

着氷面の破断プロセスに及ぼす破壊モードの影響

Effects of fracture modes on rupture processes at ice-substrate interfaces

横国大(学)※長谷 剣人, (正)大久保 光, 日本ペイント・サーフケミカルズ(非)杉田 翼, (非)松井 徳純, (非)玉本 健
京大(正)辻井 敬亘, 横国大(正)中野 健

Kento Hase¹, Hikaru Okubo¹, Tsubasa Sugita², Norizumi Matsui², Ken Tamamoto^{2,3}, Yoshinobu Tsujii³, Ken Nakano¹

¹Yokohama National University, ²Nippon Paint Surf Chemicals Co., Ltd., ³Kyoto 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、疎氷性表面の開発が進められている。本研究では、表面材料開発の評価基準となる着氷応力の計測と、表面形状設計の指針の獲得に向けて、これまでに、着氷面の破断に至る動的なプロセスを可視化しながら着氷力を計測する試験機を開発した[1]。本報では、接線力の作用位置をパラメータとした実験の結果と、同実験を通して明らかになった破壊モードの影響を報告する。

2. 方法

試験機の概念図を図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、二個のロードセル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、基板直下のガラス円板側面の光源Bにより全反射光観察を可能とし、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 $T = -15^{\circ}\text{C}$ 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 $h = 1, 2, 4, 8 \text{ mm}$ 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

代表的な力の時系列信号を図2左に示す。横軸 $t = 0$ はプローブの駆動開始時刻を表す。プローブ高さ $h = 1 \text{ mm}$ では $t = 4.17 \text{ s}$ で接線応力 F/A が急落し、 $h = 8 \text{ mm}$ では $t = 2.01 \text{ s}$ で急落した。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。接線応力の最大値を着氷応力 F_{\max}/A とすると、 $h = 1 \text{ mm}$ で $F_{\max}/A = 0.88 \text{ MPa}$, $h = 8 \text{ mm}$ で $F_{\max}/A = 0.16 \text{ MPa}$ であり、着氷応力に5倍程度の違いが現れた。そこで、着氷応力に及ぼすプローブ高さの影響を両対数表示でまとめると、図2右を得る。ただし、記号は5回以上の計測の平均値、誤差線はそれらの標準偏差を表す。プローブの位置を高くすると、着氷応力は明確に減少し、フィッティング曲線の傾きより、 F_{\max}/A は h の-0.4乗に比例することがわかった。

図2左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を図3上と図4上に、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下と図4下に示す。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。プローブ高さ $h = 1 \text{ mm}$ (図3)では、 $t = 4.15 \text{ s}$ に着氷面内で三叉の亀裂が走った後、 $t = 4.17 \text{ s}$ に着氷面全体が破断している。一方、 $h = 8 \text{ mm}$ (図4)では、 $t = 1.99 \text{ s}$ から 2.00 s にかけて、画像の右側(プローブによる接線力の作用側)から着氷面が剥離を始め、 $t = 2.01 \text{ s}$ に着氷面全体が破断している。これらの結果は、プローブ高さが低いとき、面内剪断型(モードII)の破壊(図3)が卓越し、プローブ高さが高いとき、開口型(モードI)の破壊(図4)が卓越したことを示している。

4. 結言

本報では、前報[1]で報告した可視化試験機を用い、未修飾のガラス基板を対象として、プローブ高さをパラメータとした実験結果を報告した。接線力の作用位置の違いにより、着氷面には異なる破壊モードが生じ、破壊モードの違いにより、着氷力が劇的に変化することが明らかになった。このことは、表面材料開発の評価基準となる着氷応力が必ずしも絶対的ではないことを示唆するとともに、表面形状設計ならびにシステム設計により着氷力が制御可能であることを意味している。

文献

- [1] 長谷 剑人 他 6名, 接線力を受ける着氷面の破断プロセス: 可視化試験機の開発, トライボロジー会議 2022 春 東京 予稿集, F9 (2022).

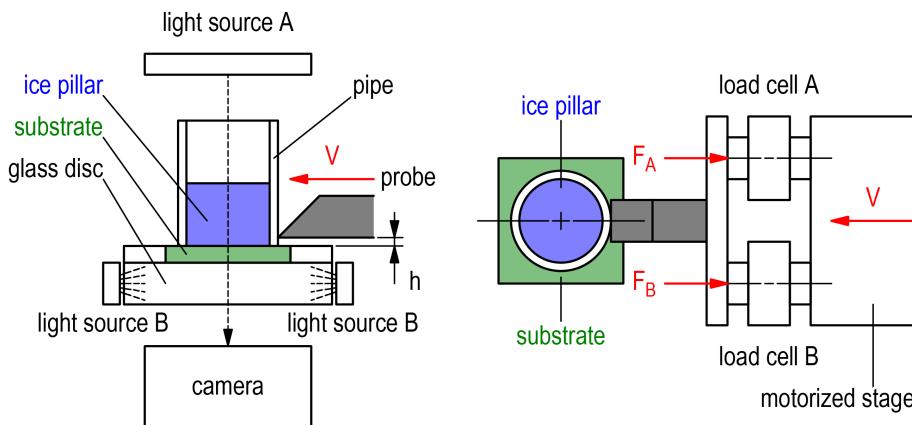


図1 着氷試験機の概念図(左:正面図,右:上面図)

