

# 濃厚ポリマーブラシの超低着氷性メカニズム: 着氷界面の可視化と力学計測

Super-low ice adhesion mechanisms in concentrated polymer brushes:  
mechanical characterization and interface visualization

横国大(正)※大久保 光, 日本ペイント・サーフケミカルズ(非)玉本 健京大(正)辻井 敬亘,  
横国大(正)中野 健

Hikaru Okubo<sup>1</sup>, Ken Tamamoto<sup>2</sup>, Yoshinobu Tsujii<sup>3</sup>, Ken Nakano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>Nippon Paint Surf Chemicals, <sup>3</sup>Kyoto University

## 1. 緒言

太陽光パネルの上の積雪が固着すると、発電効率の低下を招き、屋根の上の積雪が滑落すると、人身事故を招く場合がある。このような事象や事故を未然に防ぐために、疎水性表面の開発が進められている。とりわけ、濃厚ポリマーブラシ(concentrated polymer blush: CPB)は、基板に高密度に固定された高分子鎖がブラシ状の構造体を形成する高分子薄膜であり、超低着氷材料として注目されている。しかし、そのメカニズムは不明瞭である。そこで、本研究では、独自に開発した「着氷応力の計測」と「着氷面の破断に至る動的なプロセスの可視化」を同時に行える試験機を駆使して、CPBの超低着氷メカニズムを調査した結果について報告する。

## 2. 装置および方法

試験機概念図を図 1 に示す。基板と凝着する氷柱を鋼プローブで接線方向に押し、二つのロードセル A 及びロードセル B で接線力の時間変化を計測し、接線力  $F = F_A + F_B$  の最大値  $F_{\max}$  と接触面積  $A$  の比から着氷応力を得ることができる。氷柱直上の光源 A により透過光観察を可能とし、ガラス円板の下に配したカメラで着氷面の破断プロセスを撮影する構造とした。未修飾のガラス基板(縦幅:30 mm, 横幅:30 mm, 厚さ:2 mm)をガラス円板の表面上に固定した。ガラス基板の中央に置いたアクリルパイプに純水を注ぎ、槽内温度  $T = -40^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$  の恒温槽の中で、ガラス基板に凝着する氷柱(直径:20 mm, 高さ:10 mm)を作成した。着氷面からの高さ  $h = 1 \text{ mm}$  の位置に水平なプローブの先端を設置した後、速度  $V = 0.1 \text{ mm/s}$  でプローブを駆動して、着氷面に接線力を加えた。着氷面が破断に至るまで、接線力を 2000 Hz, 動画を 100 fps で計測した。

## 3. 結果および考察

試験温度  $-15^{\circ}\text{C}$  における未修飾および CPB 修飾基板の代表的な力の時系列信号を図 2 に示す。図 2 より、未修飾基板では、徐々に接線力が増加し  $t = 4.17 \text{ s}$  付近で接線力  $F = F_A + F_B$  が急落した。この接線力挙動は、せん断下の二面間の一般的な破断挙動であり、接線応力が急落するこのタイミングで、着氷面が破断したと考えられる。一方、CPB 修飾基板では、接線力は一定値で推移し、未修飾基板のような接線力の急落は確認されなかった。図 2 の時系列信号と同時に得た「透過光像」のスナップショットと透過光像から作成した「時間微分像」のスナップショットを図 3 に示す。時間微分像は、輝度の変化が小さい部分が青く、大きい部分が赤くなるようにグラデーションをつけた。未修飾基板(図 3 a, b)では、 $t = 4.15 \text{ s}$  に着氷面内で三又の亀裂が走った後、 $t = 4.17 \text{ s}$  に着氷面全体が破断している。一方、CPB 修飾基板(図 3 c, d)では、未修飾基板のような特徴的な輝度変化は確認されなかった。上述の結果より、CPB を付与した場合、接線力が一定値で推移し、表界面の特徴的な破断現象は確認されなかった。このことは、何らかの流動層の介在により CPB-氷柱界面は着氷しておらず、滑り界面として振舞っている可能性が示唆された。

## 4. 結言

本研究では、CPB の超低着氷機構について独自開発の試験機により考察した。その結果、CPB の存在により、着氷界面が何らかの流動層として振舞っていることが示唆された。講演では、CPB 着氷界面の接線力の速度依存性と温度依存性の計測結果を示すことで、CPB 界面層の振る舞いについてさらに詳細な議論を行う<sup>1)</sup>。

## 謝辞

本研究は CREST(JPMJCR2193), ACT-X(JPMJAX23D4)と 2024 年度フジシール財団の助成により実施されました。

## 文献

- 1) H. Okubo et al., In-situ observation of ice-adhesion interface under tangential loading: Anti-icing mechanism of hydrophilic PPEGMA polymer blush, *Tribology Lett.* **72**, 96 (2024).

