
タイトル	建築物設計用雪荷重に関する研究成果と課題
著者	桜井, 修次; SAKURAI, Shuji
引用	北海学園大学工学部研究報告(42): 57-69
発行日	2015-01-15

建築物設計用雪荷重に関する研究成果と課題

桜井修次*

The Results and Problems of the Investigation about Design Snow Load for Buildings

Shuji SAKURAI*

要旨

建築物設計用雪荷重に関する分野は、「積雪深の再現期待値」や「等価単位積雪重量」などの研究成果の導入により、近年その合理化が大きく進展した。しかしながら、未だに体育施設や倉庫など大スパンの建築物が、屋根雪荷重を原因として屋根崩落や建物倒壊に至った例は数多く報告されているのが現状である。本報では、初めに建築物設計用雪荷重に関する評価法がどのように合理化されてきたかを、筆者の研究を軸に概説する。次に、筆者が現在取り組んでいる風洞実験手法を用いた研究の一部を解説する。

1. はじめに

2014年（平成26年）2月、関東・甲信地方は大雪に見舞われた（「平成26年豪雪」(注1)）。これにより、この地方の積雪深が「荷重指針」¹⁾に示されている100年再現期待値を上回るケースが相次いだ。例えば、山梨県甲府市では、1894年の観測開始以来1位の記録が53cmであったが、2014年2月15日に114cmを記録し、これまでの最大値の2倍を超える降雪となった。

このような降雪により建物屋根の崩落事故も相次いだ。特に、埼玉県富士見市の市立市民総合体育館メインアリーナの鉄骨造屋根が15日朝全面崩落した事故は衝撃であった。雪国と称される北海道・東北・北陸地方ではなく少雪地方の埼玉県での事故発生であったことである。事故の詳細な調査結果は公表されており²⁾、屋根架構耐力と設計雪荷重との関連が分析されてい

* 北海学園大学工学部建築学科 教授・博士（工学）

* Department of Architecture and Buildings, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University, Professor, Dr. Eng.

る。

建築物設計用雪荷重（以下、設計用雪荷重と記す）に関する評価法は、近年、コンピュータ技術の進歩と雪工学研究者らの努力により目覚ましい進展を遂げ、その成果は「荷重指針」に反映されている。しかしながら、未だに解決されていない問題も多々残されている。例えば、風による吹き払い・吹き溜まりに起因する屋根雪の偏荷重評価がそれである。鉄骨造大スパン建物の雪による倒壊被害は、豪雪年ではなくても時々各地で発生しているが、その原因は屋根雪の偏荷重である場合が認められる。このため、屋根雪の偏分布評価法の確立が急務となっている。

本報では、まず設計用雪荷重評価法の合理化の過程について、筆者らの研究成果を軸に概説する。次に、現在取り組んでいる風洞実験手法を用いた屋根雪偏分布評価法の現況を述べる。

2. 建築物設計用雪荷重評価法の合理化

2.1 雪害事例に学ぶ

過去の雪害の中で、際立って大きな建築被害をもたらしたのが1980年（昭和55年）12月から1981年（昭和56年）2月にかけての「56豪雪」である。このときの被害は、東北・北陸・信越地方にわたり広く発生した。特に、小中高等学校などの体育館、倉庫、工場など大スパン鉄骨構造の建物屋根の崩落が相次ぎ、「56豪雪被害調査報告」³⁾に詳細な分析が報告されている。

この年札幌では、平年並みの積雪であったが、丘珠空港の「北海道航空格納庫」が1月30日朝、屋根が崩落した。建物は、スパン47.8m、軒高7.2m、軒先勾配35°の鉄骨構造アーチトラスである。詳細な調査・分析が故北海道大学名誉教授・柴田拓二博士によって行われ、前述の報告書に記載されている。これによれば、被害の原因として次の3点を指摘している。1. 主原因は風による屋根雪の著しい偏荷重であること 2. ガセットプレートの局部座屈や破断がはじめに進行した可能性が高いこと 3. 過去にこの年より大きな雪荷重を経験しており、過荷重の繰り返しによる累積損傷の可能性も考えられること である。当日の積雪は、地上で137cmであった。これに対し屋根上では、スパン方向風上側で40cm程度、風下側で200cm程度と記述されている。従って、風下側の屋根積雪量は風上側のそれに比べ5倍にもなり、さらに地上積雪のおよそ1.5倍である。このように屋根雪の偏分布がもたらす危険性は大きく、その適切な予測手法の開発が必要であることが強く認識された。

