

## 研究報告

マイクロテクスチャリング表面における霜成長過程の  
その場 SEM 観察と表面設計指針

野老山貴行\*\*

The Observation of Frost Growth on the Micro-Texturing in SEM and Surface Design

Takayuki Tokoroyama\*\*

## Abstract

In general, frost generation on cooled surfaces have a harmful influence on prevention of heat exchange as well as falling frosts can cause contamination of some medical or daily products. The countermeasure of frost growth on the surfaces achieve by heating those surface by electronic heaters even if it is refrigerator. To enhance eco-friendly electronic devices which have heat exchanger, the surface design to prevent or detach frost from itself is highly required. In the current study, micro-texturing and wettability of the surface were hypothesized to have significant influence on growth process of frost. Several surfaces were prepared such as a lotus leaf which is famous material for natural texturing, and line and space type texturing which was manufactured on the silicon wafers. In the environmental scanning electron microscope equipped peltier device behind of sample can generate frost on the specimen surface, hence, in-situ SEM observation of micro frost was conducted. In the case of hydrophilic surface, frost quickly grew on everywhere with low contact angle to the surface, and then the observation area was covered by frost. On the other hand, if we conducted same procedure to obtain frost on hydrophobic surface, the contact angle toward the surface was higher than hydrophilic one and growth speed of frost was lower than hydrophilic surface. From the observation, the frost on hydrophobic surface grew without enhancing their contact area between frost and the lotus surface. In the case of frost grew on hydrophobic surface, the frost did not grow with widen the contact area between lotus leaf. To determine the accommodate micro-texture design, different width and depth of texturing was applied to observe, then the appropriate gap was determined between 2 to 8  $\mu\text{m}$ . The gap could minimize a contact area between frost and cooled surface which could decrease adhesion force.

## 1. はじめに

冷凍倉庫や食品工場など低温環境の必要な施設では、壁や天井への結露防止が不可欠である。この結露部分は雑菌やカビが発生する温床となることや、天井からの滴下による食品や医薬品などの汚染は不良品発生の原因となりうる。また、冷凍倉庫では、床に溜まった結露水が氷床となると、転倒事故の原因になるなど作業時の安全性が低下するばかりでなく、低温焼けと呼ばれる不良品の発生を引き起こすため、結露及び着霜の防止は重要な課題である。

これらの問題を解決するため冷凍庫の表面を改良し、

2016年7月22日受理

\*\*秋田大学大学院理工学研究科システムデザイン工学専攻機械工学コース, Mechanical Engineering Course, Department of Systems Design Engineering, Graduate School of Engineering Science, Akita University

霜ができにくい表面や結露しない表面を設計することが求められている。冷凍機は食料品・医薬品の長期保存や、長距離輸送のために必要不可欠な技術であり、一般家庭から業務用にいたるまで様々な容量と冷凍能力で使用されている。いずれの冷凍機も冷気の吹き出しと相対湿度との関係で霜が形成され、これが冷凍庫内の壁面に付着することにより、冷凍庫内の容量減少と冷凍能力の低下が起こるため、除霜を行う必要がある。しかし、この除霜の際に、冷凍保存されている物品を一時的に所望の冷却温度から高温にさらす弊害があることや、別途冷凍設備を準備する必要があり、その設備の維持費用や管理場所などのコスト増加を抑制することが求められるため、着霜しない表面が求められている。

冷凍庫に限らず、鉄道架線では架線に着霜することでパンタグラフと架線が離線した際にアーク放電が発生し、

パンタグラフの損傷や架線の溶断等の事故が発生することが知られている<sup>(1),(2)</sup>。また、単一のエンジンでマッハ数6までの飛行が可能な空気吸い込み式エンジン ATREXは、再使用型宇宙輸送システムとして期待されており、空気予冷却システム（プリクーラ）を用いている。性能向上のためこのプリクーラを小型軽量化することが求められており、冷却チューブ配列を密にする必要があるが、チューブ表面に着霜が発生し、所望の能力を発揮できない問題がある<sup>(3),(4)</sup>。以上のように様々な分野において着霜現象は冷却能力の低下や機器の破損、所望能力の発揮を妨げる要因であることから、着霜しにくい表面の開発は今後の必須課題と考えられている。

