

北陸地方における建築物の雪荷重に関する基礎的研究

——金属板屋根における雪の滑落についての実験——

前 田 博 司

Fundamental Study on Snow Load on Roofs in Hokuriku District —Experiment on Sliding Down of Snow on Metal Sheet Roofs—

Hiroshi MAEDA

It is observed frequently in Hokuriku District that snow on roofs breaks and slides down. Usually, this is considered as a favorable phenomenon in the determination of snow load on sloping roofs, but on the other hand, it brings about various disasters.

The main purpose of this study is to investigate the conditions of the snow sliding on the sloping roofs of private houses and other buildings roofed with metal sheet.

As the results of experiments, the followings are found.

- (1) Snow sliding is influenced by the atmospheric temperature. Generally, it starts when the temperature rises above 4°C.
- (2) The temperature variation after snow fall is an important factor. Unless the lowest temperature is below -1°C or so, snow sliding is easy to occur.
- (3) Snow does not slide easily on old roofs, but in some cases, sliding occurs within snow layers under some condition.
- (4) Overall sliding is caused by successive local sliding.

1 はじめに

北陸地方は世界有数の豪雪地帯にあるにもかかわらず、冬季も比較的温暖で、積雪は他のほとんどの多雪地方のような寒冷地におけるものとは異なった性質を示す。その雪質は含水率の高い、いわゆる「湿り雪」で、雪温は特別の場合を除き、常に 0℃である。このため密度が高く、建築物の屋根に作用する荷重としての重量が大きいこと、力学的強度や付着力が小さく、勾配のある屋根では滑落しやすいことなど、建築物への影響もこの地方独特のものがある。これらのうち、屋根雪の滑落に関しては、従来その重要性が強調されてはいるものの、実際には研究の報告は少ない。しかしながら、最近の木質系建築物や鉄骨造低層建築物に多く用いられている金属板屋根はその効果が著しく、建築物の大型化や市街化の進行に伴って、直接的にも、また間接的にも、屋根雪の滑落による被害が大きくなっている。特に工場や体育館などの大規模な建築物の倒壊の

多くは、滑落による偏荷重が原因であると考えられる。また一方、荷重低減の面では、滑落の効果を利用することにより、その後の雪処理を考慮しておけば、雪おろしや融雪設備よりはるかに確実かつ経済的な除雪方法となり得る。本研究は建築物に作用する雪荷重に関しての基礎的な問題として金属板屋根における雪の滑落をとりあげ、そのメカニズムを明らかにするためにモデル実験を行ない、付着力、摩擦力および粘性抵抗について検討したものである。

2 実験方法および理論的考察

i) 積雪の断面観測と屋根雪の成層構造

積雪は一様、または連続的なものではなく、降雪毎に層構造を形成している。各層内の雪質は降雪条件および降雪後の気象条件などによって異なり、さらに時間的にも変化してゆく。一般に地上積雪の最下層はざらめ化しているが、屋根雪も同様で、降雪後に気温が特に低くなった場合などは融雪水が再び凍結して氷板、または堅いざらめ（こしもざらめ）雪となる。それより上の成層構造は地上におけるものとはほぼ同様であるが、風や日射の影響を受けやすいため、変態がやや早く、また雪の移動があった場合には全く異なった状態となることがある。

地上および屋根上における積雪の断面観測結果の例を図-1に示す。

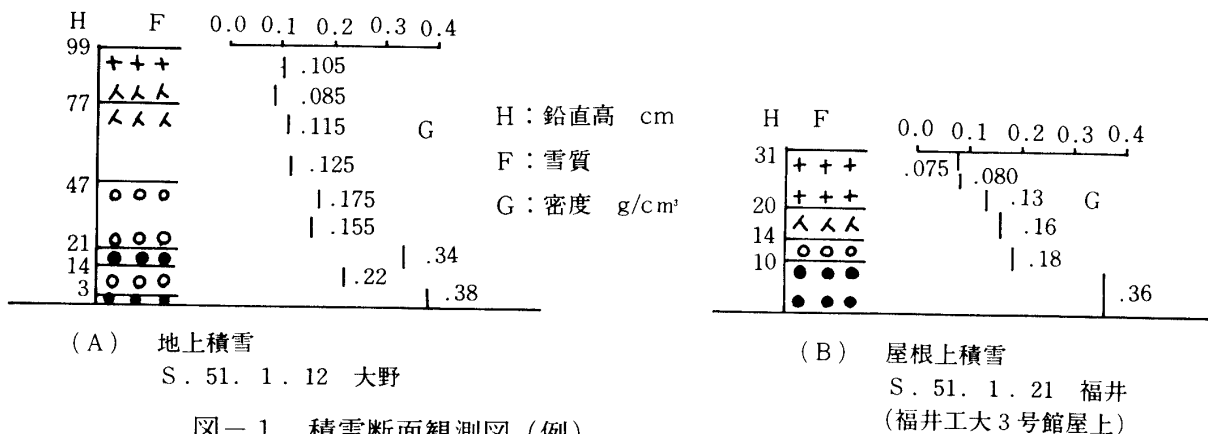


図-1 積雪断面観測図 (例)

