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
北海商科大学

タイトル	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 ： 風速に対応した水平屋根および切妻屋根の偏分布係数
著者	桜井，修次；SAKURAI，Shuji；阿部，修；ABE，Osamu；城，攻；JOH，Osamu
引用	北海学園大学工学部研究報告(46)：75-96
発行日	2019-02-14

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

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
ー風速に対応した水平屋根および切妻屋根の偏分布係数ー

桜　井　修　次*・阿　部　　修**・城　　攻***

Practical Estimation for the Unbalanced Snow Accumulations about Flat and Gable Roofs based on the Relationships between the Wind Pressures and the Snow Accumulations
－Influence of the Wind Velocities on the Roof Snow Depths－

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

要　旨

吹雪風洞実験および風圧風洞実験を通して得られる屋根雪の偏分布係数と屋根面の風圧係数との相関性を活用して，風工学的根拠のある偏分布係数を算定する手法をこれまで提案してきた．本報では，この手法を基に風速に対応した偏分布係数を明らかにすることを目的として，屋根勾配10度，20度，30度の切妻屋根計３模型および水平屋根１模型について吹雪風洞実験を行った結果を報告する．実験気温を－10℃とした寒冷地相当，実験風速が1.0～2.5m/s（実風換算風速1.8～4.5m/s相当）の範囲である．さらに得られた結果と積雪により倒壊した建物の屋根雪実測資料とを照合し，本実験の信頼性を確かめた．

１．はじめに

建築物の設計用雪荷重を算定する際，その基礎となる地上積雪重量については，近年の研究進展により合理的な推定が概ね可能となってきた．一方，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特性に関しては，実測資料による情報が乏しく，汎用性を有

* 北海学園大学　名誉教授・博士（工学）
* Professor Emeritus, Hokkai–Gakuen University, Dr. Engineering
** 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　客員研究員・博士（学術）
** Visiting Researcher, Shinjo Cryospheric Environment Laboratory, Snow and Ice Research Center, NIED, Dr. Philosophy
*** 北海道大学　名誉教授・工学博士
*** Professor Emeritus, Hokkaido University, Dr. Engineering

し且つ実用的な推定手法の確立が今日的な課題として残されている．これについて，吹雪風洞実験による方法が有効なアプローチの一つであり，特に人工雪を用いた方法は，雪粒子が天然のそれと同等な物性を有することや，風速と気温との両条件を制御した実験が可能であるため，信頼性の高い屋根雪分布の情報を得ることができる[1),2)]．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．」[3)]という基本的事項を挙げることができる．

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てきた．水平屋根（学術用語では陸屋根），切妻屋根，アーチ屋根およびドーム屋根など各種屋根形状について，吹雪風洞実験と風圧風洞実験とを行った結果，屋根面における負圧および正圧いずれの圧力領域においても，風圧係数と屋根雪の偏分布係数とは概ね相関関係があることを確認した[4),5)]．ここで風圧係数とは，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基準速度圧で除した値をいう[3)]．また偏分布係数とは，水平屋根，切妻屋根とも屋根全面積の平均積雪深に対する屋根上各点の積雪深の比である．

上記の概念を**図1**に示すような直線回帰式で表現した．横軸が風圧係数で負圧領域と正圧領域を示し，縦軸が偏分布係数である．積雪の増加要因として負圧の減少（特性①）あるいは正圧の増大（特性③）による影響を，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）による影響を指摘した．この特性は，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る．屋根雪分布を考える際，棟と斜め方向に作用する風環境への配慮も必要であるが，屋根形状の主軸方向

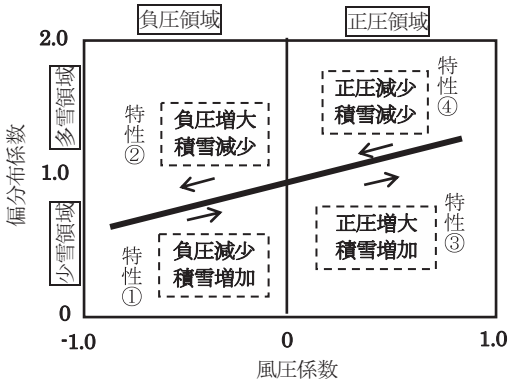


図1　屋根面風圧係数と屋根雪の偏分布係数との関係を表す概念図

での積雪分布形状を把握することがより重要であり，本報では，偏分布が顕著に現れる切妻方向で議論することを優先課題としている．また本研究は，風圧係数を屋根雪分布評価に取り入れた点に新しさがあるが，その時の風圧係数は無雪時の屋根面を対象としている．従ってこれと対比させる積雪深は，無雪時を基準としたものとなる．複数回の降雪による積雪分布特性については今後の検討課題である．

図1に示す知見を風速に対応したものに展開しようとする場合，屋根面の風圧係数分布は風速に拘わらず概ね一定であるが，屋根雪の偏分布形状は風速に依存するため，種々の風速下での吹雪風洞実験を行いその特性を把握する必要がある．これまでの筆者らの研究では，水平屋根については3種類の風速下での吹雪風洞実験を行っているが[6]，その他の屋根形状では主に1種類の風速下での実験であったため，風速の影響を反映した屋根雪偏分布係数の総合的評価には至らなかった．本報の目的は，①切妻屋根に焦点をあて，4種類の風速下での吹雪風洞実験を行い，風上側と風下側での積雪分布性状を得ること．その偏分布係数と風圧係数との相関性を確かめ，それをベースにした偏分布係数を算出すること　②切妻屋根について，風上側が概ね無雪で風下側に多く堆雪する風速域（「境界風速域」と記す）の特定　③水平屋根について，これまでに行っていない風速下での追加実験を加え，切妻屋根と同様に風速に対応した偏分布特性評価を行うことである．

2．実験概要

風圧風洞実験は新たに行わず，北海道大学大学院・工学研究院・流れ制御研究室において行ってきた既往の実験データを利用する．また，人工雪による吹雪風洞実験については，これまでと同様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った．当該風洞は，密閉型回流式で測定部の断面は，高さ1.0m，幅1.0m，長さ14.0mであり，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．また，風洞装置内に設置された冷却器により実験気温を制御することができる．本研究では寒冷地を想定してこれまで－10℃に設定している．

吹雪風洞実験を行うための相似則として，①建物の幾何学的条件　②風の分布の条件　③飛雪粒子運動の相似条件　④雪粒子性質の相似条件　⑤経過時間の5項目が挙げられる[7]．しかし実際には，①～⑤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．③，④に関する項目については，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．実験要領や気流プロファイル等の相似則については，既報[2]で詳述しているので本報では再掲しない．その際，重力や慣性力に関わるフルード数について，雪粒子の大きさを基準とした場合の相似性を緩和条件とみなしている．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ている．

実験に用いる建物模型はこれまでと同一のものを使用している．その断面図を**図 2** に示すが，屋根形状は，水平屋根１個（正方形，軒高比１／２）および左右対称の切妻屋根３個（正方形，屋根勾配10度，20度および30度，軒高比１／２）である．吹雪風洞実験では，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，建物模型はできるだけ大きいものを設定している．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の研究展開に支障はない．ただし，風洞断面閉塞率の値は一般的に５％以下が適当とされており，建物寸法はおのずと制限される．このため強い風速や屋根勾配によっては飛雪粒子の一部が模型建物の風下側屋根域外に達する場合もあるが，棟部からはく離した粒子の多くは屋根に再付着することを目視確認している．従って，屋根雪の堆雪性状を考察する上で本実験は有効であると考える．模型材料は，吹雪風洞実験ではスチレンボードを，風圧風洞実験ではアクリル樹脂を用いている．いずれも表面は滑らかで厚さ５mmである．吹雪風洞実験では，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，本報では全実験において同一粗さの材料を使用しているので，堆積形状の相互比較が可能である．屋根雪の深さは，**図 2** に示す模型屋根上のセンターラインに沿って，レーザー変位センサー（精度0.1mm）により測定する．

