2 段屋根建物試験体を用いた吹きだまり性状の屋外観測 Field Measurements on Snowdrift on Two-level Flat Roof Model

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

When estimating snow accumulation on a building roof in a heavy-snowfall district, for structural and architectural planning, it is important to know its volume and drift. The snowdrift on and around buildings is usually investigated by snow wind tunnel tests. However, some of the similarity law has not yet been clarified. Then it is not easy to conduct such tests. To clarify the similarity law of snow wind tunnel tests, it is necessary to investigate the relationship between the wind property and snowdrift.

The purpose of this study was to clarify the relationship between snowdrift on a building model and wind flow around it by a field observation. In the observation, two pieces of two-level flat roof building models were installed in the athletic field in Hokkaido, and snowdrift distribution, wind direction, wind velocity and temperature were measured every day for two winters. As the result, the property of the snowdrift patterns by wind direction and wind velocity was investigated.

Keywords : snowdrift, snow load, wind, field test

1. はじめに

北海道や本州の日本海沿岸などの多雪地域において、建築物の積雪荷重を評価する場合、その積雪量に加え、風雪時に生じる吹きだまりや吹き払いによって生じる偏荷重分布を評価することが重要である。

積雪分布は、建物形状やその周囲の状況、降雪量、雪質、そして、風速や風向を始めとする風の性状など様々な要因により変化することから^{1~4)}、その性状を把握することは、容易ではない。積雪分布を対象とした屋外観測による研究は、これまでに幾つか報告^{5~7)}などされている。これらの研究では、いずれも数週間から一冬期に渡る期間の観測を行い、その積雪性状を示している。また老川等⁸⁾は、立方

体モデル周辺の積雪分布に関しての日別観測を行い、ある特定の風向、風速と積雪分布との関係を示している。

屋根上の積雪分布に着目した場合、単純な陸屋根の場合は、屋根面内における積雪量の偏りは大きくはなく、問題となり難い。これに対して、セットバックし階段状となった屋根形状では、その下段の屋根において、大きな偏分布荷重となることが知られている。

本研究では、吹きだまりによる偏分布荷重が形成され易い階段状建物における積雪分布性状を明らかにすることを目的として、試験体を屋外に設置し、特定の風向、風速下における下段屋根上の積雪分布

*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・博士（工学）

*4 千葉工業大学建築学科 助教授・博士（工学）

[本稿受理：2001年8月22日，修正原稿受理：2002年1月14日，討論期限：2003年3月31日]

の観測を行った。その結果から、風向、風速の違いによる積雪分布性状の変化について報告する。

2. 観測方法

屋根面の吹きだまり性状の屋外調査は、北海道工業大学のグラウンド（札幌市手稲区前田）において実施した。観測期間は、2000年寒候期（1999年12月7日～2000年3月10日）及び2001年寒候期（2000年12月22日～2001年2月26日）である。観測場周辺の状況及び試験体の配置を図1に、試験体の概要を図2に、試験体をグラウンドに設置した状況を写真1に示す。試験体は、グラウンドのほぼ中央に設置し、周囲約80m以内は平坦で、その外側は、戸建て住宅地が広がる状況である。試験体は、2種類の高さの屋根面を持つ階段状屋根建物（以下、2段屋根建物）

を想定し、その大きさは、下段部分が高さ0.9m(H)、幅4.5m(5H)、奥行き5.4m(6H)、上段部分が高さ0.9m(H)、幅1.8m(2H)、奥行き5.4m(6H)で、下段屋根面と上段屋根面の長さ比は3:2とした。また、降雪が多い1月から2月にかけての地上積雪が0.5m程度の状況において、雪面上に試験体形状を維持できるように、試験体を地上から0.5m高さに設置した。試験体表面は、屋根面、壁面とも木製合板の塗装仕上げである。試験体は2体製作し、この地域の冬期の主風向に対して、下段屋根が風上側になる方向と、上段屋根が風上側になる方向に設置した。2000年寒候期の設置方向は、当地の気象観測記録を基に北西－南東軸とした。2001年寒候期は、2000年寒候期の観測結果において頻度が最も高い値を示した西北西－東南東軸とした。

(a) 観測場の周辺図 (札幌市手稲区前田) (b) 試験体配置図 (H=0.9m)

図1 観測場周辺の状況と試験体配置

図2 試験体の概要 (H=0.9m)

図3 試験体に対する風向角の定義

写真1 試験体の設置状況

写真2 下段屋根上の積雪断面
(2000年1月12日撮影)

