

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文概要

論文題目

極低温伝熱面上でのミスト化を伴う霜形成メカニズムの解明
に向けた数理モデルの構築

Modeling of Frost Formation with Fog Generation for Elucidating Its
Mechanism on a Cryogenic Heat Transfer Surface

申請者

服部 皓大
Akihiro HATTORI

機械科学・航空宇宙専攻 航空宇宙輸送システム研究

2023年11月

本研究では、極低温伝熱面上での着霜現象を対象に、着霜実験による現象調査に加えて、極低温伝熱面上でのミスト化（空気中の水蒸気が凝縮または凝固し微小な液滴や氷粒子となること）を伴う着霜現象に対応した数理モデルを構築し、霜形成メカニズムを解明することを目的とする。

航空宇宙分野で開発が進む極超音速機用エンジンには、中間冷却効果による熱効率向上や内部の熱的保護のため、燃料である液体水素を用いて流入空気を冷却する空気予冷器が搭載されている。しかし、伝熱面への着霜による性能低下や流路閉塞などが課題となっており、有効な着霜抑制法の確立に向け、詳細な霜形成メカニズムの解明が不可欠である。

一般的な低温伝熱面上では、水蒸気が固体面上で昇華凝結することで、霜層が形成される。一方で、極低温伝熱面上では、昇華凝結による霜形成に加えてミスト化を伴う点が特徴である。水蒸気がミスト化し、生成したミストが後流に輸送されると霜形成が抑制されるが、ミストの一部は伝熱面上に堆積して霜形成にも寄与する。そのため、極低温伝熱面上ではミスト化による影響が非常に重要である。しかし、ミスト自体の計測は難しく、ミストそのものやミストと霜形成との相互の影響については、未解明な点が多く残っている。また、このような複雑現象には、実験調査のみではなく、数値的なアプローチを併用した調査が有効だが、極低温伝熱面上でのミストの堆積まで考慮した数理モデルは前例がない。

そこで本研究では、レーザーシート光源や粒径計測装置を用いて着霜実験を行い、霜層とミストの光学計測やミストの粒径計測などを行うとともに、ミスト堆積による霜形成まで考慮した数理モデルを構築し、極低温伝熱面上での霜形成メカニズムの解明に取り組んだ。

本研究では次の成果を得た。

1. 強制対流下の冷却平板上での着霜を対象に、レーザーシート光源などを用いた光学計測やミストの粒径分布計測を行い、伝熱面温度に依存して大きく異なる霜の質量や形状、ミスト生成の様子などについて定量的なデータを取得した。
2. 昇華凝結による霜形成を **Burton-Cabrera-Frank** 理論（**BCF** 理論）に基づいてモデル化し、結晶界面積と霜層内での水蒸気拡散を補正することで定量的に現象を再現できることを示した。
3. ミスト化とミスト堆積に対応した数理モデルを構築し、昇華凝結過程とミスト化・ミスト堆積過程の双方を考慮した数値解析を実現した。実験結果との比較を通して、本数理モデルが現象を定量的にもよく再現できることを確認した。
4. 強制対流下の極低温平板上での霜形成を対象に、昇華凝結やミスト堆積などの霜形成への影響を定量的に評価し、特徴的な現象であるフロストヒルの形成やその後方での無着霜領域の形成、霜層分離などのメカニズムを明らかにした。

本論文は次のように構成される。

第 1 章は「序論」と題し、本研究の背景と目的を説明する。従来の着霜研究を概観し、本研究で取り組む極低温伝熱面上でのミスト化を伴う着霜現象の数理モデル化や霜形成メカニズムの解明に向けた課題と方針を示す。

