

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：32639

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560207

研究課題名（和文） 霜結晶生成機構の制御および結晶成長の抑制

研究課題名（英文） Control of mechanism of crystallization and inhibition of crystal growth of frost-crystal

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

研究成果の概要（和文）：

冷凍機やヒートポンプの熱交換器は除霜運転が必要であり、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。本研究では、熱交換器の表面温度を低温度に維持したまま機械的に霜層を除去する機械的除霜法を実現するために、冷却面表面の表面性状を変化させ、霜結晶の生成・成長の制御および抑制に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Frost formation can often lead to a deterioration of the performance of consumer products such as refrigerators and heat pumps. Generally, defrosting is carried out by melting the frost on the heat exchangers of the devices periodically. Here, we propose a new mechanical method in which the heat exchangers can still maintain their low temperatures while defrosting. To evaluate the frosting process, we used in this experimental investigation a new parameter, which is the force required scrap off the frost from the cooling surface. We have succeeded at controlling the mechanism of crystallization and inhibiting the crystal growth of frost-crystal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：結晶成長・省エネルギー・熱工学・エネルギー効率化・新エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

寒冷地仕様のヒートポンプを普及させるためには COP の向上が必要であり、革新的な着霜の低減化技術が生まれることが期待されている。霜結晶の生成・成長の抑制に関して、アメリカ、日本等で氷の付着力が弱い材

料が開発されており、氷の付着力が弱い表面性状の冷却面を用いて、霜層の低減化を実現することが検討されている。

着霜現象は熱および物質の同時移動現象であり、熱移動と物質移動の相関関係から、熱交換器の伝熱性能を増大させると物質移

動量も増大する。これまでに、霜層を融解することなく除霜に成功した例は「固気混相流を用いて付着した霜結晶を除去する方法」と「電場を用いて霜結晶を除去する方法」が挙げられるが、前者は固体粒子が飛散しないように閉空間を作ることが必要である。また、後者は着霜初期では効果があるが、霜層が成長するにしたがって効果が低減する。これらの技術はいずれも日本で考案された技術であり、着霜・除霜の分野では日本が先導的役割を果たしてきた。しかし、韓国および中国が自国で低温機器を開発するようになり、研究が盛んになってきた。現状では、これらの国の研究は応用的研究が多く、本研究のために有意な研究成果は見受けられないが、研究費の援助もあることから、今後、急速に発展することが予想できる。

## 2. 研究の目的

本研究の第1段階の目的は、空気側の条件を室温以下の低温まで拡張し、着霜曲線および非均質霜層成長モデルを用いて現象の理解を深めることである。結果として、着霜の低減化に必要な条件を提示する。

次に、第2段階では、冷却面表面性状を変化させ、霜結晶の生成・成長機構をモデル化する。本研究では、微視的観察を用いて、着霜曲線の領域I ( $0^{\circ}\text{C} < t_w < 40.1^{\circ}\text{C}$ ,  $t_w$ : 冷却面表面温度)における霜結晶の生成・成長機構を把握することを目的とする。空気側の条件が室温以上である場合、領域Iでは、過冷却液滴の存在が指摘されており、この液滴が凝固した後、霜結晶が成長する。この場合、霜結晶の付着力は過冷却液滴を制御することによって変化させることも可能であると考える。

以上の研究結果に基づき、霜結晶生成機構の制御および結晶成長の抑制を実現する方法を提案し、着霜現象の諸量である霜層厚さ、着霜量、霜層表面温度、熱流束を測定し、低減効果を検討する。さらに、申請者が最近提案した霜層の付着力を評価する。現段階では、霜層の付着力を直接求める方法を見出せていないことから、霜層を除去するために必要な力を測定し、これを霜層の掻き取り力として評価している。

