

氏 名 吹場 活佳

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 934 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 冷却円柱周りの水蒸気の凝縮を伴う流れの物質伝達

| | | | |
|--------|----|-----|---------------------------|
| 論文審査委員 | 主査 | 助教授 | 小川 博之 |
| | | 教授 | 小杉 健郎 |
| | | 助教授 | 高木 亮治 |
| | | 助教授 | 坪井 伸幸 |
| | | 教授 | 林 光一(青山学院大学) |
| | | 助教授 | 佐藤 哲也 (JAXA 宇宙科学 研究本部) |

論文内容の要旨

超音速旅客機や宇宙往還機用の推進機関として、極超音速で飛行可能なエアブリージングエンジンの開発研究が盛んに進められている。このうちターボジェットをベースにしたエンジンでは高速飛行時に吸入空気が加熱されるという問題が発生する。プリクーラは液体水素などの極低温燃料を冷媒として吸入した高温空気を冷却することによりこの問題を解決する熱交換器であり、宇宙航空研究開発機構（JAXA）では現在までにこのプリクーラを地上燃焼試験に組み込むレベルまでの開発を進めてきた。その中でプリクーラの冷媒配管に付着する霜がエンジン性能に悪影響を及ぼすことが明らかとなっている。一方、熱交換器における着霜の問題は地上用の空調システムに関連した問題として古くから多くの研究が行われてきた。しかしこれらの研究における冷却面温度は水の凝固点付近（ $-30\sim 0^{\circ}\text{C}$ 程度）のものがほとんどである。冷媒として液体水素を使用するプリクーラの冷却面温度は極低温となり、常温付近の着霜現象とは大きく異なる。過去の極低温冷却面に対する着霜の研究は、平板についての研究が数例あるのみであり円柱については行われていない。また、極低温冷却面に対する着霜現象についても十分に理解されていない。本論文では熱交換器への応用で重要となる冷却円柱周りの流れ場における物質伝達に着目し、実験と数値解析を行い、両結果の比較を議論した。

実験的手法を用いた研究では、液体窒素を冷媒とし銅の熱伝導を利用して $120\sim 250\text{ K}$ の円柱表面温度を作り出し、銅円柱に巻いたアルミ箔の試験前後における質量差を計測することにより、円柱周りの物質伝達の計測を行っている。本実験においては流れの速度は 1 m/s 、円柱径は 20 m/s 、主流温度 23°C 、湿度 59% の条件で試験を行った。その結果、円柱表面温度を 250 K から低下させていくと、まず $250\sim 230\text{ K}$ の温度領域では質量流束は緩やかに上昇する。しかし 230 K 以下の領域では、円柱周囲で水蒸気が凝縮する様子が観察されるようになり、同時に円柱表面への物質伝達は円柱表面温度の低下と共に急速に減少する。表面温度が 120 K の場合、表面温度が 230 K （最大値）の場合と比較し質量流束が約 $1/6$ にまで低下することを観測した。この物質伝達の温度依存性は従来の分子拡散に基づいた理論では説明できない。また、長時間（2分間）の通風試験を行うと、円柱表面温度が 220 K の円柱表面には霜がほぼ全面に均一に付着するのに対し、円柱表面温度が 95 K の円柱には着霜が円柱の上流側に集中する様子も観測された。

数値計算による研究では、実験条件と同等の流れ場を数値解析により詳細に調査した。数値解析においては「水蒸気の凝縮」および「凝縮物の円柱への輸送」を考慮し、極低温冷却面への物質伝達を計算した。凝縮物の円柱への輸送に関しては、凝縮生成物である氷の粒子に働く熱泳動力を計算に考慮し、粒子が冷却円柱に引きつけられ付着し質量流束に寄与する様子を再現している。計算手法としては、円柱表面と一様流との間で大きな温度差があるため、流れ場の解析には密度変化を表現することができる圧縮性流体の数値計算スキームを採用した。従来この計算手法は本研究が対象とするような低速の流れ（ 1 m/s ）を解くことができないが、本計算ではこれをEdwardsらの前処理法を用いてあらゆる速度の流れを解析できるよう改良した。さらに円柱周りの流れ場はカルマン渦の発生により非定常的な流れ場となるが、本研究ではこれを擬似時間を用いた時間進行法を用いることで解析している。

結果として、計算においても実験と同様に 220 K 以下の温度領域では円柱近傍で水蒸気の凝縮が発生することが確認された。またこの水蒸気の相変化により、壁面近傍の水蒸気が減少し壁面への質量流束が低下することや、相変化による凝縮潜熱の放出により境界層内の温度勾配に変化をもたらすことなど、凝縮に伴う流れ場の変化が確認された。このような凝縮による流れ場の変化により、円柱表面にもたらされる質量流束の成分として、 230 K 程度までの円柱表面温度については水蒸気の濃度拡散による輸送が支配的であるが、冷却面温度が低下すると水蒸気の凝縮物であるミストの付着が支配的となってくることが明らかになった。さらに実験結果との比較では、本数値解析により実験で得られた物質伝達の温度依存性（円柱表面温度の低下と共に 220 K 付近から質量流束が急激に低下する）を数値解析においても再現した。また、実験において見られた「円柱表面温度の低下と共に着霜が円柱の上

