

極低温冷却円管への着霜に及ぼす障害物形状の影響

Influence of Obstacle's Cross-Sectional Shape on a Frost Formation on a Cryogenically Cooled Cylinder

◎佐藤 颯大* (静岡大院), 吹場 活佳* (静岡大院), 園部 誕紀* (静岡大院), 吉村 祐亮* (静岡大院)

◎Sota SATO*, Katsuyoshi FUKIBA*, Nobuki SONOBE* and Yusuke YOSHIMURA*

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University

NOMENCLATURE

c_p	: specific heat at constant pressure	[J/kg/K]
C_p	: pressure drop coefficient	[-]
\dot{m}	: mass flow rate of main air flow	[kg/s]
Δp	: cooling tube's pressure drop	[Pa]
Q	: the amount of heat transferred	[W]
ρ	: air density	[kg/m ³]
T	: airflow temperature	[K]
u	: main airflow speed	[m/s]

Subscripts

in : inlet

out : outlet

1. 序論

近年, 大陸間移動などの長距離輸送時間を短縮するため極超音速機の開発が進められている. 極超音速機とは一般的にマッハ5以上で飛行する航空機のことを示す. また安全性, 信頼性が高く低コストで再使用が可能な宇宙輸送システムとして, 極超音速で飛行する宇宙往還機 (スペースプレーン) の開発も進められている. これらのシステムには, 高比推力かつ広いマッハ数領域で連続作動できる予冷ターボジェットエンジン (PCTJ) が搭載される¹⁾.

極超音速機にターボジェットエンジンを搭載した場合, 吸入した高速気流を減速する過程で空力加熱によって空気が極めて高温に加熱される. その温度は 1000 °C にも及び, エンジン推力の大幅な低下などの重大な問題を引き起こす. この問題への対策として, PCTJ では極低温熱交換器 (プリクーラ) による吸入空気の前冷却が行われる. Fig. 1 に PCTJ の概略図を示す²⁾. エアインテークとジェットエンジン間に燃料の液化水素を冷媒としたプリクーラが設置されている. このプリクーラは, 極超音速飛行中にエンジンを高温から保護する役割を担うだけでなく, 離陸時には空気密度を上昇させて推力を増大させる役割を担う.

しかし, PCTJ を地上付近で稼働させる上で重大な課題があることが報告されている³⁾. 熱交換器を作動させると, 空気中の水分が霜となって冷却管表面に付着する. この着霜は熱交換を著しく阻害するだけでなく, 流路狭窄による圧力損失上昇を招いて主流流速を低下させる. Fig. 2 に PCTJ 試験機における着霜の様子を示す³⁾. この着霜は最終的に流路をほ

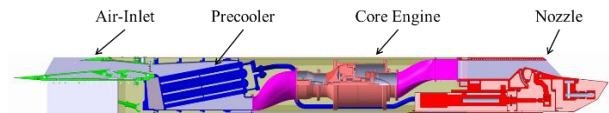


Fig. 1. Cut view of PCTJ.

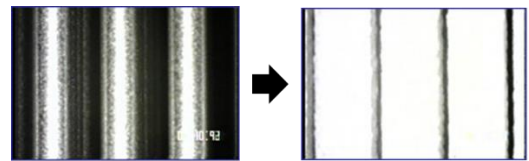


Fig. 2. The pictures of frost formation on cooling tubes of the precooler.



Fig. 3. Concept of the countermeasure of frost formation.

ぼ完全に閉塞し, エンジンの稼働が不可能となる. この技術的課題を克服するため, 様々な着霜抑制法が研究されており一定の効果を上げている⁴⁾⁵⁾. PCTJ の構造上, 飛行中にバード・ストライクを受けると熱交換器内の冷却管が破損して燃料が漏洩する可能性が高いことも課題となっており, PCTJ の実現に向けてこれらの課題を解決する必要がある.

PCTJ に適用できる新しい着霜抑制法として, 筆者らは強制対流中に置かれた冷却管の前方に V 字型の障害物を設置し, 冷却管を空気流の衝突から保護することで着霜を抑制する方法を提案した⁶⁾. Fig. 3 にこの着霜抑制法の概念図を示す. この障害物は冷却管をバード・ストライクによる破損から保護する役割を担う. 気流湿度 50 %, 冷媒温度 -20 °C および -196 °C で実験を行い, V 字型障害物による着霜抑制法が (1) 冷却面温度が極低温であるとき, (2) 適切な大きさの障害物を選択したとき, の両者を満たす場合に一定の着霜抑制効果があることを明らかにした⁶⁾.

本研究では, 障害物と冷却管の距離および障害物の形状が着霜現象に及ぼす影響を調査したため, その結果を報告する.

2. 実験装置と条件

強制対流中に冷却管を設置し, 着霜挙動の観察と熱交換器性能の計測を行った. Fig. 4 に実験装置の概要を示す. 気流は恒温恒湿送風機から送出され,

増速ファン，整流筒，オリフィス流量計を通過してテストセクションへと導かれる．オリフィス流量計では前後の圧力差から空気流量が測定される．

テストセクションの概要を Fig. 5 に示す．テストセクションは幅 40 mm，高さ 60 mm のアクリル製矩形流路であり，直径 20 mm の銅製冷却管によって熱交換が行われる．冷媒には -196°C の液化窒素を用いた．気流条件は PCTJ を地上で運転した状態を想定し，温度 20°C ，相対湿度 50 %，流速 1.5 m/s， $\text{Re} = 2,000$ とした．冷却管の前後には圧力計測孔が設置されており，これにより試験区間の圧力損失を計測した．この圧力損失を Eq.(1) に示されるように主流の動圧で除して無次元化し，圧力損失係数として熱交換器性能を評価した．