実験風速については，吹き払い効果が強く屋根雪が積もらない強風や，偏分布が生じにくい弱風は研究の対象外である．これを予備実験で確認し，1.0m/s，1.5m/s，2.0m/sおよび2.5m/sの４種を設定することにした．これらの実験風速を野外の実風速に換算しようとする場合，風洞内のモデル実験と実現象の相似性を雪粒子の入射角の一致を担保することによって可能である．すなわち，模型高さにおける実験時の雪粒子の入射角に基づいて，野外の実風速を推定することができる．その際雪粒子の入射角は，その落下速度と風速との関係で決められる．落下速度は雪粒子の性状によって幅があり，直径1.0mmの樹枝状結晶では0.5～1.0m/sの範囲である[8]．この場合，放射状の粒子であれば最も落下速度の小さい0.5m/s付近との報告[8]があるが，筆者らが用いている粒子は放射状ではなく**図 3** に示すように枝状の雪片であり，単独であったり相互に絡み合ったりしている．

また数日間使用していくため，徐々に形状が破壊され変化し落下速度が大きくなっていくこ

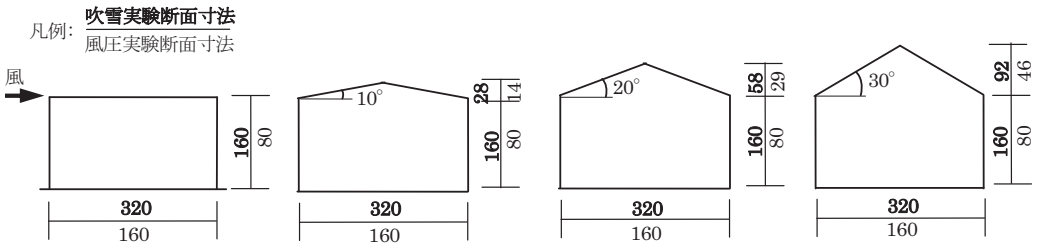


図 2　実験模型建物断面図（単位 : mm）

図 3　人工雪粒子（目盛単位：1 mm）

とを勘案して，本報では野外粒子の落下速度を1.0m/sとしたときの実風換算風速値を求めた．これによると，実風換算値は順に1.8m/s，2.7m/s，3.6m/sおよび4.5m/sとなる．さらに，雪粒子の落下速度に及ぼす気温の影響評価については，それを直接考慮することは現状では難しく，本報では上述したように落下速度の変動幅を踏まえて対処しているが，この分野の今後の発展に依拠している．

3．切妻屋根の偏分布係数

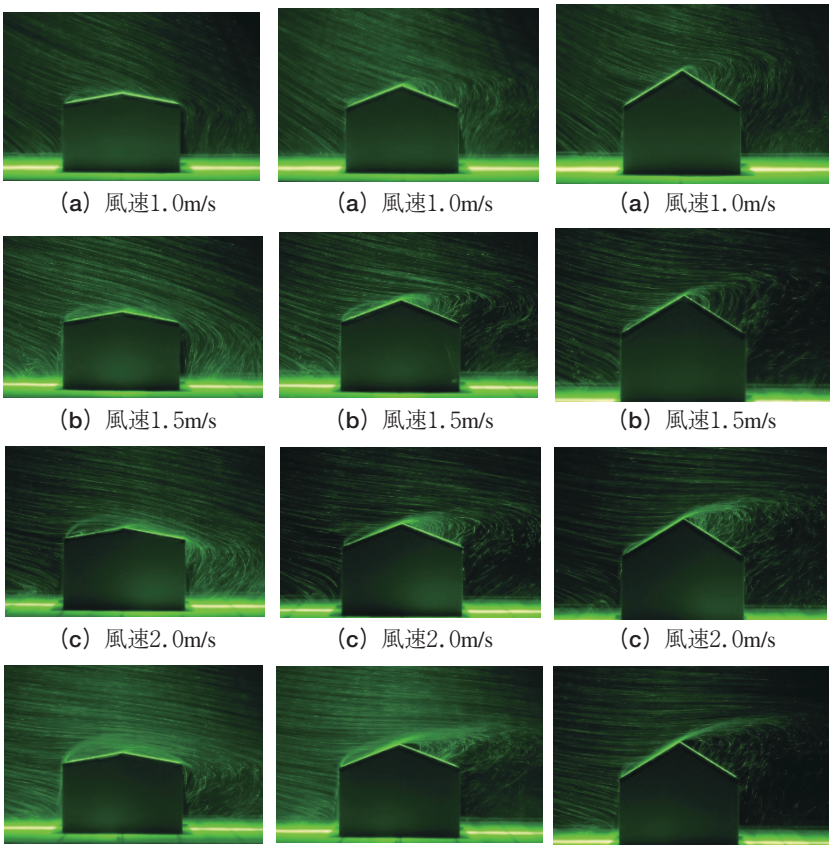
3.1　屋根面近傍の雪粒子流線の特徴

模型実験で用いる雪粒子のサイズは自然のものとほぼ等しく，落下速度も同等である．このため，強風時に棟付近から風下側へ吹き飛ばされる雪粒子の軌跡は，棟部近傍において特に慣性力の影響が現れ，屋根面付近の空気の流線には必ずしも追随しない．しかし，より細かな粒子を用いたとしても，屋根面での大局的な流線構造には，さほど大きな違いはないと考えられ，本研究の主旨である屋根雪分布性状の検討は十分可能であると考える．

図 4（1）～（3）に屋根勾配10度，20度および30度における屋根面近傍での雪粒子流線を示す．用いた風速は，前述したように1.0～2.5m/sの 4 種である．切妻屋根での気流のはく離は，風上側軒先および棟部の 2 か所で発生するが，風速の違いが屋根面近傍の流れ場に与える影響を雪粒子流線によって検証する．以下，考察のし易さから10度，30度，20度の順で行う．

屋根勾配10度の場合，風速1.0～2.5m/s（**図 4（1）(a)～(d)**）のいずれにおいても風上側軒先からのはく離の発生が明瞭で，風速が大きくなるにつれはく離線がより高くなり，再付着点までの距離が伸びていくことが分かる．一方，棟部を起点とするはく離は，風速が増大するにつれ徐々に拡大していくが，風上側軒先からのものに比べ高さが小さいことが分かる．

これに対し**図 4（3）(a)～(d)**に示す屋根勾配30度のはく離線は，屋根勾配10度の場合と逆の特徴を示している．すなわち，風上側軒先からのそれは，風速1.0m/sでは目視できず1.5m/sから形成されているが，それ以上風速が増大してもはく離域は極めて小さいことが分かる．こ



（1）屋根勾配10度　　（2）屋根勾配20度　　（3）屋根勾配30度

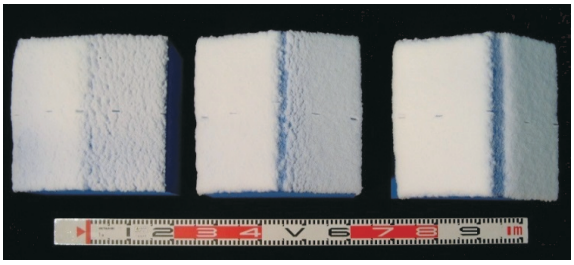
図4　切妻屋根近傍の雪粒子流線（写真左側が風上）

れに対し，棟部を起点とするはく離域は風速1.0m/sでは小さいが，1.5m/s以上になると非常に大きな渦を形成する．すなわち，棟部から飛び出したはく離線が屋根面に巻き込まれるように再付着し，後述の積雪写真（**図5**）が示すように風下側の積雪分布を形成していると言える．風速2.5m/sでは，他の風速に比べ流線が大きく飛び出しているが，積雪写真（**図5**）が示すように，風下側に十分堆雪しており屋根雪の偏分布特性を検討する上で支障はない．

