

着雪氷防止技術に関する研究（第3報）

－ 滑雪と材料表面特性について －

吉田 光則，吉田 昌充，金野 克美

Investigation to Prevent Icing (part III)

－ Relationship between Snow-sliding and Surface of Materials －

Mitsunori YOSHIDA, Masamitsu YOSHIDA, Katsumi KONNO

抄 録

本研究では、滑雪性と素材表面の水との親和性との関連について検討した。屋外の着雪実験では、およそ -3°C 以上の湿り雪の場合、親水性が高い素材の方が雪氷体の脱落がしやすかった。また人工降雪装置を用いた滑雪実験においてテフロンとガラスの比較ではガラスの方が明らかに滑雪特性が優れていることがわかった。これは滑雪が開始する条件として雪と素材の界面に水膜が生じ、その水膜の量が素材の水との親和性に大きく影響しているものと考えられる。両者の滑雪特性の相違は、ガラス表面では親水性が高いため雪との界面により多くの水を捕水することが出来るためであり、疎水性が高いテフロンの場合は捕水性がなく水膜の量が少ないことによるものと考察した。

キーワード：着雪氷，滑雪，疎水性，親水性

1. はじめに

屋外構造物からの落雪による事故や災害は積雪寒冷地における重大な課題のひとつである。勾配屋根からの落雪や橋梁のアーチ部からの雪氷塊の落下は時として大きな事故となる。

一般的に垂直に近い屋外構造物表面には湿り雪でも乾き雪でも付着する。湿り雪の付着は雪中の水の表面張力によるものであり、乾き雪の場合は雪の水分子と構造物表面との分子間力によるものである。したがって、それぞれの付着は液体もしくは固体の水分子と構造物表面との間で生じるため、構造物表面の物理的・化学的性質に大きく影響される。このような着雪氷を防止するひとつの方法は、構造物表面の化学的性質をコントロールすることが考えられる。つまり雪との付着力を低減させることで、雪が剥離する表面特性を作り出すことである。そのためには撥水性の表面特性が有効であることが知られている¹⁾²⁾。

また勾配面のある屋外構造物では、冠雪した雪氷体が大きくならないように早期に滑雪することが望まれる。勾配屋根の滑雪特性については、屋根素材の表面性状、積雪の粒径・

密度・含水量などの性状が大きく影響している。特に滑雪が開始する条件として、屋根と雪氷体の界面の水膜が大きく影響している⁴⁾⁵⁾。

そこで著者らは、滑雪性と素材表面の水との親和性との関連について検討した。

2. 屋外実験による着雪率と温度の関係

著者らは、着雪氷防止材料の開発の目的で屋外の自然環境下で各種素材の着雪実験を行った。その中で、垂直に設置した大きさ $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ のアルミ板にコーティングした塩ビフィルム（一般の道路標識の表面材）と着雪氷防止用に試作した撥水性の高いフッ素系フィルムの着雪状況について着目した。塩ビフィルムの水の接触角は 65° 、撥水性フィルムは 138° 度であった。

実験方法は、図1に示すように冬季間の着雪状況をタイムラプスビデオで自動観測し、着雪の状況と気温、風速、風向、日射量の気象データとの関連性を検討した。図2に塩ビフィルムと試作した撥水性の高いフッ素系フィルムの着雪した面積の割合（着雪面積率）と気温の関係を示す。一般の塩ビフ