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (1)$$

また冷却管の前後には熱電対が設置されており，これにより主流の温度差を測定した．下流においては温度が一樣でないため，3 本の熱電対を配置して温度計測を行った．冷却円管に温水を供給して行った予備実験より，この 3 点での温度計測は妥当であると判断した⁶⁾．主流温度差を Eq.(2) に適用して熱

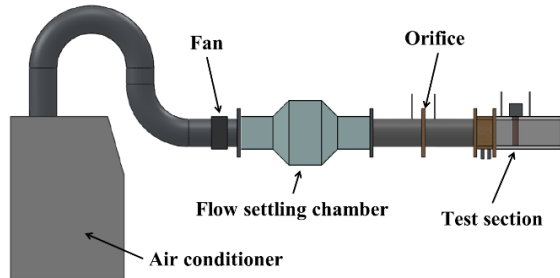


Fig. 4. Experimental apparatus.

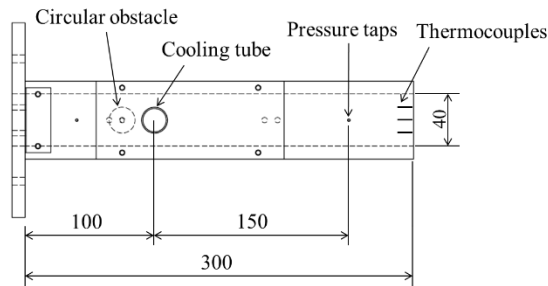


Fig. 5. Overhead view of test section.

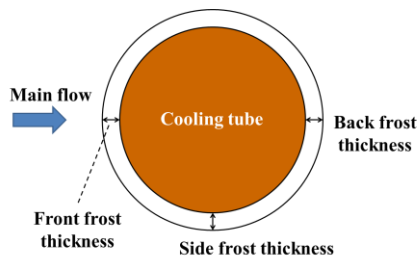


Fig. 6. Definition of the thickness of the frost on the cylinder.

交換量を算出し，熱交換器性能を評価した．

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

気流方向に対して冷却管の前方，後方，側方に付着した霜層の厚さは撮影した画像を用いて測定した．Fig. 6 にそれぞれの霜層厚さの呼称を示す．

実験に際しては，試験区間の上流を閉じて主流が試験区間に流入しないことを確認した後，試験区間への乾燥空気の充填を行う．試験区間に乾燥空気が充填した状態で伝熱面の予冷却を行うことで，各ケースの試験開始時における伝熱面温度を等しくすることができ，また試験開始前に冷却管へ着霜することによる初期状態の差異を無視できる程度に小さくすることができる．冷却円管内の冷媒が核沸騰し伝熱面温度が一定となったことを確認した後，試験区間に主流を流入させて実験を開始する．試験時間は 600 秒とした．

本実験では V 字型，円形，正方形，長方形の 4 種類の断面形状の障害物を用意し，障害物なしのケースと比較して着霜抑制効果を検証した．Fig. 7 に各障害物の寸法を示す．V 字型障害物には L 字等辺アルミアングルを使用し，円形，矩形障害物にはポリアセタール樹脂を使用した．V 字型障害物では，冷却円管前縁から障害物頂点までの距離を障害物距離と定義し，円形および矩形障害物では間隙距離を障害物距離と定義した．長方形障害物においては，寸法，障害物距離を PCTJ 試験機に搭載される防護格子で使用されているものに合わせて設定した．実験条件を Table 1 に示す．

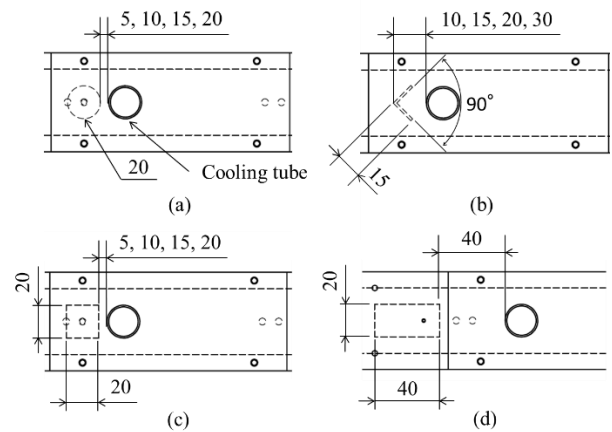


Fig. 7. Overhead view of obstacles (a): with circular obstacle, (b): with V-shaped obstacle, (c): with square obstacle, (d): with rectangle obstacle.

Table 1. Obstacle conditions.

Obstacle	Distance[mm]
V-shaped obstacle	10, 15, 20, 30
Circular obstacle	5, 10, 15, 20
Square obstacle	5, 10, 15, 20
Rectangle obstacle	40

3. 実験結果

3.1 円形障害物を用いた着霜実験

3.1.1 映像による着霜の様子

円形障害物を用いた着霜実験において、試験開始から 600 秒経過後に流路下流から撮影した冷却管への着霜の画像を Fig. 8 に示す。左から障害物がない場合、障害物距離が 5 mm および 20 mm の場合の画像となっている。初期状態との違いを明確化するため、着霜した円管の画像を無着霜時の円管の画像に重ねて表示している。図より、伝熱面に霜が付着している様子が見て取れる。また、伝熱面上で着霜領域と無着霜領域が明確に分かれている。障害物の有無や障害物距離に関わらず、冷却管下流、特に前方よどみ点から 90°~140°の領域においては霜の成長がほとんど見られない。

