

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03994

研究課題名（和文）X線μCTを用いた霜層微細構造計測に基づく熱物質輸送解析による霜成長過程の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the frost growth process by means of the heat and mass transfer analysis bases on the frost micro structure measurement by using X-ray micro CT

研究代表者

松本 亮介（RYOSUKE, MATSUMOTO）

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：50268314

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：冷凍空調機器の熱交換器において霜の形成は多大なエネルギー損失を招くため、霜成長過程の解明は急務な課題である。本研究は、霜結晶構造と霜層内の熱物質輸送との関係の解明し、霜成長過程を明らかにすることを目的とする。X線マイクロCTを用いて霜結晶の3次元微細構造を測定することで、冷却面性状が結晶構造に与える影響を評価した。さらに、測定された3次元微細構造を用いて、氷結晶と湿り空気の複合熱伝導を解析した。霜層の成長と共に霜層表面温度が上昇するのに対し、霜層底部の温度は低下する。その結果、霜層底部の霜結晶は層内での昇華により供給された水蒸気によって成長することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空調機器の暖房運転において室外機の熱交換器で着霜が生じると、機器のエネルギー効率が30%近く低下することが報告されており、熱交換器の耐着霜の技術開発は重要な課題である。本研究は、霜結晶構造と霜層内の熱物質輸送との関係の解明により、霜成長過程を明らかにすることを目的とし、耐着霜性能を有する伝熱面の微細構造や表面処理性状の開発につながる基礎研究として位置づけられる。本研究結果により、はっ水性の冷却面表面では霜形成初期の水滴の形成に影響し、霜結晶密度が疎となることが示された。さらに、氷結晶と湿り空気の複合熱伝導を解析した結果、霜層内の水蒸気輸送が霜層の発達に影響することが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Frost formation on the heat exchangers of the air conditioning equipment causes the serious energy loss, thus the anti-frost formation technique is the urgent task. The purpose of this study is to clarify the frost growth process by estimating the relationship between the frost-crystal micro structure and the heat-mass transport phenomena in the frost layer. The three-dimensional microstructure of the frost crystal was measured using X-ray micro CT, and the effect of the cooling surface properties on the crystal structure was evaluated. Furthermore, the combined heat conduction of ice crystals and moist air in the frost layer was analyzed using the measured three-dimensional microstructure data. The surface temperature of the frost layer rises as the frost layer grows, while the temperature of the bottom of the frost layer decreases. As a result, ice crystals at the bottom of the frost layer grow by the water vapor supplied from the sublimation in the frost layer.

研究分野：伝熱工学

キーワード：霜 氷結晶 X線マイクロCT 3次元微細構造 熱物質輸送

### 1. 研究開始当初の背景

冷凍機器やヒートポンプの伝熱面が0 以下となる熱交換器では、着霜が生じる。霜は、空気中の水蒸気が冷却面にて氷に相変化した微細な氷の結晶の層である。その体積の約 90%が空気であり、等価熱伝導率は極めて低い。伝熱面表面で熱移動を阻害する霜層の形成は、冷却性能の大幅な低下を招く。また、付着した霜を取り除くため、電気ヒータなどによる加熱による除霜運転が間欠的に行われる。着霜による伝熱性能劣化と除霜時の電力消費は、約 20%の冷却性能低下を招いており、省エネルギーの観点から着霜問題の解決が強く望まれている。

顕微鏡観察により報告されている霜層モデルを図1に記す。空気中の水蒸気が冷却面に凝縮し、過冷却液滴を形成後、過冷却の解消により液滴が凝固し、個々の氷滴から霜結晶が生成する。霜発生初期は柱状の霜結晶が成長し、その後、樹枝状へと変化するとされており、霜層厚さの成長後も、霜層内への水蒸気の拡散・凝結により霜の密度が増加する。