ii) 滑落のメカニズム

屋根雪は地上積雪と同様に最下層はざらめ化している。ざらめ雪の粒子は単結晶ではなく、融解と凍結をくりかえして比較的大きい多結晶粒子となっており、粒子間の結合は弱い。屋根材表面との結合は相当強い場合が多い。雪粒子と屋根材表面との結合には、2種の場合がある。その1は一度融解した雪が再び凍結するときに結合する場合で、他は融解を経ずに結合する場合である。両者の間には結合力などに大きな差があり、前者を氷着、後者を凍着と呼んで区別している。凍着については、その結合力は接触時間に関係すると考えられている。

屋根雪の滑落で最も多いケースは、最下層のざらめ雪の含水率が融解などで多くなった場合に生じるもので、雪の自重などによる力が氷着や凍着による結合力（付着力）を上回ってはいく離され、そこに融雪水層ができて雪が移動する。したがって、屋根雪の滑落は夜間の低温時に堆積した雪が朝の気温の上昇とともに動きはじめて開始されることが多い。その他、積雪の内部に粒

子間の結合が極端に弱い層があった場合には、表層などと同様のメカニズムで滑落することがある。いずれの場合にも、滑落は屋根全面で同時に開始されるのではなく、ある部分（棟近く、または軒先など）で開始され、その力が周囲に影響を与えて、順次、移動しはじめるのである。

屋根雪の滑落の状況は、福井工業大学記念講堂大屋根における場合を映画に撮影して検討した。

iii) 滑落開始時の力学的性状

一般に屋根雪の滑落は、動きはじめるまでは屋根材表面に対する雪の静止摩擦係数 μ による摩擦力

$$F_1 = \mu \cdot N \quad (1)$$

に関係すると考えられるが、屋根雪が自然に堆積したまま、あるいは長時間静止した状態にあれば、雪粒子と屋根材表面との結合は強く、移動しようとする時の抵抗力は摩擦力ではなく、付着力が支配的である。単位面積当りの付着力を f 、見かけの接触面積を S とおけば、

$$F_2 = f \cdot S \quad (2)$$

であり、一度はく離れた後、静止の状態から静かに動かすのに要する力が F_1 であると考えられる。金属板表面に対する雪の摩擦係数 μ は、このように考えれば、ごく小さい値であり、(1)式で得られる F_1 と(2)式で得られる F_2 とでは、 $F_1 \ll F_2$ となることが普通である。したがって、勾配のある屋根の上の雪の滑落に関しては、主として F_2 について検討しなければならない。実験は自然に堆積したままの雪で作られたブロックについて、図-2に示すように行なわれた。

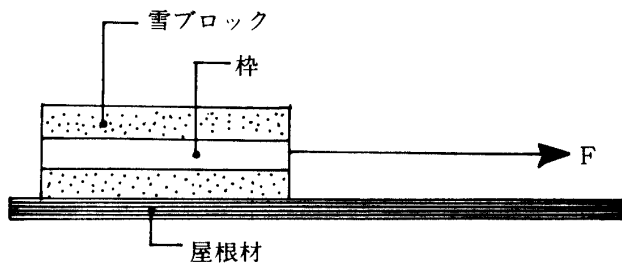


図-2 実験方法(1)

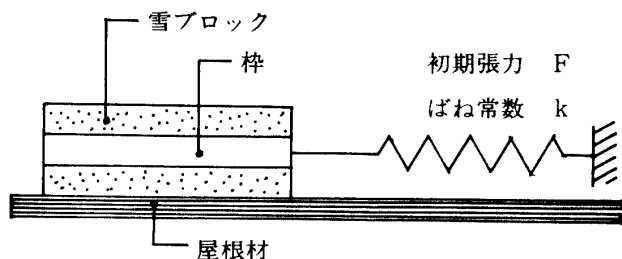


図-3 実験方法(2)

iv) 滑落開始後の雪の運動

滑落が開始されてからの雪の移動の状態に関しては、図-3に示すような実験が行なわれた。すなわち、雪ブロックをあらかじめストッパーで固定して力を加えておき、ストッパーをはずしたときの雪ブロックの動きについて実験を行なったものである。動きはじめてからの雪粒子と屋根材表面との間は、固体（雪粒子）と固体（屋根材）の接触ではなく、液体（融雪水）を介しての接触である。したがって、そこには運動の速度に比例する粘性抵抗が働くと考えられる。すなわち、雪ブロックの質量を M 、加えた力を F とすれば、

