

# 強制対流下における平板上着霜現象の数値予測

木下義章, 佐藤哲也, 平林遥介, 十川悟

2016 年 2 月 23 日

## 概要

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) で開発中の極超音速機には, 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が用いられるが, この予冷器の主要課題の一つとして伝熱管表面への着霜現象がある. 本研究ではこのエンジンの設計最適化や性能予測に必要な着霜のモデル化およびモデルの検証実験を行う. 数値予測としては, 主流と霜に関し弱連成解析を行うコードを自作し, 形状と密度分布を得た. 検証実験では, 空気管路の側面に銅製のプレートを埋め込み冷却することで, 強制対流下に低温面を作り出せる実験装置を作成, 温湿度を制御した風を送り発生した霜に関して撮影および質量計測を行った. 数値解析と実験結果を比較すると, 冷却面端部形状に関しては, 設計不備による意図せぬ温度分布・湿度分布や数値計算における霜表面付近の水蒸気輸送の捉え方に問題があり, あまり一致しなかった. 霜厚さに関しても, 霜柱生成のモデルや表面に生成される霜密度, 内部への水蒸気拡散に問題があると考えられ, 定性的傾向が異なる. それに対し, 霜質量に関しては絶対湿度と経過時間に対する傾向が一致した. 質量伝達率には差があったが, これはダクト内の流れの 3 次元性や乱流, あるいは実効的な冷却面面積に原因があると考えられる.

表 1: 記号一覧

$l$	矩形ダクト辺長さ (= 0.072)	m
$A$	冷却面面積 (= 1500)	$mm^2$
$u$	x 方向速度	$m/s$
$v$	y 方向速度	$m/s$
$u_{max}$	ダクト中心の x 方向速度 (=1.5)	$m/s$
$AH$	容積絶対湿度	$g/m^3$
$M$	分子量	$kg/mol$
$R$	気体定数 (=8.3144)	$J/kg \cdot K$
$k$	熱伝導率	$W/m^2 \cdot K$
$\alpha$	温度拡散係数	$m^2/s$
$L$	水の昇華潜熱 (= $2.8345 \times 10^6$ )	$J/kg$
$k_{eff}$	有効熱伝導率	$W/m^2 \cdot K$
$D_{AB}$	空気-水蒸気拡散係数	$m^2/s$
$\tau$	屈曲度 (=1.1)	—
$\beta$	霜内部拡散係数因子 (= 1.55)	—
$D_{eff}$	霜内部有効空気-水蒸気拡散係数	$m^2/s$
$\mu$	粘度	$Pa \cdot s$
$t$	時間	s
$\rho$	密度 (質量濃度)	$kg/m^3$
$T$	静温	K
$p$	静圧	Pa
$\varepsilon$	氷の体積分率	—
$q$	熱流束	$W/m^2$
$n$	質量流束	$kg/m^2 \cdot s$
$h_h$	熱伝達率	$W/m^2 \cdot K$
$h_m$	質量伝達率	$m/s$
$\delta$	霜厚さ	mm
$m_f$	霜質量	g

表 2: 添え字一覧

$air$	空気
$ice$	氷
$vap$	水蒸気
$sat$	飽和水蒸気
$frost$	霜
$fs$	霜表面
$in$	主流

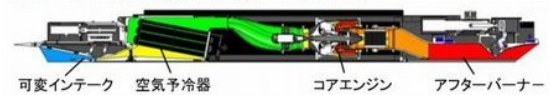
## 1 序論

### 1.1 研究背景

宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) は, 2025 年までにマッハ 5 クラスの極超音速旅客機の実証を掲げている [1]. この極超音速機には空力加熱からコアエンジン部を熱的に保護するため, 流入空気を冷却する空気予冷器 (プリクーラ) が搭載される. プリクーラの搭載によって図 2 のように圧縮機に流入する空気の密度が上がり, 同じ仕事量でも圧縮比があがることで熱効率の向上も見込める. (プリクーラがある場合の廃熱量は赤, ない場合の廃熱量は赤と青の和であるので, 効率が上がっていることがわかる)



(a) 極超音速旅客機



(b) 予冷ターボジェットエンジン

図 1: 極超音速旅客機と予冷ターボジェットエンジン

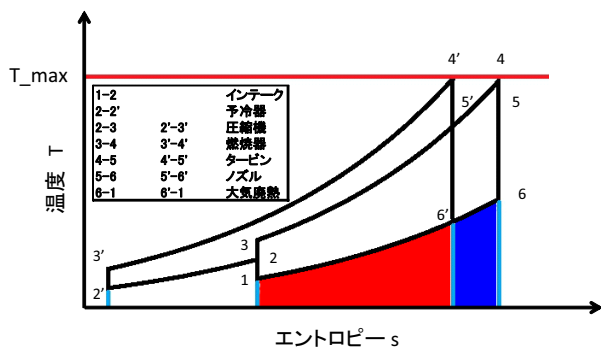


図 2: T-s 線図

プリクーラに関する課題の一つとして、伝熱管表面における着霜が上げられる。地上または低空でこのエンジンを運用すると、図 3 のように空気中の水蒸気が昇華して霜として伝熱管の表面に付着し、流路が閉塞、性能が劣化することが報告されている [2]。

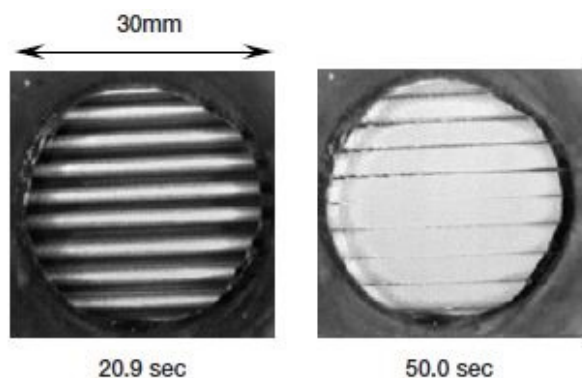


図 3: プリクーラにおける着霜の様子

## 1.2 研究目的

着霜による性能劣化予測には、伝熱管形状や内部の流れの複雑性により、従来から多くの研究がなされてきた一次元的な成長を扱うモデルでは不十分となる場合が多い。また、霜に関しては物性が密度や温度に依存することが判明しており、内部に大きな密度差があると、その分布によっては大きく熱抵抗が異なり、性能も変化すると考えられる。そこで、本研究では二次元的、非均質的な着霜現象のモデルを作成、検証実験を行いモデルの妥当性を評価することを目的とする。

## 2 数値計算

### 2.1 モデル概要

今回の着霜モデルは図 4 のように矩形ダクト内部の流れを二次元的に模擬し、ダクト側壁近傍のみを計算対象としている。計算手法としては図 5 のように主流に関するモデルと霜に関するモデルとの間で、霜表面における温湿度情報と熱流束・質量流束の情報をやり取りするこ

とで交互に各モデルに関し計算を行っていく弱連成を採用している。

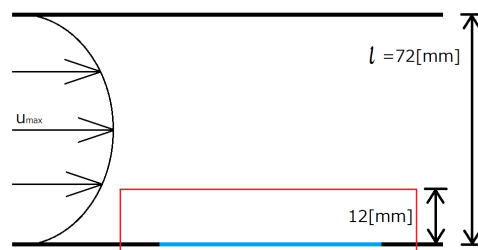


図 4: モデル計算領域

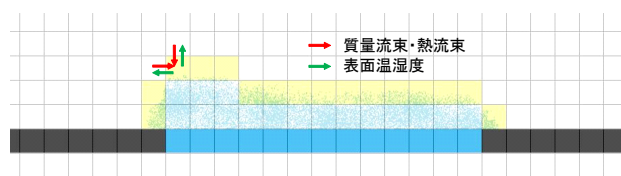


図 5: 弱連成概念図

また、計算における主流条件は表 3 のように設定している。

表 3: 実験条件一覧

	主流温度	主流容積絶対湿度
条件 1	20.00	10.0
条件 2	28.00	15.0
条件 3	28.00	20.0

以下、主流モデルと霜モデルの詳細に関して述べていく。

主流に関しては以下の仮定を用いる。

主流の仮定

- 層流
- マッハ数が十分小さい
- 空気、水蒸気は共に理想気体
- 水蒸気の質量分率は空気のものに比べて十分小さい
- 空気と水蒸気は任意の場所・時間で同じ速度をもつ (均一流モデル)
- 粘性散逸を無視
- 熱伝導はフーリエの法則、物質拡散はフィックの法則に従う

これらの仮定を用いることで基礎方程式は以下に述べる 6 つ (連続の式, x 方向ナビエ・ストークス方程式, y 方向ナビエ・ストークス方程式, エネルギー保存式, 水に関する質量保存式, 状態方程式) となる。

$$\nabla(\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(T)(\nabla^2 u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(T)(\nabla^2 v) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla)T + \nabla(\alpha \nabla T) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_{vap}}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla) \rho_{vap} + \nabla(D \nabla \rho_{vap}) \quad (5)$$

$$\rho = \frac{p}{R/M_{air}T} \quad (6)$$

ここで、連続の式およびナビエ・ストークス方程式は密度変動を考慮し、保存形の SIMPLE 法を用いて解いている。また、エネルギー方程式、水蒸気輸送方程式は制限関数つき空間 2 次精度のオイラー陰解法を用いている。これらの解法は、霜の成長の時間スケールが流れの時間スケールと比べて大幅に小さいということに留意し、時間刻み幅を大きく取れるとして選ばれたものである。

また、霜のモデルに関しては以下の仮定を用いる。これは LeGall ら [3] が提唱したものとはほぼ同じである。

- 霜の内部では流動はない
- 霜の内部の水蒸気は常に飽和状態である
- 液相の水が存在しない
- 水蒸気の質量分率は空気のものに比べて十分小さい
- 同一のセル内部では氷と空気の温度は同じである
- 霜内部の圧力は大気圧で一定とする

これらの仮定により、解くべき方程式は下記の 2 つ (水の質量保存式、エネルギー保存式) になり、未知変数も温度と氷の体積分率のみとなる。

$$\frac{\partial \rho_{sat}}{\partial T}(1 - \varepsilon) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{ice} - \rho_{sat}(T)) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

$$(\rho C_p)_{frost} \frac{\partial T}{\partial t} - (L \rho_{ice}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q} \quad (8)$$

モデルの計算においては、この 2 式を連立して解くことで計算を進めている。ここで右辺の熱流束・質量流束に関しては

$$\mathbf{q} = -k_{eff} \nabla T = \frac{1}{C/k_{per} + (1 - C)k_{par}} \nabla T \quad (9)$$

$$\mathbf{n} = -D_{eff} \nabla \rho_{vap} = -D_{AB} \frac{(1 - \varepsilon) \beta}{\tau} \left( \frac{M_v^2 L}{R^2 T^3} \right) \left( \frac{p_t p_{sat}}{p_t - p_{sat}} \right) \nabla T \quad (10)$$

というモデルを用いている。ここで有効熱伝導率  $k_{eff}$  は、熱流束の向きに対し氷と空気が直列に存在する場合の熱伝導率  $k_{per}$  と直列に存在する場合の熱伝導率  $k_{par}$

を組み合わせで求めたものであり、温度による霜の熱伝導率の変化を考慮したものである。係数  $C$  に関しては  $C = 0.42(0.1 + 0.995 \rho_{frost})$  が提唱されている。また、霜をはじめとした多孔体の内部では図 6 のように通常の分子拡散に加え、多孔体固相表面の分子吸着率の差から起こる表面拡散と、多孔体内の分子の平均自由移動距離が通常より短くなることに起因するクヌーセン拡散が存在する [4]。

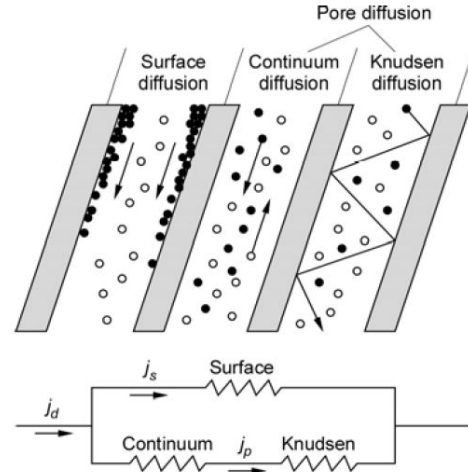
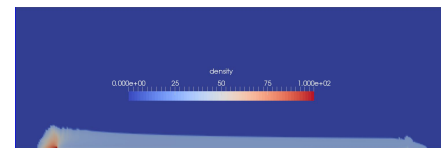


図 6: 多孔体内の拡散のメカニズム

式 10 における  $\beta (= 1.55)$  はこれらの拡散を考慮した補正係数であり、 $\tau (= 1.1)$  は屈曲度因子である。今回は大久保ら [5] が提唱する値を用いることにする。また、式変形にはクラウジウス・クラペイロンの式を用いている。

## 2.2 計算結果

図 7 に今回提唱するモデルによる実時間 5[min] 分の計算結果を示す。主流は図の左から右に流れており、また、カラーバーは密度を表している。



(a) 条件 1(300[s])



(b) 条件 2(300[s])



(c) 条件 3(300[s])

図 7: 計算結果

数値計算結果の特徴として、上流側の密度が他の場所と比べて非常に高く丸みを帯びた形状をしていること、下流側に不自然な突出が見られることが上げられる。

### 3 実験

#### 3.1 実験装置および手法

図 8 に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。アクリル製矩形ダクトの流路側壁に銅製のプレートが埋め込めるようになっており、プレートに付随したボルトを液体窒素に浸すことでプレートを冷やし、強制対流下に冷却面を作り出すことが出来る。また、冷却面上流側と冷却面側端部に温度計測用熱電対、微差圧計が取り付けられており、主流温度、主流流速、冷却面温度を計測することが出来る。実験条件は主流に関する部分のみ表 3 の従い 3 通りに変化させ、ダクト中心流速  $u_{max}$  は  $1.5[\text{m/s}]$  で統一している。

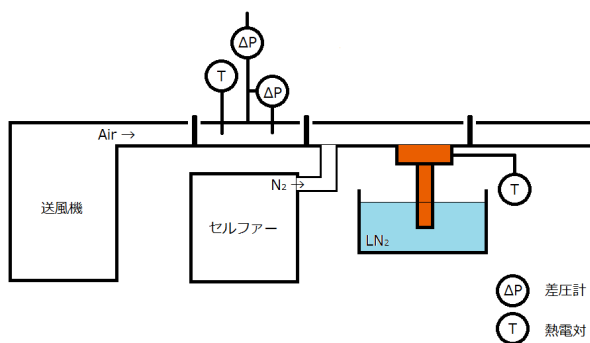


図 8: 実験装置外略図

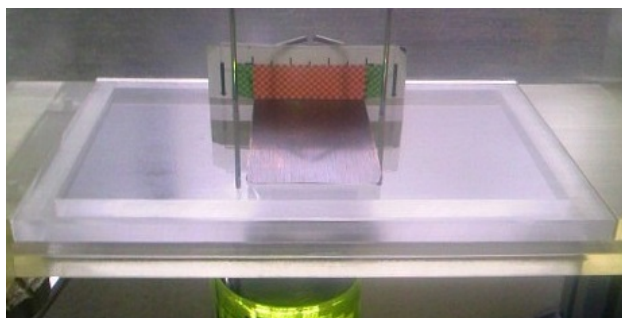


図 9: 冷却面

#### 実験手順

1. 送風機の温湿度を表 3 に従い設定する。同時に計測系も設定、補正を行う
2. プラスチック製のへら（霜をかきとるためのもの）の質量を精密電子天秤で計測、記録する
3. 全てのシャッターを閉め、セルフアーから乾燥窒素を供給する
4. 断熱材を巻いたスチール製の缶に液体窒素を入れ、

プレートに付随したボルトを浸して冷却を開始すると同時に、スチール製の缶よりひとまわり小さい箱を錘を使って液体窒素の中に沈め、液面の高さを高くする

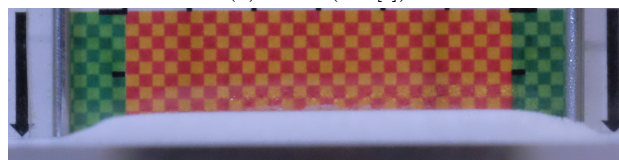
5. 冷却面温度が  $220[\text{K}]$  になったら乾燥窒素の供給を止め、同時に錘と箱を取り外して液体窒素の液面を下げる
6. 冷却面温度が  $210[\text{K}]$  になったらシャッターを開けて送風を開始する
7. 規定時間経過後、シャッターを閉じる
8. デジタルカメラで霜の形状を記録する
9. へらで霜をかきとり、へらごと質量を計測、記録する

#### 3.2 実験結果

撮影した霜の形状を図 10 に示す。



(a) 条件 1(300[s])



(b) 条件 2(300[s])



(c) 条件 3(300[s])

図 10: 実験結果 (霜形状)

実験結果の特徴としては上流側、下流側端部共に形状に大きな差がなく鋭い縁を持っていること、厚みが湿度の影響をあまり受けないことが挙げられる。

### 4 考察

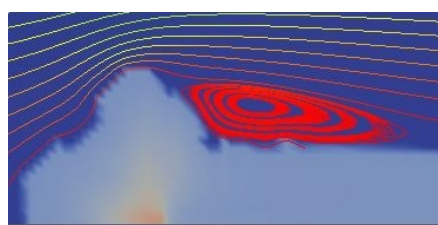
以下、主に数値計算結果と実験結果の比較、およびそれぞれの結果に関し強く影響すると思われる要因に関して考察していく。比較対象は、両端部形状、中心部厚み、質量である。

#### 4.1 霜形状

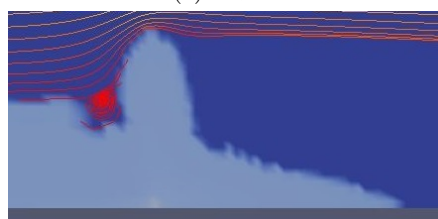
数値計算・検証実験の結果に関して両端部形状を見ると、数値計算では上流側端部は丸みを帯びた形状をしており、また、絶対湿度が高いと下流側には突出部が見られるようになる。それに対し、実験結果では両端部の形状には大きな差がなく、鋭くとがった形状をしている。数



値計算結果がこのような結果になるのは、霜表面近傍における流れの影響が大きいと推測される。図 11 に条件 3( $t=300[s]$ ) における両端端部の流線を示す。どちらも剥離が発生しているのが見てわかり、該当領域の霜の成長が遅くなっている。実際の霜の表面近傍は、霜の表面性状によって計算どおりに流れが剥離しないこと、あるいは霜内部でも微小な流動などの原因でこのような成長の停滞が起こるとは限らず、形状を正確に捉えるためにはモデルの見直しがいると想定される。また、検証実験において霜が鋭い端部形状をしているのは、流路側壁の断熱性が原因の一つとして挙げられる。図 12 に、送風開始後数秒経過した際の冷却面近傍の様子を上から撮影したものを示す。図より冷却面近傍に結露(青)、着氷(赤)が発生しているのがわかる。これは、予冷中に流路側壁が冷却され、実効的な冷却面積の増加、温度分布の変化が生じたことを示している。



(a) 上流側



(b) 下流側

図 11: 数値計算上の霜表面近傍の流線

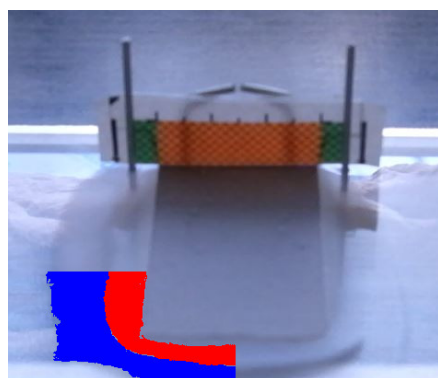


図 12: 送風開始直後の結露範囲

#### 4.1.1 霜厚さ

図 13 に、霜厚さに関し数値計算結果と実験結果をまとめたものを示す。数値計算結果では厚みが経過時間、絶対湿度にほぼ比例しているのに対し、実験結果において厚

みは着霜開始直後に急激に増加し、その後増加がゆるやかになる、また、絶対湿度の影響をあまり受けないという傾向を示した。霜は最初に針状の結晶が生成されてからまわりに粒状の結晶が生成され成長することが先行研究でわかっている。着霜開始直後に急激に厚みが増加したということから、モデルではこの針状の結晶のモデル化に関し改良があると推測される。また、絶対湿度の影響を受けなかったことから、表面に新しく生成される霜の密度や内部への水蒸気の拡散量に関し、モデルの改良が必要だと考えられる。

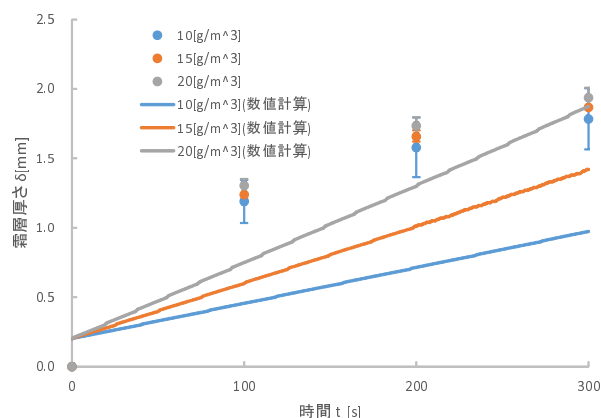


図 13: 霜厚さの時間履歴

#### 4.1.2 霜質量

図 14 に、霜質量に関し数値計算結果と実験結果をまとめたものを示す。霜質量に関しては数値計算結果、実験結果共に経過時間と絶対湿度に比例するという傾向を示した。質量伝達率が一定と見なせる場合、式 11 と式 12 から質量伝達率を求められる。ここで  $A = 1500[mm^2]$ ,  $\rho_{vap,in} \gg \rho_{vap,fs}$  と仮定して求めた質量伝達率を表 4 に示す。

