HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ

学校法人北海学園 北 海 学 園 大 学 北 海 斎 科 大 学

タイトル	風洞実験手法による建築物の屋根雪偏分布形状の推定 について
著者	桜井,修次;阿部,修;城,攻
引用	工学研究 : 北海学園大学大学院工学研究科紀要, 8: 11-17
発行日	2008-09-28

風洞実験手法による建築物の屋根雪偏分布形状の推定について

桜 井 修 次* · 阿 部 修** · 城 攻***

Estimation of unbalanced roof snow accumulation by wind tunnel test

Shuji Sakurai*, Osamu Abe** and Osamu Joh***

1. はじめに

積雪寒冷地域に建設する工場や体育施設などの 大スパン構造物では、風の吹き払い・吹きだまり 効果に起因する屋根雪の不均等な分布形状(以下, 偏分布形状と記す)を適切に推定しなければなら ない.建築基準法施行令第86条「積雪荷重」は, 屋根雪の偏分布に関して,「屋根の両側の積雪量が 著しく違う場合は片側荷重による影響を考慮す る」と規定しているが,その評価法については記 述されていない.また「建築物荷重指針」¹⁾は,M 形屋根・のこぎり屋根およびセットバックのある 屋根の吹きだまりに関する屋根形状係数を示して いるが,大規模または特殊な屋根形状の建築物に おける屋根形状係数は,「建設地の気象条件および 屋根形状に対応した適切な調査・実験などに基づ いて定める必要がある」と指摘している.

屋根雪の偏分布形状を推定する手法の一つとし て,降雪風洞実験が挙げられる。筆者らは,人工 的に作られた雪(以下,人工雪と記す)を用いた 低温室内での降雪風洞実験により,信頼性の高い 屋根雪分布形状予測手法を検討してきた。実験モ デルとして,正方形水平屋根を有する実在建物を 選定し,その屋根雪実測資料と風洞実験結果とを 比較して,実験手法の照査を行った。一方,屋根 雪の偏分布現象は,屋根面近傍の気流性状と密接 な関連があるため,風工学の分野における風洞実 験手法や成果を利用して屋根雪分布形状を推定で きれば,建物の雪荷重評価の合理化に寄与するこ とができる。このため,一般の風洞実験により得 られる屋根面の風圧分布特性と降雪風洞実験によ り得られる屋根雪分布特性との基本的関係につい ても検討してきた。本報では,日本建築学会構造 系論文集に掲載された成果²⁾を基に,屋根雪の偏 分布形状評価に関連する実験的手法を概説する。

2. 実在建物の屋根雪分布調査

2.1 建物概要および気象条件

風洞実験モデルに供することのできる実在建物 の条件として、周辺に高い建物がないこと、冬期 間(主に1,2月)の風向が一定方向に卓越して いること、建物形状がシンプルであることが挙げ られる。これらの条件を満たす建物として、札幌 市郊外の浄水場内に建つ水平屋根を有する建物1 棟(以下,A棟と記す)を選定した。図1に平面 図・断面図を示す。平面は15.9m×15.9mの正方 形、屋根高さは8.3mで、たて横比はほぼ1:2 である。また、パラペット高さはおよそ0.4mで ある。なお、当該浄水場はやや谷状の地形に位置 しているが、風速の鉛直分布評価にかかわる地表 面粗度は区分II程度と考えられる。また、2001年 ~2006年の気象観測の結果、同地域における冬期

*北海学園大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

Professor, Dept. of Architecture, Hokkai-Gakuen University, Dr. Eng.

** 独立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄支所・総括主任研究員・博士(学術)

Professor Emeritus, Hokkaido University, Dr. Eng.

Principal Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Phirosophy *** 北海道大学 名誉教授・工学博士



図1 A棟の屋根平面図と断面図(●:目視観測点)

の主風向は,年度によって多少異なるが,西南西 (WSW) ~西北西 (WNW) の範囲に強く卓越し, 西方向 (W) が最多風向であることが認められた. またA棟の対角線方向と方角Wは概ね一致す る.日平均風速は,0.8~5.3 m/s の範囲となり, 平均値は2.0 m/s である.日最大風速は 2.1~10.7 m/s の範囲であり,平均値は4.7 m/s である.1月・2月の平均気温は-5.2°C,日最低 気温の平均値は-9.3°C,日最高気温の平均値は-0.3°Cである.

