^{*2}
Susumu Oikawa Tsukasa Tomabechi
石原 孟^{*1}
Takeshi Ishihara

ABSTRACT

An investigation of the snowdrifts around a model cube in a field observation was conducted in January and February of 1998 in Sapporo, Japan. The cube, which was made from plywood sheets, 1.0m on each edge, was set on the false floor (0.5m height×10m width×10m length). The observation duration of each run was one day.

The results show that the snowdrifts with the largest depths were windward of the cube, followed by large snowdrifts on each side and leeward of the cube. The strong erosion areas were observed to be nearly surrounding the cube. It was found that when the wind speed exceeded about 4m/s, the wind scoop, which was combination of areas with a high snow deposit and those without, formed. This wind speed corresponded to the threshold friction velocity of 0.15-0.20m/s, which agrees with those found in previous studies.

Keywords

1. はじめに

多雪地域に建物を建設する際には、建物近傍の吹きだまりが問題となる。多雪地域の冬季における生活環境を安全に、そして快適なものとするために建物近傍の積雪を予測し、かつ適切な積雪対策を行うことが重要である。建物周囲の流れは、壁面での剥離、建物の風上側や後流での渦の生成など複雑な3次元的な流れ場となっている。建物近傍の雪の吹きだまりや吹き払い現象はこれらの流れの影響を強く受ける。建物近傍の積雪現象を調べるには、模擬雪を用いた降雪風洞による積雪予測が有用な手法とされ、多くの研究が行われてきた^{1, 2, 3, 4, 5)}。しかし、自然雪を対象とした観測が少ないため、風洞実験に

よる建物近傍の積雪現象の再現性については十分に解明されていない。

野外において建物近傍の積雪観測を行った研究はこれまでに幾つか報告されている^{6, 7, 8, 9, 10)}。例えば、小林⁷⁾は北海道にて観測小屋周囲の積雪観測を行い、小屋周りに柄杓の形をした Wind scoop と呼ばれる吹きだまりと吹き払いの積雪パターンを示した。この観測は、2ヶ月程度の期間の累積した積雪パターンの観測結果である。また、成瀬ら⁸⁾は北海道の石狩町花川にて集合住宅地内の積雪深分布を計測した。その結果、建物風上側と側面には積雪のない吹き払い領域が形成され、建物群内の中庭は吹きだまり領域が、そして風下には吹きだまりの尾根

* 1 清水建設(株)技術研究所

* 2 北海道工業大学 教授

[本稿受理：1999年4月23日，修正原稿受理：1999年8月10日，討論期限：2000年9月30日]

が長く伸びることなどの積雪パターンを示した。この観測は短いものでも数週間を越える期間の累積された積雪深の観測結果である。苫米地ら¹⁰⁾は、立方体形状の建物周囲の積雪観測を行い、建物の周囲に馬蹄状の大きな Wind scoop が形成されたことを報告している。この結果も2ヶ月の長い観測期間で得られたものである。これらの研究では、冬季における長期間で得られた建物近傍の積雪パターンを対象としているため、観測期間における風向および風速の状況を明示していない。

それ以外に、真木⁶⁾は1970年南極において、高さ45~90cm程度の円柱および2個配列した直方体近傍の積雪深の観測を行っている。その結果、障害物の周囲に窪んだ吹き払い域を観測し、その周辺との境界は鋭く尖った峰をもった吹きだまりが生じることを示した。観測期間は5日間であり、また日最大瞬間風速は30m/sを越える気象条件下で観測されている。また、Mitsuhashi⁹⁾は、1978年の3~11月において南極の昭和基地にある高床式建物背後の積雪観測を行った。その結果、高床建物の影響により建物風下の下部がU字型に吹き払われていること、風下に沿って鋭い峰形状の吹きだまりが主風向に沿って形成されていること、建物高さの5倍の風下距離に顕著な吹きだまりが形成されることなどの現象を明らかにした。25回のブリザードの観測を行い1回の観測時間は6~280時間であり、観測期間の風速は毎秒数メートルから30メートルの範囲にある。また、積雪深は毎回のブリザードを累積した堆積形状の計測結果である。これら2つの観測は、瞬間最大風速が20~30m/sを越える南極の気象条件下で行われ、雪の移動限界風速といわれる4~5m/s程度の低い風速条件の検証データとしては使いにくい。

以上の様に既報の観測は長い観測期間の累積された積雪状況の結果であり、この間種々の気象条件下にさらされている。この様な状況の下で形成された野外の積雪現象と風洞内の積雪現象とを比較することは容易ではなく、風洞実験の相似則の検討を行うための短期観測データの蓄積が望まれる。

そこで本研究では、冬季間、立方体形状の建物モデルを野外の仮床上に設置し、建物近傍の積雪深の日観測を行った。本観測は、従来の観測とは異なり、1日単位の短期間の観測を行ったために、ほぼ一定な気象条件下のデータを得ることができ、また、時間経過による雪の構造変化を避けることができた。本観測は、自然雪、自然風を利用した一種の屋外モデル実験といえる。