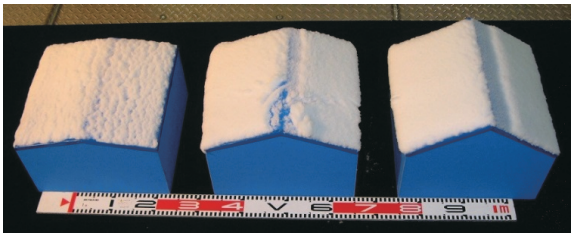
図4（2）(a)～(d)に示す屋根勾配20度の場合の流線は，風上側，風下側のいずれも，各風速において勾配10度と30度との中間的な様相を示していることが分かる．

3.2　吹雪風洞実験写真から見る屋根雪の偏分布特性

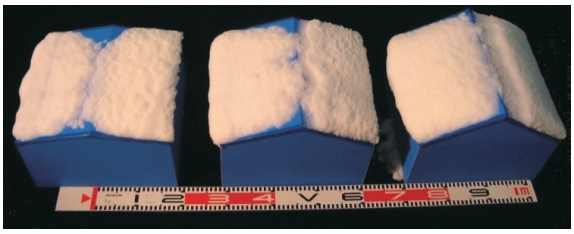
ここでは，吹雪風洞実験後の積雪写真から屋根雪分布の全体的傾向を見ていくことにする．**図5（1）～（4）**は，風速1.0m/s，1.5m/s，2.0m/sおよび2.5m/sの場合で，各画像左から順に屋



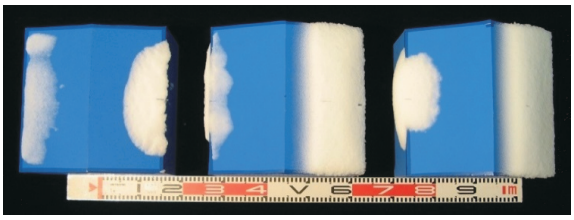
（１）風速1.0m/s



（２）風速1.5m/s



（３）風速2.0m/s



（４）風速2.5m/s

図５　切妻屋根の積雪状況
（写真左側が風上，左から順に勾配10度，20度，30度）

根勾配10度，20度および30度である．また各画像左側が風上である．なお，レーザー変位センサーによる積雪深測定データの分析は次節で行う．

はじめに1.0m/s（**図５（１）**）と1.5m/s（**図５（２）**）の風速下における積雪分布の特徴を見てみる．まず風向と直交する方向においては，いずれの屋根勾配においてもほぼ一様に積雪分布しており，屋根面近傍での２次元的な流れ場を確保していることを示している．

一方風向方向では，前節で述べたように，切妻屋根特有の鋭角的な屋根形状のため，棟部近傍においてはく離による渦が生じ，角度が大きくなるほど棟部の風下側付近に積雪の少ない領域が発生している（以後，この領域を便宜上「棟部はく離域」と記す）．これは，雪粒子の慣性力が大きいため，風下側の棟の直下には落下しないので，この部分が凹みになったと考えられる．このため風上側の積雪分布と風下側のそれとの間が不連続となっている．このことは，棟部近傍が，**図1**に示す考察条件とは異なる領域であることを示唆しており，棟部を含んで屋根面に沿う積雪分布を精度よく推測するには，現状では不十分であると言える．しかし，この部分を過ぎた乱流域においては，渦に乗って屋根に落下する雪粒子も多数見られることから自然状態と同様の堆積が起こっており，屋根面全体の屋根雪分布性状を考察する上で大きな支障はないと考える．なお，3.3節で後述する測定データによれば，1.0m/sと1.5m/sの風速下では，いずれの屋根勾配においても風上側の平均積雪の方が風下側のそれより大である．また，**図5（2）**中央写真の屋根勾配20度の場合において棟部手前の積雪が乱れているが，写真撮影の際に誤って触れたことによるものである．

次に**図5（3）**に示す風速2.0m/sの場合，いずれの屋根勾配においても棟部の両端部分に局所的な無雪域が現れ，そこでの気流の変化を想定させるが，屋根面全体では大きなものは見られず，実用上この影響は無視してよいと思われる．また，前述した「棟部はく離域」が屋根勾配20度と30度では顕著に現れている．なお後述する測定データによれば，平均積雪は屋根勾配10度では風上側より風下側の方が大きく，30度では風上側の方が風下側よりやや大きかった．

最後に**図5（4）**に示す風速2.5m/sの場合，上述してきた風速1.0～2.0m/sの範囲での積雪分布とは様相が大きく異なっている．はじめに屋根勾配20度と30度の場合を見ることにする．これらの風上側では，いずれも軒先周辺に付着・堆雪した領域が見られるが，屋根面の大半は吹き払いのため積雪ゼロとなっている．一方，風下側では「棟部はく離域」が見え，3.3節で後述する測定データによれば，そこから風下方向に向かい積雪が急激に増加する傾向を示している．また筆者らは，風速3.0m/s（実風換算風速5.4m/s）において，風上側，風下側とも一定の時間内において殆ど堆雪しないことを目視確認している．従って，実用的な観点からいって，風速2.5m/s（実風換算風速4.5m/s）以下近傍を風上側の積雪がほぼゼロ且つ風下側一帯に吹きだまり現象を引き起こす可能性のある「境界風速域」として位置づけてよいと思われる．東浦は，新庄雪氷環境実験所の野外に設置した3寸勾配（約29度）の片流れ実験屋根を対象に，送風機を使った屋根雪処理の可能性を検討した[9]．その結果，送風風速が，3.8～4.0m/s以上になると降雪は屋根面に積もらないことを指摘している．この指摘は，筆者らの上記の結論とほぼ一致している．

次に勾配10度の場合，風上側では軒先にうっすらと堆雪しているがその他の部分は吹き払われており，勾配20度や30度の場合と同様な分布傾向を示している．一方風下側では，勾配20度

や30度の場合に比べ吹き払い域が広くなっており，積雪形状がやや異なっている．このことから，勾配20度や30度の場合のような積雪形状をもたらす風速条件としては，この2.5m/sの風速は勾配10度にとってやや強い値であったろうと推定される．しかし，自然環境下での積雪現象は風速に対し本来ばらつきを有しており，この風速よりやや弱い風速を斟酌する意味は実用的観点から薄いため，本研究では，勾配10度の場合においても風速2.5m/sを「境界風速域」の範疇として位置づけることにする．

3.3　風圧係数との相関性に基づく偏分布係数の算定

本節では，屋根面の風圧係数と屋根雪の偏分布係数相互の関係を定式化し，それを利用して屋根雪の偏分布特性を算定する．既報[6]では，両者の相関性を検討する際，風上側と風下側との両面を含む屋根面全体に適用する一つの直線回帰式を求めた．しかし，本報ではより適用精度を高めるため，風上側と風下側とに２区分したそれぞれの領域において直線回帰式を求めることにする（後述の**図８**，**９**，**12**，**13**）．その際，棟部近傍や軒部などの気流が乱れる部位については，**図１**に示す考察条件とは異なる領域であることを勘案して，回帰式の算定において適宜除外する．このため後述の**図７**や**図11**では，局所的に偏分布係数の測定値（○印）と推定値（■印）とが乖離する場合がある．この領域の評価は今後の課題であるが，これらを除く広範な屋根面での積雪分布を推定できる手法としては有効であると考える．

なお，既報[6]では風速1.7m/sの条件下において，３種の屋根勾配の風上側および風下側の偏分布係数平均値を提示した．それによると，屋根勾配20度の場合，それらの値が屋根勾配10度と30度の値の中間値を示した．また今回の吹雪風洞実験においても，図示はしていないが屋根上積雪量が同様の傾向を示すことを確認したので，本報では，屋根勾配10度と30度のみ詳述し，20度については両者の中間値として位置づけることにする．