2.2 先駆者に学ぶ

前述の柴田博士は、設計用雪荷重を合理化するための要件として、「56豪雪被害調査報告」の中で次の3点を提案している。

1. 設計用積雪深を統計資料に基づく再現期待値に改正すること

2. 積雪の単位積雪重量（比重）を等価単位積雪重量へ改正すること
3. 極限設計方式へ移行すること。許容応力度方式による場合も設計者は、建物の限界荷重を確認すること

今から30余年前に同博士が提案されたこれらの事案は、現在、行政・建築学会および実務設計の中で生かされている。すなわち前項1については、2000年（平成12年）に改正された建築基準法施行細則に反映され、周知のように設計積雪深として50年再現期待値が用いられることになった。これまで、行政値と統計資料との関連が必ずしも明確ではなかったことからみれば大きな進展である。

前項2については、北大名誉教授・城 攻博士と筆者の提案した次式の「等価単位重量算定式」⁴⁾が「荷重指針」に採用された。

$$P = 0.72\sqrt{d} + 2.32 \quad (\text{kN/m}^3)$$

ここで、 p ：等価単位積雪重量　　 d ：積雪深の再現期待値（m）

これまでの単位積雪重量と区別するため「等価単位積雪重量」として提案したものであるが、この背景となっている知見の一つとして、多雪地域においては、根雪期間における年最大積雪重量の起日は年最大積雪深のそれより1～2週間遅れて発生すること、場合によってはそれ以上遅れることが認識されてきたことによる。すなわち、これまでのように、年最大積雪深に一定の単位積雪重量値を乗じても、起日の異なる年最大積雪重量を算定することにはならないことが広く認識されてきた。さらに設計積雪深として再現期待値が導入されるため、それに対応できる合理性を有する単位積雪重量を定める必要がある。このことから、全国の多雪地域12点における積雪深と積雪重量両方の実測資料を整理して、年最大積雪深と年最大積雪重量の再現期待値相互の関係を明らかにし、「等価単位積雪重量」として提案した。

前項3は、実務設計に関わる事であり、現実に「札幌ドーム」における構造設計において検討されている⁵⁾。

以上のように、柴田博士の提案した事項は、近年の設計用雪荷重合理化研究において文字通り指針の役割を果たしたと言えるのではないだろうか。

2.3 気象資料の活用

積雪深は、目に見えて一般人にも分かりやすいことや気象官署による観測資料の蓄積が豊富であるため、雪荷重を評価する上での基本統計量として使われている。年最大積雪深の50年あるいは100年再現期待値に、前項の等価単位積雪重量 p を乗じて積雪重量の再現期待値を求める手法を前節で述べた。

一方、各地の積雪重量の観測資料が豊富であれば、それを利用して積雪深資料に抛らずとも雪荷重を直接評価することができる。このことから城 攻博士は「降水量」(注2)資料に着目した。「降水量」は、降雪の場合それを融かした水の深さを表すので、事実上降雪の重量であるといえる。従って、冬期の降雪期間において、毎日の「降水量」資料の累積値を求めれば、それが当日の積雪重量に相当することが予想できる。すなわち、累積降水量に基づく積雪重量の推定法⁶⁾であり、次式が「荷重指針」に掲載された。

$$P_n = \sum_{i=1}^{n-1} P_i \quad [T_i < 2^{\circ}\text{C}]$$

ここでは、根雪初日 ($i = 1$) から $(n - 1)$ 日目までの日降水量 (mm) から換算した降水重量 P_i (N/m^2) の累積値を n 日目における積雪重量推定値 P_n (N/m^2) とみなしている。日平均気温 T_i が 2°C 未満の場合の日降水量記録のみが積雪重量の増加に寄与するとみなして累加する。