このような表面への着霜防止にははっ水性粒子や官能基物質を混合したポリマー塗膜を用いて付着を抑制する技術や<sup>(5)</sup>、超音波振動を用いた微小霜の壁面からの離法などが考案されている<sup>(6)</sup>。しかし、一般的に用いられている冷凍庫でも除霜のためにヒータによる加熱が行われ、余分な電力消費を行っている。冷凍庫内部への湿度を含む気体の流入は避けられないため、一般家庭用冷蔵庫において着霜そのものを防止することは困難である。熱交換器周辺に到達した水分子は、熱交換器表面近傍で冷却されて固化し、霜へと成長する。このような霜成長過程の観察研究は、湿度を含んだ気体を流入させる風洞及び、風洞内に冷却する基板とその表面を観察するための光学顕微鏡により構成され、観察できる微小な霜は mm サイズである。霜の成長は mm サイズに成長するよりも早い  $\mu\text{m}$  サイズにおいて起こっていることが著者らにより確認されており<sup>(7)</sup>、はっ水性を付与したマイクロテクスチャリングを有する基板表面への  $\mu\text{m}$  サイズの微小な氷を成長・観察可能な環境制御型電子顕微鏡を用い、着霜の素過程の観察から、霜の成長方向の制御可能性が著者らにより明らかにされている<sup>(8),(9)</sup>。親水性の表面では、 $\mu\text{m}$  サイズの初期霜の成長方向が表面を覆うように成長し、やがて表面を覆うことが観察されている。一方、はっ水性表面の場合、試料表面に対して垂直方向に霜成長することが確認されており、はっ水性及び表面のテクスチャリングの組み合わせが、霜の成長方向を制御し、かつ表面との接触面積減少に影響を及ぼすものと考えられる。本研究では、テクスチャリング内部への霜成長を抑制可能な溝幅、霜が表面に対して垂直方向に成長するためのテクスチャリング間隔について明らかにするため、電子線描画（Electron Beam, EB）法、超音波衝撃（Ultra-Vibration Digging, UVD）法及びダイサーによる切削（Dicing, D）法の異なる3種類の加工法を用いてシリコン基板上に  $\mu\text{m}$  サイズのテクスチャリングを作製した。また、表面にはっ水性処理を施し、微小な霜が成長する様相を環境制御型走査型電子顕微鏡

（ESEM, Environmental Scanning Electron Microscope）を用いて観察した。溝深さの影響を明らかにするために、EB法を用いたが、 $1\ \mu\text{m}$  以上の深さを作製することが困難であったため、2枚のシリコン基板を隣り合うように貼り合わせ、結果として得られた溝幅にて試験を行うことを繰り返し行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片及び微小霜成長観察方法

異なる3種類の加工法を用いてシリコン基板表面に溝幅、ピッチ及び深さの異なる試験片を作製した。Table 1 に EB 法、UVD 法、及び D 法により加工したシリコン基板表面上の凸平面部の幅（Line width）、溝幅（Space width）及び溝深さ（Space depth）をそれぞれ示す。また、2枚のシリコン基板を隣り合うように貼り合わせて作製した I 試験片も同様に Table 1 に示し、表中で示す幅、溝幅及び溝深さの模式図を Fig. 1 に示す。電子ビーム照射により作製した EB 試験片には、フィールドエミッション型電子顕微鏡による電子線照射を予めシリコン基板上にスピコートしてプリバークした樹脂にラインアンドスペースとなるようにビームを走査する方法を用いた。電子線照射により露光された樹脂部をリンス液にて除去後、現像後に残された樹脂（マスク）部ごとイオンミリング装置を用いて掘り、結果として得られた深さが  $0.3\ \mu\text{m}$  であった。次に超音波衝撃法で作製した UVD 試験片には、先端幅が約  $5\ \mu\text{m}$  の矩形型超硬工具を保持したロボットアームに超音波振動を与え、この先端部分がシリコン基板に接触するように自動ステージを往復運動させて作製する手法を用いた。往復は必ず接触時の方向が1方向のみになるように、復路では試験片表面から工具が離れるようにステージを動作させている。ステージの直線運動を  $50\ \mu\text{m}$ 、往復運動を5回行うごとに深さ方向のステージを  $0.5\ \mu\text{m}$  ずつ深さ方向へ送り、設計深さが  $10\ \mu\text{m}$  となるまで繰り返し行って作製した。その結果深さは約  $7\ \mu\text{m}$  であった。ダイサーにより作製した D 試験片には、高速回転するダイシングブレードを  $100\ \mu\text{m}$  の深さとなるように固定して切り込む手法を用いた。ダイシングブレードは幅約  $20\ \mu\text{m}$  を用い、一つの溝を切り込んだのち、溝と直角方向に約  $40\ \mu\text{m}$  送り、再度切り込みを繰り返し行って作製した。結果として得られた深さは約  $110\ \mu\text{m}$  であった。試験片は約  $5\ \text{mm}$  角に切り出され、ESEM 内の冷却ステージ上に配置された試験片ホルダ上にカーボン両面テープにより固定される。試験片及び観察時の SEM 内の配置を Fig. 2 に示

Table 1 The several texturing scales of line width, space width, and space depth prepared by EB, UVD and D method.

