

# 着雪氷防止技術に関する研究（第1報）

—各種材料の着氷力について—

吉田 光則, 大市 貴志, 山岸 暢  
金野 克美, 後町 光夫, 平野 徹  
藤野 和夫<sup>1)</sup>, 堀口 薫<sup>1)</sup>, 水野悠紀子<sup>1)</sup>  
山岡 勝<sup>2)</sup>, 近藤 孝<sup>3)</sup>, 浅井 規夫<sup>4)</sup>  
佐竹 正治<sup>5)</sup>

## Investigation to Prevent Icing (Part I)

— Adhesion of Ice to Various Materials —

Mitsunori YOSHIDA, Takashi OHICHI, Thohru YAMAGISHI  
Katsumi KONNO, Mitsuo GOCHO, Tohru HIRANO  
Kazuo FUJINO, Kaoru HORIGUCHI, Yukiko MIZUNO  
Masaru YAMAOKA, Takashi KONDOH, Norio ASAI  
Syoji SATAKE

### 抄 録

材料表面に凍着した氷の付着力（着氷力）について、種々の材料について体系的に明らかにすることを目的として、着氷力試験方法および高分子系、金属系、無機系の材料の着氷力特性を検討した。さらに着氷力に影響を及ぼす因子として材料の固体表面自由エネルギーおよび表面粗さについて検討した。その結果、フッ素系およびシリコン系の高分子材料が小さい着氷力を示し、硬さの異なる材料では軟質のものが着氷力は小さかった。さらに着氷力は固体表面自由エネルギーおよび表面粗さに密接に関連があることがわかった。

### 1. はじめに

積雪寒冷地域において発生する災害のひとつに着雪氷がある。これらの災害はなだれ、凍上等にくらべて一般の耳目に触れる機会は少ないが、一般生活や産業活動にさまざまな被害、障害をもたらす。たとえば電線着雪による断線や鉄塔の倒壊により広い地域において停電事故が生じる。また高速列車が舞い上げる雪がパンタグラフ

や車両下部に付着して運行障害を引き起こす。その他橋桁・鉄塔・ビル・住宅などからの落雪事故、船舶・車両・航空機・電気通信施設・道路交通標識・信号機の着雪氷による事故や障害、流雪溝の内壁や投雪口の着氷による閉塞などがあり時には人命にかかわることもあり、着雪氷防止対策が各方面から望まれている。

本報告は、材料表面に凍結した氷の凍着力（以下着氷

1) 北海道大学低温科学研究所, 2) 北海道電力株式会社総合研究所, 3) 北海鋼機株式会社, 4) 株式会社シオン,  
5) 財団法人日本気象協会北海道本部

力とする) について, どのような材料が着氷力が大きい  
か, どのような因子が着氷力を小さくするかなどという  
基礎的なデータを得ることを目的とする。このために各  
種試験条件の検討および高分子系, 金属系, 無機系など  
の種々の材料の着氷力特性を体系的に明らかにして, 着  
氷力に影響を及ぼす因子として材料の固体表面自由エネ  
ルギーおよび表面粗さについて検討した。

## 2. 着雪氷の分類

着雪氷とは雪・氷が物体に付着することをいう。着雪  
は一般的に温度が0℃に近づくほど付着性が増し, さら  
に雪が湿って水を含むと, その表面張力によって特に付  
着しやすくなる。着氷には, 大気中の水蒸気が昇華凝固  
してできる樹霜や過冷却状態の雨や水しぶきなどが物体  
に付着し凍結するものがある。過冷却水滴によるもの  
には, その構造から雨水, 粗氷, 樹氷に分類される。樹氷  
は形がエビの尻尾状で, 空隙が多く白く不透明である。  
この型は気温が低く風が比較的弱いときにできる。雨水  
は透明な氷で表面は滑らかである。この型は気温が0℃  
に近く風速が大きいときにできる。粗氷はこれら二つの  
中間で, 白っぽいがやや透明で, かなり固い<sup>(1)</sup>。また湿り  
雪が付着したあと, 気温が下がり凍着することもある。

## 3. 着雪氷防止方法

着雪氷を防止または軽減させる方法には, 雪や氷の物  
体上への付着そのものを防止するか, 堆積した雪氷を除  
去する方法とがある。防止方法は構造物や部位, または  
環境によって異なるが, 一般につぎのようにまとめられ  
る<sup>(2)</sup>。

### 1. 熱エネルギーによる方法

- ・エンジンの余熱
- ・電熱ヒーター
- ・ヒートパイプ
- ・蒸気, 温水などの直接吹き付け

### 2. 化学物質による方法

- ・各種の塩類
- ・グリコール類, グリース類

### 3. 物理化学的方法

- ・ポリマーコーティング

## 4. 物理的方法

- ・圧搾空気の吹き付け
- ・圧搾空気による変形
- ・難着水性素材の使用

これらはそれぞれ長所と短所がある。物体表面を暖め  
て凍らせないようにする熱エネルギーによる方法ではエ  
ネルギーコストが高く, 機械的に落とす物理的方法では  
施工性とコスト, 化学物質による氷点降下を利用した方  
法では性能の耐久性や公害の点で問題がある。