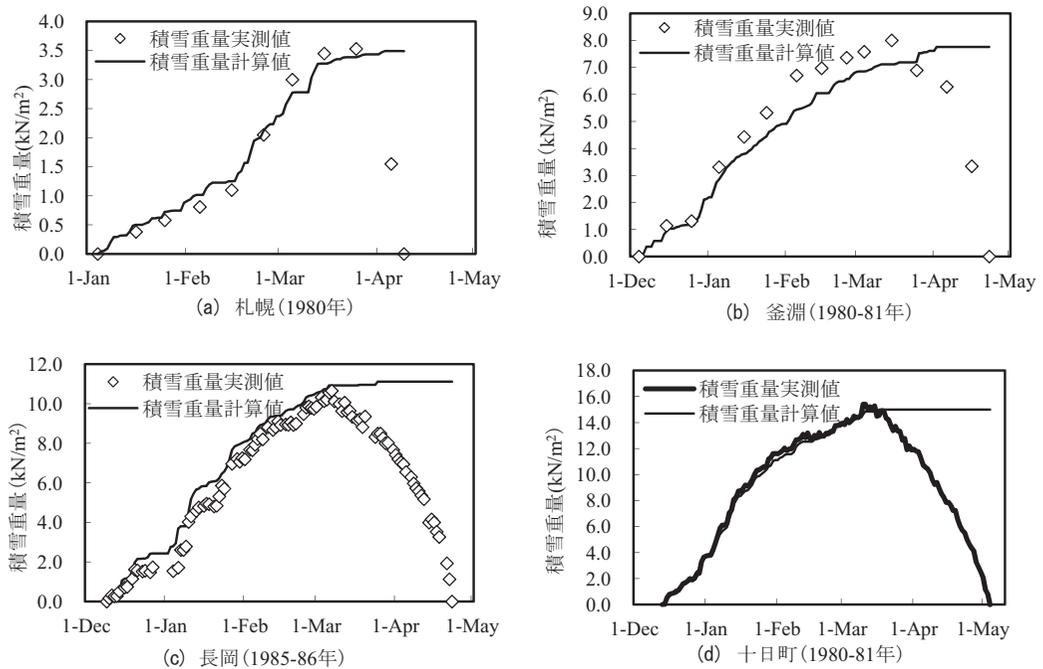


図1 降水量に基づく積雪重量の計算値と実測値との比較

このアイデアに基づき、同博士と筆者は、地上積雪重量と降水量が冬期間毎日測定されている8つの研究機関をえらび、それらの資料の提供を依頼した。図1(a)~(d)は、札幌(北海道大学低温科学研究所)、釜淵(旧農林水産省林業試験場・釜淵試験地)、長岡((独)防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター)、十日町(旧農林水産省林業試験場・十日町試験地)における上式による算定値と実測重量値とを比較例示したものである。上式が、根雪期間の積

雪重量最大値までの実測データによく追従していることが分かる。

3. 研究の現況：屋根雪の偏分布評価法

3.1 屋根面風圧分布と屋根雪分布との基本的関係

屋根雪の偏荷重評価を行うにあたり，屋根面での風の吹き払い・吹きだまり効果に起因する屋根雪の偏分布形状を適切に推定する必要がある．今日，人工雪を用いた吹雪風洞実験により，風速と気温の両方を制御した実験条件下における信頼性の高い屋根雪情報を得ることができるようになった^{7),8)}．

さらに，得られた結果について，屋根面近傍の気流特性との関係から合理的に説明できる根拠があれば，屋根雪偏分布形成のメカニズム理解への一助となると共に，気流特性を利用した実務設計への応用展開が期待できる．これに関する知見として，「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，はく離れ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．」⁹⁾という基本的事項を挙げる事ができる．

このことから筆者らは，屋根面の風上から風下へ向かう風圧分布特性と屋根雪分布形状との関係に注目した．水平屋根・切妻屋根・アーチ屋根など各種屋根形状についての風圧風洞実験および吹雪風洞実験を行った結果，負圧および正圧いずれの圧力領域においても風圧分布と屋根雪分布との緊密な関係性を確認した^{10)~12)}．その概念を図2に示す

横軸は屋根面における風圧係数で負圧と正圧の領域からなる．風圧係数とは，模型屋根面において測定した風圧力を模型屋根の平均高さにおける速度圧で除した値をいう¹³⁾．縦軸は，屋根雪の偏分布係数（屋根の平均積雪深に対する各点の積雪深の比）で，値1.0を境として，それより大きい場合を多雪領域，小さい場合を少雪領域とする．積雪の増加要因として，負圧の

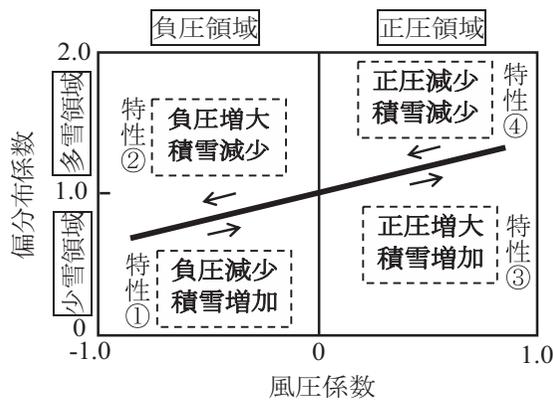


図2 風圧係数と屋根雪の偏分布係数の関係を表す概念図
(直線表示した場合)