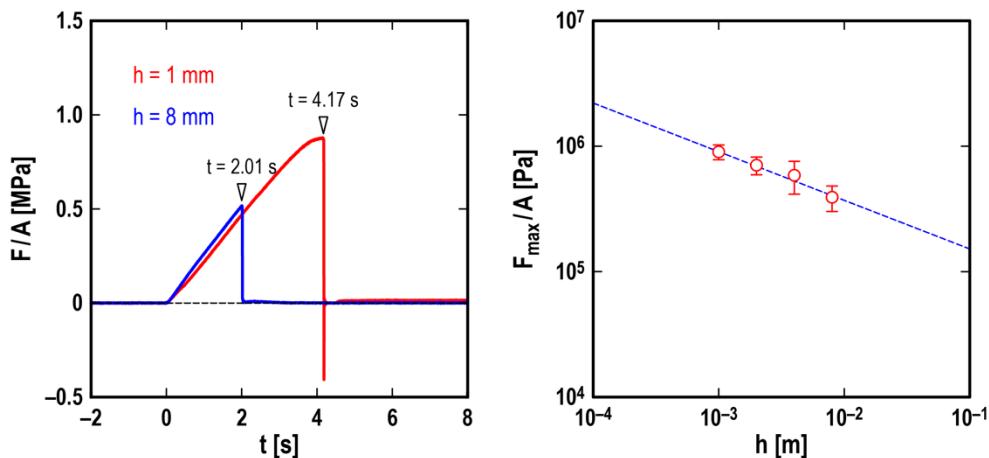


図2 未修飾ガラスの実験結果($T = -15^\circ\text{C}$, $V = 0.1 \text{ mm/s}$)。左:接線応力 F/A の時間変化(赤: $h = 1 \text{ mm}$, 青: $h = 8 \text{ mm}$)。右:着氷応力 F_{\max}/A に及ぼすプローブ高さの影響(記号:平均値, 誤差線:標準偏差, 破線:フィッティング曲線)

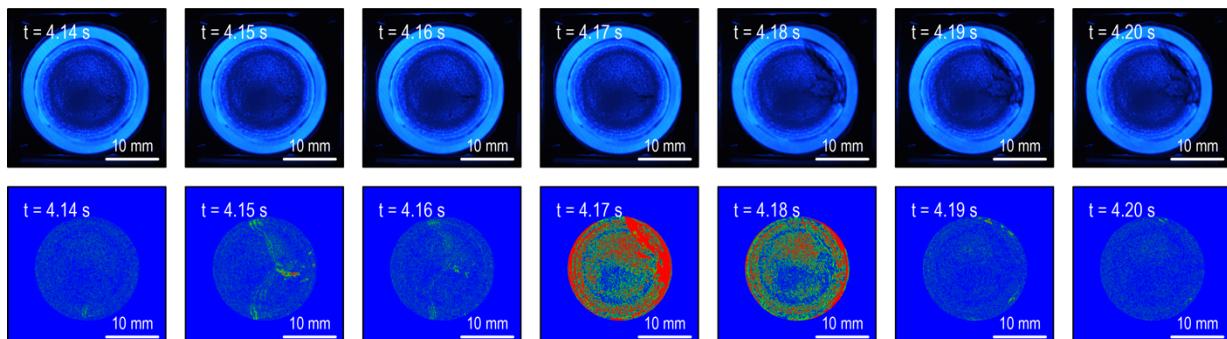


図3 着氷面の破壊モード(プローブ高さ: $h = 1 \text{ mm}$)(上:透過光像, 下:時間微分像)

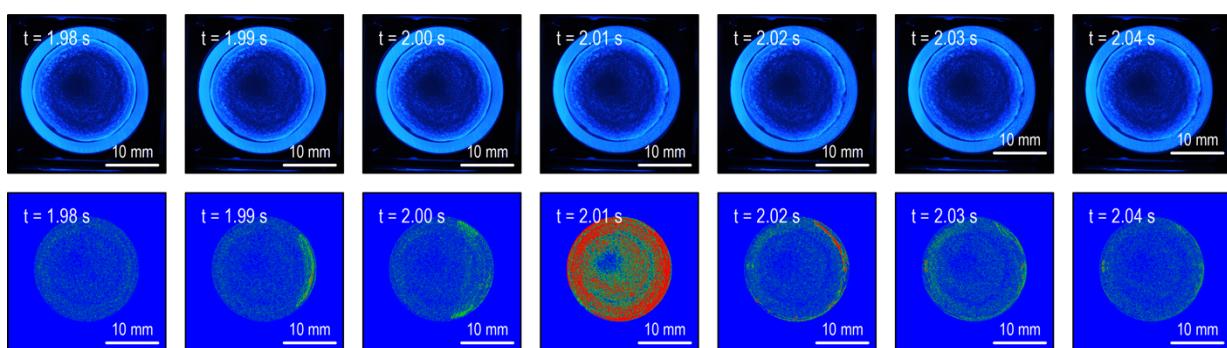


図4 着氷面の破壊モード(プローブ高さ: $h = 8 \text{ mm}$)(上:透過光像, 下:時間微分像)