2. 観測方法

観測は、札幌市手稲区の北海道工業大学のグラウンド内にて1998年1~2月に実施した。建物モデルは、一辺が1mの立方体形状のモデルを高さ0.5mの仮床上(10m×10m)に設置した。建物および仮床は表面を防水塗装した合板で製作し、建物モデルの大きさは、雪面からの雪粒子の跳躍高さの影響、幾何学的相似の問題(雪粒子径および地上積雪深などと模型代表長さの比)と積雪深を計測する簡便さなどの兼ね合いから1mに定めた。

仮床の風上側約200mは平坦な雪原であり、その先には住宅地が続いている。また仮床の風下約40mは平坦な雪原である。本観測期間における仮床高さと同側の積雪高さは概ね同一であり段差はない。図1に観測の概要図を示し、写真1に仮床面に設置したモデル建物の状況を示す。

積雪深の計測は、観測期間を1日単位とし観測開始時には前日までに堆積した仮床上の雪を除雪した。

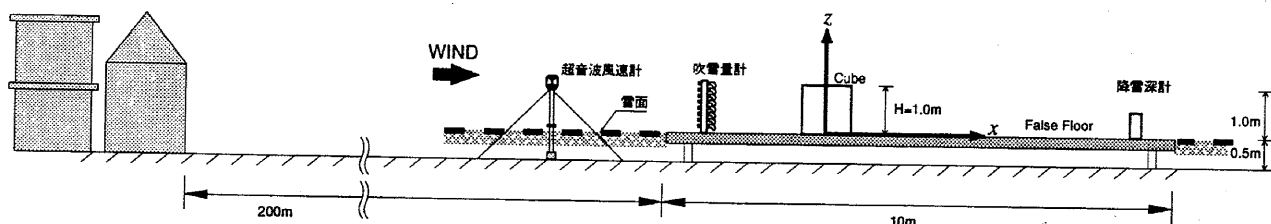


図1 観測概要図

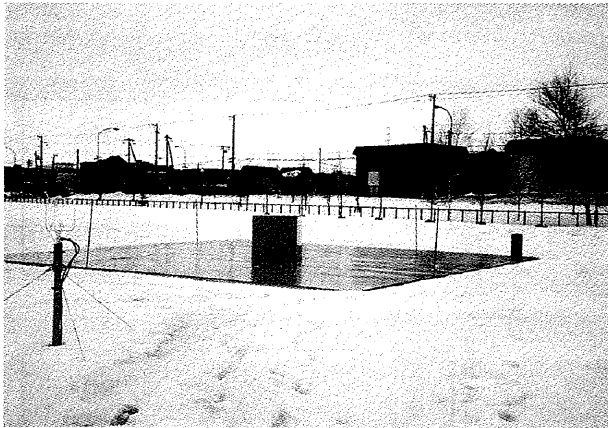


写真1 建物の設置状況

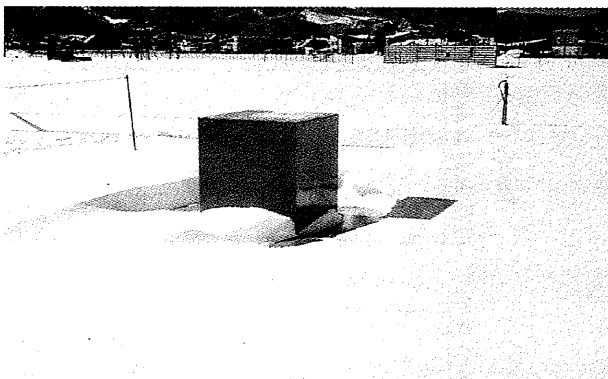


写真2 建物近傍の積雪状況 (写真の奥方向が風上)

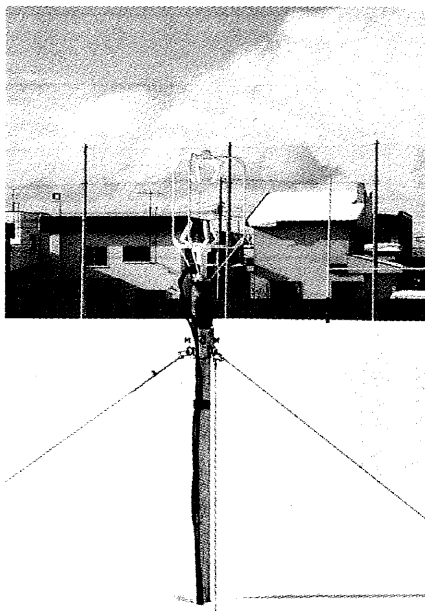


写真3 超音波風速計の設置状況

これは、できるだけ一定な気象条件のデータを得ること、および新雪を対象とし時間経過による雪の構造変化を避けることなど現象の単純化を目指したことによる。積雪深は、仮床上に規則的な間隔

(20~50cm 間隔) で配置した合計約700点の測定点を1地点毎に積雪深尺(長さ1m 直径1cm のステンレス製)をさし込み、仮床面から雪面までの高さを5mm 単位で計測した。写真2には建物周囲の積雪状況を示す。1日の降雪量は、仮床上の基準点にて降雪深箱(高さ70cm, 断面25cm×25cm)に積もった深さ(D_{up})を計測した。降雪深箱での積雪深と風下の比較的建物の影響を受けにくい仮床上の積雪深とはほぼ同じ深さであった。

積雪深のデータは、積雪深比 R (=測定点の積雪深(D_g)/基準点の降雪深(D_{up}))で整理した。ここでは、 R が1以上を吹きだまり、1未満を吹き払いと定義する。また、吹雪量は、高さ10~100cm までの10cm ごとの高度に吹雪量計¹⁰⁾(内径43mm, 長さ20mm のエンピ管に雪溜め用のガーゼを取付けたもの)を設置し、1日に捕集した雪の重量を計測した。また、降雪の有無は、ビデオカメラによる連続的な観測を行い目視により判定した。

風上側の風向、風速は超音波風速計にて計測した。写真3には超音波風速計の設置状況を示す。設置高さは雪面から1mであり仮床に設置したモデルと同一高さである。サンプリングは1Hzで行い1時間における3600個のデータの平均値を算定した。また、同時に3杯風向風速計による測定を補完的に行った。

本研究では2つの座標系を用いた。1つは、流れの解析に用いた座標で、1時間における平均風向 θ_n を算定し、平均風向に沿って流れる風を x 座標、それに直交する方向を y 座標とした(時間毎に変化する座標で小文字で表示)。他の1つは、積雪深分布の表示に用い、座標原点は建物の中心とし、卓越風の風上側の建物前縁に対し垂直方向を X 軸、スパン方向を Y 軸と表示した(固定座標で大文字で表示)。鉛直座標の原点は仮床表面とし、小文字 z 、大文字 Z とも同一方向を表す。

3. 観測結果

3.1 気象条件

観測は1998年1月4日~2月4日に実施した。観測日と気象条件を表1に示す。各ケースの観測時間はその日の午後より翌日までの24時間である。表に

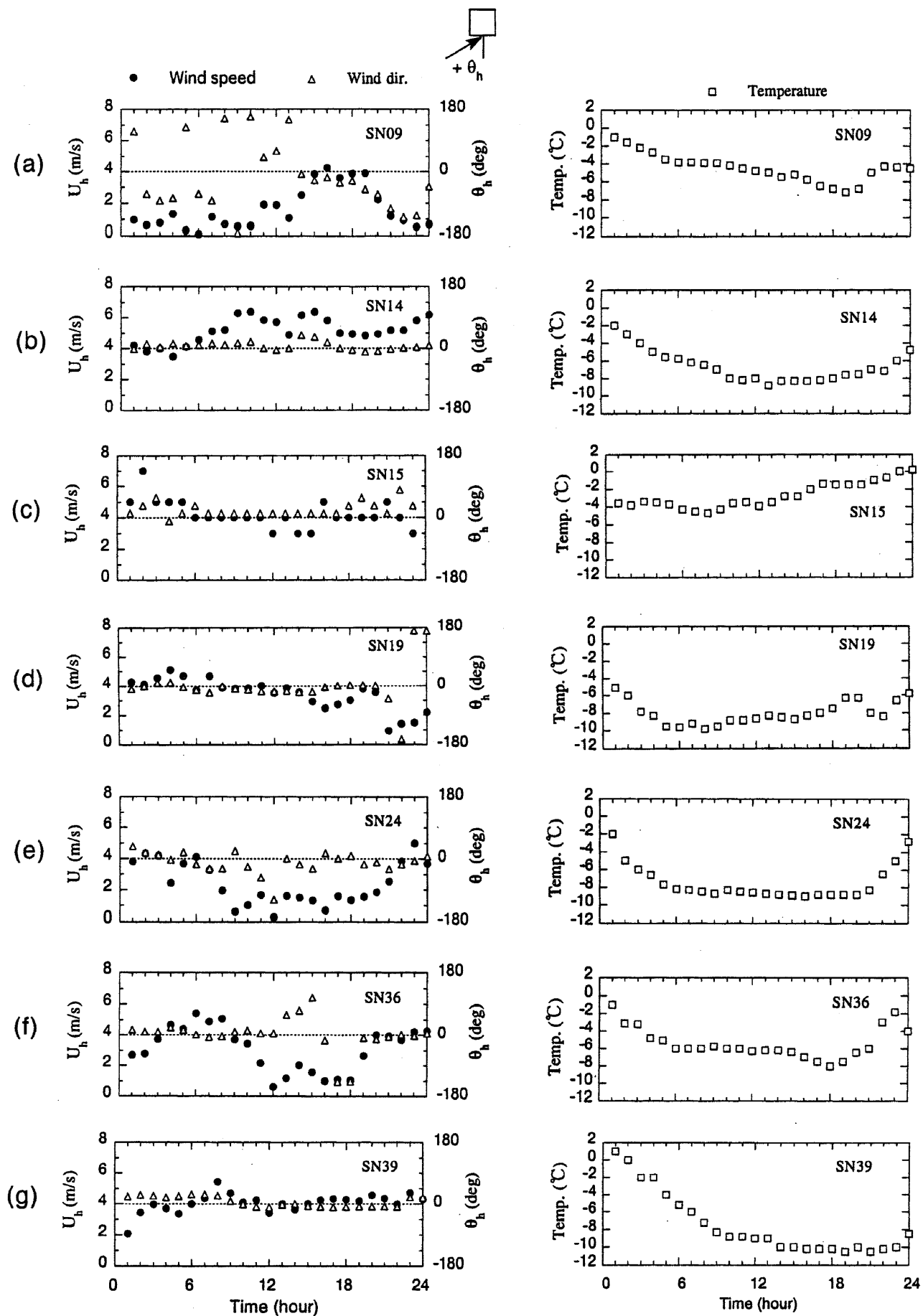


図2 平均風速，風向，気温の経時変化

表1 野外観測一覧表

(表中の気象データは日平均値を表す)

Case No.	観測日	基準点降雪深 D_{up} (cm)	平均風速 U (m/s)	σ_u (m/s)	最大風速 U_{max} (m/s)	平均風向 θ (deg)	σ_θ (deg)
SN09	1月4日	20.0	1.7	0.84	4.3	-15	41
SN14	1月9日	5.0	5.2	1.57	6.4	8	18
SN15 *1	1月10日	5.0	4.6	---	7.5	23	---
SN19	1月14日	10.0	3.4	1.10	5.1	-1	20
SN24	1月19日	5.0	2.4	1.18	5.0	-11	38
SN36	1月31日	20.0	3.1	1.10	5.4	1	28
SN39	2月3日	7.0	4.1	1.26	5.5	7	17

(*1)SN15は、超音波風速計データの欠測により3杯風速計のデータを使用。

示した気象データは、1時間平均値(添字h)の24個のデータを平均した日平均値(添字なし)を示した。 U は日平均風速を、 σ_u は変動風速 u' の標準偏差の日平均値を、 U_{max} は1時間平均風速の日最大値を、 θ は日平均風向を、 σ_θ は風向変動の標準偏差の日平均値を表す。観測期間において基準点降雪深 D_{up} が5cm以上になった11ケースの中から比較的風向が安定していた7つのケースを解析対象とした。図2に各ケースの1時間平均風速 U_h 、風向 θ_h および気温Temp.の時間推移を示す。風向が不安定となる状況は、1~2m/s前後の弱風時にみられ(SN09など)、風速3m/s以上のケース(SN14, 15, 39)では一定の風向を示している。すべてのケースの観測期間における気温は-11~+1℃の範囲にあり、乾雪を対象とした観測となっていることが分かる。

図3には、吹雪量の垂直分布を示す(欠測を除く5つのケースの平均値)。地表面(以下、仮床面を地表面と記す)に近づくにつれ吹雪量が増大する。図4には吹雪量と日平均風速の関係を示した。ここで吹雪量は3高度($z=10, 20, 30$ cm)の平均値を用いた。風速が大きいほど地表近傍の吹雪量が多い。竹内ら¹³⁾は、石狩川で雪面上の飛雪流量の観測から高さ20cmで、2~20($g/m^2 \cdot sec$)の飛雪流量を得ている。本観測のケース14では、高さ10~30cmの平均値が約1.5($g/cm^2 \cdot 日$)の吹雪量である(図4)。これをビデオカメラの目視観測で得た吹雪継続時間(4時間)をもとに、竹内らのデータと同一

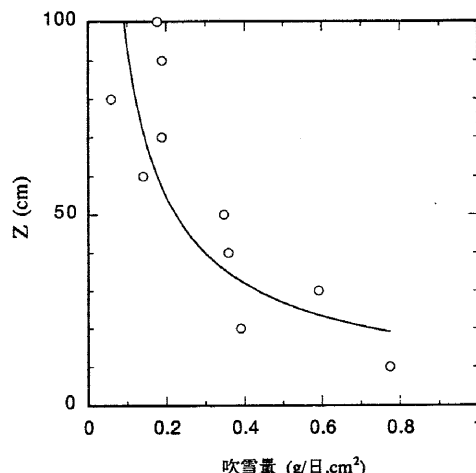


図3 吹雪量の垂直分布 (5ケースの平均値)

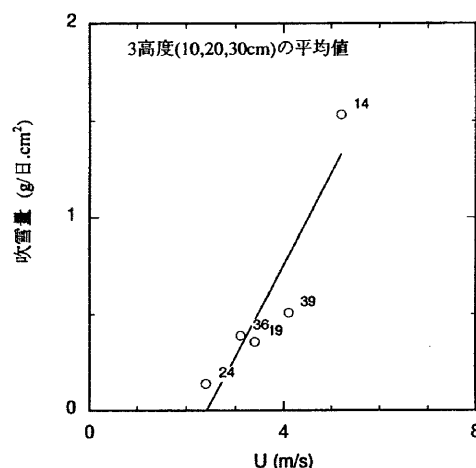


図4 吹雪量と日平均風速の対応 (図中の数字はケースNo.を表す)

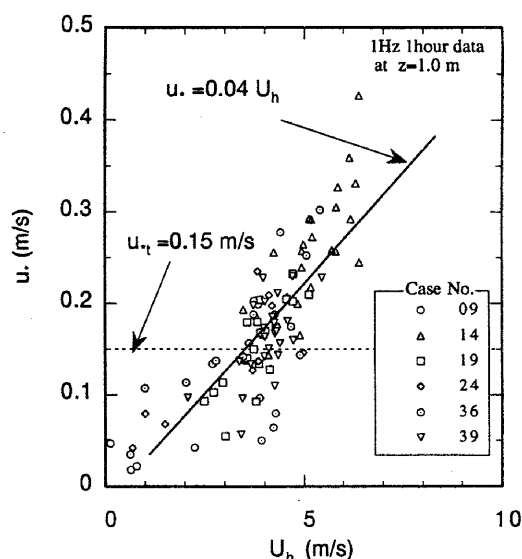


図5 時間平均風速 U_h と摩擦速度 u_* の対応($z=1$ m)

