屋根雪滑落による屋根葺材の摩耗現象に関する研究

ABRASION DAMAGE TO ROOFING MATERIALS DUE
TO SLIDING SNOW

伊東 敏 幸*, 苫米地 司**, 三橋 博 三***

Toshiyuki ITO, Tsukasa TOMABECHI and Hirozo MIHASHI

This paper deals with abrasion damage to roofing materials caused by sliding snow on sloped roofs in a region receiving heavy snow. We tested abrasion of coated metal sheets due to sliding snow. From the test results, it became clear that three factors, namely the ratio of clay dust in roof snow, the snow load, and the snow sliding velocity, exert great influence on the abrasion. We calculated the number of times snow slid off the roof eaves for the purpose of estimating the degree of abrasion after the lapse of a certain number of years. The calculation was based on meteorological data as well as on observations of snow sliding off test roofs. From the facts described above, we obtained an equation for estimating abrasion of roofing materials of sloped roofs.

Keywords: roofing material, snow on roof, abrasion damage, sliding-snow property, mechanism of deterioration

屋根葺材, 屋根雪, 摩耗損傷, 滑雪性状, 劣化機構

1. はじめに

多雪地域においても通年利用が可能な運動施設などの大規模構造物が本格的に建設されるようになり, それらの建築物における屋根上積雪荷重の評価および屋根雪処理方法の確立が望まれている。一般に, 大規模構造物の屋根形状は勾配を持つ場合が多いことから, 屋根雪を滑雪させて処理することが有効となる。1993年に改訂された日本建築学会荷重指針においても, 融雪滑雪などによって屋根上積雪荷重を制御する考え方が取り入れられている¹⁾。この考え方に基づいて大規模構造物の屋根上積雪荷重を滑雪処理によって制御することを考えると, 一定の積雪深以下で規則的に滑雪現象を発生させる必要があり, さらにこの滑雪現象を長期間にわたって維持しなければならない。この滑雪処理の規則性を維持するには, 建築物の経年に伴う屋根葺材の滑雪性能変化を把握しなければならない。その際, 滑雪性能は屋根葺材の表面性状に大きく支配されることから, 材料表面の経年劣化後の性状およびその劣化機構を検討する必要がある。

屋根雪の滑雪処理に関する既往の研究の多くは, 未使用状態の屋根葺材を対象として屋根雪との凍着性状あるいは摩擦性状に対する屋根葺材の表面特性や屋根雪状態の影響を検討している^{2~5)}。しかし, 屋根葺材の経年劣化後における滑雪性状に関する研究^{6~8)}で指摘されているように, 大気暴露後あるいは実際に使用されていた屋根葺材は, 劣化以前と大きく異なる滑雪特性を示す。さらに, 屋根雪を滑落処理する屋根(以下, 落雪屋根という)に用いる塗装鋼板の劣化に関する研究⁹⁾によると, 数年間使用された塗装鋼板表面は, 屋根雪の滑雪による摩耗(以下, 滑雪摩耗という)を受け, 軒先に近い部位ほど塗膜厚が薄くなることを指摘している。落雪屋根に用いる塗装鋼板の塗膜は下地鋼板の防錆機能と共に, 他材料よりも優れた滑雪性^{4, 5)}を維持するという機能を併せ持つものである。従って, 材料表面の塗膜が滑雪摩耗すると, 屋根雪の滑雪性状に大きな影響を及ぼす⁷⁾ことになる。特に, この滑雪摩耗現象は屋根長さの長い大規模構造物の場合に顕著な影響を及ぼすと考えられる。

* 北海道工業大学建築工学科 助手

** 北海道工業大学建築工学科 教授・工博

*** 東北大学工学部建築学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology

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

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

屋根葺材の経年劣化に関しては、大気暴露による一般劣化すなわち紫外線、大気汚染物質および雨水などに対する材料の耐久性に関する研究^{1)~12)}が行われ、劣化要因と劣化機構について検討されている。しかし、これらの研究では滑雪摩耗による材料劣化を検討していない。さらに、各種材料の摩擦および摩耗に関する研究^{13, 14)}においても、雪氷体との摩擦で生じる材料表面の摩耗に関する考察は行われていない。

以上のような背景から、本研究は屋根葺材の滑雪性能を維持するという観点から、その材料劣化に関する基礎資料を得ることを目的とし、塗装鋼板を対象とした滑雪摩耗促進試験を行い、その結果と気象データに基づいて算出した屋根雪の落雪量を用いて滑雪摩耗量の経年変化を推定した。