写真3 積雪深計(左)と風向風速計(右)の
設置状況

屋根上の積雪分布の測定は、下段屋根上の中央断面位置を雪尺を用いて10cm間隔(2000年寒候期)または5cm間隔(2001年寒候期)で測定した。測定は、主として降雪後の毎正午前に行った。積雪断面の一例を写真2に示す。この写真は、手前側の屋根面上の雪を除去し、中央断面を切り出した状態である。観測にあたっては、一定風向下の積雪分布を得るために、屋根上に堆積した雪は毎測定後にす

べて除雪した。また、試験体の周囲の吹きだまりや吹き払いは、定期的に平滑化した。

基準となる風向、風速と積雪深を測定するために、試験体の影響を受けない風上位置に、矢羽根型風向計、三杯型風速計(地上高さ:1.8m)と超音波型積雪深計(広洋エレクトロニクス製:SSL-100)を設置し、10分毎に10分間の平均風速、最大の瞬間風速、最頻度風向などの常時観測を行った。使用した風向計の分解能は、方位軸を基準とした16風向である。また、試験体に対する風向角は、下段屋根が風上の場合及び風下の場合のそれぞれについて、図3に示すように、試験体に正対する場合を 0° として定義する。また、風速計の地上高さ1.8mは、下段屋根面の地上高さ1.4m($0.5\text{m}+0.9\text{m}$)と上段屋根面の地上高さ2.3m($0.5\text{m}+1.8\text{m}$)のほぼ中間的な高さに相当する。観測期間中の気温は、観測地点より約2km北西のアメダス観測点(観測所名:手稲山口, 所在地:札幌市手稲区手稲山口292番地)における毎正時の観測値を用いた。

3. 観測結果

降雪期間中における最頻度風向角と平均風速の違いによって分類した9通りの積雪深分布の観測結果を図4から図6に示し、それぞれの積雪が発生した期間の気象条件を表1に示す。

表1の「降雪期間」とは、試験体上を除雪した時以降に発生した降雪の始まり年月日時及びその降雪がやんだ年月日時を示し、()内にはその継続時間を示す。降雪の開始及び終了の時間は、超音波積雪深計の観測記録から判断した。「基準積雪深増分 S_d 」は、超音波積雪深計の観測記録から判断した降雪の開始及び終了時間における積雪深の差から求めた。なお、降雪の継続時間が概ね1日以内であること、気温がすべて氷点下であることから、その間の積雪の沈降は、無視できると判断した。風向、風速、気温は、降雪期間中におけるそれぞれの観測記録から求めた。最大の瞬間風速値の左には、その発生風向を示し、最大の10分間平均風速値の左には、その10分間における最頻度風向を示す。風向頻度分布のグラフの中央に示した長方形は、試験体の設置

表1 観測データ別の気象条件（風向、風速、気温、積雪記録）

気象条件	最頻度風向角	風向頻度分布 (%)	瞬間風速の最大値 10分間平均風速の最大値 降雪期間中の平均風速 10分間平均風速の最小値	最高気温 平均気温 最低気温	基準積雪深の増分Sd	降雪期間
A	0°		9.9 m/sec (WNW) 4.8 m/sec (NW) 2.9 m/sec 1.0 m/sec	-2.4 °C -4.6 °C -5.7 °C	7 cm	2001年1月30日18時 ↓ 2001年1月31日11時 (17時間)
B			11.7 m/sec (W) 6.0 m/sec (W) 2.3 m/sec 0.9 m/sec	-5.1 °C -7.2 °C -8.7 °C	30 cm	2000年2月24日23時 ↓ 2000年2月25日06時 (7時間)
C			6.1 m/sec (WNW) 3.5 m/sec (SSE) 1.2 m/sec 0.0 m/sec	-3.9 °C -8.1 °C -13.2 °C	11 cm	2001年1月22日08時 ↓ 2001年1月23日10時 (26時間)
D	22.5°		10.7 m/sec (WNW) 5.0 m/sec (NW) 3.5 m/sec 1.7 m/sec	-3.3 °C -5.5 °C -6.7 °C	15 cm	2001年2月19日22時 ↓ 2001年2月20日12時 (14時間)
E			9.1 m/sec (W, WNW) 5.0 m/sec (WNW) 3.3 m/sec 2.1 m/sec	-4.9 °C -5.9 °C -6.9 °C	20 cm	2001年2月25日01時 ↓ 2001年2月25日20時 (19時間)
F			8.9 m/sec (W) 4.9 m/sec (NW) 2.4 m/sec 0.4 m/sec	-6.7 °C -8.2 °C -10.8 °C	15 cm	2001年1月16日00時 ↓ 2001年1月17日00時 (12時間)
G	45°		13.0 m/sec (WNW) 6.5 m/sec (WNW) 3.9 m/sec 1.0 m/sec	-4.8 °C -6.2 °C -7.3 °C	22 cm	2000年1月11日12時 ↓ 2000年1月12日08時 (20時間)
H			8.9 m/sec (WSW) 5.1 m/sec (W) 3.1 m/sec 1.0 m/sec	-8.0 °C -10.6 °C -12.7 °C	19 cm	2000年1月25日15時 ↓ 2000年1月26日12時 (21時間)
I			5.2 m/sec (NW) 3.0 m/sec (WNW) 1.8 m/sec 0.0 m/sec	-7.1 °C -7.7 °C -8.7 °C	15 cm	2001年2月08日17時 ↓ 2001年2月08日22時 (5時間)

