気象要素を用いた屋根上積雪の評価方法について^{注1)}

苫米地 司^{*1}・山口 英治^{*2}
橋本 茂樹^{*3}

1. はじめに

設計用屋根上積雪荷重に関する基本的な考え方は、建築基準法施行令と日本建築学会雪荷重指針に示されている。このうち、後者の日本建築学会雪荷重指針では、近年の研究成果を取り入れた改定作業が現在進められている^{1,2)}。この改定の基本的な考え方の第一の特徴は、屋根上積雪荷重を制御するか否かを定めた後に、建設地点の積雪状況を考慮しながら建築物の規模、形状に応じて屋根形状係数を求めて、屋根上積雪荷重を算定する点にある。第二の特徴は、屋根上積雪荷重の制御を行う場合には7日間の積雪増分を考慮し、荷重をより適切に評価できるものとした点にある。

屋根上の積雪状況は、建築物の規模や形状および気温・風向・風速によって、地上の積雪状況と大きく異なることが筆者らの研究で明らかになっている^{3,4)}。日本建築学会雪荷重指針の改定(案)では、基本的な屋根形状に対して、1～2月の平均風速に応じて屋根形状係数を定め、その係数を地上積雪荷重に乗ずることによって基本となる屋根上積雪荷重を評価することになっている。この場合、建設予定地の何年間にも及ぶ風速の観測データがあれば、その値を用いることができる。しかし、現実的にはこのような例はなく、気象官署のデータを用いるのが一般的である。

この気象官署は全国に約160ヶ所あるに過ぎず未観測地点が多いのが現状である。積雪地域の気象官署数をみても、北海道で22ヶ所、青森県で4ヶ所、秋田県で1ヶ所、新潟県で3ヶ所と未観測地点が多い⁵⁾。しかし、1974年からアメダス(地域気象観測システム)が各地に設置され、現在では気象官署数の10倍近くの約1300ヶ所にもなっている⁶⁾。これらのアメダスの観測資料は、地上気象観測法、気象測器取扱い指針、地上気象観測指針などに従って観測およびデータ整理が統一して行われ、均質性をもった気象データといわれている⁶⁾。ただ、風速の観測精度をみると、気象官署では0.1m/s、アメダスでは1.0m/sとなっているため、両者を同一に扱うことにはやや問題が残る。しかしながら、気象官署数

図-1 調査対象とした水平屋根の概要

*1 北海道工業大学助教授・工博
*2 太陽工業株式会社設計部・工修
*3 日本データサービス㈱・工修

注1) 本論は第8会日本雪工学会大会において発表した論文に加筆してまとめたものである。
[本稿受理: 1993年3月27日, 討論期限: 1994年6月30日]

が少ない現状を考慮すると、アメダスの観測資料を有効に用いることも必要であろう。

このような背景から、本研究では最も基本的な屋根形状である陸屋根の屋根上積雪の経時的な観測資料とアメダスの気象観測資料をもとに、屋根上積雪深と降雪期の気象要素との関係を検討した。次に、これらの結果を基にした気象データを用いた屋根上積雪深の評価方法を検討した。

2. 調査方法および解析方法

2.1 調査方法

経時的な屋根上積雪の調査は、札幌市手稲区の北海道工業大学構内に設置した図-1に示す陸屋根を対象に実施した。試験体周辺の建物配置状況を示すと図-2のようになる。調査は、図-1に示すように屋根面中央部を冬期間の恒風方向に横断するように、1983年から1989年までの7冬季にわたり各年の屋根上積雪が安定する1月中旬から3月末日までの間、原則として1週間ごとに調査した。屋根上積雪の調査と同時に、図-2に示す位置で地上積雪深を測定した。測定点の間隔は30cmとし、スノーサンプラー（気象協会型）付属のスケールを用いて1cm単位で測定した。屋根面の測定点は、屋根面に基準点を設け、この点を基準に測定点を設定して各年の測定点が同じになるように配慮した。なお、調査開始当初は試験体風上に障害となる建物が存在しなかったが、1987年の調査から風上48mの位置に高さ13.5mの建物が存在している。

