はっ水性塗膜上への着雪量の検討[†]

斎藤 博之* 高井 健一*
高沢 寿佳** 山内 五郎**

Study on Snow Stacking Weight for Water Repellent Coating

by

Hiroyuki SAITO*, Kenichi TAKAI*, Hisayoshi TAKAZAWA**

and Goro YAMAUCHI**

When snow or ice sticks to radio communication antennas, it sometimes causes signal transmission problems. In many cases, the degree to which snow or ice sticks to antennas is based on the degree of adhesion.

Recently, several water repellent coatings have been developed to prevent such adhesive problems. In this paper, the snow adhesive property of these water repellent coatings was experimentally studied. The following results have been obtained.

- (1) Fallen snow adheres to FRP samples much more than water repellent coatings.
- (2) Fallen snow adheres to samples at +1.5°C much more than at -5°C.
- (3) Snow naturally falls off from the surface as a block when its weight reaches a certain value for both of FRP and water repellent coating.
- (4) The estimated value of snow falling off coincides with the experimental value.

Key words : PTFE, Coating, Repellent, Snow, Water, Antenna, Communication

1 緒 言

雪や氷が物体に付着することにより様々な問題が生じることがある。屋根などの建築物に対する着雪や着氷は建物の倒壊などの重大な問題を引き起こすことから、これを軽減する方法については従来から研究されている。特に氷と材質の付着機構に関する研究^{1)~3)}、材質の劣化による雪氷の凍着強度等の分野において種々の研究がなされているが決定的な方法は見いだされていないのが現状である。電気通信についても特に無線通信の分野ではアンテナに付着した雪氷が電波伝搬に大きく影響することから対策が求められているが、現在までのところ決定的な方法は得られていない。^{6),7)}

このようななかで近年注目されるようになってきたのが材料表面の物理化学的性質を利用する方法である。^{8)~11)}特にフッ素樹脂を利用した濡れ性の悪い塗膜により着雪や着氷を防止しようとする方法が期待されている。筆者らも水に対する表面自由エネルギーが低く濡れ性が悪い^{12)~14)}はっ水性塗膜による無線通信用アンテナへの着雪着氷防止の研究をすすめている。^{15),16)}

定性的には、気温が0°Cより高い環境での各種材料への雪の付着は水を介して行われ、それ以下の温度環境では焼結類似の機構によるものとされている。^{8),12)}筆者らは人工降雪機を用いた着雪実験によってフッ素樹脂系の塗料について着雪性の評価を行った。さらに、水を介して雪が付着する場合の雪の最大付着量について検討を行っ

た。

2 実験方法

2・1 試料の作製

パーフルオロ化したポリ四フッ化エチレン (PTFE) 樹脂粉末 (平均粒径 $1\mu\text{m}$ ¹⁷⁾) をポリフッ化ビニリデン (PVdF) 系樹脂ワニス中に 30~90 vol % 添加し、ボールミルによって2時間かく拌混合して塗料化した。¹⁵⁾これをあらかじめエポキシ樹脂系塗料を約 $50\mu\text{m}$ の厚さに下塗りした FRP 板に約 $10\mu\text{m}$ の厚さにスプレー塗装して乾燥させ、試料とした。この際、各塗装は 23°C の恒温室内の塗装ブースで行い、そのまま 24 時間以上放置して乾燥させた。

なお、対照用に無線アンテナの保護用に用いる一般的な材料であるガラスエポキシ系 FRP 板を用いた。

2・2 人工降雪試験

Fig. 1 に示すような装置 (スガ試験機製小型降雪装置) を用いて人工降雪実験を行った。この装置は人工的にかさ密度約 $0.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の雪を作製してベルトコンベアで試料室となる恒温槽に運び、試料方向に向かう風に乗せて人工的に平均降雪速度 $8.33\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ の模擬的な降雪をさせるものである。人工雪は Fig. 2 に示すような形状であった。今回の実験では面積 300cm^2 の試料板 2 枚を 45 度の傾斜で設置して、この上に降雪させた。降雪試験はひとつの試料について 30 分とし、一部の試料 (PTFE 添加量 80 %) についてののみは 150 分の長時

[†] 原稿受理 平成 8 年 6 月 17 日 Received June 17, 1996

* 正会員 日本電信電話 (株) 技術協力センター 〒180 武蔵野市緑町, Technical Assistance & Support Centre, Nippon Telegraph and Telephone Co., Midoricho, Musashino, 180

** 日本電信電話 (株) 技術協力センター 〒180 武蔵野市緑町, Technical Assistance & Support Centre, Nippon Telegraph and Telephone Co., Midoricho, Musashino, 180

Fig. 1. Schematic diagram of apparatus.