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + S \lambda \frac{dx}{dt} + Mg\mu - F = 0 \quad (3)$$

k をばね常数、 l をはじめのばねの伸びとすれば、

$$F = k(l - x) \quad (4)$$

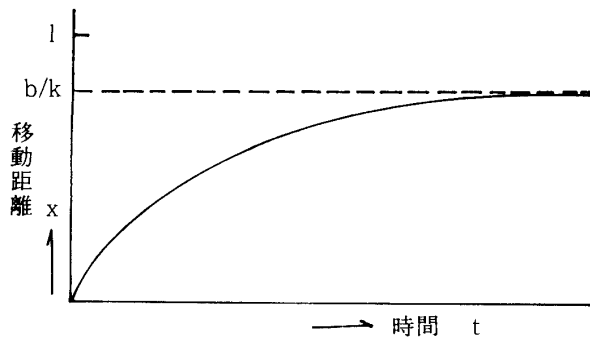


図-4 雪ブロックの漸近運動

したがって、

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + S \lambda \frac{dx}{dt} + kx - kl + Mg\mu = 0 \quad (5)$$

(5)式の特解の一つとして、次式を得る。

$$x = \frac{b}{k} \left(1 - e^{-\frac{S\lambda - \sqrt{(S\lambda)^2 - 4Mk}}{2M} t} \right)$$

$$b = kl - Mg\mu \quad (6)$$

これを図示すれば図-4のようになり、漸近運動であって、これから μ を算出することができる。

3 実験結果および考察

i) 滑落開始時の力学的性状

実験台の屋根材にはカラー鉄板と亜鉛鉄板を用い、それぞれ新品と錆のある古品とについて実験を行なった。錆は新品の板の表面にサンドペーパーをかけ、濃食塩水を塗布した後、約1週間野外に放置して発生させたものである。雪は自然に堆積したものであり、そのまま野外で実験を行なったため、気温をはじめ、任意の条件を与えることは不可能である。したがって、この実験結果をもって定量的な判断を下すことはできないことを前提とした上で考察を行なう。なお実験は福井市内（福井工業大学構内）と大野市内（福井県大野土木事務所構内）で行なわれたものである。

図-5は実験時の気温とカラー鉄板および亜鉛鉄板（いずれも新品）に対する付着力との関係を示すものである。図中の直線①は付着力の上限であり、曲線②は静止摩擦係数 μ を雪ブロック