2.2 解析方法

前の調査日から当該調査日までの期間（以下、「各調査週」という。）ごとの屋根上積雪の各要素の値と気象要素値との関係を因子分析で解析した。以下に各要素の算出方法を示す。

1) 屋根上吹雪指数

写真-1に屋根面における雪の移動状況（屋根上地吹雪）の例を示す。一般に、このような雪の移動は図-3に示す風速と気温との組合せに支配される⁷⁾。図中の吹雪臨界風速曲線は、吹雪発生時の瞬

図-2 試験体周辺の建物配置状況

写真-1 屋根面における吹雪の一例（1985年1月15日、日平均気温 -3.8°C ・日平均風速 1.7m/s ）

図-3 吹雪発生条件の風速と気温との関係

間的な状況を示しているため、日平均風速や日平均気温を用いて雪の移動を推定することは難しい。そこで、本研究では各調査週ごとの平均風速と平均気温とを用いて簡便的に雪の移動する割合を表す数値として U_r を提案する。 U_r は図-3に示した平均気温を吹雪臨界曲線の式に代入して得られる風速

W1と平均風速 W2 との比で下記の式(1)で求められる。Urは値が大きいくほど雪の移動が多くなり1を越えると吹雪が発生しやすいことを示す。また、屋根上積雪を評価する場合には雪質の差異も重要な問題となる。本研究で提案する Ur は気温と風速との関係から得られる値であり、気温は雪質を決定する大きな要因であることから雪質の差異を含んで評価している⁸⁾と考える⁹⁾。

$$Ur = W2/W1 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

W1 : 各調査週の平均気温を吹雪臨界曲線の式に代入して得られる吹雪臨界風速 (m/s)

W2 : 各調査週の平均風速 (m/s)

2) 因子分析に用いた各要素の算出方法

屋根上積雪の要素値としては、下記に示す式(2)で求められる積雪深の変化率SDrcを用いた。気象要素値は、調査対象建物設置場所から約800m離れた札幌管区気象台手稲山口観測所(アメダス)の観測資料を用いて、下記に示すTsm, Tnm, Wsm, Wnm, Sfおよび屋根上吹雪指数 Ur を各調査週ごとに求めた。

$$SDrc = SDri/SDgi \dots\dots\dots (2) \quad (SDrc \leq 1)$$

ここに、

SDrc : 各測定点の屋根上積雪深の変化率

SDri : 各調査週の屋根上積雪深の増加量 (cm)

SDgi : 各調査週の地上積雪深の増加量 (cm)

気象要素

Tsm : 降雪日の日平均気温の平均値 (°C)

Tnm : 降雪のない日の日平均気温の平均値 (°C)

Wsm : 降雪日の日平均風速の平均値 (m/s)

Wnm : 降雪のない日の日平均風速の平均値 (m/s)

Sf : 各調査週の降雪量 (cm)

Ur : 屋根上吹雪指数

これらの気象要素値は各調査日の地上積雪深が前の調査日より大きく、その間の総降雪量が10cm以上の調査週を対象として算出した。なお、式(1)から考えると、SDrc>1の領域は屋根上積雪深が地上積雪深よりも大きくなることになる。しかし、これまでの観測例では屋根上積雪が地上積雪よりも大きくなることはほとんど見られなかったため、

図-4 積雪深と降雪深の推移状況(1984-1985)

