

## 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 3 月 31 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究（C）（一般）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560208

研究課題名（和文）微小スケール場での霜形状・構造と付着力の相関の解明

研究課題名（英文）Clarification of correlation between frost crystal dimensions/structure and adhesion force in micro-scale field

研究代表者

松本 浩二（MATSUMOTO KOJI）中央大学・理工学部・教授

研究者番号：60229549

研究成果の概要（和文）：走査型プローブ顕微鏡（SPM）による霜結晶の形状/構造/分布と霜結晶のかき取り力の測定方法を提案し、その妥当性を明らかにし、そして、着霜のメカニズムを解明するためにまず霜結晶発生から成長初期段階で、霜結晶生成に対する影響が大きいと想定される冷却面温度に加え雰囲気湿度を広範囲に変えながら、銅試験板上に生成される霜結晶の形状/分布、霜個数、着霜面積着霜質量と霜結晶のかき取り力の相関を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In a period from generation of frost crystals to primary stage of growth, using a scanning probe microscope (SPM), frost crystals dimensions/distribution, number of frost crystals, frosting area and mass were measured in micro scale field based on the method proposed by representative of applicants, varying surface temperatures of the copper test plate and humidities mainly governing generation and growth of frost crystals. Similarly, scraping forces, which has not been measured in the above period because of much more difficulty, were also measured. And then, the correlations among frost crystals dimensions/distribution and scraping force and influences of the cooling copper surface temperature and humidities on the correlation were investigated, respectively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：冷凍・空調，着霜

## 1. 研究開始当初の背景

（1）霜は 0℃以下で露点温度よりも低い冷却面に大気中の水蒸気が接触することで形成され、結晶構造を形成しながら冷却面に付着する。霜層は氷と空気の多孔質であり、霜層は時間共に成長するので、その構造も時間

共に変化する。着霜により、例えば、空調機器においては、低外気時の暖房運転時に室外熱交換器の暖房能力が低下する。冷蔵ショーケースやユニットクーラ等においては、庫内の熱交換器への着霜により、機器の効率が低下し、その結果、冷凍能力が低下する。さら

に、除霜運転では、余計な電力が必要となる。また、超音速機を開発する上で、空気予冷却器の冷却管群への着霜がエンジン性能の低下を引き起こすという報告も有る。さらに、カーブミラーへの着霜も大きな問題となっている。この様に、着霜現象は多くの状況で見られ、それは機器の性能低下を引き起こし、重大な事故の原因となることもある。よって、着霜現象の科学的・工学的解明は急務である。

(2) 従来、霜の付着力は氷に比べて非常に小さく、定量的に検討した研究は皆無である。また、温度・湿度・雰囲ガスの状態と霜構造には相関があり、特に温度(試験板表面温度)とは強い相関が有ると考えられるが、それらの霜の構造への影響の系統的、かつ、定量的検討も皆無である。そのため、着霜現象の本質的なメカニズム解明のために不可欠である霜構造と付着力の相関を明らかにすることは困難であり、全く行われていない。

(3) 着霜現象を考えると、霜層の寸法を考慮すると、マイクロスケールでの検討は重要である。

## 2. 研究の目的

(1) 多くの状況下で起こる着霜現象は経済損失を伴う重大事故の原因となり、その科学的・技術的な解明は急務である。着霜現象の解明において、霜層寸法および想定される霜の付着因子を考慮すると微小スケールでの検討は重要であり不可欠である。そこで、走査型プローブ顕微鏡(以降、SPM)により、微小(マイクロ)スケール場での霜結晶形状(根元径と高さ)/構造と霜結晶のかき取り力を測定する方法を提案し、その妥当性を明らかにする。

(2) 提案した方法で、銅試験板温度、雰囲気湿度、試験板種類、試験板表面状態を変えながら、微小(マイクロ)スケール場での霜結晶形状/構造分布および霜結晶のかき取り力の定量的相関を明らかにする。

