屋根上積雪の経時的な雪質変化および摩擦特性

Change of Snow Condition and Frictional Property
of Snow with Duration on Roof伊 東 敏 幸^{*1}・高 倉 政 寛^{*2}

Toshiyuki Ito Masahiro Takakura

苫米地 司^{*3}

Tsukasa Tomabechi

SYNOPSIS

For systematic sliding of roof snow, appropriate evaluation of the frictional properties between roof snow and roofing materials is needed. Snow generally slides off a roof several days after accumulating on the roof due to changes in snow condition (new snow → compacted snow → granular snow) caused by the transfer of heat from attic space. In this study, we experimentally investigated the temporal changes of roof snow and the accompanying changes in frictional properties between the snow and roofing material. The results showed that the size of snow particles gradually increases after snow has accumulated on the roof, and frictional resistance between the snow and coated steel sheets greatly decreases. Within 24~48 hours after accumulation of snow on the roof, the frictional resistance of the snow decreases to about one-third of that of new snow. Thereafter, there is almost no change in frictional resistance. The results of this study show that consideration of the temporal decrease in frictional resistance between roof snow and roofing materials is important for planning systematic sliding of roof snow.

Keywords : roof snow, snow sliding, frictional resistance, snow condition

1. はじめに

多雪地域における建築物の屋根上積雪を自然滑落処理することは、積雪荷重の低減や雪下ろし作業中の転落事故防止に有効である。しかし、屋根雪を規則的かつ安全に滑落させなければ、落雪による人身事故や過剰積雪による建物崩壊などにつながるこ

から、屋根雪の滑落現象を規則的に制御する必要がある。屋根雪の滑落は屋根葺材と屋根雪下層部との摩擦性状に支配される。すなわち、屋根葺材の表面性状と摩擦面付近の雪質並びにその含水状態に対応した滑雪性状を明らかにし、その特性を考慮した滑落雪計画を行う必要がある。

* 1 北海道工業大学・講師 (工博)

* 2 北海道工業大学大学院

* 3 北海道工業大学・教授 (工博)

[本稿受理: 1998年5月25日, 修正原稿受理: 1998年8月31日, 討論期限: 1999年12月31日]

一般住宅のように屋内暖房があり天井断熱を施した小屋裏を持つ緩勾配屋根における屋根雪の滑落状況を観察すると、降雪の直後に滑落するのは稀であり、多くの場合、数時間もしくは数日経過した後に滑落し、その場合における屋根雪の最下層部はザラメ化している¹⁾。また、屋根雪の落雪事故に関する研究によると、落雪事故の多くは多量の降雪があった日の数日後に発生している²⁾。これらの現象をみると、屋根雪の滑落抵抗力は降雪後の経時過程において減少していると考えられる。このことに関して、異なる雪質の摩擦抵抗力を評価した報告では、雪粒の粗大化に伴って摩擦抵抗力が減少することを指摘している³⁾。このことから、降雪後の経時過程において屋根面付近の雪は変態し、その粒径が粗大化することによって摩擦抵抗力が減少して数日経過したときに滑落現象が発生していると考えられる。

このように、小屋裏からの伝熱がある屋根においては、降雪後の経時過程において屋根面付近の雪質が変化して摩擦抵抗力が減少すると考えられることから、屋根雪の規則的な滑落を制御するためには、経時的な雪質変化およびその摩擦特性を明らかにする必要がある。しかし、このことに関する研究報告は、極めて少ない現状にある。屋根雪の滑落性状に関する既往の研究をみると、材料の表面性状が及ぼす滑雪特性を評価したものが多く、その評価に用いている屋根雪モデルは氷体、しまり雪あるいはザラメ雪であるが、経時的に変化する雪質を想定した屋根雪モデルを用いた例はない^{4)~7)}。

