

平成 21 年 5 月 12 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560559
 研究課題名（和文） 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と実務設計への展開
 研究課題名（英文） Study on the estimation of the shape of roof snow accumulations by wind tunnel tests using artificial snow and the application to the structural design of buildings
 研究代表者 桜井 修次
 北海学園大学・工学部・教授
 研究者番号：50153953

研究成果の概要：

北海道・東北・北陸地方などの多雪地域に建設する建築物は、屋根雪荷重を考慮して設計する必要がある。特に、工場や体育施設などの大スパン建築物では、構造体重量を少なくして応力を低減させることが有利となる一方で、雪荷重の占める割合が増大するためその荷重評価が特に重要となる。近年の雪工学研究の発展により、地上積雪の深さや重量については観測資料に基づく統計的な算定が可能となった。しかし、屋根雪の分布は、風の吹き払い・吹きだまり効果によって著しく偏分布をすることがあり、その形状推定は必ずしも容易ではない。

本研究は、積雪寒冷地において、1回の吹雪現象によって形成される建築物屋根雪の偏分布形状を予測するための実験的手法を検討したものである。その一つは、人工雪を用いた低温室内における降雪風洞実験である。水平屋根を有する実在建物 of 野外実測調査結果と実験で得られた縮尺模型の屋根雪分布とを比較した結果、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、当該風洞実験が屋根雪の分布パターンをある程度再現できることを示した。二つ目は、屋根雪の偏分布現象は、屋根面近傍の流れ場の影響を受けることから、屋根面の風圧分布特性に注目した。5種類の屋根形状について、一般の風圧風洞実験から得られる平均風圧分布と降雪風洞実験から得られる屋根雪分布両者の増減特性とを比較した。その結果、両者に相関関係があることが分かった。この関係を利用して、屋根面の平均風圧係数に基づいて屋根雪偏分布形状を工学的に推定し得る実用的方法を提示することができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 18 年度	1,100,000	0	1,100,000
平成 19 年度	800,000	240,000	1,040,000
平成 20 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：荷重論、構造設計

1. 研究開始当初の背景

多雪地域に建設する建物の雪害を未然に

防ぐためには、屋根雪分布形状について信頼性の高い予測手法の確立が急務である。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。また「建築物荷重指針」では、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・実験に基づいて定める」と記述している。しかし、いずれにおいてもその評価法は未だ確立されていないのが現状であり、合理的且つ実用的な推定手法の提案が必要とされている。

屋根雪の分布形状を推定する手法として、従来、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。これに対し樹枝状の結晶を有する人工雪を用いて、温度管理された低温室内で行う降雪風洞実験が、近年、三橋や筆者らにより報告されてきた。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。これらのことから、人工雪を用いた降雪風洞実験は、屋根雪分布を推定するための有効な手法と考えられるが、実験の信頼性を確かめるためには、野外での実現象との比較、検証が必要である。その際、実建物の詳細な屋根雪深さ分布資料と併せて、風向、風速、外気温の調査も行われなければならない。

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、両者の関係性を検討する試みが、土谷らによって行われた。土谷らは、屋根面に近接した位置における風の水平方向の平均加速度分布に着目し、屋根上積雪深分布との関係について検討した。二段水平屋根を有する建物モデルを対象として、野外実測から得られた積雪深分布と気流風洞実験から得られる屋根面風速の平均加速度分布を比較した結果、両者に負の相関関係があることを報告している。他方、筆者らは、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できると考え、屋根面の風圧分布特性に注目した。これに関連する風工学的知見として、「物体表面における風圧分布の様相は、物体周りの気流の流線の状況と密接な関係があり、はく離した流線が再付着する場合、その地点付近で負圧の大幅な減少が生じ、そのため流体粒子は圧力勾配によって物体近傍へ引き寄せられる。」という基本的事項

を挙げるができる。屋根雪の分布特性と風圧の分布特性との関係について考察した例はなく、これについて有効な知見が得られれば実務設計への展開するための足がかりをつかむ可能性があると考えられる。

2. 研究の目的

屋根雪の偏分布形状を予測するためには、実建物について豊富な実測資料の蓄積が必須である。しかし、屋根上での調査は危険を伴うと共に、多大な労力を必要とするので、現実的にそれは困難であると言わざるを得ない。さらに屋根雪の分布は、建物形状、風向・風速、外気温、日射、周辺環境などに大きく左右され、たとえ実測してもそれは個々の事例にとどまってしまうため、影響要因を整理して一般化しにくい事情がある。これに対する有効な手法として吹雪風洞実験が挙げられる。そこで模擬雪あるいは人工雪のいずれを用いるにせよ、相似則を満たし、あるいはその緩和条件を明確にすれば、得られる実験データは、モデル化が可能であり有意義なものとなり得るはずである。ただし、その風洞実験手法が有効であり、実現象に追従できるかどうかを、実測資料と比較して事前に照査されなければならない。その際、検証に用いる実測資料が十分信頼できるものにするためには、冬期間の屋根雪の時系列観測、風向・風速、外気温の観測資料が不可欠である。一方このような吹雪風洞実験とは別に、屋根雪分布と屋根面付近の気流流線すなわち風圧分布との相関性を明らかにする研究も有効性がある。その場合、屋根雪分布の特性把握には、前述の人工雪を用いた降雪風洞実験を利用する。両者の関係性が得られれば、その結果を利用して屋根雪の偏分布を推定するための実務的展開へつなげることが可能となる。