試験開始から 600 秒経過後に流路側方から撮影した冷却管への着霜の画像を Fig. 9 に示す。図において、左側が主流の上流となっている。図より、障害物が無い場合には冷却円管の前部への着霜が著しく、前方よどみ点から 90°の領域が霜に覆われている。一方、障害物距離が 5 mm のときには円管の前縁部に着霜しない領域が存在していることがわかる。また障害物の設置により、着霜面積が減少していることがわかる。図ではわかりにくいですが、障害物距離が大きい場合でも前縁部に着霜は見られない。障害物距離が 20 mm の場合には、冷却管の後縁における霜層厚さが不均一となっている。

3.1.2 霜層厚さ

Fig. 10 に側方霜層厚さを示す。図中の W/O の表示は障害物を設置しない場合のデータであり、5 mm, 20 mm などの表示は障害物距離を示している。障害物を設置すると 20 秒から 180 秒までの霜層厚さの勾配は大きくなる。しかし、それ以降の勾配は障害物を設置しない場合とほぼ等しく、試験終了時には障害物設置による差が見られない。障害物を設置し

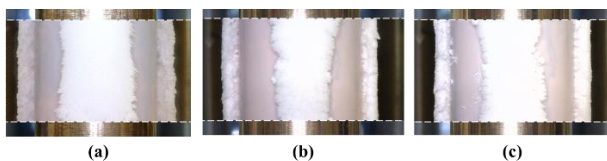


Fig. 8. The pictures of frost formation from downstream camera (a): without obstacle, (b): 5 mm, (c): 20 mm.

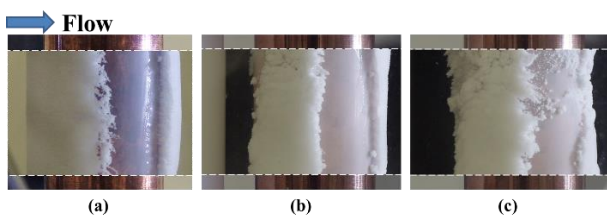


Fig. 9. The pictures of frost formation from side camera (a): without obstacle, (b): 5 mm, (c): 20 mm.

た場合の試験初期における勾配の上昇は、障害物によって狭窄され増速した主流が冷却円管の側方へ衝突した影響だと考えられる。また障害物距離が変化した場合でも、側方霜層厚さには有意な差が見られない。

Fig. 11 に後方霜層厚さを示す。障害物距離が 15 mm 以上の場合には霜層が頻繁に脱落しデータのばらつきが大きくなってしまったため、図には示していない。障害物の設置によって着霜が抑制されることがわかる。特に障害物距離が 10 mm の場合には、300 秒での霜層厚さが障害物なしの場合の 1 割程度に抑制されている。これは障害物の設置によって流れ場が変化し、冷却管後縁への水蒸気供給量が減少したためと考えられる。

障害物を設置した場合には冷却管側方への着霜が前方に成長して冷却管の前縁部を覆ったため、前方霜層厚さのデータはない。

3.1.3 圧力損失係数

Fig. 12 に圧力損失係数を示す。いずれの障害物条件でも霜層の成長に伴って圧力損失係数が上昇している。またいずれの障害物条件でも 160 秒以降の係数の勾配はほぼ等しい。障害物がない場合では、40 秒まで圧力損失係数がほぼ一定となり、そこから 160 秒まで大きく上昇している。その後係数の勾配は減少し、試験終了までほぼ一定の勾配となっている。この上昇傾向は Fig. 10 に示される側方霜層厚さの増加傾向とよく一致しており、障害物がない場合

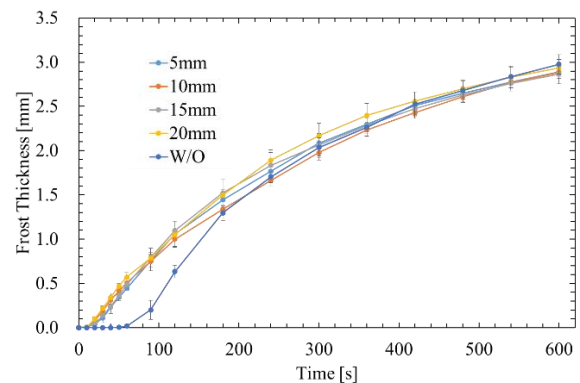


Fig. 10. Frost thickness on the side area with the circular obstacle.

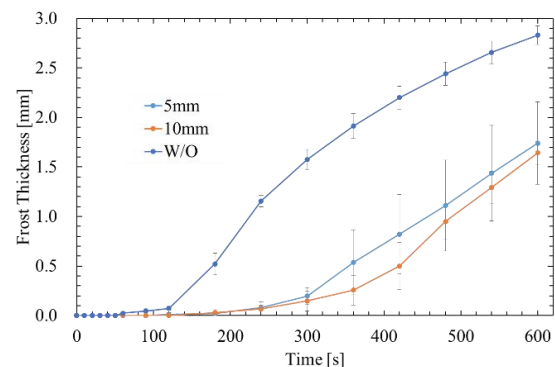


Fig. 11. Frost thickness on the downstream stagnation point with the circular obstacle.