Name	Scale ( $\mu\text{m}$ )	Line width	Space width	Space depth
EB(Electron Beam)		1	1	0.3
UVD(Ultra-Vibration Digging)		9	9	7
D (Dicing) <sub>14</sub>		14	44	110
D (Dicing) <sub>24</sub>		24	44	110
I(Interstice) <sub>1</sub>			5	600
I(Interstice) <sub>2</sub>			2.5	600

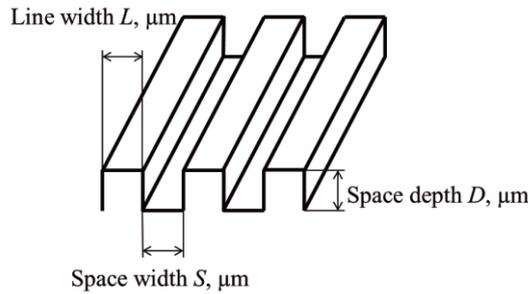


Fig. 1 The schematic image of line width, space width and space depth of micro-texturing on silicon wafer.

す。試験片を固定した銅合金製ホルダは約 $-20^{\circ}\text{C}$ まで冷却したペルチェ素子により冷却される。ESEMは装置背面からチャンバ内に水蒸気を導入している。高電圧を印加したフィラメントから射出された一次電子が試験片表面で反射し二次電子となる。この二次電子がチャンバ内に導入された水分子に衝突することで電子雪崩による電子増幅が起こり、検出器において結像する仕組みである。冷却された試験片表面の観察時の真空圧力を、通常観察時の約 $200\text{ Pa}$ から $800\text{ Pa}$ まで徐々に上昇させると、試験片表面にて飽

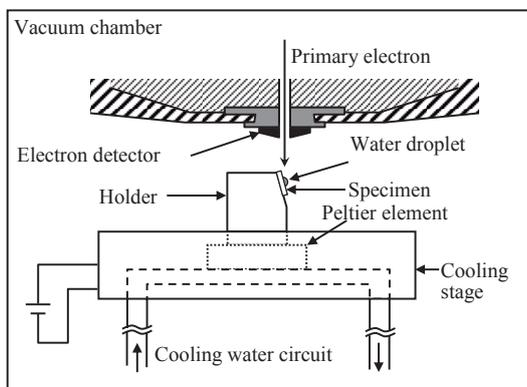


Fig. 2 The schematic image of ESEM chamber inside. Specimen was set on the Cu alloy holder which has 15 degree angle from vertical axis. The holder was cooled by peltier element which surface reached to  $-20^{\circ}\text{C}$  was cooled by circulation water.

和蒸気圧に到達した水蒸気が凝集し、試験片表面上に結露が発生する。この結露が成長する速度よりも速く氷に変化するように圧力上昇速度を任意に調節し、観察を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 表面粗さ及び親水性・はっ水性表面着霜観察結果

親水性及びはっ水性が霜成長方法に及ぼす影響を明らかにするため、シリコン基板の鏡面側 ( $R_a: 1\text{ nm}$ ) 及び裏面側 ( $R_a: 1\text{ }\mu\text{m}$ ) に親水性及びはっ水性を施した場合について観察を行った。鏡面に親水性処理を施した結果を Fig. 3(a)~(d)に示す。表面に霜が発生し始め ((a)~(b)), その後表面は氷の層により覆われ

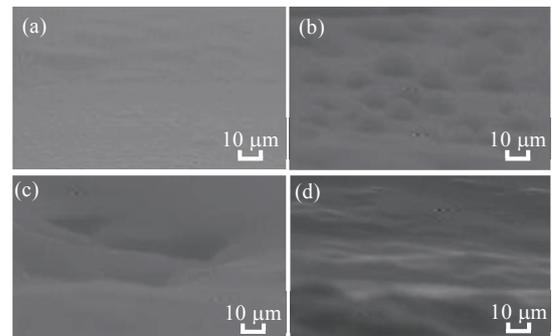


Fig. 3 The frosting process SEM observation of hydrophilic treatment silicon wafer (smooth surface with  $R_a: 1\text{ nm}$ ) (a) at the very beginning of frost generation, (b) frosting started, (c) the frost covered surface, and (d) frost layer covered the whole surface.