図1 屋外着雪実験の様子

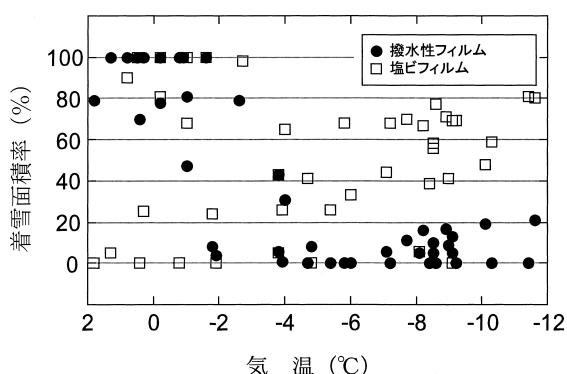


図2 着雪面積率と気温の関係

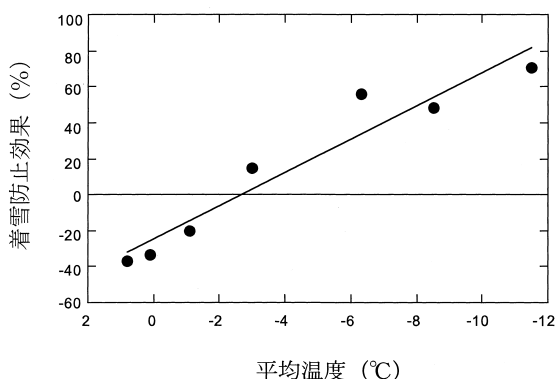


図3 着雪防止効果と温度の関係

フィルムは気温が $-12^{\circ}\text{C} \sim +2^{\circ}\text{C}$ まで偏りなく着雪しているが、撥水性の高いフッ素系フィルムでは $-2 \sim -3^{\circ}\text{C}$ を境に着雪の状況が大きく異なっている。ただし、グラフには気温、風向、風速、降雪強度が異なる一シーズンの様々な気象条件の着雪状況がプロットされている。そこで、気温との関連性を検討するために、風向、風速及び降雪強度が一定な同一日で少なくとも1日に2回以上の観測データがある日について整理すると、図3に示す様な結果が得られた。これは風向、風速、降雪強度には依存しないと言える。図中の縦軸は、塩

ビフィルムの着雪面積率から試作した撥水性の高いフッ素系フィルムの着雪面積率を差し引いた値である。図から明らかなように気温がおよそ -3°C より高くなると、撥水性の高いフッ素系フィルムの方が塩ビフィルムより多く着雪している。つまり、 -3°C 以上では撥水性が高い方が着雪しやすいことになる。これは -3°C 以上の雪が水分を含んでいて、素材との界面の水の粘性力が水膜のない乾いた雪の素材との付着力より小さいため、自重で脱落しやすくなったと考えられる。水との親和性が大きく異なるPTFEとガラス板の屋外での着雪を観察すると、湿り雪の場合ガラス板の方が非常にゆっくりではあるが滑雪するのが観察された。これは水の粘性作用による流動と考えられる。

一般的には 0°C 以下の雪は水を含んでいない。しかし、国内においては酸性雪の報告があり、たとえば荒木らの報告⁶⁾によると北海道内の降積雪中にはナトリウムイオン(Na^+)、塩素イオン(Cl^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})などの電解質が含まれていて、水素イオン濃度(pH)は4.7~6.6である。このことから考察すると -3°C 前後の気温でも凍結しない水分が雪に含まれていることが考えられる。

また、苫米地らによると屋根雪の滑雪現象に及ぼす外気温の影響では、 -2°C 以下では滑雪しにくいと報告している⁷⁾。これらのことから、着雪や滑雪は $-2 \sim -3^{\circ}\text{C}$ を境に被付着物との界面の雪の含水率に大きく影響されると思われる。

3. 氷の付着力と温度の関係

著者らは、各種素材の氷の付着力を検討するために、図4及び5に示すような氷のせん断付着力試験を行った。試験方法は、氷作製のステンスリング(内径25mm、高さ15mm)を測定する試料面に置き、所定の温度に十分冷却した後、蒸留水を注ぎ1時間放置して、氷を試料表面に凍着させた。その後ステンスリングにせん断方向より荷重を荷重させて、凍着した氷をはく離させる。

多くの素材について実験した中で、テフロン(四フッ化エチレン樹脂; PTFE)、ポリエステル樹脂カラー鋼板(#810)、ポリカーボネート樹脂(PC)及びガラスに対する氷の付着力と温度の関係を図6に示す。テフロンは温度依存性がなく付着力が一定であるが、ポリエステル樹脂カラー鋼板、ポリカーボネート樹脂、ガラスははっきりとした温度依存性を示す。特筆すべきことは、 -1°C では親水性の強い素材であるガラスが、水をよく弾く疎水性の強い素材であるテフロンよりも小さい付着力を示すことである。

さらに、テフロンとガラスについて氷のはく離の過程について着目した。表1にテフロン及びガラスの表面特性を示す。図7に -10°C 、 -3°C の場合の試験の荷重-変形曲線を示す。この曲線は、図4に示した試料表面に凍着している氷にせん断力を荷重して、氷のはく離するまでの荷重と変形量(時間)