表-1 各調査年の気象状況

T : 平均気温 (°C) W : 平均風速 (m/s) Sf : 降雪量

調査年	気象要素	12月	1月	2月
1982 - 1983	T (°C)	-0.6 (0.38)	-3.8 (0.78)	-5.7 (1.36)
	W (m/s)	2.9 (1.26)	4.0 (1.74)	4.2 (1.68)
	Sf (cm)	58 (0.77)	58 (0.43)	88 (1.10)
1983 - 1984	T (°C)	-3.3 (2.06)	-6.5 (1.33)	-6.8 (1.62)
	W (m/s)	1.7 (0.74)	2.0 (0.87)	4.0 (1.80)
	Sf (cm)	38 (0.49)	80 (0.59)	100 (1.25)
1984 - 1985	T (°C)	-3.4 (2.13)	-8.4 (1.71)	-3.5 (0.83)
	W (m/s)	2.8 (1.22)	3.9 (1.70)	4.4 (1.76)
	Sf (cm)	26 (0.36)	120 (0.89)	68 (0.83)
1985 - 1986	T (°C)	-4.3 (2.69)	-6.3 (1.29)	-6.1 (1.45)
	W (m/s)	3.8 (1.65)	3.2 (1.70)	2.4 (0.96)
	Sf (cm)	112 (1.53)	102 (0.76)	42 (0.53)
1986 - 1987	T (°C)	-1.8 (1.00)	-5.2 (1.06)	-4.3 (1.02)
	W (m/s)	3.6 (1.57)	3.4 (1.48)	3.9 (1.56)
	Sf (cm)	102 (1.40)	54 (0.40)	128 (1.60)
1987 - 1988	T (°C)	-2.6 (1.63)	-3.8 (1.56)	-5.5 (1.31)
	W (m/s)	3.6 (1.57)	2.8 (1.22)	4.7 (1.88)
	Sf (cm)	102 (1.40)	54 (0.40)	128 (1.60)
1988 - 1989	T (°C)	-6.0 (0.38)	-2.5 (0.51)	-1.9 (0.45)
	W (m/s)	3.9 (1.70)	4.3 (1.87)	3.1 (1.24)
	Sf (cm)	127 (1.74)	30 (0.22)	28 (0.35)
札幌の 平年値	T (°C)	-1.8	-4.8	-4.2
	W (m/s)	2.3	2.3	2.5
	Sf (cm)	73	135	80

SDrc>1 の場合は屋根上積雪深と地上積雪深がほぼ同じになるとみなし、SDrc=1と定義した。

なお、「はじめに」でも触れたように、気象官署とアメダスの風速の観測値を同一に扱うことにはやや問題がある。このため、本研究では北海道工業大学構内に設置した3杯型風速計で1990年10月2日～22日に実測した値と同期間のアメダスによる観測値とを対比して補正した日平均風速を用いている。こ

の観測期間のアメダスの日平均風速と実測地とを対比すると、図-5となる。図のように、ほぼ比例関係を示しており、実測値は日平均風速よりも0.4 m/s程度大きな値を示す。前述の気象要素の風速は図中の式で補正した値とした。

3. 調査期間の気象状況

最大積雪深は、各調査年も2月中旬～下旬にかけて発生している。図-4に降雪量の多い1984-1985年の積雪深と降雪量との推移を示す。なお、北海道工業大学構内での実測値とを対比すると、両者の積雪深の差は10cm程度で近似した傾向を示している。積雪深は、最大積雪深を示すまで漸増し、その後漸減して札幌における典型的な形状を示している。他の調査年においても最大積雪深は小さいが同様の形状を示している。

各調査年の最大積雪深を示す2月までの各月における降雪量、平均気温および平均風速をみると、表-1となる。同表には日本気候表による札幌における各気象要素の平年値を示してある。表中の()内は平年値に対する比を示している。同表のように、気温は1988-1989年を除いて平年値よりやや低い状況にあった。風速は各月によって異なるが平年値の1.5倍程度の場合が多く、平年値よりやや大きい状況にあった。風向は各調査年も西北西の発生頻度が35~40%と卓越しており、図-2に示したように試験体を直角に横断するような風向となっている。降雪量は各月によって異なるが、平年値を下回る場合が多い状況にあった。

