

プリクーラ伝熱面における霜層成長の遅延化に関する研究^{*1}

○平林 遥介^{*2}, 相川 美紗^{*2}, 小倉 直尊^{*3}, 佐藤 哲也^{*3}

Delay of Frost Formation on Precooler Tube Surfaces

Yosuke HIRABAYASHI^{*2}, Misa AIKAWA^{*2}, Naotaka OGURA^{*3} and Tetsuya SATO^{*3}

1 はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、長期ビジョン JAXA2025 においてマッハ 5 クラスの極超音速機技術の実証を掲げている。この極超音速機には空気中の酸素を酸化剤として用いる空気吸い込み式エンジンが採用されているが、ターボ/ラム/スクラムジェット の 3 種の基本形態には特定の作動マッハ数領域が存在する為、地上静止状態からマッハ数 5~6 の広範囲を単一機構で運用することは難しい。

この制限に対し JAXA では、燃料である液体水素を冷媒とする空気予冷却器 (Precooler) を圧縮機上流に搭載した予冷ターボジェットエンジン (Fig.1) を提案し、極超音速飛行を可能とするターボジェットエンジンの研究開発を行っている。空気予冷却器の導入は熱負荷低減によるエンジン作動領域の拡大と共に、中間冷却効果による吸い込み空気の密度増加、及び圧縮機仕事の軽減によりサイクル性能の向上が期待される。一方で、空気予冷却器の搭載によるエンジン重量・サイズの増大、主流空気の圧力損失の増加、プリクーラ伝熱面への着霜等、実現化する為には解決すべき技術課題が多くある。特に危惧される問題として低マッハ数領域において流入空気中に含まれる水蒸気が昇華凝結により伝熱管表面で霜に相変化する着霜現象が挙げられる。プリクーラ伝熱面に生成される霜層は空気と氷の多孔質物質で熱伝導性が著しく低く熱抵抗となる為、伝熱性能を劣化させる原因となる。加えて、霜層成長に伴う流路閉塞が生じ主流流路の断面積が低下する為、圧力損失の増大に繋がる。これらの問題はエンジン性能を劣化させる要因となる為、着霜抑制法の考案は重要課題となっている。

そこで、本研究では簡易的な着霜抑制法の考案を目的として、霜層成長の遅延化を促す伝熱管構造の提案、及びその有効性検証を実施した。伝熱管構造による着霜の低減は、プリクーラ以外の機構が必要となる従来の研究に比べエンジン重量の増大を最低限に抑制し、エンジンシステムの複雑化を回避するなど、単純かつ軽量化した機構が求められる推進系の条件を満たした最適であると考えられる。伝熱管構造の提案では、霜層成長の遅延化を促す要素として水蒸気輸送に着目

し、水蒸気輸送速度の軽減効果を図ったひれ付伝熱管 (Fig.2) を設計した。本稿ではひれ付伝熱管の有効性検証として実施した単管、管群の両条件における性能取得試験について報告する。

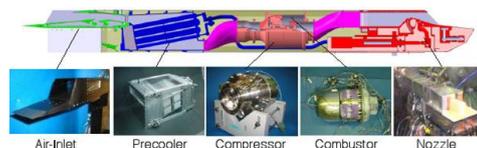


Fig.1 Hypersonic Pre-cooled Turbojet Engine

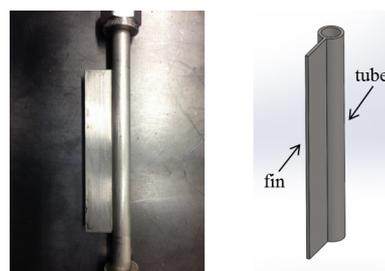


Fig.2 Longitudinal Finned Tube

2 ひれ付伝熱管の考案

プリクーラの流路閉塞は隣接する伝熱管の霜層が成長し、結合することで生じる。強制対流下における円型伝熱管周りの着霜については、吹場^[1]によって実験・数値計算の両視点から先行研究がなされており、単管条件における円型伝熱管表面の霜層は前縁、後縁、側面の順に形成されることが確認されている (Fig.3)。特に表面温度 95K 近傍の極低温域における霜層成長は伝熱管前縁部に集中し、本研究ではこの前縁部における霜層成長の抑制がプリクーラにおける流路閉塞の遅延化に有効な手段であると考えた。

