SPM を利用した霜形状と霜の付着力の測定方法の検討

Discussion on measurement methods of frost shape and adhesion force of frost using SPM

○伝学 鋸持 義明 (中大院 学)

機正 松本 浩二 (中大理工)

機正 寺岡 喜和 (中大理工)

Yoshiaki Kenmotsu, Koji Matsumoto and Yoshikazu Teraoka, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo

Frost adhesion to a cooling surface causes many serious accidents accompanying economic losses. Therefore, it is necessary to clarify the mechanism of frost adhesion to the cooling surface both scientifically and technologically. Considering the size of frost, investigation in micro scale field is essential. However, there has been no the investigation. Thus, in this paper, a scanning probe microscope (SPM) with different radii of the probe attached to the cantilever was used, and the methods to measure frost shape such as the diameter and height and adhesion force of forest to the cooling surface and their effectiveness were investigated, varying humidity and cooling time.

Key Words: Shape of Frost, Adhesion Force of Frost, Micro Scale Field, Scanning Probe Microscope

1. 緒言

霜の冷却固体面への付着は様々な状況で問題となっている。例えば、伝熱面への着霜による冷却システムの効率低下などである。このように多くの状況下で起こる着霜の対策は急務である。そして、霜層寸法を考慮すると、微小スケールでの着霜現象の検討は重要である。そこで本研究では、第一段階として走査型プローブ顕微鏡（以後、SPM と記述）を用い、微小スケールでの霜形状の経時変化と霜の付着力の測定の可能性を検討した。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

本研究で使用了した実験装置を Fig.1 に示す。SPM 本体は温度、湿度、圧力などが制御できるチャンバー内に設置されている。試験板の温度制御は液体窒素とセラミックヒーターにより行われる。チャンバー内の湿度は所定の湿度の窒素ガスをチャンバー内に流入し、ファンで循環させることで制御される。チャンバー内の圧力は窒素ガスと真空ポンプにより制御される。測定中、チャンバー内に直結したグローブにより、チャンバー内の環境を維持しながら実験を行う。

その底面に熱伝導グリスが塗布された銅試験板（10mm×10mm×1mm）が、Fig.1 に示すようにセラミックヒーターの上に設置される。温度センサーは、試験板の下部にあるため、着霜する試験板表面の温度がわからない。そこで、予備実験によりセラミックヒーター温度と試料表面温度の関係を求め、その関係から試験板表面温度を推算した。

Fig.1 Experimental apparatus

2.2 SPM について

SPM は、先端に極めて微小なプローブが取り付けられたカンチレバーを片持ち梁のように固定し、試験板表面をプローブで走査させたときのカンチレバーの微小な撓みや反りといった相互作用を測定する装置である⁽¹⁾。

プローブは、走査範囲の上方左端より水平方向に走査を開始し、上方右端まで走査したら(トレース)、直ちに折り返して同じ軌跡を辿り(リトレース)一往復する。その後、プローブは1ライン下に移り、同様に一往復する。この動作を設定ライン数だけ実行し、走査時のプローブの垂直、水平方向の変位を検出する。なお、トレースとリトレースで2つのデータが得られる。

2.3 SPM の測定モード

本研究では、SPM のダイナミックモードと LFM(Lateral Force Microscopy)モードの2種類の測定モードを用いる。霜形状測定は、Fig.2 のようにダイナミックモードで行う。そのモードでは、カンチレバーを共振させた状態で走査し、試料(霜)とプローブの間欠の接触で垂直方向の変位を得る。一方、水平力測定は、Fig.3 のように LFM モードで行う。そのモードでは、プローブを試料に押しつけた状態でカンチレバーの長軸方向と直角方向にプローブを走査し、プローブの水平軸方向のねじれ量を検出する。走査時に、プローブが霜をかき取りながら進むので、そのときのねじれ量を検出することで霜と試験板の付着力が得られる。

2.4 水平力の算出方法

使用したプローブ材質は、単結晶シリコンであり、ダイナミックモードでは、その曲率半径 10nm、バネ定数 42N/m、LFM モードでは、先端部直径 8~10μm、バネ定数 0.073N/m のカンチレバーをそれぞれ用いた。また、Fig.4 に試料表面上でのプローブの走査1ラインの挙動を示す。トレースとリトレースで逆方向のねじれが検出される。このとき式(1)で求める V_0 の値を基準のゼロ点とする。走査はトレースとリトレースがあるが、最初に霜に接触するトレースに着目し、式(2)で求める F を1ラインの水平力と評価した。