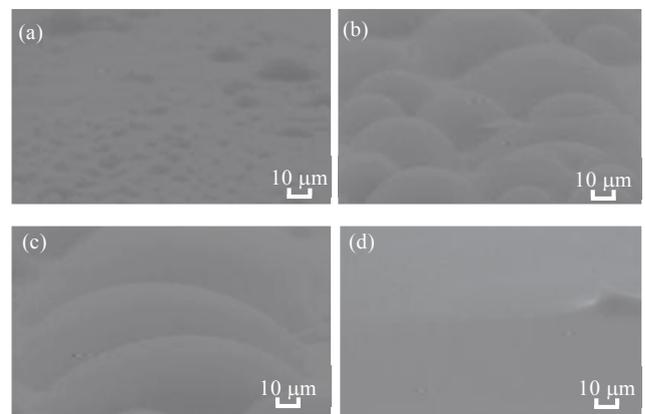


Fig. 4 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment silicon wafer (smooth surface with  $R_a: 1\text{ nm}$ ) (a) at the very beginning of frost generation, (b) frosting started, (c) the frost covered surface, and (d) frost layer covered the whole surface.

てしまう ((c)~(d)). このように表面を層状に覆う氷は溶けにくく, また, 霜と表面との接触面積も大きくなることから, 付着力も増大することが推測される. 次に示す Fig. 4(a)~(d)では同様の鏡面にはっ水性を施した場合の結果であるが, はっ水性であっても, 表面を覆う霜の成長はほとんど親水性と同様であった. 一方, 表面粗さの大きいシリコン基板の裏面を用い, 親水性処理を施した場合を Fig. 5(a)~(d)に示す. 鏡面の場合に比べ霜は真球形状ではなくいびつで, 独立した粒状で成長していくことが明らかとなった. また, Fig. 6(a)~(d)に示すはっ水性処理を施した場合, 各霜はそれぞれ独立して成長していたが (Fig. 6(a)~(c)), 最終的には前面を覆っていた.

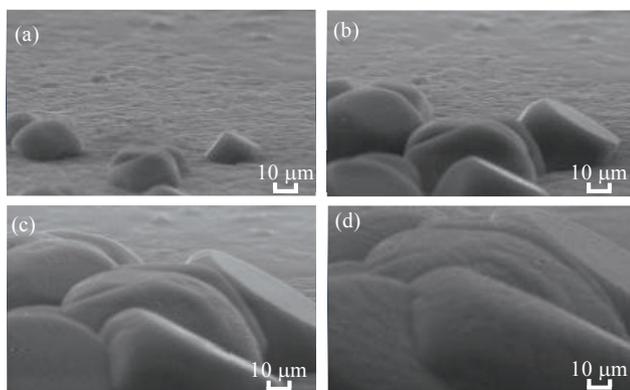


Fig. 5 The frosting process SEM observation of hydrophilic treatment silicon wafer (rough surface with Ra: 1  $\mu\text{m}$ ) (a) at the very beginning of frost generation, (b) frosting growing, (c) the frost conflicted each other, and (d) each frost combined together.

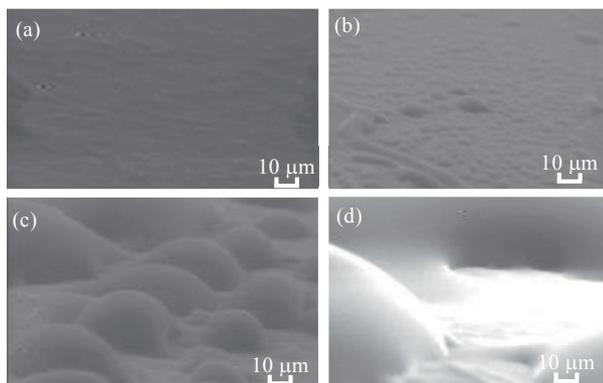


Fig. 6 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment silicon wafer (rough surface with Ra: 1  $\mu\text{m}$ ) (a) at the very beginning of frost generation, (b) frosting growing, (c) the frost enlarged respectively, and (d) each frost combined together.