向きを示す。「最頻度風向角」は、最も頻度が高い風向と試験体との相対的な角度(図3)を示す。

図4から図6に示した下段屋根上の積雪深分布では、それぞれの左図が、最頻度風向に対して下段が風上側となる場合、右図が、最頻度風向に対して下段が風下側となる場合である。図の縦軸は、測定した積雪深 $S(\text{cm})$ を基準積雪深増分 $S_d(\text{cm})$ で除した積雪深比 S/S_d であり、図の横軸は、下段屋根上において上段壁面からの距離 x を上段壁面高さ H で除した値である。

(1) 最頻度風向角が 0° の場合

図4に、最頻度風向角が 0° の場合における下段屋根上の積雪深分布を示す。

表1に示す気象条件Aにおける下段が風上側となる積雪深分布(図4(a)の左図)を見ると、上段壁面位置($x/H=0$)では、 $S/S_d=2.0$ 付近まで積雪が

あるものの、その風下側($x/H=0.1\sim0.5$)には局所的な吹き払いが見られ、積雪深が $S/S_d=0.25$ まで急激に減少している。 $x/H=0.6\sim0.7$ において積雪深のピークが見られ、 $S/S_d=1.3$ 程度を示す。その風下側では、積雪深がなだらかに減少し、 $x/H>1.5$ では $S/S_d<1$ となり、端部($x/H=3$)において、 $S/S_d=0$ となる分布を示す。

一方、下段が風下側となる積雪深分布(図4(a)の右図)では、 $x/H=0.5$ に $S/S_d=1.2$ 程度のピークを持つ分布を示す。 $x/H>0.9$ では $S/S_d<1$ となり、 $x/H>1.3$ では $S/S_d<0.5$ の小さい値を示し、屋根面上の全積雪量は、下段が風上側の場合と比較してやや少ない。

ただし、図4(a)の測定値は、降雪期間中の最頻度風向は 0° であるものの、 22.5° の頻度もほぼ同様に高く、本来の主風向は正確には 0° ではない。また、

(a) 気象条件Aにおける積雪深分布(降雪期間中の平均風速: 2.9m/sec , 基準積雪深増分 S_d : 7cm)

(b) 気象条件Bにおける積雪深分布(降雪期間中の平均風速: 2.3m/sec , 基準積雪深増分 S_d : 30cm)

(c) 気象条件Cにおける積雪深分布(降雪期間中の平均風速: 1.2m/sec , 基準積雪深増分 S_d : 11cm)

図4 最頻度風向角 0° の場合における下段屋根上の積雪深分布

基準積雪深増分が7cmと小さいことから、相対的な誤差が大きい測定結果になりかねないが、主風向が 0° に近似した分布は他に得られなかったため、ここでは、本結果を示した。

気象条件 B における下段が風上側となる積雪深分布 (図 4 (b)の左図) を見ると、屋根全面に渡って、ほぼ均一な分布になっており、気象条件 A (図 4 (a)の左図) と比較して大きく異なる。積雪深比は、ほとんどの領域において $S/S_d > 1$ を示す。気象条件 A の場合と同様に $x/H = 0.1 \sim 0.5$ の局所的な吹き払いは見られるが、吹き払い量は小さい。

下段が風下側の分布 (図 4 (b)の右図) は、上段壁面位置 ($x/H = 0$) の $S/S_d = 2$ から $x/H = 1$ 付近の $S/S_d = 1$ まで徐々に減少、 $x/H = 2.5$ まではほぼ均一に堆積し、 $x/H < 2.5$ の位置で、やや減少を示す。