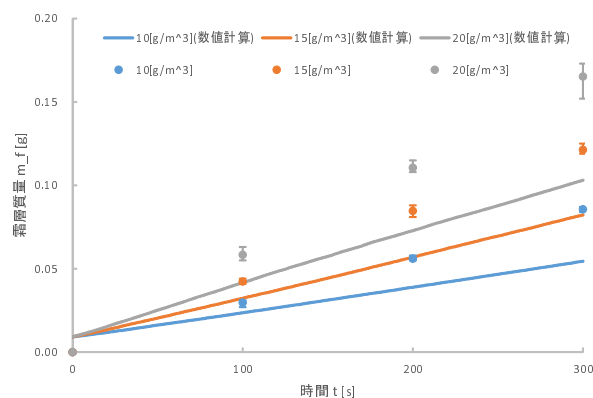


図 14: 霜質量の時間履歴

$$n = \frac{h_m}{A} (\rho_{vap,in} - \rho_{vap,fs}) \quad (11)$$

$$m_f = \int_0^t n A dt$$

$$= h_m (\rho_{vap,in} - \rho_{vap,fs}) \times 1000 \text{ A t} \quad (12)$$

表 4: 質量伝達率の比較

	主流容積絶対湿度 $AH[g/m^3]$	質量伝達率 $h_m[m/s]$	
		数値計算	検証実験
条件 1	10.0	0.0100	0.0190
条件 2	15.0	0.0107	0.0183
条件 3	20.0	0.0106	0.0185
平均	-	0.0104	0.0186

数値計算と検証実験で質量伝達率が異なるが、これはダクト内の流れの三次元性や乱流による拡散の促進、先述した実効的冷却面の増加が原因と考えられる。

## 5 結論

強制対流下における着霜現象について数値予測と検証実験を行い以下の知見を得た。

### 数値計算

- 冷却面上端部の形状は丸みがあるものになり、下端部の形状は鋭く、絶対湿度によっては突出が見られるようになる。
- 霜厚さは経過時間と絶対湿度にほぼ比例する。
- 霜質量は経過時間と絶対湿度にほぼ比例する。

### 検証実験

- 冷却面両端部の形状はほぼ差がなく、どちらも鋭い形状をしている。
- 霜厚さは着霜開始直後に急激に成長し、その後成長が緩やかになる。また、絶対湿度の影響をほぼ受けない。
- 霜質量は経過時間と絶対湿度にほぼ比例する。

これらの結果から、以下のような課題が挙げられる。

### 今後の課題

- 冷却面両端部の形状に関して、数値計算と検証実験の結果には差がある。これは、計算においては霜表面近傍の流れが実際の流れと異なること、実験においては流路側壁の断熱性が悪く、意図せぬ温湿度分布が発生したことが原因と考えられ、コード実験装置共に改良が必要である。
- 霜厚さに関して、数値計算と検証実験の結果には差がある。これは、着霜開始直後に発生する針状結晶のモデル、表面に新しく生成される霜の密度、水蒸気の内部拡散のモデル等に問題があると考えられ、更なる調査や数値モデルの改良が必要である。
- 霜質量に関しては、数値計算と検証実験で定性的傾

向が一致した。質量伝達率に大きな差があるが、これはダクト内の流れの三次元性や乱流、実効冷却面積が影響していると考えられ、更なる高精化が必要である。

## 参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構. JAXA 長期ビジョン JAXA2025 20 年後の日本の宇宙と航空. 丸善ブライネット株式会社, 2005.
- [2] 原田 賢哉 小林 弘明佐藤 哲也. 空気予冷却システム (ブリクーラ) の開発研究 (第一報).
- [3] J.M. Grillo R. Le Gall. *Modelling of frost growth and densification*. 1996.
- [4] 山口誠一. シリカゲル系デシカントロータの特性解析と性能評価に関する研究. 2010.
- [5] 下村 信雄 井上 翔 一岡 順大久保 英敏. 非均質霜層成長モデルによる自然対流下における着霜現象. 玉川大学.