Fig. 2. Shape of man-made snow.

間降雪試験を行って時間に対する着雪の挙動を調べた。試験においては試料上にのった雪の質量を上皿秤によって経時的に測定した。

3 実験結果および考察

3・1 単位時間あたりの着雪量

単位時間あたりの試料に対する着雪量を Fig. 3 に示す。この Fig. 3 にみられるように、室温が -5°C の場合の着雪量は FRP の場合に $10\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度の値になったのに対して塗料の場合はいずれもほとんど雪が付着せず、特に 60 % 以上の PTFE 添加では雪の付着は $0\sim 3\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度であり、有意で FRP よりも着雪量が小さかった。

一方、室温が $+1.5^{\circ}\text{C}$ のときには全試料について着雪量は -5°C の場合に比較して極端に大きくなった。この場合に材料の種類による差異は明確ではないが、塗膜は 90 % の PTFE 粉を添加した場合で $30\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ であり FRP の場合の $81\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ よりも小さな値であった。

全試料について $+1.5^{\circ}\text{C}$ の場合に -5°C よりも着雪量が大きくなるのは雪表面の一部が融解して水となり、付着に水を介するため、表面でラプラス圧力による付着が生じるからであると考えられる。^{7),8)}

3・2 時間に対する着雪の挙動

PTFE 粒子を 80 % 含む塗膜に対して行った 150 分の連続降雪実験では、着雪した雪は時間の経過とともに試料上に積もっていった。このとき、雪の降雪速度がほ

Fig. 3. Snow adhesiveness on samples.

Fig. 4. Relation between snow on 80 %PTFE-sample and time.

ぼ一定に制御されているため、その積分値に相当する着雪量は時間と共にほぼ直線的に増加するのが観察された。直線的に増加した雪は、ある量に到達すると積雪した雪が塊状となって落下する現象がみられた。この様子を Fig. 4 として示す。この Fig. 4 にみられる A 点が雪が塊になって落ちた点であり、この点での値が雪の最大付着量であると考えることができる。

このときに雪が試料に付着する力についてのつりあいはマクロ的には Fig. 5 のように考えられる。すなわち、雪塊にかかる重力の斜面方向成分と雪のせん断方向での付着力がつりあう範囲で雪が付着できると考えられる。そこで、雪が均一に付着していると考えて力のつりあいから付着強度を計算してみるとせん断方向には $82\text{ mgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ となる。この値は同種のはっ水性塗膜に -5°C で水を介して氷を付着させた場合に報告されているせん断付着力である $2.5\text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ と比較すると極端に小さい。¹⁶⁾ この理由としては、 -5°C で氷が水を介して付着する場合には水が接着剤のようになって凝固するためアンカー効果などによる強固な付着が生じるのに対して、 $+1.5^{\circ}\text{C}$ では同様に水を介して付着しても凝固しないためラプラス圧力による弱い付着が生じるのみであるためと考えられる。この場合、はっ水性塗膜表面と雪粒の間の部分にある水ははっ水表面の影響を受けて曲率が通常の塗料や FRP と雪粒の間にある水の曲率よりも小さく

Fig. 5. Balance of forces on a block of snow.

Fig. 6. Model of a snow particle on sample surface.