2. 研究の方法

本研究では、落雪屋根の屋根葺材における滑雪摩耗量の経年変化を推定するため次のことを行った。

- 1) 屋根葺材の滑雪摩耗に及ぼす滑雪時の諸要因の影響を定量的に評価するため、塗装鋼板を対象とした滑雪摩耗促進試験を行った。
- 2) 試験建物を設置し、その屋根における落雪状況の観察から、落雪を引き起こす気象条件について検討した。さらに、この気象条件と過去の気象データとを照合することにより、札幌市などの年間落雪回数を積雪深別に算出した。
- 3) 上記の落雪回数を用いて滑雪摩耗量の経年変化を推定し、実際の建築物で使用されていた塗装鋼板（以下、実使用材という）の塗膜厚と比較した。さらにその結果から、滑雪を受ける屋根葺材の表面劣化機構を考察した。
- 4) 各地域における滑雪摩耗量を推定するために、北海道内各地の落雪回数を算出した。また、各種屋根葺材における滑雪摩耗量を推定するために、材料の落砂摩耗試験を行った。そして、地域性と材料特性を考慮した滑雪摩耗量の推定手法を検討した。

3. 塗装鋼板の滑雪摩耗促進試験

3-1. 実験方法

塗装鋼板を対象とした滑雪摩耗促進試験を次のように行った。滑雪摩耗に及ぼす滑雪時の諸要因は、屋根の滑雪長さ増加に伴う摩耗量変化、滑雪面に介在する砂塵量の影響、滑雪時における屋根雪の速度および荷重の影響が考えられることから、これらの要因を変化させた実験を行った。実験は写真1に示すような滑雪摩耗試験装置を用いて、 -1°C の恒温室内で行った。実験に供した試料は多雪地域の屋根葺材として一般的であり、かつ後述する実使用材と同一材料である塗装溶融亜鉛めっき鋼板

(JIS G 3312)のポリエステル樹脂光沢仕上げとした。塗装鋼板の滑雪摩耗は図1に示すように、試験装置に取り付けた合板に接着した試料上で、雪氷体を回転運動させて行った。実験に用いた雪氷体は屋根雪の下層部を想定し、ざらめ雪に粒径 0.3mm 以下の細骨材を混入させ、砂の含有状態が均一になるように攪拌した後、 5cm 角の立方体に整形して -5°C で凍結させたものを用いた。この雪氷体に用いた雪は自然雪であり、整形後の雪密度は $0.7 \sim 0.8\text{g}/\text{cm}^3$ である。滑雪時の諸要因変化を再現する方法として、滑雪長さは実験時間、砂塵量は雪氷体に含ませる砂の重量比、積雪荷重は雪氷体上に載せる重り重量、滑雪速度は回転軸の回転数を各々変化させて実験した。なお、実験は同一条件で2枚の試料について行った。このような方法で次に示す3通りの実験を行った。

- 1) 滑雪長さの増加に伴う摩耗量変化を評価するため、滑雪する雪氷体の合計長さを 45m 毎に 405m まで変化させた9段階の摩耗実験を行った。この実験では砂塵量を

写真1 滑雪摩耗試験に用いた装置

図1 滑雪摩耗試験の方法

- 5%, 積雪荷重を $4\text{gf}/\text{cm}^2$, 滑雪速度を $17\text{m}/\text{min}$ とした。
- 2) 滑雪摩擦面の砂塵量が及ぼす影響を評価するため, 砂塵量を 0.1, 5, 10% の4段階に変化させた実験を行った。この実験では滑雪速度を $8.5\text{m}/\text{min}$, 積雪荷重を4および $16\text{gf}/\text{cm}^2$, 滑雪長さを 135m とした。
- 3) 滑雪時の積雪荷重および速度が及ぼす影響を評価するため, 積雪荷重を 4, 8, 16, $32\text{gf}/\text{cm}^2$ の4段階とし, 各々において滑雪速度を 8.5, 17.0, 25.5, $34.0\text{m}/\text{min}$ の4段階変化させた実験を行った。この実験では砂塵量を5%, 滑雪長さを 90m とした。