には冷却管側方への着霜が圧力損失に大きく寄与していると言える。障害物距離が 5 mm の場合の圧力損失係数は、障害物がない場合の値とよく一致している。障害物距離が大きくなると圧力損失係数も増加しているように見えるが、誤差が 0.8 程度であることを考慮すると有意な差であるかどうかは判断が難しい⁶⁾。

主流中に直列に設置された二円柱において、前方の円柱が下流に形成した負圧領域中に後方の円柱が侵入していれば、負圧領域を縮小する効果によって全体の抗力係数が低減することが知られている⁷⁾。今回の実験でもこの効果により、障害物距離が小さい場合には圧力損失係数が低減されることが見込まれたが、障害物距離が 5 mm の場合でも低減効果は見られなかった。これは今回の実験が流路内で行われたため、冷却円管を開放空間中に置いた場合とは円管周りの流れが大きく異なるためと考えられる。

3.1.4 熱交換量

Fig. 13 に熱交換量を示す。いずれの障害物条件でも霜層の成長に伴って熱交換量が減少している。また、いずれの障害物条件でも試験開始直後に熱交換量が最大となり、その後は減少している。冷却円管の予冷却時には微量の液体空気が伝熱面に付着していることを目視で確認しており、この液体空気が

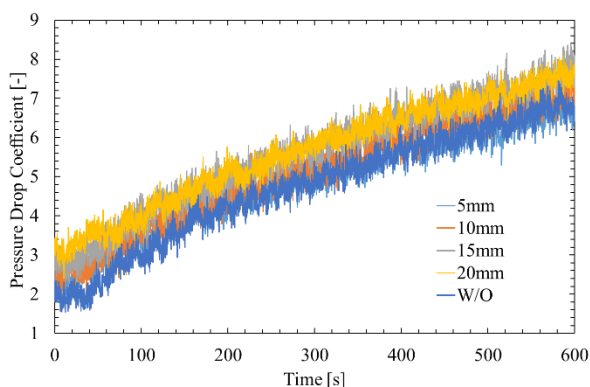


Fig. 12. Effect of the obstacle distance on the pressure drop coefficient with the circular obstacle.

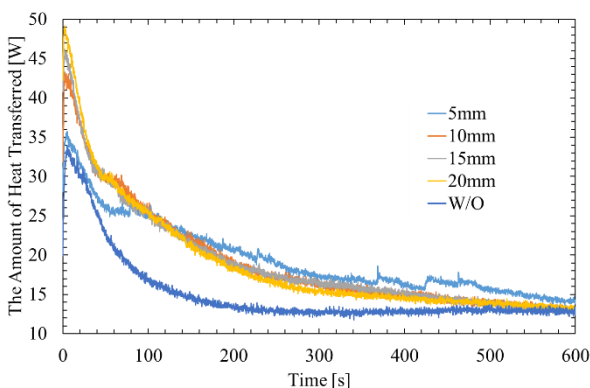


Fig. 13. Effect of the obstacle distance on the amount of heat transferred with the circular obstacle.

蒸発していく過程で試験開始直後に見られる熱交換量の上昇を引き起こすと考えられる。障害物がない場合には 240 秒以降ではほぼ一定の値となっている。障害物を設置すると試験開始直後の熱交換量は増大するが、試験時間の経過とともに障害物がない場合の値に近づいていき、試験終了時にはほぼ等しい値となる。障害物距離が 5 mm の場合では、60 秒から 240 秒までの熱交換量の勾配がその他の障害物条件の場合よりも小さい。

熱交換量の積分値を試験時間で除した値を平均熱交換量とし、Table 2 に示す。障害物の設置によって、障害物がない場合よりも平均熱交換量が 3 割程度増加した。この熱交換量増加は、Fig. 9 に見られる着霜面積の減少および Fig. 11 に見られる霜層厚さの減少に起因するものだと考えられる。

以上の結果をまとめると、円形障害物の設置によって特に冷却円管の後方における着霜の抑制に効果があり、熱交換量低下の抑制に効果があった。また、障害物距離が過大な場合には圧力損失係数は円管のみの場合に比べ増加するが、距離を小さくすることで損失の増加を抑制できた。

3.2 矩形障害物を用いた着霜実験

3.2.1 映像による着霜の様子

矩形障害物を用いた着霜実験において、試験開始から 600 秒経過後に流路下流から撮影した冷却管への着霜の画像を Fig. 14 に示す。左から障害物がない場合、障害物距離が 5 mm および 20 mm の場合の画像となっている。障害物がない場合、障害物距離が 20 mm の場合では円形障害物の場合と同様な着霜が見られる。障害物距離が 5 mm の場合では着霜の様子が左右非対称であり、その他の障害物条件では無着霜であった領域においても不均一な着霜が見られる。これは流路構築の際に、障害物の傾きや位置合わせにおける誤差が生じたためと考えられる。

試験開始から 600 秒経過後に流路側方から撮影した冷却管への着霜の画像を Fig. 15 に示す。障害物距離が 5 mm のときには円管の後縁部における霜層厚さが不均一となっている。また円形障害物を用いた場合と同様に、障害物の設置によって冷却管の前縁部には着霜が生じないことを目視で確認している。

Table 2. Effect of the obstacle distance on the average amount of heat transferred with the circular obstacle.

Distance [mm]	The average amount of heat transferred [W]
5	19.6
10	19.1
15	19.1
20	18.9
W/O	15.0

3.2.2 霜層厚さ

Fig. 16 に側方霜層厚さを示す. 図中の **Rectangle** の表示は長方形障害物を使用した場合のデータを示している. 長方形障害物の場合, 円管との距離は 40 mm である. 障害物を設置すると 20 秒から霜層が成長し始め, 障害物距離が 10 mm 以上の場合では 300 秒までの霜層厚さは障害物がない場合よりも大きい. しかし試験時間の経過とともに霜層厚さの勾配は減少し, 試験終了時には両者はほぼ等しい値となる. 障害物距離が 5 mm の場合では, その他のいずれの障害物条件よりも 90 秒から 240 秒までの勾配が小さく, 試験終了時には障害物がない場合よりも 1 割程度小さい値となる.