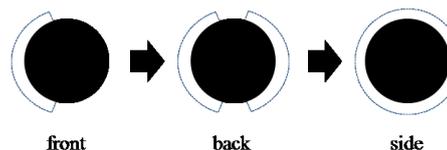


Fig.3 Frost Formation around Circular Cylinder

霜層成長は水蒸気輸送に起因する現象であり、前縁部の霜層成長を遅延させる為には水蒸気輸送速度の低減が必要となる。中村ら^[2]が伝熱特性について報告したひれ付管では、ひれ根元及び伝熱管前縁部に主流

^{*1} 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム STCP-2014-025

^{*2} 早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 機械科学専攻
Department of Applied Mechanics, Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University

^{*3} 早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空学科
Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University

の停滞領域が形成され、この領域における伝熱特性の劣化が確認された。加えて、ひれ高さがある程度以上大きければ境界層厚さが比較的薄いひれ先端表面で熱伝達率が大きくなり、伝熱管全体としての伝熱特性は総じて向上することが報告されている。着霜現象は熱移動と物質移動が同時に生じる非定常現象であることから、水蒸気輸送速度が低下する主流空気の停滞領域では着霜の抑制が期待される。また、本来の熱交換器としての伝熱特性も拡大伝熱面によって維持できることからひれ付管はブリクーラが要求する機能を満たした伝熱管形状であると言える。

そこで本研究では、澱み点に設けた拡大伝熱面のひれ高さをパラメータとして選定し、主流停滞領域の面積変化を図ったひれ付伝熱管を3種設計した。主流停滞領域の大きさはひれ高さに起因し、ひれ高さの増大に伴いひれ部における主流剥離位置が伝熱管前縁から遠ざかり、停滞領域面積が拡大することを白煙を用いた可視化試験で確認している (Fig.4)。このひれ付伝熱管の着霜遅延効果を検証する為、単管性能試験、管群性能試験を実施し、単管性能の取得、管群内での有効性評価を行なった。

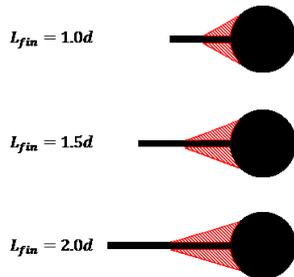


Fig.4 Stagnation Zone of Mainstream Airflow

3 性能評価試験

3.1 単管性能評価

ひれ付伝熱管の単管性能取得を目的として実施した単管性能試験について記す。試験供試体は円型伝熱管 (Type0) とひれ付伝熱管 (Type1-3) の全4種を設計し、ひれ高さは伝熱管外径 d を基準として $1.0d, 1.5d, 2.0d$ の3種を製作した。供試体の材質は熱伝導性の良い銅を選定し、ひれ部と伝熱管はろう付けによって接合した。また、各供試体の着霜性状比較を容易にする為、伝熱管の外径は実機ブリクーラに比べ大きい $\phi 25\text{mm}$ とした。単管性能試験で用いる試験供試体の諸元及び概略図を Table.1, Fig.5 に示す。尚、試験供試体は冷媒を内部に溜めることができる構造とする為、貫通していない伝熱管を製作している。

Table.1 Specification of Test Piece (Single Tube)

試験供試体	Type0	Type1	Type2	Type3
材質	Cu			
伝熱管全長	mm 135			
伝熱管外径	mm 25			
ひれ高さ	mm -	mm 25.0	mm 37.5	mm 50.0
ひれ厚さ	mm 1.5			
伝熱面積	$\times 10^3 \text{mm}^2$ 10.6	16.6	19.6	22.6

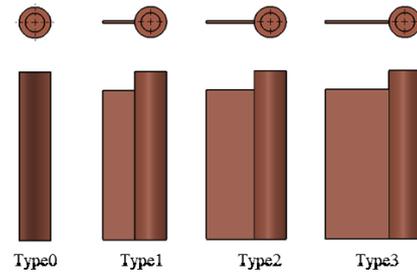


Fig.5 Test Piece (Single Tube Experiment)

3.1.1 単管試験概要

単管性能試験の概要について記す。単管試験では供試体表面温度が 85K 近傍における性能取得を行った。実験は Fig.6 に示す空気管路を用いて実施し、大気中の空気をブロワで吸い込む方式を取っている。温度データの取得は K 型熱電対を用いて行い、円型伝熱管は澱み点、ひれ付伝熱管はひれ根元及び先端で表面温度を計測した。また、着霜量の取得は伝熱管表面からへらを用いて掻き落とし、電子天秤で計測を行った。尚、試験供試体近傍の主流流速は 2.95m/s 、試験時間は 400 秒に設定している。