(3) 霜と試験板界面に平行方向の霜の付着力に加え、界面に垂直方向の付着力の両者をそれぞれ測定し、霜の付着力の本質を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 微小(マイクロ)スケール場での測定を行うために SPM を使用する。SPM の LFM(Lateral force microscope)モードは、本来、カンチレバー先端のプローブと試験板表面の接触により生じるカンチレバーのねじれから、プローブと試験板表面の間の摩擦力を測定するのに使用される。この手法を応

用することで、試験板上に生成された霜をプローブでかき取る時の力を測定する方法を確立する。この場合、プローブ幅は、霜結晶の大きさを考慮して  $1.8\mu\text{m}$  程度とする。さらに、ダイナミックモードにより、霜の凹凸状態から霜層形状(根元径・高さ)が求まる。この形状の経時変化から霜構造を同定する方法を確立する。この場合、プローブ曲率半径は  $10\text{nm}$  とする。

なお、測定範囲を  $1.8\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$  とする。

(2) 試験板温度と雰囲気湿度を変えながら、霜結晶形状/分布/個数と霜結晶のかき取り力の経時変化を明らかにする。

## 4. 研究成果

走査型プローブ顕微鏡(SPM)により、雰囲気湿度と霜結晶が形成される銅製冷却試験板表面の温度を変えながら、霜結晶発生から成長初期段階での霜結晶形状/分布と霜結晶のかき取り力の相関へ及ぼす影響を微小(マイクロ)スケール場で定量的に検討し、以下の結論を得た。

(1) SPM において霜結晶形状(根元径と高さ)/分布および霜のかき取り力を測定する方法の提案し、その妥当性を示した。

(2) 霜結晶形状/分布および霜のかき取り力を測定するための SPM の最適測定条件を明らかにした。

(3) 霜結晶の形状測定において、プローブによる霜結晶の破壊の影響に関して、霜結晶の根元径では殆ど影響なかったが、霜の高さへの影響は大きいことを明らかにした。

(4) 霜結晶を円錐と近似することで破壊された霜結晶の高さを推定する方法を提案した。

(5) 霜結晶発生から成長初期段階のマイクロスケールでの霜結晶の形状(根元径と高さ)と霜結晶個数から霜結晶の着霜面積と着霜質量を算出する方法を提案した。

(6) 冷却面温度を変えながら冷却時間と着霜速度の関係を明らかにした。

(7) 霜結晶発生から成長初期段階試験板表面温度によらず、霜結晶は概ね均一に分布することを明らかにした。

(8) 霜結晶発生から成長初期段階での霜結晶の形状/分布、霜個数、着霜面積、着霜質量とかき取り力の相関の試験板温度と時間依存性を明らかにした(参照 図 1~4)。

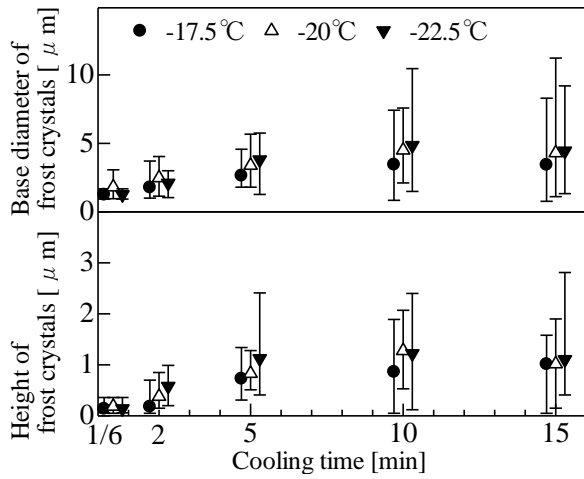


図1 冷却時間，根元径と高さの関係  
(湿度： $=1.24\text{g/m}^3$ )

