

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文審査報告書

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

2024年2月

着霜現象は、空気中の水蒸気が低温固体面上で氷へと昇華凝結し、微細な構造を持つ氷結晶が生成する現象であり、古くから冷凍空調、鉄道架線、農業、電力設備など多くの領域で問題となっていたが、未だメカニズムの解明や制御には至っていない。その理由として、着霜現象は複雑なプロセスを含み、大気の温湿度、空気中の微粒子、物体表面の温度や性状などの数多くの要因が影響する上、スケールが非常に小さく、実験や計測が困難であることが挙げられる。近年開発が進んでいる極超音速機用エンジンには、高速飛行時の空力加熱からターボ機械を防護するために、燃料である液体水素を冷媒とする極低温熱交換器（予冷器）が搭載されているが、伝熱面での着霜による性能低下や流路閉塞が課題となっている。

極低温伝熱面上での着霜現象は、さらに複雑である。すなわち、一般的な低温伝熱面上では水蒸気が昇華凝結することで霜層が形成されるが、極低温伝熱面上ではそれに加えて、空気中の水分が伝熱面に運ばれる前に液体や固体の微小粒子に変換されるいわゆる「ミスト化」という現象が発生する。ミスト化により水蒸気が消費され、これが着霜量の減少につながるという報告もあり、ミストの生成、輸送、堆積は着霜現象に大きく影響を与える。しかしながら、ミストの計測はより難しく、ミストと霜形成の相互の影響については未解明である。

着霜現象を数値的に予測するための研究も実験と並行して進められており、実験結果に基づく経験式や実験と理論を組み合わせた霜層成長モデルなど数多くの試みがなされてきた。近年の数値流体力学の発展により、流れと熱物質輸送をカップリングした混相流解析も行われるようになり、局所的な相変化量を決定する数理モデルの研究が行われるようになった。経験的な係数を導入することで、かなり精度良く着霜現象を捉えることが可能になったが、任意の条件に適用可能な係数が不明であり、実験による試行錯誤的な係数の設定が必要である。さらに、ミストに関する数理モデルの研究は数少なく、ミスト堆積による着霜への影響を取り扱ったものは皆無である。

そこで本研究では、実験と数値解析により、極低温平板伝熱面上での強制対流下におけるミスト化を伴う着霜現象の解明を試みた。主な研究成果を以下に示す。第一に、白色 LED 光源とレーザーシート光源を用いた霜層とミストの可視化および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）によるミストの粒径分布計測を実施し、ミスト化と着霜の関係を明らかにした。第二に、昇華凝結過程を理論的にモデル化すべく、Burton-Cabrera-Frank 理論（BCF 理論）に基づく昇華凝結による霜形成のモデル化を行い、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。第三に、ミスト化とミスト堆積に対応した数理モデルを構築し、極低温伝熱面上での着霜解析を実施して、特徴的な現象であるフロストヒルや後方での無着霜領域の形成、霜層分離などを再現するとともに、実験結果を定量的に再現した。

第四に、これらの解析手法を用いて、ミストの輸送に対する熱泳動や重力の効果について明らかにした。

本論文は、全7章から構成される。

第1章「序論」では、本研究の意義と位置づけを明確にするために、従来の着霜研究に関する実験、数理モデル化、数値解析等の先行研究を整理し、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解明」に向けた課題と研究目的、方針について提示し、論文の構成について示した。

第2章「異なる伝熱面温度での着霜現象の実験的調査」では、本研究で実施した $-25^{\circ}\text{C}$  から $-170^{\circ}\text{C}$  の幅広い温度範囲での着霜実験について述べている。本実験では、伝熱面以外からの影響（側壁や上流部の影響）を排除することやミストをクリアに撮影するための工夫（サイドプレートの装着、第二通風等）がなされている。また、白色LED光源とレーザーシート光源を用いた光学計測により、霜層とミスト層の撮影に成功している。さらに、2種類の粒径計測装置を用いて、ミストの粒径分布を定量的に捉えた。実験結果から、霜質量や霜形状、結晶性状、ミストの有無などが伝熱面温度に大きく依存し、その特性から伝熱面温度を3つ（低温域： $-25$ ,  $-50$ ,  $-75^{\circ}\text{C}$ 、遷移温度域： $-100$ ,  $-125^{\circ}\text{C}$ 、極低温域： $-150$ ,  $-170^{\circ}\text{C}$ ）に分類できることを明らかにした。また、霜形成の様子が平板上の位置によっても異なり、伝熱面温度によるミスト化の有無と前端に発生したフロストヒルによる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、再現性のあるデータが取得でき、 $0.2\ \mu\text{m}$  から  $2.0\ \mu\text{m}$  の粒径範囲の粒子が計測された。これらの粒子は、伝熱面温度が $-100^{\circ}\text{C}$  以上では通風後100秒以降はほとんど計測されなかったが、伝熱面温度が $-125^{\circ}\text{C}$  以下では持続的に計測された。また、伝熱面の温度が低いほど粒径が小さくなる傾向を見出した。