4. 屋根上積雪深の調査結果

写真-2に陸屋根上の積雪状況の一例を示す。写真のように、風下側に50cm程度の大きな雪庇が形成されているが、屋根上積雪の分布はほぼ均一となっている。各調査年の測定開始日と最大積雪深日との屋根上積雪分布をみると、図-6となる。図のように、いずれの調査年においても測定開始日から最大積雪深を示すまで顕著な積雪増がみられるが、その

図-5 アメダスの日平均気温と実測値との関係

写真-2 積雪状況の一例

図-6 測定開始日と最大積雪深日における屋根上積雪分布の一例

図-7 地上積雪深の増加量と屋根上積雪深の増加量との関係

分布形状に大きな差はみられない。従って、本陸屋根の積雪分布は各測定点の平均値で特徴づけられると考える。なお、前述のように1987年の調査から風上48mの位置に存在する高さ13.5mの建物による顕著な影響は、特に認められない。

次に、地上積雪深の増加量と屋根上積雪深の増加量との関係を見ると、図-7となる。図のように、全体的には地上積雪深の増加に伴い比例的に屋根上積雪深が増加する傾向を示す。しかし、この関係には図中に示した $SDr=SDg$ 以下の範囲で大きなバラツキがある。

5. 屋根上積雪と気象要素との関係

5.1 屋根上積雪と気象要素との要因分析

前述のように、本調査結果では各調査週における地上積雪深と屋根上積雪深の増加量が異なる場合が多くみられた。屋根上積雪深の形成は降雪期の気象要素の影響を大きく受けていることを考えると、屋根上積雪深の形成に大きな影響を与える気象要素を明らかにすることが重要と考える。このようなことから、2.2に示した各調査週の屋根上積雪形状を示す要素値と気象要素を示す変量を用いて、因子分析を行った。その結果、固有値が1以上である因子がいくつか抽出された。各因子の累積寄与率を見ると、第2因子までの累積寄与率が60%以上となり、この2つの因子で多変量間の代表的な関係の検討が可能と考える。また、一般に因子分析の結果に具体的な事象解釈を与えることは困難であるとされているが、本解析では因子負荷ベクトルの成分に各屋根形状の測定点ごとの積雪深の他に、気象要素の成分を加えたことで物理的解釈が可能となっている⁹⁾。

図-8に、因子分析結果から得られた因子負荷量のモード分布を示す。各測定点のモード分布は、前述の屋根上積雪分布形状と近似した形状となる。第1因子の各測定点のモード形状を示す場合の気象要素値を見ると、降雪時の風速の強弱を示す Wsm と屋根上吹雪の発生状況を示す Ur の因子負荷量が大きく、それぞれ0.87、0.65となる。他の気象要素値の因子負荷量は、いずれも0.5以下となる。第2因

子では明瞭な特徴がみられない。この結果をみると、屋根上積雪の形成は気象要素の中でも風速や気温に関連する要因の影響を大きく受けていることが明らかである。

5.2 屋根上積雪と風速および気温との関係

各調査週の屋根上積雪深を前述の変化率 $SDrc$ で捉えて、風速および気温との関係を見ると図-9および図-10となる。図のように、 $SDrc$ の値は風速

図-8 因子負荷量のモード分布

図-9 各調査週の屋根上積雪深の変化率と風速との関係

図-10 各調査週の屋根上積雪深の変化率と気温との関係

の増大に伴い減少する傾向を示す。なお、図中には各調査週の降雪日とそれ以外とに分けて示してあるが、両者に大きな差異はみられない。

図-10に示すSDrcと気温との関係を見ると、SDrcの値は気温の増加に伴い増大する傾向がみられる。しかし、前述の風速の場合よりもバラツキが大きくなっている。なお、図中には各調査週の降雪日とそれ以外とに分けて示してあるが前述の風速と同様に両者に大きな差異がみられない。このように、屋根上積雪深は風速や気温の影響を大きく受けながら形成されて、降雪時あるいは降雪後の屋根面の雪の移動によって地上積雪深よりも少ない傾向を示していると考えられる。屋根雪の移動は写真-2に示したように風下側に形成された雪庇によっても容易に理解できる。