滑雪摩耗試験を行った試料の摩耗量は, 摩耗部分の塗膜厚さを測定して評価した。塗膜厚さの測定は, 図1に示す摩耗部分の2ヶ所から測定用試料(大きさ約 $5 \times 20\text{mm}$)を切除して行った。切除した測定用試料の断面を耐水ペーパーで研磨し, 電子顕微鏡(1000倍)で観察した。観察した断面から約 1cm 間隔の2ヶ所を写真撮影し, 各々のネガフィルムを万能投影機で拡大投影して塗膜部の厚さを $1/1000\text{mm}$ の精度で2点ずつ測定した。このように測定した計8点の塗膜厚さの平均値を摩耗前の塗膜厚さから減じた値を塗膜摩耗厚とした。

3-2. 実験結果および考察

塗装鋼板を対象とした滑雪摩耗促進試験の結果から, 滑雪摩耗量に及ぼす滑雪時諸要因の影響を検討する。滑雪摩耗の進行状況を摩耗試験の滑雪長さすなわち滑雪した雪氷体長さと摩耗厚の関係からみると図2となる。図のように, 両者の関係は金属相互の摩耗現象にみられる傾向¹⁵⁾と同様に直線関係となる。滑雪摩耗を促進すると考えられる屋根葺材と屋根雪の摩擦面に介在する砂塵量の影響を, 雪氷体に含ませた砂塵量と摩耗厚の関係からみると図3となる。図に示す摩耗厚は滑雪した雪氷体の長さを 1m 当たり換算した摩耗厚である。図のように, 砂塵を混入しなかった雪氷体の滑雪においても若干の摩耗が生じ, 砂塵量が1%になると顕著に摩耗が進行する。なお, それ以上の砂塵量における摩耗厚は緩慢な増加傾向となる。次に, 屋根雪の積雪荷重および滑雪速度と摩耗厚の関係をもとに図4となる。図のように, 積雪荷重の増加に伴って摩耗厚が大きくなる傾向にあり, その傾向は滑雪速度の増加に伴って顕著となる。

以上の結果から屋根雪の滑雪時に関わる諸要因と滑雪摩耗量の関係について検討すると次のことが言える。滑雪実験長さとも摩耗厚が比例関係にあることから, 屋根の軒先部における屋根葺材の摩耗量は, 屋根の滑雪方向の長さおよび屋根雪の落雪回数に比例して増加する。屋根面上に存在する砂塵量, および屋根上積雪深に依存する積雪荷重は摩耗量に大きく影響する。屋根葺材の摩擦係数および屋根勾配に依存する滑雪速度は摩耗量に影響す

図2 滑雪実験長さとも摩耗厚の関係

図3 雪氷体中の砂塵量とも摩耗厚の関係

図4 積雪荷重とも摩耗厚の関係

表1 滑雪摩耗要因間の相関

要因	砂塵量	積雪荷重	滑雪速度	摩耗厚
砂塵量	1.000	0.172	0.441	0.786
積雪荷重	-	1.000	0.134	0.601
滑雪速度	-	-	1.000	0.592

るが、積雪荷重が小さい場合には影響が少ない。

次に、ここで得られた実験値を用いて、滑雪摩耗量に影響する3つの要因から塗膜の摩耗厚を推定する式を導くと次のようになる。3つの要因を独立変数とし、塗膜の摩耗厚を従属変数として重回帰分析を行うと次の実験式($r=0.95$)が得られる。なお、ここで用いた変数間の相関は表1に示すように、独立変数間の内部相関は低く、従属変数との相関係数は約0.6~0.8である。

$$A_1 = (4.161 \cdot S + 0.580 \cdot W + 0.340 \cdot V - 0.707) \times 10^{-3} \dots (1)$$

ここで、 A_1 :滑雪長さ1m当たりの摩耗厚(μm)、 S :雪氷体に含まれる砂塵量(%), W :積雪荷重(gf/cm^2), V :滑雪速度(m/min)を表す。

4. 屋根雪の滑雪摩耗作用の評価

前述したように、塗装鋼板の塗膜は滑雪面の砂塵量、積雪荷重および滑雪速度に影響され、滑雪長さに比例して摩耗量が増加する。このことから、屋根葺材の滑雪摩耗量の経年変化を推定するには、各地域における屋根雪の年間落雪回数を積雪深別に求める必要がある。

