

## 第二章

# 平板モデルを用いた 流れ制御デバイスの基礎研究

## 2.1 研究の背景と目的

### 2.1.1 フィルム冷却の平板モデルが果たす役割

フィルム冷却の流れ制御を行うためには、フィルム冷却自体の流れ場や流れ制御機構周辺の流れ場を詳細に調査する必要がある。このような調査は、実機のガスタービンを用いて実施することは難しいため、一般的にはフィルム冷却の拡大モデルを用いた調査が有効である。フィルム冷却の拡大モデルは様々なモデルが提案されているが、最も基礎的なモデルとしては平板を使用したモデルが挙げられる。平板モデルでは、実験装置の構築がし易く、計測プローブの挿入が容易であるため、フィルム冷却の流れを観察し易いメリットがある。また、実機のタービン翼面では曲率、エンドウォール面では二次流れなど、フィルム冷却に影響する流れ場を研究上考慮する場合には、問題が複雑化するが、平板モデルを用いることでフィルム冷却の流れ場自体に着目することが可能である。従って、本章ではフィルム冷却の平板モデルを用いることによって、流れ制御デバイスの基礎研究を実施している。

### 2.1.2 本研究の平板フィルム冷却モデルの特徴

本研究では、フィルム冷却孔や流れ制御機構周辺の流れ場を詳細に捉えることを目的としているが、特に実験的研究においては、モデルの形状が、詳細な流れ計測の可否に大きく影響する。これは、実験的研究においては計測プローブのサイズが計測対象に対して十分に小さい場合には、必然的に計測の解像度を高く設定することが可能になるためである。フィルム冷却の平板テストモデルに関しては、一般的に冷却孔の直径  $d$  を代表長さとし、これを基準として全てのテストモデルの寸法を決定する場合が多い。過去の研究を見ると、いずれの平板モデルを用いた研究でも  $d$  は 10mm 程度としている場合が多い。以下の表 2.1.1 は過

去の研究において、どのような冷却孔直径とレイノルズ数条件下で、実験的研究が行われているのか、代表的なケースを示す。表に記載しているレイノルズ数は、論文中に記載している冷却孔直径と、テストセクション入口流速から概算した流速を示している（論文中に明記している場合は、論文中の値をそのまま記載した）。過去の研究を見ると、ほとんどの研究は冷却孔下流の空間的な解像度を確保するために、冷却孔の直径をある程度大きく確保していることがわかる。例を示すと、Kohli ら<sup>(3)</sup>の研究では、論文から引用した図 2.1.1 のように、冷却孔下流領域での乱れ度や、温度場を計測している。

本研究においても、冷却孔下流領域の空間的な計測を行うことを可能にするために、使用した平板フィルム冷却の直径は大きめの直径を確保し  $d=20\text{mm}$  とした。この冷却孔直径は、過去の研究と比較しても 2~4 倍の大きさとなっており、冷却孔下流領域を高解像度に実験で計測することが可能である。

表 2.1.1 過去の平板モデルフィルム冷却研究

著者	$d[\text{mm}]$	$Re(d \text{ ベース})$
Sinha et al., 1991 <sup>(1)</sup>	12.7	15,000
Takeishi, 1995 <sup>(2)</sup>	10.0	9,000
Kohli et al., 1997 <sup>(3)</sup>	11.1	13,000
Yu et al., 2002 <sup>(4)</sup>	6.4	25,000 and 46,000
Barigozzi et al., 2007 <sup>(5)</sup>	5.0	6,000
Bernsdorf et al., 2010 <sup>(6)</sup>	5.0	50,000
Laveau et al., 2010 <sup>(7)</sup>	5.0	30,000

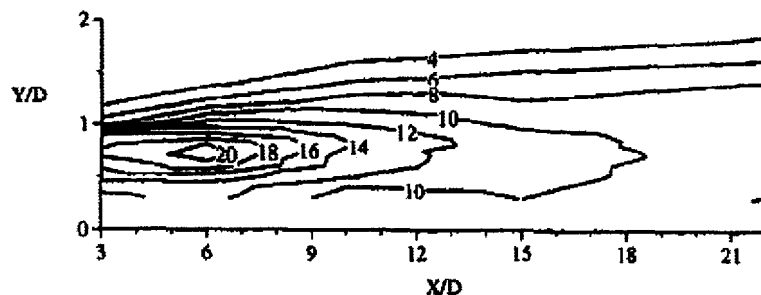


Fig. 11 (a) Turbulence levels away from the injection location for the 55 deg round hole:  $M = 0.4$ ,  $l = 0.1$ ,  $VR = 0.25$ ,  $DR = 1.6$