第 2 章は「異なる伝熱面温度での着霜現象の実験的調査」と題し、強制対流下における -25°C から -170°C の幅広い温度の冷却平板上での着霜現象を対象に着霜実験を実施し、白色 LED 光源とレーザーシート光源を用いた霜やミストの光学計測や、走査式モビリティパーティクルサイザー (SMPS) と白色光エアロゾルスペクトロメーター (WELAS) を用いたミストの粒径分布計測を行った成果について議論した。霜質量や霜形状、霜層の性状などが伝熱面温度に大きく依存し、伝熱面温度を 3 つ (低温域: -25 , -50 , -75°C , 遷移温度域: -100 , -125°C , 極低温域: -150 , -170°C) に分類できることを明らかにした。支配的な霜形成過程は平板上の位置や時間的によっても異なり、ミスト化の有無や前端のフロストヒルでの剥離の有無によって特徴づけられることを示した。粒径分布計測では、伝熱面温度 -125°C 以下の場合に通風後 100 秒以降で定量的に再現性のある粒径分布データを取得できた。ミストの粒径範囲は $0.2\ \mu\text{m}$ から $2.0\ \mu\text{m}$ 程度の範囲であり、ピーク粒径は -125°C で $1\ \mu\text{m}$ 程度、 -150°C 以下では $0.4\ \mu\text{m}$ から $0.7\ \mu\text{m}$ 程度で、低温ほど小粒径になる傾向があることを明らかにした。

第 3 章は「着霜数値解析手法」と題し、本研究で用いる着霜数値解析手法について、その詳細を示す。

第 4 章は「昇華凝結過程のモデル化」と題し、水蒸気が昇華凝結により氷結晶となる過程 (昇華凝結過程) のモデル化を行った。昇華凝結過程には、相変化量が過飽和度に比例するという定性的な考察に基づくモデルが広く用いられているが、比例係数部分を理論的に決定できず、条件に合わせて試行錯誤的に決定する必要がある。そこで、本研究では BCF 理論に基づく結晶成長速度と、霜層と同じ氷の多孔質体である積雪の比表面積の計測データを用いてモデル化を行い、補正係数を必要としない数理モデルの構築を試みた。昇華凝結のみで霜が形成される -30°C 以上の平板上での着霜を対象に、モデルの妥当性や精度の検証を行った結果、本数理モデルでは伝熱面温度が低い場合や高湿度条件で霜厚さが過小評価されることがわかった。誤差の要因を検討し、結晶成長に寄与する界面積と霜層内での水蒸気拡散を補正することで精度が改善することを明らかにした。また、伝熱面温度 -10°C から -30°C 、主流湿度 $8\ \text{g}/\text{m}^3$ から $16\ \text{g}/\text{m}^3$ の範囲では 600 秒時の霜質量や平均霜厚さを最大 15%未満の誤差で予測できることを示した。

第 5 章は「ミスト化・ミスト堆積過程のモデル化」と題し、極低温伝熱面上での霜形成に特有なミスト化やその堆積による霜形成（ミスト化・ミスト堆積過程）を数理モデル化した。ミストの個数濃度と質量濃度に関する一般動力学方程式を導入し、核生成や粒径成長、堆積、熱泳動や重力沈降によるミストの輸送も考慮した。構築したミスト化・ミスト堆積モデルと第 3 章で構築した昇華凝結モデルを用い、極低温伝熱面上での霜形成に対応した着霜数値解析を実現した。検証のために、 -75°C と -170°C の二つの伝熱面温度で実験結果との比較を行い、数理モデルの妥当性を確認した。霜質量や霜形状はいずれの伝熱面温度でも比較的良好に再現でき、ミスト生成の様子も実験結果とよく一致していることを確認し、本モデルがミスト化を伴う霜形成の数値解析に有用であることを示した。

第 6 章は「強制対流下の極低温伝熱面上での霜形成メカニズムの解明」と題し、強制対流下における -170°C の極低温平板上での霜形成メカニズムの解明に取り組んだ。数値解析を複数の数理モデル条件で実施し、実験では解明が困難なミスト化による影響や、昇華凝結とミスト堆積の霜形成への寄与、ミストの輸送や堆積への拡散、重力沈降、熱泳動の影響を定量的に評価した。前端部のフロストヒルは主に昇華凝結によって形成され、後方では水蒸気が 0°C の等温線に沿う位置で主にミストの粒径成長（ミスト化）により消費されることで、平板近傍への水蒸気供給量が減少して、昇華凝結が大きく抑制されることを明らかにした。また、平板の後方での霜形成は、熱泳動によるミスト堆積が支配的であり、拡散や重力沈降の影響は小さいことも示した。熱泳動の影響が温度勾配に比例し、流れの剥離や再付着などに伴って霜層表面での温度勾配が不均一になるため、霜層が分離して形成されることを明らかにした。