3.3.1　屋根勾配10度における定式化と偏分布係数

はじめに，屋根勾配10度の場合の屋根面の風圧係数分布図を**図６**に示す．同図から分かるように，風圧は，風上端付近で負圧の最大値（－1.22）となるが，風下側に向かって急激に低下し（特性①），屋根の棟部前近傍において停滞しはじめ－0.5付近の値を示す．その後微増傾向に転じ（特性②），棟部を過ぎた付近から風下端に向かって再び低下する（特性①）．結局，風圧分布は，特性①→②→①の展開すなわち負圧の増減のみとなり，後述する勾配30度の場合のように負圧と正圧とを有する展開と比べるとシンプルである．以下，風速1.0m/s，1.5m/s，2.0m/sおよび2.5m/sの各条件下における吹雪風洞実験の積雪データを基に，屋根面の風圧係数と屋根雪との偏分布係数との相関性を検討し，それを活用した偏分布係数を算定する．

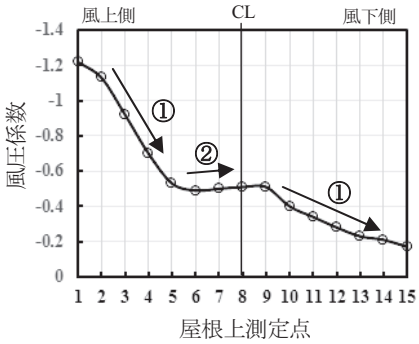


図6　切妻屋根（勾配10度）の風圧係数

（1）風速1.0m/sおよび1.5m/sの場合

風速1.0m/sおよび1.5m/sの吹雪風洞実験において得られた屋根雪の偏分布係数分布を，**図7（1），（2）**（○印点線）に示す．前述の風圧係数分布図と対比すると，風上側や風下側における負圧の減少域において積雪の増大傾向が見られ（特性①），また，棟部近辺の負圧の停滞域では積雪の減少傾向が認められる（特性②）．このことから，風速1.0m/sや1.5m/sの条件下では概ね風圧の増減特性①→②→①に対応した積雪分布の特徴を示していると言える．

図8（1），（2）および**図9（1），（2）**に，風上側および風下側における風圧係数 xと偏分布係数 yとの関係を表す散布図および回帰直線を示す．それぞれ相関性が認められ，風速1.0m/sでの回帰式は風上側が y＝0.162x＋1.301（相関係数R＝0.817（以後Rと記す）），風下側が y＝0.824x＋1.121（R＝0.960）となった．また，風速1.5m/sでの回帰式は風上側が y＝0.257x＋1.310（R＝0.873），風下側が y＝1.504x＋1.446（R＝0.871）となった．ここで直線回帰式を算定する際，**図8（1）**では風上側の全測定点7個のデータを利用しているが，**図8（2）**では適用外と判断できるセンター近傍の点（No. 7）を除いた6個のデータを用いている．また，風下側に関する**図9（1），（2）**では，センターを含む全測定点8個のデータを利用している．

次に既報同様[6]，**図6**に示す風圧係数の値をこれらの回帰式に代入することによって，風圧分布をベースにした屋根雪の偏分布係数値を求めることにした．結果は**図7（1），（2）**（■印実線）のようになり，推定値は測定値に概ね追随している．

（2）風速2.0m/sの場合

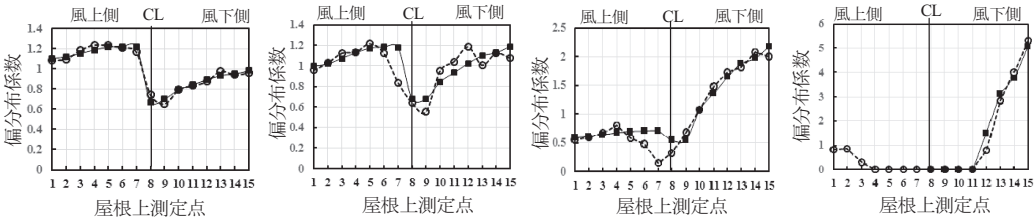
風速2.0m/sにおける屋根雪の偏分布係数分布図を**図7（3）**（○印点線）に示す．風速1.0m/s（同図（1））および1.5m/s（同図（2））の場合と比べると，風上側における積雪の増加，棟部近傍での少雪，風下側での積雪の増加といった全体的な特徴は変わらず，**図6**に示す風圧との関係性を維持している．しかし，これら2種類の風速下に比べ，風上側においては吹き払いのためより少雪になり，風下側においては棟部からの吹き溜まりが急激に増加しており，風速による影響が顕著に表れている．風下側の偏分布係数の値は0.32から2.00までの変動を示した．

風圧係数との関係を表す散布図と回帰直線を，風上側では**図８（３）**，風下側では**図９（３）**に示す．前者の回帰式はy＝0.149x＋0.774（R＝0.440）となり，相関係数はやや低かった．用いたデータはセンター近傍の２点を除く５点である．また，後者の回帰式はy＝4.757x＋2.971（R＝0.977）となった．用いたデータはセンターを含む全測定点８個である．

図６に示す風圧係数の値をこれらの回帰式に代入した結果は**図７（３）**（■印実線）のようになり，棟部風上側近傍では，推定値と測定値との乖離がやや大きかった．

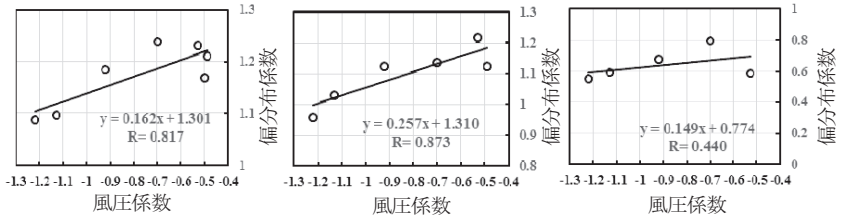
（３）風速2.5m/sの場合

風速2.5m/sの場合の屋根雪の偏分布係数を**図７（４）**（○印点線）に示す．3.2節でも述べたように，風上側では軒部分にうっすらと堆雪が認められるものの，強い吹き払いのため屋根大半の領域で無雪となっていることから，実用的には偏分布係数をゼロとして扱ってよいと考えられる．従って3.2節で述べたように風速2.5m/sを「境界風速域」として位置づけることにす



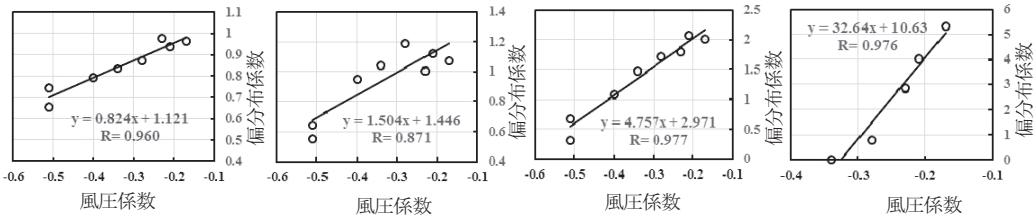
（１）風速1.0m/s　（２）風速1.5m/s　（３）風速2.0m/s　（４）風速2.5m/s

図７　切妻屋根（勾配10度）の偏分布係数（○：測定値，■：風圧に基づく推定値）



（１）風速1.0m/s　（２）風速1.5m/s　（３）風速2.0m/s

図８　切妻屋根（勾配10度）風上側における風圧係数と偏分布係数の関係



（１）風速1.0m/s　（２）風速1.5m/s　（３）風速2.0m/s　（４）風速2.5m/s

図９　切妻屋根（勾配10度）風下側における風圧係数と偏分布係数の関係

る．このため風圧係数と偏分布係数との関係については，風上側を本報の適用外とみなし，風下側のみ検討することにする．偏分布係数の値は，「棟部はく離域」以降，急激に増加しており，0.00から5.08までの変動を示している．

風下側における散布図および回帰直線を**図9(4)**に示す．回帰式はy＝32.64x＋10.63（R＝0.976）となった．用いたデータはセンターとその近傍の2点を除く5点である．**図6**に示す風圧係数の値をこの回帰式に代入して得られた推定値は，**図7(4)**風下側（■印実線）のようになり，ほぼ測定値に追随している．ただし，計算値が負の値となった時はゼロとみなしている．