減少（特性①）あるいは正圧の増大（特性③）を，逆に積雪の減少要因として負圧の増大（特性②）あるいは正圧の減少（特性④）を指摘することができる。

この知見は，風圧の平均成分に着目すれば，屋根面近傍の気流性状が，概ね2次元的な流れ場と仮定できる場合において有効であり，屋根雪の偏分布特性に対して基本的な解釈を与えている。なお風圧係数は風速に拘わらずほぼ一定であるが，屋根雪の分布形状は風速に依存するため，図中に示す回帰直線式は一定ではなく風速によって当然異なってくる。従って，風速をパラメータとしてこの回帰直線式を定式化できれば，屋根雪偏分布評価の合理化に大いに資することができる。

3.2 水平屋根の屋根雪偏分布特性

前述した知見を，水平屋根の屋根雪偏分布特性評価に応用した事例¹⁴⁾を以下に述べる。風圧風洞実験を北海道大学大学院・工学研究院・流れ制御研究室において，吹雪風洞実験を（独）防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・新庄雪氷環境実験所において行なった。前者に関する写真を付録写真1～3に，後者に関しては付録写真4～6に示す。

(1) 実験概要

実験用建物模型の寸法を図3に示す。正方形水平屋根（軒高比1/2）で，模型材料は，吹雪風洞実験ではスチレンボード，風圧風洞実験ではアクリル樹脂である。いずれも表面は滑らかで厚さ5mmである。なお，吹雪風洞実験においては，人工雪粒子径を勘案してできるだけ大きな模型寸法を採用している。風圧実験模型の2倍の寸法であるが，風圧分布と屋根雪分布とを相互比較する上で支障はない。

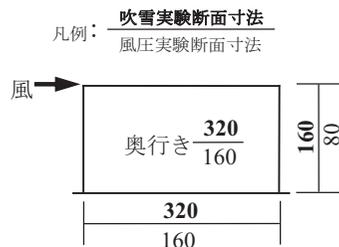


図3 実験模型断面図 (mm)

初めに寒冷地を想定し，吹雪風洞実験時の気温を -10°C とした。実験風速を1.7m/s，2.0m/sおよび2.5m/sの3段階に変化させ，屋根雪分布に及ぼす風速の影響を検討した。次に，暖地を想定し気温を -2°C とし，気温 -10°C との違いを検討した。実験風速については，構造設計上考慮が必要となる屋根雪の典型的な偏分布特性を検討しているので，それと関連する風速の範囲はおのずと限定される。すなわち吹き払い効果が強すぎる強風や，偏分布が生じにくい弱風は対象外である。これを予め実験的に確認し，1.7m/s，2.0m/sおよび2.5m/sを設定している。また，実験時間については，屋根雪の偏分布特性を考えようとするときの適正時間があるので，積雪形状を目視確認しながら決定した。屋根雪の深さは，レーザー変位計（精度0.1mm）により計測する。

人工雪粒子の粒径は，図4内○印で示す粒子の長さで表され，その平均値はおよそ1.0mmである。石坂らの野外観測報告¹⁵⁾によれば，雪粒子径が1.0mm程度の場合その落下速度の平均

値は、0.8~1.0m/s付近である。吹雪粒子の入射角は、その落下速度と風速との関係で決められる。このため、模型高さにおける実験時の吹雪粒子の入射角に基づいて、実験風速を野外の実風速に換算することが可能である。すなわち用いた実験風速は、軒高さで1.7m/s、2.0m/s、2.5m/sの3種類であるが、これを実風に換算するとそれぞれ3.2m/s、3.6m/s、4.5m/sとなる。

付録写真7a)~d)から、風速が増大するにつれ吹雪粒子の入射角が小さくなっていく様子が分かる。

なお、雪粒子の性質、気流プロファイルその他の相似条件については、参考文献⁹⁾で述べておりここでの記述は割愛する。

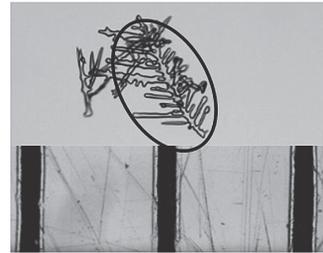


図4 人工雪粒子

(2) 風圧係数と屋根雪偏分布係数との関係の定式化

図5に水平屋根面における風圧係数の分布を示す。負の圧力は、風上端付近で-0.92~-0.97となり微増傾向(②)にあるが、その後反転して再付着点付近に向かい-0.16となり急激な減少傾向(①)を示している。また、風下端付近で、減少傾向が終わり、反転して-0.17へと微増傾向(②)を示した。屋根区分風上側での平均値は-0.78、風下側で-0.27である。