雪の研究において有名な「中谷ダイヤグラム」では、雪の結晶の構造とその成長は、湿り空気の温度と水蒸気の過飽和度(過剰な水蒸気分圧)によって分類される。霜層内においても、層内局所の温度と水蒸気分圧が、柱状、樹枝状といった霜結晶構造を決定すると考えられるが、顕微鏡観察では霜表面しか観察されておらず、霜層内部の霜結晶構造は明らかとなっていない。

霜層内では、霜の成長とともに内部の温度分布と水蒸気分圧が時間的にも変化し、霜層内にて複雑に結晶構造を変化させながら、霜が成長する。着霜現象を支配する霜結晶構造と霜層内の熱物質輸送の関係について解明が進むことで、着霜の抑制技術の開発、そして着霜問題の解決につながる。

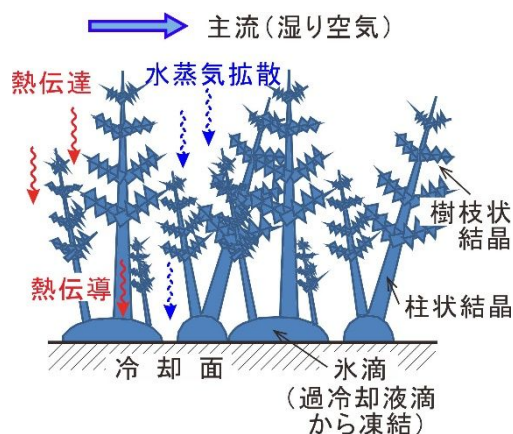


図1 顕微鏡観察による霜層モデル

### 2. 研究の目的

冷凍空調機器の熱交換器において霜の形成は多大なエネルギー損失を招くため、霜成長過程の解明は急務な課題である。霜層では、霜の成長とともに内部の温度分布と水蒸気分圧が時間的にも変化し、霜層内にて複雑に結晶構造を変化させながら、霜層が成長する。霜結晶構造と霜層内の熱物質輸送の関係を解明により、霜成長過程を明らかにする可能性がある。

近年の着霜研究においては、伝熱表面のぬれ性などの表面処理や、微細加工による着霜量の低減を目指した研究が多数報告されているが、そのメカニズムは不明である。図1に示すように、霜発生初期段階では滴状凝縮により冷却面に微小な水滴が形成され、過冷却解消を経て凍結した氷滴の上部より柱状の霜結晶が成長する。つまり、霜結晶は氷滴を起源として発生しており、親水性もしくははっ水性の冷却面の表面性状においては、霜形成初期の氷滴の形状が変化することで、霜層成長後の霜の結晶構造が変化することが示唆される。冷却面の表面性状が霜層微細構造に与える影響が明らかになれば、霜成長の抑制技術の開発にもつながる。

本研究では、「X線マイクロCTを用いた霜層微細構造評価」と「霜層内熱物質輸送解析と霜成長過程の解明」の2つのアプローチにより、冷却面性状が霜結晶構造に与える影響を明らかにするとともに、霜結晶構造と霜層内の熱物質輸送との関係を解明し、霜成長過程を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

「X線マイクロCTを用いた霜層微細構造評価」については、冷却面の表面性状が霜層微細構造に与える影響について、横浜国立大学が所有する卓上型X線マイクロCTを用いて測定した。着霜部は一辺約4mm、厚さ1.0mmのシリコンチップである。シリコンチップは、アルミニウム板中央部の直径6mmの凸部に貼り付けた。アルミニウム平板はペルチェ素子より-15℃に冷却した。0.0047kg/kgの湿度の湿り空気をシリコンチップ上部から流し込んだ。

親水性とはっ水性の表面性状を施した2種類のシリコンチップにて着霜実験を行った。親水面は30 wt%濃度の過酸化水素と95 wt%濃度の硫酸を1:4の割合で混合したピラニア溶液にシリコンチップを浸し、基板表面に酸化膜形成を施した。接触角は15°以下である。はっ水面は、シリコンチップ表面に直径200nmのナノワイヤの凹凸を形成することで接触角を高めている。その接触角は96.2°である。