ポリマーコーティングによる方法は材料の表面の性質  
のみによって着雪氷防止を機能させることから技術的に  
は難しいと考えられる。しかし未処理に比べて, 雪や氷  
の除去が容易になることや他の方法と併用することによ  
り, 効果的に防止が期待できる等々メリットは大きい。

## 4. 実験方法

### 4.1 実験材料

本実験に用いた材料を表1に示した。これらの材料は

表1 実験材料

高分子材料	プラスチック	テトラフルオロエチレン(PTFE), シリコン樹脂(SI) ポリエチレン(PE), ポリプロピレン(PP) アクリルニトリル-ブタジエン-スチレン共重合体(ABS) 6-ナイロン(PA), ポリアセタール(POM), アクリル(PMMA) ポリカーボネート(PC), ポリスチレン(PS) 硬質塩化ビニル(PVC-H), 軟質塩化ビニル(PVC-S)
	塗料等	フッ素樹脂塗料, アクリルシリコン樹脂塗料, アクリルウレタン樹脂塗料, ポリウレタン樹脂塗料, ポリエステル樹脂塗料, フッ素樹脂塗料
金属材料	アルミニウム(鏡面仕上げ) ステンレス(鏡面仕上げ) チタン(鏡面仕上げ), 鋼(酸化皮膜)	
無機材料	ガラス, タイル レンガ コンクリート	

実用的に広く使用されているものである。プラスチック  
は12種類で厚さ2mmの板状材料である。塩化ビニルに  
ついては硬さの異なる2種類(硬質と軟質)のものを用  
いた。フッ素樹脂, アクリルシリコン樹脂, アクリルウ  
レタン樹脂およびポリウレタン樹脂塗料の4種類はアル  
ミニウム板に所定の配合により塗装したものである。屋  
根材料としては, 一般的なポリエステル樹脂系と耐候性  
の良好なフッ素樹脂系の各色および各種グレードを用  
いた。金属材料は一般に市販されているもので, アルミ  
ニウム, ステンレスおよびチタンについては表面が鏡面  
仕上げされているもので, 鋼は表面が酸化皮膜のもの  
を用いた。レンガは普通の赤レンガ, タイルは最も一般

陶器質施釉タイルである。コンクリートは比較的緻密なものを用いた。

#### 4.2 実験装置および方法

##### (1) 着氷力測定

着氷力の測定には規格化された試験方法や装置はな

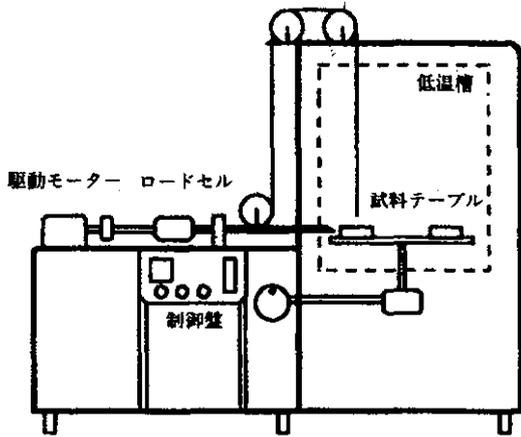


図1 着氷力試験機

い。そこで我々は図1に示す装置を試作した。荷重はロードセルにより動ひずみ計を通してレコーダに出力され、駆動モーターの回転数を調節することにより、負荷速度をコントロールすることができる。仕様としては最低温度 $-40^{\circ}\text{C}$ 、最大荷重 100kgf である。低温槽内部の回転式試料テーブルには試料 10 枚がセットでき、外部のハンドル操作により試料を順次送ることができる。本装置はせん断法および引張法の試験が可能であるが、本実験においてはせん断法を中心に行った。

実験手順は写真1に示すように、氷作成用のステンレスリング(標準の場合:高さ 15mm, 直径 25.4mm)を

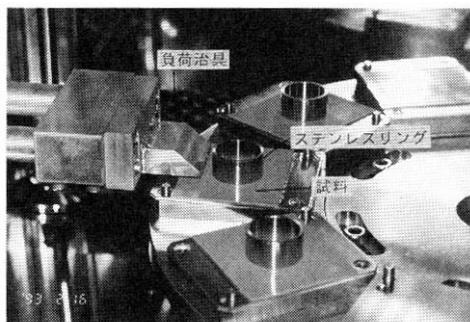


写真1 着氷力試験機の低温槽内部

試料表面に置き、所定の温度に十分冷却した後、 $5^{\circ}\text{C}$ の蒸留水を注ぎ、所定の時間放置して氷を試料表面に凍着させた。その後ステンレスリングにせん断方向より荷重を負荷することにより材料と凍結面をはく離させる。その時の荷重を付着面積(ステンレスリング内面積)で除した値を着氷力(kgf/cm<sup>2</sup>)とした。図2は着氷力試験により得られた荷重-時間曲線の一例を示したものである。