図6にレーザースクリーンを用いて可視化した吹雪粒子の流れを示す。同図から風上端で剥離した雪粒子が、屋根面後方で再付着している様子が分かる。

図7に、吹雪風洞実験により得られた偏分布係数の値および多項式近似曲線を示す。今後の考察は、この近似曲線を基に進める。その理由は、雪深さに対する雪粒子径の比率により測定値に乱れが生じると推定され、近似曲線の方が平均的な予測計測ラインを表しており、現実的であると考えからである。同図中○印が風速1.7m/sの場合で、その近似曲線(実線)と風圧係数(図5)との曲線形状を比較すると、両者の反曲点位置はほぼ対応し、さらに凹凸特性が概ね逆の関係になっている。風上端と風下端では特性②(負圧の増大による積雪の減少)が認められるが、屋根面の広い領域において特性①(負圧の減少による積雪の増加)を読み取ることができる。次に、風速2.0m/sの△印の場合を見ると、上記の○印の場合とほぼ同等の傾向を示すことが分かる。さらに、2.5m/sの場合では、風上端の狭い領域で積雪の増加が見られるが、全体的な特徴は、○印や△印の場合と概ね同等とみなしてよい。ことから、1.7m/s~2.5m/sの風速の場合、風上側での少雪、風下側での多雪という水平屋根上積雪形状としての典型的なパターンを示している。また、上記の範囲で風速が違っていても偏分布の定量的特性に大差はないと言える。

図8に、風圧係数と屋根雪の偏分布係数との関係を表す散布図および回帰直線を示す。図中、○印が風速1.7m/sの場合、△印が風速2.0m/sの場合、□印が風速2.5m/sの場合である。こ

ここで風圧係数の値は図5に示すそれを、屋根雪の偏分布係数の値は図7に示す近似曲線のそれを用いている。図から明らかなように、いずれの風速においても風圧係数と偏分布係数両者の相関は強く、相関係数は、風速1.7m/sにおいて0.96、2.0m/sにおいて0.92、2.5m/sにおいて0.95となった。

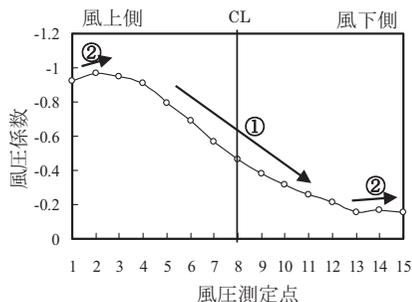


図5 水平屋根面の風圧係数

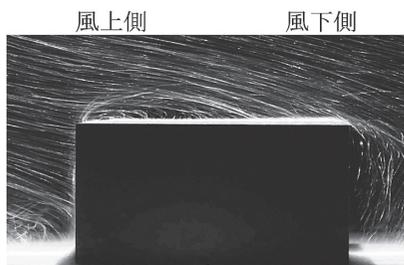


図6 雪粒子の流線（風速1.7m/s）

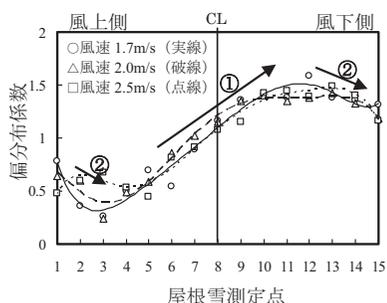


図7 水平屋根雪の偏分布係数

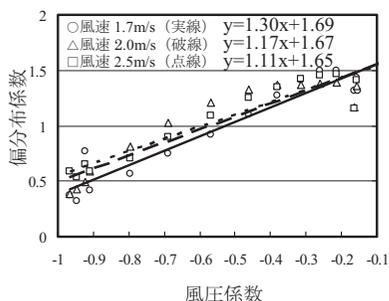


図8 水平屋根における風圧と偏分布係数の関係（気温 -10°C ）

（3）風圧分布と屋根雪分布との定式に基づく屋根雪偏分布係数

これまで述べてきたように、屋根雪偏分布の形成において、屋根面風圧係数の増減による影響が認められるため、両者の相関性を活用すれば風工学的根拠が明確な偏分布係数値を示すことができると考えられる。ここでは、図5に示した水平屋根面における風圧係数の値を、図8に示す直線回帰式に代入して、屋根雪の偏分布係数値を求めることにした。

図9に得られた結果を示す。図中、○印、△印および□印で示すラインは、気温 -10°C 下での風速1.7m/s、2.0m/sおよび2.5m/sの場合である。この3つのラインを比べると、それらの差異は小さく、従ってこの風速の範囲では、