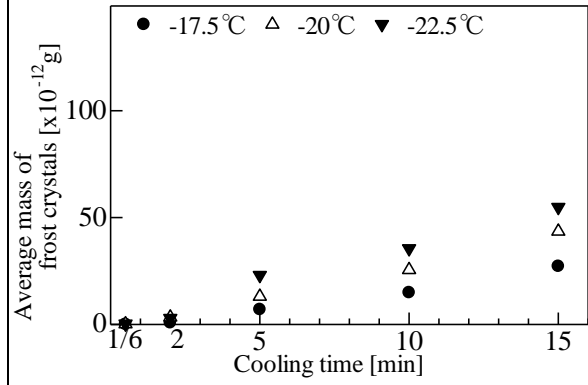
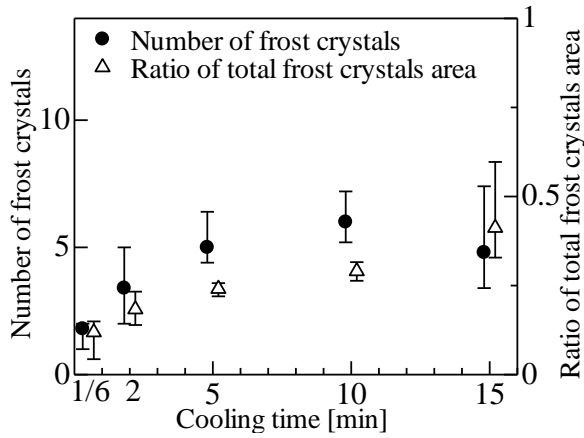


図3 冷却時間と平均着霜質量の関係  
(湿度： $=1.24\text{g/m}^3$ )



(a) 銅試験板表面温度： $=-17.5^\circ\text{C}$

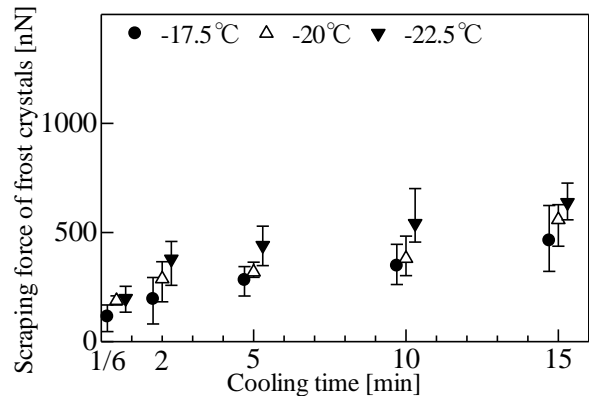
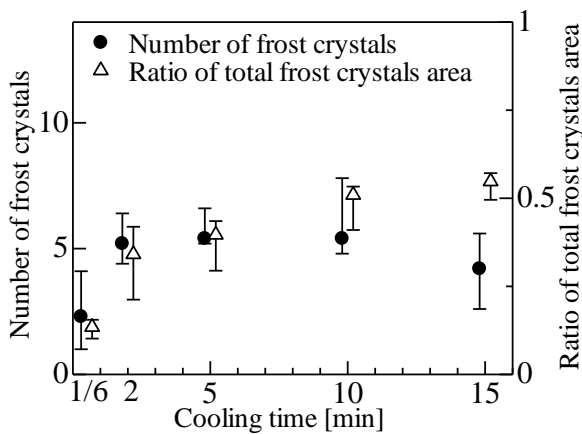


図4 冷却時間と平均かき取り力の関係  
(湿度： $=1.24\text{g/m}^3$ )



(b) 銅試験板表面温度： $=-22.5^\circ\text{C}$

図2 冷却時間，霜結晶個数と着霜面積割合  
(湿度： $=1.24\text{g/m}^3$ )