2.2 屋根雪分布の調査結果

筆者らは, 信頼性の高い屋根雪深さの測定法と して、空中写真測量技術を応用した方法を提案し てきた3.本研究では、この方法を用いてA棟屋根 面全体の詳細な積雪深分布を得ることができた. 図2に、10 cm ごとの等高線図(2001年2月16日 撮影)を示す. ここで, 平均積雪深は58 cm であ る. 同図では, 60 cm を区切りとして, 60 cm 以上 の部分を斜線で、60 cm 未満の部分を白抜きで表 している. ここでは, 前者を「少雪領域」, 後者を 「多雪領域」として扱う。また、後述の降雪風洞実 験の結果と比較する上で都合がよいので、屋根の N-S対角線を挟んで風上側(以下 Area 1と記 す)と風下側(以下 Area 2 と記す)に区分する. Area1では、少雪領域が風上側屋根角部(西角) を起点に、風向軸に沿って対称なV字状をなし、 その内側と外側に多雪領域を形成している.また,

Area 2 では, 放射状少雪領域の裾の部分があり, その両側角部に多雪領域が見られる. このような 屋根面での偏分布は,日最大風速の影響を大きく 受けて,雪が移動し形成されたものと考えられる.

降雪風洞実験結果の検証に用いる実建物のデー タとしては、理想的には、1回の降雪ごとに屋根 雪分布形状の3次元的変化を詳細に測定したもの が望ましいが、その取得は現実的には極めて困難 である.このため、積雪深の時系列変化について は、屋根上に設置した9本の雪尺(図1●印)の 目視観測による継続的調査を行った。これによる と、屋根雪の少雪・多雪領域は積雪期間中、変動 が少なく、ほぼ一定していることが認められた⁴⁾. したがって、図2に示す等高線図は1日のみの データであるが、積雪期間中の屋根雪分布の特徴 を概ね現していると考えてよい。

3. 人工雪を用いた降雪風洞実験

活性白土,ばん砕その他の模擬雪を利用した風 洞実験が国内外において多く行われ,その成果が 報告されている^{例えば 5)-7)}.これに対し本方法は,独 立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究セ ンター新庄支所内の温度管理された低温室で行う 降雪風洞実験⁸⁾であり,近年,三橋や筆者らにより 報告されてきた⁹⁾⁻¹²⁾.風洞は,密閉型回流式で,測 定部の断面は,高さ1.0 m,幅1.0 m,長さ14 m である.測定部の風上端天井にある雪粒子供給装 置から人工雪粒子を落下させることで,風洞内に 吹雪状態を再現することができる.





写真1 人工雪粒子の顕微鏡写真

写真1に樹枝状の結晶を有する人工雪を示す. 従来の模擬雪とは異なり,天然の雪粒子と同等な 物性を持つ人工雪粒子を使用することにより,雪 粒子に関する物性をそのまま利用できる利点があ る.また,模型建物の屋根軒先に雪庇の形成が確 認され,人工雪粒子は実際の屋根雪に近い付着性 を有していると考えられる.

3.1 実験概要

前述したように、A棟付近の冬期風向は、西南 西~西北西方向に卓越している.このことから、 西方向を代表風向とみなして、実験気流が建物の 西方向相当から吹くように、風洞内での模型の配 置を決めた(風向角45°と記す).筆者らは、風向 角を45°に固定し、屋根面風速を4種類(1.0, 1.5, 1.7, 3.0 m/s)に変化させて、それが積雪分布形 状へ与える影響について検討した。実験気流は、 すべて勾配流で行うのが理想であるが、風速を変 えることに伴う実験準備に要する時間を勘案し て、準備に時間のかからない一様流も併せて用い ている。

また,風洞気温は野外実測結果に基づき,1・ 2月の日最低気温平均値-9.3°Cに合わせ-10°C



(a) No.4 (1.0 m/s)



(b) No.5 (1.5 m/s)

Wind W

図3 A棟の降雪風洞実験結果

(c) No.6 (1.7 m/s)



(d) No.7 (3.0 m/s)

に設定している。日平均気温ではなく日最低気温 に合わせた理由は、数日間にわたる実験期間中、 雪の変態の速さを遅らせ、できるだけ各実験に用 いる雪粒子の性質を揃えることを意図したことに よる。

なお本実験は、初期の無雪状態から、1回の吹 雪によって形成される積雪分布形状の特性把握を 目的としており、屋根上に予め堆雪がある状態や 複数回の吹雪による影響については今後の課題と する.また、屋根雪深さは、レーザー変位センサー (精度 0.1 mm)により、屋根上 225 点について測 定した.