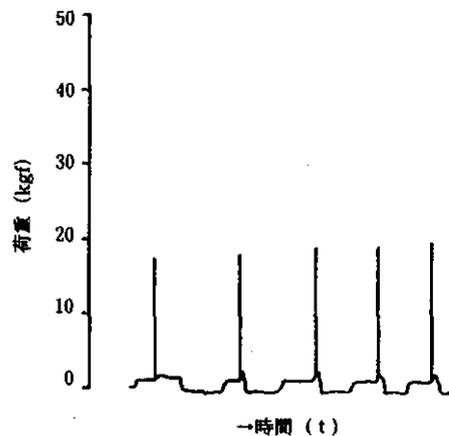


図2 着氷力試験における荷重-時間曲線

##### (2) 接触角測定

接触角測定は自動接触角計(協和界面科学㈱)を用いて行った。本装置は図3に示すような固体表面上の液滴を CCD カメラによりコンピュータに取り入れ、画像処理により接触角を測定するもので、正確かつ迅速に測定が可能である。接触角は後述する固体表面自由エネルギーの算出に用いた。

##### (3) 表面粗さ測定

試料表面の粗さ測定は触針式表面粗さ計(榊東京精密製)を用いて、JIS B 0601(表面粗さの定義と表示)に準拠し、10 点平均粗さ(Rz:  $\mu\text{m}$ )を算出した。また走査型電子顕微鏡により試料の表面観察を行った。

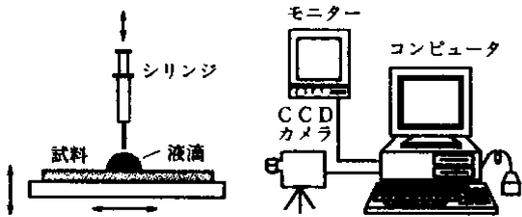


図3 自動接触角測定装置

5. 結果および考察

5.1 着氷力測定条件の検討

写真2に試料表面に付着した氷の偏光写真を示した。このように付着した氷は多結晶氷であった。着氷力と試験温度の関係を図4に示した。着氷力は温度の低下とともに大きくなる傾向が認められた。これは後述する試料

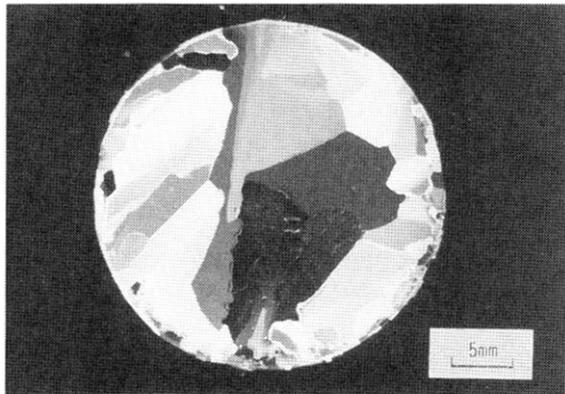


写真2 付着面の氷の偏光写真

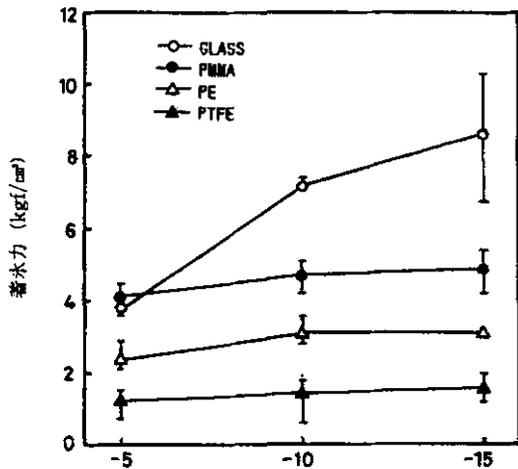


図4 着氷力と試験温度の関係  
付着面積5.07cm<sup>2</sup>, 負荷速度10mm/min, 付着時間1hr

の固体表面自由エネルギーが温度に対して負の傾きを示すことから、温度が低下すると着氷力が増加することが考えられる。特にガラスではその傾向が大きかった。この理由として氷表面の水膜の影響が考えられる。氷の表面には0℃以下の温度でも安定な氷膜が存在することが確認されている。その水膜は融点に近づくとき急激に増大する<sup>(3)</sup>。本実験においても-5℃の場合、最大荷重に達した後氷ははく離せず、すべるように荷重が低下するのが観察された。表面が非常に平滑で、親水性の大きなガラス表面においては氷表面の水の粘性作用により、融点付近に近づくときせん断着氷力が著しく小さくなったと考えられるが、詳細については今後の検討課題である。