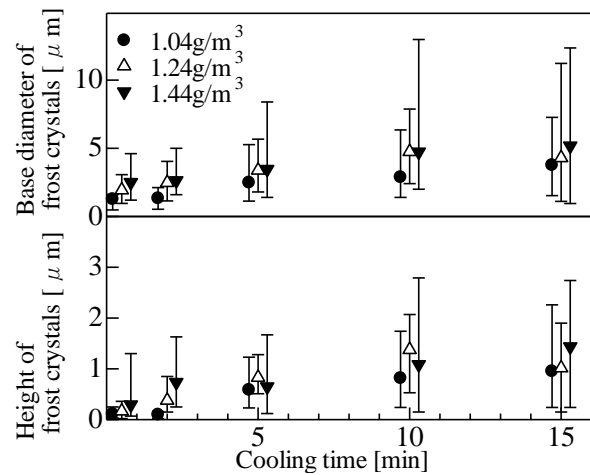
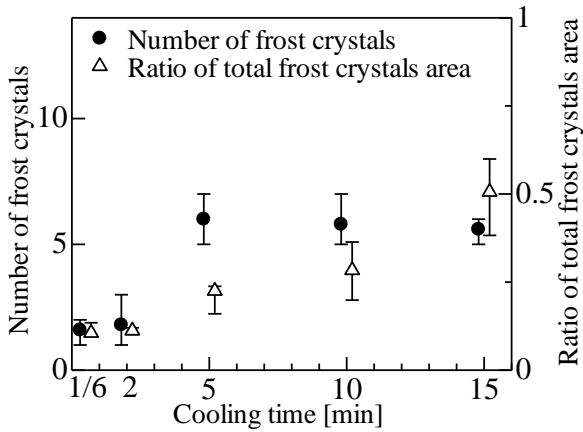
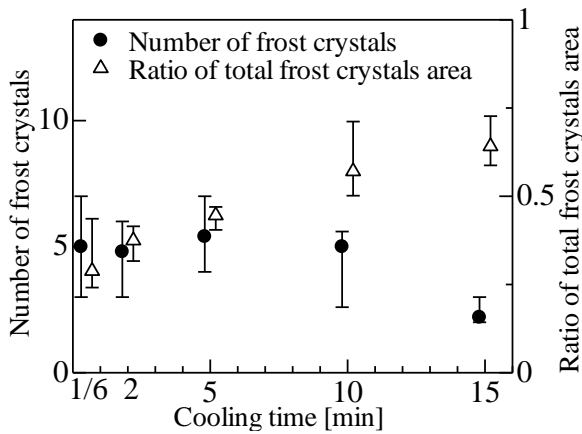


図5 冷却時間，根元径と高さの関係  
(銅試験板表面温度： $=-20^\circ\text{C}$ )



(a) 湿度 : =1.04g/m<sup>3</sup>



(b) 湿度 : =1.44g/m<sup>3</sup>

図6 冷却時間、霜結晶個数と着霜面積割合 (銅試験板表面温度 : =-20°C)

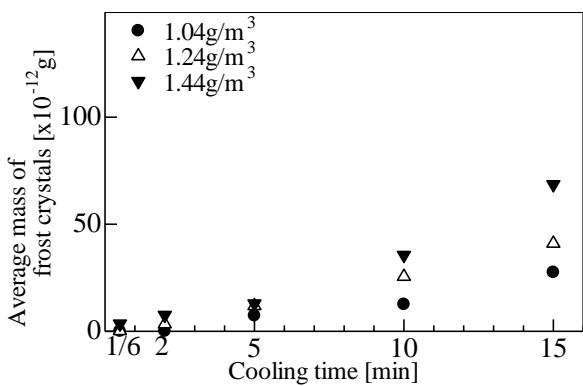


図7 冷却時間と平均着霜質量の関係 (銅試験板表面温度 : =-20°C)