3.3.2　屋根勾配30度における定式化と偏分布係数

屋根勾配30度における風圧は，**図10**に示すように特性①→③→④→②→②→②の展開となる．屋根勾配10度の場合の特性①→②→①に比べ，正圧の増減を示す特性③と④が含まれることが大きな特徴である．すなわち風上端で負圧（−0.29）であるが，急激に減少し始める（特性①）．この後正圧へ変化し，0.18まで増大するが（特性③），この正圧はすぐに減少し始める（特性④）．この後負圧へ変化し，値が−0.4付近に達するまで増大し（特性②），引き続き風下端まで漸増していく（特性②→②）．

一方，**図5(1)**～**(4)**の積雪写真が示すように，屋根勾配30度ではいずれの風速においても「棟部はく離域」が顕著であり，その領域では風圧係数と偏分布係数との相関性が悪くなる．このため両者の回帰式の算定においては，この領域を除いて行う．なお本報では，この領域の推定方法として，風下側屋根の棟部に最も近い測定点11の積雪量をゼロとし，後述の**図13**で用いた測定点の中で最も棟部に近い測定点の推定値を用いて，その中間を単純に直線補間することにした．模型寸法が大きくなれば，この領域の屋根面全体に占める割合は減少することが予想されるが，この領域の扱い方については，測定値自身の信頼性を含めて今後の課題とする．

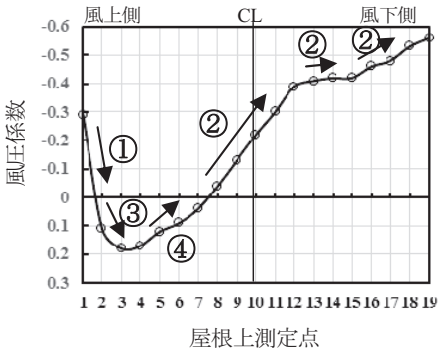


図10　切妻屋根（勾配30度）の風圧係数

（１）風速1.0m/sおよび1.5m/sの場合

風速1.0m/sおよび1.5m/sの吹雪風洞実験において得られた屋根雪の偏分布係数を，**図11（１），（２）**（○印点線）に示す．いずれも分布形状はシンプルで，「棟部はく離域」を除けば屋根雪は風上端から風下へ漸減していることが分かる．すなわち風上端では特性①→③による影響は現れず屋根雪の増大が認められない．ただちに特性④→②による影響が表れ，屋根雪が風上端から棟部に向かい減少している．引き続き「棟部はく離域」を経過後，ゆるやかな減少（特性②）が認められる．

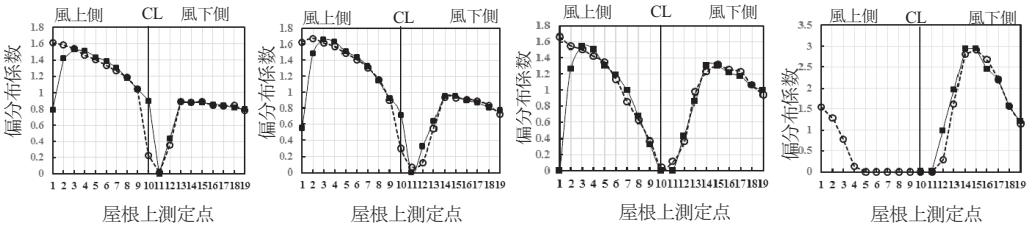
風圧係数との関係を表す散布図と回帰直線を**図12（１），（２）**および**図13（１），（２）**に示す．風速1.0m/sでの回帰式は，風上側が風上端とセンター（CL）を除く８点のデータからy＝1.576x＋1.247（R＝0.917），風下側がセンターとその近傍の２点を除く７点のデータからy＝0.588x＋1.128（R＝0.903）となった．また，風速1.5m/sでの回帰式は風上側が風上端とセンターを除く８点のデータからy＝2.337x＋1.231（R＝0.954），風下側がセンターとその近傍の３点を除く６点のデータからy＝1.292x＋1.490（R＝0.946）となった．**図10**に示す風圧係数の値をこれらの回帰式に代入した結果は，**図11（１），（２）**（■印実線）のようになり，風上端では同図に併記した偏分布係数測定値（○印点線）との乖離が見られるが，全体としては測定値に追随していることが分かる．

（２）風速2.0m/sの場合

風速2.0m/sの場合，風速1.0m/sや1.5m/sの場合と比べ風下側の積雪量は増加している（**図11（３）**（○印点線））．両者の散布図と回帰直線を，風上側について**図12（３）**，風下側について**図13（３）**に示す．回帰式は，前者が風上端とセンターを除く８点のデータからy＝3.944x＋0.834（R＝0.956），後者がセンターとその近傍の３点を除く６点のデータからy＝2.236x＋2.243（R＝0.925）となった．**図10**に示す風圧係数の値をこれらの回帰式に代入した結果は**図11（３）**（■印実線）のようになり，風速1.0m/sや1.5m/sの場合と同様な結果となった．

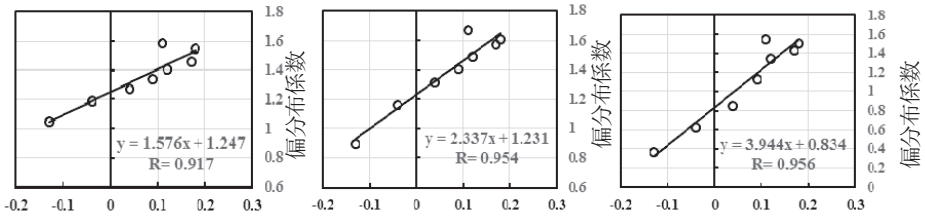
（３）風速2.5m/sの場合

風速2.5m/sの場合の屋根雪の偏分布係数を**図11（４）**（○印点線）に示す．**図５（４）**の積雪写真からも分かるように，風上側では，軒先部で局所的に付着・堆雪しているが大半の領域で無



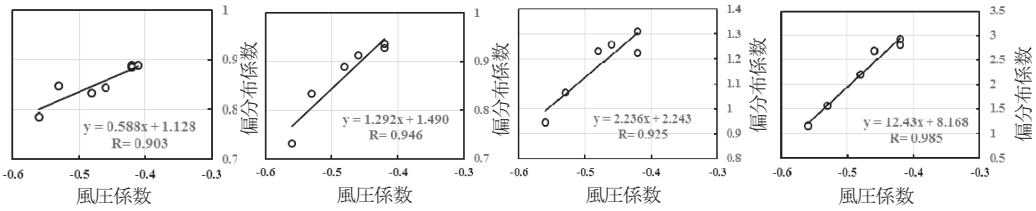
（１）風速1.0m/s　（２）風速1.5m/s　（３）風速2.0m/s　（４）風速2.5m/s

図11　切妻屋根（勾配30度）の偏分布係数（○：測定値，■：風圧に基づく推定値）



（１）風速1.0m/s　（２）風速1.5m/s　（３）風速2.0m/s

図12　切妻屋根（勾配30度）風上側における風圧係数と偏分布係数の関係



（１）風速1.0m/s　（２）風速1.5m/s　（３）風速2.0m/s　（４）風速2.5m/s

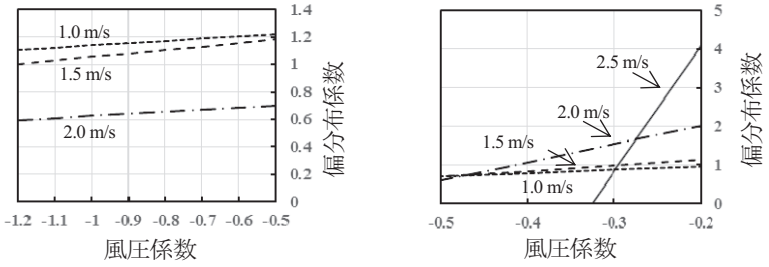
図13　切妻屋根（勾配30度）風下側における風圧係数と偏分布係数の関係

雪となり強い吹き払いを生じている．風下側においては，「棟部はく離域」以降急激に積雪が増加している．また，3.2節でも述べたように風速を3.0m/sに上げた場合，風上側，風下側とも一定の時間内で殆ど堆雪しないことを目視確認している．従って，屋根勾配10度の場合と同様に，屋根勾配30度においても風速2.5m/sを「境界風速域」の範疇として位置づけることができる．

