

令和元年6月19日現在

機関番号：32639

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06130

研究課題名(和文)境界層内の気液および固液相変化を利用した着霜の低減化

研究課題名(英文) Reduction of frost deposition by using gas-liquid and solid-liquid phase change in boundary layer

研究代表者

大久保 英敏 (OHKUBO, Hidetoshi)

玉川大学・工学部・教授

研究者番号：80152081

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：大久保らは、人工霜の生成・成長を防止または抑制することを目的とし、(1)冷却面に微細加工を施し、凹凸面の凹部(溝部)の着霜を抑制し、凸部表面から霜結晶を生成・成長させる方法、(2)冷却面表面上または温度境界層内に微小担体を設置し、冷却面表面での霜結晶の生成を抑制するとともに、微小担体上に霜結晶を生成・成長させる方法を提案している。

本研究では、(1)および(2)の方法に関する基礎的研究を行い、着霜曲線の領域I, II ($-75 < tw < 0$, tw :冷却面表面温度)における着霜の低減化に関する検討を行った。結果として、熱移動を低下させることなく、冷却面表面への物質移動を低減することを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

着霜現象は、熱移動と物質移動の同時移動現象であり、熱移動と物質移動の間には相関関係が成立する。本研究は、湿り空気中の水蒸気が境界層内で凝縮または凝固した後に、冷却面近傍で過冷却液または氷として微小担体上に付着させ、みかけ上、物質移動を制御することを提案しており、このような現象が確認できたことは、着霜現象をマイクロ現象として理解することに繋がる。

現在普及している寒冷地仕様のヒートポンプでは、加熱・融解による除霜が行われており、効率の低下につながっている。本研究が成功した場合、地球温暖化対策への貢献、CO2排出権、トップランナー方式、省エネルギー等を考慮すると、社会経済への貢献は大きい。

研究成果の概要(英文)：The authors have proposed and tested several methods to reduce the mass transfer towards the cooling surface without hindering the surface heat transfer. The methods and their effects are as follows: (1), the cooling surface was micro-machined to control the deposition of frost in the grooved parts of the cooling surface, limiting the frost crystal formation and growth to the protruded parts of the surface ; (2), mirco-objects were fixed either on the cooling surface or in the temperature boundary layer to control the formation of frost crystals on the cooling surface by making frost crystals to form and grow on the micro-objects. The present study carries out fundamental research on the method (1) and (2) focusing on reducing the frost deposition in the region I and II ($-75 < tw < 0$: where tw is cooling surface temperature).

研究分野：熱工学

キーワード：物質移動 省エネルギー 冷凍空調

1. 研究開始当初の背景

現在、日本では、寒冷地におけるヒートポンプの普及が急速に進んでいる。ヒートポンプは二酸化炭素排出量の削減が可能な技術とされており、ヒートポンプの高効率化は民生部門における消費エネルギーを削減するための重要課題である。寒冷地におけるヒートポンプの高効率化の大きな課題の一つが着霜の防止である。低温機器の熱交換器に発生する人工霜は熱抵抗層となるばかりではなく、流動抵抗層ともなり、熱交換器の性能を低下させる。したがって、性能向上を実現するために、着霜の抑制や除霜の効率化を達成することが求められている。着霜の抑制には、霜結晶となる水蒸気の移動を防止することが必要となる。水蒸気の移動を防ぐ方法の一つは湿り空気の除湿であるが、除湿のためには除湿装置を組み込む必要がある。現状では、霜層が付着している熱交換器の表面温度を氷の融解温度以上に昇温し、霜層を融解させる除霜を行っている。これに対して、大久保らは、熱交換器の表面温度を上げずに、機械的に霜層を除去する機械的除霜を提案し、微細加工技術を用いて、冷却面表面の75%の領域に霜結晶が付着しない現象を見出し、この現象を利用することによって、霜層の付着力を低減させることに成功した。

2. 研究の目的

本研究では、低温機器の熱交換器で問題となる着霜の低減化および霜結晶の付着力の低減化技術のさらなる向上を実現することを目的とする。この目的を達成するため、温度境界層内に微小担体を設置し、温度境界層内で発生する凝縮および凝固を利用して境界層内での除湿を実現し、冷却面上に霜結晶が付着し難い現象を実現することを目標とする。また、境界層内で霜結晶を成長させ、霜層表面および霜層表面温度に関する検討を行うとともに、霜結晶の制御技術を提案し、その有効性を確認する。これらの研究から、熱移動を低減させることなく、冷却面への物質移動を低減する現象を実現する。