### 3.2 蓮の葉試験片着霜観察結果

親水剤を塗布した蓮の葉表面への微小霜成長の観察結果を Fig. 7(a)~(d)に示す. 蓮の葉表面には幅が約 10  $\mu\text{m}$ , 高さが約 5~10  $\mu\text{m}$  の突起があり, 真空圧力が飽和蒸気圧以下の (Fig. 7(a)) の条件では霜の成長前の状態が観察されている. 飽和蒸気圧に到達するように真空圧力を 200 Pa から徐々に増加させ, 微小な霜の成長が観察されはじめた (Fig. 7 (b)). 図中の矢印 1 は霜成長のはじまり部分に注目した場所を示している. この矢印部分には突起高さ約 6.7  $\mu\text{m}$  の突起が 4 つ集中している. この部分に霜が現れると, 4 つの突起ごとすべて覆って, 一つの氷の塊となっていることが観察された. 親水性表面の場合, 突起間に水分が凝集し, 微小な液滴から氷へと変化しているように観察結果から考えられる. その後霜の体積が増加するにつれて (Fig. 7(c)), ほぼ全ての突起間が霜により覆われることが観察された. 最終的に霜同士は水平面上互いに接触し, 成長した霜同士のすき間を埋めるように一枚の氷の板のように成長する過程が確認された (Fig. 7(d)).

一方, はっ水性表面の場合を Fig. 8(a)~(d)に示す. 霜成長前 (Fig. 8(a)) の表面は親水性表面の場合と同様に無数の突起がある. 図中矢印 2 は微小な霜の成長のはじまり部分に注目した場所を示している. 矢印で示された突起は親水性表面の場合と同様に周囲をいくつかの突起に囲まれているが, 霜の成長がはじまると (Fig. 8(b)), 一つの突起だけが霜に覆われ, 周りの突起まで霜に覆われていないように観察結果から考えられる. その後, 突起の体積が増加すると

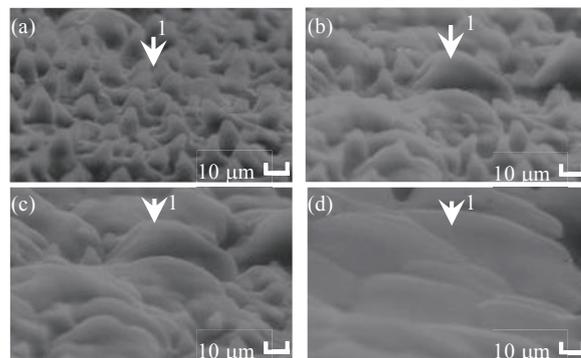


Fig. 7 The frosting process SEM observation of hydrophilic treatment lotus leaf (a) without any frost on the surface at the very beginning, (b) frosting started between the asperities, (c) the frost covered asperities and (d) flat frost was built on the asperities. The arrow shows the same position.

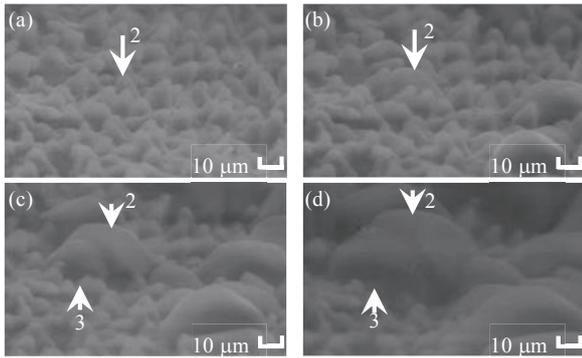


Fig. 8 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment lotus leaf (a) without any frost on the surface at the very beginning, (b) frosting started on the asperities, (c) the frost did not stack between asperities and (d) dot frost was built on the asperities. The arrow shows the same position.

(Fig. 8(c)), 図中矢印3で示した隣り合う霜と接触し、その界面には境界線が観察されている。矢印2及び3で示される霜は互いに体積が増加しても一つの塊にはなかなか成長しない様子が観察されている(Fig. 8(d))。最終的に表面上にはまばらに球形状に成長した霜が観察された。

突起の有無が微小霜成長に及ぼす影響を明らかにするため、親水剤及びはっ水剤を塗布した表面を蓮の葉と同様に準備し、同様の手順にて実験を行った結果、突起の無い表面の場合、親水性及びはっ水性のいずれの場合もほぼ同様に霜が成長する様子が確認された。

ESEM 内において霜成長が起こるためには、チャンバ内の水蒸気が試験片表面で冷却され、表面上に留まる必要がある。親水性及びはっ水性のいずれの表面の場合でも、微小霜成長の核となる初期の氷が付着した部分にチャンバ内の水蒸気が吸着して成長していると考えられる。蓮の葉表面のように微小な突起があり、かつ親水性の場合、水蒸気が吸着して微小な数 $\mu\text{m}$ の氷として表面上に留まることが可能であったものと考えられる。一方、はっ水性の表面の場合、はじめに核成長した氷部分に選択的に水蒸気が吸着しているものと考えられる。

