

# 陽極酸化法を用いた超撥水伝熱管によるプリクーラ伝熱面への着霜遅延化

## Delaying Effect of the Frost Formation on Pre-cooler Tube Surfaces Using Super-Hydrophobicity Tube by Anodic Oxidation Method

十川悟, 木下義章, 守屋篤基, 大住隆真, 倉田琢巳, 佐藤哲也(早稲田大学)

### 1. 序論

宇宙航空研究開発機構(JAXA) は, 地上静止状態からマッハ 5 から 6 の広範囲を単一機構で運用する極超音速機用エンジンとして予冷ターボジェットエンジン(PCTJ) を提案している<sup>[1]</sup>. PCTJ は, 圧縮機上流に液体水素燃料を冷媒とする空気予冷却器(Pre-cooler) を搭載し, ターボ機構の熱負荷を低減することで極超音速飛行を可能とする. しかし, 低マッハ数領域においてプリクーラ伝熱面へ着霜が生じ, 熱交換量の低下や流路閉塞といったエンジン性能を劣化させる問題があり, 着霜抑制法の考案が重要課題となっている. 今までも, 冷媒噴霧による除霜法<sup>[2]</sup>や凝縮性物質を噴霧する除霜法<sup>[3]</sup>, ジェット噴射による除霜法<sup>[4]</sup>などが考案されてきた. しかし, これらの方法は新たな機構が必要となり, 機体重量の増加やシステムの複雑化が懸念される. そこで, 本研究では新たな機構を必要としない着霜抑制法として伝熱管の表面処理, 特に撥水性に着目し, 超撥水性を持たせた伝熱管を用いて実験的に着霜低減効果を確認した.

### 2. 実験

プリクーラの材質は SUS316L 製であるが, 本実験では比較的陽極酸化処理が容易な A1070 材を用いた. 供試体は外径  $\phi$  10 mm, 内径  $\phi$  7 mm の円型伝熱管で, 伝熱面積は  $2262 \text{ mm}^2$  である. 陽極酸化処理は定電流法を用いて, 硫酸 200 g/L, 電流密度  $25 \text{ A/m}^2$ , 液温  $20^\circ\text{C}$ , 電解時間 120 min の条件で行った. 撥水性の付与にはパーフルオロ基りん酸基含有エステルとエタノールの混合溶液中に 24 時間浸漬処理することで行った. 上記により処理をした供試体の静滴接触角は非処理材が  $57.2 \text{ deg}$  である一方, 撥水処理材は  $157.1 \text{ deg}$  となりロータス効果を確認した. 着霜試験は  $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$  の矩形アクリル製低速風洞中に伝熱管を垂直に設置し, 伝熱管単体の性能を取得するために単管要素試験とした. 風洞には温度, 湿度, 風速を制御された制御空気が精密空調機より供給されている. 流速は精密空調機の定格範囲内とし, 実機とレイノルズを一致させるように決定した. 冷媒は液体窒素を用い, Table 1 に示す 3 種類の制御空気中で, 500 sec 間の着霜試験を行い, 熱交換量, 着霜質量, 前方霜層厚さを測定した.

Table 1 Air conditions

Air	温度 $T$ [K]	相対湿度 $RH$ [%]	絶対湿度 $VH$ [ $\text{g/m}^3$ ]	流速 $U$ [m/s]	レイノルズ数 $Re$
1	301.3	55.2	15.0	2.0	1263
2	301.3	73.6	20.0	2.0	1263
3	301.3	55.2	15.0	4.0	2526

### 3. 結果

Fig.1 に試験開始 500 sec 後の着霜質量を示す. これより, 超撥水処理材はいずれの空気条件でも着霜質量が減少する傾向を得られた. これは, 撥水性により霜の付着力が低下したことが原因と考えられ, 着霜試験中には伝熱管に着霜した霜が主流空気により, 吹き飛ばされる現象が見られた. 特に, 主流空気に対して伝熱管後

方及び側方の霜は顕著に減少する事を確認した。これは、伝熱管後方に発生した流れの乱れにより霜がより多く吹き飛ばされたためと考えられる。

Fig.2 には前方霜層厚さと伝熱管全周の着霜質量より算出した霜密度を示す。着霜質量は減少した一方、前方霜層厚さは撥水性により増加する傾向が見られ、結果的に霜密度が減少する傾向を得た。この原因は現在追及中であるが、撥水性により霜の結晶成長に何らかの変化が生じたためと考えられる。

伝熱量の時間平均は非処理材と超撥水処理材で有意な差は見られない結果となった。伝熱管後方及び側方の着霜量が減少したことにより、伝熱量の増加が期待されたが、前方霜層の密度低下が伝熱を阻害したためこのような結果となったと推測される。

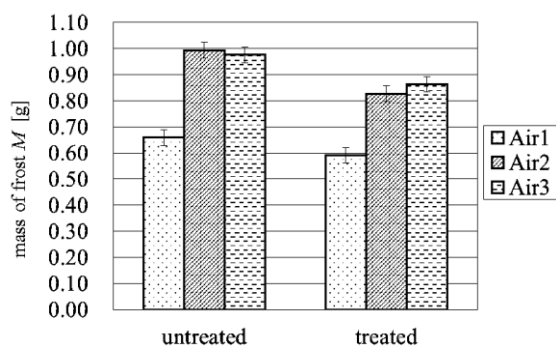


Fig.1 Mass of frost (at 500 sec)

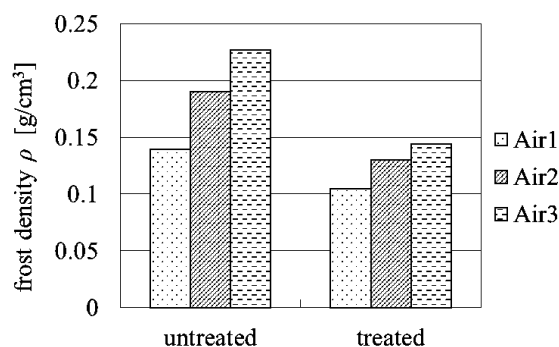


Fig.2 Frost density (at 500 sec)

#### 4. 結言

超撥水伝熱管の性能取得を目的とした単管要素試験において以下の知見を得た。

- (1) 超撥水処理材は非処理材に比べ、着霜質量が 10~16%程度減少した。これは、撥水性により霜の付着力が低下したためと考えられる。特に、伝熱管後方及び側方の霜は顕著に減少した。
- (2) 霜密度は非処理材に比べ減少した。特に、伝熱管前方の霜層厚さの大幅な増加が確認された。
- (3) 伝熱量の時間平均では有意な差が見られなかった。霜密度増加により伝熱が阻害されたためと考えられる。
- (4) 超撥水性を持たせた伝熱管は特に伝熱管後方及び側方の着霜質量を減少させるため、プリクーラの流路閉塞といった問題に対し有効であると言える。

#### 謝辞

本研究での各種物性計測は早稲田大学物性計測センターラボにて行われました。

#### REFERENCES

- [1] The long-term vision -JAXA2025-, JAXA, (2005).
- [2] T. Sato, N. Tanatsugu, K. Harada, J. Tomike, Study of the Precooler for ATREX Engine, *40th Proceedings of the Conference on Aerospace Propulsion and Power*, (2000).
- [3] T. Kimura, and T. Sato, Improvement of the Precooler Performance against the Icing Problem by Using the Condensable Gas, *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.51, No.598, pp597-605, (2003).
- [4] K. Fukiba, S. Inoue, T. Sato, and H. Ohkubo, Defrosting of a Heat Exchanger for Precooled Turbojet Engines Using Jet Impingement, *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.56, No.657, pp.464-470, (2008).