なっていると考えられる。そこで、このような条件でははっ水性塗膜に対するラプラス圧力による雪粒の付着は通常の塗料や FRP の場合に比較して小さいものと考えられる。

雪粒をかりに単純な剛体球と仮定した場合、水による平面状の試料板への付着は主に次のラプラス圧力によって生じると考えられる^{(8), (11), (13)} (Fig. 6)。

$$p = \gamma_L / r_1 \quad (1)$$

ただし、ここで、 γ_L は水の表面張力である。この圧力が Fig. 6 のふたつの表面間 $\pi x^2 = 2\pi R d$ に働くので、 ϕ が十分に小さいときには次の様な引力が得られる⁽¹⁹⁾。

$$\begin{aligned} f &= p \cdot 2\pi R d \\ &= p \cdot 2\pi R (2r_1 \cos \theta) \\ &= 4\pi R \gamma_L \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、ここで θ は水が固体表面上で示す接触角である。これに氷と試料の固体同士の接着付着力を加えると次のようになる⁽¹⁹⁾。

$$\begin{aligned} F &= 4\pi R \gamma_L \cos \theta + 4\pi R \gamma_{SL} \\ &= 4\pi R (\gamma_L \cos \theta + \gamma_{SL}) \\ &= 4\pi R \gamma_s \end{aligned} \quad (3)$$

ここで γ_{SL} は水と材料の界面自由エネルギー、 γ_s は材料の表面自由エネルギーである。この力 F が氷の一つの粒子を試料上に付着させる力と考えられる。したがって、雪の結晶粒が単位面積あたりで占める個数を t とするときに、雪粒が受ける単位面積あたりの力 P は次のようにあらわされる。

$$\begin{aligned} P &= F t \\ &= 4\pi R \gamma_s t \end{aligned} \quad (4)$$

これが雪が塊となって落ちるときのせん断力と等しくなると考えられる。

そこで、この値を具体的に考えてみると次のようになる。 t については、本実験の場合 Fig. 2 から求められるが、雪粒が図中に占める割合は、半径 $R = 5 \text{ mm}$ の粒子が面積 $5.7 \text{ mm} \times 4.2 \text{ mm}$ 中にはほぼ 2 粒とみられる。そこで、 $t = 2 / (5.7 \times 4.2) = 0.08 \text{ [mm}^{-2}\text{]}$ となる。また、試料の表面自由エネルギーについては PTFE と PVdF についてのそれぞれの表面自由エネルギーについて混合比率で平均値をとった値であると仮定すると、文献⁽²⁰⁾ から PTFE の表面自由エネルギーは $18.5 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であり、

PVdF の表面自由エネルギーは $25 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であるので、 $\gamma_s = 18.5 \times 0.8 + 25 \times 0.2 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2} = 19.8 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ となる。これらを式 (4) に代入してみると次の値が得られる。

$$\begin{aligned} P &= 4 \times 3.1 \times 5 \text{ [mm]} \\ &\quad \times 19.8 \text{ [mJ} \cdot \text{m}^{-2}\text{]} \\ &\quad \times 0.08 \text{ [mm}^{-2}\text{]} \\ &= 98 \text{ [mgf} \cdot \text{cm}^{-2}\text{]} \end{aligned} \quad (5)$$

この値は、Fig. 4 から求めた実測値である $82 \text{ [mgf} \cdot \text{cm}^{-2}\text{]}$ と比較的よく一致している。この値が実測値と多少ずれるのは、実際の降雪では試料上の降雪が必ずしも一様でなく部分的に厚く雪が付着することや、雪粒の形状が単純な球状でなく凹凸があって付着が一様に生じないためであると考えられる。

4 結 言

水に対する濡れ性が悪いのははっ水性塗膜についての着雪量を検討し、次の結果を得た。

- (1) はっ水性塗膜では FRP に比較して単位時間あたりの雪の付着量が小さい。
- (2) 単位時間当たりの着雪量は $+1.5^\circ\text{C}$ では -5°C の場合に比較して大きくなる。
- (3) 試料に積もった雪は一定の量 (最大付着量) になると塊となって試料から落ちる。
- (4) $+1.5^\circ\text{C}$ でののはっ水性塗膜への雪の最大付着量についての実測値と計算値はよく一致する。