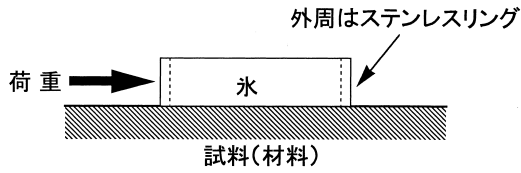


図4 氷の付着力測定の方法



図5 氷の付着力測定装置の概要

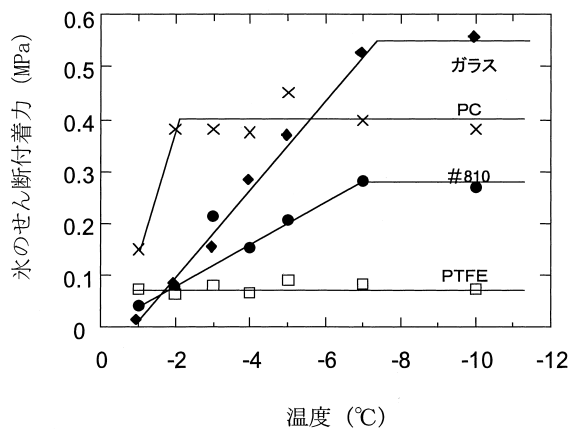


図6 氷の付着力と温度の関係

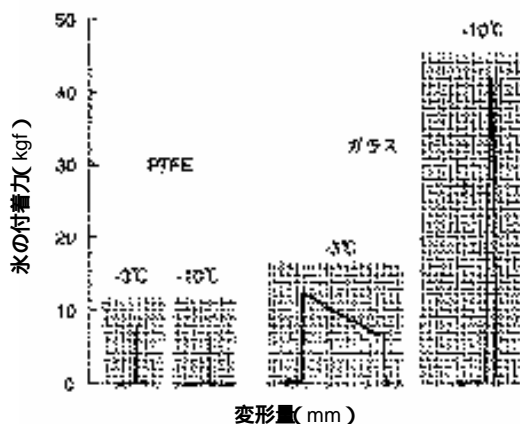


図7 氷の付着力-変形曲線

の関係を表している。-10℃の場合、テフロン、ガラスともに荷重を負荷すると付着力は増加し、最大値で氷は試料表面から完全にはく離した。しかし-3℃のガラスの場合、付着力が最大を示した後も氷はガラス表面からはく離せず荷重が徐々に低下した。これは氷とガラスの界面に粘着性の物質、すなわち不凍結水が存在することを意味している。前者が脆性的にはく離するのに対して、後者は粘弾性的にはく離する。

以上のことから考察すると、融点近傍ではガラスなどの親水性の強い素材と氷の界面には水膜が存在していると考えられる。融点近傍の水膜は温度が高いほど膜の厚さが大きいため、融点に近づくほど氷の付着力は低下し、その影響は親水性の大きさ、すなわち水との接触角に大きく依存するものと考えられる。

このことは、Jellinek が氷とポリスチレン及びアクリルとの付着強度試験により大きな温度依存性を見だし、氷と物体との界面に疑似液体層 (Liquidlike layer) の存在を提案したものと⁸⁾と同じと考えられる。疑似液体層は融点直下の温度において、氷の表面上に熱力学的に安定な状態として存在する薄い水膜である。疑似液体層内部の水は双極子の配列が表面から氷結晶との界面まで連続的に変化している、いわゆる電気二重層を形成しているといわれている。

4. 人工雪による滑雪特性

各種素材の滑雪試験を同一の条件で行うために、科学技術庁防災科学技術研究所新庄雪氷防災研究支所(山形県新庄市)の雪氷防災実験棟の人工降雪装置を用いた。本施設は低温実験室内に天然の雪に近い結晶形の雪を降らすもので、降雪強度、気温、日射などを制御することにより、同一の環境で滑雪特性を評価することができる。

実験の概要を図8に示す。まず低温実験室内の降雪テーブル上に木製の架台を用いて勾配角度10度、30度、45度に500mm×500mmの板状の供試体を設置した。人工降雪は-7℃の温度雰囲気において積雪深約150mmとなるように13