本研究の目的が達成された場合、霜層を融解する除霜方法は不要となり、省エネルギーに寄与できる。

## 3. 研究の方法

着霜の低減化を実現するために、以下の方法を用いて、霜結晶の生成・成長の制御および抑制が可能な冷却面表面性状を明らかにした。

(1) 着霜現象に影響を及ぼす諸因子の影響の系統的理解。

大学等の研究機関で行われてきた研究では、空気側の条件が室温以上である場合が多く、室温以下の条件下での研究例は「昇華を利用した除霜」を除けば有意義な研究は少ない。一方、実用機器では、室温以下の低温環境下で運転される場合が多い。本研究では、室温以下の空気条件を実現するための実験装置を構築する。霜層の成長に及ぼす諸因子の影響を系統的に把握し、着霜の低減化に有効な条件を見出す。

(2) 霜結晶の生成・成長機構の把握。

観察システムを構築し、冷却面表面の性状を変化させ、これらの冷却面上での霜結晶の生成・成長機構を観察する。

(3) 霜結晶生成機構の制御および結晶成長の抑制。

霜結晶生成機構の制御および結晶成長の抑制を実現する方法を提案し、着霜現象の諸量である霜層厚さ、着霜量、霜層表面温度、熱流束および霜層の掻き取り力を測定し、低減効果を検討する。

## 4. 研究成果

着霜曲線の領域Iにおける着霜現象に及ぼす諸因子の影響を検討し、着霜量、霜層厚さ、霜層表面温度および伝熱量を予測する計算方法を見出した。

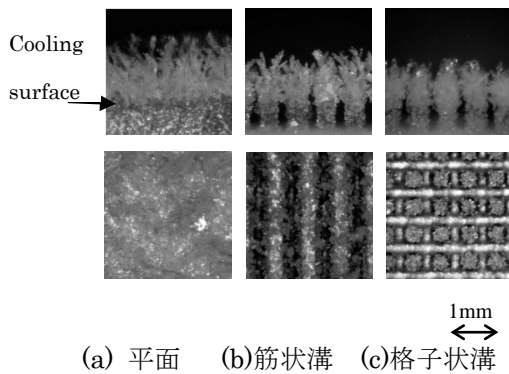
また、冷却面表面のぬれ性を変化させた場合および殺菌された菌を用いた場合の二通りの表面処理技術について検討し、現状では、長時間にわたって着霜を防止することは困難であるとの結論に達した。

次に、霜結晶の生成・成長機構を観察するシステムを構築し、観察を行った結果、金属面表面に溝加工を施すことによって表面性状を変化させることが有効であることを見出し、霜結晶の生成・成長の制御および抑制に成功した。

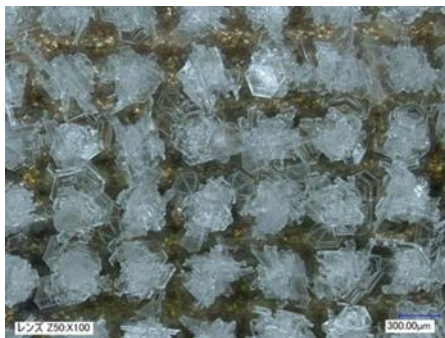
さらに、表面を微細加工し、みかけの表面性状を変化させた冷却面表面を用いて、自然対流下における鉛直平面系での実験および数値計算を行った。溝加工の寸法は過冷却液滴と同程度または数倍の大きさとした。観察の結果、凸部表面から霜結晶が成長し凹部には霜結晶は付着していないことが確認できた(図1, 2)。結果として、平滑面と比較して、霜層厚さが20~25%、着霜量が25%低減することが分かった(図3, 4)。一方、熱移動量に関しては、顕著な変化は無いことが分かった(図5)。したがって、物質移動量を減少させ、熱移動量を維持することを実現できた。数値計算の結果、微細加工面表面には微細な渦が発生しており、この渦の存在が物質移動に影響を及ぼしているものと判断した(図6)。また、霜層の掻き取り力は着霜時間が30min以内の場合80~85%低減することが分かった。したがって、機械的除霜を30min以内に

行うことによって霜層は容易に除去できることが明らかとなった (図 7, 8).