着氷力と負荷速度の関係を図5に示した。速度が大きくなると着氷力は小さくなる傾向が認められた。

また、着氷力と付着面積および時間の関係を図6および図7に示す。これらに関しては有意な差は認められなかった。

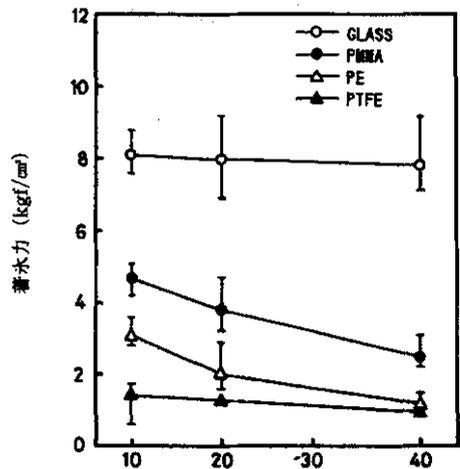


図5 着氷力と負荷速度の関係  
試験温度-10℃, 付着面積5.07cm<sup>2</sup>, 付着時間1hr

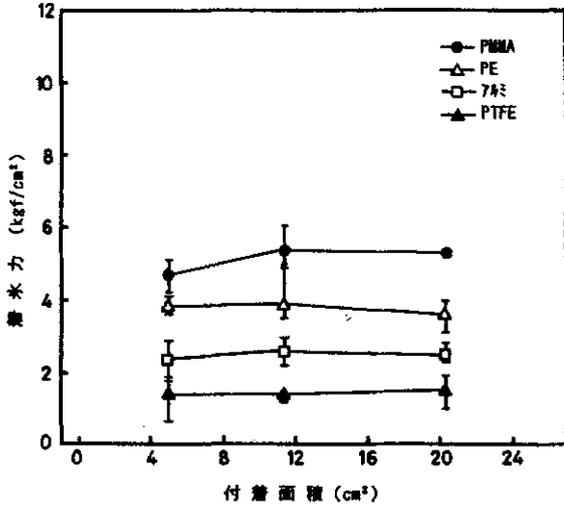


図6 着氷力と付着面積の関係  
試験温度-10°C, 負荷速度10mm/min, 付着時間1 hr

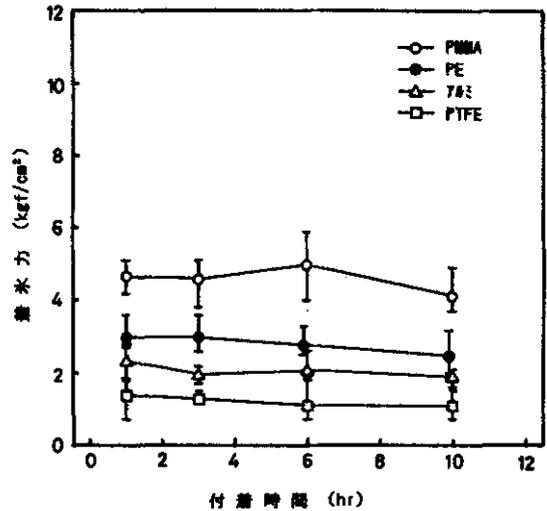


図7 着氷力と付着時間の関係  
試験温度-10°C, 付着面積5.07cm<sup>2</sup>, 負荷速度10mm/min

5.2 各種材料の着氷力

図8に-10°Cにおける各種材料の着氷力を示した。プ

ラスチックにおいてはポリテトラフルオールエチレン, シリコン樹脂が小さく, アクリル, 硬質塩化ビニルが大きい

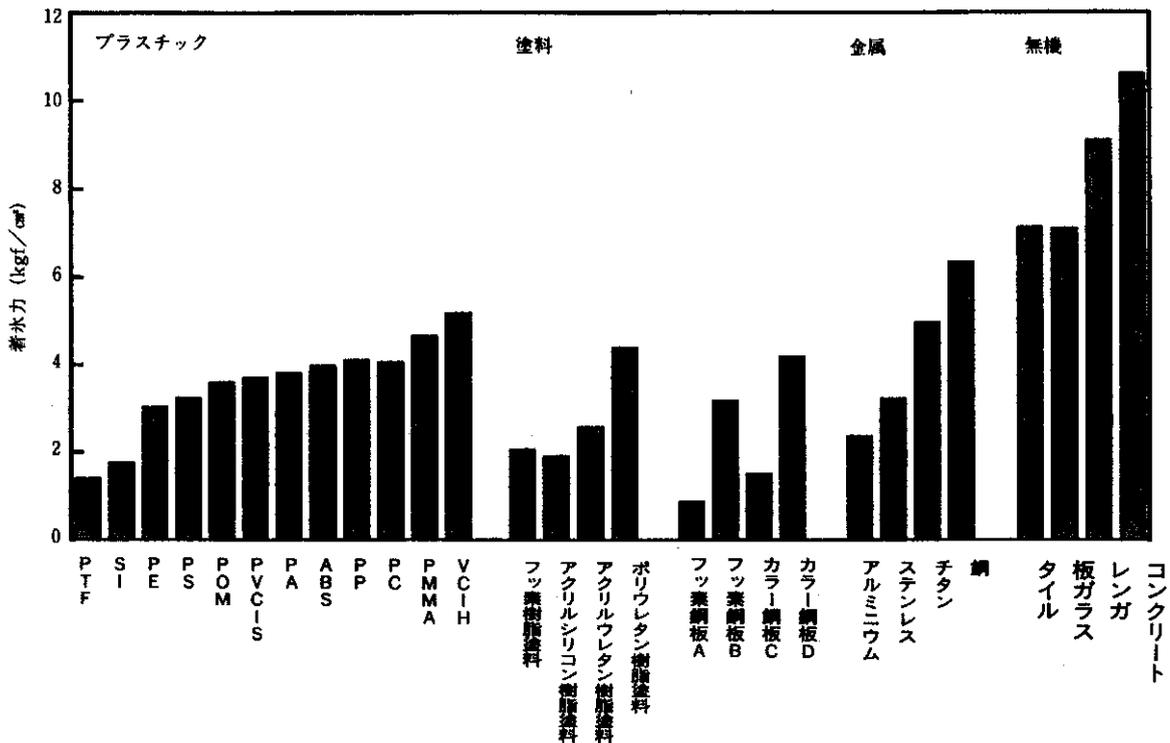


図8 各種材料の着氷力

な値を示した。硬さの異なる塩化ビニルは硬質に比べ軟質のものが小さい着氷力を示した。塗料についてはフッ素樹脂およびアクリルシリコン樹脂塗料が比較的小さい着氷力を示した。屋根材料においては塗料の種類や一般タイプ（カラー鋼板C）、艶なしタイプ（カラー鋼板D）などの表面状態により、着氷力に大きな差が認められた。これらは表面の粗さが異なるためであり詳細は後述する。無機材料は大きな値を示した。特にレンガおよびコンクリートは表面が多孔質なためアンカー効果により、特に大きな値を示したと考えられる。

