

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

Rapture processes of ice-substrate interfaces subject to tangential force: Development of visualization apparatus

横国大(学)※長谷 剣人, (非)渡邊 大河, 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, Taiga Watanabe¹, 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[1,2]。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のために、着氷面における固着滑り現象のプロセスの把握を目指して、着氷面のその場観察が可能な着氷試験機を開発した。

2. 方法

開発した着氷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、並列に配した二個のロードセルで接線力の時間変化を計測し、最大力と接触面積の比から着氷応力を得る。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動画を得る構造とした。

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。ガラス基板の中心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。着氷面から高さ $h = 1 \text{ mm}$ の位置にプローブ先端を設定し、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

得られた力の時系列信号の例を図2に示す。時刻 $t = 0$ はプローブの駆動開始時刻を表す。二個のロードセルが計測した接線力(F_A と F_B)は単調増加し、 $t \sim 4.2 \text{ s}$ で最大値を示した後、急激に減少し、以後ほぼ零を示した(図2(a)と(b))。和信号($F_A + F_B$)の最大値は 276 N であり、これを接触面積で除すことにより、ガラスの着氷応力の値として 879 kPa を得た(図2(c))。なお、見掛け上は線対称配置で実験したが、差信号($F_A - F_B$)は零とならず、和信号の一桁下のオーダーの値を示した(図2(d))。

図2と同時に得た透過光像のスナップショットを図3右に示す。着氷面の破断まで顕著な変化は認められなかつたが($t = 3.00 \text{ s}, 3.50 \text{ s}, 4.00 \text{ s}$)、破断後のスナップショットには暗い筋模様が現れた($t = 4.50 \text{ s}$)。この筋模様は、着氷領域の右端(プローブ接触側)から左向きに伸びていることから、接触界面の損傷を伴う亀裂と予想される。

着氷面の破断プロセスの詳細を調べるために、透過光像の時間微分像を作成し、設定した閾値よりも輝度が急落した画素数 ΔN を数えた。氷柱の底面を構成する画素数 N_0 との比をとると、 $t = 4.17 \text{ s}$ に $\Delta N/N_0 \sim 30\%$ 程度の卓越したスペイクが現れた。そこで、この時系列信号を拡大し、拡大した力の和信号と差信号と重ねて分析した。図3左のグラフより、時刻 $t \sim 4.2 \text{ s}$ に生じた着氷面の「瞬間的な破断」は「有限な時間を要するイベント」であり、その時間のオーダーは 30 ms であることがわかつた。また、透過光像の時間微分解析により、破断に先立つ多数の前兆現象の把握が可能となること、更には、 $\Delta N/N_0 \sim 0.5\%$ 程度の前兆現象($t = 3.79 \text{ s}, 4.15 \text{ s}$)が接線力に影響を及ぼし、それらを契機に接線力の時間変化が鈍化することがわかつた。

4. 結言

本研究では、着氷面をその場観察しながら接線力を計測し、破断に至るプロセスを実時間計測する着氷試験機を開発した。今後の表面材料開発と表面形状設計の基礎となる着氷ガラス面の破断プロセスについて、力と時空間のオーダーを定量的に把握することができた。なお、紙面の都合により割愛した全反射光観察の結果については、講演で報告する。透過法とは異なる画像が得られる全反射法の併用により、着氷面の破断プロセスの理解を深めることができる。

文献

- [1] M. J. Kreder et al., Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery?, *Nature Reviews Materials*, **1**, 15003 (2016).
- [2] Z. He et al., Design of icephobic surfaces by lowering ice adhesion strength: a mini review, *Coatings*, **11**, 1343 (2021).