### 3.3 EB 試験片着霜観察結果

微小霜成長の観察結果を Fig. 9(a)~(b)に示す。霜成長前の表面 (Fig. 9(a))には電子線描画により作製された1 $\mu\text{m}$ 凸幅及び1 $\mu\text{m}$ 溝幅が観察されているが、溝をまたいで霜が成長しており、テクスチャリングの影響が無いことが明らかである。

### 3.4 UVD 試験片着霜観察結果

矢印1で示した2本の溝間の平坦部に注目すると、Fig. 10(a)~(d)に示すように、霜の成長が観察された。霜成長前の表面 (Fig. 10(a))には数 $\mu\text{m}$ の大きさの初期の霜が生成され始めていることが観察されている。その後、Fig. 10(b)では、2本の溝間に形成された初期の霜が徐々に大きく成長し、溝内部へと徐々に入り込む様子が確認されている。その後 Fig. 10(c)及び Fig. 10(d)に示すように、霜が成長して大きくなることと同時に、溝の内部へ霜が成長していき、表面が覆われることが明らかとなった。しかし、霜は比較的表面から垂直方向に成長していることから、8 $\mu\text{m}$ 程度の深さ、または8 $\mu\text{m}$ 程度の凸部幅をテクスチャリングとして用いることにより、霜と表面との接触面積を減少できる可能性は示されている。

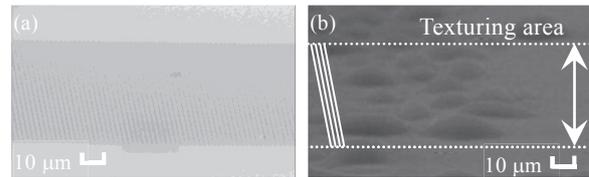


Fig. 9 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment EB pattern (a) without any frost on the surface at the very beginning and (b) frosting started.

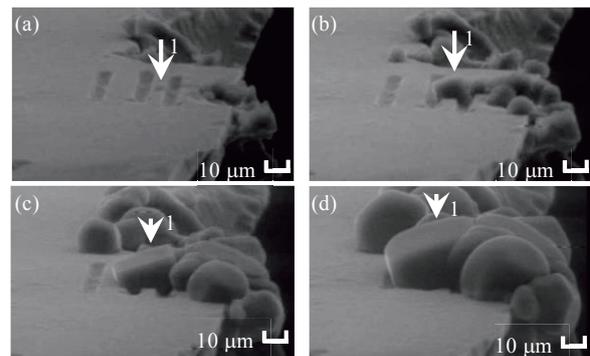


Fig. 10 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment UVD method (a) without any frost on the surface at the very beginning, (b) frosting started on between lines, (c) the frost enlarged over spaces and (d) frost covered over spaces.

### 3.5 D 試験片着霜観察結果

Fig. 11(a)~(b)に、ダイサーにより加工した14 $\mu\text{m}$ の凸部及び44 $\mu\text{m}$ の溝幅を有する試験片の霜成長の様子を示す。本試験片では冷却が不十分であったた

めか、霜としての成長よりも液滴としての成長が主であったが、Fig. 11(a)に示すように、凸部の平面部分(矢印2)でも、溝の内部の壁面部分でも(矢印3)、液滴の成長が観察されている。Fig. 11(b)では液滴同士が接触して(矢印4)しまう部分が観察されるなど、溝内部に氷が形成される状況が観察されている。このような44  $\mu\text{m}$ の溝幅では、霜の成長にとってテクスチャリングの影響はほぼないことが明らかである。

### 3.5 I 試験片着霜観察結果

シリコン基板を2枚隣り合うように貼り合わせた試験片を用い、溝深さを見かけ無限大とした場合の溝幅約5  $\mu\text{m}$ における霜成長の観察結果をFig. 12(a)~(c)に、また、Fig. 12(c)の溝部を拡大した写真を(d)に示す。溝の外側に微小な霜が発生し(Fig. 12(a))、その霜が徐々に大きくなると図中矢印1に示す霜の先端部分が、Fig. 12(c)に示すように溝をまたいで成長する様子が確認された。同様の試験を溝幅2.5  $\mu\text{m}$

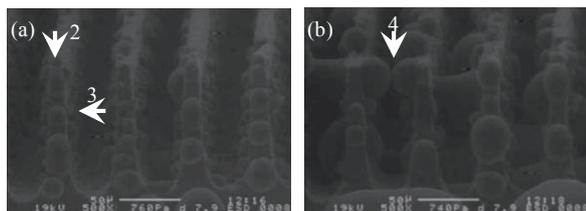


Fig. 11 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment D method (a) some frost on the surface at the beginning and (b) grown frost.