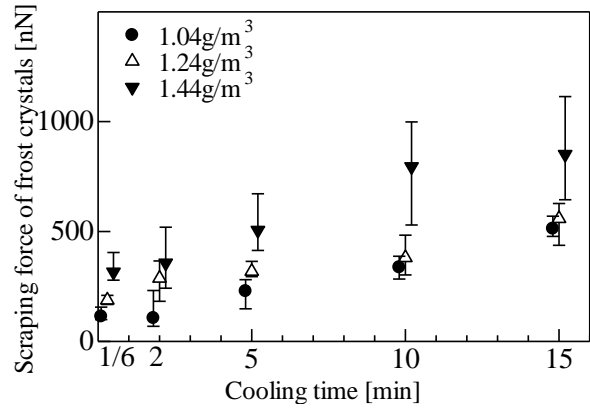


図8 冷却時間と平均かき取り力の関係 (銅試験板表面温度 : =-20°C)

(9) 雰囲気湿度を変えながら冷却時間と着霜速度の関係を明らかにした。

(10) 霜結晶発生から成長初期段階から雰囲気湿度によらず、霜結晶は概ね均一に分布することを明らかにした。

(11) 霜結晶発生から成長初期段階での霜の形状/分布、霜個数、着霜面積、着霜質量とかき取り力の雰囲気湿度と時間依存性を明らかにした(参照 図5-8)。

霜結晶の発生から成長初期段階での霜結晶の形状やかき取り力は非常に小さく測定が極めて困難であった。それ故、微小スケール場で試験板温度・雰囲気湿度の霜形状/分布、霜個数、着霜面積、着霜質量のかき取り力への影響の系統的・定量的結果はこれまで皆無であった。

よって、本研究で得られた知見は、着霜による重大事故の防止や性能低下の起き難い熱交換器の設計方法や効果的な除霜方法の確立に十分な貢献を果たすことが期待される。

今回は、昇華による着霜現象を対象に測定を行ったが、今後は凝縮液滴の凍結による着霜現象に対して、同様の測定を行う。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Koji MATSUMOTO, Yoma ITO, Keisuke HAYASHI, Keisuke MURAHASHI, Daisuke SHIRAI, Masato HONDA, Study on measurements of frost crystals

dimensions/distribution and frost scraping force using a scanning probe microscope (Investigation on influence of surface temperature of cooling solid surface), Int. J. Refrigeration, 査読有, Vol. 36, No. 1, (2013-1) 120-128.

DOI:10.1016/j.ijrefrig.2012.10.003

②Koji MATSUMOTO, Yoshiaki KENMOTSU, Yoshikazu TERAOKA, Yoma ITO, Study on methods of measuring frost crystal dimensions/structure and frost scraping force using a scanning probe microscope, Int. J. Refrigeration, 査読有, Vol. 34, No. 2 (2011-3) 550-559.

DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.10.005

〔学会発表〕(計4件)

①伊藤 洋麻, 腰塚 真, 松本 浩二, 林 圭佑, 「SPMを利用した霜結晶形状/構造/分布と霜のかき取り力の測定(冷却面温度の影響の検討)」, 第22回環境工学総合シンポジウム(仙台), (2012.7.6) .

②伊藤 洋麻, 松本 浩二, 寺岡 喜和, 「SPMを利用した霜結晶形状/構造/分布と霜のかき取り力の測定」, 日本機械学会熱工学コンファレンス2011(浜松), (2011.10.30) .

③伊藤 洋麻・松本 浩二・寺岡 喜和・稲場 浩之・赤石 武蔵, 「SPMを利用したナノ/マイクロスケール場での氷の付着力の測定法の検討」, 第48回伝熱シンポジウム(岡山), (2011.6.3) .

④伊藤 洋麻・松本 浩二・寺岡 喜和, 「SPMを利用した霜形状/構造と霜のかき取り力の測定方法の検討」, 日本機械学会東北支部第46期秋季講演会(秋田市), (2010.9.24) .

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 浩二 (MATSUMOTO KOJI)

中央大学 理工学部 教授

研究者番号: 60229549

### (2) 研究分担者 (2010年度のみ)

寺岡 喜和 (TERAOKA YOSHIKAZU)

中央大学・理工学部・助教(現 金沢大学 大学院自然科学研究科 准教授)

研究者番号: 10365025