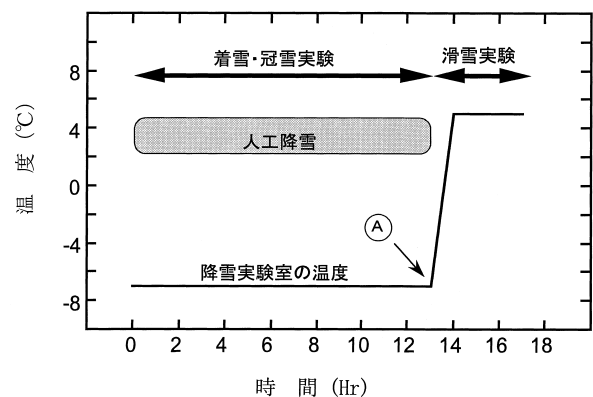


図8 人工降雪装置による実験概要



図9 人工降雪実験の様子

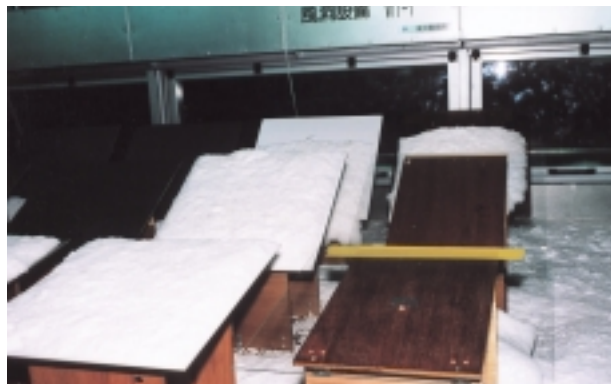


図11 ガラスとテフロンでの降雪特性の違い
手前：勾配角度10度，2列目：30度

表1 ガラスとテフロンでの表面特性

表面特性 サンプル名	表面粗さ (μm)	水の接触角 (deg.)	氷の付着力 (MPa)
ガラス	0.1以下	17	0.36
テフロン	1.5	113	0.12

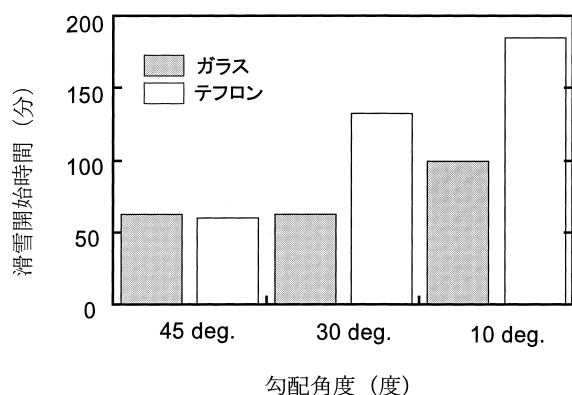


図10 ガラスとテフロンでの降雪特性

時間行った。その後、低温実験室内を $+5^{\circ}\text{C}$ まで昇温させ、気温の上昇とともに降雪する状況を観察した。降雪による着雪、冠雪及び降雪などの実験の様子は2台のタイムラプスビデオで録画して、後で詳細に解析した。また各供試体の裏面に熱電対を取り付けて供試体温度を計測した。積雪した人工雪については適宜、雪温度、密度、含水率を測定した。含水率の測定にはインスブルック式含水率計を用いた。降雪テーブルに設置された実験供試体の様子を図9に示す。実験には疎水性の素材としてテフロン及び親水性の素材としてガラスを用いた。それぞれの表面特性を表1に示す。

実験結果として図10にテフロンとガラスの降雪特性を示す。図中の縦軸の降雪開始時間とは、人工降雪を終了し昇温を開始した時点(図8中のA点)から供試体上の雪が滑りはじめた時点までの時間である。勾配角度が $45^{\circ} > 30^{\circ} > 10^{\circ}$