単位で比較すると0.7 (g/m²・sec) 程度となり、彼らの得た下限値に近い。

図5には、地表高さ1mにおける1時間平均風速 U_h と摩擦速度 u_* の関係を示した。ここで摩擦速度 u_* は、 $u_* = \sqrt{-\overline{u'w'}}$ として渦相関法により求めた。 u' 、 w' は各々平均風向および鉛直方向の変動風速成分を表す。風速の増大とともに摩擦速度は大きくなり、その関係はおおむね $u_* = 0.04U_h$ で表される。西尾ら¹²⁾ は札幌の観測で、 $u_* = 0.04U$ を得ている。摩擦速度 u_* は、雪粒子の移動や軌跡に深く関与する指標である。新雪 (dry uncompacted snow) では、雪粒子が移動を始める移動限界摩擦速度 u_{*c} の値が、0.14m/s (Iversen)¹³⁾、0.15m/s (Kind)¹⁴⁾、0.25m/s (Tabler)¹⁵⁾ と報告されている。ここでは参考に $u_{*c} = 0.15\text{m/s}$ の値を図中に点線で示した。

3.2 建物近傍の積雪パターン

図6には積雪深比 R の分布を示す。この分布図は地表700点での積雪深比 R のデータを用いて等コンター線を描いたものである。濃い色ほど積雪深比が大きいことを表す。図6(a)は $U = 1.7\text{m/s}$ (SN09)、図6(b)は $U = 3.4\text{m/s}$ (SN19) の場合であり、両ケースとも建物風上側には比較的大きな吹きだまりが生じている。建物前面から側面へかけての増速域に相当する所では吹き払いが生じており、その外周を囲むように吹きだまりが生じている。図6(c)には $U = 5.2\text{m/s}$ (SN14)、図6(d)は $U = 4.6\text{m/s}$ (SN15) における積雪深比 R の分布を示す。図6(a)、6(b)よりも相対的に風速が強いこれらのケースは、 R が0に近い強い吹き払い域が建物からやや離れた風上側、側面および風下側に建物周囲を取り囲むように形成されている。

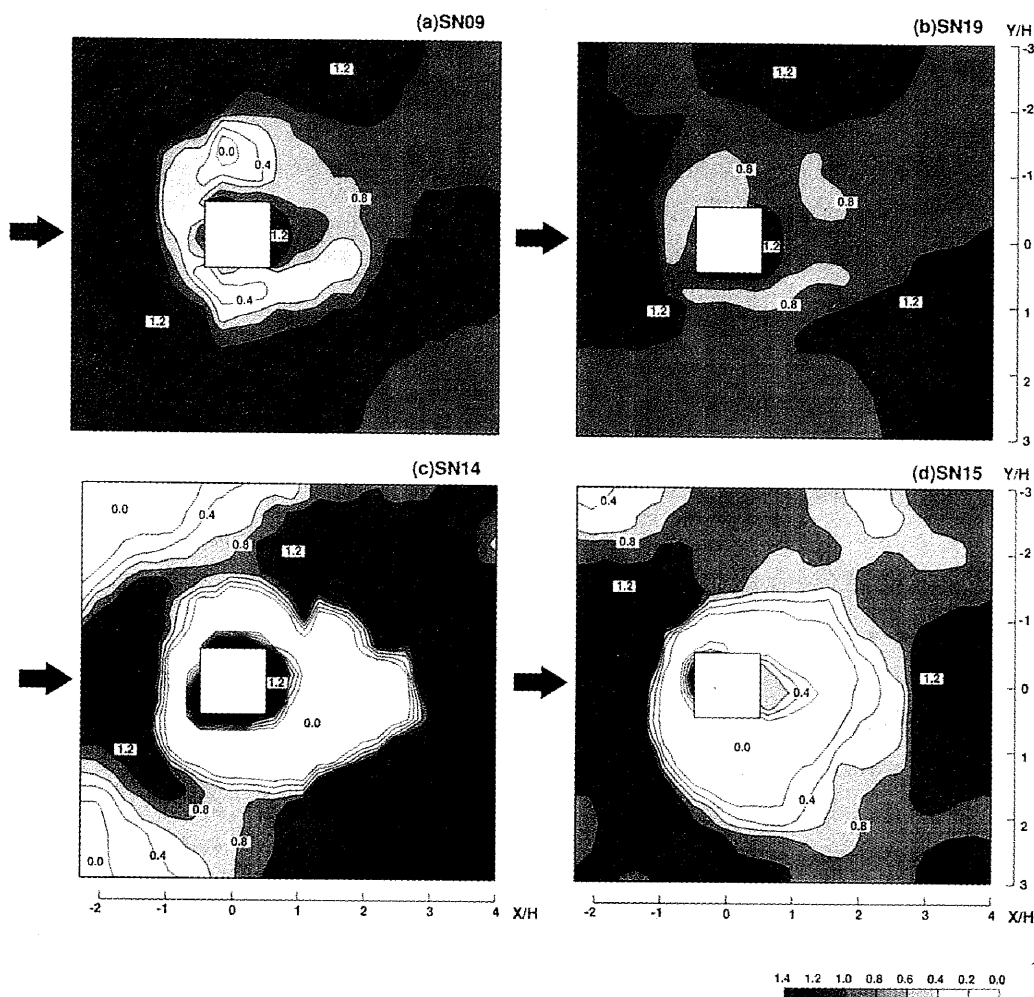


図6 地表面の積雪パターン

- (a) ケース9 ($U = 1.7\text{m/s}$) (b) ケース19 ($U = 3.4\text{m/s}$)
(c) ケース14 ($U = 5.2\text{m/s}$) (d) ケース15 ($U = 4.6\text{m/s}$)