5.3 表面エネルギーについて

固体の表面張力すなわち固体表面自由エネルギーはぬれ、吸着、接着などを支配する重要な因子である。そこで、高分子系の固体表面自由エネルギー（以下表面エネルギーとする）の解析について次に述べる。

表面エネルギーを表面を構成する分子間に作用する各種の力に基づく成分要素に分けると表面エネルギー(γs)は次式のようになる。

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \dots\dots\dots(1)$$

ここで、γs<sup>d</sup>は個体表面のロンドン分散力、ファンデルワールス力などに関する項(分散成分)、γs<sup>p</sup>は個体表面の双極子間力、クーロン力などに関する項(極性成分)である。

また、液滴が図9のように固体表面で接触角θで平衡に達したとき、Youngの式、Dupreの式およびFowkesの式を組み合わせることにより次式が得られる。

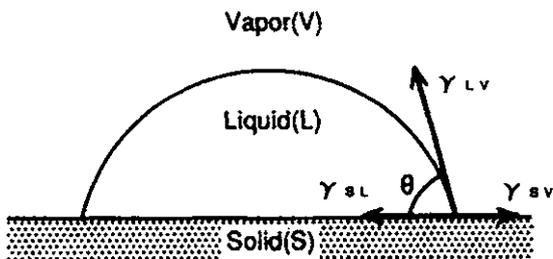


図9 体面表面上の液滴

$$\cos\theta = \frac{2 \{ (\gamma_{sv}^d \cdot \gamma_{lv}^d)^{1/2} + (\gamma_{sv}^p \cdot \gamma_{lv}^p)^{1/2} \}}{\gamma_{lv}} - 1 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、γ<sub>LV</sub>は液体の空気との界面張力、γ<sub>SV</sub>は固体の空気との界面張力であり、添字のdとpはそれぞれの分散成分と極性成分を表す。

プラスチック、塗料、ゴムなどはγ<sub>SV</sub>≒γ<sub>S</sub>と考えられるので、(1)、(2)式より表面張力が既知の2種類の液体を用いて接触角を測定することにより、表面エネルギーが算出できる。本実験においては液体には蒸留水および流動パラフィンを用いた。

表面エネルギー(erg/cm<sup>2</sup>)と着氷力の関係を図10に示した。表面エネルギーが大きいと着氷力も大きくなる傾向が認められた。

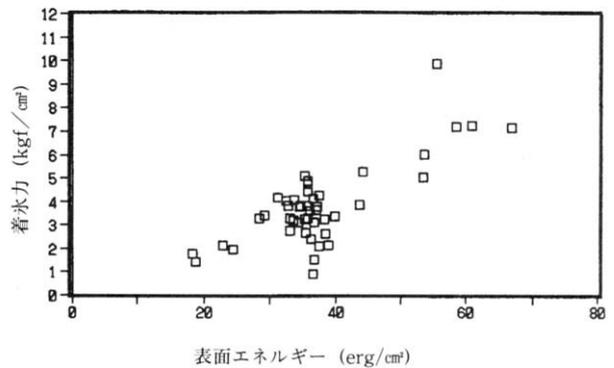


図10 着氷力と表面エネルギーの関係

5.4 表面粗さについて

表2に代表的な実験材料の着氷力と表面粗さ(10点平表2 代表的な実験材料の着氷力、表面粗さ、表面エネルギーの関係

No	品名	着氷力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	表面粗さ (μm)	表面エネルギー (erg/cm <sup>2</sup> )
1	PTFE	1.42	1.46	18.7
2	PE	3.08	2.39	33.4
3	PMMA	4.72	0.13	35.8
4	ポリエステル樹脂塗装鋼板A	1.35	1.62	36.7
5	” B	2.57	5.81	38.0
6	フッ素樹脂塗装鋼板	2.34	3.22	39.0
7	艶無しポリエステル樹脂塗装鋼板	3.39	22.50	31.5
8	ステンレス (鏡面仕上げ)	3.26	0.66	33.1
9	チタン (鏡面仕上げ)	4.56	0.26	40.3
10	アルミニウム (鏡面仕上げ)	2.39	0.51	36.2
11	鋼板 (酸化皮膜)	6.43	4.12	39.1
12	ガラス	7.22	0.14	58.5
13	コンクリート	10.83	12.70	-

均粗さ), 表面エネルギーの関係を示した。ポリテトラフルオロエチレン (PTFE), ポリエチレン (PE) およびアクリル (PMMA) などの表面粗さの小さいプラスチック材料については, 表面エネルギーが大きくなると着氷力も大きくなる傾向が認められた。屋根材料は同種の塗料を用いたものならば表面エネルギーが同程度であるため, 図 11 からわかるように表面粗さが大きいと着氷力が大きくなる傾向が認められた。しかし表面粗さが大きい