3. 研究の方法

冷却面表面に微細加工を施し、凹凸面の凹部（溝部）の着霜を抑制し、ぬれ性の異なる凸部表面から霜結晶を生成・成長させる方法および冷却面表面上または温度境界層内に微小担体を設置し、冷却面表面での霜結晶の生成を抑制するとともに、微小担体上に霜結晶を生成・成長させる方法に関する以下の基礎的研究を行い、着霜の低減化に関する検討を行った。

(1) 霜層表面および霜層表面温度の検討。

明確な定義がなく、未解明である霜層表面および霜層表面温度の検討を行った。

(2) 境界層内での相変化現象の解明。

温度境界層内の温度分布を把握するとともに、境界層内で凝縮液滴を捕獲できることを確認した。

(3) 霜結晶生成機構の制御および結晶成長の抑制。

境界層内に微小担体を設置し、境界層内で発生する凝縮および凝固を利用して、境界層内で霜結晶を成長させ、これを制御する霜結晶の制御技術を提案した。

4. 研究成果

霜結晶生成・成長機構を観察するための顕微鏡撮影システムに高速度撮影システムを組み込み、境界層内で発生する凝縮液滴および氷結晶が霜層表面に衝突し、付着する現象を撮影することに成功した（図1）。また、観察の結果、微細加工面および平滑面上にメッシュを設置した場合、冷却面近傍およびメッシュ表面近傍の霜層の空隙率が、平滑面上で成長する霜層と比較して、顕著に増大していることが明らかとなった。この事実は、霜層の構造が物質移動の低減化および掻き取り力の低減化に寄与していることを意味する。



図1 高速度撮影結果

明確な定義がない霜層表面に関しては、霜層表面温度について検討を行った。霜層表面温度の測定は、放射温度計および熱電対を用いて測定した。ここでは、前者を Exp.1、後者を Exp.2 と呼ぶこととする。Exp.2 の場合、湿り空気の温度境界層内温度分布を測定し、測定した温度分布から霜層表面温度を求めた。図2に、

温度境界層内温度分布を示した．図 3 に，金網面上で成長する霜層の表面を基準とした温度境界層内温度分布を示した．基準の位置($x_{ft} = 0$)は，霜層表面である．図中には，解析解から求めた温度分布および境界層厚さの計算値を併記した．計算値と実験値との対応は良好であり，金網面を設置した場合でも，自然対流の流れおよび温度分布は平滑面上での自然対流と同様であり，対流熱伝達を検討する場合，霜層厚さで定義した霜層表面位置で霜層表面温度を測定することが妥当であることが確認できた．一方，霜結晶表面からの電磁波による熱移動が放射伝熱量であることから，放射熱伝達の場合は，放射温度計で測定される表面温度で霜層表面を定義することが妥当である．

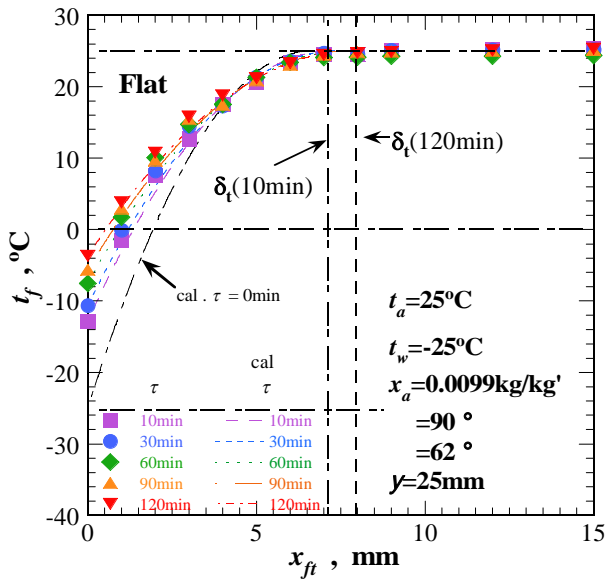


図 2 境界層内温度分布 (平滑面)