風圧係数と偏分布係数との関係については，風上側を本報の適用外とみなし，風下側のみ検討することにする．**図13(４)**に風下側の回帰直線を示す．回帰式はセンターとその近傍の３点を除く６点のデータからy＝12.43x＋8.168（R＝0.985）となった．**図10**に示す風圧係数の値をこの回帰式に代入した結果は**図11(４)**(■印実線）のようになった．なお本報は，風速2.5 m/sを「境界風速域」としてとらえるので，実用的には風上側の偏分布係数をゼロとして扱う．その際，軒先の堆雪については，風下側を参考にしてその何割かを局所的な荷重として別途見ておく配慮も必要であろう．

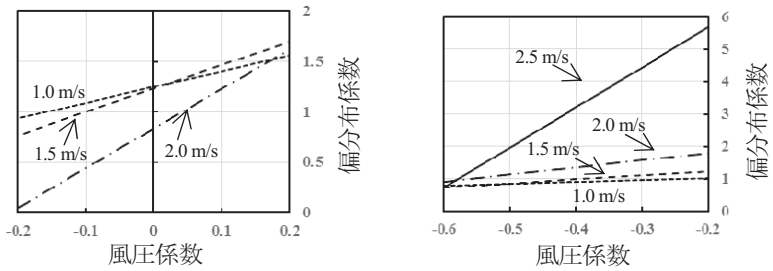
3.4　風圧係数と偏分布係数との回帰式の特徴

図１に屋根面風圧係数と屋根雪の偏分布係数との関係を表す概念を示したが，上述してきた実験を通じ，風速をパラメータとして両者の相互関係を定量的に把握することができた．得られた直線回帰式をまとめると**図14，15**のようになる．横軸が風圧係数，縦軸が偏分布係数である．



（１）風上側　　（２）風下側

図14　直線回帰式のまとめ（勾配10度）



（１）風上側　　（２）風下側

図15　直線回帰式のまとめ（勾配30度）

はじめに風上側について見る．屋根勾配10度の風上側（**図14(１)**）では，1.0m/s（点線），1.5m/s（破線）および2.0m/s（一点鎖線）の３種の風速の違いが認められると共に，いずれも負圧の減少に伴い偏分布係数が増加していることが分かる．また，屋根勾配30度の場合（**図15(１)**）では，正圧と負圧の両領域にまたがるが，３種の風速のいずれにおいても**図１**に示す概念を表現している．屋根勾配10度と30度の場合を比較すると，30度の場合の方が10度の場合に比べ回帰式の傾きが大きく，両者の屋根勾配の違いによる差異が明瞭である．

一方，風下側においても，**図１**に示す概念を表現していることが分かる．屋根勾配10度（**図14(２)**）と30度（**図15(２)**）とを比べると，1.0m/s（点線），1.5m/s（破線）および2.0m/s（一点鎖線）のいずれの風速においても回帰式の傾きは類似しており，風下側では屋根勾配10度と30度の違いによる影響は大きく現れない．ただ，風速2.5m/s（実線）では，屋根勾配10度と30度との回帰式を比べると，前者の傾きが後者の３倍程度大きいことを指摘できる．

3.5　切妻屋根の偏分布係数のまとめ

これまで屋根途中に屈折部のある切妻屋根を対象にして，風上側と風下側での屋根雪偏分布性状を吹雪風洞実験により求め，既往の風圧分布との相関性を確かめた．その結果，後述する水平屋根においては，ある風速以上で常に風下側の積雪が多くなるのに対して，切妻屋根で

は，①積雪分布は風上側と風下側とで異なり，それぞれの側の中でも均等ではない偏分布性状が示されること，②屋根勾配と風速の組み合わせの条件によっては風上側で多くなること，③屈折形状でも風圧分布と積雪分布には強い相関性が認められ，風圧風洞実験からでも積雪分布がある程度予測できること，などを明らかにした．

本報では，切妻屋根雪の代表的な分布形として，２段屋根の三角形分布のように風上・風下ごとに不均等分布形を提案しても良いところであるが，実際の屋根上では，風速や風向の変動の影響を受けること，実務上の設計用風速は冬期間の平均風速を用いる場合が多いこと，小型模型と実大建物との相関性が確認できていないことなどから当実験結果をそのままでは実務に適用しにくいと考えられる．しかし，風上側と風下側に分けた各重量の不均等性が骨組みの応力分布に大きく影響して崩壊に至った事例があること，後述するように当実験結果では風速と屋根勾配との関係によっては，風上側と風下側における積雪深の各偏分布形数の平均値（即ちそれぞれの積雪重量の比に相当）に大きな差異が認められることから，本節では以下，風上側と風下側それぞれの平均値を基に考察し，「荷重指針」[10]の雪荷重における屋根形状係数への適用例として示すことにする．

屋根勾配10度と30度の場合とについて，風上側，風下側それぞれの偏分布係数の平均値をまとめると**表１**のようになる．同表中，（　）内に示す小数点以下一桁にまとめた数値が実用的であることから，それを用いて図示したものが**図16**である．横軸は風速，縦軸は屋根雪の偏分布係数である．ここで，風速2.5m/sについては，前述してきたように「境界風速域」とみなしており，風上側の偏分布係数をゼロとして評価し単純モデル化している．

表１に示すように，屋根勾配10度においては，風速1.0m/sでは，風上側平均値1.14（1.1），風下側平均値0.86（0.9）の値となり，風上側が風下側より積雪は多く，およそ1.33倍となった．同様に1.5m/sでは，風上側1.06（1.1），風下側0.94（0.9）の値となり，風上側が風下側

表１　切妻屋根の風上側と風下側の偏分布係数平均値

風速 (m/s)	屋根勾配10度		屋根勾配30度	
	風上側	風下側	風上側	風下側
1.0	1.14	0.86	1.27	0.73
[1.8]	(1.1)	(0.9)	(1.3)	(0.7)
1.5	1.06	0.94	1.27	0.69
[2.7]	(1.1)	(0.9)	(1.3)	(0.7)
2.0	0.64	1.36	0.98	0.92
[3.6]	(0.6)	(1.4)	(1.0)	(0.9)
2.5	0.25	2.00	0.37	2.03
[4.5]	(0.3)	(2.0)	(0.4)	(2.0)

風速：風洞実験風速　［　］内：実風換算風速

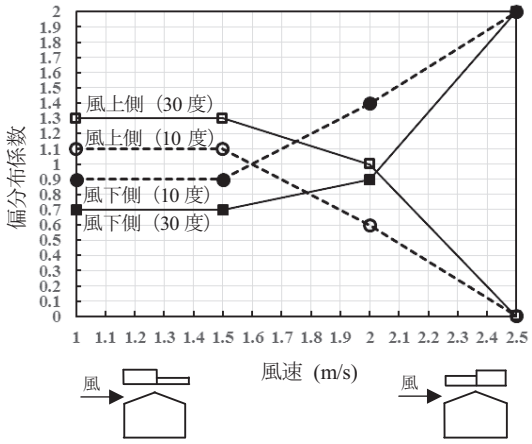


図16　切妻屋根における実験風速と偏分布係数の関係

より積雪は多く，およそ1.13倍となった．また風速2.0m/sでは，風上側064（0.6），風下側1.36（1.4）の値となり，風下側が風上側に対しおよそ2.13倍となった．風速2.5m/sでは，風上側0.25（0.3），風下側2.00（2.0）となった．