「霜層内熱物質輸送解析と霜成長過程の解明」については、霜結晶の3次元微細構造がより詳細に計測が可能なSpring-8のBL20B2ビームラインのX線マイクロCT装置の測定データを用いた。直径6mmの冷却面に形成された霜層を180°回転させ、600枚のX線透過画像を撮影し、コンピュータ上に再構成することで霜層の3次元微細構造を取得した。実験から得られた霜結晶構造の1500 $\mu\text{m}$ ×400 $\mu\text{m}$ ×1115 $\mu\text{m}$ (548pixel×146pixel×407pixel)の領域について、氷結晶と湿り空気の3次元複合熱伝導の数値計算を行った。

#### 4. 研究成果

「X線マイクロCTを用いた霜層微細構造評価」についての成果を記す。

図2に親水面における着霜の写真を示す。親水性、はっ水性のどちらの冷却面においても、冷却開始後に冷却面上で滴状凝縮が生じた後、凍結し、微小水滴から霜の発生が確認された。霜層の成長後の $t=900\text{sec}$ では、チップ全体に霜が覆い、目視では表面性状の差による霜結晶の違いは観察されなかった。



図2 着霜時の写真(親水面)  $t=900$  秒後

15分の着霜後にX線CT撮影システムにて霜層の構造を観察した。回転ステージを180°回転する間に1200枚のX線透過画像を撮影し、3次元再構成を行った。幅1.0mm、奥行きが0.14mmの領域の霜層断面の構造を図3に示す。氷相を白色で示す。図3(a)の親水面では、幅1mmの間に3個の水滴が確認でき、その水滴の上部より複数の柱状の霜結晶が鉛直方向に伸びる。高さが $z=0.7\text{mm}$ を超えると斜め方向へ伸びる結晶構造に変化する。なお、40 $\mu\text{m}$ 程度の小さな水滴からは霜結晶の成長は観察されなかった。

一方、図3(b)のはっ水面では、幅1mmの間に水滴が8から9個存在し、水滴上の $z=0.1-0.3\text{mm}$ 付近で、水滴を覆うように平板状の結晶が観察された。その上部では、斜め方向に平板状の結晶が重なるように形成され、平板状結晶の端から柱状の結晶が鉛直方向へ伸びていることが確認された。そのため、平板状結晶の上部においては、霜結晶が存在しない空間が存在する。そのため、局所的に霜密度が低い領域が観察された。

以上のように、「X線マイクロCTを用いた霜層微細構造評価」については、表面性状が親水性とはっ水性の異なる冷却面を持つシリコンチップに霜を形成させ、霜層の微細構造をX線 $\mu\text{CT}$ を用いて測定し、冷却面表面性状が霜層微細構造に与える影響について評価した。

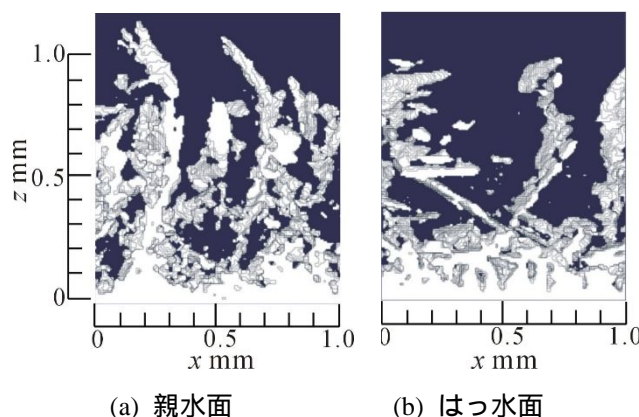


図3 霜層微細構造



「霜層内熱物質輸送解析と霜成長過程の解明」についての成果を記す。

図4に霜層内の3次元温度分布の計算領域を示す。SPring-8で計測した霜成長中の各時刻における霜層の3次元微細構造の $1500\mu\text{m}\times 400\mu\text{m}$ の領域を切り出し、氷結晶の形状の実験データに基づき計算格子を形成して、定常3次元熱伝導方程式を解くことで霜層内の温度分布を評価した。氷の熱伝導率を $2.200\text{W/mK}$ 、空気熱伝導率を $0.02421\text{W/mK}$ である。計算領域底面の冷却面温度は $258\text{K}$ の均一とした。なお、加熱面である計算領域上面には、自然対流の相関式から求めた熱伝達率を与え、空気的主流温度 $287\text{K}$ と与え、計算領域上面からの熱流束を与えた。