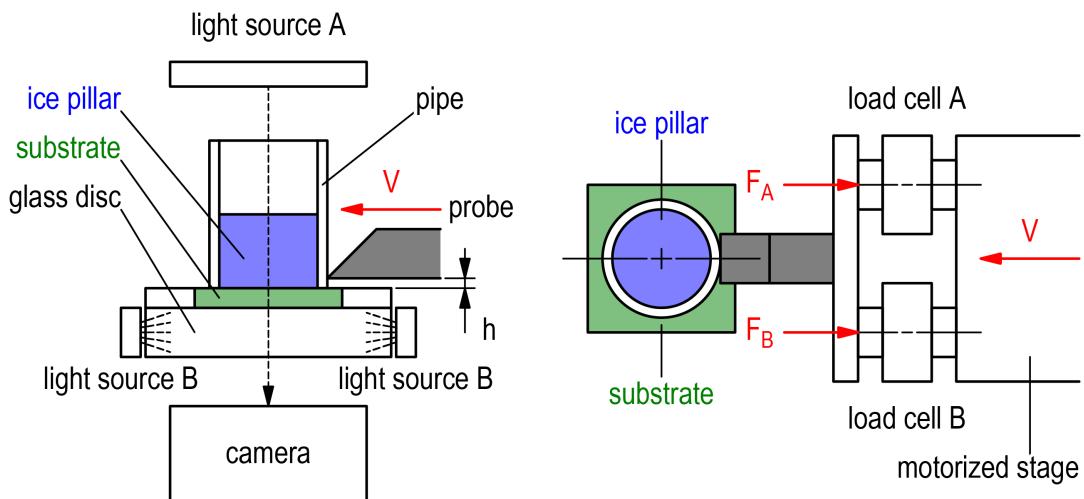


図1 開発した着氷試験機の概念図。左:側面図, 右:上面図。

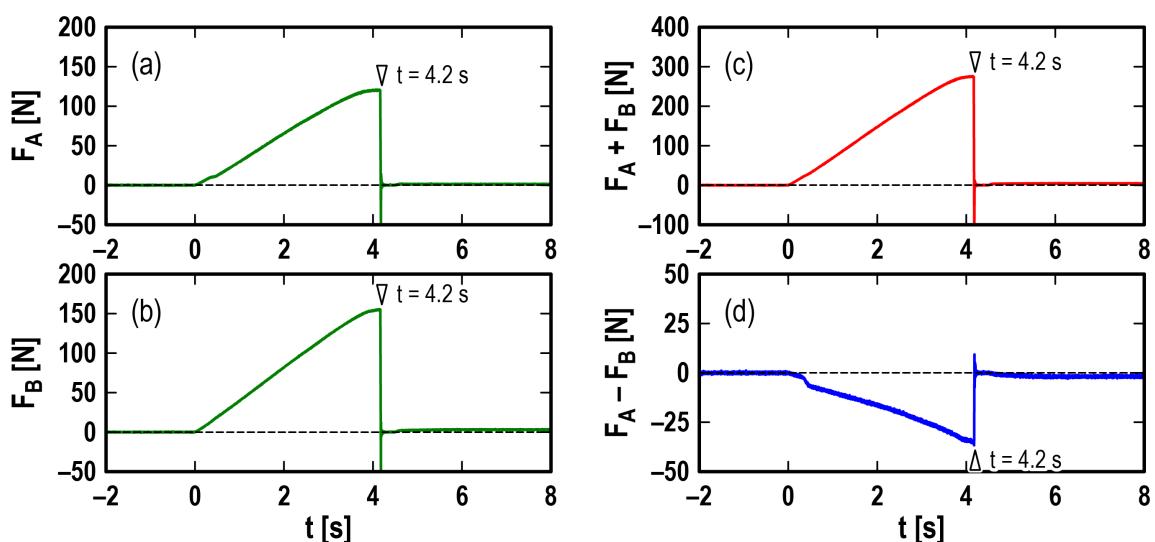


図2 得られた力の時系列信号の例。(a) ロードセル A の信号, (b) ロードセル B の信号, (c) 両者の和信号, (d) 両者の差信号。基板:未修飾ガラス。 $T = -15^{\circ}\text{C}$, $h = 1 \text{ mm}$, $V = 0.1 \text{ mm/s}$ 。

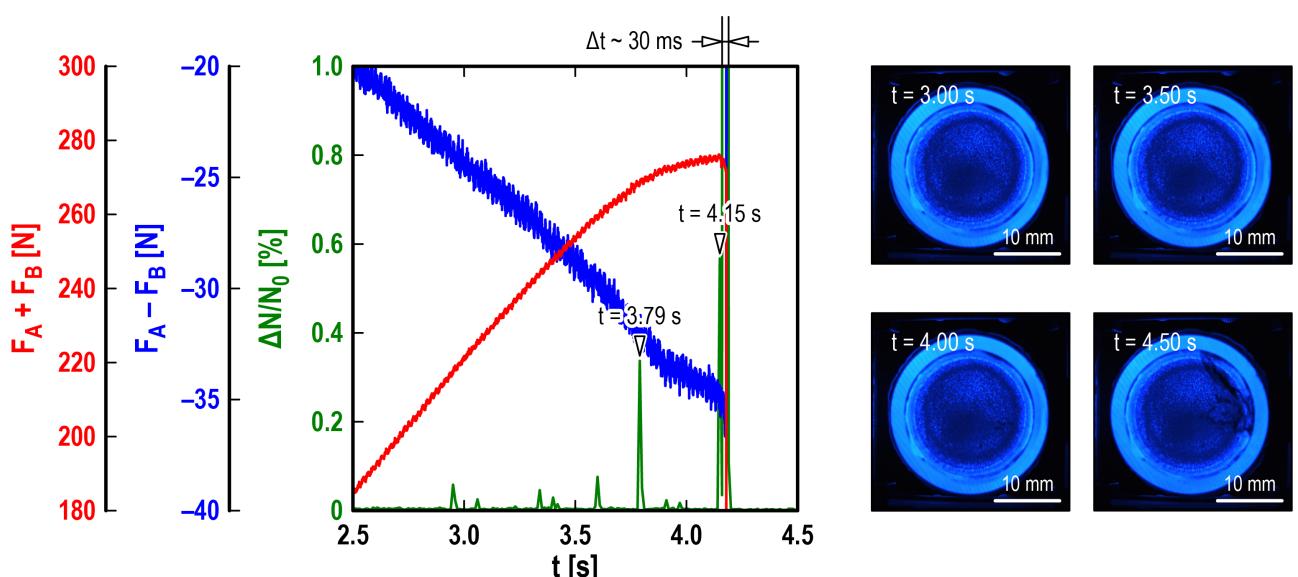


図3 着氷面の破断プロセス(赤:和信号, 青:差信号, 緑:輝度が急落した画素数の割合)と着氷面のスナップショット(可視化手法:透過法)。基板:未修飾ガラス。 $T = -15^{\circ}\text{C}$, $h = 1 \text{ mm}$, $V = 0.1 \text{ mm/s}$ 。