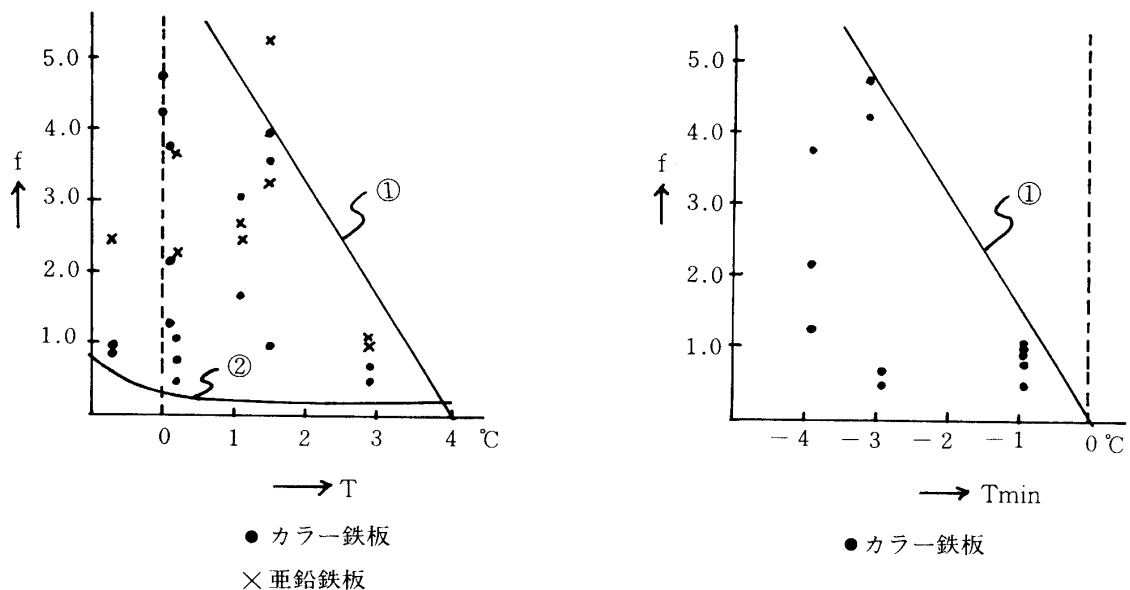


図-5 実験時の気温と付着力

の付着力 f に換算したもので、付着力の下限を示すと考えられる。ただし、①、②ともカラー鉄板に対する値である。一般に気温が 4°C 以上になると緩勾配でも滑落すると言われており、この実験によってもそれを認めることができる。また、気温が低い場合には実験値に大きな差があるが、これは雪質による以外にも雪ブロックの切出し中に不慮の力が加わって付着が弱められるなどの要因が考えられる。カラー鉄板と亜鉛鉄板を比較すれば、亜鉛鉄板の方がやや付着力が大きい値を示す。しかし、その差はあまり小さくなく、それぞれを錆のある古品と比較すれば、古品では付着力は $3 \sim 5$ 倍になる。

付着力はそのときの気温に影響されるばかりでなく、降雪後の気温の変化によっても左右される。図-6 はカラー鉄板に対して、前夜の最低気温と付着力との関係を示すものである。直線①は図-5 と同様に付着力の上限を示す。最低気温が比較的低い場合であっても付着力が非常に小さい値を示すものがあるが、これは実験時の気温が高く、融雪水層が発生していたことが明らかであったものである。

これらの結果から、屋根雪の滑落は降雪後の気温が低い場合には起りにくく、逆に気温が高い場合には容易に滑落するという傾向が認められる。特に降雪後の気温が -1°C 以下にならないようなときや、最低気温にかかわらず気温が 4°C 程度まで上昇したときには、滑落に対する抵抗力は摩擦力に近い値にしかない。このような場合には、静止摩擦係数 μ はカラー鉄板で 0.2 以下であるという結果を得ているので、実際の金属板屋根（勾配 $3/10$ 前後）ではすべて滑落する可能性があると言える。

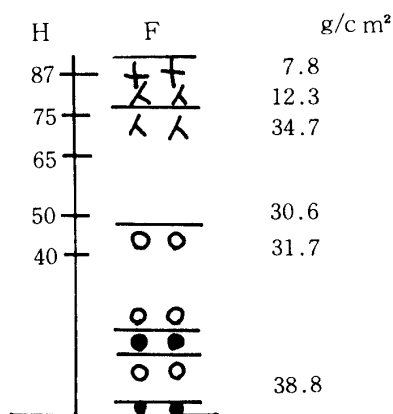


図-7 セン断耐力測定図（例）

錆のあるものについては、前述のように付着力が非常に大きくなるため、気温があまり上昇しないときには積雪の内部で滑りはじめることがある。この場合の抵抗力は層内または層間のせん断耐力である。せん断耐力は雪質および成層構造によって変化し、一概には論じられないが、層内では含水率の高いざらめ雪、層間ではしまり雪などの層の上に新雪層がある場合が低い値となる。

積雪のせん断耐力の測定結果の例を図-7 に示す。

ii) 滑落開始後の雪の運動

移動中の雪の運動に関する実験は亜鉛鉄板上で行なわれた。結果は図-8、図-9 および表-1 に示すとおりである。この結果から滑落中の雪ブロックの運動は、仮定のとおり粘性抵抗を受ける漸近運動であることが明らかである。表-1 の μ は(6)式によって求めた動摩擦係数である。亜鉛鉄板上における雪ブロックの動摩擦係数は静止摩擦係数のおよそ $1/5$ 、あるいはそれ以下である。これは雪粒子と屋根材表面との間に水が介入するため、すなわち雪ブロックの下に薄い融雪水層ができ、それが潤滑油の役目を果たすからである。そのため、付着力が非常に小さいときでも、滑落中の抵抗力は速度が早くない限り、動きは始めるまでより小さい。したがって、屋根雪は一部分でも滑落を開始すれば、エネルギーに余剰ができ

表-1 実験結果

$k=200\text{g/cm}$

屋根材	$S(\text{cm}^2)$	$M(\text{g})$	$F(\text{g})$	$l(\text{cm})$	$b/k(\text{cm})$	μ
亜鉛鉄板	462	3885	1500	7.5	5.5	0.103
亜鉛鉄板	462	1610	1500	7.5	6.5	0.062