屋根勾配30度においては，風上側と風下側の偏分布係数の平均値は，風速1.0m/sでは，風上側1.27（1.3），風下側0.73（0.7）の値となり，風上側の方が風下側より積雪は多く1.74倍となった．同様に1.5m/sでは，風上側1.27（1.3），風下側0.69（0.7）の値となり，風速1.0m/sの場合とほぼ同じであった．風速2.0m/sでは，風上側0.98（1.0），風下側0.92（0.9）の値となり，風上側が風下側よりやや積雪が多く1.07倍となった．風速2.5m/sでは，風上側0.37（0.4），風下側2.03（2.0）となった．

図16は，切妻屋根雪の偏分布特性として，強風下では風上側が吹き払われて風下側に多く堆雪するが，弱風下では風上側の方が風下側より多く堆雪することを示している．これから風上側と風下側の両者の積雪が等しくなる風速の条件は，屋根勾配10度では概ね1.6m/s，30度では概ね2.0m/sである．

屋根勾配10度と30度の間にある屋根勾配については，**表1**に示す値の直線補間値を用いることで対処できる．

なお，上述した方法を活用して「荷重指針」における「屋根形状係数μ_0」を算定することができる．すなわち，同指針では，μ_0＝「基本となる屋根形状係数μ_b」＋「風による偏分布に関する屋根形状係数μ_d」である．ただし「屋根上滑動による偏分布に関する屋根形状係数μ_s」を除く．ここで「基本となる屋根形状係数μ_b」を屋根上平均積雪深相当とみなせば，本報の偏分布係数は，屋根上平均積雪深を基準として風による偏分布特性が加算された結果を示しているので，上記のμ_0に相当していると言える．

3.6　実測資料との照合

前節**表1**および**図16**に示す実験結果の信頼性を，屋根雪の実測資料と比較して照査することが必要であるが，勾配を有する屋根雪の実測資料は極めて乏しいのが現状である．ここではやや古い資料であるが，札幌市において1978年（昭和53年）３月15日に生じた「札幌トラックターミナル」倒壊事例[11]について考察する．当該ターミナル敷地内では，ほぼ同型の上屋４棟（A～D）が並列しているが（**図17**（参考文献[11]より転載　以下同様）），そのうちの２棟（C棟およびD棟）の中央部が倒壊した（同図斜線部分）．両棟は，鉄筋コンクリート造の支柱の上に両側にはね出しを有する鉄骨造トラスを架け渡したものである．屋根平面の幅は39m，棟の長さ147m（C棟）および157.5m（D棟）で，勾配１/10（5.7度）の切妻屋根を架け，下部のプラットホームは吹きさらしの構造となっている．

同日午後９時半頃，C棟の中央部６スパン（棟の長さ63m），続いて約20分後にD棟の中央部３スパン（同31.5m）が倒壊した．屋根雪の測定は，北海道大学旧建築構造第二研究室によって，翌日倒壊部に近接した残存屋根について行われた．ここでは詳細な調査データが公開されているC棟の屋根雪分布を参考にする．**図18**に示す倒壊部直近の積雪断面２ライン（cライン，dライン）では，いずれも風下側に吹きだまりが生じている．**図19**，**20**にそれぞれの積雪断面形状を示しているが，cラインでは屋根雪平均値が84cm，風上側平均値71cm，風下側平均値97cmであり，風下側の最大値は114cmである．屋根雪の偏分布係数は風上側で0.85,風下側で1.15となった．dラインでは，屋根雪平均値が91cm，風上側平均値77cm，風下側平均値105cmであり，風下側の最大値は121cmである．屋根雪の偏分布係数はcラインと同様風上側で0.85，風下側で1.15となった．なお，地上積雪深は114cmである．

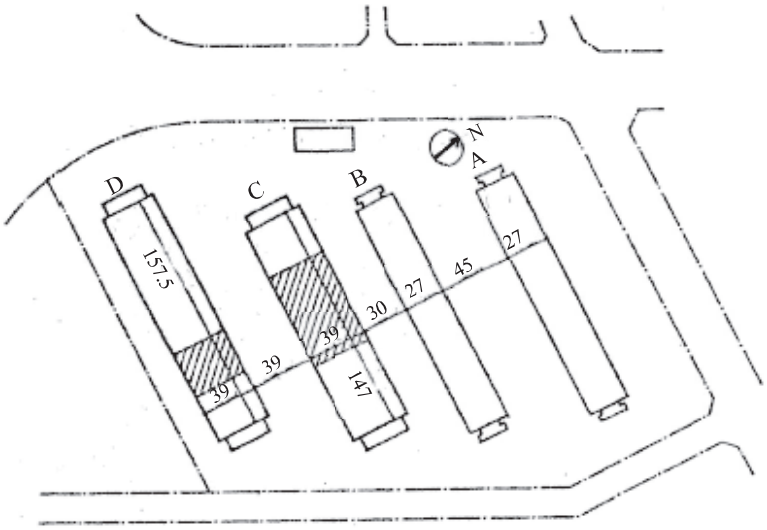


図17　札幌トラックターミナル配置図（単位：m）

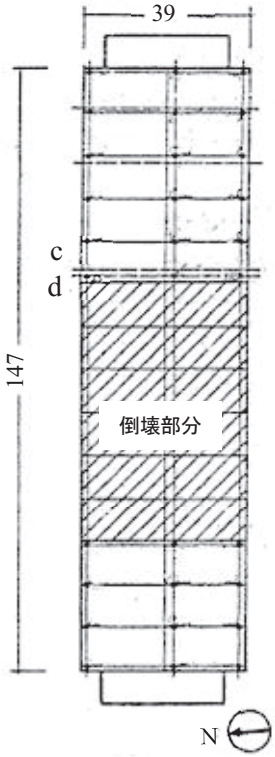


図18 C棟積雪断面観測ライン
（単位：m）

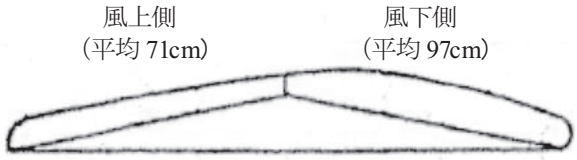


図19 cライン積雪断面形状
（図形は垂直方向の寸法を２倍にして作図）

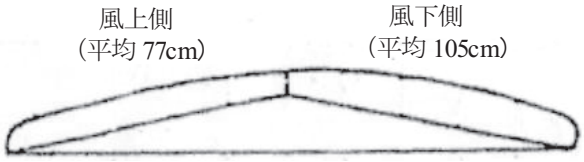


図20 dライン積雪断面形状
（図形は垂直方向の寸法を２倍にして作図）

本研究では屋根勾配10度以下での実験を行っていないので，上記事例については**図16**に示す勾配10度の場合を参考値とする．**図16**によれば，屋根雪の偏分布係数が風上側で0.85，風下側に吹きだまりが生じて1.15となる偏分布が一定の風速条件下で発生することが示されており，実現象としてもそのような偏分布が生じることを確認できた．このときの実験風速は，概ね1.7m/s付近であり，その実風換算風速は3.2m/sである．気象庁のデータによれば，1978年の月平均気温，月平均風速および最深積雪は，１月でそれぞれ－5.2℃，1.9m/s，97cm，２月で－7.6℃，1.6m/s，125cm，３月で－0.7℃，2.4m/s，111cmである．これらの風速は上記3.2m/sと比べて小さい値を示しているが，C棟の風上側には同形状のA棟・B棟が並列して位置しているため，これらの建物の影響によってC棟屋根面では風速が増幅され，屋根雪の大きな偏分布を引き起こしたであろうことが推定される．ただこのような近隣建物の影響による風速の増幅率については，参考文献[3]に１事例が示されているもののほとんど研究されていないため，本事例について適用できるような知見が得られていないのが現状であり，この分野での研究の蓄積が待たれる．