Fig.2 Dynamic mode

Fig.3 LFM mode

しかし、試験板上に霜が存在する場合、トレースとリトレースで挙動が異なり、前述と同じ方法でゼロ点を決定できない。そこで、この場合の新たなゼロ点を後述の 2.5 節で示す方法で補正することで決定した。また、本報では、トレース後の試験板上での残霜の確認方法が今だ十分に確立されていないため、現段階ではトレース時の測定値から試験板表面とプローブ間の摩擦力を引いた値を 1 ラインでの“霜のかき取り力”として評価した。

2.5 測定方法

チャンバー内温度を 20℃ に設定し、相対湿度 5%, 6% (絶対湿度 1.03g/m³, 1.24g/m³) の条件で測定を行った。また、予備実験により、走査範囲 100 μm × 100 μm, 走査速度 40 μm/s, 画素数 256 × 256, LFM モードでのプローブの押し付け力 100nN に決定した。

霜形状測定は、まず試験板表面温度 10℃ で試験板表面を測定し、表面状態を確認する。その後、冷却を開始し霜を試験板上に生成する。表面温度が -20℃ に達したら測定を開始する。なお、測定には約 20 分要する。

かき取り力の測定は、まず表面温度 10℃ で摩擦力を測定する。その後冷却を開始し霜を試験板上に生成する。表面温度が -20℃ に達した時刻を冷却時間=0 とし、走査位置を走査範囲の下方に設定し走査を繰り返しておく。目標の冷却時間になったら走査を止め、上方の走査に切り替えて測定を開始する。かき取り力の算出は、上方の走査で測定した第 1 ラインで行う。基準となるゼロ点は、下方の走査を止める直前の走査ラインの測定値を用いる。

3. 実験結果及び考察

3.1 霜形状測定

Fig.5 に相対湿度 5%, Fig.6 に相対湿度 6% での霜分布の測定結果をそれぞれ示す。Figs.5,6 のそれぞれの画像右下の表示は、走査範囲内の霜高さの分布と頻度を示す。Figs.5,6 から、広範囲での霜の生成が確認できた。また、5% より 6% の方が霜の成長が速いことがわかる。また、5% では、霜が柱状に成長しているが、6% では霜径が太く成長している。5% の場合の冷却時間が長い所と、6% の冷却時間が短い所の霜形状が似ていることから、6% でも冷却初期では、柱状に霜が生成され、時間の経過と共に霜の根元近傍で霜同士が結合し、霜径が太くなるように成長したと考えられる。今後は、霜の径・高さ、定位置での霜形状の経時変化の測定方法を検討する。

3.2 かき取り力測定

相対湿度 5%, 6% でのかき取り力と冷却時間の関係を Fig.7 に示す。各冷却時間で、かき取り力の測定はそれぞれ 10 回行い、測定結果の中央値を ●, ▲ 印で示し、最大値及び最小値をエラーバーで表した。Fig.7 より、5%, 6% 共に時間経過に伴い、かき取り力の増加傾向がみられた。5% では霜径が比較的小さく、その分布も一様ではないために、結

$$V_0 = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad \dots(1) \quad \begin{array}{l} V_0 [\text{V}] : \text{Zero position} \\ A_1 [\text{V}] : \text{Average of one line of Trace} \\ A_2 [\text{V}] : \text{Average of one line of Retrace} \end{array}$$

$$F = A_1 - V_0 \quad \dots(2) \quad F [\text{V}] : \text{Lateral force in one line scanning}$$

Fig.4 Scanning behavior of probe of one line

果のバラツキが大きくなったと考えられる。また、6% の場合、湿度の増加により霜の生成量が増加し、走査 1 ライン上の霜の密度が増加したことで、かき取り力も増加したと考えられる。試験板表面温度 -20℃ では、霜の成長速度が大きく、湿度 1% の差でも霜の生成量にかなりの違いが生じた。今後は、表面温度を高くすることで霜の成長速度を低下させ、適応可能な湿度範囲をより拡大する。また、現段階では、かき取り力として評価したが、今後は、霜と試験板の付着力への拡張を検討する。

4. 結言

- (1) 霜の生成の様子と霜形状を確認できた。
- (2) 湿度を変えながら霜のかき取り力の経時変化を測定し、測定方法の有効性を検討した。

5. 参考文献

- (1) B. Bhushan, Ju-Ai Ruan, "Atomic-Scale Friction Measurement Using Friction Force Microscopy : Part I-General Principles and New Measurement Techniques", ASME j. Tribol., vol.116, pp.378-338, 1994.

Fig.5 5% relative humidity

Fig.6 6% relative humidity

Fig.7 Relation between cooling time and scraping force