

【研究論文】

【平成29年度～令和元年度 県単研究】

## 機能的コーティング材料の開発

今野 奈穂, 加藤 景輔\*, 四戸 大希, 佐藤 勲征

材料開発・分析技術部

(\*現 保健環境センター)

国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センターとの共同研究により、山形県新庄市と新潟県長岡市で曝露試験を行った結果、雪質の異なる両市ともに、設置後5年経過してもワックス添加塗料を塗装した4寸勾配パネルが対照塗料(一液シリコン塗料)より先行して滑雪する現象が観測された。

そこで夜間低温時及び日照に伴う気温上昇時の2種の環境下の滑雪現象に着目し、人工降雪装置を用いた低温実験を行った結果、夜間零下を模した室温-5℃下では雪抵抗計測によって、日照による気温上昇を模した室温上昇時には、自然落雪に要する時間の差によって滑雪性能を評価できることを確認した。

キーワード: ワックス, 滑雪塗料, 滑雪抵抗, 人工降雪装置, 曝露試験

### 1 緒言

輸送機器, 半導体, 土木・建築など各産業界において、様々な表面機能的を持つコーティング材料の開発が求められている。その中で筆者らは、地域企業とともにワックス成分を酸化重合型樹脂に添加した常温硬化型一液滑雪塗料(以下「ワックス添加塗料」という。)を開発した。この塗料は、塗膜形成時にワックス成分が表面に浮き出し、撥水と水滑り性、低摩擦化を発現する。この表面機能により、雪の付着し難さや付着しても非常に小さい力で滑り落ちる効果が得られており、除雪車の除雪機構部のメンテナンス塗料として利用されている。この塗料の塗装により、除雪機構部に雪が付着しにくくなり、また付着しても振動や軽い力で雪が滑り落ちる効果を示す。その結果、除雪作業者の労力軽減や除雪作業の効率化に貢献している。

この機能を屋根用塗料に応用することで、雪下ろし作業を軽減することが期待されるため、筆者らは地域企業とともに屋根用のワックス添加塗料の開発に取り組んでいる。これまで国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センター(以下「雪氷防災研究センター」という。)との人工降雪装置を用いた低温実験や曝露試験により、ワックス添加塗料の滑雪機能の現象把握を行っており、一定の成果を得ている<sup>1)</sup>。

本研究は、平成29年度から平成31(令和元)年度まで継続してワックス添加塗料の滑雪機能の発現機構(どのような条件で雪が滑り落ちるか)を明確にするための実験を実施した。過年度の報告については、それぞれ短報<sup>2) 3)</sup>として報告したので、ここでは令和元年度の実

施内容を中心に報告する。

### 2 実験方法

#### 2.1 曝露試験

平成27年12月より、雪氷防災研究センター構内にて曝露試験を実施し、気象・積雪条件によるワックス添加塗料の機能発現機構の解明に資するデータの蓄積を開始している<sup>1)</sup>。雪質の異なる新庄市、長岡市に、各種塗料を塗布した屋根パネルを設置し、各年12月から翌年3月まで滑雪の状況をビデオ撮影により観測した。新庄市における曝露試験状況及び実験概要を図1及び表1に、長岡市における曝露試験状況及び実験概要を図2及び表2に示す。

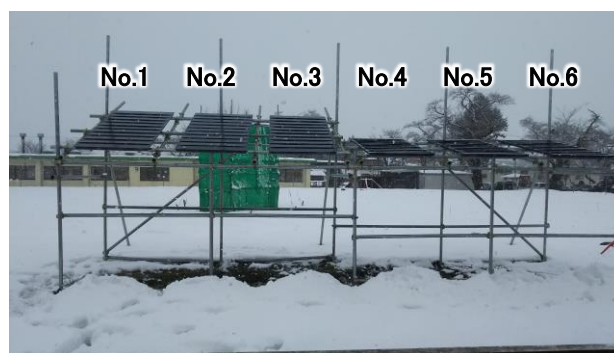


図1 曝露試験状況(新庄市)

表1 曝露試験概要(新庄市)

No.	塗料種類	勾配	設置年月
1	二液フッ素塗料	4寸	平成27年12月
2	一液シリコン塗料		
3	ワックス添加塗料		
4	二液フッ素塗料	2寸	
5	一液シリコン塗料		
6	ワックス添加塗料		

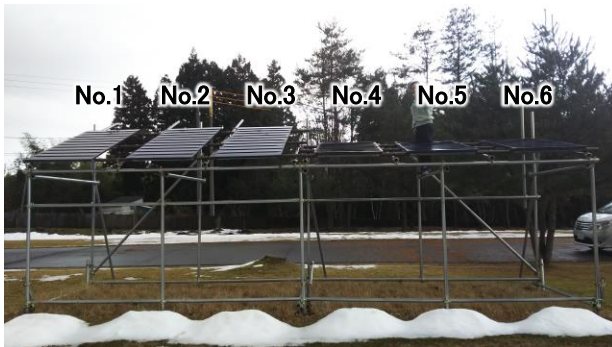


図2 曝露試験概要(長岡市)

表2 曝露実験概要(長岡市)

No.	塗料種類	勾配	設置年月
1	新配合ワックス添加塗料※1	4寸	平成30年1月※2
2	一液シリコン塗料(対照塗料)		平成27年12月
3	ワックス添加塗料		
4	新配合ワックス添加塗料※1	2寸	平成30年1月※2
5	一液シリコン塗料		平成27年12月
6	ワックス添加塗料		

※1 ワックス添加塗料を改良し、速乾性を高めた塗料。

※2 平成29年5月までは、二液フッ素塗料を設置。

## 2.2 室内試験の実験方法

曝露試験で観測された滑雪現象のメカニズムを検証するため、雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の雪氷防災実験棟において、人工降雪装置を用いた実験を行った。本実験では球形状の雪を使用した。

実験は既報に従い、屋根パネルから落雪する積雪重量の計測と滑雪の仕方を動画にて観測することで滑雪挙動を調査した。各屋根パネル上端の表面にシート型熱電対を貼り付け、屋根パネル表面及び降雪時は屋根パネルと積雪の界面の温度を記録した。

調査した塗料と実験条件を表3に示した。降雪モードの実験は、-5℃で雪が降り続けた場合の滑雪挙動を調べたもので、屋外曝露試験における夜間など氷点下での積雪し滑雪する環境を想定した。また、降雪→融雪モードの実験は、室温を-5℃から+2℃に変化させ、屋根パネルが0℃を超えた場合、すなわち屋根パネルと積雪面の間に水が存在した場合の落雪挙動を調べたもので、屋外曝露試験における夜間等の氷点下での積雪が翌日の気温上昇に伴い滑雪する環境を想定した。

なお、実験に用いた屋根パネルの水接触角及び摩擦係数を表4及び表5に示す。水接触角は、株式会社エキシマ製 Smart Contact Mobileにより測定し、各パネル10点計測した平均値で評価した。摩擦係数は、図3に示す装置により、各屋根パネルの上部及び下部それぞれ5箇所の摩擦力を計測した。静摩擦力( $F_s$ )は最初に得られた最大荷重とし、動摩擦力( $F_D$ )は静摩擦力のピークを無視し、接触面間の相対ずれ運動を開始した後の最初の5cmまでの平均値とし、次式から各摩擦係数を求め、その平均値で評価した。ただし、 $F_p$ は滑り片の質量によって生じる法線力(1.96N)である。

$$\text{静摩擦係数 } \mu_s = \frac{F_s}{F_p}$$

$$\text{動摩擦係数 } \mu_D = \frac{F_D}{F_p}$$

表3 室内実験に用いた塗料と実験条件

塗料種類	実験条件		
	モード	屋根勾配	温度変化
ワックス添加塗料	降雪	4寸	-5℃一定
		6寸	
ワックス添加塗料	降雪 →融解	2寸	-5℃ →+2℃
		4寸	-5℃一定
一液シリコン塗料	降雪	6寸	
		降雪 →融解	2寸

表4 室内実験に用いた屋根パネルの水接触角

	水接触角 [deg.]
ワックス添加塗料	80.81
一液シリコン塗料	79.93

表5 屋根パネルの摩擦係数

	静摩擦係数		動摩擦係数	
	上部	下部	上部	下部
ワックス添加塗料	0.333	0.353	0.255	0.263
一液シリコン塗料	0.379	0.450	0.291	0.385

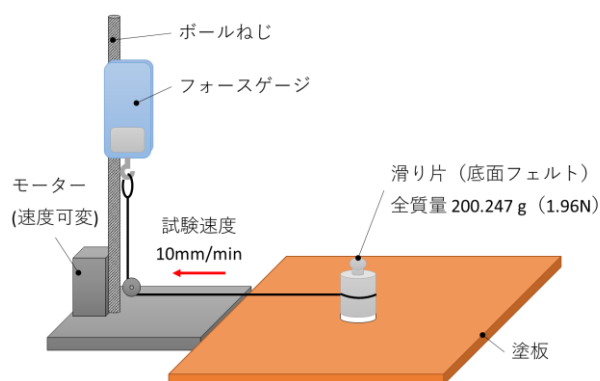


図3 屋根パネルの摩擦力測定装置概要

### 3 実験結果及び考察

#### 3.1 曝露試験の結果

図4及び図5より、雪質の異なる新庄市・長岡市ともに、設置後5年経過しても、ワックス添加塗料を塗装したパネルが先行して滑雪した。

ワックス添加塗料が対照とした一液シリコン塗料に先行して滑雪する現象は、夜間の低温下にも、日照に伴い気温が上昇していく場合にも確認された。夜間、気温が低温下で屋根パネルに積雪した場合、屋根パネルと積雪の間には融雪水の発生はないと考えられる。

一方、夜間、低温下で屋根パネルに積雪した雪が、翌朝の日照による気温上昇とともに滑り落ちる場合は、屋根パネルと積雪の界面には、融雪水が介在すると考えられる。ワックス添加塗料は、一液シリコン塗料に比べ、雪と塗面の界面に融雪水がある場合でも、融雪水の無い場合でも滑雪機能を優位に発現すると考えられる。

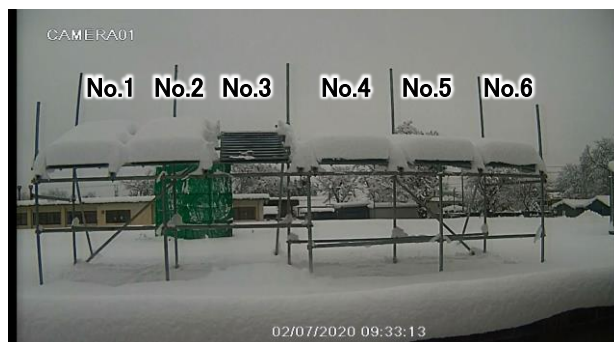


図4 曝露試験(新庄市:2020年2月7日)



図5 曝露試験(長岡市:2020年2月18日)

特に、本開発塗料の屋根雪対策への有用性を示す興味深い観測例を紹介する。これは、新庄市における曝露試験結果である。2020年2月6日の昼間から降り出した雪が、夜間のうちに積雪した(図6)。2寸勾配のNo4～No.6のパネルに着目すると、ワックス添加塗料を塗布したNo.6のパネルは、2020年2月7日の15時台に積雪が滑り落ちたが、No.4及びNo.5のパネルは積雪が軒先側(写真では手前側)にずり落ちて庇状の雪(以下「巻き垂れ」という。)が形成されるが落雪せず(図7)、これらの巻き垂れが完全に消失するには、2月9日の12時台まで、3日ほど要した(図8及び図9)。このことは、ワックス添加塗料が他の塗料に比べ、雪下ろし作業を行う頻度を大幅に軽減できる可能性を示す。



図6 積雪後の状況  
(2020年2月7日9時40分)



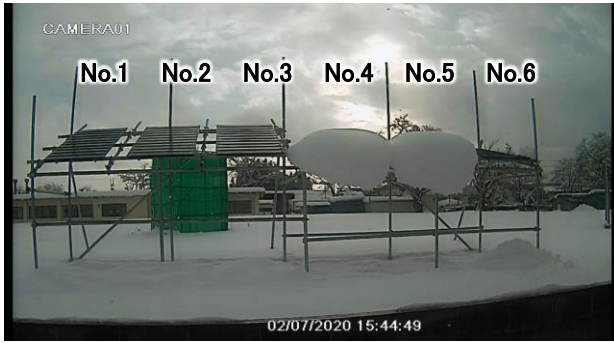


図 7 巻き垂れの形成  
(2020年2月7日15時44分)

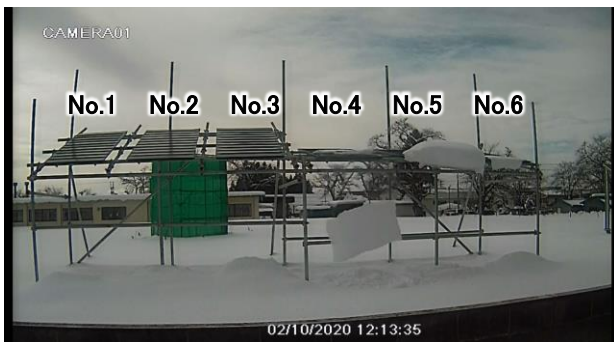


図 8 No.4 巻き垂れ落雪  
(2020年2月10日12時13分)