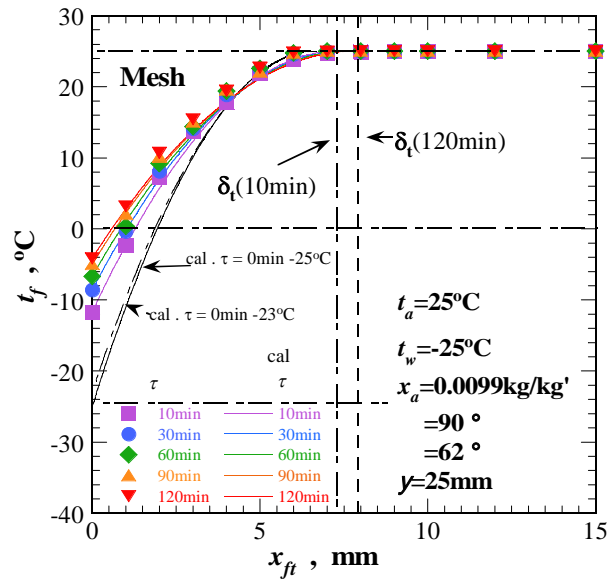


図 3 境界層内温度分布 (金網面)

図 4 に，鏡面仕上げを施した平滑面(a)および平滑面上に設置した SUS304 製の金網面 (b)から生成・成長する霜結晶の観察結果をそれぞれ示した．冷却面表面温度は， $t_w = -25$ である．着霜曲線の領域 I では，過冷却液滴は生成・成長し，過冷却解消後，丘状の氷結晶から複数の霜結晶が成長する．観察の結果，平滑面および金網面のいずれの冷却面上でも，過冷却液滴が生成した後に，合体しながら成長する様子が確認できた．しかし，過冷却が解消した後，結晶成長する過程が大きく異なり，金網面表面近傍では，霜層の空隙率が平滑面上で成長する霜層と比較して大きくなる． $t_w = -25$ の条件では，霜結晶の形状は樹枝状である．また，鉛直平面系の場合，成長した霜結晶が，重力の影響で倒れる様子が確認できた．さらに，成長する霜結晶の成長速度が，平滑面と金網面で異なる．

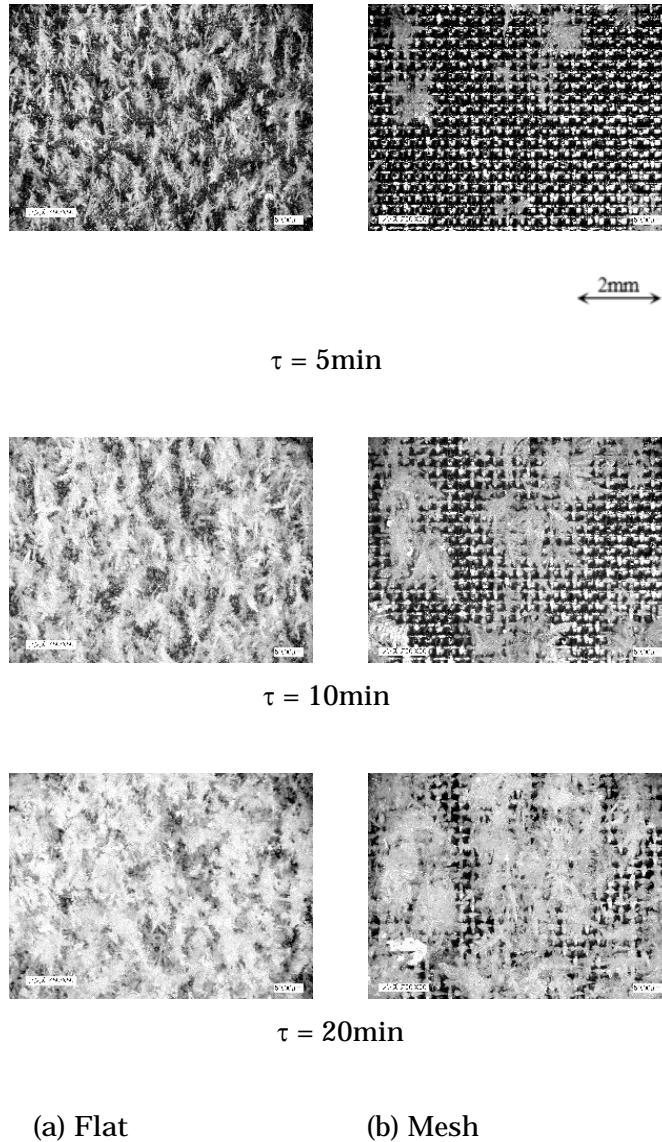


図4 霜結晶の生成・成長

霜層厚さの着霜曲線を図5に示した．図中には，平滑面表面の温度および金網面表面の温度を表面温度として過冷却度 ΔT_w を求め，計算値を併記した．金網面上に付着する霜層の厚さを予測する場合も，着霜曲線が有効であることが確認できた．