以上のことから、本研究では、次の 4 点について調査・検討をすることを目的とする。

(1) 実建物の野外実測

札幌市郊外に建つ水平屋根を有する建物を選定し、屋根雪深さ分布の特徴を調査する。併せて、屋根面での風向・風速、外気温を測定する。この建物を降雪風洞実験および風圧風洞実験のモデル建物とする。

(2) 人工雪を用いた降雪風洞実験の信頼性

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・新庄支所の低温室内に設置されている密閉型回流式風洞で降雪実験を行う。風洞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。これにより実建物の屋根雪分布特性を再現できるかどうかを検証する。

(3) 屋根雪の偏分布特性と屋根面風圧分布特性との関係

一般の風圧風洞実験および人工雪を用いた降雪風洞実験を行う。模型建物の屋根基本形として、正方形水平屋根(パラペットなし、ありの2種)、二段水平屋根、半球ドーム屋根および切妻勾配屋根の計5種類を選んだ。ここで、二段水平屋根については下段部分のみを扱う。風向は、壁面に正対する方向から風が吹いた場合(風向角 0° と記す)を対象とする。これらの屋根面における平均風圧係数あるいは積雪形状の特徴については、必ずしも全てカバーされている訳ではないが、風工学の立場からあるいは雪工学の立場からそれぞれ多くの研究者により報告されていることは周知のとおりである。しかし、両者を風洞実験データに基づき関連づけて検討した報告は見当たらない。本研究では、屋根形状ごとに両者の増減特性を比較し、基本的な相互関係について考察する。

なお、屋根雪の分布は冬期間の複数回の吹雪の累積効果によって形成されるが、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を対象とする。

(4) 実務設計への展開

屋根面の風圧分布特性を利用して、大型建物屋根雪の偏荷重評価法について検討する。

3. 研究の方法

実建物の屋根雪の野外調査およびデータ整理等を、桜井(研究代表者)と城(研究分担者)が行う。人工雪を用いた低温室内での降雪風洞実験を、阿部(研究分担者)の所属する防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・新庄支所の設備を用いて行う。実験の実施およびデータ整理等を桜井、阿部が担当する。また、一般の風圧風洞実験は、城の所属する北海道大学大学院・工学研究科所属の設備を用いて行う。実験の実施およびデータ整理等を桜井および城が担当する。最終的な研究の取りまとめは、桜井を中心に、城、阿部と共同で行う。

4. 研究成果

(1) 実建物の野外実測

風洞実験モデルに供することのできる実建物の条件として、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棟を選定した。平面は $15.9\text{m} \times 15.9\text{m}$ 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。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程度と考えられる。また、2001年~2006年の先行観測の結果、同地域における冬期の主風向は、年度によって多少異なるが、

西南西~西北西の範囲に強く卓越し、西方向が最多風向であることが認められた。また屋根の対角線方向と西方向は概ね一致する。日平均風速は、 $0.8 \sim 5.3\text{m/s}$ の範囲となり、平均値は 2.0m/s である。日最大風速は $2.1 \sim 10.7\text{m/s}$ の範囲であり、平均値は 4.7m/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。

屋根雪分布に関する風洞実験の信頼性を照査するためには、モデルとなる実建物の屋根面全域における詳細な積雪深実測資料が必要である。このため空中写真測量技術を応用した方法により、先行調査資料を得ている。それによると積雪形状の特徴として、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こと指摘できる。風工学の分野では、風向角が 45° の場合、円錐形の渦がV字形に発生することはよく知られており、この積雪形状は、それにより形成されたものと考えられる。一方、屋根上に設置した9本の雪尺の目視観測による継続的調査を行ってきた。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、V字形の積雪形状を保持していた。これらの調査結果は、信頼できるものであり、他の研究者の風洞実験にも供することが可能である。

(2) 人工雪を用いた降雪風洞実験の信頼性

信頼性の高い風洞実験を行うために、相似条件を検討する必要がある。雪氷学の分野では、建物の幾何学的条件 風の分布の条件 飛雪粒子運動の相似条件 雪粒子性質の相似条件 経過時間の相似性の5項目が挙げられている。しかし実際には、これらすべての条件を満たすことは不可能であり、目的によって相似条件を緩和することが一般的である。本研究では以下の対応をとった。