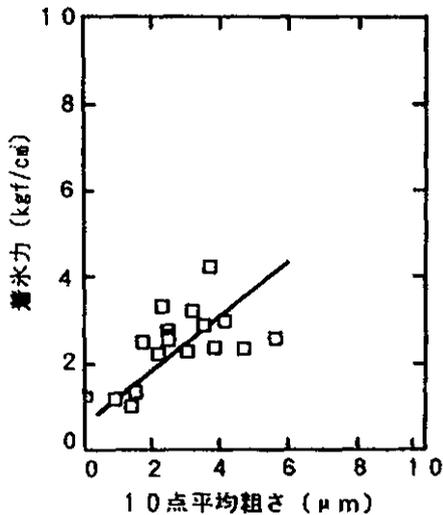
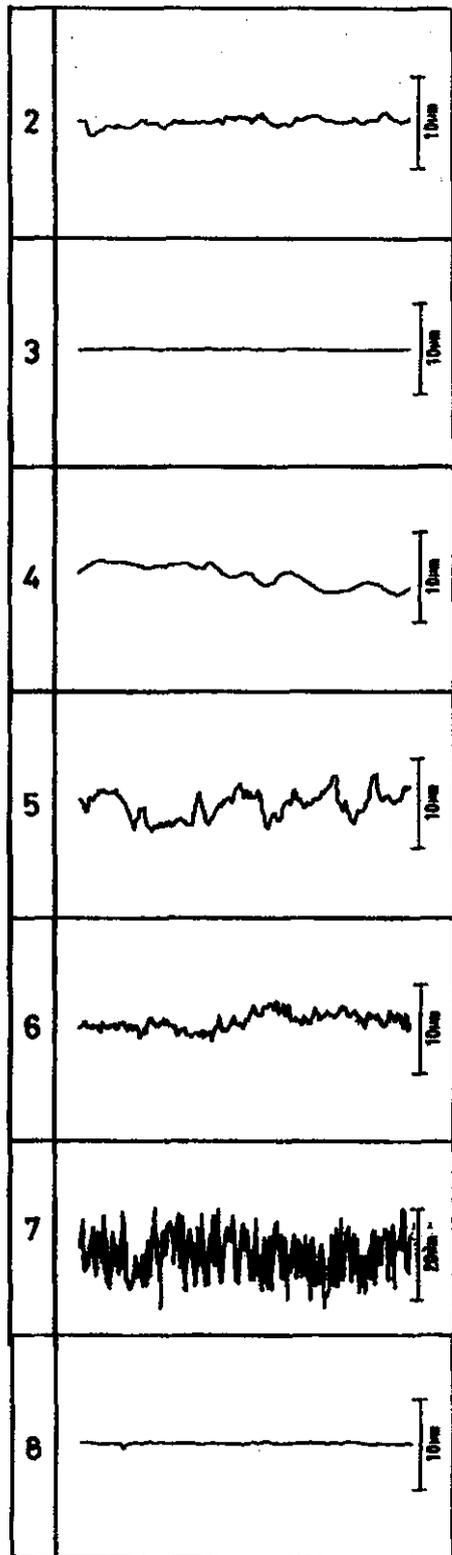
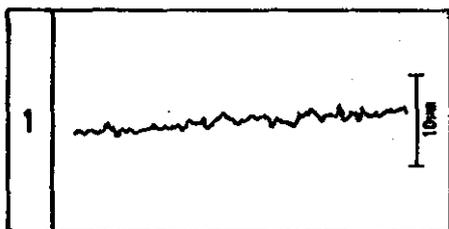


図11 着氷力と平均粗さの関係

艶なしタイプの着氷力は比較的小さかった。これは山と谷との平均高さを意味する粗さだけでなく, 波形の勾配やピッチなども着氷力に影響していると考えられる。写真3に走査型電子顕微鏡による試料の表面観察結果を示し, 図 12 に表面粗さ計から得られた表面形状を示した。図 12 の番号は表 2 中の番号である。プラスチック, 塗装鋼板, 金属の各材料の表面性状はそれぞれ特徴的で, かなり異なっているのがわかる。