4-1. 屋根雪落雪時の気象観測

1) 観測方法

滑雪摩耗量の経年変化推定に用いる積雪深別の年間落雪回数は次のように算出した。落雪時の気象条件を定めるため、図5に示すような小屋有りおよび小屋無しの試験体を地上約8mの屋上に設置し、降雪期の屋根雪状態をビデオ撮影すると共に、試験体近傍の気象要素および屋根部温度を観測した。小屋有り試験体は実際の小屋裏環境を再現するため、約28℃の室内暖気を小屋裏に供給できるようにしている。すなわち、設置した小屋有り試験体は天井断熱および小屋裏換気が不十分の建物を想定し、小屋無し試験体はそれらが優れる建物を想定している。また、試験体の屋根は最も積雪量が多くなる¹⁶⁾ 勾配(0.4)とし、その勾配において比較的容易に落雪するように、光沢仕上げの塗装鋼板を一文字葺で葺いた¹⁷⁾。観測した気象要素は毎正時における温度、湿度、風速、日射量および日照時間とした。観測期間は降雪量が平年値よりも多かった1994年の1~2月である。このような試験体における屋根雪状態と気象要素の観測結果から、落雪時の気象条件を定めた。

2) 観測結果

筆者らの研究⁵⁾によると、屋根雪の落雪は屋根雪の凍着要因すなわち屋根面温度に支配され、屋根面温度は外気温、風および日射などの気象要素に依存する。このことから、落雪観察用の試験体における落雪状況と屋根面温度に影響する気象要素値を示すと表2になる。表に示

図5 落雪観察用の試験体

表2 屋根上積雪があった日の落雪状況

日付	最高気温(℃)	最低気温(℃)	最大風速(m/s)	日照時間(h)	○:落雪, ●:堆積 小屋有 屋根	○:落雪, ●:堆積 小屋無 屋根
1/19	-5.7	-10.7	3.8	4.3	●	●
2/ 3	-4.4	-8.9	4.1	0.6	●	●
2/ 4	-4.3	-9.9	4.6	1.5	●	●
1/18	-3.9	-10.2	3.3	2.7	●	●
1/12	-3.8	-7.4	2.2	4.0	○	●
1/14	-3.1	-17.3	1.8	4.0	○	●
1/ 7	-2.7	-11.8	7.6	0.0	●	●
2/10	-2.5	-6.5	5.1*	4.9	○	●
2/13	-2.4	-8.6	6.8	3.8	●	●
2/14	-2.0	-4.9	7.4	5.0	●	●
2/ 2	-1.4	-5.7	6.4	1.5	●	●
2/11	-1.3	-6.8	5.0	3.5	●	●
1/20	-1.1	-9.5	4.2	4.7	●	●
1/ 8	-0.3	-7.5	2.6	4.6	○	○
1/26	-0.3	-6.7	2.3	5.1	○	○
1/13	-0.2	-11.8	2.2	5.3	○	○
1/15	-0.2	-6.3	4.7	3.8	●	●
2/12	0.1	-7.0	2.9	5.1	○	○
1/31	0.7	-15.7	3.2	5.1	○	○
1/17	1.1*	-5.2	2.6	0.0	●	●
2/ 8	1.3	-8.5	6.7	6.0	○	○
1/16	1.9	-5.0	3.4	4.9	○	○
1/21	2.3	-11.8	1.8	3.4	○	○
2/17	2.3	-3.3	4.8	4.6	○	○
2/15	2.6	-3.8	5.5	6.0	○	○
2/ 5	4.1	-4.5	3.4	5.5	○	○
1/ 3	4.1	-2.0	3.5	2.9	○	○
2/18	4.4	-3.9	4.4	7.0	○	○

*1 この最大風速は21:00の観測値。日中の最大風速は3.3m/s。
*2 この最高気温は1:00の観測値。日中の最高気温は-2.0℃。

図6 気温と風速からみた落雪状況

す気温は毎正時に観測した温度の日最高および日最低を示し、最大風速は毎正時の10分間平均風速の日最大を示し、日照時間は毎正時に観測した値の日合計を示している。表のように、観測日の朝、試験体上に積雪があった日における落雪状況は最高気温に大きく影響される。落雪発生に大きく影響する最高気温と最大風速の関係から落雪状況をみると図6となる。図のように、最高気温、最大風速および日照時間でみると、落雪しない堆積領域、小屋有りの場合に落雪する領域および小屋無しでも落雪する領域の3領域に分類できる。また、小屋有りに限り落雪する場合には一定時間以上の日照が確認出来る。従って、ここに示した3つの気象要素を用いて落雪時の気象条件を定めることが可能と考える。なお、表2に示した*1および*2のような例外日もあるが、その割合は観測期間中の10%以下であったことから、例外日が落雪回数に及ぼす影響は小さいと考える。