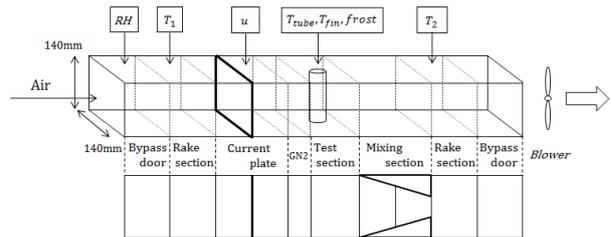


Fig.6 Experimental Equipment (Single Tube)

3.1.2 単管試験結果

各供試体の試験条件を Table.2, 0 秒, 200 秒, 400 秒における霜層性状を Fig.7 に示す。伝熱管前縁の霜層性状を比較すると、ひれ高さの増加に伴い霜層が粗く形成されていることが確認できる。これは、主流停滞領域がひれ高さの増加に伴い拡大し、前縁への水蒸気輸送が低減された為と考えられる。試験開始 400 秒におけるひれ部を除く伝熱管の着霜量を Type0 の円型伝熱管を基準とした減少率で評価すると、ひれ高さ 25.0mm の Type1 は 31.19% 、 37.5mm の Type2 は 43.20% 、 50.0mm の Type3 は 49.93% となり、ひれ高さの増大に伴い着霜量が減少することが確認された (Table.3)。尚、Type3 のみ実験日が異なり、絶対湿度条件が異なるため減少率の算出は Type3 と同日に実施した円型伝熱管の着霜量 (0.677g) を用いている。

Table.2 Experimental Condition (Single Tube)

試験供試体	Type0	Type1	Type2	Type3
Re 数	4670			
主流流速	m/s $2.95(\pm 0.03)$			
主流温度	K 288.74	288.92	288.63	286.27
主流絶対湿度	g/kg' 5.67	5.53	5.43	3.27

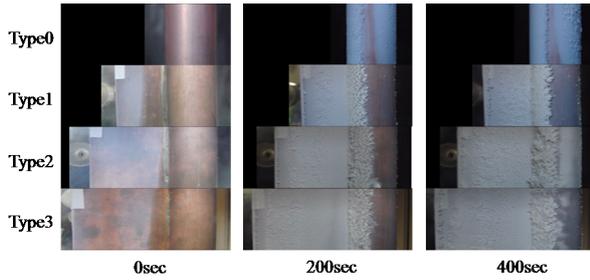


Fig.7 Frost Formation around Single Tube

Table.3 The amount of Frost on Circular Cylinder (at 400sec)

試験供試体	Type0	Type1	Type2	Type3
着霜量 g	0.824 (0.677*)	0.567	0.468	0.339*
減少率 %	-	-31.19	-43.20	-49.93*

上記の伝熱管前縁における着霜量，霜密度の低下は霜層成長遅延効果を示すものであり，ひれ付伝熱管の主流停滞領域生成による水蒸気輸送速度の軽減が着霜抑制に有効であることが確認された。

3.2 管群性能評価

単管性能評価で得たひれ付伝熱管の霜層成長遅延効果が管群においても有効であるか検証した管群性能試験について記す。試験供試体は円型伝熱管，ひれ付伝熱管の各々で1列管群と3列管群を製作し，ひれ付伝熱管の3列管群は1列目のみにひれ付伝熱管を配置した。3列管群は，流れ方向ピッチ20mm，流れに垂直方向ピッチ16mmの碁盤目配列で，材質は実機ブリクーラと同様のSUS316Lを選定した。管群性能試験で用いる試験供試体の概略図及び諸元をFig.8, Table.4に示す。尚，管群性能試験では液体窒素用自加圧式容器を用いて伝熱管内に冷媒を流動させ性能取得を行った。

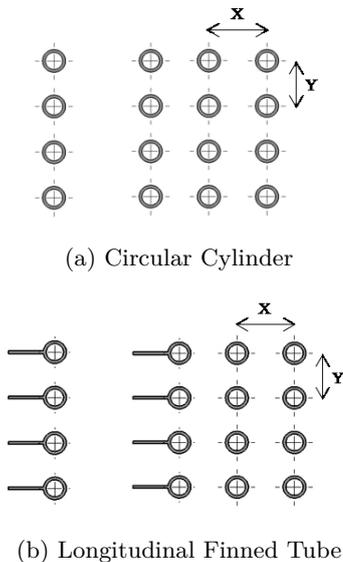


Fig.8 Test Piece (Left:Single, Right:In-Line)