Fig. 17 に後方霜層厚さを示す. 障害物距離が 10 mm 以上の場合では, 障害物がない場合と有意な差が見られない. 障害物距離が 5 mm の場合では, 120 秒から 420 秒までの霜層厚さの勾配が小さく, 試験終了時には障害物がない場合よりも 5 割程度小さい値となる. 障害物距離が 5 mm と小さい場合では, 側方, 後方の着霜がいずれも低減されることがわかった.

障害物を設置した場合には冷却管側方への着霜が前方に成長して冷却管の前縁部を覆ったため, 前方霜層厚さのデータはない.

3.2.3 圧力損失係数

Fig. 18 に圧力損失係数を示す. 障害物の設置によって試験開始直後の圧力損失係数が 2 倍以上大きくなることからわかる. 試験開始直後の圧力損失係数は, 障害物距離が 5 mm の場合で 4 程度, 20mm の場合で 5 程度であり, 障害物距離の増大が圧力損失の増大をもたらす傾向にある. また, 障害物を設置した場合の圧力損失係数の勾配がどの障害物距離でもほぼ等しいことから, 障害物距離の縮小が圧力損失係数の低減に最も有効であると言える. 長方形障害物を用いた場合, 圧力損失係数は障害物がない場合の約 3 倍と非常に大きい値となっている. これは障

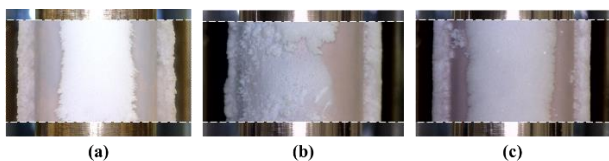


Fig. 14. The pictures of frost formation from downstream camera (a): without obstacle, (b): 5 mm, (c): 20 mm.

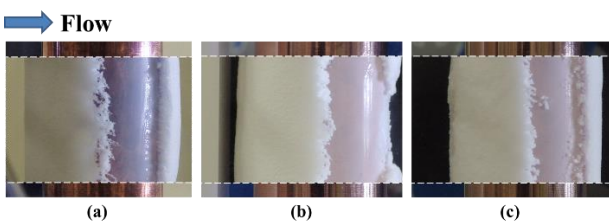


Fig. 15. The pictures of frost formation from side camera (a): without obstacle, (b): 5 mm, (c): 20 mm.

害物距離がその他のケースよりも大きいことが要因であると考えられる.

3.2.4 熱交換量

Fig. 19 に熱交換量を示す. 障害物距離が 10 mm 以上および長方形障害物の場合ではほぼ等しい値を示している. いずれのケースでも, 40 秒から 140 秒までの熱交換量の勾配は障害物がない場合よりも小さい. 障害物距離が 5 mm の場合ではさらにその勾配が小さく, 試験終了までその他の障害物条件よりも高い熱交換量を示す. 440 秒で, 障害物がない場合および障害物距離が 10 mm 以上のケースがほぼ同値となり, 試験終了時には障害物距離が 5 mm のケースもほぼ同値となる.

平均熱交換量を Table 3 に示す. 障害物の設置によって, 障害物がない場合よりも平均熱交換量が 2 割程度増加した. 特に障害物距離が 5 mm の場合では, 3 割程度増加した. Fig. 16, Fig. 17 より, 障害物距離が 5 mm の場合では霜層厚さが特に小さくなっており, 霜層厚さが平均熱交換量に多大な影響を与えていると考えられる.

以上の結果をまとめると, 矩形障害物の設置は熱交換量低下の抑制には効果があるが, 圧力損失係数の低減には逆効果であった. また, 障害物距離が小さい場合には伝熱面への着霜を効果的に抑制でき, 熱交換量の低下を抑制できた.

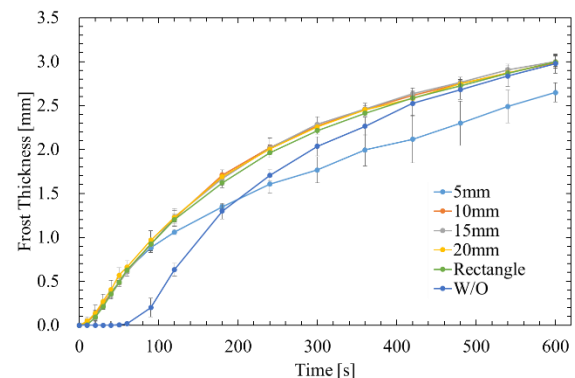


Fig. 16. Frost thickness on the side area with the square or rectangle obstacle.

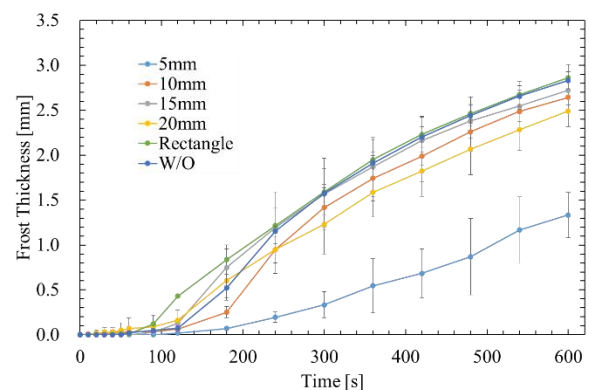


Fig. 17. Frost thickness on the downstream stagnation point with the square or rectangle obstacle.

3.3 V字型障害物を用いた着霜実験

3.3.1 映像による着霜の様子

V字型障害物を用いた着霜実験において、試験開始から600秒経過後に流路側方から撮影した冷却管への着霜の画像をFig. 20に示す。左から障害物がない場合、障害物距離が10mmおよび30mmの場合の画像となっている。この画像の撮影は、試験終了直後に障害物を取り外した状態で行った。図より、障害物距離が10mmのときには円管の前方にはほとんど着霜が見られない。なお、今回の実験では冷却円管と障害物の距離が小さい場合においても、霜層が成長して円管と障害物との隙間を閉塞しないことを目視で確認している。障害物距離が大きくなると冷却円管前方の着霜量は増加したが、円管の前縁部分にはほとんど着霜しない領域が存在することを目視で確認した。

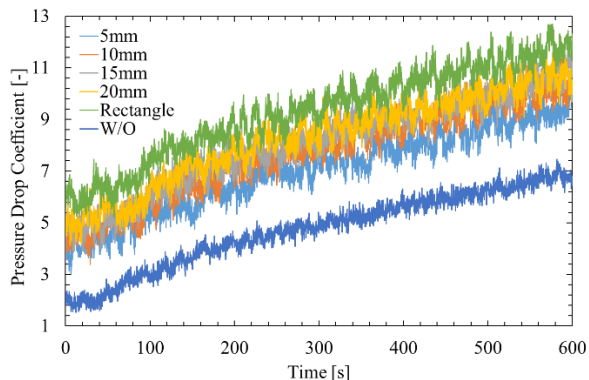


Fig. 18. Effect of the obstacle distance on the pressure drop coefficient with the square or rectangle obstacle.

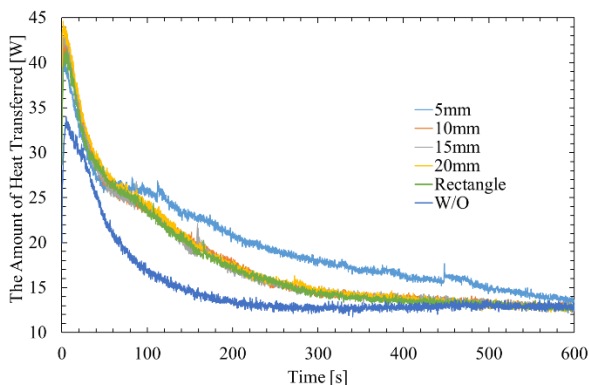


Fig. 19. Effect of the obstacle distance on the amount of heat transferred with the square or rectangle obstacle.

Table 3. Effect of the obstacle distance on the average amount of heat transferred with the square or rectangle obstacle.

Distance [mm]	The average amount of heat transferred [W]
5	19.8
10	17.7
15	17.6
20	17.9
Rectangle	17.5
W/O	15.0

3.3.2 霜層厚さ

Fig. 21に前方霜層厚さを示す。障害物距離が10mmの場合は試験中に霜層を撮影することができず、試験終了後に障害物を取り外して計測を行ったため、試験中のデータはない。また、障害物距離が30mmの場合は冷却管側方への着霜が前方に成長して冷却管の前縁部を覆ったため、データはない。図より、V字型障害物によって霜層成長が抑制されていることがわかる。特に障害物距離が10mmの場合では、試験終了時の霜層厚さが障害物を使用しない場合の1割程度となっている。

Fig. 22に側方霜層厚さを示す。障害物を設置した場合には90秒までの霜層厚さの勾配が増大した。それ以降の霜層厚さは、障害物距離が10mm、30mmの場合では障害物がない場合と同程度となり、15mm、20mmでは障害物がない場合よりも減少している。特に障害物距離が15mmの場合では、試験終了時の霜層厚さが障害物を使用しない場合の7割程度となっている。PCTJのようなシェルアンドチュー

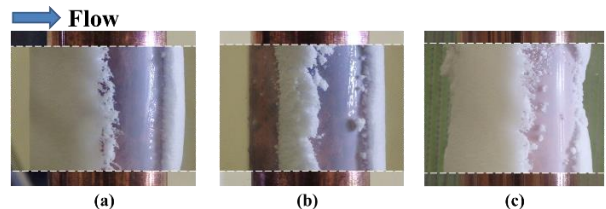


Fig. 20. The pictures of frost formation from side camera (a): without obstacle, (b): 10 mm, (c): 30 mm.

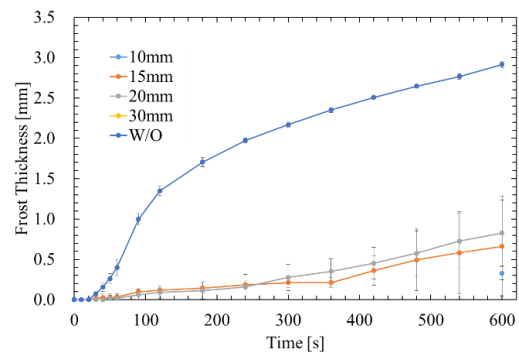


Fig. 21. Frost thickness on the upstream stagnation point with the V-shaped obstacle.