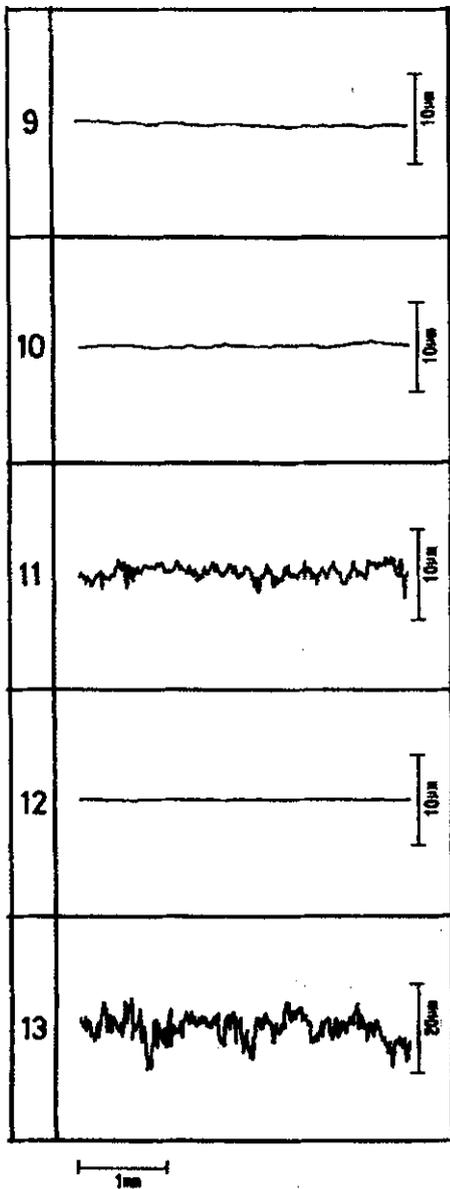
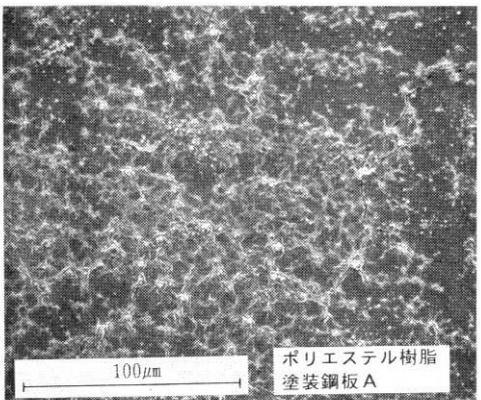
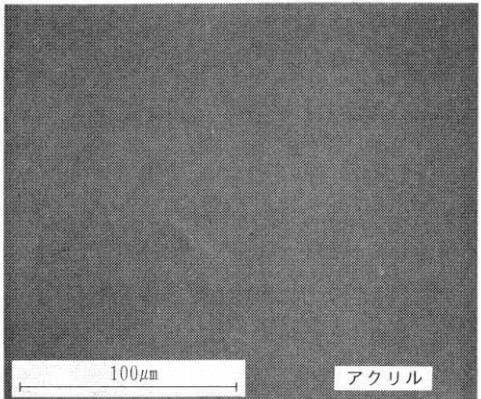
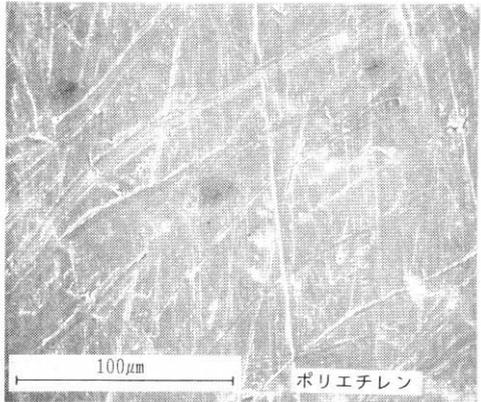
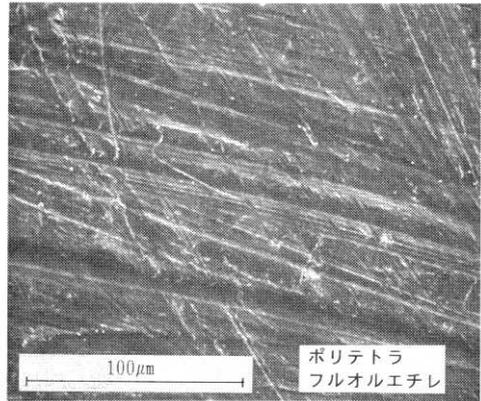
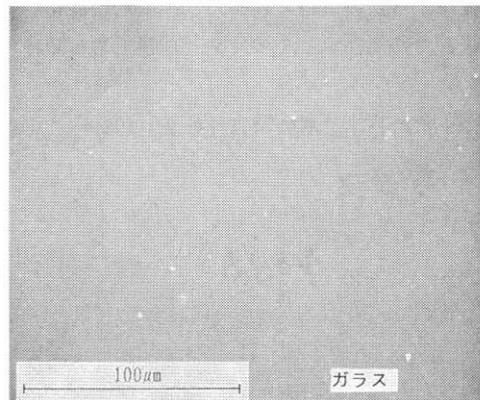
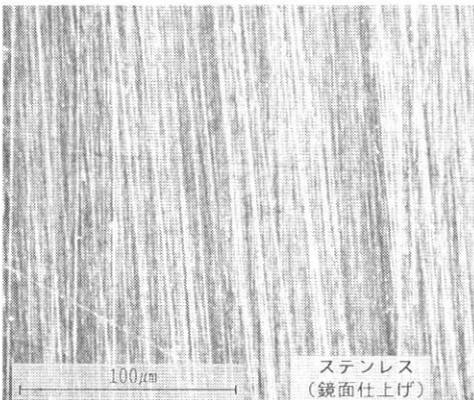
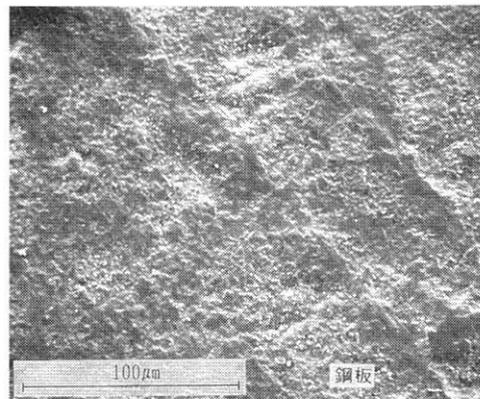
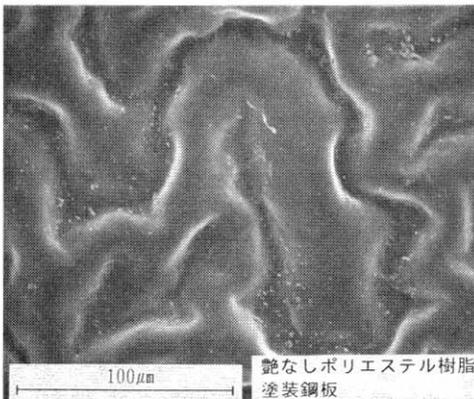
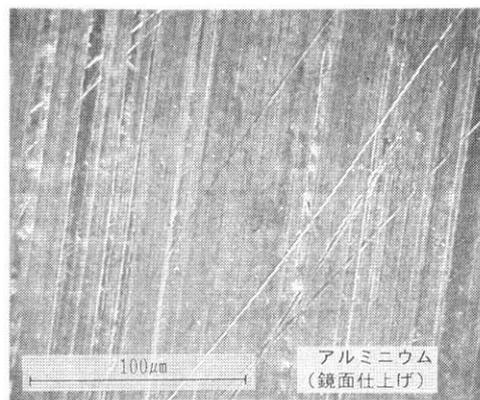
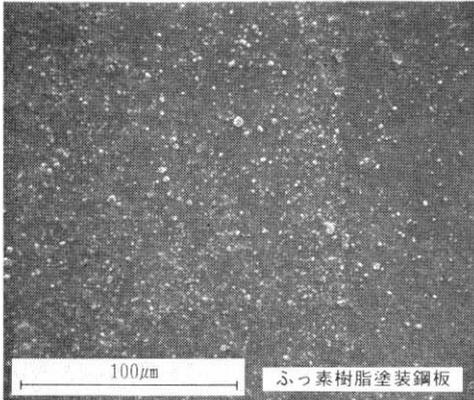
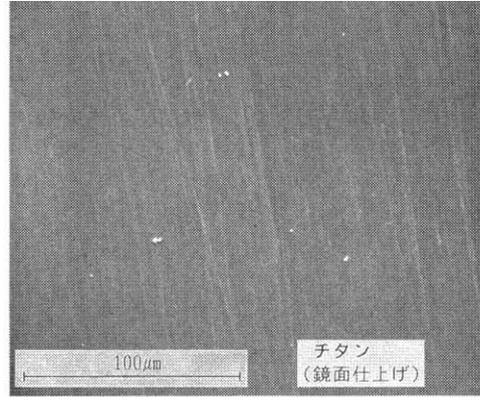
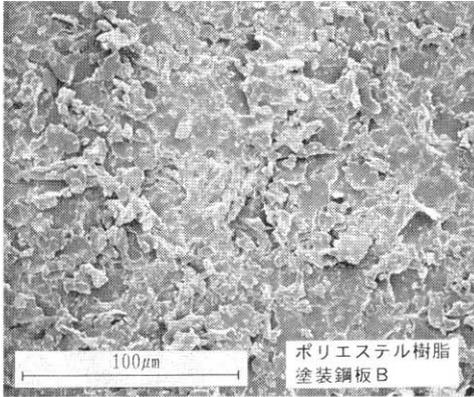