図-11 屋根上吹雪指数と屋根形状係数との関係

6. 気象要素を用いた屋根上積雪の評価法

5.2で示したことから、屋根上積雪深を評価するためには、平均風速と平均気温を用いて行うことが必要であると考えられる。ここで、前述の要因分析に用いた風速と気温で決定される値である屋根上吹雪指数Urと屋根上積雪深の変化率SDrcとを用いて屋根上積雪深の評価方法を検討すると以下のようになる。

UrとSDrcとの関係を見ると、図-11となる。UrとSDrcとの関係を見ると、Urの増加に伴いSDrcの値が減少する傾向を示すが、その傾向は大きく3つに分類できる。Aの範囲では近似式が1.0を超えるので、SDrc=1.0と仮定する。Bの範囲ではUrの増加に伴いSDrc=0.5程度まで反比例的に減少し、Cの範囲ではSDrc=0.4前後の値となり、

図-12 屋根上吹雪指数の等値線図

図-13 屋根形状係数の等値線図と多雪地の風速および気温の分布

図-14 屋根上吹雪指数から推定したSDrcと実測値によるSDrcとの対比

図中の式で近似できる。さらに、前述のSDrcと風速や気温との関係と比較するとバラツキが小さく、Urを用いることによって合理的な屋根上積雪深の評価が可能と考える。

次に、同一の屋根上吹雪指数を示す温度と風速との関係を求めると、図-12となる。図のように、同一の屋根上吹雪指数を示す風速と気温との関係は図中の実線で近似され、屋根上吹雪指数の等値線が得られる。さらに、図中には各屋根上吹雪指数に対応する屋根上積雪深の変化率を合わせて示していることから、屋根上積雪深の変化率の等値線ともなる。

図-12に示した等値線図に各地点の冬季間を代表する1, 2月の平均風速と平均気温との関係を合わせて示すと図-13となる。図中の各地点をSDrcで分類すると、表-2となる。同表のように、 $SDrc=1.0$ の範囲に北陸地方や東北南部の地点、 $0.8 \leq SDrc < 1.0$ の範囲に新潟地方や北海道の内陸部の地点、 $0.6 \leq SDrc < 0.8$ の範囲に東北地方や北海道南部の海岸線の地点、 $SDrc < 0.6$ の範囲に北海道の海岸線の地点がある。

このSDrcとこれまでの実測調査結果とを対比すると図-14となる^{4,10,11,12,13)}。図のように、両者の誤差は概ね ± 0.2 の範囲に分布して比較的良好な対応をし

表-2 屋根上吹雪指数による屋根形状係数の分類

SDrc	地 点	分布の特徴
$SDrc < 0.4$	江差・寿都 留萌・根室	北海道の海岸線に位置して、1, 2月の平均風速が5m/s以上の地点
$0.4 \leq SDrc < 0.6$	浦河・室蘭 羽幌・釧路 雄武・網走 苫小牧	北海道の海岸線に位置して、1, 2月の均風速が3~4m/s程の地点
$0.6 \leq SDrc < 0.8$	酒田・秋田 八戸・青森 函館・小樽 岩見沢・深浦 北見枝幸 広尾・盛岡	東北および北海道の海岸線に位置する地点が多く、1, 2月の平均風速が3~4m/s程度の地点で比較的气温が高い
$0.8 \leq SDrc < 1.0$	高田・新潟 札幌・旭川 新庄・帯広 倶知安	内陸に位置する地点が多く、1, 2月の平均風速が2m/sの地点
$1.0 = SDrc$	敦賀・福井 金沢・富山 仙台・若松 伏木・福島 山形	北陸や東北南部の地点で、1, 2月の平均気温がプラスの地点