４．水平屋根の偏分布係数

水平屋根の風速と屋根雪偏分布特性との関係については，既報[6]で報告している．すなわち，屋根雪偏分布係数の平均値は，風速1.7m/s（実風換算風速3.2m/s）の場合，風上側で0.66（0.7），風下側で1.34（1.3），風速2.0m/sと2.5m/sの場合では，風上側で0.70（0.7），風下側で1.30（1.3）であった．今回，風速1.0m/sでの追加実験を行ったところ，風上側で1.00

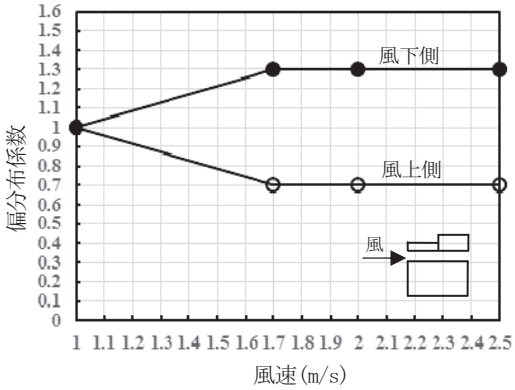


図17　水平屋根における風速と偏分布係数の関係

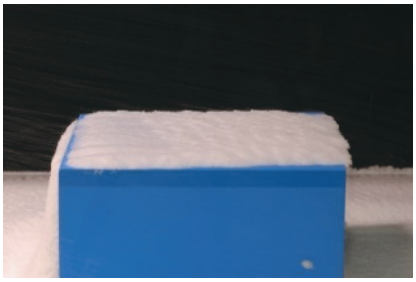


図18　水平屋根の積雪状況
（風速2.5m/s，左側が風上）

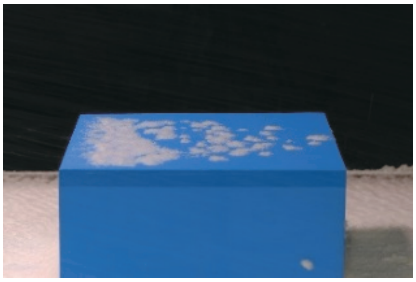


図19　水平屋根の積雪状況
（風速3.5m/s，左側が風上）

(1.0)，風下側で1.00（1.0）となり屋根雪の偏分布現象は見られなかった．切妻屋根同様，小数点以下一桁にまとめた数値を用いて**図17**にまとめて示す．

横軸が風速，縦軸が偏分布係数である．これから分かるように，水平屋根では，風速1.0m/s以上では常に風下側に多く堆雪し，風速1.0～1.7m/sの範囲では，風速が大きくなるにつれ風上側と風下側の差が徐々に大きくなることが予想されるが，1.7m/sを超えると風上側で0.7，風下側で1.3の値に落ち着くことが分かる．また，風速3.0～4.0m/s（実風換算風速5.4～7.2m/s）では屋根面ところどころに着雪するものの，吹き払い効果が強く，一定時間内では堆雪しにくくなることを目視確認している．**図18**に風速2.5m/sの場合，**図19**に風速3.5m/s（実風換算風速6.3m/s）の場合の積雪写真を例示する．

以上の考察は，－10℃の実験気温下におけるものである．既報[6]では，気温の影響を検討するため，暖地を想定した－２℃下での実験も行っている．これによると風速2.5m/sでは，屋根雪偏分布係数の平均値は，風上側で0.84（0.8）風下側で1.16（1.2）となり，－10℃の場合に比べ偏分布係数値に風上側で0.14（0.1），風下側で－0.14（－0.1）の差がある．この結果は，屋根雪の偏分布特性に及ぼす気温の影響を考慮する際の参考値として利用できると考える．

5．結語

吹雪風洞実験および風圧風洞実験を通して得られる屋根雪の偏分布係数と屋根面の風圧係数との相関性を活用して，風工学的根拠のある偏分布係数を算定する手法をこれまで提案してきた．本報では，この手法を基に風速に対応した偏分布係数を明らかにすることを目的として，屋根勾配10度，20度，30度の切妻屋根計３模型および水平屋根１模型について吹雪風洞実験を行った．実験気温を－10℃とした寒冷地相当，風速が1.0～2.5m/s（実風換算風速1.8～4.5m/s相当）の範囲である．風圧係数についてはこれまでのデータを利用した．その成果は次のように纏められる．

１）切妻屋根について

①積雪分布は風上側と風下側とで異なり，それぞれの側の中でも均等ではない偏分布性状を示す．

②風上側が概ね無雪となり，風下側に多く堆雪する風速（境界風速域）を2.5m/s（実風換算4.5m/s）として特定した．このとき風下側に生ずる大きな積雪量を偏分布係数として定量的に明らかにした．

③屋根勾配20度の場合，屋根上積雪量が屋根勾配10度と30度の中間の値を示すので，本報では，屋根勾配10度と30度のみ詳述し，20度については両者の中間値として位置づけた．

④風圧分布と積雪分布には強い相関性が認められ，風圧風洞実験から積雪分布をある程度予測できる可能性を示した．ただし，風上側軒先部や棟部については，屋根勾配と風速が大きくなると局所的に風圧係数と偏分布係数との相関性が悪くなるため，この領域については改善の余地が残されており，今後の課題とする．

⑤風上側と風下側の両者の平均積雪が等しくなる風速の条件は，屋根勾配10度では概ね1.6m/s，30度では概ね2.0m/sである．これ以下の風速では，風上側の積雪が多くなり，これ以上では風下側の積雪が多くなる．

⑥実建物の倒壊事例１棟における屋根雪調査資料と風洞実験結果とを照合した結果，本研究の信頼性が認められた．

２）水平屋根について

寒冷地相当における既往の研究成果に加え，風速1.0m/sでの追加実験を行った．風速1.0m/sでは屋根雪の偏分布はみられなかったが，それ以上の風速では常に風下側に多く堆雪するとことを示した．また，暖地相当（－２℃）での偏分布係数参考値も提示した．

３）荷重指針への適用例について

風上側と風下側の偏分布係数の平均値を求め，それを本文の**図16**および**図17**として提示した．本報の偏分布係数は，屋根上平均積雪深を基準として風による偏分布特性が加算された結

果を示しているので，「荷重指針」における「屋根形状係数μ_0」すなわち「基本となる屋根形状係数μ_b＋風による偏分布に関する屋根形状係数μ_d」に相当する．ただし「屋根上滑動による偏分布に関する屋根形状係数μ_s」を除く．

本研究は，屋根面近傍の気流性状が概ね２次元物体の流れ場とみなせるシンプルな屋根形状において，屋根上の積雪がない状態から１回の吹雪によって形成される積雪性状を対象としている．今後の課題を纏めると，模型寸法による影響，壁面に正対しない風向を想定した吹雪風洞実験データの蓄積，切妻屋根における風上側軒先部や棟部近傍の扱い，複数回の降雪による偏分布特性の評価．時間の経過に伴う屋根雪の堆積形状と作用風圧の性状の変化への対処などが挙げられる．

謝辞

本研究は，防災科学技術研究所との共同研究におけるこの数年間の成果である．実験の実施に当たっては，同研究所小杉健二総括主任研究員，同根本征樹主任研究員，同望月重人契約研究員，同大川元造オペレータ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．

参考文献

１）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65巻３号，pp.287－295，2003．5
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集No．620，pp．９－16，2007.10
３）日本風工学会：風工学ハンドブック，朝倉書店　2007．4
４）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.451－458，2009．3
５）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，構造Ｉ，pp.61－62，2013．8
６）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
７）佐藤　威：吹雪の風洞実験について，日本雪氷学会　雪氷65巻３号，pp.279－285，2003．5
８）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
９）東浦将夫：屋根雪処理の研究（その７）－送風式除雪の可能性について－，日本雪氷学会秋季大会講演予稿集，1975.10
10）日本建築学会：建築物荷重指針・同解説2015，2015．2
11）大野和男：積雪荷重に関する条例の改正について，北海道建築指導センターリポートNo.24，pp１－８，1982．1