図12 試料の表面性状  
(番号は表2のものと同じ)





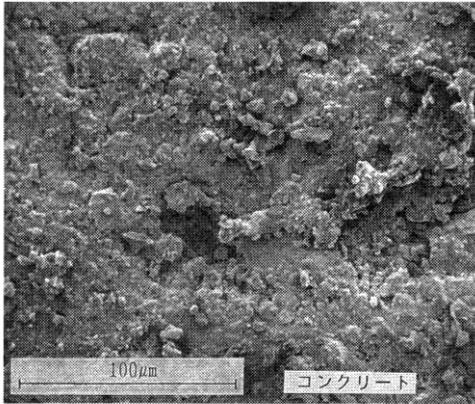


写真3 電子顕微鏡による表面観察

## 6. おわりに

氷の付着は、水分子と固体表面に位置する原子との間に形成される水素結合やファンデルワールス力などによるものである。このため表面エネルギーなどの化学的な因子の影響は大きい。しかし物理的な表面粗さも影響を与えている。実際にはこれらの因子の相互作用により着氷力が生じていると考えられる。

氷が凍結して付着した場合、その氷を除去するために必要な力、すなわち着氷力を小さくするには(1)表面エネルギーを小さくすること、(2)表面粗さを小さくすることが必要と考えられる。さらに硬さに関しては硬質より軟質が小さい着氷力を示した。

なお本研究は、産学官共同研究「着雪氷防止材料の開発とその応用技術に関する研究」の一部として行われたものである。

## 参考文献

- 1) 松澤勲監修；自然災害科学辞典，築地書院，(1988)
- 2) 今井丈夫編；機能性コーティング，日刊工業新聞社 (1986)
- 3) 前野紀一；氷の科学，北大図書刊行会 (1981)