建物の幾何学的条件

模型縮尺を $1/50$ として、模型を作成した。この場合、閉塞率(模型見付面積と風洞断面積の比)は、模型配置が風向に正対する場合すなわち風向角 0° の場合 5.3% 、同 45° 相当において 7.5% である。風工学の分野では、風洞実験での閉塞率の値は一般的に 5% 以下が適当とされているが、後述するように本研究では自然雪と同等な大きさを有する人工雪粒子を用いるため、出来る限り建物模型は大きい方がよいことを考慮した。なお、模型材料としてスチレンボードを使用した。屋根材料の表面粗さは、屋根雪の堆積現象に影響を与えるが、本研究では全実験において同一粗さの材料を使用したため、堆積形状の相互比較が可能である。

風の分布の条件

地表面粗度区分における自然風を模擬した勾配流を作成した。ここで、境界層高さは、風洞高さの1/2 ($z=50\text{cm}$)とした。本実験の目的に沿った実験風速(自由気流)として、既往の研究や筆者らの経験から判断して、1.0~2.0m/sを基本とした。風速2.0m/sの場合、模型屋根面高さの風速は1.7m/s、乱れ強さは17%となった。

・ 飛雪粒子運動の相似条件および雪粒子性質の相似条件

飛雪粒子の跳躍高度や跳躍距離などの運動状態の相似、雪粒子の安息角や付着力、摩擦係数などの相似があげられる。特に、屋根面での雪の堆積には摩擦係数が大きな影響を与える。これらに関する項目を本研究では重要視しているが、自然雪と人工雪の性状は同等とみなしてよいと考えられ、このことが、筆者らが人工雪を用いた風洞実験に注目した理由である。なお、フルード数に関しては、粒子の大きさを基準とした場合、人工雪と自然雪の粒子の大きさの比を1:1とすると、実験風速と自然風速の比も1:1となるため、フルード数の相似性を緩和条件とみなすことにした。

経過時間の相似性

経過時間に関しては、自然現象の実時間が風洞実験の実験時間どう対応するのか、いまだ不明であり定説すらないのが現状である。このため本実験では、降雪開始後、屋根雪堆積形状の経過を目視判断しながら、概ねそれが平衡状態に達したとみなされる時点で屋根雪計測を行うことにした。

実験の実施にあたって、模型付近での降雪粒子の大きさを揃えるため、雪粒子の落下速度0.67m/sを目標として、雪粒子供給装置からの建物模型位置を決めた。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に合わせ-10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。また、前述したように、実在建物付近の冬期風向は、西南西~西北西方向に際立って卓越しており、西方向を代表風向とみなすことができる。このため、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。また、屋根雪深さは、レーザー変位センサー(精度0.1mm)により、屋根上225点について測定し、屋根雪の偏分布係数(屋根雪平均深さに対する屋根面各点の積雪深さの比)を基に考察した。

風洞実験の結果、模型建物屋根上の積雪分布形状は、風上側角部を起点としたV字形の少雪領域と、その内側と外側に多雪領域を形成し、野外実測結果と概ね近似した。従って、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。

(3) 屋根雪の偏分布特性と屋根面風圧分布特性との関係

筆者らは、屋根面の風上から風下へ向かう風圧分布に着目し、その圧力勾配が積雪深分布へ及ぼす影響について焦点を合わせることにした。このため、2次元物体周りの流れ場を対象として、風洞実験手法によるケーススタディを行った。具体的には、研究目的(3)で述べた5種類の屋根形状を対象にして、屋根面の平均風圧係数と屋根雪の偏分布係数との基本的関係の特徴把握である。

各屋根それぞれのセンターライン断面における圧力勾配に焦点をあてて検討した結果、積雪の増加要因として負圧の減少あるいは正圧の増大を、逆に積雪の減少要因として負圧の増大あるいは正圧の減少を指摘することができた。また、屋根面の平均風圧係数と屋根雪の偏分布係数とは相関関係が認められ、両者の相関係数は、パラペットなし水平屋根において0.94、パラペットを有する水平屋根において0.74、二段水平屋根(下段部)では、風上側領域で0.80、風下側の吹きだまり領域で0.98、半球ドーム屋根では、風上側半円部分で0.99、風下側半円部分で0.89となった。ただし、切妻勾配屋根では風下側で0.70となったが、風上側でほとんど相関が認められなかった。結局、屋根面全体でみると、パラペットなし水平屋根および半球ドーム屋根において、相関関係が顕著に認められた。

(4) 実務設計への展開例

5種の屋根形状のうち特に、パラペットなし水平屋根および半球ドーム屋根が、屋根上センターライン全域において、平均風圧係数と偏分布係数との強い関係を示した。ここでは、この2つの屋根形状について、平均風圧係数から屋根雪の偏分布形状を推定するための実用的方法を示す。その際、建築基準法施行令第87条の風力係数の算定に適用されている簡略化された屋根区分を参考にする。