3.2 実験結果

屋根雪分布の堆積性状を定量的に評価するた め、屋根雪深さ225点の平均値に対する各点の値 の比(以後,偏分布係数と記す)を用いることに する.この値が1.0以上の場合,積雪の多い領域 として「多雪領域」を,1.0未満の場合,積雪の少 ない領域として「少雪領域」を定義する.また, 偏分布係数0.0~0.5の場合,特に積雪の少ない領 域として「極少雪領域」を定義する.

図 3 (a)~(d)は、A棟に対し、4 種類の風速(1.0, 1.5, 1.7, 3.0 m/s)を設定したときの実験写真で ある。また、図 4 (a)~(c)は、このときの屋根雪深 さを偏分布係数の等高線図で示したものである。 ただし、風速 3.0 m/s の場合は、堆雪が殆ど見ら れなかったので等高線図を示していない。

図3・4の(a)~(c)から分るように,これら3ケースの積雪分布形状のパターンとして,風上屋根角部から風下側に向かうV字形の極少雪領域および少雪領域の形成を挙げることができる。このV字形少雪領域の形状は,風速が大きくなるにつれ拡大する傾向のあることが認められる。また,V字形少雪領域内側には多雪領域が形成される。その特徴として,風速1.0m/sの場合のように一部広



い少雪領域を含む状態から、風速が大きくなるに つれ少雪領域が減少して多雪領域が拡大し、風速 1.7 m/s の場合のように丘状に多雪領域が発展し ていく過程をとることが指摘できる.なお、風速 3.0 m/s の場合は、前述したように殆ど積雪は見 られないので、この屋根寸法に対しては、本研究 の目的の主旨からして範疇外の風速と言える.

以上のことから,屋根雪分布形状は,風速の違いによる影響を受けるが,風向角と同様にある程 度そのパターン分類が可能であると思われる.

3.3 実験結果と野外実測調査結果との比較

実建物の屋根雪は,その物性や風向・風速・日 射・降雪等気象条件が刻々と変化しているので, ほぼ一定の実験条件下で行われた風洞実験結果と 比較することは厳密には困難である.しかし,本 研究では,両者の観測値は概ね平衡状態になって いると仮定して,実務設計に供するための屋根雪 分布形状のパターンを検討対象とする.

2.2節で述べたように、A棟屋根面を風上側の Area 1 と風下側のArea 2 に 2 分して、野外実測 結果(図 2)と降雪風洞実験結果(図 4)とを比 較する.Area 1 では、積雪分布の基本形状として、 両者共に風向軸に対称なV字形の少雪領域が見ら れ、且つその内側と外側に多雪領域が形成されて いる.Area 2 については、野外実測で見られる放 射状少雪領域の裾の部分が、風速 1.5, 1.7 m/s で の風洞実験では明確に現れていない。しかし、風 速 1.0 m/s の場合には、V字形少雪領域の内側に 一部広い少雪領域が見られることから、風洞実験 結果は野外実測結果をある程度近似していると解 釈できる。

Area 1 と Area 2 の考察から総合的に判断し

て、人工雪を用いた降雪風洞実験は、その風向・ 風速を野外条件と近似させることによって、屋根 雪分布形状のパターンバリエーションの推測があ る程度可能であると言える.

4.風圧風洞実験による屋根面風圧分布の測定

屋根雪の堆積現象は,屋根面近傍の気流性状と 密接な関係があると考えられる.このため,流れ 場の特性から屋根雪分布形状を推定することがで きれば,建物の屋根雪荷重評価の合理化に大いに 資することができる.

これに関して土谷は¹³⁾,アーチ型屋根を対象と して、風洞実験結果から求めた風の水平方向平均 加速度分布図から積雪分布の予測断面図を示し、 既往の積雪分布形状データとの類似性を指摘し た.一方、筆者らは、物体表面の風圧分布の様相 が気流の状況と強い関係があることから、屋根面 の風圧分布特性と屋根雪分布形状との関係につい て検討してきた^{14),15)}.本報では、気流の乱れあるい は渦による圧力の変動に着目し、屋根面全域にお ける変動風圧係数(以下 *C*['])と記す)の分布特性を 検討対象とした.

ところで本研究は、前述したように初期の無雪 状態から、1回の吹雪によって形成される屋根雪 分布形状を対象としている。このことから屋根面 の風圧分布特性と比較する屋根雪分布資料として は、野外実測結果より降雪風洞実験結果の方が適 当である。その際注意すべきことは、降雪風洞実 験による屋根雪分布形状は、用いる風速の強弱に より直接的な影響を受けるが、風圧風洞実験によ る屋根面 *C*_p'の分布特性は、風速の強弱に関わら ずほぼ一定となることである。このため、両者の 相互関係の検討において、降雪風洞実験の風速に は自ずと有効範囲があることを念頭においておく 必要がある.