Table.4 Specification of Test Piece (Tube Bank)

材質	SUS316L	
伝熱管全長	mm	72.0
伝熱管外径	mm	8.0
伝熱管肉厚	mm	1.0
ひれ高さ	mm	12.0
ひれ厚さ	mm	1.0
伝熱面積 (Circle/Fin)	$\times 10^3 \text{mm}^2/\text{tube}$	1.81/3.49
X方向ピッチ	mm	20.0
Y方向ピッチ	mm	16.0

3.2.1 管群試験概要

管群性能試験の概要について記す。管群試験では供試体表面温度が95K近傍における性能取得を行った。実験はFig.9に示す空気管路を用いて実施し，主流空気は精密空調機で温湿度制御された温度293.15K，絶対湿度8.68g/kg'の空気を使用する。管群性能の評価は計測される供試体通過前後の温度差及び全圧損失から熱伝達率hと圧力損失係数Cpを算出して行う。各性能を導出する計算式をEq.(1)，(2)に記す。

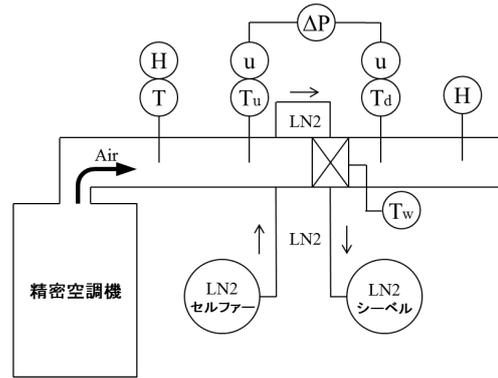


Fig.9 Experimental Equipment (Tube Bank)

$$h = \frac{\rho_{\infty} u_{\infty} A C_{p\infty} (T_u - T_d)}{A_w (T_u - T_w)} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} u_{\infty}^2} \quad (2)$$

尚，試験供試体近傍の主流流速は3.0m/sとし，実機ブリクーラの設計値から算出される最小流路断面における流速を用いて定義されるRe_d数3196に一致する値を設定した。また，試験時間は着霜が問題となる離陸直後の10分間を想定し，600秒としている。

3.2.2 管群試験結果

1列管群，3列管群の試験結果について記す。尚，管群試験の試験条件は2種の供試体で共通とし，Table.5に示す値とする。

初めに1列管群の結果について記す。1列管群における圧力損失係数Cpと熱伝達率hの時間履歴をFig.10，11に示す。ひれ付伝熱管群の圧力損失係数

挙動に着目すると、320 秒、380 秒、450 秒時に圧力損失係数の回復が確認され、円型伝熱管群に比べ性能が大幅に改善された。これはひれ付伝熱管の円管前縁部に付着した粗い霜層が剥離・飛散したことに起因する回復で、熱伝達率においても同様の回復傾向が確認される。また、550 秒以降はひれ付伝熱管群においても円型伝熱管群と同様に圧力損失係数が増加傾向に遷移する挙動が計測され、これはひれ部の霜層成長による流路閉塞に起因すると考えられる。590-600 秒における各供試体の性能の平均値を比較すると、円型伝熱管群を基準としてひれ付伝熱管群の圧力損失係数は 7.39% の低減、熱伝達率は 29.8% の減少を示す結果となった。但し、600 秒間の総伝熱量についてはひれ付伝熱管群が 67.4% 増加しており、供試体の重量増加率 54.6% を考慮すると性能は向上したと考えられる。

Table.5 Experimental Condition (Tube Bank)

試験供試体	Single Row	In-Line Tube Bank
Re _d 数		3196
主流流速	m/s	3.0
主流温度	K	293.15
主流絶対湿度	g/kg'	8.68

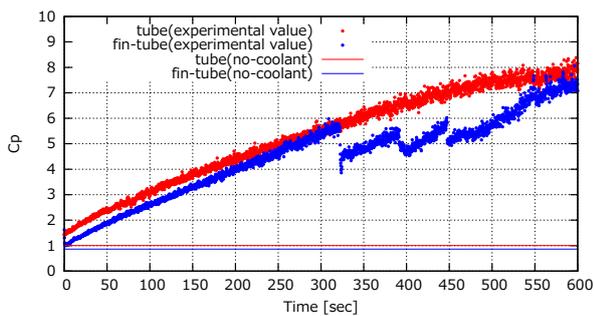


Fig.10 Pressure Loss Coefficient (Single Row)

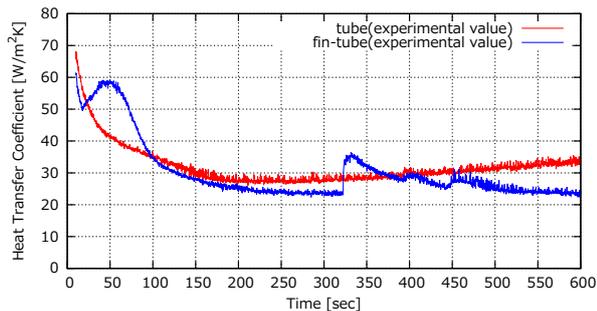


Fig.11 Heat Transfer Coefficient (Single Row)

続いて、3 列管群の結果について記す。3 列管群における圧力損失係数 Cp と熱伝達率 h の時間履歴を Fig.12, 13 に示す。ひれ付伝熱管群の圧力損失係数の挙動に着目すると、1 列管群と同様、伝熱管前縁の霜層剥離・飛散が確認され、それに伴う圧力損失係数の回復が計測された。しかし、1 列管群と比較すると円型伝熱管群に対する性能値の回復は微小であり、管群全体としての大きな性能改善に繋がらない結果となった。この要因として 2 列目以降の管群配置の影響が挙

げられる。無着霜時における圧力損失係数の値に着目すると 1 列管群とは異なり、初期値の差が無いことが確認される。また、熱伝達率についても 3 列管群では各供試体の挙動が類似したものとなりひれ付伝熱管の効果が打ち消された結果が示された。このことから、流れ方向のピッチや 2 列目以降の配列が管群性能に影響を与えるパラメータになり得ると推測され、後列条件を変化させた管群構造での検証が必要であると言える。

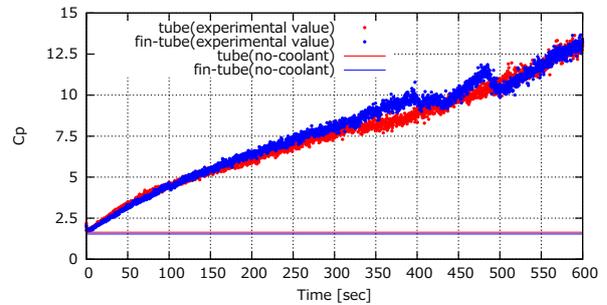


Fig.12 Pressure Loss Coefficient (In-Line)

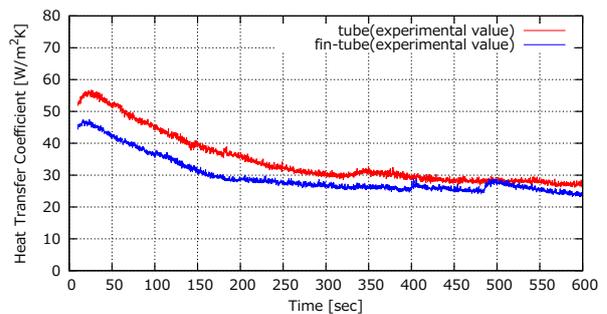


Fig.13 Heat Transfer Coefficient (In-Line)

4 結論

伝熱管凝み点部に拡大伝熱面を設けたひれ付伝熱管の霜層成長遅延効果検証を目的として、単管、管群の両条件における性能取得試験を実施した。本研究で得た知見は以下の通りである。

1. 単管性能試験ではひれ高さの増加に伴い霜層成長が遅延化する結果が取得され、主流停滞領域の生成による水蒸気輸送速度の軽減が着霜抑制に有効であることが確認された。
2. 管群性能試験では 1 列管群において霜層の剥離による性能回復が確認されたが、3 列管群では後列配置によりひれ付伝熱管の効果が打ち消され、管群性能の改善に繋がらない結果となった。今後は管配列を再検討し、最適構造を追究する。

参考文献

- 1) 吹場活佳, "冷却円柱周りの水蒸気の凝縮を伴う流れの物質伝達", 総合研究大学院大学博士論文, 2005
- 2) 中村行三, 福永節夫, 松下正幸, "新伝熱管の性能研究 (第 1 報)", 日本機械学会論文集, 22 巻, 116 号 (1956), pp.253-259