第 7 章は「結論」と題し、本研究で得られた成果を総括する。

以上より、本研究では着霜実験による現象調査と、昇華凝結過程とミスト化・ミスト堆積過程の双方に対応した数理モデルの構築に取り組み、極低温伝熱面上での霜形成メカニズムを明らかにした。本研究で構築した数理モデルは、霜形成過程の可視化や予測を可能にすることで、空気予冷器に限らず低温冷媒を用いる各種熱交換器の性能向上や設計効率化に貢献しうる。また、明らかにした霜形成メカニズムからは、平板上での剥離領域を制御することでミスト化の促進やミスト堆積の抑制が可能であることが示唆され、新たな着霜抑制法の創出にも寄与しうる。本成果は、極低温空気熱交換器における着霜問題を解決に向けて前進させ、航空宇宙分野や冷凍空調分野での極低温冷熱の活用に貢献しうるものである。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 服部 皓大

印

(2024年 2月 9日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文 (筆頭)	○ <u>Hattori, A.</u> , Sato, T., Numerical Model of Frost Formation Based on Burton–Cabrera–Frank Theory Considering Complex Transportation of Water Vapor in Frost, <i>Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i> , Vol. 40, No. 4 (2023), pp.215-226.
論文 (筆頭)	○服部皓大, 吉田幹男, 佐藤哲也, 強制対流下の平板上におけるミスト化を伴う霜形成メカニズムに関する光学計測を用いた実験調査, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 40, No. 4 (2023), pp.227-239.
論文 (筆頭)	○服部皓大, 倉田琢巳, 十川悟, 森永裕大, 植田晃弘, 佐藤哲也, 強制対流条件下での着霜現象への冷却面温度及び主流絶対湿度の影響, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 38, No. 2 (2021), pp.59-71.
国際会議 論文 (査読付)	○ <u>Hattori, A.</u> , Ueda, A., Yoshida, M., Hirai, R., Sato, T., Numerical Research on Effects of Gravitational Settling and Thermophoresis of Mist Particles on Frost Formation under Cryogenic Conditions, <i>Proceedings of the 17th IIR International Conference on Cryogenics</i> , pp.78-83.
講演 (国際)	○ <u>Hattori, A.</u> , Tokawa, S., Morinaga, Y., Chen, W., Ueda, A., Yoshida, M., Sato, T., Numerical Prediction of Frost Formation on a Cryogenic Plate Considering Mist Generation Using General Dynamic Equation, <i>The 10th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning</i> , 59, 2022年4月.
講演 (国際)	○ <u>Hattori, A.</u> , Sato, T., Influence of Sublimation Models on the Computational Method for Predicting Frost Formation Phenomena During the Sublimation Process, <i>2nd Asian Conference of Thermal Science</i> , 50421, 2021年10月.
講演 (国内)	○服部皓大, 数値解析を用いた極低温伝熱面上での着霜予測と現象解明への取り組み, 2023年度第一回着霜除霜研究会, 2023年9月.
講演 (国内)	○服部皓大, 吉田幹男, 富田泰成, 西川暉, 佐藤哲也, 昇華凝結過程とミスト堆積過程を考慮した着霜数値解析, 2023年度 日本冷凍空調学会 年次大会, B322, 2023年9月.
講演 (国内)	吉田幹男, 服部皓大, 富田泰成, 西川暉, 佐藤哲也, 異なる伝熱面温度における霜形状と結晶構造の時間変化の観察, 2023年度 日本冷凍空調学会 年次大会, B321, 2023年9月.
講演 (国内)	植田晃弘, 服部皓大, 陳衛偉, 吉田幹男, 平井理久, 佐藤哲也, 極低温冷却面上の霜結晶構造に関する実験的研究, 令和4年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2022-023, 2023年1月.
講演 (国内)	森永裕大, 十川悟, 服部皓大, 植田晃弘, 吉田幹男, 佐藤哲也, 極低温平板冷却面での着霜現象におけるミスト化の影響に関する実験研究, 令和3年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2021-032, 2022年1月.
講演 (国内)	○服部皓大, 十川悟, 森永裕大, 陳衛偉, 植田晃弘, 吉田幹男, 佐藤哲也, ヘルツ・クヌーセンの式に基づく昇華凝結モデルを用いた着霜現象の予測, 2021年度日本冷凍空調学会年次大会, A121, 2021年9月.
講演 (国内)	服部皓大, 十川悟, 森永裕大, 陳衛偉, 植田晃弘, 佐藤哲也, 強制対流条件下における着霜現象への冷却面温度および絶対湿度の影響, 令和2年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2020-039, 2021年1月.
講演 (国内)	服部皓大, 佐藤哲也, エアロゾル輸送解析とCFDとの連成による着霜解析手法の提案, 第34回数値流体力学シンポジウム, B03-1, 2020年12月.
講演 (国内)	倉田琢巳, 服部皓大, 堀越大輝, 十川悟, 佐藤哲也, 核形成理論を用いた数理モデルによる平板上への着霜現象の予測, 2019年度日本冷凍空調学会年次大会, B141, 2019年9月.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 服部 皓大