図 2.1.1 冷却孔下流領域の乱れ度分布

### 2.1.3 流れ制御デバイスのコンセプトと研究の目的

フィルム冷却の基本的な流れ場は、第一章で示したように冷却孔下流領域に形成される CRVP の渦構造が代表的である。従来、冷却孔周辺の形状を変化させる場合には、二次元型

の凹みや、突起が用いられており、空力損失を増大させてきた。本章で用いる流れ制御デバイスは、従来提案されてきたような突起形状の部分を反映しているが、形状を二次元から三次元に変化させつつ、フィルム冷却の性能を向上させることを研究の狙いとしている。デバイスの形状を突起形状とした理由に関しては、以下のような点が挙げられる。

①突起形状では凹み形状に比べると強い渦構造が形成されるため、流れの制御能力が高いと考えられること

②突起形状にすることで突起からの流れの吹き降ろし効果が期待できること

そこで、本章では三次元突起形状の流れ制御デバイスを冷却孔上流に設置することで、CRPVの制御能力を調査している。

### 2.1.4 本章の概要

本章ではフィルム冷却の平板モデルに流れ制御デバイスの設置を行い、空力伝熱性能の調査を行うと共に、現象の観察を行った。2.2, 2.3 節では実験装置および計測手法に関して述べ、2.4 節では比較的単純形状の流れ制御デバイスの効果について論ずる。2.5 節では、三次元化した流れ制御デバイスを、冷却孔1ピッチに対して、1個設置することでその効果を観察した結果を示す。

## 2.2 実験装置

### 2.2.1 概要

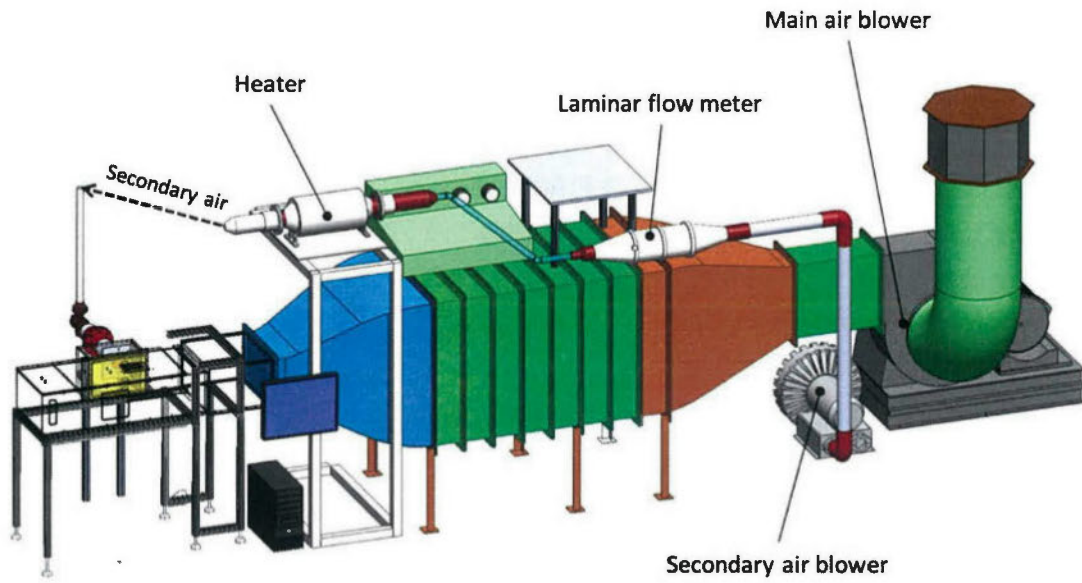
本研究では以下の2つの実験装置（実験装置Ⅰ，実験装置Ⅱ）を用いて研究を行った。実験用の風洞は2台使用しているがそれぞれ異なる使用用途をもっている。2つの実験装置はそれぞれ異なる用途に用いる。本来は、1つの共通した実験装置で実験を行うことが好ましいが、LDV等の大型計測機器に必要な設置スペースが各風洞で異なっており、実験スペース上の制約を受けたために、実験装置は2つ用いている。

