

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15.9 m×15.9 mの正方形、屋根高さは8.3 m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0.4 m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)

Principal Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Philosophy

*** 北海道大学 名誉教授・工学博士

Professor Emeritus, Hokkaido University, Dr. Eng.

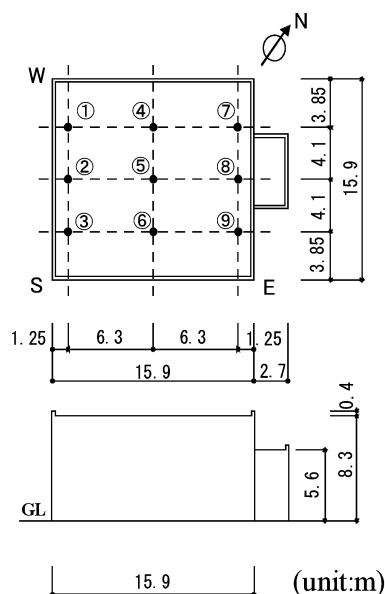


図1 A棟の屋根平面図と断面図（●：目視観測点）

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。Area 1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次元的变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。

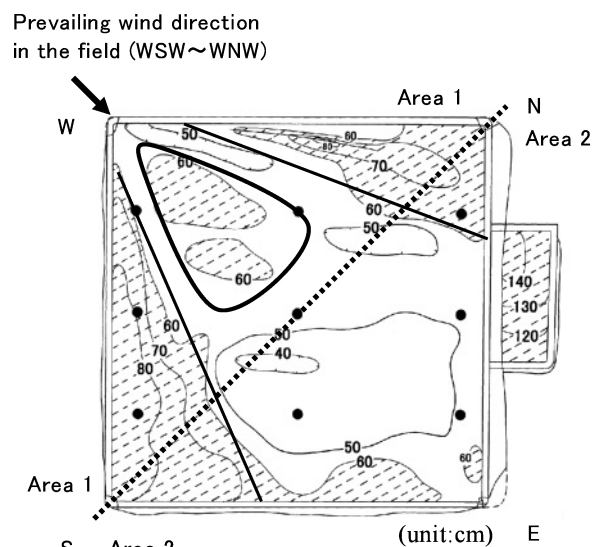


図2 A棟の空中写真解析結果（2001.02.16）



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

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 1.0 m/s の場合のように一部広

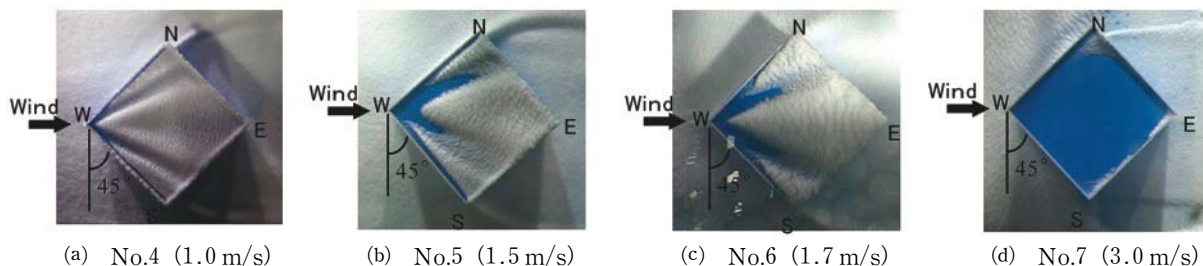


図3 A棟の降雪風洞実験結果

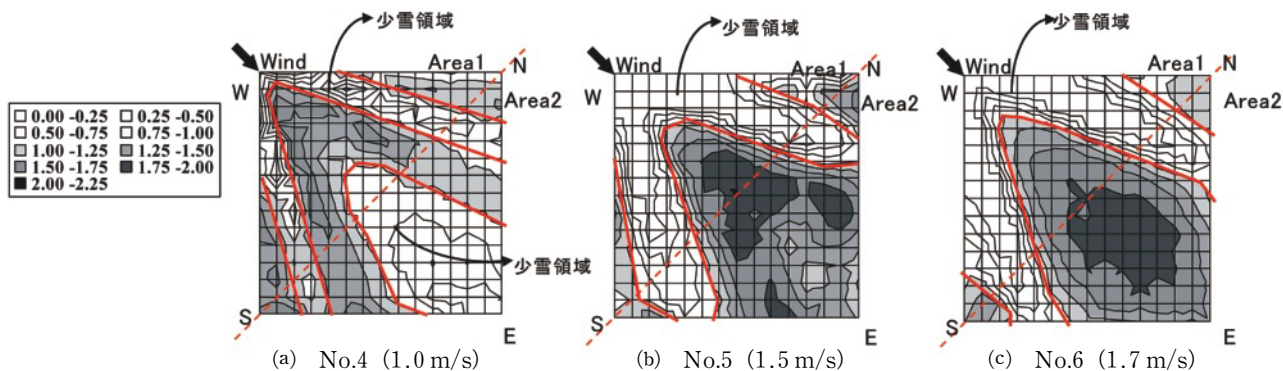


図4 A棟の屋根雪偏分布係数等高線図

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_p' 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¹⁰⁾。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。

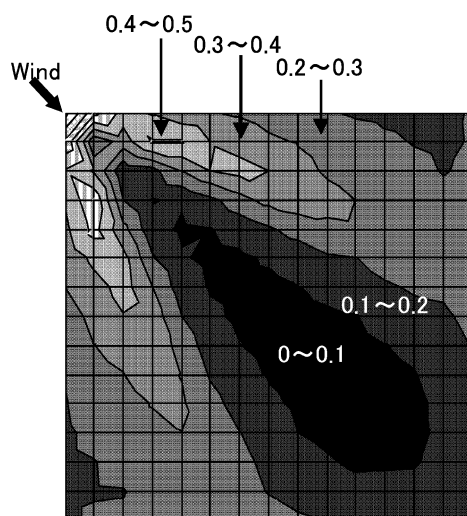


図 5 A 棟屋根面の変動風圧係数等高線図（風向角 45°）

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_p ' 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_p ' 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_p ' 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

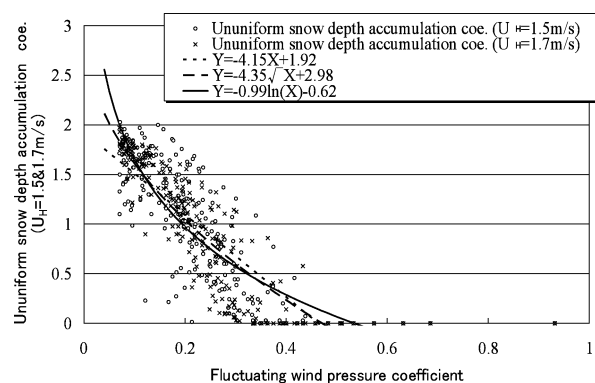


図 6 A 棟屋根面における変動風圧係数と屋根雪偏分布係数との関係

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次元の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次元の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，苔米地司：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