下段が風上側及び風下側の両方において、気象条

件 A と B の積雪深分布の形状が異なる要因として、風向分布及びその風向における発生風速の違いが挙げられる。気象条件 A では風向変化の幅が狭いのに対して、気象条件 B では風向分布が比較的分散し、最頻度風向は、風向角が 0° となる南東であるものの、風向角 22.5° (南南東)や風向角 135° (西)の風の頻度も比較的多く含まれる。更に、10分間平均風速の最大値である 6.0m/sec を示した風は、風向角 135° (西)であることから、この点のみに着目すると、図 4 (b)の左図は、後述する風向角 45° における下段が風下側の場合であり、図 4 (b)の右図は、風向角 45° における下段が風上の場合に相当し、図 4 (b)の右図の上段壁面付近の分布形状が、図 6 (b)左図の下段が風上側の分布に類似していることが説明できる。

気象条件 C における下段が風上側となる積雪深分布 (図 4 (c)の左図) は、上段壁面 ($x/H = 0$) 付近

図 5 最頻度風向角 22.5° の場合における下段屋根上の積雪深分布

を除いては、小さな凹凸があるものの、全体的には、 $S/S_d=1$ 程度の均一な分布形状を示す。これは一時的に強い風が吹いたものの、降雪期間中の平均風速は、1.2m/sec と弱いことによる。なお、上段壁面付近の局部的に大きな積雪は、上段壁面に付着した雪が落下し堆積したものであり、風による吹きだまりとは、形成過程が異なる。下段が風下側となる積雪深分布（図 4 (c) の右図）においても、 $S/S_d=1$ 程度の均一な分布形状を示す。

(2) 最頻度風向角が 22.5° の場合

図 5 に、最頻度風向角が 22.5° の場合における下段屋根上の積雪深分布を示す。

気象条件 D（図 5 (a)）と気象条件 E（図 5 (b)）の場合は、類似した積雪深分布の形状を示し、下段が風上側となる積雪深分布（左図）は、両者とも $x/H=0\sim0.5$ の位置に吹き払いが見られ、 $x/H=0.6\sim0.8$ の

位置に積雪のピークがある。ピーク位置から軒位置（ $x/H=3$ ）までは、ほぼ直線的に減少する。下段が風下側となる積雪深分布（図 5 (a), (b) の右図）では、 $x/H=0.3\sim0.4$ の位置にピークがあり、その位置より上段壁面側の吹き払い、下段が風上側となる場合と比較して小さい。屋根中央 $x/H=1.5$ においては、 $S/S_d<0.5$ となり、屋根面上の全積雪量は、下段が風上側の場合と比べて小さい。以上のように、気象条件 D と E における積雪深分布の性状は、気象条件 A における場合に類似している。

気象条件 F における下段が風上側となる積雪深分布（図 5 (c) の左図）は、気象条件 D（図 5 (a) 左図）及び E（図 5 (b) 左図）の場合の積雪深分布に見られた上段壁面近傍の窪みが小さくなり、全体的に $S/S_d=1$ 程度であるほぼ均一な積雪深分布を示している。これは、上段壁面近傍の窪みを形成するための渦の強さが、接近流

(a) 気象条件 G における積雪深分布（降雪期間中の平均風速：3.9m/sec、基準積雪深増分 S_d ：22cm）

(b) 気象条件 H における積雪深分布（降雪期間中の平均風速：3.1m/sec、基準積雪深増分 S_d ：19cm）

(c) 気象条件 I における積雪深分布（降雪期間中の平均風速：1.8m/sec、基準積雪深増分 S_d ：15cm）

図 6 最頻度風向角 45° の場合における下段屋根上の積雪深分布

図7 風速と風向角による下段屋根上の積雪分布性状の分類

の風速に伴って、小さくなったことによると考えられる。下段が風下側の積雪深分布（図5(c)の右図）において、上段壁面近傍の窪みが形成されていないのも、同様の現象によると考えられる。

(3) 最頻度風向角が45°の場合

図6に、最頻度風向角が45°の場合における下段屋根上の積雪深分布を示す。

気象条件Gにおける下段が風上側となる積雪深分布（図6(a)の左図）では、 $x/H=0$ において $S/S_d=1.3$ 程度の積雪深を示し、 $x/H=0\sim1$ の範囲においてほぼ直線的に積雪深が減少し、 $x/H=1$ 付近において積雪深が0となる。 $x/H=1\sim3$ では、 $S/S_d<0.25$ 以下の小さな丘状の堆積を示す。下段が風下側となる積雪深分布（図6(a)の右図）においては、気象条件D及びEの下段が風下側となる積雪深分布と類似した形状を示している。