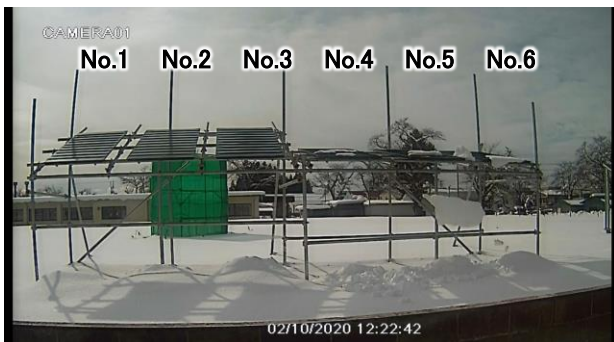


図 9 No.5 巻き垂れ落雪  
(2020年2月10日12時22分)

### 3.2 室内試験の結果

#### 3.2.1 降雪モードの実験結果

ワックス添加塗料と一液シリコン塗料の屋根パネルを4寸勾配の架台に設置し、室温-5℃下で降雪装置により積雪させたが、試験時間内には自然な落雪は生じなかったため、フォースゲージを用いて滑雪抵抗値を計測した。4寸勾配での試験の様子及び結果を図10～図13及び表に示す。

なお、降雪装置からの水垂れにより明らかに屋根パネルと積雪が凍着した部位が生じた場合は、凍着部を除外した立方体形状に積雪を切り出して計測した。

積雪面積や重量に差があり、単純に比較はできないが、ワックス添加塗料の滑雪抵抗が低い傾向が確認できた。これは、屋外曝露試験において、氷点下で降雪・積雪した際に、一液シリコン塗料より早くワックス添加塗料が落雪する傾向がみられることと一致する。

表 6 4寸勾配の滑雪抵抗値等測定結果

	ワックス 添加塗料	一液シリコン 塗料
最大積雪量	107.6 kg	110.4 kg
凍着有無	無	無
滑雪抵抗計測時の積雪の重量及び重屋根パネルとの接触面積	107.6 kg 98cm x 180cm	64.4 kg 47cm x 180cm
滑雪抵抗値	0.34 kN	0.36 kN



図 10 最大積雪時のワックス添加塗料(奥)と一液シリコン塗料(手前)



図 11 滑雪抵抗計測後のワックス添加塗料パネル表面(奥)



図 12 一液シリコン塗料の凍着部を除外して切り出した積雪(手前)



図 14  $-5^{\circ}\text{C}$ 下最大積雪量のワックス添加塗料パネル(手前)及び一液シリコン塗料パネル(奥)



図 13 滑雪抵抗計測後の一液シリコン塗料パネル表面(手前)