3.3 建物風下側の積雪深と風速との関係

図7は、中心軸上 ($Y/H=0$) における建物風下の4つの位置 ($X/H=1.5, 2.0, 3.0, 4.0$) で得られた積雪深比 R と日平均風速 U との対応を示す。図中の数字はケース No. を表す。建物風下 $X/H=1.5$ および $X/H=2.0$ (図7(a), 7(b)) の位置では、日平均風速 4 m/s を越えると、どのケースも積雪深比 R がほぼ0となり吹き払いが生じている。 $X/H=3.0$ (図7(c)) の位置では、風速が増大すると積雪深比は小さくなるが、 $R=0$ の様な領域が現れていない。さらに $X/H=4.0$ (図7(d)) の風下の位置になると、風速が増大しても顕著に吹き払いはみられない。これらの図から建物風下での強い吹き払いの有無は、日平均風速 4 m/s を境に生じていることが分かる。

図8には、中心軸上 ($Y/H=0$) の風下側におけ

る積雪深比 R の垂直断面を表す。横軸の $X/H=0.5$ の位置はモデル建物の後面を表す。日平均風速が 4 m/s 未満のケースでは (図8(a)), 風下に顕著な吹き払いが生じない。一方、日平均風速 4 m/s 以上の風速では (図8(b)), 建物から離れた $X/H=1.5 \sim 2.5$ の範囲において強い吹き払いが生じており、また、 $X/H=2.5$ 付近から徐々に吹きだまり域に移行している。

3.4 建物風上側の積雪深と風速との関係

図9には、建物からやや離れた風上側 ($X/H=-1.5$) の吹きだまりの積雪深比 R の最大値と日平均風速 U との対応を示す。日平均風速が強くなるほど、積雪深比 R の最大値は増大することが分かる。風速による積雪深比の増加は、図4に示す吹雪量の増大と建物近傍の流れ場の相互作用により生じた結