本研究成果は、冷却面表面温度を低温に維持したまま、空気噴流等で霜層を機械的に除去することに応用が可能であり、この機械的除霜システムが実用化できた場合、熱交換器の効率が向上し、省エネルギーを実現できる。現在、寒冷地仕様のヒートポンプでは、冷却面表面を氷の融点である  $0^{\circ}\text{C}$  よりも高い温度に上げることによって霜層を融かす除霜が行われているが、本研究の成果を熱交換器に利用した場合、効率の向上が実現できるだけでなく、機械的に除霜した霜結晶を蓄冷材として利用する利霜も可能となる。寒冷地仕様のヒートポンプを普及させるために、COP の向上が求められているが、微細加工面を用いた実験は、自然対流下だけではなく、強制対流下でも行い、低温・低湿度の強制対流下における実験においても、自然対流下の実験で得られた結果と同様の霜結晶生成機構の抑制および結晶成長の抑制が実現できることも確認した。



$t_a = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $t_w = -10^{\circ}\text{C}$ ,  
 $x_a = 0.0119\text{kg/kg}'$ ,  $\tau = 20\text{min}$   
 図 1 霜層内の結晶成長



冷却面表面微細加工の影響

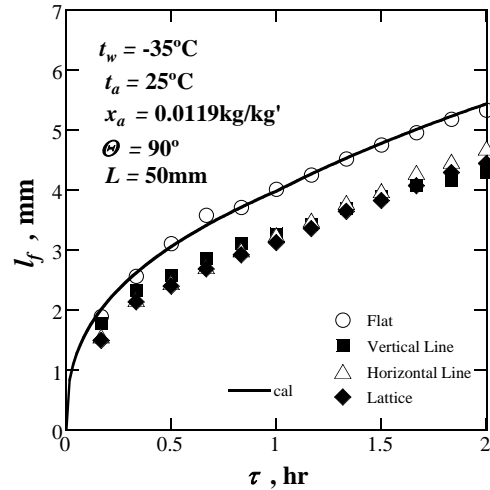


図 3 霜層厚さの時間的変化

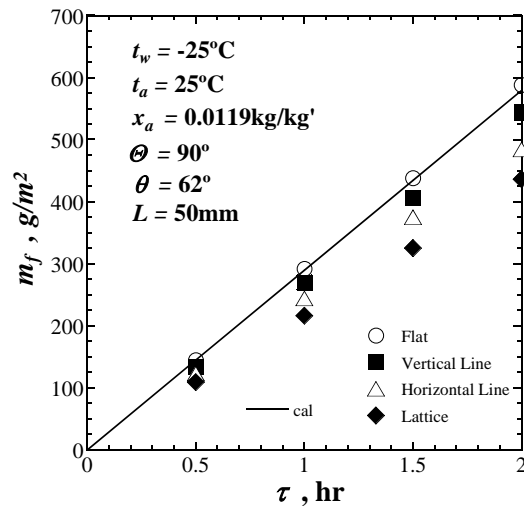


図 4 着霜量の時間的変化

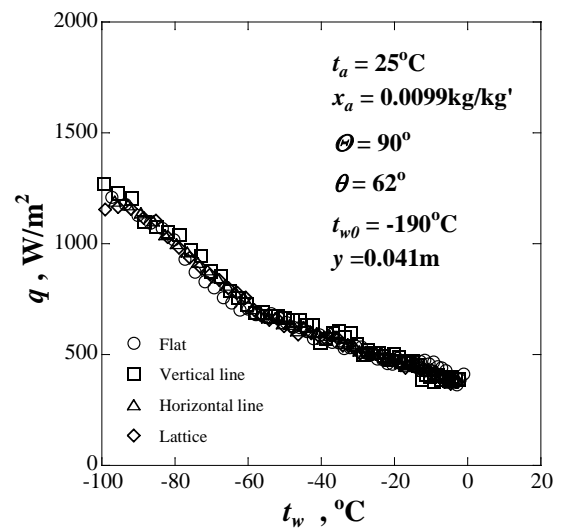


図 5 着霜を伴う熱移動

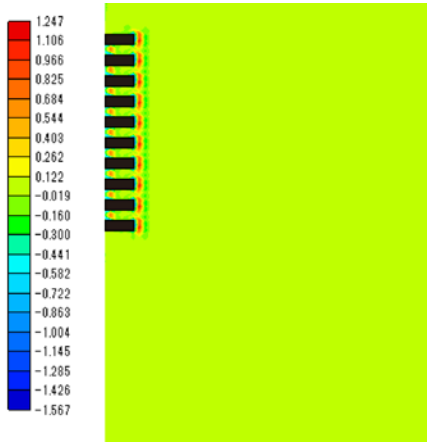


図6 数値計算結果