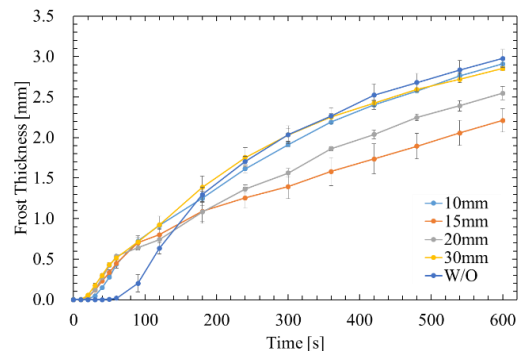


Fig. 22. Frost thickness on the side area with the V-shaped obstacle.

ブ型熱交換器では、冷却管の側方に成長する霜による流路狭窄が圧力損失上昇の大きな要因となるため、この着霜量減少は実機における圧力損失上昇の低減につながると考えられる。

3.3.3 圧力損失係数

Fig. 23 に圧力損失係数を示す。試験開始直後の初期圧力損失係数は障害物がない場合が最も小さく、障害物を設置すると上昇している。これは V 字型障害物の幅が 21.2 mm と冷却円管よりも大きく、障害物自体が流路を狭窄してしまったためと考えられる。障害物距離が 10 mm の場合の圧力損失係数は 270 秒までの係数の勾配が小さく、試験終了時には障害物がない場合の圧力損失係数を下回っている。この勾配が減少した要因としては、霜層成長によって障害物と冷却円管全体の形状が流線型に近づき、障害物の下流に形成される負圧領域が縮小したためと考えられる。障害物距離が 15 mm, 30 mm の場合では圧力損失係数はほぼ等しく、障害物がない場合よりも高い値を示している。障害物距離が大きくなると障害物下流に形成される負圧領域から冷却円管が外れ、負圧領域縮小の効果が小さくなったためと考えられる。280 秒以降ではいずれの障害物条件でも圧力損失係数の勾配がほぼ等しいことから、障害物設置による圧力損失係数上昇を抑制する効果は、着霜初期に限定されると言える。

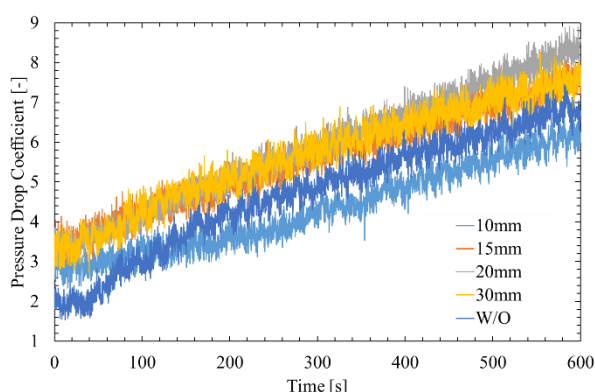


Fig. 23. Effect of the obstacle distance on the pressure drop coefficient with the V-shaped obstacle.

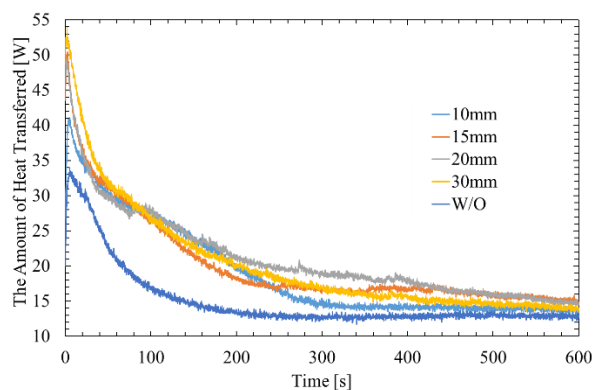


Fig. 24. Effect of the obstacle distance on the amount of heat transferred with the V-shaped obstacle.

3.3.4 熱交換量

Fig. 24 に熱交換量を示す。障害物の設置によって熱交換量の低下が抑制されていることがわかる。いずれのケースでも、試験終了時にはほぼ等しい値を示す。平均熱交換量を Table 4 に示す。障害物の設置によって、平均熱交換量は 3 割程度上昇している。

以上の結果をまとめると、V 字型障害物の設置は特に冷却円管の前方における着霜の抑制に効果があり、熱交換量の低下を抑制することができる。障害物距離が小さい場合には、さらに圧力損失係数の上昇を低減させる効果があった。

3.4 障害物断面形状による影響の比較

3.4.1 霜層厚さ

障害物断面形状の違いによる着霜への影響を比較する。ここでは、距離 10 mm の V 字型障害物、5 mm の円形および正方形障害物、障害物なし、長方形障害物で比較する。これらは各断面形状のデータのうち、障害物距離が最小のケースである。

Fig. 25 に側方霜層厚さを示す。試験終了時には、正方形障害物がその他の断面形状よりも 1 割程度小さな値をとる。その他の障害物条件では、試験終了時に優位な差は見られない。

3.4.2 圧力損失係数

Fig. 26 に圧力損失係数を示す。試験終了時に値が最小となるのは断面形状が V 字型、円形の場合であり、最大となるのは長方形の場合である。いずれの断面形状でも 160 秒以降の係数の勾配はほぼ等しい。試験開始時には障害物がない場合で約 2、円形、V 字型障害物の場合で約 3 の圧力損失係数を示すが、110 秒でその大小関係は逆転している。

Table 4. Effect of the obstacle distance on the average amount of heat transferred with the V-shaped obstacle.