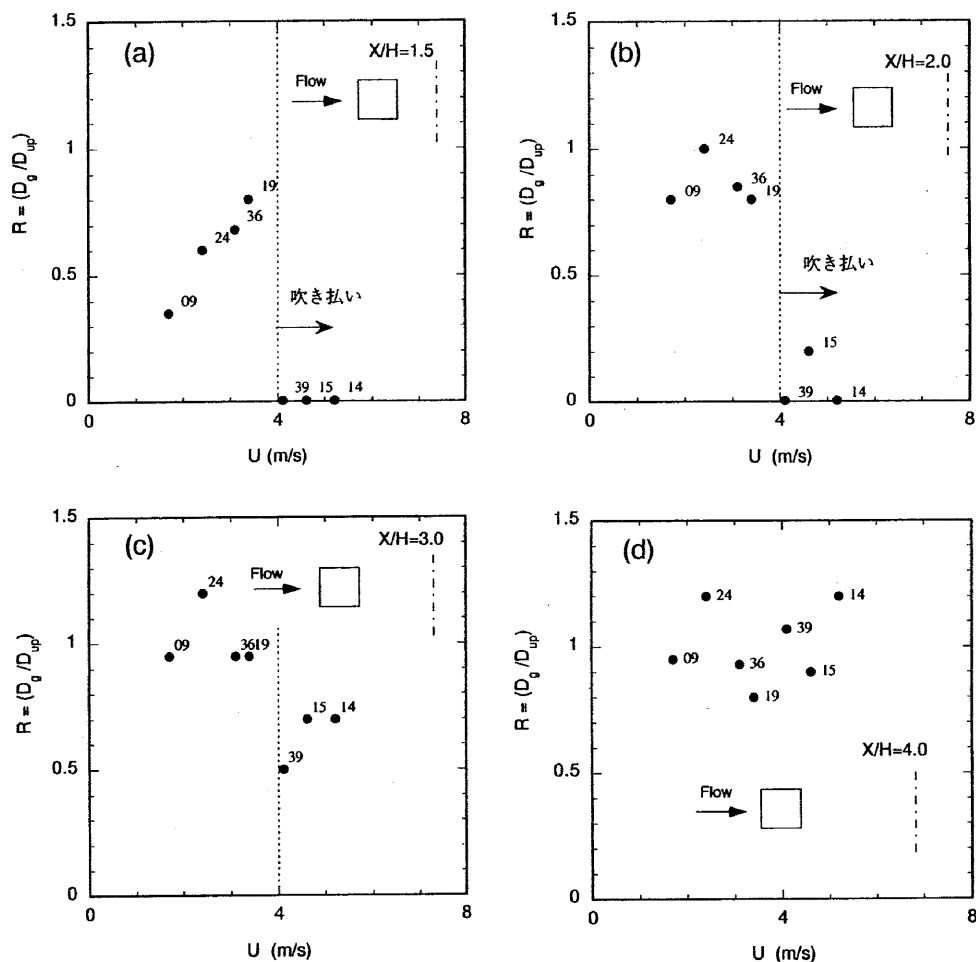


図7 各風下位置における積雪深比と日平均風速
 (a) $X/H=1.5$ (b) $X/H=2.0$ (c) $X/H=3.0$ (d) $X/H=4.0$

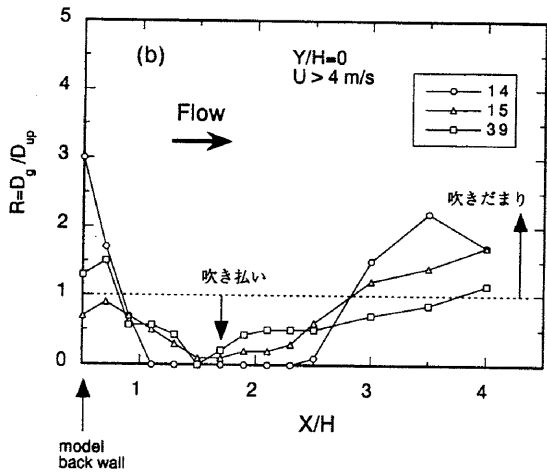
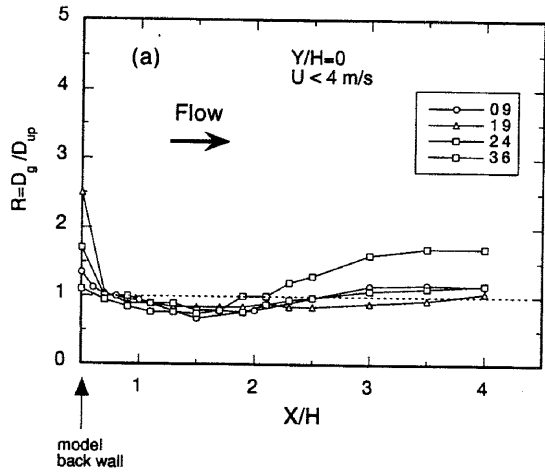


図8 建物風下の積雪深比の垂直断面 (Y/H=0)

(a) 日平均風速 4 m/s 未満

(b) 日平均風速 4 m/s 以上

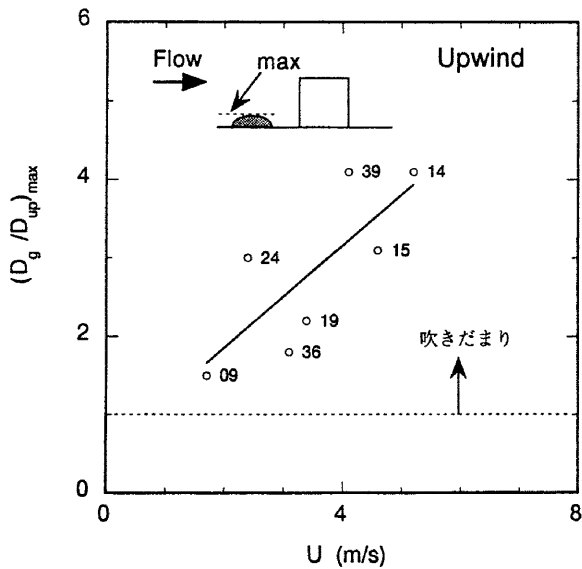


図9 建物上流の最大積雪深比と日平均風速

果と考える。

図10には中心軸上 (Y/H=0) における風上側の積雪深比Rの垂直断面を表す。横軸のX/H=-0.5の位置はモデル建物の前面を表す。日平均風速が4 m/s 未満のケース (図10(a)) および4 m/s 以上のケース (図10(b)) とも、建物からやや離れた風上側 (X/H=-1.5) に吹きだまりが形成されている。

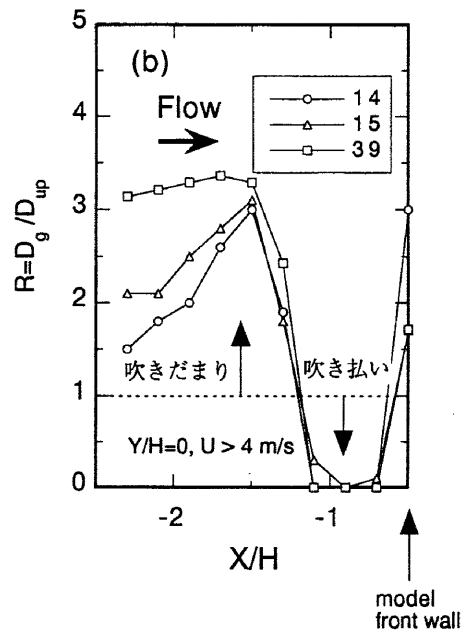
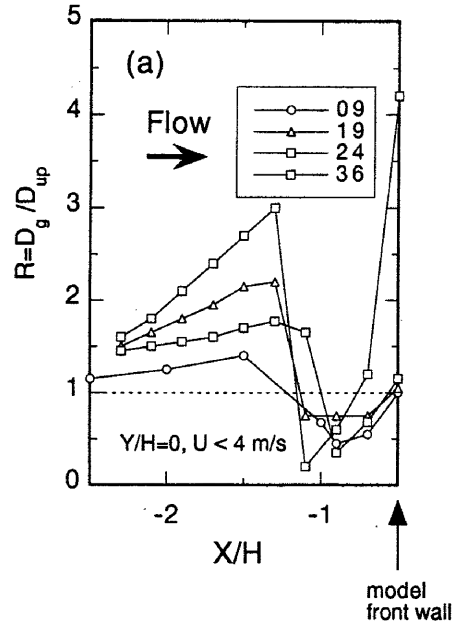