4.1 実験結果

模型屋根面の風圧分布測定は,北海道大学院工 学研究科所有の低速還流型風洞(測定部は高さ 1.2 m,幅1.4 m,長さ6 m)を用いて行った.模 型は,縮尺1/100,表面が滑らかなアクリル製の剛 模型である.模型表面の圧力は,直径0.8 mmの 風圧測定孔を10 mm間隔の格子点上に225点設 け、ビニールチューブを介して測定した.この導 圧チューブの振動による影響は、その圧力伝達特 性を求めてデジタル補正した¹⁶⁾.実験に用いる風 速は,前述したように、その強弱が*C_p*の屋根面分 布特性へ及ぼす影響は小さいので,1種類の風速 (自由気流風速10 m/s)による結果を用いる.模型 高さでの平均風速7.0 m/s,乱れ強さは約15%で ある.

図5に示すように、 C_p 'の分布は風向軸に対し てほぼ左右対称となり、風上側角部を基点に風下 側へ放射状に広がっている(特性①). C_p '値の特 徴として、風上側角部に局部的に大きな値 (0.5~0.8)をとること(特性②)や、各階級ごと の分布形状がV字の形状を基本とし、 C_p '値の大 きい領域(0.4~0.5)から小さい領域(0.1~0.2) へ段階的にV字の裾野が伸びていくこと(特性③) が分る.また、 C_p '値の最も小さい領域(0~0.1) が水滴状となっている点(特性④)が特徴的であ る.



図 5 A 棟屋根面の変動風圧係数等高線図 (風向角 45°)

4.2 変動風圧分布と屋根雪偏分布形状との関 係

本節では、屋根面の C, '分布特性と屋根雪の偏 分布形状との関係を考察する.その際, C_p'値と降 雪風洞実験によって得た偏分布係数との関係を表 す散布図を基に、直線式、ルート式、対数式の3 つの回帰式を利用する.ここで, 偏分布係数は降 雪風洞実験時の屋根高さ風速が1.0 m/s, 1.5 m/s および1.7 m/sの場合の3種類である.風速1.0 m/sの場合,図示をしていないが、 C_p '値と偏分布 係数との相関性は低く、前述の3式では相関係数 がそれぞれ-0.03, 0.05, 0.12 となった. しかし, 風速 1.5 m/s および 1.7 m/s の場合には、いずれ も C_b'値と偏分布係数との間に相関性が認められ た. 図6に, C_p '値と両風速における偏分布係数と の関係を併せ示すが、C, '値が大きいほど偏分布 係数が小さくなる(少雪領域)となる傾向がある ことが分る。また、図中には、3つの回帰式も併 記しているが、直線式 (点線)、ルート式 (破線)、 対数式(実線)の3式における変数相互の相関係 数は順に, -0.81, -0.85, -0.84 となり, 概ね 0.8程度となった。このことから、風圧風洞実験に より得られる C_p'の分布特性と降雪風洞実験にお ける屋根雪分布形状とが概ね相関性を有している ことを指摘できる.この時の適用条件として,降 雪風洞実験における風速が挙げられ、本実験の範 囲では屋根高さ風速1.5~1.7 m/s 程度において 有効であった.

5. まとめ

建築物設計用の雪荷重評価に供するため、屋根



雪分布形状の予測手法について,実測資料と比較 しながら開発研究を行った。寒冷な積雪地域に建 つ水平屋根を対象として得られた成果は,次のよ うに纏められる。

1. 人工雪を用いた降雪風洞実験の信頼性

本実験では、要求される相似条件をほぼ満足し たが、実験時間と自然現象の実時間との関係につ いて特定することは現状では困難であるので、降 雪開始後、屋根雪堆積形状が概ね平衡状態に達し たとみなされる時点で屋根雪計測を行った。これ を上記の野外実測資料と比較した結果、人工雪を 用いた降雪風洞実験は、実験風向や実験風速を野 外条件と近似させることにより、屋根雪の分布パ ターンをある程度再現できる可能性を有している ことを示した。

2. 変動風圧分布と屋根雪偏分布形状との関係

気流の乱れあるいは渦による圧力の変動に着目 し、屋根面全域における変動風圧係数の分布特性 と屋根雪分布形状両者の相関性を検討した。その 結果、風圧の変動が大きいほど積雪深は小さくな り、両者が概ね相関性を有していることを確認し た。この時の適用条件として、降雪風洞実験にお ける風速が挙げられ、本実験の範囲では屋根高さ 風速 1.5~1.7 m/s 程度において有効であった。

本報では,野外実測資料と対比するために3次 元的流れ場における屋根雪の偏分布形状と変動風 圧との関係を考察した.現在引き続き,2次元的 流れ場における屋根雪の偏分布形状と平均風圧と の関係についても検討中である.