### 2.2.2 実験装置Ⅰ

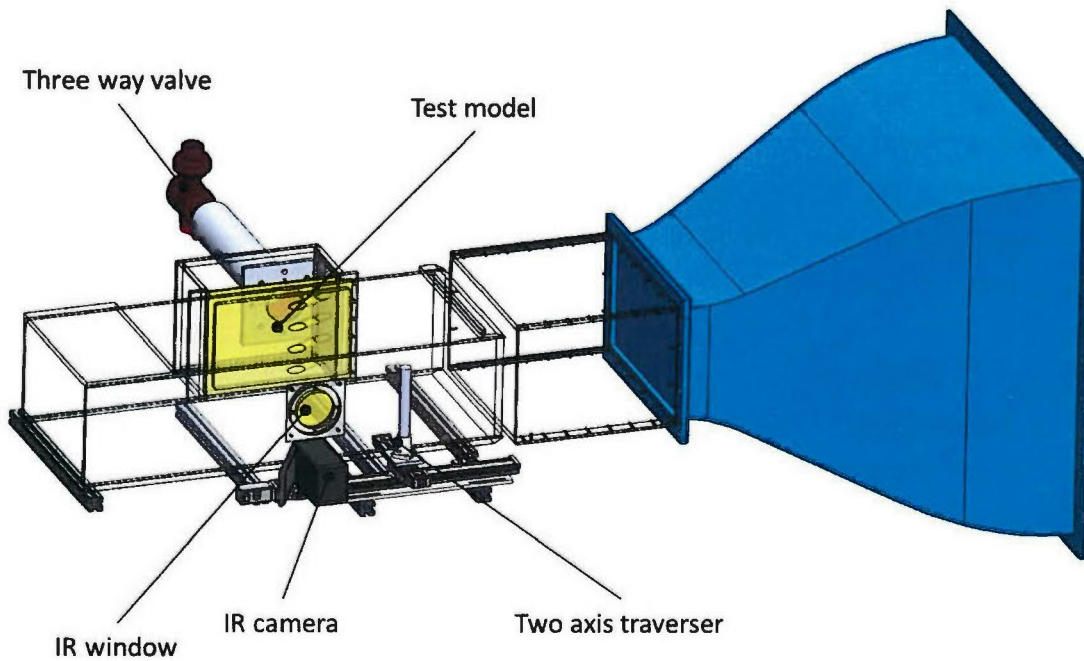
実験装置Ⅰは岩手大学所有の伝熱試験用風洞を示す。本実験装置は主に伝熱試験と、接触式のプローブを用いた空力試験を行うことを目的として作成を行ったものである。主流供給用に用いている風洞は開放型風洞であることが特徴である。本実験装置では供試体のあるダクトに流入する主流空気と、供試体の内部に注入しフィルム冷却孔から吹き出される二次空気（実機のタービンでは冷却空気に相当する）の2つの空気系統を有している。図2.2.1(a), (b)に実験装置の概要を示す。実験装置は2台の送風機と風洞、トランジションダクト、ヒーター、二次空気系の配管によって構成されている。本来、実機のガスタービンにおいて主流側は燃焼器によって加熱された空気が用いられるが、本実験装置では主流の流量が多く主流の加熱には莫大な電力を必要とする。したがって、二次空気側をヒーターで加

熱することにより、密度比を実機とは逆にして実験を行っている。密度比が異なることで、フィルム冷却に与える現象がわずかに異なることは過去の研究<sup>(1)</sup>で証明されているが、基本的な伝熱特性は密度比が逆でも調査することが可能である。一般的に、密度比が実機に近い場合には、主流と二次空気の運動量比が小さくなるため、冷却空気の壁面付着性が高くなる。一方で、本研究のように、密度比が1を下回る場合には、運動量比が大きくなるため、比較的冷却空気の lift-off が発生し易い流れ場になる。

テストセクションダクトはアクリル製であり、外側からでも供試体や計測プローブの観察ができるようになっている。テストセクションダクトの片方の側面にはフィルム冷却平板モデルが取り付けられるようにチャンバーが設置してある。もう片方の側面には、2軸トラバース装置と、赤外線カメラが取り付けられるようになっているが、両社は同時に設置するのではなく、実施する実験項目に応じてどちらか片方を設置する。赤外線カメラでの計測時には、テストモデル正面に赤外線透過ガラス(ZnSe)を設置し、トラバース装置設置時には、スリット付のアクリルパーツを取り付ける。二次空気は、二次空気用送風機を介して層流流量計へ流入し、その後ヒーター、三方バルブを介して供試体へ達する。二次空気用配管は、伝熱試験を実施するために耐熱性の配管を用いた。



(a)装置全体図



(b)テストセクション拡大図

図 2.2.1 実験装置 I 外観図

### 2.2.2.1 主流

主流送風機から吐き出された空気は開放型風洞を通過し、風洞内に設けられた 6 枚の整流網によって整流される。その後縮流され、加速した空気はテストセクションダクトへと流入する。主流側の作動流体を供給するために用いた送風機は片吸い込み単段遠心式であり、駆動方式はモーター駆動である。また、主流側の流量は入口に設けられた円錐型の流量調整弁で調節した。流量調整弁は送風機のモーター駆動に伴う振動により、回転を起こしてしまうが流量調整弁にストッパーを設置することにより流量の変動が発生しないようにしている。主流送風機の仕様は以下に示す。

表 2.2.1 主流送風機仕様

型式	POT
出力	7.5[kW]
製造元	HITACHI Ltd
流量	120[m <sup>3</sup> /min]

#### 主流空気の温度変化

主流空気は季節によって以下のような温度変化が生じる。

- ・夏季：20℃～40℃
- ・冬季：10℃～20℃

本研究では温度変化に伴う現象の変化を最小限に抑えるために、主流空気の温度変化が起こった場合には二次空気側の温度をヒーターによって調整することにより、空気の密度比を季節によって変化が起らないようにしている。

### 2.2.2.2 二次空気

二次空気用送風機から吐き出された空気は、塩化ビニル製（耐熱仕様）の配管とブレードホースにより供試体内部へと流入する。その管路の途中には層流型空気流量計とヒーターが接続されている。

#### (1) 二次空気用送風機

二次空気は、層流流量計やヒーターを通して冷却孔から吹き出すことになるが、ここで二次空気の静圧が主流よりも低い場合はフィルム冷却の吹出しが行われない。そこで本研究では比較的送風機の吐出圧が高いものを選定し、二次空気が冷却孔から支障なく吹き出すことが出来るように配慮した。二次空気送風機はインバーターによって流量制御を行っている。表 2.2.2 に送風機の仕様を示す。二次空気の流量調整は基本的にインバーターを用いたが、流量が少ない場合はブロワーがオーバーヒートする可能性がある。そのため、二次空気の入口流量を絞るための絞りバルブと、二次空気を逃がすことで流量を減らすための逃がしバルブを取り付けてある。インバーターの仕様は表 2.2.3 に示した。

表 2.2.2 二次空気用送風機仕様


イメージ	
	
型式	VB-110-E2
出力	8.0 [m <sup>3</sup> /min]
吐出圧	16.7 [kPa]
出力	8.8 [kW]
製造元	日立産機システム

表 2.2.3 二次空気用送風機インバーター仕様

型式	FREQROL-A700
製造元	三菱電機
電源	3相 200[V]

## (2) 層流型空気流量計

層流流量計は差圧を測定することで流量を算出する。その構造は内部に毛細管が埋め込まれている。層流型空気流量計は、非圧縮とみなせる気体について、層流路前後の差圧を測定して、これに比例定数を乗じてその入り口温度、圧力条件における体積流量を求めることができる。この比例関係は流体の粘性が直接影響し、流量測定にはその粘度が一定であることが前提となる。また、二次空気の流量範囲は供試体の冷却孔个数、冷却孔直径、それによって導き出される噴出し比( $BR$ )によって決定される。本研究では  $BR=2.0$  の条件での実験の実施が十分可能であるように層流型空気流量計を選定した。層流型空気流量計の特徴をまとめると以下のようなになる。

- ・測定精度が高い
- ・測定レンジが広い
- ・圧力損失が小さく，脈動流でも誤差が少ない
- ・応答特性が良い
- ・微小流量の測定ができる

表 2.2.4 に層流流量計の仕様を示す．層流流量計本体部分は“イメージ”の左図のようなものであるが，今回は入口と出口側にノズルを設置することで流体を徐々に拡大させて層流流量計本体まで供給した．

表 2.2.4 層流流量計仕様

イメージ	
	
型式	LFE-100B
定格流量	100 [l/s]
精度	±1.0%FS
使用温度範囲	0～80[°C]
製造元	司測研

#### 流量計算式

層流流量計の入口温度，圧力，湿度条件における体積流量  $Q_{real}$  は次式で計算できる．

$$Q_{real} = K20 \times \left( \frac{\mu_{20}}{\mu} \right) \times \Delta P$$



- $Q_{real}$  : 温度  $t_1$ , 圧力  $P_1$ , 湿度  $\varphi$  (相対湿度%) における実体積流量 [l/s]  
 $K_{20}$  : 空気 20°C におけるラミナ係数  
 $\Delta P$  : 層流流量計の差圧  
 $\mu_{20}$  : 空気の 20°C における粘度  
 $\mu$  : 空気の  $t_1$ °C における粘度  
 $\varphi$  : 入口空気の  $t_1$ ,  $P_1$  における相対湿度

空気流量の粘度についての補正係数  $\mu_{20}/\mu$  は, Sutherland の実験式の定数  $C=107^*$  として次のように求められる. (\*機械工学便覧 改訂第 6 版 10-2)

$$\frac{\mu_{20}}{\mu} = \frac{380 + t_1}{400} \times \left( \frac{293}{273 + t_1} \right)^{3/2}$$

### (3) ヒーター

本研究で行う伝熱試験では, 主流と二次空気の温度差により壁面温度を変化させ, 伝熱特性を知る必要がある. そのために, 二次空気はヒーターによって加熱を行っている. ヒーターを層流流量計の上流に置いた場合, 二次空気の温度を考慮した正確な流量測定が可能になるが, 層流流量計の使用温度は 80°C であるため, ヒーターは層流流量計の下流に設置することにした. ヒーターは流路内でのヒートロスが少なくなるようにできるだけテストセクションダクトに近い位置に設置した. ヒーターの温度は暖気の際にスライダックにより調整し, 任意の温度に調整が可能である. しかし, 手動での調整であるため, 一定の温度に保つ場合には, 温度計を見ながら適宜調整する必要がある. 表 2.2.5, 表 2.2.6 にヒーターとスライダックの仕様を示す.

### (4) 三方バルブ

三方バルブとは, 空気を 3 方向から流入させる機器のことであり, 伝熱試験を行う上で必要不可欠な機器である. 実験手法の項目で説明を行うが, 本研究で用いている実験手法である過渡応答法は二次空気をステップ状に温度上昇させることにより伝熱特性を実験的に調査している. しかし, 供試体にヒーターで加熱しない状態での空気を流し, ヒーターを始動したとしても急激な温度上昇は達成することができない. したがって, 三方バルブを用いることにより以下の図 2.2.2 に示すように空気の流れる方向を切り替えることで二次空気の急激な温度上昇を可能にする. 手順としては, まず空気を I の方向へ逃がし, 空気を加熱する. 十分な加熱が行われた後で, 空気の流れる方向を I から II へと切り替えることで供試体へ加熱された空気を送り込む. 加熱された空気を供試体に送り込むのと同時に実験を開始することで, 供試体内部の二次空気は急激な温度上昇を達成することが可能になる.

三方バルブは手動切り替え方式とエア切り替え方式があるが, 本研究で用いた三方バルブはエア切り替え方式である. これは, 空気の流れる方向を切り替える際にコンプレッサー

で圧縮された空気をパイロット式 5 ポートバルブを介して 2 方向に切り替え，三方バルブに送りこむことにより空気の方向変化を可能にするものである。これにより，手動式よりも急激な温度上昇が達成できるほか，供試体をカメラで撮影するときの人の映り込みを最小限に抑えることが可能である。表 2.2. 7～表 2.2. 9 に三方バルブやコンプレッサーの仕様を示す。

表 2.2. 5 ヒーター仕様

イメージ	
	
型式	SR-9N
電気容量	13.5[kW]
最高風速	13.0[m <sup>3</sup> /min]
製造元	株式会社加島

表 2.2.6 スライダック仕様

イメージ	
	
型式	S3P-240-45
製造元	山菱電機
電気容量	15.5 [kW](3相 200[V])

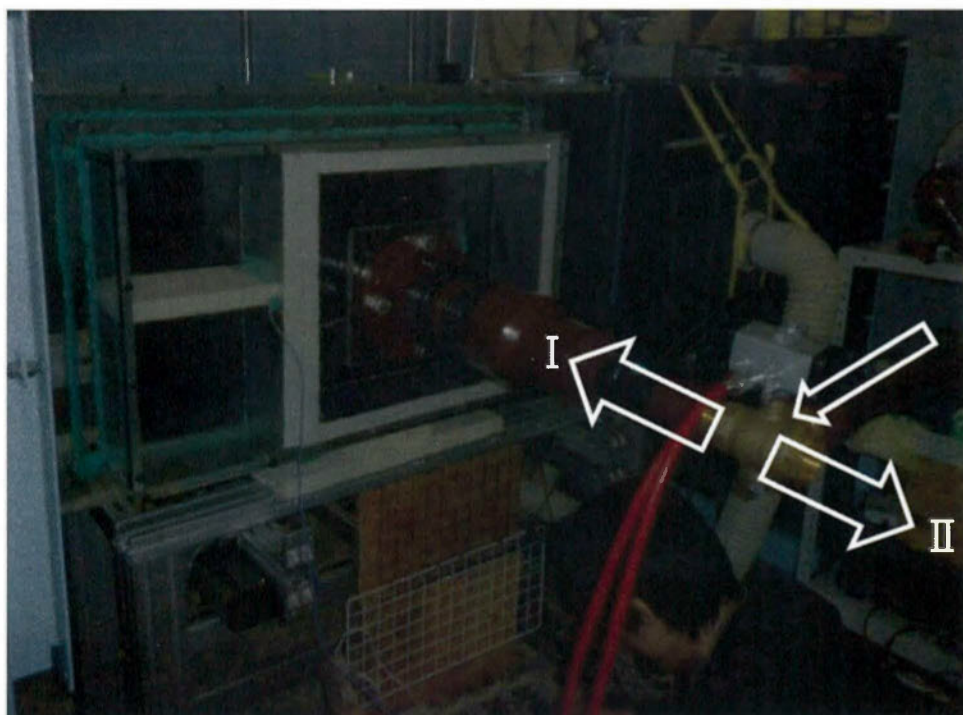


図 2.2.2 三方バルブ

表 2.2.7 三方バルブ仕様

イメージ	
	
型式	C-TNE-1.5
必要圧力	0.98[MPa]
呼び径	40A
製造元	株式会社キッツ

表 2.2.8 パイロット式バルブ仕様

イメージ	
	
バルブ種類	パイロット式 5 ポートバルブ
型式	4F210-08-AC100V
製造元	CKD 株式会社

表 2.2.9 コンプレッサー（空気切り替え用）仕様

イメージ	
	
型式	ACP-50
製造元	RYOBI
電源	単相 100[V]
使用最高空気圧	0.78[MPa]
最大吐出量	60[L/min]
空気タンク容量	7[L]

### (5) 二次空気系配管

本研究では加熱された空気を使用することにより伝熱試験を行う。従って、二次空気系に用いる配管は耐熱仕様でなければならない。また、三方バルブからテストセクションダクトへ流入するまでは二次空気のヒートロスをも最小限に抑える必要がある。したがって、三方バルブ後の流路には熱伝導率の低いスタイロフォームを設置することによりヒートロスを抑えている。スタイロフォームは断熱特性が高いことと、加工性が高いことから本実験装置に使うのにふさわしいと判断し、設置している。二次空気系に使用した配管とスタイロフォームの仕様を以下に示す。

表 2.2.10 二次空気配管仕様（通常流路）

型式	スーパーパイプ
材質	硬質ポリ塩化ビニル
耐熱温度	65[°C]
熱伝導率	0.16~0.17[ kcal/mh°C]
製造元	旭有機材工業

表 2.2.11 二次空気配管仕様 (耐熱部分)

型式	スーパーパイプ
材質	耐熱性硬質ポリ塩化ビニル
耐熱温度	90[°C]
熱伝導率	0.10~0.12[kcal/mh°C]
製造元	旭有機材工業

表 2.2.12 スタイロフォーム仕様

型式	スタイロフォーム
熱伝導率	0.028 [W/m・K]
製造元	ダウ化工株式会社

### 2.2.2.3 トラバース装置

モーターはインタフェース社製モータードライバ及び制御ボードを用いて制御した。モーター制御は Visual Basic プログラムを用いてアプリケーションを作成して行った。トラバース装置は 2 軸 (X 軸: テストセクションダクト流れ方向, Y 軸: 供試体法線方向) となっており, 各軸に 3 個のフォトセンサ (End Limit(+), End Limit(+), Origin) を有する。それぞれモーターはオリエンタルモーター製 2 相ステッピングモーターで, 詳細な仕様は表 2.2.13 に示す。

表 2.2.13 トラバース装置仕様

イメージ	
	
X 軸	
モーター型式	PK545AW
モーター製造元	オリエンタルモーター
ストローク	540[mm]
最少移動距離	0.01[mm]
Y 軸	
モーター型式	PK545AW
モーター製造元	オリエンタルモーター
ストローク	100[mm]
最少移動距離	0.004[mm]

#### 2.2.2.4 データロガー

本研究で用いたデータロガーは 2 種類である。基本的に実験装置 I では共和電業製データロガー UCAM-60B, 実験装置 II ではアジレントテクノロジー製 34970A を用いているが、計測チャンネル数が不足する場合等にはこれを入れ替える場合もある

共和電業製データロガー UCAM-60B は比較的計測チャンネル数が多い。UCAM-60B では温度（熱電対からの出力）と、直流電圧（圧力変換器からの出力）を読み取る用途に用い

た。本研究で使用したデータロガーは各計測チャンネルのデータを同時に読み込むことはできないが、最大 30 チャンネルのデータロギングができるメリットを持っている。データロガーの制御は専用制御ソフトウェア UCS-60B を用いて行った。詳しい仕様は以下に示す。

アジレントテクノロジー製データロガー34970A も、計測チャンネルのデータを同時に読み込むことはできないが、UCAM-60B と比べると時間の正確な計測機能に加わっている。34970Aは、最大 20チャンネルの計測モジュールをカートリッジに挿入することで温度と、電圧の計測が可能になっている。データロガーの制御は専用制御ソフトウェア PS-X30 G10102A を用いた。

表 2.2. 14 UCAM-65B 仕様

イメージ	
	
計測チャンネル数	30[CH]
電源周波数	50[Hz]
熱電対温度測定 (K 型熱電対の場合)	
スキャン速度	50[ms/CH]
温度測定範囲	-200[°C]~1230[°C]
分解能	0.1[°C]
精度	±0.7[°C]
内部基準接点補償気精度	±0.5[°C] (周囲温度範囲 0~50[°C])



電圧測定 (標準モード)	
スキャン速度	50[ms/CH]
測定範囲	0~5.0000[V]
分解能	100[ $\mu$ V]
精度	$\pm$ (表示値の $\pm 0.05\%+2$ )
電圧測定 (高速モード)	
スキャン速度	50[ms/CH]
測定範囲	0~5.0000[V]
分解能	100[ $\mu$ V]
精度	$\pm$ (表示値の $\pm 0.08\%+6$ )

表 2.2. 15 34970A仕様

イメージ (データロガー本体)	
	
イメージ (計測モジュール)	
	
型式	34970A
製造元	アジレントテクノロジー
熱電対温度測定時 (K型熱電対の場合)	
スキャン速度	0.01[s/CH]
温度測定範囲	-100[ $^{\circ}$ C]~1200[ $^{\circ}$ C]

分解能	0.01[°C]
精度	±1.0[°C]
電圧測定 (標準モード)	
スキャン速度	0.01[s/CH]
測定範囲	0~300.000[V]
精度	読み取り値の 0.0015[%]+レンジの 0.0004[%] (測定レンジ 10.00000[V]時)

