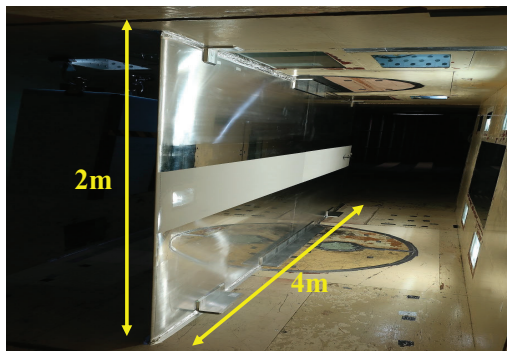




# FINE

「表面摩擦抵抗低減コーティング技術の飛行実証」  
Flight Investigation of skin-friction reducing Eco-coating

## 大型平板模型を用いたリブレット性能評価試験



JAXA 航空技術部門

○飯島 秀俊、栗田 充、古賀 星吾、高橋 英美、  
飯島 由美、阿部 浩幸

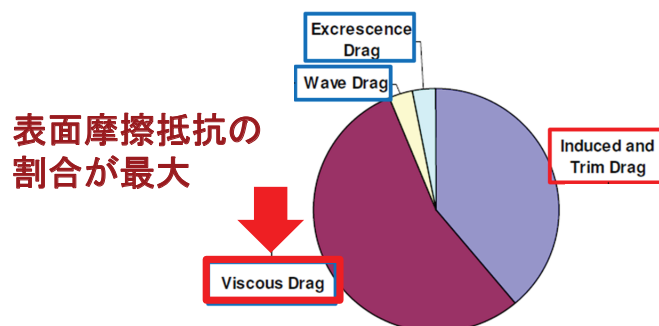
第95回風洞研究会議@防衛省航空装備研究所(立川)

1

## 研究背景



- 旅客機開発において、**燃費の良さ**が国際競争力を決定付ける。燃費を改善するためには、エンジンの改善(高バイパス比エンジンの適用)、機体の軽量化(複合材の適用)、**機体抵抗の低減**などが必要。
- 巡航中の航空機に生じる抵抗のうち、**50%以上は表面摩擦抵抗**。
- 機体抵抗の低減するには、**表面摩擦抵抗を低減**させることが最も効率的。

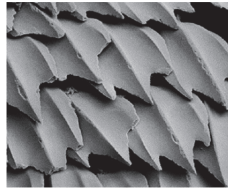


出典: GROUP ON INTERNATIONAL AVIATION AND CLIMATE CHANGE(GIACC) 3<sup>rd</sup> MEETING, 2009

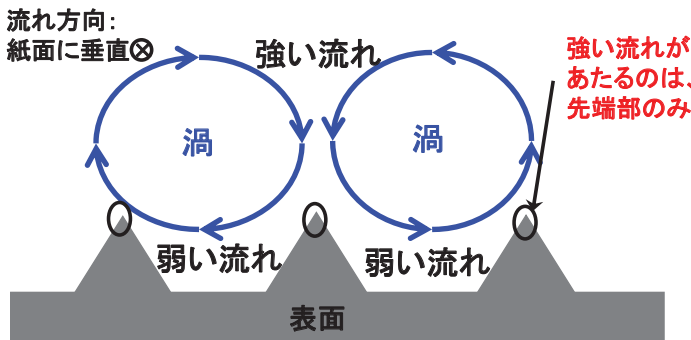
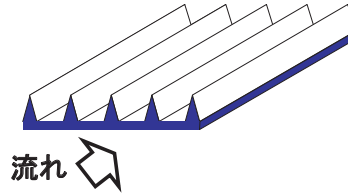
2

# リブレットによる抵抗低減について

- 乱流における表面摩擦抵抗低減のための受動的デバイス
- 流れ方向に沿う微細な溝列(0.1 ~ 0.2mm幅)
- 渦と表面の接触面積を減らし、表面摩擦抵抗の低減が可能



サメ肌表面



$s^+$ : 無次元化したリブレット間隔

$$s^+ = \frac{su_\tau}{\nu}$$

$s$  [m]:リブレット間隔,  $u_\tau$  [m/s]:摩擦速度,  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]:動粘性係数