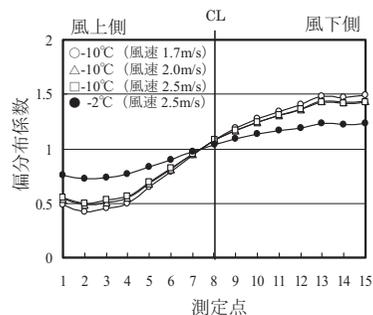


図9 定式に基づく水平屋根雪の偏分布係数

実用的にはその違いによる影響を無視してよいと思われる。また、同図には気温 -2°C の場合（●印）も示しているが、 -10°C の場合と比べると、両者の違いは明瞭であることから、気温による影響を考慮する必要がある。なお、気温 -10°C および -2°C のいずれにおいても、風上側から風下側に向かって屋根雪が漸増していく特性は共通している。

これらの結果を実用に供するため、図9を基に、風上側と風下側の偏分布係数の平均値を求めた。 -10°C の場合、風上側と風下側の値は風速 1.7m/s において 0.66 と 1.34 、風速 2.0m/s および 2.5m/s において 0.70 と 1.30 であった。図10(a)に、 -2°C の場合と比較するため、それと同じ風速条件である 2.5m/s の場合における値を示している。ただし実務上では、小数点以下1桁程度に丸めた数値を扱う方が現実的であり、その場合上述の3種のいずれの風速においても風上側で 0.7 、風下側で 1.3 となる。以後、丸めた値を必要に応じて文章あるいは図中（ ）内に併記する。 -2°C の場合、図10(b)に示すように風上側で 0.84 (0.8)、風下側で 1.16 (1.2)となり、 -10°C の場合に比べ、 -2°C では風上側と風下側との積雪量の差が小さくなっていることが分かる。

なお、吹雪風洞実験における偏分布係数測定値の平均は、 -10°C の場合、風上側と風下側の値は、風速 1.7m/s において 0.65 と 1.35 、風速 2.0m/s および 2.5m/s において 0.69 と 1.31 であった。また、 -2°C の場合、風上側で 0.82 、風下側で 1.18 であり、風圧係数からの推定値と極めてよく近似している。

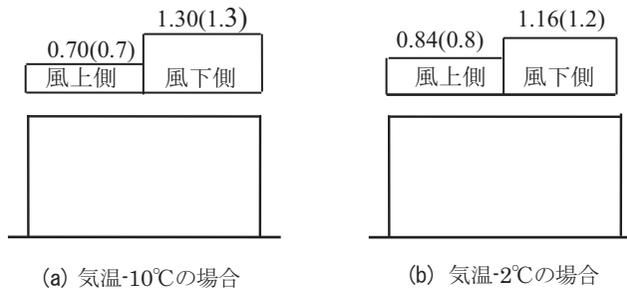


図10 水平屋根の風上側・風下側偏分布係数平均値
(実験風速 2.5m/s (実風換算 4.5m/s))

以上、水平屋根における屋根雪の偏分布係数値を示した。本報では触れていないが、切妻屋根やアーチ屋根についても同様な実験・検討を行っている^{12),14)}。屋根雪の偏分布は風速の強弱により固有の形状が現れるので、風速の影響を包括した総合的な考察を行うべく、現在、実験データの取りまとめを行っている。

4. まとめ

建築物設計用雪荷重に関する評価法は、偉大な先達やそれに続く多くの雪工学研究者の研鑽

の結果が集積されて、近年著しい発展を遂げた。筆者の研究もささやかではあるが、それに対し何がしかの貢献ができたことは幸運であった。本報では、筆者が関わってきたこれまでの研究を軸に評価法合理化の要諦と現在進行形の研究を概説した。