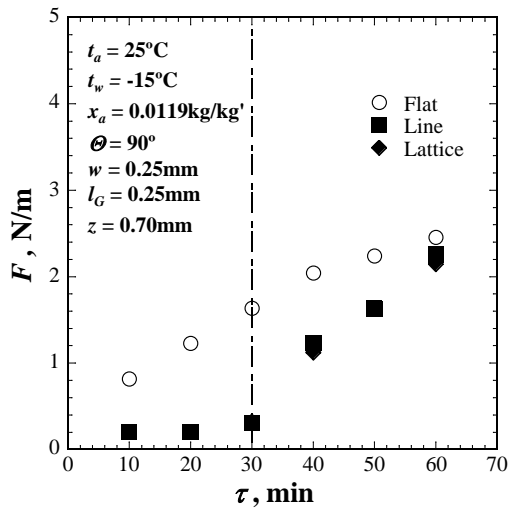


図7 霜層の掻き取り力の時間的変化

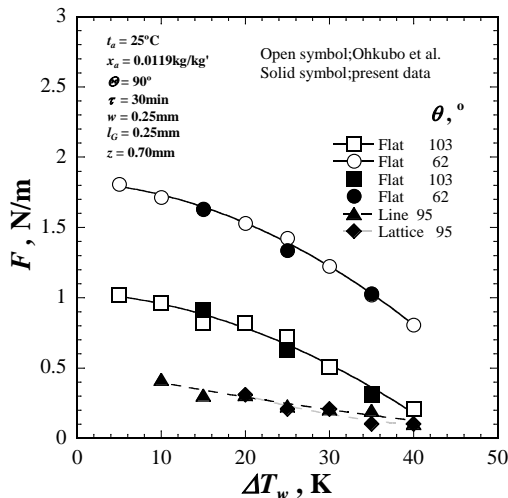


図8 着霜曲線 (掻き取り力)

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

- ① 着霜を伴う熱移動に及ぼす冷却面表面性状の影響, 大久保英敏, 松下将, 第50回伝熱シンポジウム, ウェスティンホテル仙台, 5.29, 2013.
- ② 冷却面上での着霜の抑制に関する基礎的研究, 大久保英敏, 松下将, 日本機械学会 第47回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学, 4.18, 2013.
- ③ A NEW DEFROSTING METHOD FOR UTILIZATION OF FROST, Sho Inoue, Hidetoshi Ohkubo and Shun Ikemoto, 10th IIR Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, 神戸大学, 7.30, 2012.
- ④ 霜結晶の成長に及ぼす冷却面表面性状の影響, 大久保英敏, 矢島健史, 池本駿, 第47回伝熱シンポジウム, 札幌コンベンションセンター, 5.28, 2010.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 熱交換器

発明者: 大久保英敏, 池本駿, 市ヶ谷賢太, 井上翔, 舟木智之 他

権利者: 東京電力(株)

種類: 特許

番号: 2010-227526

出願年月日: 平成22年10月7日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし