

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

服部皓大¹ 十川悟¹ 森永裕大¹ 陳衛偉¹ 植田晃弘² 佐藤哲也²

¹ 早稲田大学大学院基幹理工学研究科機械科学・航空宇宙専攻

² 早稲田大学基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科

Abstract

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、極超音速機の実現に向けて、空気予冷器 (プリクーラ) を搭載した予冷ターボジェットエンジンの開発に取り組んでいるが、予冷ターボジェットエンジンに搭載される空気予冷器の伝熱管表面への着霜が課題となっている。有効な着霜低減・抑制手法の開発のためには、着霜現象における支配的パラメータを特定することが必要である。そこで本研究では、強制対流条件下での着霜現象を対象に、着霜開始後 600 s 以内における平板冷却面温度と主流容積絶対湿度による霜厚さ及び霜質量への影響を調査した。平板冷却面温度を -10°C 、 -20°C 、 -30°C の 3 通り、主流容積絶対湿度を $8\text{g}/\text{m}^3$ 、 $12\text{g}/\text{m}^3$ 、 $16\text{g}/\text{m}^3$ のそれぞれ 3 通りとした。主流絶対湿度が高くなると、霜質量、霜厚さ、霜密度ともに増加し、冷却面温度が高くなると、霜質量、霜厚さは減少するが、霜密度は増加することがわかった。また、質量増加率は時間によらず一定で、主流と冷却面上での水蒸気濃度差に比例することや、霜厚さ増加率は、主流絶対湿度が高く冷却面温度が低いほど大きく、時間経過とともに減少して条件によらず同程度の微量になることなども明らかになった。

Table 1: 記号一覧

A	面積	m^2
V	体積	m^3
ρ	密度	kg/m^3
δ	厚さ	m, mm
m	質量	kg, g

Table 2: 添え字一覧

v	水蒸気
s	飽和水蒸気
f	霜
cp	冷却面
∞	主流

1 序論

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、2025 年までにマッハ 5 クラスの極超音速旅客機 [1] の実現に向け、予冷ターボジェットエンジンの開発に取り組んでいる。この予冷ターボジェットエンジンには、インテークで圧縮され高温になった主流空気を冷却するために、空気予冷器が搭載されている。空気予冷器による主流の冷却により、(1) 空力加熱による熱的負荷を低減し、エンジン内部構造を保護するとともに、(2) 圧縮比や熱効率が增加し、エンジン性能の向上が見込める [2]。一方で、

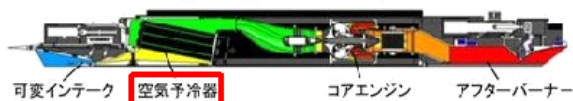


Fig. 1: 予冷ターボジェットエンジン

地上や低空においてはプリクーラの伝熱管表面に低密

度で分厚い霜層が形成されることで、流路閉塞や圧力損失の増大、熱交換効率の低下など引き起こし、エンジン性能が低下することが報告されており [3]、有効な着霜抑制・除霜技術の確立が求められている。

また、空気予冷器における着霜現象については、(1) 極低温冷媒 (燃料の液体水素) を用いること、(2) 短時間に低密度で分厚い霜が形成されること、(3) 温度や湿度に空間的・時間的分布があることが報告されている。特に、一般的な冷凍空調機の熱交換器 (比較的高温な冷却面) でみられる着霜現象と異なり、短時間で急速に成長する点や、空気予冷器内の伝熱管表面温度や水蒸気分布には時間的・空間的な分布がある点などが特徴である。そのため、様々な冷却面温度、主流絶対湿度での着霜現象について、着霜開始から霜層成長期における挙動を把握し、着霜現象に対する支配的因子を特定することが必要である。

そこで本研究では、強制対流条件下での着霜現象について、着霜開始直後から霜層成長期に至るまでの短時間における冷却面温度および主流絶対湿度の影響を調査した。

2 実験装置および手法

2.1 実験装置

本研究で使用した実験装置の概略図を Fig. 2 に、テストセクションの概略図を Fig. 3 に示す。実験装置は、

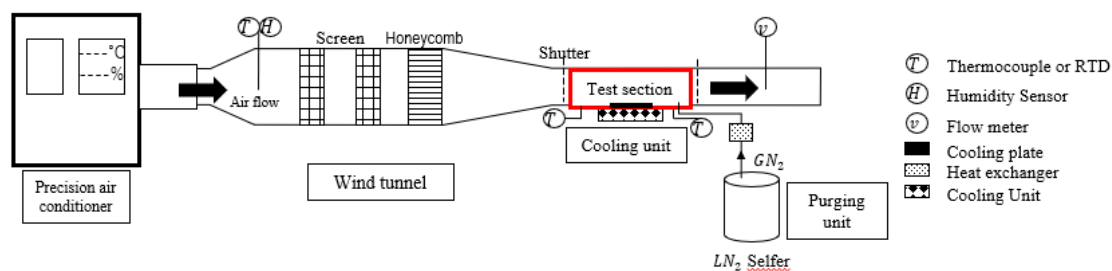


Fig. 2: 実験装置

Table 3: 実験条件

Case	冷却平板温度 °C	主流絶対湿度 g/m ³
1	-10.0	8.0
2		12.0
3		16.0
4	-20.0	8.0
5		12.0
6		16.0
7	-30.0	8.0
8		12.0
9		16.0

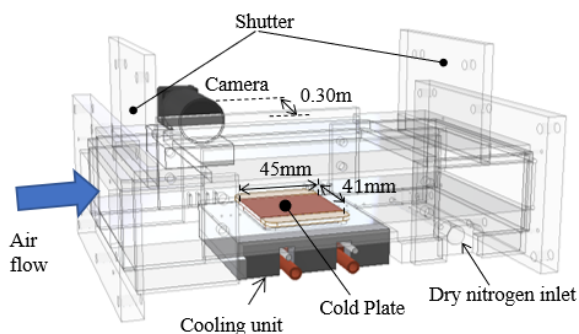


Fig. 3: テストセクション

精密空調機，空気風洞，冷却装置，乾燥窒素パージ装置から構成されている．主流空気は精密空調機（PAP01B-KJ, ORION）で調湿し，整流器で整流してテストセクションに流入させる．主流空気の空気流量は，テストセクション後方に設置された風速計（6501-00, 6542-21, KANOMAX）の計測値を基に，精密空調機で調節した．テストセクション内に設置された45 mm×41 mmの冷却平板は，熱電素子（72001/127/085B, Ferrotec Holdings Co.）とペルチェコントローラ（TDU-5000AR, 株式会社セルシステム）を用いてPID制御により温度制御を行った．

2.2 実験方法

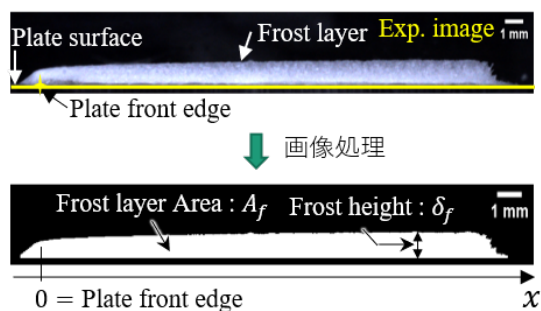


Fig. 4: 霜画像と画像処理後の霜画像

本研究での実験条件を Table 3 に示す．主流流速，主流温度はそれぞれ 2.0 m/s, 27.0 °C で固定し，主流絶対湿度，冷却面温度を変化させて実験を行った．実験時間は，100 s から 100 s 間隔で 600 s まで 6 通りとした．実験時間経過後に冷却平板上の霜層をかきとり，電子天秤（UW420H, 島津製作所）によって質量を計測し霜質量 m_f とした．また，実験中にはテストセクション側方に設置した高解像度カメラ（BU1203MCF, Toshiba Teli Co.）により 5 Hz で霜の画像を撮影した．撮影した画像を Lee ら [4] と同様の手法で解析し，霜厚さ δ_f と霜の射影面積 A_f を計測した．画像解析には MATLAB を用いた．Fig. 4 に示すように，撮影した画像を二値化して霜層部分のみを取り出し，霜厚さ方向のピクセル数をカウントすることで霜厚さを，総ピクセル数をカウントして霜層の射影面積 A_f を取得した．また，平板上の霜厚さの平均値として平均霜厚さ δ_f を得た．霜の射影面積 A_f と平板の幅 41 mm の積として霜体積 V_f を算出し，霜質量 m_f を霜体積 V_f で除して霜密度 ρ_f を算出した．

3 結果・考察

3.1 霜質量

霜質量の時間変化を Fig. 5 に示す．霜質量は時間に比例し，その質量増加率が条件により異なることがわ

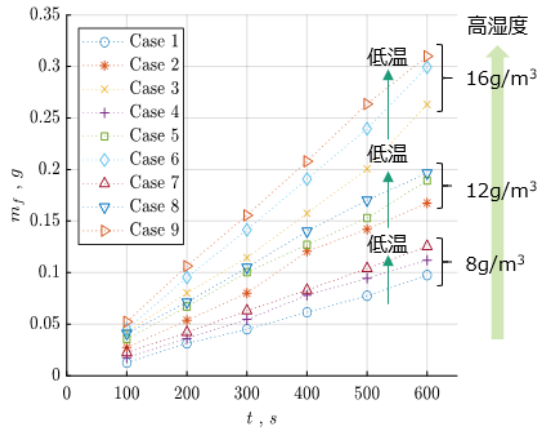


Fig. 5: 霜質量

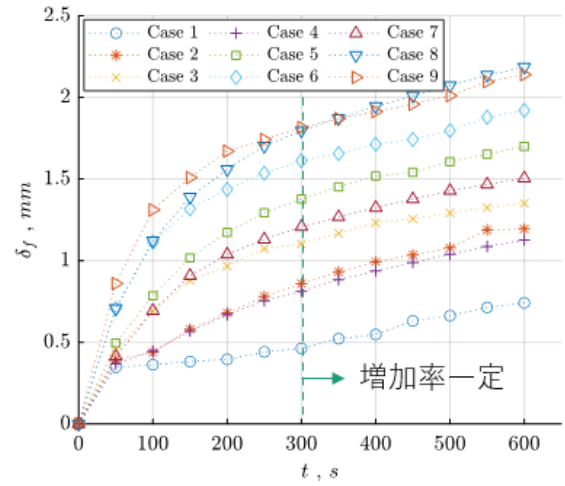


Fig. 7: 霜厚さ

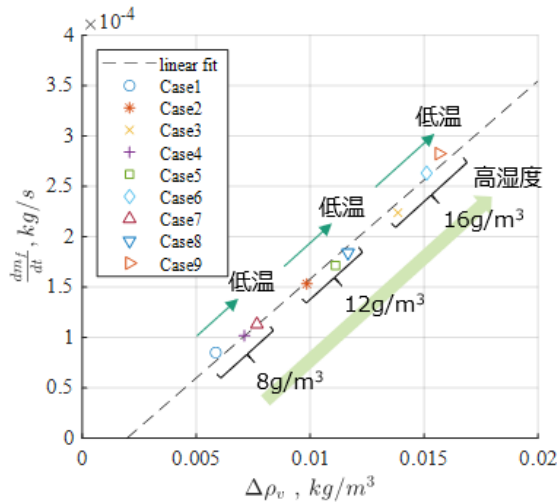


Fig. 6: 霜質量増加率

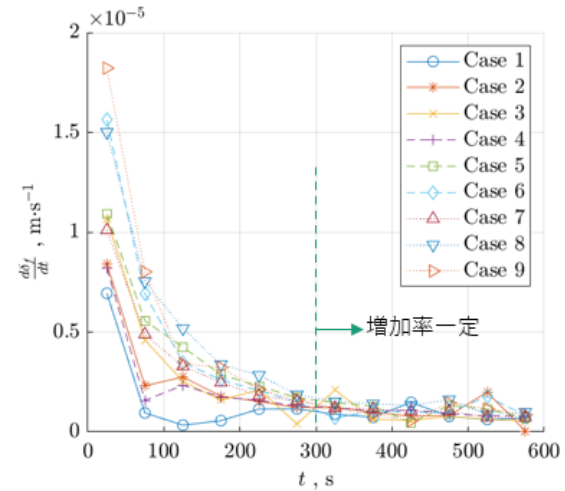


Fig. 8: 霜厚さ増加率

かる。また、霜質量は主流絶対湿度が高く、冷却面温度が低いほど大きくなること、冷却面温度に比べ、主流絶対湿度の方が霜質量への影響が大きいことが明らかになった。

各条件での冷却面単位面積当たりの霜質量増加率と主流と冷却面上との水蒸気濃度差 $\Delta\rho_v$ との関係を図. 6 に示す。

$$\Delta\rho_v \equiv \rho_{v,\infty} - \rho_{s,cp} \quad (1)$$

霜質量増加率は、主流と冷却面上との水蒸気濃度差 $\Delta\rho_v$ に比例することがわかる。本研究の条件では、霜質量増加率と主流と冷却面上との水蒸気濃度差 $\Delta\rho_v$ との間の比例定数が条件によらず一定であることから、その比例定数は本研究で固定した主流温度または主流流速に依存することが予想される。

3.2 霜厚さ

霜厚さの時間変化を図. 7 に示す。また、霜厚さ増加率の時間変化を図. 8 に示す。霜厚さ増加率は、着

霜開始直後が最も大きく、急激に減少して、300s 以降には条件によらずほぼ一定値の微小量となる。

霜厚さ増加率は霜層表面での相変化量が多いほど高くなる。霜層表面での相変化量は、霜層への水蒸気供給量が多い場合や、霜層表面温度が低い場合ほど多くなると考えられる。したがって、主流絶対湿度が高い場合や霜層表面温度が低い（冷却面温度が低い）場合に霜厚さ増加率が高くなる。そのため、着霜開始直後に最も霜厚さ増加率が大きくなり、時間経過とともに霜層が形成されると霜層表面温度が上昇し、霜厚さ増加率は急速に減少した。また同じ理由で、主流絶対湿度が低い場合や冷却面温度が高い場合に比べ、主流絶対湿度が高い場合や冷却面温度が低い場合には、霜厚さの増加率が比較的高く保たれた。

3.3 霜密度

霜密度の時間変化を図. 9 に示す。霜質量は時間とともに増加し続ける一方で、霜厚さの増加は時間とともに緩やかになるため、霜密度も時間とともに増加す

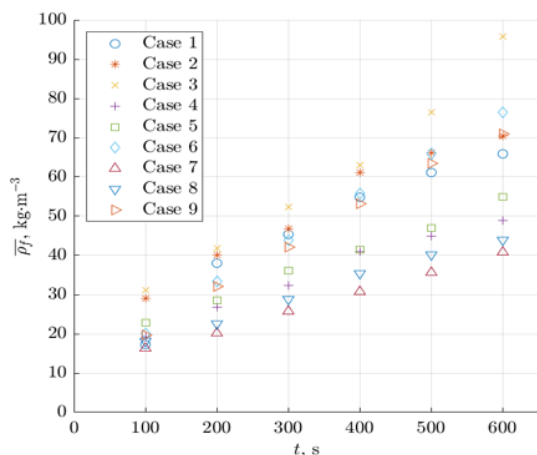


Fig. 9: 霜密度

る。また、冷却面温度が高く、主流絶対湿度が高いほど霜密度が高くなる傾向がみられる。

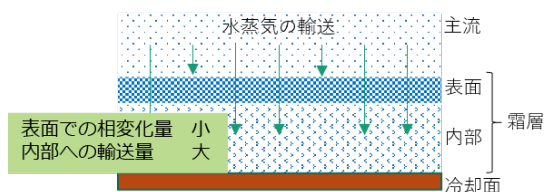


Fig. 10: 霜密度が高くなる状態

霜密度は霜層内部での相変化量が多いほど高くなる。霜層内部での相変化量は、Fig. 10 に示すように、霜層内部への水蒸気供給量が多いほど多くなるため、主流絶対湿度が高い場合や、霜層表面温度が高く表面での相変化量が少ない場合に多くなる。そのため、主流絶対湿度が高い場合や、冷却面温度が高く、霜層表面温度が高くなりやすい場合に、霜密度が高くなった。

4 結論

強制対流条件下における着霜開始後 600s 以内の短時間の着霜現象を対象に、主流絶対湿度と冷却面温度の影響を調査し、以下の知見を得た。

1. 主流絶対湿度と冷却面温度が霜質量、霜厚さ、霜密度に与える影響を Table 4 に示す。主流絶対湿度が高くなると、霜層への水蒸気輸送量が増加し、霜質量・霜厚さ・霜密度のいずれも増加する。また、冷却面温度が高くなると、主流と冷却面上での水蒸気濃度差が小さくなり霜層への水蒸気輸送量が減少することや、霜層表面の温度が高くなりやすいため、霜質量・霜厚さは減少する。冷却面温度が高い場合には霜層の厚さ方向への成長が抑制されるため、霜密度は高くなる。
2. 質量増加率は時間によらず一定で、主流と冷却

Table 4: 主流絶対湿度と冷却面温度の影響

主流条件	霜質量	霜厚さ	霜密度
主流絶対湿度 ↑	↑↑	↑	↑
冷却面温度 ↑	↓	↓	↑

面上での水蒸気濃度差に比例することが明らかになった。

3. 霜厚さ増加率は、霜層表面での相変化量が多いほど大きくなるため、主流絶対湿度が高く冷却面温度が低いほど大きい。また、霜厚さ増加率は着霜初期に最も大きく、時間経過とともに急速に減少して条件によらず同程度の微量になる。

参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構. JAXA 長期ビジョン-JAXA 2025-. Technical report, 2005.
- [2] Tetsuya Sato, Nobuhiro Tanatsugu, Kenya Harada, Hiroaki Kobayashi, and Jun'ichiro Tomike. Development Study on a Precooler for the Hypersonic Air-Breathing Engine. *JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES*, Vol. 50, No. 580, pp. 196–203, 2002.
- [3] Katsuyoshi FUKIBA, Tetsuya SATO, Hiroaki KOBAYASHI, and Hidetoshi OHKUBO. Frost Formation Problem in the Development of a Hypersonic Turbojet Engine. *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, Vol. 25, No. 2, pp. 97–106, 2008.
- [4] Jaehwan Lee and Kwan Soo Lee. The behavior of frost layer growth under conditions favorable for desublimation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, pp. 259–266, 2018.