5. 付録写真

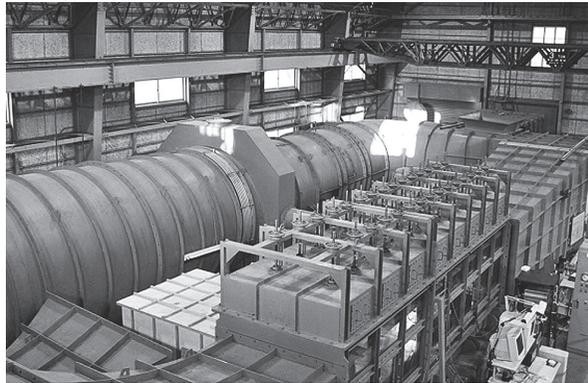


写真1 風圧風洞外観（北海道大学大学院・工学院・流れ制御研究室）

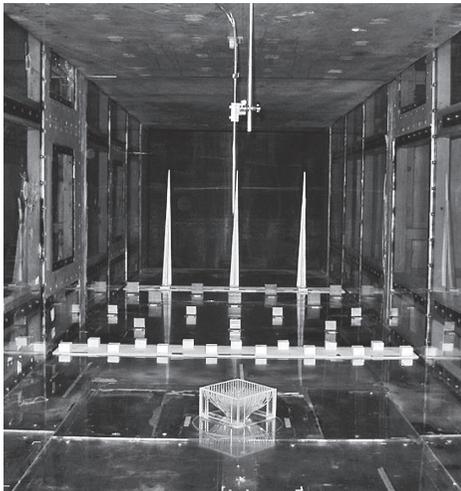


写真2 風圧風洞内部

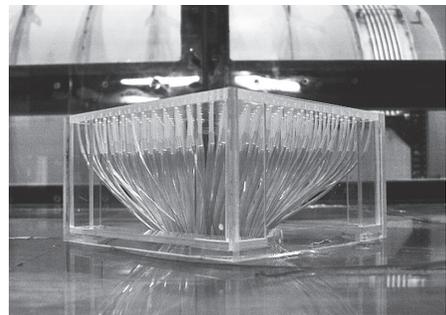


写真3 風圧風洞建物模型

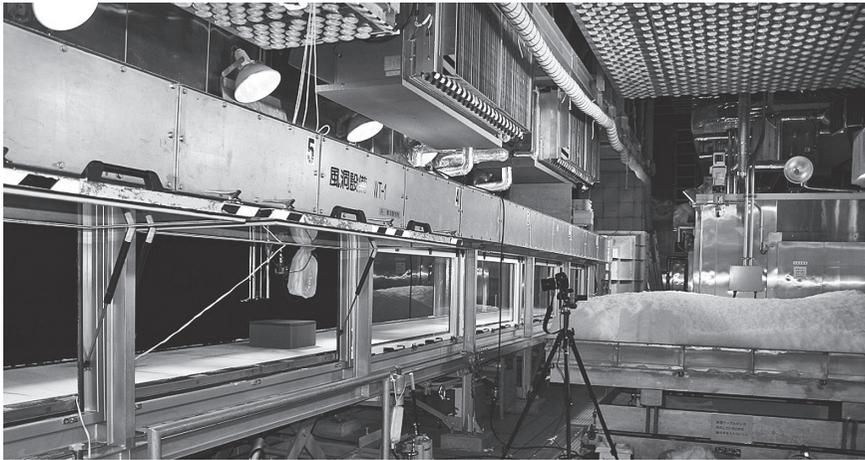


写真4 低温実験室（(独) 防災科学技術研究所・新庄雪氷環境実験所）
（左側が吹雪風洞，右側が人工雪降雪テーブル）

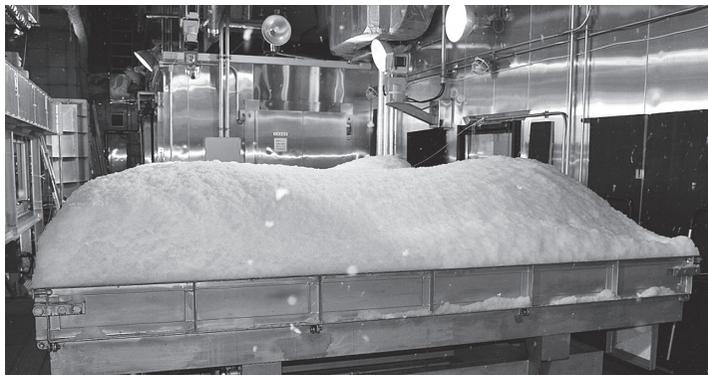


写真5 降雪テーブル上の人工雪



写真6 吹雪風洞実験風景

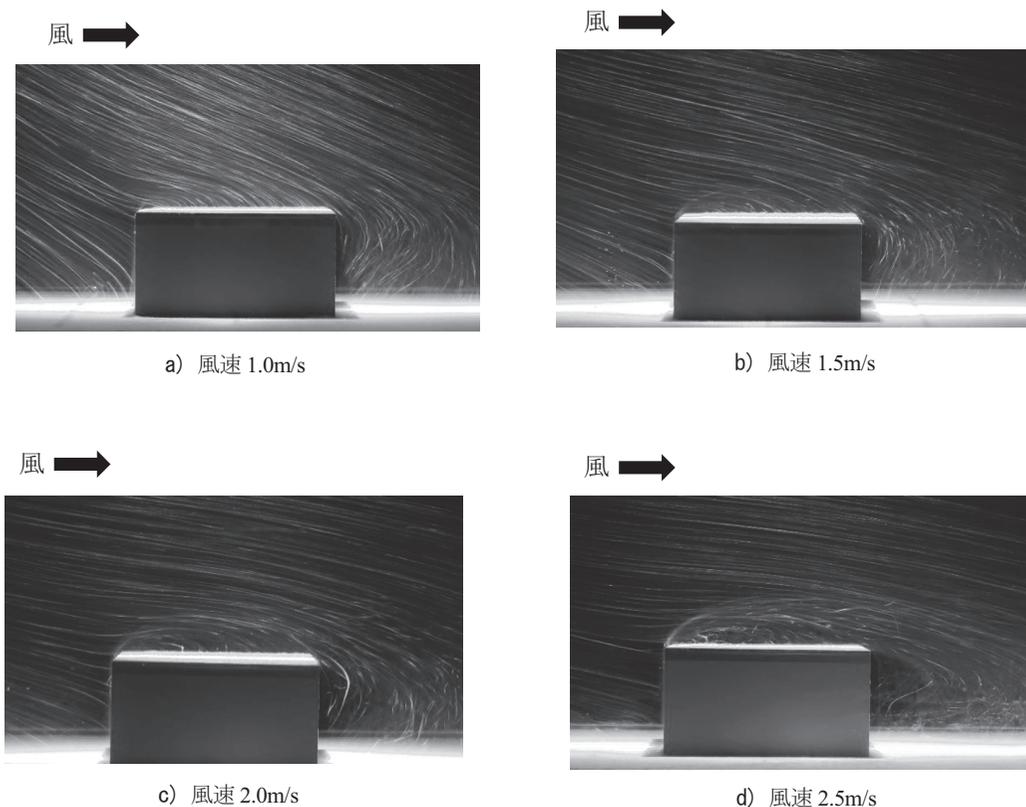


写真7 降雪粒子流線

注1) 平成26年(2014年)2月14日~16日にかけて、関東・甲信地方に降った大雪

注2) 地表の水平面に落下した降水の量をいう。雨のみの場合を降雨量ともいう。雪、霰(あられ)、雹(ひょう)などの固形降水の場合は、融かした水の深さで表す。(気候学気象学辞典, 二宮書店)

謝辞

この12年間行ってきた風洞実験研究は、北海道大学名誉教授・城 攻博士と(独)防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・新庄雪氷環境実験所元所長・阿部 修博士共に歩んできた。お二人のご協力やご指導がなければ成果を出すことはできなかった。心から感謝申し上げます。

また、北海道大学大学院・工学研究院・流れ制御研究室からは、風洞施設の利用を含めて多大なお力添えを頂いたことを感謝申し上げます。最後に、北海学園大学から平成25年度の学術研究助成(一般研究)を頂いた。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004
- 2) 富士見市立市民総合体育館屋根崩落事故調査委員会：富士見市立市民総合体育館屋根崩落事故調査報告書，2014.7