一部の実験にご協力いただきました NTT アドバンステクノロジー株式会社の上田利信課長と水野誠一郎主査に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 今井丈夫, “機能性コーティング”, p. 89 (1987) 日刊工業新聞社。
- 2) 清水増治郎, 木村忠志, 雪氷, **54**, 269 (1992)。
- 3) M. Landy and A. Freiburger, Journal of Colloid and Interface Science, **25**, 231 (1967)。
- 4) 苦米地司, 伊東敏幸, 雪氷, **56**, 215 (1994)。
- 5) 伊東敏幸, 湯浅雅也, 苦米地司, 今津隆二, 日本雪工学会誌, **11**, 3 (1995)。
- 6) 高野 忠, 山田吉秀, 進士昌明, 電子情報通信学会誌, J61B, 383 (1978)。
- 7) 鈴木道也, “雪氷電波・光工学”, p. 72 (1988) 昭晃堂。

- 8) 吉田光則, 日本接着学会誌, **30**, 418 (1994).
- 9) 村瀬平八, 高分子, **36**, 854 (1987).
- 10) 村瀬平八, 名西 靖, 小暮英雄, 塗料の研究, **117**, 27 (1989).
- 11) L. Anderson, C. Golander and S. Persson, Journal of Adhesion Science and Technology, **8**, 117 (1994).
- 12) 大石不二夫, 村瀬平八, 表面, **28**, 988 (1990).
- 13) 花園繁彌, 実務表面技術, **31**, 190 (1984).
- 14) 村瀬平八, 実務表面技術, **34**, 205 (1987).
- 15) 斎藤博之, 高井健一, 高沢寿佳, 半田隆夫, 上田利信, 山内五郎, 防錆管理, **39**, 389 (1994).
- 16) 斎藤博之, 高井健一, 高沢寿佳, 山内五郎, 表面技術, **47**, 279 (1996).
- 17) G. Yamauchi, J. D. Miller, H. Saito, K. Takai, H. Takazawa and T. Ueda, Material Transactions (JIM), **37**, 721 (1996).
- 18) 水野悠紀子, 若浜五郎, 低温科学物理篇, **35**, 133 (1977).
- 19) J. Israelachvili, "Intermolecular And Surface Forces", p. 330 (1991) Academic Press Inc..
- 20) 今井丈夫, "機能性コーティング", p. 93 (1987) 日刊工業新聞社.

書 評

“キッチンで体験レオロジー”

尾崎邦宏 (著) 応用物理学会 (監修)

(1996年, 裳華房, B 6 判, 152ページ, 定価1442円)

「レオロジー」なる言葉は物性屋にとっては馴染み深いものであるが、未だ一般的ではない。研究を生業にする人を除けば物理学の一領域であることすら、おそらく知られていない。熱力学用語の「エントロピー」が、その難解さにもかかわらず市民権を得ていることに比べ大きな違いである。このことはしかし、レオロジーに関連した現象が特異なものであることを意味しない。本書のいたるところで紹介されているように、むしろ生活の中にいくらかでもある。味覚に大きく影響する歯ごたえなどは、レオロジーの領域のひとつである。本書は、その表題からわかるように身近な現象をとりあげ、その中に潜むレオロジー的なものを平易に解説したものである。話題として取り上げられた「弾むゴムと弾まないゴム」、「弾性液体」、「割れる液体」、「流れる固体」等々は、一見常識的感覚とは相反するものである。固体であるはずのガラスが液体であり、弾性を示すはずのないバテが弾性を示すことが何故なのかを具体的事例を引き合いに出しながら、豊富な写真と巧みな図を交えて分かりやすく紹介されている。とりわけ、簡単にできる実験は読者の興味をそそること請け合いである。また、難解な概念も受け入れ易い記述がなされており、この分野の第一人者である著者の経験の豊かさが感じられる。

本書を読み終えた読者は、氷河の移動から納豆の粘りまで、レオロジーが対象とする領域の広さと深さに改めて驚かされるであろう。だれしも、少年の時代に様々な身近な現象に興味を抱き胸ときめかせた経験を持っている。理科系離れが言われる昨今、自然の営みに対する好奇心とときめきを、本書は呼び起こしてくれるに違いない。レオロジーの啓蒙書として広く読まれることを期待したい一冊である。

(北海道立林産試験場 中野 隆人)