印

(2024年 2月 9日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (国内)	服部皓大, 十川悟, 倉田琢巳, 堀越大輝, 木下義章, 佐藤哲也, 強制対流条件下の平板冷却面における二次元着霜モデルに関する研究, 2018年度日本冷凍空調学会年次大会, B324, 2018年9月.
その他 (国内)	吉田幹男, 服部皓大, 富田泰成, 西川暉, 佐藤哲也, ダスト粒子を用いたミスト化促進による強制対流下での平板冷却面での着霜量とミスト厚さの影響調査, 令和5年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2023-032, 2024年1月.
その他 (講演)	Hattori, A., Yoshida, M., Tomita, T., Nishikawa, H., Sato, T., Experimental Study on the Frost Suppression Effect of Arizona Test Dust Injection, 2023 SAREK Summer Conference, 23-S-091, 2023年6月.
その他 (講演)	服部皓大, 十川悟, 植田晃弘, 吉田幹男, 佐藤哲也, エアロゾルを用いたミスト化促進による着霜低減効果に関する研究, 2022年度日本冷凍空調学会年次大会, B112, 2022年9月.
その他 (講演)	吉田幹男, 十川悟, 服部皓大, 植田晃弘, 佐藤哲也, 線香を用いたミスト化促進による円管伝熱面への着霜低減効果に関する研究, 混相流シンポジウム2022, E0102, 2022年8月.
その他 (講演)	十川悟, 服部皓大, 森永裕大, 植田晃弘, 吉田幹男, 佐藤哲也, 陽極酸化法を用いた超撥水アルミニウム平板上での過冷却水凍結時間の遅延化に関する研究, 2021年度日本冷凍空調学会年次大会, A131, 2021年9月.
その他 (講演)	十川悟, 倉田琢巳, 服部皓大, 堀越大輝, 佐藤哲也, 陽極酸化法を用いた超撥水伝熱管によるプリークレー伝熱面への着霜遅延化に関する研究 第2報: 着霜への主流流速の影響に関する検討, 2018年度日本冷凍空調学会年次大会, B314, 2018年9月.
その他 (受賞)	服部皓大, 日本冷凍空調学会「優秀講演賞」, 2022年9月.
その他 (受賞)	服部皓大, 日本機械学会「畠山賞」, 2019年3月.
その他 (受賞)	服部皓大, 「早稲田大学基幹理工学部長賞 最優秀賞」, 2019年3月.
その他 (受賞)	服部皓大, 「早稲田大学機械科学・航空学術賞」, 2019年3月.