霜層内で氷が占める体積割合は約20%であるが、熱伝導率の高さから霜層内の熱移動は氷結晶の熱伝導による熱移動が支配的である。霜層の成長と共に霜層表面の結晶先端温度が上昇し、霜層表面での霜成長が鈍化する一方で、霜層底部の空気の温度は氷結晶に囲まれるため温度が低下する。その結果、霜層表面の氷の温度は霜層内の空気よりも高いため、飽和水蒸気濃度の差が生じ、霜層上部の氷結晶で昇華(氷結晶から蒸気に相変化)、そして下部の氷結晶に逆昇華(着霜)が生じることが数値計算結果より明らかとなった。

このことから、霜形成初期の氷滴の形状だけが霜層構造に影響を与えるのではなく、霜層成長により霜層自体が熱抵抗となることで急激な温度勾配が生じ、層内での水蒸気輸送が活発化し、霜層底部の氷結晶の微細構造に影響を与えていることが示唆される。

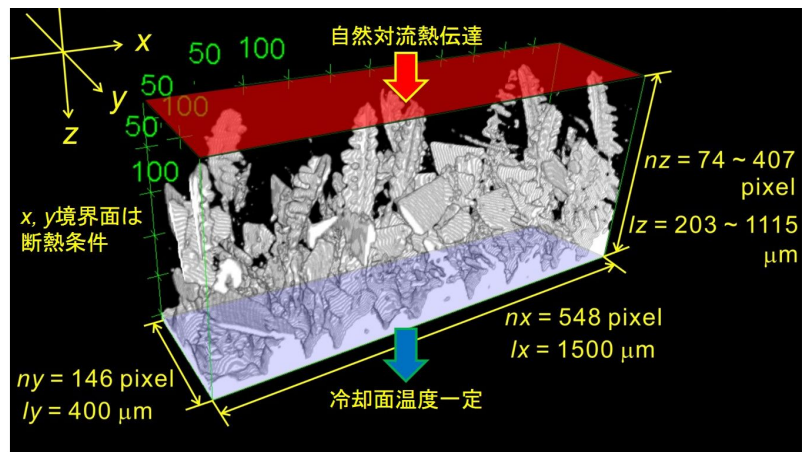


図4 霜層内の3次元温度分布の計算領域

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 松本亮介, 西浦雄人, 塩川貴大, 榎原拓郎, 小田豊, 清水智弘, 依岡拓也, 荒木拓人	4. 巻 -
2. 論文標題 霜層微細構造に及ぼす冷却面性状の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11322/tjsrae.20-20_EM_OA	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西浦雄人, 松本亮介, 塩川貴大, 清水智弘, 依岡拓也, 荒木拓人
2. 発表標題 霜層微細構造に及ぼす表面性状の影響
3. 学会等名 2019年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西浦 雄人, 松本 亮介, 長澤 佳輝, 塩川 貴大, 清水 智弘
2. 発表標題 X線 $\mu$ CTを用いた霜層微細構造における表面性状の影響
3. 学会等名 日本機械学会関西支部定時総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本亮介, 西浦雄人, 塩川貴大, 榎原拓郎, 小田豊, 清水智弘, 依岡拓也, 荒木拓人
2. 発表標題 霜層微細構造に及ぼす冷却面性状の影響
3. 学会等名 日本冷凍空調学会学会誌冷凍
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	小田 豊  (ODA YUTAKA)  (50403150)	関西大学・システム理工学部・准教授    (34416)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------