気象条件Hにおける下段が風上側となる積雪深分布（図6(b)の左図）では、 $x/H=0$ において $S/S_d=2.25$ 程度の積雪深を示し、 $x/H=0\sim1$ の範囲において積雪深が減少し、 $x/H=1$ 付近において $S/S_d=0.75$ 程度となる。 $x/H=1\sim3$ では、やや丘状の堆積を示す。つまり、気象条件Gにおける場合の積雪深分布に一定値を加えた分布形状をしていると言える。下段が風下側となる積雪深分布（図6(b)の右図）においては、上段壁面近傍に極小さな窪みが見られるものの、気象条件Fの場合に近い形状であると言える。

気象条件Iにおいては、下段が風上側及び風下側となる両者（図6(c)）において、屋根全面に渡りほぼ一定の積雪深分布を示している。

4. 積雪分布性状の分類

以下では、下段屋根上の積雪分布性状を、風速と風向により分類した結果を示す。

図4～図6に示した積雪深分布を、I型～III型の3つに分類する。積雪深が一定となる分布形状をI型とし、上段壁面側に偏り、下段屋根の軒方向に向かって概ね単調に減少する分布形状をII型とし、下段屋根面中央より上段壁面寄りに積雪深のピークを持つ分布形状をIII型とした。なお、O'Rourke等⁹⁾は、今回の試験体とはやや異なる形状ではあるが、階段状屋根建物における積雪深分布について、「Triangular Drift」と「Quadrilateral Drift」に分類しており、ここで示すII型が前者に、III型が後者に相当する。それぞれが発生した風向、風速との関係を図7に示す。気象条件Bは、最頻度風向と強風が発生した風向が大きく異なることから、この図では省略した。

下段が風上側の場合（図7(a)）、降雪時の平均風速が2.3～2.4m/sec程度以下では、下段屋根上の積雪は概ね一定（I型）となり、それ以上の風速では、分布に偏りが生じる。その時、風向角が0°及び22.5°の場合は、上段壁面付近が吹き払われる分布形状

(Ⅲ型)となり、風向角が 45° の場合では、上段壁面側に偏る分布形状(Ⅱ型)となる。

下段が風下側の場合(図7(b))は、風向角が $0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲では、風向角による分布形状の差は小さく、風速による差が大きい。積雪がほぼ一定(Ⅰ型)となるのは、平均風速が約 2m/sec 以下の場合であり、下段が風上側の場合と比べて、その風速値はやや低い。次に、平均風速が 3m/sec 程度以下の場合には、上段壁面側に偏る分布形状(Ⅱ型)を示し、 3m/sec 程度以上の平均風速では、 $x/H=0.5$ 付近に吹きだまりのピークを持つ分布(Ⅲ型)を示す。これは、風速の増加により、上段壁面付近の渦が強くなり、上段壁面側が吹き払われることによると考えられる。

5. 終わりに

階段状屋根建物の下段屋根上における積雪深分布の形状とそれらが発生する風向、風速の関係を明らかにした。2冬期に渡り、ほぼすべての降雪について測定を行ったが、必ずしも必要とする観測値が揃わず、屋外観測の難しさを痛感した。

今後、吹雪風洞実験における相似則の検討や、気流性状を用いた吹きだまり予測の検討を行う上での有用な資料として活用していきたい。

なお本観測にあたっては、北海道工業大学建築工学科建築雪氷工学研究室の皆様、大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.41-48，2000.01.
- 2) 苫米地司他：屋上積雪形状と気象特性の関係について，第2回雪工学シンポジウム論文報告集，pp.25-32，1986.
- 3) 橋本茂樹他：屋根上積雪と風の諸性状との関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1021-1022，1993.
- 4) Taylor D. A. : Snow loads for design of cylindrical covered roofs in Canada, 1953-1980, Canadian Journal of Civil Engineering Vol.8, No.1, March 1981, pp.63-76.
- 5) Michael O'Rourke and Kamek El Hmadi : Roof snow load : Drifting against a higher wall, Proc. West Conf. Annu. Meet, USA, 55th, pp.124-132, 1987.
- 6) K. Suda, M. Kikuta and H. Maeda : Observations of snow accumulation on the roof of an actual domed structure, Snow Engineering : Recent Advances, Izumi, Nakamura & Sack, pp.291-295, 1997.
- 7) 苫米地司他：屋根面で発生する吹雪に関する一考察，日本雪氷学会誌，Vol.9, No.2, pp.92-98, 1993.4.
- 8) 老川 進他：モデル建物近傍における積雪深の日別観測，日本雪氷学会誌，Vol.15, No.4, pp.3-11, 1999.10.