F:ぬれしまり雪 H:10cm G(平均):0.25

て次々に滑落が広がる可能性が大きいことになる。

4 まとめ

積雪の諸性質は、結晶の形成をはじめとして、降雪条件、降雪後の時間経過、気象条件など、多くの要因によって変化する。特に北陸地方などの比較的温暖な地方の積雪は、雪粒子(氷)と水が混在した湿り雪で、したがって雪温は常に氷の融解点(通常は 0°C であるが、塩分などを含むといくぶん低下する)である。湿り雪は力学的性質が雪質による他、硬度や含水率によって大きく異なり、せん断強度や引張強度は含水率にほぼ反比例することが知られている。また付着力や摩擦力は、積雪内でも、他の物体との間でも、温度や雪および物体の状態によってさまざまである。

したがって、屋根雪の滑落は定量的にとらえることが相当に困難である。本研究では滑落を雪ブロックの運動によってモデル化しているが、実際には各ブロックは連続しており、その大きさも限定できない。したがって、滑落の条件として積雪内の鉛直断面におけるせん断強度、引張強度および粘弾性などを加えなければならない。しかし、湿り雪の鉛直断面におけるせん断強度や引張強度の測定は非常に困難である。実際の滑落を観察した結果によれば、なだれと同様に積雪の表面に斜めに亀裂が入り、そこから滑りはじめることが多い。このことは引張強度に比べてせん断強度の方が低いことがあることをうかがわせる。

このように、本研究の範囲からだけでは屋根雪の滑落を完全には解明できないが、およその傾向として、金属板屋根では、

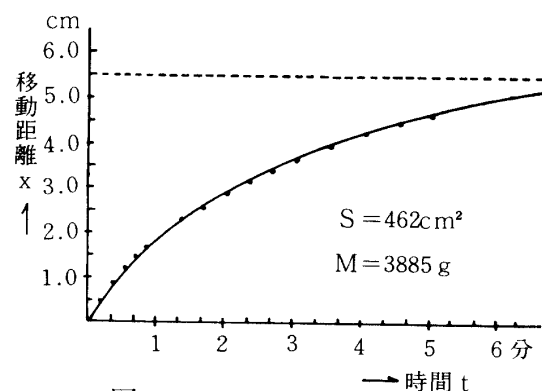


図-8 実験結果

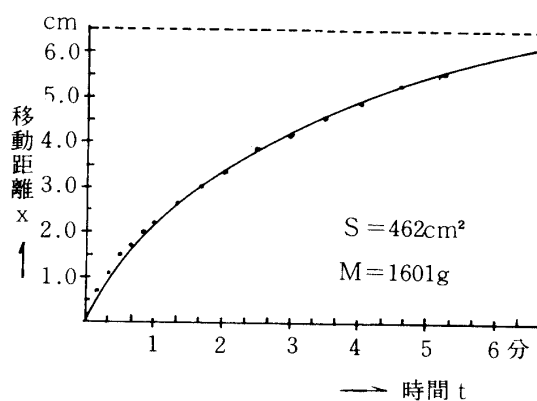


図-9 実験結果

- (1) 滑落はそのときの気温に左右され、4℃程度まで上昇すればほとんどの屋根で滑落する。
- (2) 降雪後の気温変化にも影響され、最低気温が-1℃前後より低くならなければ滑落しやすい。
- (3) 屋根材が古くなれば滑落が起りにくい。しかし、条件によっては表層なだれのように積雪内で滑りはじめる。
- (4) 一度滑落がはじまれば、次々と広がる可能性が大きい。

などが結論づけられる。

なお、屋根雪も最下層はざらめ化している場合がほとんどであるので、低温実験室における保存雪で条件を設定して行なう実験により、定量的な性質を研究することも有効であろう。

5 おわりに

本研究は、日本建築学会の推薦により、竹中育英会昭和50年度建築研究助成を受けて行なったものである。

また、実験および理論的考察については、杉森正義氏（福井県雪害研究室）の協力によるものであり、ここに厚く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 前田・杉森：屋根の雪荷重に関する基礎的研究，日本建築学会昭和50年度大会学術講演梗概集。
- (2) 山田・前田：北陸の積雪と建築構造，日本建築学会・建築雑誌VOL.91No.1108（昭和50年6月）
- (3) 杉森・前田：トタン屋根からの雪の滑落および接触面でのすべり抵抗について，日本雪氷学会昭和50年度秋季大会講演予稿集
- (4) 渡辺要・斉藤竹生：雪と建築，彰国社（昭和24年1月）
- (5) 吉田順五：積雪災害の基礎的研究，北海道大学低温科学研究所（昭和44年4月）