以上のことから、本研究は勾配屋根における降雪処理を規則的に制御するための資料となる経時的な雪質変化およびその変化過程における摩擦特性を明らかにすることを目的とする。はじめに、札幌および新庄における降雪後、数日間の外気温推移について整理した。その結果を基に小屋裏からの伝熱を想定したモデル実験を行い、摩擦界面付近の雪質変化の状態を明らかにし、さらにその状態における摩擦抵抗力を測定した。また、経時的な雪質変化を利用することによって屋根雪の滑落促進を行うことが出来ることを示した。

2. 降雪後の気温特性および屋根雪状態

2.1 小屋裏からの伝熱がある屋根面の温度

地上に堆積した雪は、その雪質が時間の経過に伴って変化し、新雪からざらめ雪へと変態してゆく。このような雪の変態過程を定量的に示す指標の一つに雪粒の粒径がある。これまでの雪粒の粗大化に関する研究によれば、0℃で推移する水に浸った新雪は、その平均粒径が130時間後に0.3mmから1.1mmまで粗大化することを観察し、雪粒径(mm)の増加が経過時間(hour)の1/3乗に比例することが明らかにされている⁸⁾。このように、雪粒の周囲に水分が介在している場合は、数日間のうちに新雪がざらめ雪へと変態する。

ここで、札幌市の一般的な小屋裏構造の戸建住宅について、厳冬期である2月の屋根葺材表面温度を測定した結果では、次のことが明らかとなっている。屋根上に雪が10~15cm堆積した状態における屋根葺材の表面温度は、外気温が-6℃程度(小屋裏温度:2~4℃,居室温度:18℃程度)まで低下した場合であっても0℃を若干上回る温度で推移する。この場合、屋根葺材と屋根雪との界面では融雪水が若干ながらも発生する状態になる³⁾。従って、暖房を行っている建物の屋根雪は、屋根裏からの伝熱の影響を受けて雪質が変態していると考えられる。

2.2 札幌および新庄における降雪後の気温特性

先に述べたように、屋根面付近の雪は、積雪後の時間経過に伴ってその雪粒径が変化する。雪粒径の変化は、融雪水の発生に影響されることから、屋根面温度を支配する降雪後の外気温推移を把握する必要がある。このことから、降雪があった日から数日後までの外気温推移について分析した。この分析は年間降雪量が多かった1980年11月~1981年4月における札幌と新庄を対象に、気象官署の観測資料を用いた。

1日の降雪深が5cm以上あった日を基点とした数日後までの日平均気温の推移について整理すると表-1となる。なお、この表は以下の2条件を基にデータを抽出している。

表－１ 札幌と新庄における降雪後の外気温推移

気象官署：札幌	当日	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目
YEAR/MONTH/DAY	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)
80/12/14	-2.5: 13	-0.4: 6	-1.7: 1	-1.0: 1	-1.6: 1	-4.8: 7	
80/12/19	-4.8: 7	-2.3: 33	-2.1: 6	-4.1: 43	-5.1: 1	-3.6: 1	
81/01/02	-2.2: 11	-0.3: 16	-2.4: 1	-6.1: 1	-6.0: 8	-5.7: 11	-5.0: 23
81/01/06	-6.0: 8	-5.7: 11	-5.0: 23	-2.4: 2	-2.1: 19	-5.7: 15	-7.3: 1
81/01/10	-2.1: 19	-5.7: 15	-7.3: 1	-6.2: 4	-5.2: 4	-6.0: 2	-5.5: 1
81/01/21	-7.2: 5	-7.2: 51	-4.4: 17	-2.3: 1	-6.3: 19	-7.3: 10	-5.6: 16
81/01/25	-6.8: 19	-7.3: 10	-6.6: 16	-5.6: 19	-5.5: 8	-4.6: 10	-2.5: 7
81/01/28	-5.6: 19	-5.5: 8	-4.6: 10	-2.5: 7	-2.0: 1	-3.3: 1	-2.5: 1
81/01/31	-2.5: 7	-2.0: 1	-3.3: 1	-2.5: 7	-0.9: 9	-2.2: 2	-1.3: 1
81/02/04	-0.9: 9	-2.2: 2	-1.3: 1	-1.6: 1	-3.2: 1	-4.3: 1	-1.8: 1
81/02/19	-1.3: 18	-3.0: 3	-3.5: 2	-5.1: 3	-5.3: 4	-7.5: 1	-7.3: 1
81/03/07	-2.4: 6	-4.2: 1	-6.0: 9	-6.0: 9	-3.5: 16		

気象官署：新庄	当日	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目
YEAR/MONTH/DAY	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)	平均気：日降雪 温(℃)：深(cm)
80/12/19	-1.7: 10	-3.0: 4	-2.0: 17	-0.1: 10			
80/12/27	-0.5: 10	-0.7: 30	0.2: 38	-0.2: 6			
81/01/03	1.6: 12	-0.1: 17	-0.8: 22	-2.9: 45	-3.4: 13	-1.2: 3	
81/01/10	-0.9: 40	-2.6: 22	-3.7: 22	-4.8: 26	-6.1: 15	-5.5: 34	-4.8: 2
81/01/13	-4.8: 26	-3.1: 15	-5.5: 34	-4.8: 2	-3.7: 18	-1.0: 12	-1.7: 20
81/01/16	-4.8: 2	-3.7: 18	-1.0: 12	-1.7: 20	-3.1: 20	-4.6: 24	-4.0: 41
81/01/19	-1.7: 20	-3.1: 20	-4.6: 24	-4.0: 41	-1.5: 11		
81/01/25	-2.3: 6	-4.2: 14	-4.2: 17	-3.1: 16	-2.3: 13	-1.9: 12	
81/02/08	-1.1: 20	-1.6: 7	0.2: 6	-2.3: 13	0.5: 9		
81/02/19	-0.7: 28	-1.6: 8	-2.9: 4	-3.3: 17	-4.8: 5	-0.7: 3	-1.9: 6
81/02/22	-3.3: 17	-4.8: 5	-0.7: 3	-1.9: 6	-4.6: 5	-5.0: 25	-4.5: 27
81/02/25	-1.9: 6	-4.6: 5	-5.0: 25	-4.5: 27	-3.8: 10		
81/03/08	-0.9: 6	-1.5: 1	-1.0: 9	-2.4: 6			

□: -3℃>平均気温≥-6℃ □: -6℃>平均気温

(1) 5 cm以上の降雪があった日の後、日最高気温が2℃未満で推移する7日後までの期間を記載した。

(2) 数日間連続して降雪があった場合については、札幌の1/25で示したように、降雪当日を含めて3日間の連続降雪までを一事象とし、4日目以降の降雪は次の事象として記載した。

表のように、(1)、(2)の条件を満たした降雪日は札幌で12事象、新庄では13事象であった。これらの事象について日平均気温の推移を温度別に分類してみると表中の網掛けのようになる。札幌の場合をみると、降雪当日の日平均気温は、1/21および1/25では-6℃未満となるものの、他の日については、通常に暖房を行っている建物の場合、ある程度の積雪があれば屋根葺材と屋根雪との界面に融雪水が発生し得る外気温となっている。さらに2日目以降についてみると、殆どの日において融雪水が発生し得る温度範囲にあり、1/25の場合は4日目以降にこ

の状態となる。一方、新庄の場合をみると、降雪当日は何れの日においても平均気温が-6℃以上となっており、2日目以降で一時的に気温が下がる日も若干存在するが、全体的には継続的に融雪水が発生する外気温推移となっている。

これらの結果をみると、札幌および新庄における暖房している建物の屋根雪は、小屋裏からの伝熱による融雪水の発生によって、経時的に雪粒径が粗大化するものと考えられる。このように、屋根雪の滑落抵抗性を評価する場合、時間経過に伴う摩擦界面付近の雪物性変化を考慮する必要があると言える。

3. 雪質および摩擦抵抗力の経時的変化

前述した降雪後の温度推移のように、小屋裏からの伝熱がある屋根では、屋根面付近の雪が経時的に粗大化することから、粗大化の状態およびその摩擦特性を実験的に検討する。小屋裏からの伝熱状態の違いによる粗大化の進行速度、および材料の違いに

よる特性を評価するため、小屋裏温度を変化させたモデル実験を数種類の屋根葺材を対象として行った。

3.1 実験の方法

実際の屋根における小屋裏からの伝熱を想定するため、図－１に示すような試験体を用いたモデル実験を行った。図に示すように、試験体はランバーコア合板上に20mm厚のフォームポリスチレン板およびパネルヒーターを載せ、その上にある9mm厚の野地板に屋根葺材を貼り付けている。このような試験体を－8～－5℃で降雪した日にパネルヒーターの電源を絶った状態で屋外に水平状態で放置し、屋根葺材上に自然状態で10cm以上積雪させた。その後、雪が載った状態の試験体を－5℃の低温室内へ移動し、積雪深10cm以上の雪を取り除いた後、パネルヒーターに通電した。パネルヒーター表面の温度は、予備実験によって屋根葺材表面の温度が0℃を若干上回るような温度になる表－2に示す4通りとした。なお、低温室の温度（－5℃）は札幌における1・2月の平均外気温である－4.5℃を想定している。実験時の積雪密度は何れも180～210kg/m³であった。

低温室内に移動した試験体を用い、次のように動摩擦係数の測定および摩擦界面付近の雪の観察を行った。動摩擦抵抗力の測定は、低温室内で水平型滑雪試験装置を用いて実施した⁹⁾。測定は所定時間を経過した時点で、各試験体上の雪を10cm角の大きさに成形した雪ブロックを4mm/secの速度で水平滑動させ、そのときの摩擦抵抗力をロードセルを用いて測定した。併せて、摩擦界面付近の雪質を評価するため、摩擦測定の直後に雪ブロック下面の雪を一

部切除し、黒い樹脂板上に薄く載せてビデオカメラ（倍率10倍）を用いて観察した。なお、この実験は継続的に行ったので、測定・観察時以外の時は雪ブロックを紙製の枠で仕切り、その周囲をしまり雪で覆うことによって周囲からの冷却を防いだ。この測定・観察は、表－2に示す経過時間毎に行い、各試料は2枚ずつとし、1枚の試料につき摩擦抵抗力を3回測定した。なお、既往の研究をみると静摩擦抵抗力和動摩擦抵抗力は線形関係にあることから、本実験では動摩擦抵抗力に限って測定した¹⁰⁾。

このモデル実験に供した試料は、表－3に示すような積雪地域で多用されている屋根葺材とした。塗装鋼板2種類は滑落雪の特性に影響を及ぼす表面粗さが異なる材料とし、光沢塗装鋼板よりも若干表面粗さが大きく撥水性のある材料として塗装ステンレス鋼板、表面が平滑で親水性に優れるフロート板ガラスを用いて本実験における材料特性を評価した。なお、板ガラスの実験ではパネルヒーター上に直に試料を載せている。

図－１ モデル実験に用いた試験体の概要

表－２ 雪粒の観察および摩擦抵抗力の測定間隔

実験No.	パネルヒーターの温度	動摩擦抵抗力の測定（○印）					
		6時間後	12時間後	24時間後	48時間後	72時間後	96時間後
No. 1	1.2℃	○	○	○	○	○	○
No. 2	1.5℃	○	○	○	○	○	○
No. 3	1.9℃	○	○	○	○	○	○
No. 4	2.4℃	○	○	○	○	○	*1

*1 雪ブロックの融雪が著しい状態であった。

3.2 経時的な雪質変化の観察結果

小屋裏からの伝熱を想定したモデル実験による経時的な雪質変化を観察した。その結果を写真－１に示す。なお、これらの写真はパネルヒーター温度が2.4℃の場合（屋根葺材の表面温度は0～0.3℃）に

おける光沢塗装鋼板の観察結果を示している。経時的な雪粒の形状変化をみると、写真のように、6時間を経過した時点までは新雪時と同様な細かい雪粒であり雪の焼結変態は殆ど確認できない。しかし、実験開始から12時間を経過すると雪粒は0.3mm程

表－３ 試料の概要

試料名称	概要	Rz	θ
フロント板ガラス	フロント板ガラス(JIS R 3202) 無色，材厚5mm	0.15 μ m	25.4°
光沢塗装鋼板	塗装溶融亜鉛めっき鋼板(JIS G 3312) 青色，材厚0.35mm	2.43 μ m	60.2°
艶消塗装鋼板	塗装溶融亜鉛-5%アルミニウム合金めっき鋼板(JIS G 3318) 艶消青色，材厚0.35mm	23.00 μ m	71.6°
塗装ステンレス鋼板	塗装ステンレス鋼板(JIS G 3320) 艶消茶色，材厚0.35mm	3.80 μ m	77.8°

注)Rzは試料表面の10点平均粗さであり， θ は試料と蒸留水との接触角である。

写真－１ 経時的な雪質の変化

度、24時間経過した時点では0.5mm程度の球状粒子に変化していることが分かる。さらに時間の経過に伴って雪粒の粗大化が進行し、実験開始から48時間経過した時点では0.5～1.0mm、72時間経過した時点では1.0～2.0mmの粒径にまで成長していることが確認できる。なお、パネルヒーター温度がこれよりも低い1.2℃の場合、雪粒径が1mm程度になるまでの経過時間は64時間要している。

このように、ある程度の積雪があり、屋根裏からの伝熱があると、経時的に屋根面付近の雪は顕著に変態し、その雪粒が粗大化する。その場合、屋根の野地板温度が+2.4℃であれば、積雪2日後には粒径1mm程度のザラメ雪が屋根面付近に存在することになる。この雪粒の粗大化は外気温、小屋裏温度および屋根雪の積雪深に影響を受けるものであることから、屋根面の温熱環境を雪の粗大化に有効な状態にすることで、雪粒の粗大化を促進することは可能と考えられる。

3.3 雪質が変化する屋根雪の摩擦特性

小屋裏からの伝熱によって経時的に雪粒が粗大化することから、積雪後における経時的な摩擦係数の変化について評価する。モデル実験における経時的な動摩擦係数の変化を3通りのパネルヒーター温度についてみると図-2となる。図のように、各屋根葺材と雪ブロックの動摩擦係数は、何れの温度においても経時的に減少する傾向を示し、48時間経過までに測定開始時の1/3程度となる。その後48時間を経過すると動摩擦係数は、ほぼ一定の値となる。この傾向に対するパネル温度の影響をみると、何れの屋根葺材も温度が高いほど動摩擦係数の減少率が若干大きくなる傾向にある。材料の違いによる影響をみると、図の1.2℃に示すように、板ガラスは経時的な摩擦係数の減少率が極めて大きく、48時間経過での動摩擦係数は0.1程度まで減少する。この減少率が大きくなる要因は、細かい雪粒が湿潤となる6～12時間経過時点では、雪とガラスの間に作用する粘着抵抗が大きく作用し、その後雪粒が粗大化すると、雪粒とガラス表面との接触状態が変化して粘着抵抗が減少するためである。光沢塗装鋼板と塗

図-2 経時的な動摩擦抵抗力の変化

装ステンレス鋼板における動摩擦係数の減少傾向は同様であり、パネル温度は1.5℃以上であれば48時間以上経過すると動摩擦係数は約0.2以下まで減少する。一方、艶消塗装鋼板は表面が粗いため、パネル温度が2.4℃の場合でも48時間以上経過したときの動摩擦係数は0.4程度となる。

このように、積雪後における屋根面付近の雪と屋根葺材との動摩擦係数は、48時間経過頃まで経時的に顕著な減少を示すことが分かった。このことは、雪粒径と摩擦係数との関係を示した既往研究からみても妥当な結果であり³⁾、経時的な雪粒の粗大化に依存する現象と考えられる。

4. 雪質変化を利用した滑落雪制御に関する考察

前述のように、屋根裏から何らかの伝熱によって屋根面がプラス温度になるような屋根の場合、屋根面付近の雪が融雪しながら、その雪粒が粗大化し、粗大化に伴って屋根雪の摩擦抵抗力が減少する。従って、外気温が氷点下で推移する場合においても、屋根面に適切な熱供給を行うことによって、強制融雪のような過大な熱量を使用することなく、経時的に雪質が変化する現象を利用した滑落雪の促進が可能になることを示唆している。すなわち、降雪直後から強制的な融雪を行って滑落雪を促進する場合は、屋根面付近の雪を融解させ、摩擦界面に融雪水を多量に介在させることによって屋根雪の滑落を促進することになる¹⁰⁾。しかし、経時的な雪粒の粗大化を利用する場合は、雪粒の粗大化に必要な融雪水を発生させるための熱量を供給すれば良く、摩擦界面に多量の水を介在させる必要がないことから、屋根面に供給する熱量は少なくても良い。なお、雪粒の粗大化を利用して滑落雪を制御する場合は、雪粒の粗大化に有効な伝熱量および粗大化の速度を適切に評価し、摩擦抵抗力が減少するために必要な所要時間を推定する必要がある。さらに、豪雪時のように連続的に多量の降雪がある場合は、粗大化に要する時間を短縮させるための方策、あるいは許容量以上の積雪になる場合の雪処理方法を考えなければならない。これらの点については、雪質変化を利用した滑落雪制御に対する今後の研究課題である。

5. まとめ

小屋裏からの伝熱がある屋根における積雪の経時的な雪質変化、およびその摩擦特性を実験的に検討した。その結果、積雪後48時間経過すると、屋根面付近の雪粒径は1mm程度まで粗大化し、粗大化した雪と屋根葺材との動摩擦係数は新雪時の1/3程度まで減少することが分かった。このことから積雪後における経時的な雪質変化を利用することによって屋根雪の滑落雪を促進させることが可能になると考える。経時的な雪質変化を利用した滑落雪制御を行うには、雪粒の粗大化に有効な伝熱量および粗大化の速度を適切に評価し、粗大化に伴う摩擦抵抗力の変化特性を材料別に明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 竹中隆一、他3名：積雪寒冷地域における膜ドームの膜上積雪処理に関する研究（その2）、自然落雪と温風融雪の効果に関する解析、第9回寒地技術シンポジウム講演論文集、pp.7-12、1993.12
- 2) 山形敏明：北海道における市街地を対象とした雪氷防災に関する基礎的研究、北海道工業大学学位論文、1997.3
- 3) 高倉政寛、伊東敏幸、苫米地司：経時的に雪質変化した屋根上積雪と塗装鋼板との摩擦特性、日本建築学会構造系論文集、第510号、pp.45-50、1998.8
- 4) 前田博司：金属板屋根における積雪の滑落、日本雪氷学会誌、第41巻3号、pp.199-204、1978.12
- 5) 渡辺正朋、平井和喜：屋根葺材と屋根雪の摩擦に関する研究（その2）、屋根葺材に対する雪氷の滑走速度および動摩擦、日本雪工学会誌、第9号、pp.4-15、1988.12
- 6) 苫米地司、他3名：膜構造物の屋根雪処理に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第426号、pp.99-105、1991.8
- 7) 伊東敏幸：積雪地域における勾配屋根の材料設計および維持保全に関する研究、東北大学学位論文、1995.12
- 8) 対馬勝年：水に浸った雪の粗大化、日本雪氷学会誌、第40巻4号、pp.1-11、1978.12
- 9) 伊東敏幸、苫米地司、星野政幸：劣化した塗装鋼板の表面性状と滑雪性について、日本雪工学会誌、Vol.10, No.2, pp.2-10、1994.4
- 10) 渡辺正朋、滝田貢：屋根雪の滑雪制御に関する基礎的考察、日本雪工学会誌、Vol.13 No.1, pp.3-12、1997.1
- 11) 苫米地司、高倉政寛、伊東敏幸：屋根葺材の表面粗さが滑雪現象に及ぼす影響、日本雪工学会誌、Vol.12 No.3, pp.3-9、1996.7