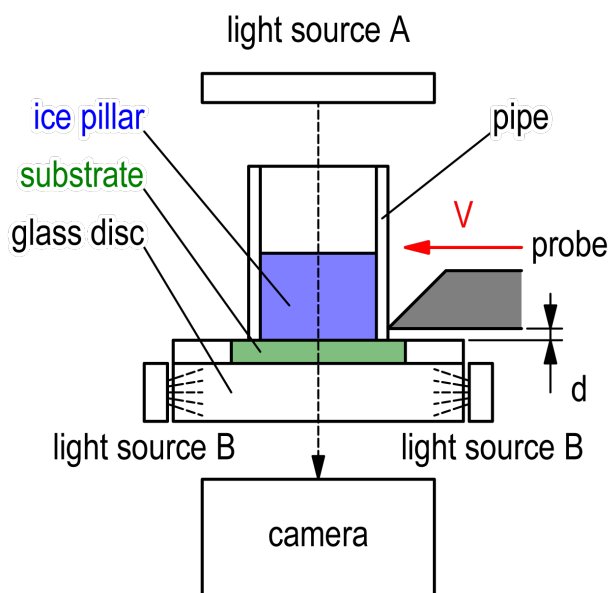


図 1 着氷試験機 の概念図

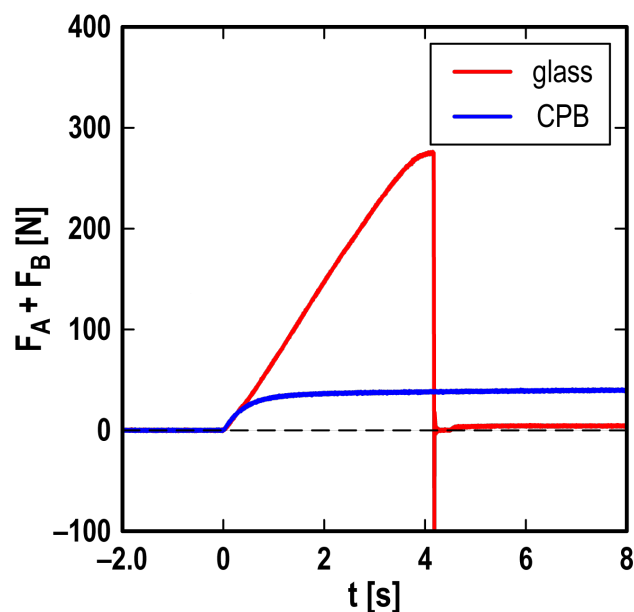
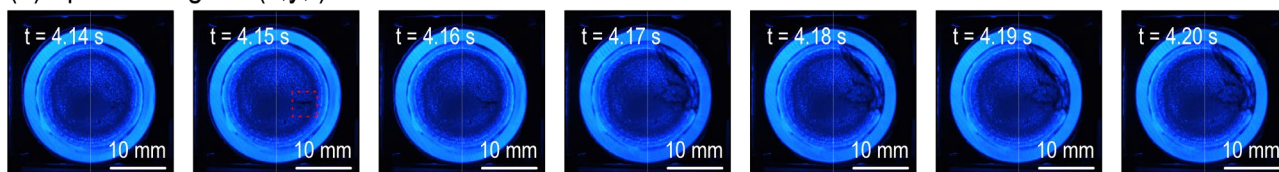
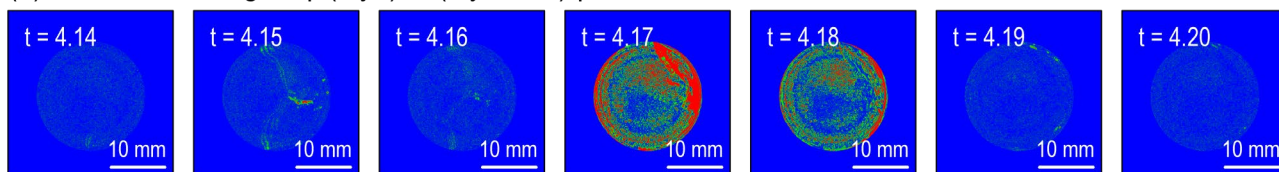


図 2 未修飾および CPB 修飾基板の力の時系列信号

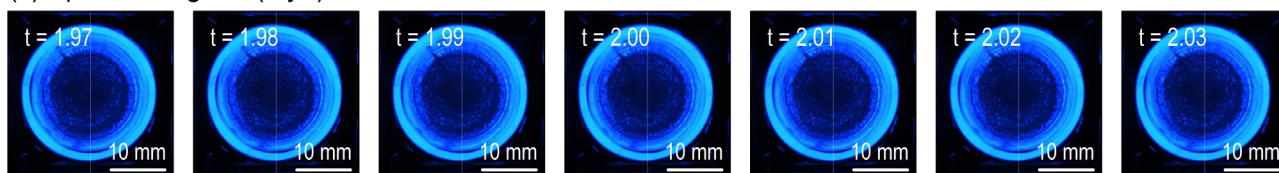
(a) optical images:  $I(x,y,t)$



(b) differential images:  $|I(x,y,t) - I(x,y,t - \Delta t)|$



(c) optical images:  $I(x,y,t)$



(d) differential images:  $|I(x,y,t) - I(x,y,t - \Delta t)|$

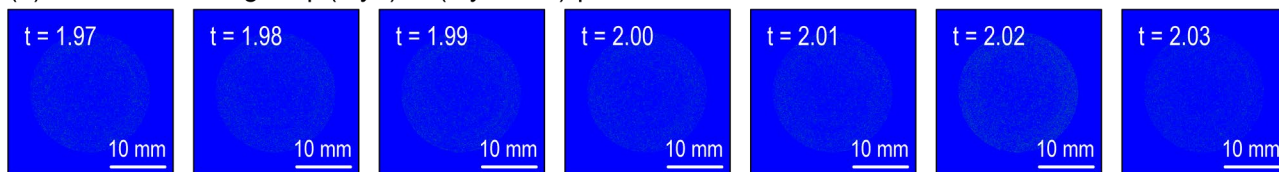


図 3 着氷面の可視化像: 未修飾基板 (a: 透過光像, b: 時間微分像) と CPB 修飾基板 (c: 透過光像, d: 時間微分像)