Distance [mm]	The average amount of heat transferred [W]
10	19.0
15	20.1
20	21.1
30	20.2
W/O	15.0

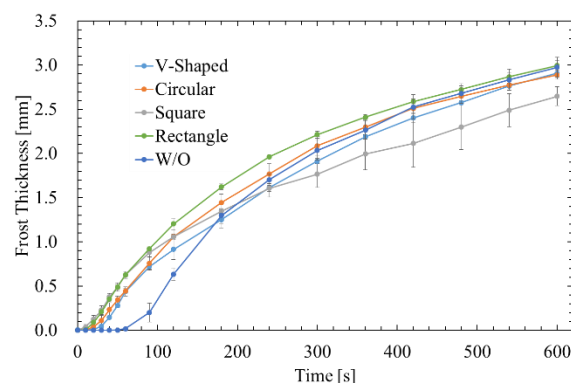


Fig. 25. Frost thickness on the side area.

3.4.3 熱交換量

Fig. 27 に熱交換量を示す。障害物の設置により熱交換量が増大することがわかる。20 秒までは V 字型、正方形、長方形障害物が最大値を取り、20 秒から 160 秒までは V 字型障害物が最大値を取る。160 秒で円形、正方形障害物と大小が逆転し、試験終了まで円形、正方形障害物が最大値を取っている。

平均熱交換量を Table 5 に示す。平均熱交換量は、円形、正方形、V 字型障害物でほぼ等しい値を取っており、長方形障害物よりも 1 割程度大きい。

以上をまとめると、冷却円管側方への着霜は断面形状が正方形の場合で最も抑制効果が高い。圧力損失係数の上昇を抑制できるのは、円形、V 字型障害物であり、熱交換量の低下を抑制できるのは円形、正方形、V 字型障害物であった。圧力損失係数、熱交換量共に性能を向上できるのは、円形、V 字型断面の障害物であった。

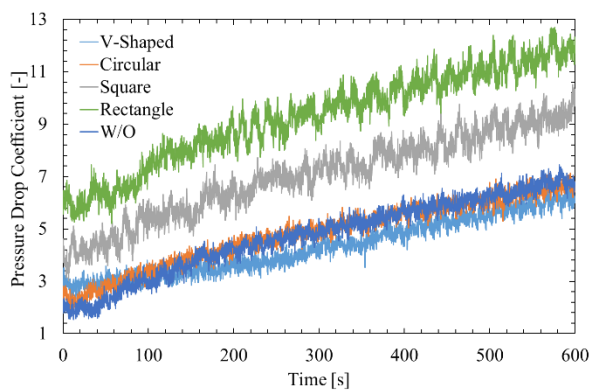


Fig. 26. Effect of the cross-sectional shape on the pressure drop coefficient.

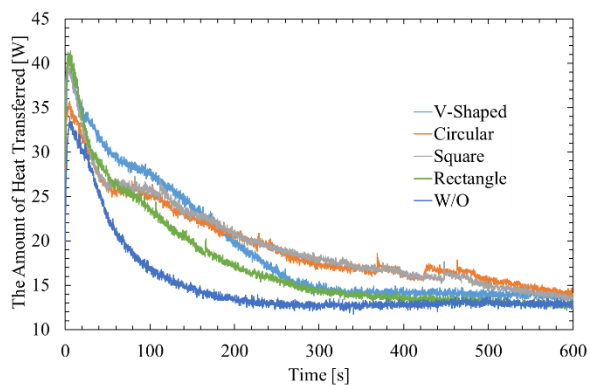


Fig. 27. Effect of the cross-sectional shape on the amount of heat transferred.

Table 5. Effect of the cross-sectional shape on the average amount of heat transferred.

Obstacle condition	The average amount of heat transferred [W]
Circular	19.6
Square	19.8
Rectangle	17.5
V-shaped	19.0
W/O	15.0

4. 結論

本研究では、障害物を使用した極低温冷却円管への着霜抑制法において、障害物断面形状と障害物距離が着霜に及ぼす影響を実験により調査し、以下の結果が得られた。

- 障害物距離の縮小は圧力損失の低減につながる。
- 断面形状が円形または V 字型の障害物を用いると、冷却円管を衝撃から保護すると同時に圧力損失の上昇、熱交換量の低下を抑制することができる。

REFERENCES

- 1) T. Sato, H. Taguchi, H. Kobayashi, T. Kojima, K. Fukiba, D. Masaki, K. Okai, K. Fujita, M. Hongo and S. Sawai: Development study of a precooled turbojet engine, *Acta Astronautica*, **66**(2010), pp.1169-1176.
- 2) T. Sato, H. Taguchi, H. Kobayashi, T. Kojima, K. Okai, K. Fujita, D. Masaki, M. Hongo and T. Ohta: Development study of precooled-cycle hypersonic turbojet engine for flight demonstration, *Acta Astronautica*, **61**(2007), pp.367-375.
- 3) 吹場活佳, 佐藤哲也, 小林弘明, 大久保英敏: 極超音速ターボエンジン開発における着霜問題, *日本冷凍空調学会論文集*, **25**(2008), pp.97-106.
- 4) 木村竜也, 佐藤哲也: 凝縮性物質を用いた空気予冷却器 (プリクーラ) の着霜軽減に関する研究, *日本航空宇宙学会論文集*, **51**(2003), pp.597-605.
- 5) K. Fukiba, S. Inoue, H. Ohkubo and T. Sato: New defrosting method using jet impingement for precooled turbojet engines, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **23**(2009), pp.533-542.
- 6) 佐藤颯大, 吹場活佳, 園部誕紀, 山田悠太: V 字型障害物を用いた極低温冷却円管の着霜低減, *日本冷凍空調学会論文集*, **31**(2014), pp.169-177.
- 7) 五十嵐保: 直列 2 円柱まわりの流れ特性 (第一報), *日本機械学会論文集*, **46**(1980), pp.1026-1036.