着霜量の着霜曲線を図6に示した．冷却面が平滑面の場合，計算値と平滑面上で成長する霜層の着霜量の測定値との対応は良好であった．また，冷却面表面に微細加工を施した場合，平滑面に比べて，本研究の実験条件の範囲内では，着霜量が低減することが分かっているが，金網面上で成長する霜層の着霜量は，微細加工面よりもさらに少なく，低減効果があることが確認できた．なお，金網面に成長する霜層の着霜量と金網面を設置した冷却面上に生成する霜結晶の着霜量を足し合わせた場合，微細加工面上で成長する霜層の着霜量と同程度の着霜量である．

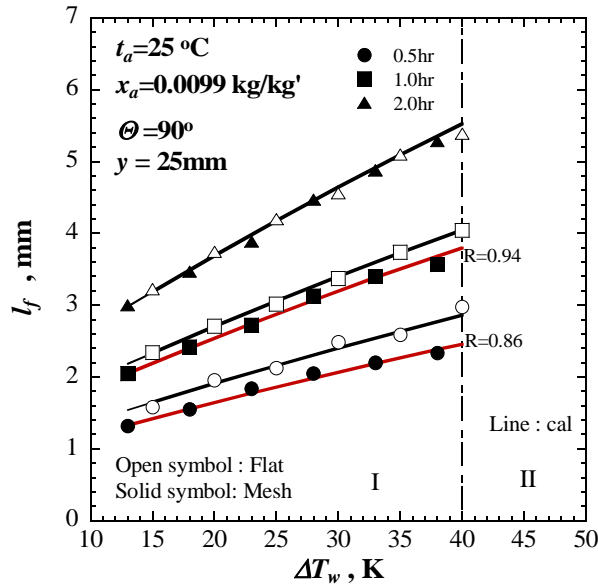


図5 霜層厚さの着霜曲線

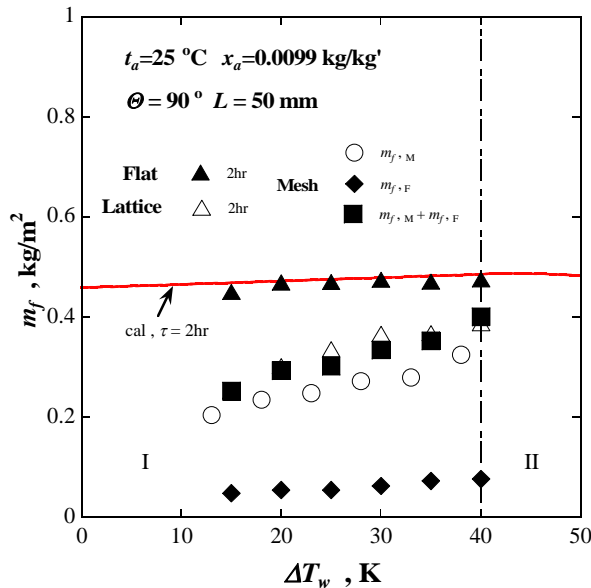


図6 着霜量の着霜曲線

以上の結果から、微細加工面および平滑面上にメッシュを設置することによって、“霜層を融解する従来の除霜方式”とは異なる“熱交換器の表面温度を上げずに、機械的に霜層を除去する機械的除霜”を実現する条件が明らかとなった。さらに、平滑面上にメッシュを設置し、メッシュの表面温度を0よりも低い温度に維持することによって、冷却面上での着霜現象を抑制し、メッシュ表面で水蒸気を霜結晶として成長させることが可能であることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

安喰春華, 大久保英敏, 宇高義郎 「霜層のみかけの密度と熱伝導率に及ぼす冷却面表面温度の影響」
日本熱物性学会第39回日本熱物性シンポジウム 2018年

H. Agui, H. Ohkubo, S. Matushita 「Effect of cooling surface micro-machining shape on frosting phenomenon on vertical plate」 The 29th International Symposium on Transport Phenomena 2018 年

横山翔一, 大久保英敏, 安喰春華 「着霜の低減化における基礎的研究」日本冷凍空調学会 2018 年度日本冷凍空調学会年次大会 2018 年

安喰春華, 大久保英敏, 金子宗平, 松崎正幹 「霜層厚さに及ぼす冷却面表面のぬれ性の影響」日本冷凍空調学会 2018 年度日本冷凍空調学会年次大会 2018 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：宇高 義郎

ローマ字氏名：(UTAKA, Yoshio)

所属研究機関名：玉川大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：50114856

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。