4-2. 年間落雪回数の算出

1) 落雪時の屋根上積雪深の推定方法

年間落雪回数の算出に用いた落雪時の屋根上積雪深は次のように求めた。日本建築学会の荷重指針によると、屋根上積雪深は、屋根勾配および月平均風速から求められる屋根形状係数に地上積雪深を乗じて推定することが出来る¹⁶⁾。このことを基に、落雪観察用の試験体と同じ屋根勾配における屋根形状係数を求め、図7に示す方法によって落雪時の屋根上積雪深を推定した。図のように、屋根上積雪深は地上積雪深の前日との差である降雪深を累積した値に、月平均風速に基づく係数を乗じて求めている。なお、地上積雪深は雪の沈降や融雪によって前日より減少する場合もあるが、ここで求めた屋根上積雪深は地上積雪深にみられる減少を考慮しないで、前日と同じ屋根上積雪深をそのまま用いた。その理由は、屋根上の積雪深さ範囲で生じる沈降量は微量であり、さらに落雪しない気象条件下での屋根雪融雪量も微量と考えられるからである。以上のように、落雪時の屋根上積雪深を推定し、積雪深別の落雪回数を算出した。なお、落雪時の屋根上積雪深が3cm未満の場合は積雪荷重が小さいために滑雪し難く、落雪する条件下では融雪などにより消雪することが多いので落雪回数に算入しないことにした。

2) 落雪回数の算出方法およびその結果

各地域における年間落雪回数を算出するために用いた過去の気象データは、北海道内で積雪状況が異なる気象官署における1981～1990年の10年間の気象月表および地域気象観測積雪月原簿とした¹⁸⁾。気象月表に日毎に記載されている気象要素は最高気温、最低気温、平均気温、降水量、日照時間、最大風速とその風向および最深積雪深である。なおここで、最深積雪深に限っては9、15、21

時の何れかに観測された不規則な観測値であることから、落雪回数の算出に適さない。一般に、落雪現象は昼間に発生することが多いことから、落雪回数の算出には朝方に観測された積雪深が適すると考える。従って、積雪量に関しては地域気象観測積雪月原簿に記載されている毎日朝9時に観測される積雪の深さをを用いた。

次に、これらの気象データから各地域の落雪回数を求めるため、前述した落雪観察における気象条件を基に、落雪回数が多い小屋有り試験体における落雪時の気象条件を3つの気象要素から定めると図8となる。図のように、落雪に対する気象要素の第一条件は最高気温、第二条件は最大風速、そして第三条件を日照時間とすることによって屋根雪の落雪を判定出来る。なお、この条件に用いた気象要素値は、気象官署の気象表に記載されている値と同様に求めている。

以上のようにして定められた落雪時の気象条件と過去の気象データとを照合することによって、札幌における

図7 落雪時の屋根上積雪深の計算方法

図8 落雪回数の算出に用いた落雪時の気象条件

年間落雪回数を屋根上積雪深別に算出すると表3になる。

5. 屋根葺材の滑雪摩耗量の経年変化の推定

5-1. 滑雪摩耗促進試験に基づく塗装鋼板の摩耗量推定および実使用屋根葺材の経年摩耗量との比較

1) 実使用屋根葺材の概要

実使用材は札幌市内で増改築を予定している住宅の勾配屋根から採取した塗装鋼板であり、表4に示すように、経過年数や屋根勾配の異なるものである。これらの実使用材は滑雪摩耗の促進実験に供した材料と同じ塗装鋼板であり、1991年に収集したものである。実使用材の塗膜の摩耗量は、前述の滑雪摩耗試験における塗膜厚さ測定と同様の方法で測定している。なお、これらの実使用材の詳細については別報⁹⁾を参照されたい。

2) 滑雪摩耗量の経年変化推定

過去の気象データから算出した落雪回数を用いて屋根用塗装鋼板を対象とした滑雪摩耗量の経年変化を推定する。滑雪摩耗量の推定は先に示した式(1)を用い、滑雪摩耗に関わる要因である滑雪長さ、砂塵量、積雪荷重および滑雪速度の代入値は次の通りとする。滑雪長さに対しては屋根長さを10mおよび20mと想定し、屋根上積雪深別の年間落雪回数を乗じて年間の滑雪摩耗厚を求める。砂塵量は、札幌市の住宅地で実測した落雪後の屋根雪における含有砂塵量である0.1%とし、積雪荷重は積雪密度を $0.2\text{g}/\text{cm}^3$ として求めた値を用いる。また、滑雪速度は積雪荷重が小さい場合に摩耗量への影響が小さいことから、実使用材とほぼ同様の屋根の滑雪実験から得られた平均速度である $6.16\text{m}/\text{min}$ を一律に代入した¹⁹⁾。このような条件で塗装鋼板の摩耗を推定すると図9となる。図は塗膜厚を $20\mu\text{m}$ として求めた塗膜厚さ比の経年変化を20年経過まで示している。また、図中には実使用材における塗膜厚さ比を併せて示す。次に、この図から屋根葺材の劣化機構について検討する。

3) 滑雪摩耗を受ける屋根葺材の劣化機構

落雪屋根に用いる屋根葺材の劣化は、一般外装材が受ける大気暴露が及ぼす要因の他に、屋根雪の滑雪が及ぼす要因があることから、その劣化機構も一般外装材と異なる。ここで、滑雪摩耗を受ける屋根葺材の劣化機構を先に示した図を用いて検討すると以下ようになる。図9に示したように、実使用材の塗膜厚さ比は屋根長さ10mの推定値に近い値となる。実使用材は採取部位から棟までの長さが4~7mであることから、ここに示した推定値の約2倍の塗膜厚減少が生じていることになる。このことに関する他の高分子材料における実験報告²⁰⁾がある。それによると、札幌市で5年間暴露した材料の表層部の摩耗量を暴露前と比較すると、ポリアセタールで約3倍、ABSでは約4倍になる。すなわち、高分子材料の塗膜表層部における耐摩耗性は暴露後に著しく減少す

る。この塗膜厚さ比の差異は次のような劣化現象によって生じていると考えられる。実使用材は数年間、屋根葺材として使用されてきたので、主に夏場の影響が大きい大気暴露による塗膜劣化と、降雪期に生ずる滑雪摩耗による塗膜劣化を受けている。すなわち、夏場の紫外線劣化などで脆弱化した塗膜上を、降雪期に屋根雪が滑雪するといった複合劣化現象が年サイクルで繰り返されている。このような滑雪摩耗現象の発生要因を推察すると次のようになる。一般に、屋根雪の温度範囲における氷の

表3 気象データから算出した札幌の年間落雪回数

屋根上積雪深 (cm)	落雪回数 (回/年)	年間摩耗厚* ($\mu\text{m}/\text{年}$)
3~5	5.2	0.118
5~10	4.2	0.115
10~15	3.2	0.106
15~20	1.6	0.062
20~25	0.9	0.040
24~30	0.2	0.010
30~35	0.2	0.011
35~40	0.4	0.025
40~45	0.2	0.014
45~50	0.2	0.015
年合計	16.3	0.516

*屋根長さを10mに想定して算出した。

表4 実際に使用されていた塗装鋼板の概要

試料 No.	経過 年数	勾配 (deg.)	屋根長さ (m)*1
a	5	23	7
b	8	20	4
c	9	11	6
d	13	10	5
e	18	15	6
f	18	45	11

*1:採取部位から棟までの長さ。

図9 塗膜厚さの経年変化

強度（微細な凸部のせん断強度や摩擦面の掘り起こし強度のこと）は、塗膜の強度よりも小さいため、砂塵が介在しない状態の滑雪で塗膜が摩耗することは少ない⁴⁾。しかし、実際の建築物屋根面にみられる微細な砂塵は塗膜よりも高い強度を持つ物質であり、この砂塵が滑雪時に研削材として作用すると塗膜が摩耗する。さらに、紫外線などによって樹脂分解過程にある塗膜表面層部は、その強度が著しく低下していることから、砂塵が介在しない滑雪によっても容易に摩耗する。また、経年に伴う塗膜劣化で表面凹凸が著しくなると⁹⁾、飛来する砂塵が屋根面に保持され易くなることから、滑雪界面の砂塵量が劣化以前よりも増加すると考えられる。以上のように、屋根葺材の劣化機構には一般外装材が受ける劣化要因と屋根雪が及ぼす劣化要因が複合して作用する。このことが影響して、未使用材料の推定塗膜厚さよりも実使用材の塗膜厚さが薄くなると考えられる。