- 3) 日本建築学会：昭和56年豪雪被害調査報告，昭和56年12月
- 4) 城 攻，桜井修次：多雪地域における等価単位積雪重量について，日本雪工学会誌 Vol.9 No.2，1993.4
- 5) 日本建築学会建築計画委員会：札幌ドーム工事全記録 1998～2001，2003
- 6) 桜井修次，城 攻：気温・降水量記録に基づく地上積雪重量の推定法および等価単位積雪重量の評価に関する基礎的研究，日本雪工学会誌 Vol.17 No.3，2001.7
- 7) 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，その2），日本雪氷学会全国大会講演予稿集，p114-115，2002.9
- 8) 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
- 9) 日本風工学会：風工学ハンドブック，朝倉書店，2007.4
- 10) 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.451-458，2009.3
- 11) 桜井修次，阿部 修，城 攻：ドーム屋根における屋根面の風圧分布に基づく屋根雪偏分布係数の算定，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp.223-224，2010.9
- 12) 桜井修次，阿部 修，城 攻：アーチ形状屋根における屋根面の風圧分布に基づく屋根雪偏分布係数の算定，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp.61-62，2013.8
- 13) 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
- 14) 桜井修次，阿部 修，城 攻：屋根面風圧と屋根雪分布との相互関係に基づく屋根雪の実用的偏分布評価法－水平屋根および切妻屋根について－，日本建築学会構造系論文集 No.679，pp.1375-1382，2012.9
- 15) 石坂雅昭他：画像処理手法を用いた自動観測による降雪粒子の同定について その2，日本雪氷学会，雪氷No.66-6，pp.647-659，2004.11