ている。これらの誤差には、調査対象の建物にあるパラペットの影響が含まれていると考える。これらの結果をみると、SDrcの等値線図から各地点の屋根上積雪深の概要を把握することが可能になると考えられる。

7. まとめ

本研究では最も基本的な屋根形状である陸屋根の屋根上積雪の経時的な観測資料とアメダスの気象観測資料をもとに、屋根上積雪深と降雪期の気象要素との関係を検討した。次に、屋根上吹雪指数の等値線図を用いた屋根上積雪深の評価方法を検討した。その結果、屋根上吹雪指数の等値線図は屋根上積雪深の概要の把握に有効であることが明らかとなった。また、アメダスデータを有効に用いるためには、気象官署の観測値に対応するような補正方法の検討も必要であろう。

なお、本研究で用いた屋根上吹雪指数の算出については北海道開発局開発土木研究所の竹内政夫博士から貴重なご助言を頂いた。風速の実測は清水建設(株)技術研究所の老川進氏のご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築雑誌 Vol.107, No.1330, pp.156-157, 1992.
- 2) 三橋博三他：雪荷重を考える，鉄鋼技術 Vol.5, No.45, pp.23-33, 1992.3.
- 3) 遠藤明久他：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第357号，pp.20-28, 昭和60年11月.
- 4) 苫米地司他：屋上積雪の評価方法に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.32B, pp.49-62, 1986.3.
- 5) 気象庁編：日本気候表その2，(財)日本気象協会刊，pp.11-13, 1982.
- 6) 日本雪氷学会編：雪氷調査法，北海道大学図書刊行会刊，pp.197-199, 1991.
- 7) 竹内政夫：吹雪と道路交通，第3回開発土木研究所講演会特集号，pp.42-64, 1990.3.
- 8) 財団法人消防科学総合センター：地域防災データ総覧危険物災害・雪害編 p.180, 昭和61年3月.
- 9) 日野幹雄：スペクトル解析，pp.97-101, 朝倉書店，1985.
- 10) 和泉正哲他：積雪荷重の評価に関する基礎的研究 その13, 日本建築学会 大会学術講演講概集 B構造1, pp.45-46, 昭和61年8月.
- 11) 和泉正哲他：積雪荷重の評価に関する基礎的研究 その15, 日本建築学会 大会学術講演講概集 B構造1, pp.1405-1406, 昭和62年10月.
- 12) 和泉正哲他：積雪荷重の評価に関する基礎的研究 その16, 日本建築学会 大会学術講演講概集 B構造1, pp.63-64, 昭和63年10月.
- 13) 山田孝一郎他：建築物の雪荷重に関する基礎的研究 その7, 日本建築学会 大会学術講演講概集 B構造1, pp.43-44, 昭和61年8月.

SYNOPSIS

An Evaluating Method of Snow Depth on Roofs in Relation with Meteorological Conditions

By Tsukasa TOMABECHI

Assoc. Prof., Dept. of Architecture,
Hokkaido Institute of Technology, Dr.Eng.

Hideharu YAMAGUCHI

Design Division, Taiyo Kogyo Corporation,
M. Eng.

Sigeki HASHIMOTO

Nippon Data Service Corporation, M. Eng.

Our former researches revealed that the wind speed and the temperature give a great influence on the snow depth on a roof. The purpose of this experimental study is to obtain indices for evaluating the snow depth on a flat roof, which is the simplest in shape, in relation with meteorological conditions. We have established them from our year's observations of the snow depth on a flat roof and various experimental studies. We can estimate the strength of the drifting snow by using our indices deduced from the average of the wind speed and that of the temperature. Our method proved to be of high reliability agreeing with actual results obtained in other researches.