最適なりブレット間隔は、 $s^+ = 17$ 付近

## FINEについて(1/4)

「表面摩擦抵抗低減コーティング技術の飛行試験」  
FINE (Flight Investigation of skiN-friction reducing Eco-coating)

**目的:**

JAXA独自リブレットによる表面摩擦抵抗低減効果を飛行環境下で確認する。

**スケジュール:**

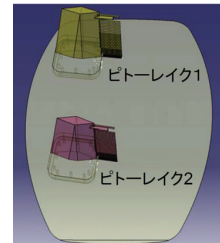
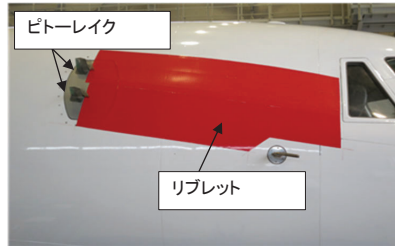
FY2016	FY2017	FY2018
<p>リブレット設計施工技術開発</p> <p>飛行試験計測技術開発</p>	<p>飛行試験 #01 飛行/計測条件の確認</p>	<p>飛行試験 #02 詳細データ取得</p>

## FINEについて(2/4)



### 評価手法:

JAXA飛翔の胴体にリブレットを施工し、ピトーレイクにより境界層速度分布を計測。

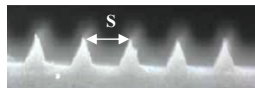


### 飛行条件:

マッハ数: 0.50~0.78、  $Re\theta: 1.3 \sim 3.9 \times 10^4$

### リブレット間隔 S:

0.1mm、0.17mm



5

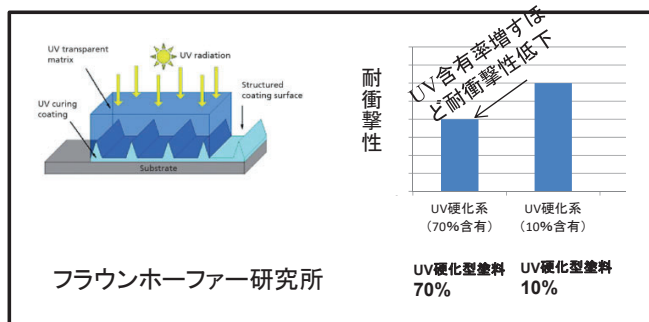
## FINEについて(3/4)



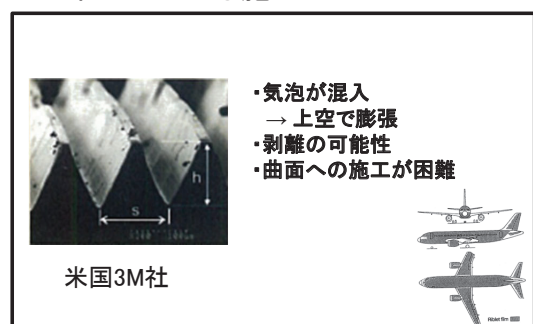
## リブレットの施工

### 海外の技術動向

#### ○紫外線硬化型塗料による施工



#### ○フィルムによる施工

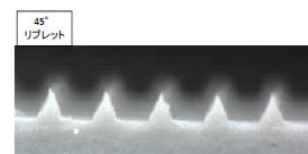


## JAXAリブレットの特長

### ○航空機用塗料のみでリブレットを施工

→耐環境性に優れる。

→従来の洗浄・剥離工程を使用可能



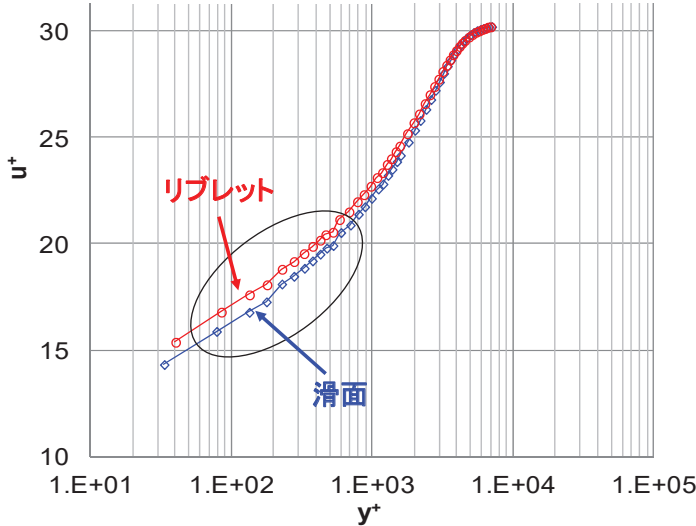
塗装型リブレット

6

# FINEについて(4/4)

## 飛行試験結果の一例

$s^+ = 17$   $M = 0.65$ , 高度 = 47,000ft (14,300m)、境界層厚さ: **80mm程度**  
 ( $Re\theta = 10^4$ )