第3章「着霜数値解析手法」では、本研究で用いた数値解析手法の全体像について記されている。二次元直交格子を用い、流体解析と熱-物質輸送解析を交互に解析する弱連成解析である。格子を主流セル（湿り空気）、不完全霜層セル（湿り空気と霜）、完全霜層セル（霜）に分類し、時間の経過とともに主流セルが霜層セルに変化する様子を解析する。霜層充填率、表面霜密度の推定方法などについて示されている。

第4章「昇華凝結過程のモデル化」では、雪の結晶成長に関する研究でも用いられているBCF理論と雪の比表面積のデータを用いて、昇華凝結過程の数理モデル化に取り組んだ。従来のモデルでは、相変化量がギブスの自由エネルギーに比例するという定性的な考察に基づくもので、いずれも試行錯誤的に設定するパラメータが必要であった。本モデルでは、パラメータを必要としないところが特長で、結晶のごく近傍に入射する分子がすべて結晶面上に取り込まれると仮定したヘルツ・クヌーセンの式に結晶面上に吸着して留まる確率（付着係数）と吸着した分子が結晶に取り込まれる確率（取り込み係数）を乗じたモデルを構築した。検証実験と比較した結果、定性的には一

致したが、定量的には霜質量、霜厚さともに最大 24%の差異が発生した。そこで本数理モデルに含まれている霜層の界面積と内部拡散を支配するパラメータについて調査し、適切な値を設定することで定量的な精度向上を図った。

第 5 章「ミスト化・ミスト堆積過程のモデル化」では、極低温伝熱面上で特有なミスト化について、生成、成長、輸送、堆積を考慮したモデルの構築を行なった。ミストの生成に関する先行研究はほとんどなく、さらにミスト堆積を考慮したモデルは存在しない。熱-物質輸送解析式にミストの質量濃度と個数濃度に関する一般動力学方程式を追加した。ミストの生成には古典的核生成理論の修正モデル (ICCT モデル) を使用し、ミストは主流領域から霜層表面に運ばれた際に全て堆積するものとした。本数値解析手法の妥当性を確認するために、 $-75^{\circ}\text{C}$  (ミストがほとんど生成せず昇華凝結が支配的) と  $-170^{\circ}\text{C}$  (ミストが盛んに生成) の二つの伝熱面温度条件で実験と比較した。その結果、双方の条件とも着霜過程を比較的よく再現でき、霜形状や霜質量に関しては定量的にも高い精度で再現することができた。

第 6 章「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」では、上述の解析手法を用いて、ミスト化と霜形成の相互干渉を伴う極低温伝熱面上 ( $-170^{\circ}\text{C}$ ) での霜形成メカニズムについて調査した。特に、ミストの輸送メカニズムに着目し、拡散、重力沈降、熱泳動の影響について評価した。前端部におけるフロストヒルは昇華凝結によって形成され、その後方でミストが生成することで着霜量が大幅に減少するという、ミスト化による着霜低減効果を定量的に明らかにした。また、後方における着霜はミストの堆積によるもので、熱泳動の影響が拡散や重力沈降による輸送に比べ大きいことを明らかにした。セル内でのミストの粒径分布を考慮していないことにより、重力沈降の影響が正しく評価されない本数理モデルの課題を示した。

第 7 章「結論」では、本研究を総括し、粒径分布の導入、霜層の融解、再凍結や変形などを含めたモデルの改善や将来展望をまとめた。

以上、要約すると、本論文は、強制対流下での極低温伝熱面上における着霜メカニズムの解明を目的とし、「昇華凝結」と「ミスト堆積」における新しい数理モデルを開発し、その有用性を実証した。また、極めて困難であった、ミストの可視化、粒径計測を実施し、ミスト化と着霜に関する希少な定量データを創出した。

本研究成果で明らかにした霜形成メカニズムから、平板上での剝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、伝熱面形状などを工夫して流れをコントロールすることで着霜を抑制できることが期待される。また、平板のみならず、極低温空気熱交換器のような複雑形状のものにも適用可能であり、今後の同分野の進展という観点からも学術的な価値がある。

以上、本論文は博士 (工学) の学位論文として、価値のあるものと認める。

2024年2月

審査員 (主査) 早稲田大学教授 博士(工学)(東京大学) 佐藤 哲也

---

早稲田大学准教授 博士(工学)(早稲田大学) 山口 誠一

---

早稲田大学教授 博士(工学)(大阪大学) 宮川 和芳

---

静岡大学准教授 博士(工学)(総合研究大学院大学) 吹場 活佳

---