はじめに、パラペットなし水平屋根について述べる。屋根は、風上側と風下側の2つの領域に簡略化して区分する。それぞれの領域における平均風圧係数の平均値は、風上側で-0.78、風下側で-0.27となる。これらの値を上記(3)において求められる回帰式へ代入すると、推定偏分布係数はそれぞれ0.68、1.34となる。従って、風上側と風下側の積雪深の比はほぼ1:2の関係になっている。

半球ドーム屋根の風領域は、上記施行令では R_1 、 R_2 および R_3 に区分されている。風上側の領域 R_1 では平均化されて-0.06となった。 R_2 では-0.87、 R_3 では-0.30となった。これらの値に対応する偏分布係数を回帰式

から求めた。ただし、領域 R_2 を風上側と風下側に 2 分割した。水平面に対する偏分布係数の値は、順に 4.83, 0.63, 0.54, 2.93 となり、これらの比はほぼ 8.9:1.2:1.0:5.4 となる。

これらの結果は屋根面各領域における積雪深について相対的な値を与えるが、従来経験的に定めていた偏分布形状に対し、風工学的根拠を与えるものであり、短期間の降雪に関し信頼性の高いものであると言える。さらに、実務設計においては、屋根雪深さについて定量的評価が必要である。そのために、降雪深の基本統計量を与えなければならないが、現状では 1 回の吹雪による降雪深の統計量取得は困難なので、気象官署の資料として得られる日降雪深を準用することが考えられる。

謝辞

実験の実施に当たって、東北大学大学院・植松 康教授、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、同小杉健二主任研究員、同根本征樹研究員、同望月重人特別技術員、同武田竹志元オペレータ、同大川元造オペレータさらに北海道大学大学院・流動場システム工学研究室・武田 靖教授、同田坂裕司助教、同山保敏幸技官から懇切丁寧なご指導、ご協力を頂きました。記して感謝申し上げます。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

- 1) 真田朋幸, 桜井修次, 阿部 修, 城 攻: 降雪風洞実験および屋根面風圧分布に基づく屋根雪分布形状の推定に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.79, pp.43-46, 2006.7
- 2) 伊藤新治, 阿部 修, 桜井修次, 城 攻: 人工雪を用いた降雪風洞実験による2段屋根上積雪分布形状について - 下段屋根が風上の場合 -, 日本建築学会北海道支部研究報告集No.80, pp.47-50, 2007.7
- 3) 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集 No.620 pp.9-16, 2007.10
- 4) 桜井修次, 阿部 修, 城 攻: 屋根面風圧分布特性と屋根雪の偏分布形状との関係, 日本建築学会北海道支部研究報告集No.81, pp.35-38, 2008.6
- 5) 桜井修次, 阿部 修, 城 攻: 風洞実験手法による屋根雪偏分布形状の推定について, 北海学園大学大学院工学研究科紀要

工学研究 No.8, pp11-17, 2008.9

- 6) 桜井修次, 阿部 修, 城 攻: 風洞実験手法による屋根雪の偏分布形状に及ぼす屋根面の風圧分布特性の影響に関するケーススタディ, 日本建築学会構造系論文集 No.637 pp.451-458, 2009.03

[学会発表](計 5 件)

- 1) 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による屋根雪分布形状の推定に関する検討 - 切妻屋根の場合 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系B-1, pp.111-112, 2006.9
- 2) 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
- 3) 桜井修次, 伊藤新治, 阿部 修, 城 攻: 2段水平屋根の下段屋根雪分布形状の特性に関する実験的検討 - 下段屋根が風上の場合 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系B-1, pp.33-34, 2007.9
- 4) Shuji Sakurai, Osamu Joh and Osamu Abe: Estimation of ununiform snow accumulations on roofs based on wind tunnel tests using artificial snow and wind pressure coefficients, Snow Engineering, Whistler Canada, 2008.6
- 5) 桜井修次, 阿部 修, 城 攻: 各種屋根形状における屋根面の風圧分布と積雪の偏分布との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系B-1, pp.41-42, 2008.9

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

- 1) 桜井修次: 建物の雪荷重を巡る旅, 日本雪工学会誌, Vol.25 No.1, pp44-45, 2009.01

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桜井 修次
北海学園大学・工学部・教授
研究者番号: 50153953

(2) 研究分担者

城 攻
北海道大学・名誉教授
平成 18~19 年度: 研究分担者
平成 20 年度: 研究協力者
研究者番号: 00002014

阿部 修

防災科学技術研究所・雪氷防研究センター
ー・新庄支所・総括主任研究員

研究者番号：70414406

(3)連携研究者

なし