5-2. 地域性および材料特性を考慮した屋根葺材の滑雪摩耗量の推定

1) 落砂摩耗試験の方法

塗装鋼板と他の屋根葺材との機械的な摩耗状況を比較し、その結果から滑雪摩耗量を推定するため、各種屋根葺材を対象とした落砂摩耗試験を行った。実験に供した試料は表5に示す7種類の材料で、その大きさは5cm角とした。落砂摩耗試験はJIS A 1452に基づく試験装置を用いて行い、JIS R 6111に規定される「炭化けい素研削材2C, 粒度#36」を研削材とし、その落下量を毎分200±10gとした。各試料の摩耗量は、実験前と120分経過後の試料重量を1/1000gの精度で測定し、次式によって求めた摩耗厚(T_s)で評価した。

$$T_s = (W_0 - W_1) / (D \cdot A) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 W_0 :実験前の試料重量、 W_1 :実験後の試料重量、 D :摩耗部の材料比重、 A :摩耗面積を表す。各材料の摩耗厚は3回行った実験結果の平均値とした。

2) 北海道内における各種屋根葺材の滑雪摩耗量の推定

塗装鋼板を対象とした札幌における滑雪摩耗量の経年変化から、屋根葺材の劣化機構を明らかにした。それらの劣化機構を基に、地域性および材料特性を考慮して、落雪屋根に用いる屋根葺材の軒先部における摩耗厚(A_y)の経年変化を求めると、次式のように表すことが出来る。

$$A_y = A_s \cdot \mu_u \cdot C_m \cdot C_r \cdot L_f \cdot y \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 A_s :基準摩耗厚、 μ_u :紫外線劣化などによる材料表面の脆弱度を示す係数（材料の耐水性および地域の気候によって決まる）、 C_m :各材料の摩耗抵抗度を表す材料係数、 C_r :各地域の落雪状況を示す地域係数、

L_f :屋根の滑雪方向の長さ、 y :経過年数を表す。

この推定方法を用いて、北海道内各地における滑雪摩耗量、あるいは各種屋根葺材における滑雪摩耗量の経年変化を推定すると以下ようになる。なお、ここでは式(3)の μ_u すなわち紫外線劣化などによる材料表面の脆弱度を示す係数は考慮しないものとする。北海道内において積雪状況が異なる幾つかの地域における滑雪摩耗量を札幌市同様に求めた落雪回数から推定し、札幌を基準とした地域係数を求めて式(3)の C_r に代入して、各地域における塗装鋼板の塗膜厚さ比を経年推定すると図10となる。各地域の摩耗量から得られた落雪状況を示す地域

表5 落砂試験に供した試料の概要

試料分類	試料No.	試料概要	
		材料名	厚さ(mm)
塗装鋼板	C1	ポリエステル樹脂塗装亜鉛めっき鋼板	塗膜 0.02 材厚 0.40
高分子材	P1	アクリル板	0.50
	P2	膜材(A種)	0.73
金属材	M1	亜鉛板	0.43
	M2	ステンレス板	0.49
	M3	アルミニウム板	0.30
ガラス	G1	フロートガラス	2.71

表6 落砂試験による摩耗厚さ

試料No.	摩耗厚さ(μm)	摩耗係数
C1	22.8	1.00
P1	33.2	1.45
P2	14.1	0.62
M1	8.4	0.37
M2	1.6	0.07
M3	8.4	0.37
G1	59.5	2.61

図10 北海道内における塗膜厚さの経年変化推定

図11 各種屋根葺材における塗膜厚さの経年変化推定

係数は図中に示す値である。図のように、降雪量の異なる地域における滑雪摩耗量の経年変化の差異をみることが出来る。

次に、各種屋根葺材における滑雪摩耗量を推定する。各種屋根葺材の摩耗抵抗度は落砂試験の結果を係数化して用いた。落砂実験の結果は表6に示す通りである。表に示す塗装鋼板(試料C1)の摩耗厚を基に係数化した摩耗抵抗度を示す材料係数を、式(3)の C_m に代入して滑雪摩耗量の経年変化を推定すると図11となる。図のように、金属材(試料M1, M2, M3)は塗装鋼板(試料C1)よりも摩耗が少ないのに対し、ガラス(試料G1)は摩耗量が多くなる。また、膜材(試料P2)およびアクリル(試料P1)では塗装鋼板と近似した摩耗量となる。

以上のような推定方法によって得られる滑雪摩耗量は、多雪地域の落雪屋根に用いる屋根葺材の耐久性を検討する上で有効な指標になると考えられる。ここでは、紫外線劣化に伴う材料表面の脆弱化を示す係数を定量化できないが、その係数が及ぼす影響は実使用材で確認されたように極めて重要である。従って、さらに正確な滑雪摩耗量の経年推定を行うには、その係数を明らかにして行く必要がある。