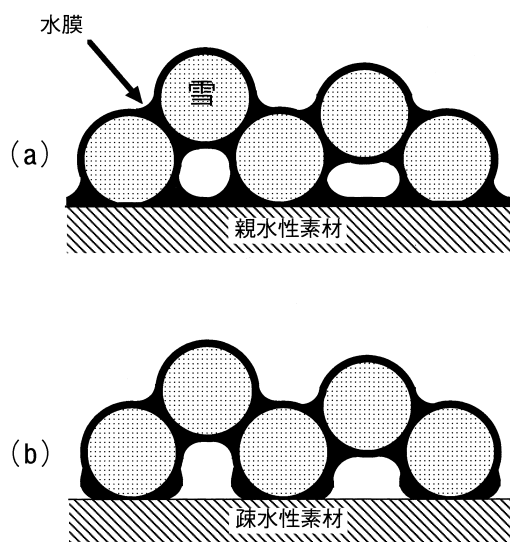


図12 親水性及び疎水性素材表面の水膜のモデル

の順に降雪特性は良くなる。注目すべきことは、勾配角度が小さくなるとテフロンよりガラスの方が明らかに降雪特性が優れていることである。(図11参照)これは降雪が開始する条件として、雪と素材の界面に水膜が生じ、その水膜の厚さ(量)が素材の疎水性や親水性という水との親和性に大きく影響されることがわかる。両者の降雪特性の違いを説明するために、図12に親水性及び疎水性素材の表面における水膜のモデルを提案した。ガラス表面では図12(a)のように親水性が高いため雪との界面により多くの水を捕水することが出来るのに対して、疎水性が高いテフロンの場合には図12(b)のように捕水性がなく水膜の量が少ないと考えられる。したがって、ガラスの方が降雪しやすいことになる。この結果は前述の融点近傍でのガラス及びテフロンに対する氷の付着力実験の結果と一致する。

なお、本実験で得られた人工雪の性状は、降雪終了直後では雪温 $-8.2 \sim -8.4^{\circ}\text{C}$ 、密度 $0.18 \sim 0.22\text{g/cm}^3$ 、降雪実験終了直後では雪温 0°C 、密度 $0.29 \sim 0.43\text{g/cm}^3$ 、含水率 $9.4 \sim$

11.3%であった。

5.まとめ

屋外の着雪実験，氷の付着力実験及び人工雪による滑雪実験を行い，素材表面の疎水性や親水性などの水との親和性と着雪及び滑雪との関連性について検討した結果は以下のとおりである。

- (1) 屋外の着雪実験では，およそ -3°C 以上の湿り雪の場合，親水性素材の方が雪氷体が脱落しやすい。これは素材の表面が水との親和性が高いため，雪氷体との界面により多くの水を捕水することができ，水の粘性力が小さいためである。それに対して，疎水性が高い素材は雪氷体との界面で捕水性がなく氷と素材表面の固体-固体での摩擦力や凍着力が水の粘性力に比べて大きいと考えられる。
- (2) 融点近傍の氷の付着力実験では，脆性的にはく離するタイプと粘弾性的にはく離するタイプが認められた。これは氷自身の特性に基づくのではなく，素材表面の疎水性や親水性の特性に起因もので，融点近傍においては親水性素材の界面には不凍結な水膜が存在すると考えられる。
- (3) 着雪や滑雪は被附着物との界面の水膜に大きく影響され，被附着物表面の水との親和性に関連している。

自然界における着雪や滑雪の現象は気温，湿度，風速，風向，日射などの影響を受け，雪や氷の状態や被附着物の条件が常に変化している。そのため詳細な現象を再現したり，実験室で模擬実験することには限界があるが，今後さらに詳細な検討を行う予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり北海道大学低温科学研究所の堀口薫助教授には有益な助言をいただきました。また科学技術庁防災科学技術研究所新庄雪氷防災研究支所の雪氷防災実験棟の人工降雪装置を使用するにあたり佐藤篤司支所長，鎌田慈特別研究員には多大なご厚意をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 吉田光則・金野克美・小林勝雄・浅井範夫ほか：着雪氷防止塗料の開発と応用について，寒地技術論文・報告集，第13巻，pp87-92 (1997)
- 2) 湯浅雅也・今津隆二・藤原真也・苫米地司：道路標識における着雪抑制に関する基礎研究，寒地技術論文・報告集，第14巻，pp30-34 (1998)
- 3) 市田昌行・外塚信・湯浅雅也・今津隆二：道路距離標の着雪抑制に関する野外研究，寒地技術論文・報告集，第14

巻，pp35-40 (1998)

- 4) 伊東敏幸・高倉政寛・苫米地司：屋根雪の経時的変態に伴う滑落雪性状の変化，寒地技術論文・報告集，第13巻，pp352-357 (1997)
- 5) 千葉隆弘・高倉政寛・苫米地司・干場真司：畜舎建築物における屋根雪の滑雪状況について，寒地技術論文・報告集，第14巻，pp206-210 (1998)
- 6) 荒木邦夫・加藤拓紀・田淵修二・野口泉ほか：酸性雪に関する調査研究，北海道公害防止研究所報，第15巻，pp73-81 (1988)
- 7) 高倉政寛・伊東敏幸・苫米地司：滑雪現象の発生に影響を及ぼす外気温特性について，寒地技術論文・報告集，第13巻，pp332-336 (1997)
- 8) H.H.G.Jellinek: Adhesive Properties of Ice, Journal of Colloid Science, Vol.14, pp268-280 (1959)