図10 建物風上の積雪深比の垂直断面 (Y/H=0)

(a) 日平均風速 4 m/s 未満

(b) 日平均風速 4 m/s 以上

また、4 m/s 以上 (図10(b)) の場合、建物前面 ($X/H \approx -1$) には $R=0$ に達する強い吹き払いが形成されている。

図10と図8を考え合わせると、建物周りの Wind scoop の出現は、日平均風速が 4 m/s を越えた条件で起こっていることが分かる。風速 4 m/s は、摩擦速度 u_* で見た場合、と 0.15~0.16m/s の値に対応し (図5)、過去の研究における雪粒子が移動開始を始める移動限界風速 $u_{*c} = 0.15\text{m/s}$ と概ね適合する。

4. まとめ

冬季間、札幌市郊外にて野外に立方体 (一辺 $H=1.0\text{m}$) の建物モデルを仮床に設置し、1日単位の積雪深計測を行った。その結果を以下にまとめる。

(1) 建物の風下側において、日平均風速が 4 m/s 未満のケースでは風下に顕著な吹き払いが生じない。一方、4 m/s 以上の風速となると建物中心から $X/H \approx 1.5 \sim 2.5$ 離れた風下に強い吹き払いが生じる。この吹き払い域は、 $X/H \approx 2.5$ 付近から徐々に吹きだまりへ移行する。

(2) 建物のやや離れた風上側 ($X/H \approx -1.5$) には、吹きだまりが形成され、日平均風速の増大とともに高くなる。また、日平均風速 4 m/s を越えると建物前方に積雪深比が 0 に達する強い吹き払い域が形成される。

(3) 日平均風速が 4 m/s を越えると、建物周りに吹きだまりと吹き払いを組合わせた Wind scoop の積雪パターンが顕著に現れる。この風速は、 $u_* = 0.16\text{m/s}$ に相当し過去の研究における雪粒子が移動開始を始める移動限界風速 $u_{*c} = 0.15 \sim 0.20\text{m/s}$ によく対応している。

謝辞

観測にあたっては、北海道工業大学建築雪氷研究室の皆様が大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

文献

- 1) 黒田, 木下: 風洞による人工吹雪の実験報告, 日本雪氷学会協会論文集, 144-158, 1940
- 2) 木村, 吉阪: 建物周囲の吹溜り積雪状況に関する模型実験 (第1報), 雪氷, 4(3), 16-19, 1942
- 3) Anno, Y. and Tomabechi, T.: Development of a Snowdrift Wind Tunnel, Cold Regions Science and Technology, 10, 153-161, 1985
- 4) 苔米地司, 遠藤明久: 建物周辺の吹きだまり対策に関する基礎的研究, 日本雪工学会誌, 1, 4-11, 1986
- 5) 三橋博巳: 建物周辺の雪の吹溜まり予測に関する研究—高床式建物の人工吹雪風洞実験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 659-660, 1985
- 6) 真木太一: 簡単な物体によってできる雪の吹きだまりに関する研究, 南極資料, 53, 33-44, 1975
- 7) 小林俊一: 障害物付近の雪の吹溜りと飛雪空間密度, 低温科学物理編, 34, 237-240, 1976
- 8) 成瀬廉二, 油川英明, 石川信敬: 札幌市における雪の堆積分布の特性, 低温科学物理編, 36, 139-153, 1978
- 9) Mitsuhashi, H.: Measurement of Snowdrifts and Wind Profiles around the Huts at Syowa Station in Antarctica, Antarctic Record No.75, 37-56, 1982
- 10) 苔米地司, 橋本茂樹: 屋根面で発生する吹雪に関する一考察, 日本雪工学会誌, 9, 92-98, 1993
- 11) 竹内政夫, 松沢 勝: 吹雪粒子の運動と垂直分布, 雪氷, 53, 309-315, 1991
- 12) 西尾文彦, 石田 完: 地ふぶきにおける乱れのエネルギー消散率, 低温科学物理編, 31, 69-85, 1973
- 13) Iversen, J. D.: Drifting Snow Similitude, J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 105 (HY6), 737-753, 1979
- 14) Kind, R. J.: A Critical Examination of the Requirements for Model Simulation of Wind-Induced Erosion/Deposition Phenomena such as Snow Drifting, Atmos. Env., 10, 219-227, 1976
- 15) Tabler, R. D.: Self-similarity of Wind Profiles in Blowing Snow Allows Outdoor Modeling, J. Glaciology, 26, 421-434, 1980