対数領域において  
 リブレット表面上の速度損失が、  
 滑面よりも小さい。  
 →リブレットの方が滑面に比べ、  
 表面摩擦抵抗が小さい。



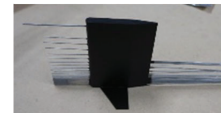
**飛行環境下でのリブレットの抵抗低減効果を定性的に示すことができた。**

$$S^+ = \frac{s \cdot u_\tau}{\nu} \quad y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu} \quad u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

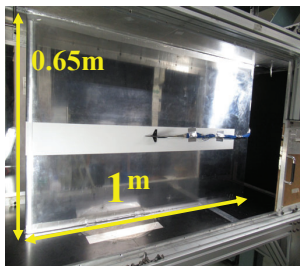
## 風洞試験におけるリブレットの評価(1/2)

### JAXA小型低乱風洞(LWT3)

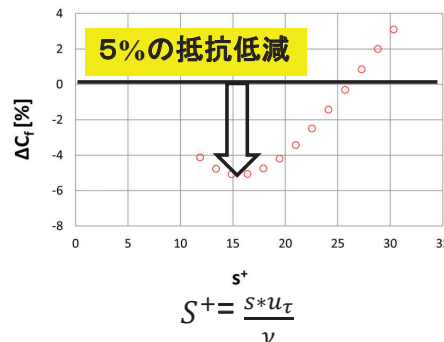
- $U_\infty = 10 \sim 80$  m/s
- ピトーレイクによる境界層速度分布による評価
- 境界層厚さ: **10mm程度** ( $Re\theta : 10^3$ )



ピトーレイク



平板模型



### 問題意識

飛行試験時の境界層厚さが80mm、LWT3の境界層厚さが10mm程度。  
 この条件でリブレット性能を評価しても良いのか？  
 $Re\theta$ を飛行試験時と風試時で合わせる必要があるのでは？



## 風洞試験におけるリブレットの評価(2/2)

Reθを実機条件と合わせるためにどうすれば良いか。

$$Re\theta = \frac{U_\infty \theta}{\nu}$$

$U_\infty$ : 一様流速

$\theta$ : 運動量厚さ

$\nu$ : 動粘性係数

S+=17付近

	$U_\infty$	$\nu$	単位 $Re$ $U_\infty / \nu$	$\theta$	$Re\theta$	リブレット区間までの 助走距離
実機条件	193m/s	$6.3 \times 10^{-5}$	$5.3 \times 10^6$	7mm	$3.5 \times 10^4$	2m程度
風試条件 (LWT3)	80m/s	$1.7 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^6$	0.9mm	$4.2 \times 10^3$	0.45m



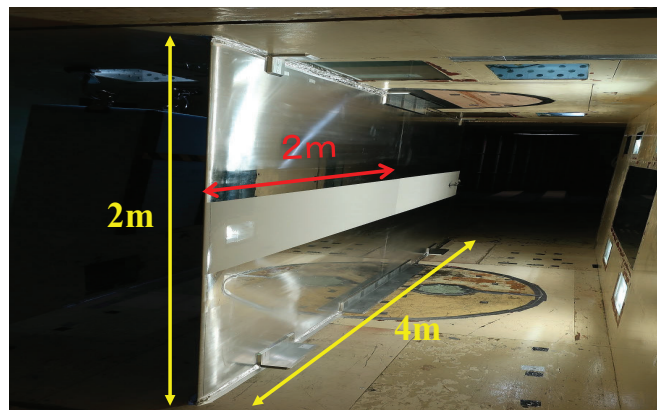
実機Reθを風試条件で達成するためには、助走距離を長くする必要があります。

9

## 研究目的

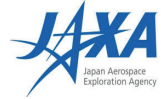


大型平板を用い、前縁からの助走区間を長くすることで実機相当の  $Re\theta$  ( $10^4$ オーダ)を実現し、JAXAリブレットを評価する。

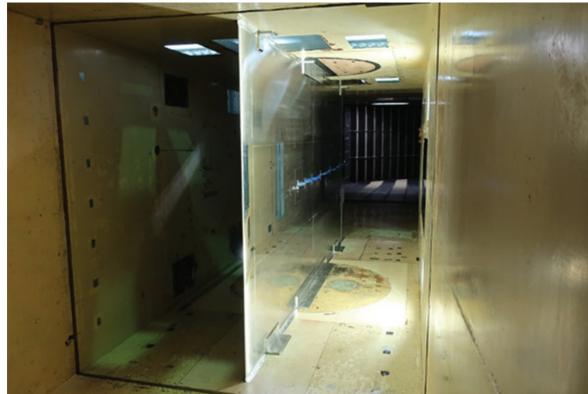


10

## 平板模型



- 高さ2m、長さ4m、厚さ2cmの平板模型(アルミ製)
- 12分割(前縁部、平板部、後端部を含め)
- 前縁から20mmの位置に高さ300 $\mu$ mのラフネスを設置
- 2m $\times$ 2m低速風洞(LWT2)を使用

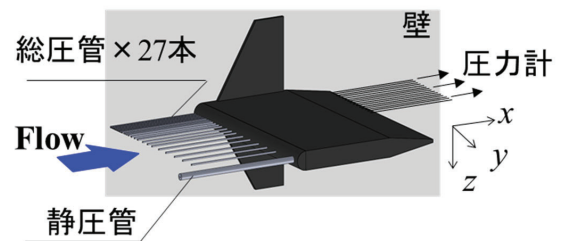


11

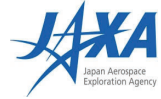
## ピトーレイクによる速度分布計測



- 高さ150mm
- 計測点数28点(総圧27点、静圧1点)



12

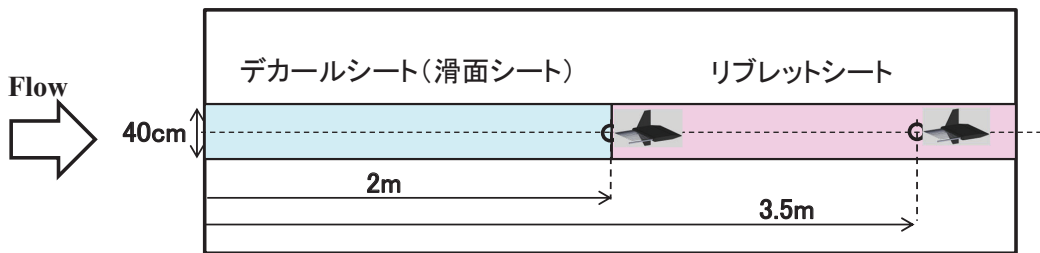


## 抵抗低減率の評価手法

$$\Delta C_F / C_{F\_smooth} (\%) = \frac{C_{F\_Riblet} - C_{F\_smooth}}{C_{F\_smooth}}$$

表面摩擦係数  $C_F = 2 \frac{d\theta}{dx} = 2 \frac{\theta_2 - \theta_1}{x_2 - x_1}$  (圧力勾配無しの場合)

上流・下流の2カ所で速度分布を計測  
運動量厚さの変化量から算出



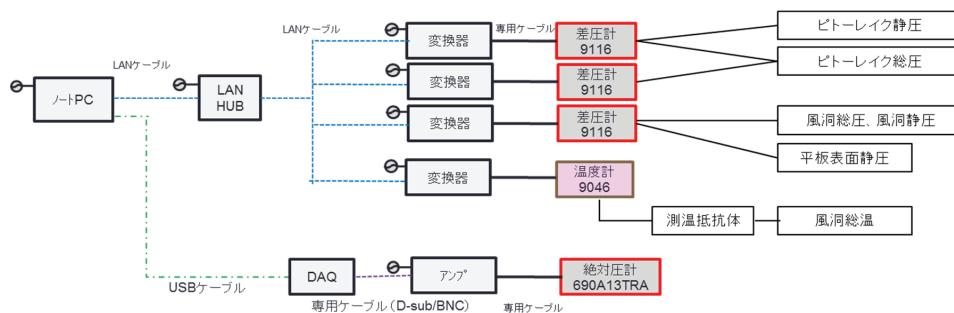
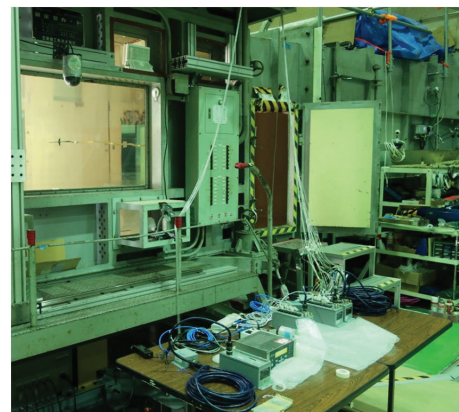
平板模型を横から見た図

## 計測系システム



### 計測項目

- ピトーレイク総圧、静圧
- 風洞総圧、静圧、風洞総温
- 大気圧

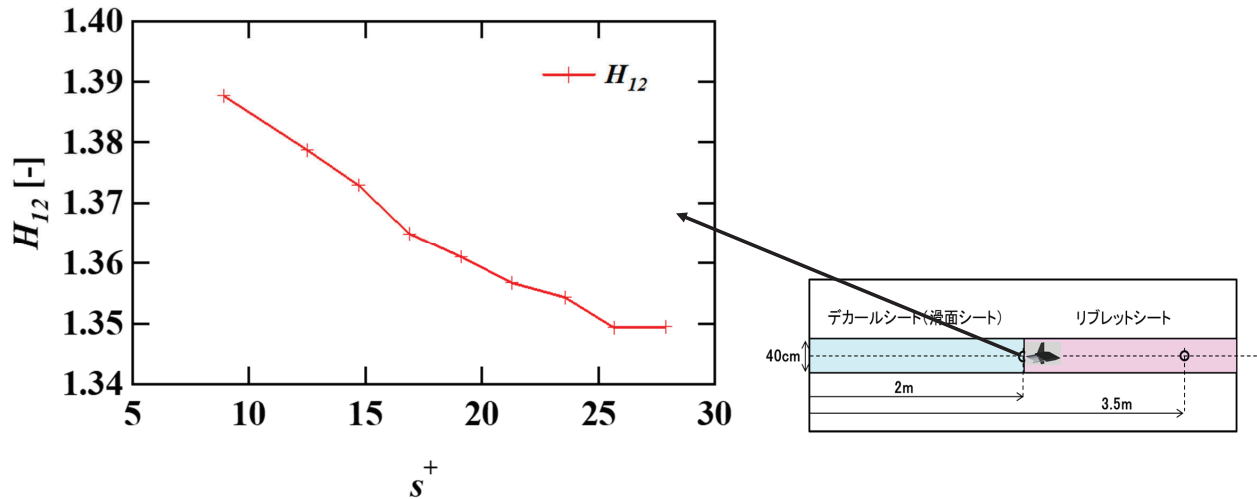


## 試験結果



### 境界層状態の確認 (形状係数 $H_{12}$ の確認)

$$H = \frac{\delta^*}{\theta}$$



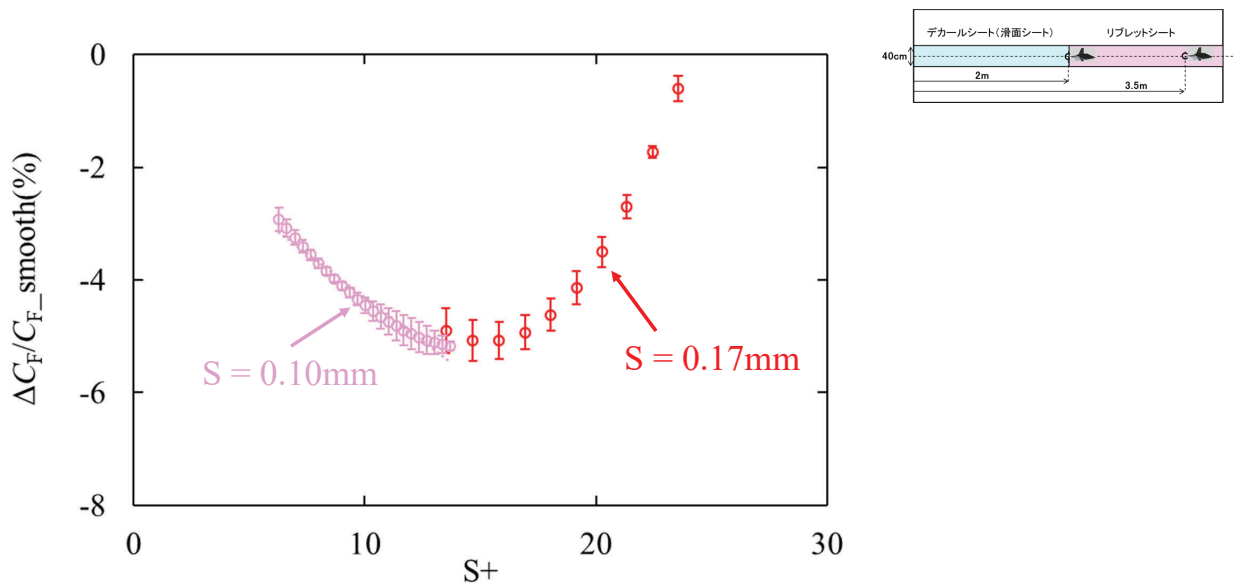
$H_{12} < 1.4 \rightarrow$  乱流境界層

15

## 試験結果



抵抗低減率(%)  $Re_{\theta} : 1.3 \times 10^4 @ S^+ = 15$



$S^+ = 17$ 付近で、滑面に比べ5%程度の抵抗低減効果があった。

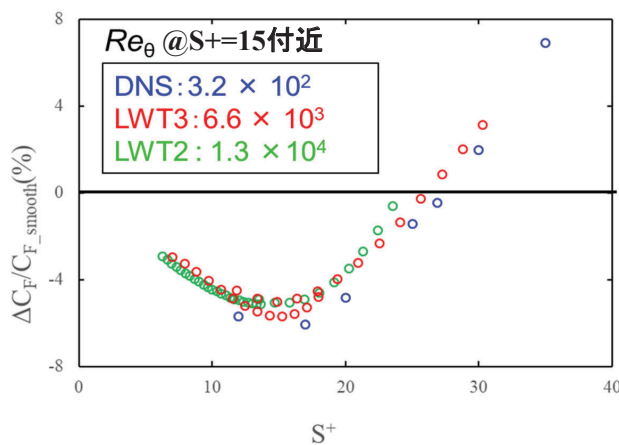
16



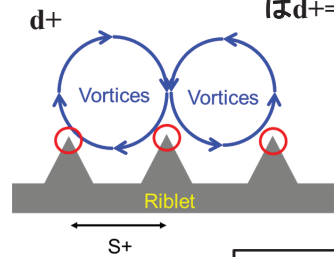
## 試験結果



### Re数効果



完全乱流時の渦の大きさは  $d^+ = \text{約}20 \sim 25$



$$S^+ = \frac{u_\tau s}{\nu}$$

$u_\tau$ : 摩擦速度  
 $s$ : リブレット間隔  
 $\nu$ : 動粘性係数

$$d^+ = \frac{u_\tau d}{\nu}$$

$u_\tau$ : 摩擦速度  
 $d$ : 渦直径  
 $\nu$ : 動粘性係数

$$Re_\theta = \frac{U_\infty \theta}{\nu}$$

$U_\infty$ : 一様流速  
 $\theta$ : 運動量厚さ  
 $\nu$ : 動粘性係数

抵抗低減率に対する、Re数依存性はなかった。

→リブレットによる抵抗低減率を算出する上で、境界層厚さ(運動量厚さ含む)は重要ではなく、リブレット間隔( $s^+$ )のみがパラメータとして支配的であることが分かった。

17

## まとめ



- 大型平板を用い実機  $Re_\theta$  において、JAXAリブレットの抵抗低減率を評価した。その結果、滑面に比べ5%程度の抵抗低減率を示した。
- DNSを含め、リブレットによる抵抗低減効果のRe数依存性を確認した結果、Re数依存性がないことが分かった。
  - リブレットの抵抗低減の評価については、必ずしもRe数を実機相当に合わせなくても、リブレット間隔( $s^+$ )のみで評価が可能であることを示唆している。

18