6. まとめ

屋根葺材の滑雪性能に影響する材料表面劣化の一要因である滑雪摩耗現象について検討した。その結果をまとめると次のようになる。

- 1) 塗装鋼板を対象にした滑雪摩耗試験を行った結果、滑雪摩耗量は屋根長さおよび滑雪回数に比例し、さらに滑雪時における滑雪界面の砂塵量、積雪荷重および滑雪速度の影響を受けることが判った。
- 2) 屋根雪の落雪観測実験から得られた落雪時の気象条件と過去の気象データとを照合して算出した積雪深別の年間落雪回数を求めた。また、この落雪回数を用いて滑雪摩耗量の経年変化を推定する手法を示した。

3) 実際に使用されていた塗装鋼板の経年劣化と摩耗量の推定値から落雪屋根に用いる屋根葺材の劣化機構を考察した。その結果、落雪屋根の劣化機構には、夏場に多い紫外線、並びに降雪期に生じる滑雪摩耗による複合劣化作用が大きく影響していることが判った。

4) 各地域の落雪状況および各種屋根葺材の摩耗抵抗度を係数化して、落雪屋根の屋根葺材に生じる表面摩耗量を推定する手法を提示した。

以上のことから、屋根雪を滑雪処理する建築物における屋根葺材は、紫外線等による材料表面劣化に伴う耐摩耗性の変化を十分に考慮したうえで、屋根雪滑雪による摩耗特性を評価することが重要と考えられる。さらに、滑雪による摩耗劣化を考慮して屋根葺材の耐久計画を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会 編：建築物荷重指針・同解説, pp. 197-200, 1993
- 2) 前田博司：金属屋根における積雪の滑落, 雪氷, 41巻3号, pp. 39-44, 1979. 9
- 3) 上野 学, 高島和希, 高村久雄, 福本博光：雪氷に対する屋根鋼板の特性評価, 雪氷, 49巻3号, pp. 131-137, 1987. 9
- 4) 渡辺正朋：屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究, 学位論文(東北大学), 1990. 6
- 5) 伊東敏幸, 苔米地司, 三橋博三：屋根葺材と屋根雪の凍着性状に関する研究(材料特性と気象要素に基づく凍着過程と凍着強度) 日本建築学会構造系論文集, 第470号, pp. 43-51, 1995. 4
- 6) 対馬勝年：屋根材の摩擦に及ぼすウェザー効果, 昭和58年度日本雪氷学会秋期大会講演予稿集, p. 143, 1983
- 7) 伊東敏幸, 苔米地司, 星野政幸：劣化した屋根用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
- 8) 伊東敏幸, 苔米地司, 星野政幸：劣化した屋根葺材と屋根雪との凍着性状について, 第9回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 123-126, 1993. 1
- 9) 伊東敏幸, 苔米地司, 星野政幸：積雪地域における屋根用塗装鋼板の表面劣化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第444号, pp. 7-12, 1993. 2
- 10) 竹島鋭機, ほか3名：塗装鋼板の耐久性寿命予測法に関する研究(第1報) ポリエステル樹脂系塗装鋼板の耐久寿命の予測, 色材, 55巻10号, pp. 715-729, 1982. 10
- 11) 古谷昭夫：塗膜の耐候性, 防食技術, 33巻1号, pp. 37-46, 1984. 1
- 12) 建材試験センター：建築材料等の耐久性に関する標準化のための調査研究報告書, pp. 34-42, 1985. 3
- 13) F. P. Bowden and D. Tabor: The Friction and Lubrication of solids, Oxford, pp. 146-168, 1964
- 14) Peter J. Blau et al.: Friction, Lubrication, and Wear technology, ASM International, pp. 175-235, 1992
- 15) 曾田範宗 訳：固体の摩擦と潤滑, 丸善, p. 271-283, 1992. 4
- 16) 日本建築学会 編：建築物荷重指針・同解説, p. 207, 1993
- 17) 伊東敏幸, 苔米地司, 星野政幸：屋根雪滑雪に及ぼす屋根葺工法の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 67, pp. 17-20, 1994. 3
- 18) 札幌管区気象台：北海道気象月報, 1980年4月～1990年12月
- 19) 伊東敏幸, 苔米地司, 星野政幸：金属板屋根の葺工法からみた滑雪速度特性, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 68, pp. 5-8, 1995. 3
- 20) 日本規格協会 編：非金属材料データブック, pp. 24-29, 1985. 9

(1995年5月10日原稿受理, 1995年8月3日採用決定)