流側に集中する」現象についても、数値計算では円柱下流側における物質伝達の低下という形で再現され、この現象が「壁面のミスト密度分布の変化が原因である」ことを明らかにしている。

その他、凝縮モデルによる物質伝達の差や、従来の分子拡散に基づいた質量流束予測手法の有効性が凝縮により失われることなどが議論されている。凝縮モデルによる物質伝達の差については、古くから凝縮を再現するモデルとして採用されている古典凝縮論に基づくモデルと、近年提案された実験結果をより忠実に再現すると言われるDillmannとMeierによるモデルの2種を採用し、質量流束の計算結果を比較した。その結果、凝縮核の生成率に及ぼす温度の影響があまりにも強いため、凝縮モデルの違いは質量流束計算結果にほとんど影響を及ぼさないことが明らかになった。また、従来の質量流束の経験式では、 Re 数の関数である Sh 数を用いて質量流束を表現しているが、凝縮の発生する220 K以下の温度領域についてはこの理論が通用しないことが確認された。

論文の審査結果の要旨

本論文は120～250 Kの表面温度を有する冷却円柱周りの流れについて、着霜現象を背景としながら主に物質伝達に着目してそのメカニズムを実験的、解析的に研究した論文である。冷却円柱周りの流れについては、比較的高温の円柱表面に付着する霜に関する研究は多くの研究例が報告されているものの、250 K（約-30℃）以下の円柱表面温度に対する研究例は希有である。本研究では120～250 Kの広範囲にわたる円柱表面温度について取り扱っており、この点で新規性を有している。

実験的研究においては、従来測定が困難であった低レイノルズ数（Re数約1300）の冷却円柱周りの物質伝達の表面温度依存性を初めて定量的に計測している。低レイノルズ数円柱流れでは得られる質量流束、すなわち本実験の場合着霜質量が微小なため計測精度を保つのが困難であるが、本研究ではこの問題をアルミ箔を用いた質量計測法で解決し、精度のよい計測を可能にした。また250 Kを下回るような冷却面温度を作り出すには通常の冷凍機では困難であるが、本研究では熱伝導率の高い銅円柱を液体窒素を用いて冷却することでこれを解決し、広範囲にわたる円柱表面温度を作り出すことに成功している。このように実験の手法に関しても様々な工夫がなされている。実験の結果として得られた質量流束は、円柱表面温度が220 K付近を下回ると急激に減少するというものであり、これは従来の物質伝達の理論とは異なる傾向を示している。この知見は本研究で初めて定量的に示されたものであり、本研究における主要な成果の一つに挙げられる。

数値計算の研究としても、水蒸気の凝縮を含む冷却円柱周り非定常流れを解析しており、その解析手法を構築したという意味において評価できる。水蒸気の凝縮を含む流れの数値解析は、過去に膨張ノズル内における流れ場の解析などが行われた例がある。しかし本研究における流れ場は、円柱周りの流れ場であるために非定常であること、また水蒸気が凝縮してできた氷の粒子も熱泳動の力を受けて輸送されること等の点で過去に行われた解析とは異なる特徴をもつ。本計算は前処理法および擬似時間を用いた時間進行法による流体解析に、水蒸気の凝縮および粒子の輸送を取り込んだ解析手法となっている。水蒸気の均一核凝縮を計算の効率性も考慮してモデル化を行い流体解析に組み込んだ点、および熱泳動による粒子の輸送を独自の差分化手法を用いることで安定に解析可能とした点は独創的であり評価できる。

数値解析の結果として、今回提案した計算手法により実験で得られた220 K以下の温度領域において急激に減少する質量流束特性を再現しており、今回の計算手法が低温冷却面周りの物質伝達の解析に有効であることが示された。数値解析により、円柱表面温度が220K以上の領域では水蒸気の濃度拡散による表面への物質伝達が支配的であるのに対し、220K以下の領域では流れ場中で凝縮した氷粒子の熱泳動による物質伝達が支配的となり、前者よりも後者の方が物質伝達量が小さいために220 K以下の温度領域において質量流束が急激に減少することが示された。また、このほかにも解析により水蒸気の凝縮を伴う熱物質伝達に特徴的な現象がいくつも示されており、これらの知見は極低温冷却面への物質伝達を理解する上で価値のあるものである。本数値解析手法を用いることで、さまざまな条件で着霜状態の予測が可能になった。このことは工学的に非常に有用である。

以上のことから本研究は、熱交換器への応用で重要な「冷却円柱周り流れ」における物質伝達の理解に新たな知見を与えており、工学的にも大きく貢献していることから、申請された論文は博士論文としてふさわしい水準にあると判定した。