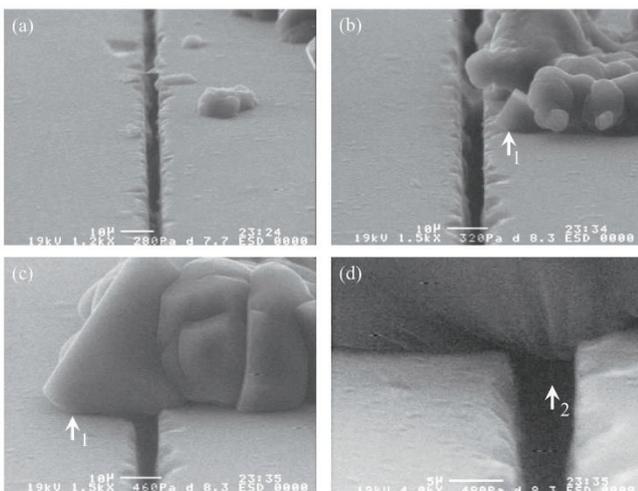


Fig. 12 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment I method of 5  $\mu\text{m}$  space (a) some frost on the surface at the beginning, (b) grown frost, (c) the tip of frost as shown by arrow 1 grew across the space and (d) the enlargement of (c).

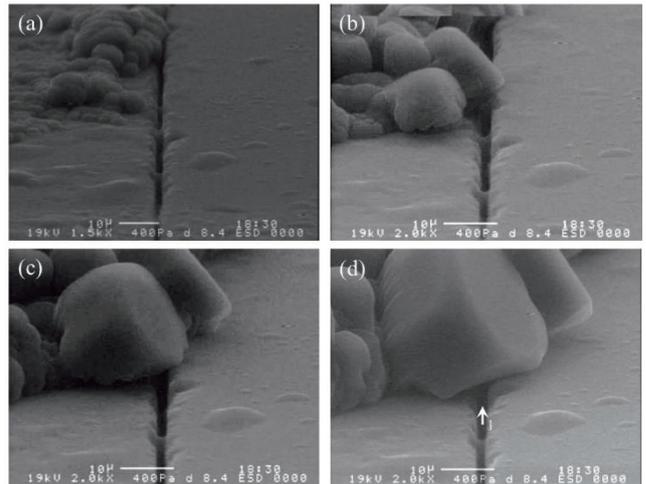


Fig. 13 The frosting process SEM observation of hydrophobic treatment I method of 2.5  $\mu\text{m}$  space (a) some frost on the surface at the beginning, (b) grown frost, (c) the tip of frost grew across the space and (d).

において実施した場合も(Fig. 13)、霜は溝を乗り越えて成長することが観察された。

## 4. 考 察

霜と表面との接触面積を減少させることは付着力減少のために必要と考えられるため、溝をまたいで霜が成長する機構となることが望ましい。そのためには、霜と表面との界面において、表面と接触している霜の輪郭部が表面に沿って広がることをいかに抑制するかが重要となる。これまでに得られた霜の成長と溝内部への侵入の有無をまとめてFig. 14に示す。図中に示す○は蓮の葉表面(蓮の葉表面に存在する突起の直径が約8  $\mu\text{m}$ 、突起高さが約10  $\mu\text{m}$ )の結果である。この蓮の葉の場合、突起内部への霜の成長は見られず、突起間をまたいで霜が形成され、その後蓮

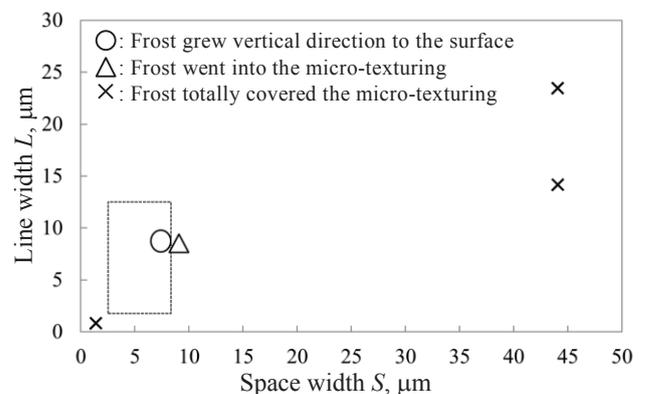


Fig. 14 The optimum line and space width of micro-texturing to prevent frost growing into space area.

の葉表面に対して垂直方向に霜が成長していた。本研究で用いた各溝試験片の中で  $I_{2.5}$  及び  $I_5$  の溝幅のみを変更した試験片の場合、溝内部への霜の侵入は確認されないため、図中の 2.5 から  $8\ \mu\text{m}$  までの範囲が溝形成のための理想的範囲と考えられる。次に△で示した UVD 試験片では、霜の成長に伴って溝内に霜が侵入していく様子が観察されているが、霜の成長方向が表面に対して垂直であることもあり、ちょうど溝内への成長が起こる条件になっているものと予想される。一方、ライン部である凸な平坦部分のみをパラメータとする試験片の作製が困難であったため、 $D_{14}$  試験片の結果からライン部が  $14\ \mu\text{m}$  以上では溝内部への侵入が起こるため、最適解ではないが、 $14\ \mu\text{m}$  以下のライン部幅とすべきことが明らかとなった。図中に示す×の条件はいずれも溝内部への霜の進入が観察されており、霜と表面との接触面積減少のための表面設計として不適当であることを示している。以上の内容から、霜成長の溝内部への侵入を防止し、表面から垂直方向に成長させるための溝設計指針として Fig. 14 中の点線で示す。

## 5. おわりに

本研究では、熱交換器等の表面に付着する霜を除去容易にするため、表面形状と濡れ性に着目し、霜と表面との接触面積を減少させるための設計指針を得るため、表面粗さ、親水性及びはっ水性処理及びマイクロテクスチャリングの霜成長過程に及ぼす影響について明らかにした。その結果、親水性及びはっ水性のいずれにおいても、表面粗さが大きい場合に霜が独立して発生することが明らかとなった。また、テクスチャリング内部への霜成長を抑制可能な溝幅、霜が表面に対して垂直方向に成長するためのテクスチャリング間隔は溝幅 2.5 から  $5\ \mu\text{m}$  であり、蓮の葉表面の場合は約  $8\ \mu\text{m}$  の突起間隔であることから、溝幅の最適値は数～ $8\ \mu\text{m}$  であることが明らかにされた。また、ライン部（凸部で平坦な部分）の理想的範囲はまだ明確ではないが、 $14\ \mu\text{m}$  以下であることが望ましいことが明らかとなった。

## 参考文献

- (1) Makkonen, L., (1998): Modeling power line icing in freezing precipitation, *Atmospheric Research*, Vol. 46, pp. 131-142.
- (2) Kamata, Y., Shishido, M., Endo, T., and Iikura, S., (2008): Resolution of Frost- Phenomena Adherent to the Overhead Lines and a Study on Prediction Method of Overhead Line Frosting, *RTRI REPORT*, Vol. 22, No. 1, pp. 5-10 (in Japanese).
- (3) Sato, T., Tanatsugu, N., Harada, K., and Kobayashi, H., (2003): Development Study of the Pre-Cooling System of ATREX Engine (2<sup>nd</sup> Report: Study of the Frost Formation on the Precooler), *ISAR Reserch Note*, Vol. 46, pp. 95-120 (in Japanese).
- (4) Fukiba, K., Sato, T., Kobayashi, H., and Ohkubo, H., (2008): Frost Formation Problem in the Development of a Hypersonic Turbojet Engine, *Transaction of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, Vol. 25, No. 2, pp. 97-106.
- (5) Ohisi, F., Murase, H., Kogure, H., Murata, H., and Kasuya, S., (1991): Durabilities of New Ice and Snow Repellent Coating, *Materials Life*, Vol. 3, No. 1, pp. 48-56 (in Japanese).
- (6) Li, D., and Chen, Z., (2014): Experimental study on instantaneously shedding frozen water droplets from cold vertical surface by ultrasonic vibration, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 53, pp. 17-25.
- (7) Tokoroyama, T., and Ito S., (2015): The Effect of Surface Texturing and Wettability on Frost, *Proc. JSME Tohoku Branch*, pp. 219-220.
- (8) Tokoroyama, T., and Tanaka, S., (2016): Controlling Frost Growth Direction by Micro-Texturing and Hydrophobicity and Its Observation, *Proc. JSME IIP Div.*, p. H-3-3.
- (9) Tokoroyama, T., and Tanaka, S., (2016): The Effect of Micro Texturing and Hydrophobicity on Frost Growth, *Proc. JSME Tohoku Branch*, pp. 115-116.