謝辞

本研究の一部は,北海道大学大学院の修士論文 として,佐藤公哉君(平成16年度・現大成建設) および真田朋幸君(平成17年度・現北電興業)が 行ったものである。実験の実施に当たっては,東 北大学大学院・植松 康教授,独立行政法人防災 科学技術研究所・雪氷防災研究センター新庄支 所・佐藤 威所長,同小杉健二研究員,同望月重 人特別技術員,同武田竹志元オペレータ,さらに 北海道大学大学院・流れ制御工学研究室・武田 靖教授,同田坂裕司助教,同山保敏幸技官,北海 道大学大学院・空間構造性能学研究室・北野敦則 助教,北海学園大学・川股一臣元助手から懇切丁 寧なご指導,ご協力を頂きました。また,既報²⁾の 校正においては,北海学園大学大学院・伊藤新治 君(平成19年度・現ダイワハウス工業)から協力 頂きました.記して感謝申し上げます.

なお,本研究の一部は,平成18年度文部科学省 科学研究費補助金(課題番号18560559 代表 桜 井修次)に依るものである.

【参考文献】

- 1)日本建築学会:建築物荷重指針·同解説,2004.9
- 2) 桜井修次, 真田朋幸, 阿部 修, 城 攻:人工雪を用 いた降雪風洞実験および屋根面の変動風圧分布特性に 基づく屋根雪分布形状の推定に関する開発研究, 日本建 築学会構造系論文報告集, No.620, pp.9-16, 2007.10
- 3) 桜井修次,城 攻:屋根上積雪深測定への空中写真測 量の応用に関する基礎的研究,日本建築学会構造系論文 報告集, No.450, pp.25-35, 1993.8
- 4) 桜井修次,城 攻:実建物の屋根雪多点観測(札幌市 に建つ陸屋根および2段屋根について),日本雪工学会
 誌, Vol.17 No.4, pp.79-80, 2001.11
- 5) 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報告集, No.357, pp.20-28, 1985.11
- 6) 野澤壽一, 鈴谷二郎:水平二段屋根上の吹き溜まりに
 関する実験的研究, 東北工業大学紀要 I, 理工学編第 16
 号, pp.127-140, 1996
- 7) Isyumov, N. and Mikitiuk, M.: Wind tunnel model studies of roof snow loads resulting from multiple snowstorms, Proceedings of third international conference on snow engineering, pp. 303–312, 1997
- 8)佐藤 威,小杉健二,佐藤篤司:雪粒子を用いた風洞 実験による吹雪の研究,第15回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集,Vol.15,pp.50-54,1999.11
- 9) 三橋博巳:建築物の雪の吹きだまりと吹雪風洞実験, 日本雪氷学会,雪氷 Vol.65 No.3, pp.287-294, 2003.5
- 10) 三橋博巳, 佐藤篤司他:建築物の屋根上積雪荷重に関 する研究 その1人工雪を用いた風洞実験, 日本雪氷学 会全国大会講演予稿集, pp.114-115, 2002.9
- 11) 佐藤公哉,桜井修次,阿部 修,城 攻:人工雪を用 いた降雪風洞実験による屋根雪分布形状の推定に関す る検討 その1およびその2,日本建築学会大会学術講 演梗概集構造系B-1, pp.11-14, 2004.8
- 12) 桜井修次,佐藤公哉,真田朋幸,阿部 修,城 攻: 人工雪を用いた降雪風洞実験による屋根雪分布形状の 推定に関する検討(風向・風速と屋根面吹き払い域形状 との関連について),日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系B-1
- 13) 土谷 学:気流性状を用いた積雪荷重分布の予測法 に関する研究,北海道工業大学学位論文,2002.3
- 14) 佐藤公哉,真田朋幸,桜井修次,阿部 修,城 攻: 屋根面変動風圧分布特性の利用による屋根雪分布形状 の推定への試み,日本建築学会大会学術講演梗概集構造

系B-1, pp.33-34, 2005.9

- 15) 真田朋幸,桜井修次,阿部 修,城 攻:屋根雪分布 形状と屋根面変動風圧分布特性との関連に関する検討 (水平屋根の場合),日本建築学会大会学術講演梗概集構 造系B-1, pp.113-114, 2006.9
- 16) 財団法人日本建築センター:実務者のための建築物 風洞実験ガイドブック,1994.6