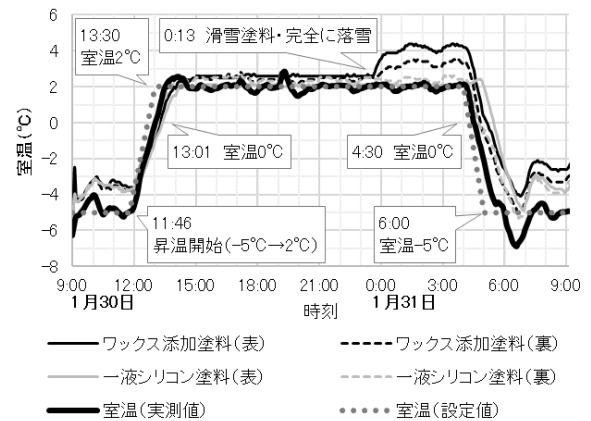


図 15 室温及び屋根パネルの温度推移

### 3.2.2 降雪から融雪モードへの移行実験結果

ワックス添加塗料と一液シリコン塗料の屋根パネルを2寸勾配の架台に設置し、室温 $-5^{\circ}\text{C}$ 下でワックス添加塗料7.1kg、一液シリコン塗料6.3kgまで人工降雪装置により積雪させた。さらに、人工降雪装置で作成した雪を篩いでふりながら屋根パネル全体が均等な積雪深となるように載せ、ワックス添加塗料及び一液シリコン塗料ともに21.4kgまで積雪量を増加させた(図14)。その後、降雪を停止し、徐々に室温を $+2^{\circ}\text{C}$ まで上昇させ、 $+2^{\circ}\text{C}$ で15時間保持し、滑雪挙動を観察した。図15に室温及び屋根パネル表面の温度変化を示す。ワックス添加塗料では室温上昇に伴い積雪が屋根パネルの下方に徐々にずり落ち始め、室温が $+2^{\circ}\text{C}$ に到達した後10時間43分で完全に滑雪した(図16)。一方、一液シリコン塗料は室温が $+2^{\circ}\text{C}$ に到達してから15時間経過しても滑雪しなかった。このことより、屋根パネルと積雪の界面が $+2^{\circ}\text{C}$ となり雪が解けてわずかな水が生じたと考えられる温度環境下で、ワックス添加塗料の滑雪機能の優位性が認められた。これは屋外曝露試験にて、夜間積雪した雪が翌日日中に気温上昇する際に、一液シリコン塗料より早くワックス添加塗料が落雪する傾向がみられることと一



図 16 室温 $+2^{\circ}\text{C}$ 下でのワックス添加塗料パネル(手前)の滑雪, 奥は一液シリコン塗料パネル

致する。

今回低温実験に用いたワックス添加塗料と一液シリコン塗料の水接触角には大きな差がなかったが、 $-5^{\circ}\text{C}$ 下での室内実験でも、 $+2^{\circ}\text{C}$ 保持下の室内実験でも、ワックス添加塗料は一液シリコン塗料よりも高い滑雪性能を示した。

筆者らは、ワックス添加塗料は表面に選択的に分布するワックス成分により高い撥水性を持つため滑雪性能を発揮するものと推測していたが、曝露試験では塗装

パネル設置後 5 年が経過しており、塗膜の劣化状況を考えれば、表面のワックス成分量が低下していてもおかしくないが、ワックス添加塗料が先行して滑雪する現象が観測された。また、融雪水が発生しない $-5^{\circ}\text{C}$ 下の低温実験でもワックス添加塗料のほうが滑雪抵抗が低い傾向を示した。さらに、今回低温実験に用いた屋根パネルは、ワックス添加塗料と一液シリコン塗料の水接触角の差が少ないにもかかわらず、融雪水が発生する $+2^{\circ}\text{C}$ 保持下の低温実験で、ワックス添加塗料の方が先行して落雪する現象を示した。これらのことから、表面のワックス成分による撥水性以外にも滑雪性能に影響する因子があると考えられる。今回低温実験に用いた屋根パネルの静摩擦係数は、一液シリコン塗料よりもワックス添加塗料が低い傾向を示しており、ワックス添加による静摩擦係数の低下が、積雪が滑り出す際の滑雪抵抗値を低下させる要因の一つと考えられる。

このほか、本実験により、ワックス添加塗料の滑雪機能の評価方法として、滑雪抵抗値の計測や、自然落雪までの経過時間の観測により、曝露試験観測挙動と対応した定量的評価が可能であることが確認できた。

今後、塗膜の粗さや曝露試験を経た塗膜の劣化度合いなどについても引き続き検討し、滑雪機能発現のメカニズムについて探っていきたい。

#### 4 結言

雪氷防災研究センターとの共同研究により、山形県新庄市と新潟県長岡市で曝露試験を行った結果、雪質の異なる両市ともに、設置後5年経過しても、ワックス添加塗料を塗装した4寸勾配パネルが対照塗料より先行して滑雪する現象が観測された。そこで、夜間低温時及び日照に伴う気温上昇時の2種の環境下の滑雪現象に着目し、人工降雪装置を用いた低温実験を行った結果、夜間零下を模した室温 $-5^{\circ}\text{C}$ 下では雪抵抗計測によって、日照による気温上昇を模した室温上昇時には、自然落雪に要する時間の差によって滑雪性能を評価できることを確認した。

#### 謝辞

本研究の実施に当たり、東北大学の栗原和枝教授、雪氷防災研究センター雪氷環境実験室の小杉健二室長、伊藤陽一主幹研究員をはじめとする皆様に多大なアドバイス、御協力をいただきました。

記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 佐藤勲征. ワックス添加滑雪塗料の機能発現及び持続要件の探索. 平成28年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2016, No. 14, p. 7-10
- 2) 佐藤勲征, 加藤景輔. 機能性コーティング材料の開発. 平成29年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2017, No. 15, p. 88-89.
- 3) 今野奈穂, 佐藤勲征. 機能性コーティング材料の開発. 平成30年度宮城県産業技術総合センター研究報告. 2019, No.16, p. 71-72.