### 2.2.2.5 圧力変換器

圧力変換器は入力された圧力に対して線形出力の関係性を持っており、圧力変換器によって電圧化された圧力情報はデータロガーで読み取られる。使用した圧力変換器の仕様は表 2.2.16 の通りである。

表 2.2.16 圧力変換器仕様

イメージ	
型式	モデル 265
精度	<±0.25[%FS]
直線性	0.98[%FS]
温度影響	-18 ~ 65[ °C ] の間で < ± 0.06[%FS/°C]
出力	DC0~5[V]
製造元	SETRA SYSTEMS

圧力変換器は各種の実験で異なるものを使用している。本研究で用いた圧力変換器の圧力レンジ，個数は表 2.2.17 に示す。

表 2.2.17 使用した圧力変換器

圧力レンジ	個数
+100 Pa	1
+500 Pa	9
+1000 Pa	2
+2500 Pa	1
+5000 Pa	3

### 2.2.2.6 微差圧較正器

圧力変換器の使用時には，較正作業が必要である。本研究では，専用の微差圧較正器を用いることで圧力変換器の較正を行った。以下に微差圧較正器の仕様を示す。圧力変換器の較正の際は，各圧力変換器に対して 5 点で較正を行い，圧力を 5 次の関数で表すことによって，圧力を較正した。

表 2.2.18 微差圧較正器

イメージ	
	
型式	モデル 869
精度	0.05[Pa] (最小レンジ)
制御安定性	0.05[Pa] (最小レンジ)
レンジ	一方向 0~3500[Pa]
サンプリングレート	20 回/秒
製造元	SETRA SYSTEMS

## 2.2.2.7 熱電対

実験の温度測定に用いた熱電対はいずれも工業的に広く用いられている K 型熱電対を使用した。主流等の主な温度測定には素線径の比較的太い熱電対を用いたが、楕形熱電対の製作時には計測領域の流れ場へ影響を与えないために素線径の細い熱電対を使用した。以下に熱電対の仕様を示す。

表 2.2.19 熱電対仕様

一般的な熱電対	
素線径	1[mm]
製造元	林電業
楕形熱電対仕様	
素線径	0.1[mm]
製造元	林電業

## 2.2.2.8 熱線流速計

本研究では、乱流の計測に DANTEC StreamLine (図 2.2.3) を用いた。この CTA は過熱温度の設定や温度補償などはコンピュータでサポートを行うことにより、乱流計測を比較的容易に行うことができる。StreamLine 本体は、3つのモジュールを収納されているが、本研究では1つのモジュールのみを使用して計測を行った。熱線は DANTEC 製 I 型熱線プローブ 55P11 (図 2.2.4) を使用した。プローブサポータは同社のものを使用している。ただし、StreamLine には較正器が付属していないため、較正に関しては後述する手順を別途行っている。



図 2.2.3 DANTEC StreamLine

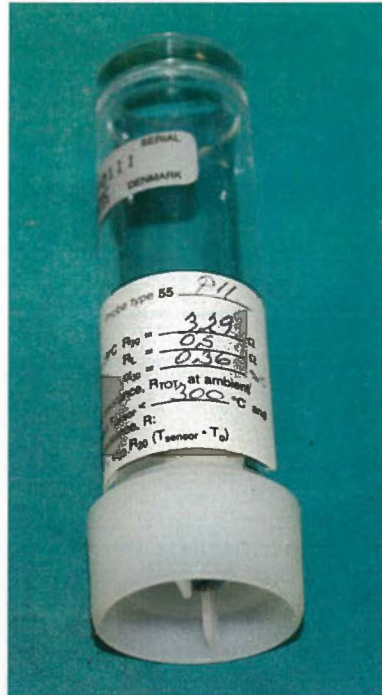


図 2.2.4 I 型熱線 (55P11)

### 2.2.2.9 テストセクションダクト

平板モデル供試体はテストセクションダクトのサイドに設置する形となっており、供試体をはめるための溝、段差が設けられている。供試体にはチャンパーを通して空気が送られる形となっており、このチャンパーもテストセクションサイドプレートに固定される形となっている。もう片方のサイドプレートは、と同じサイドプレートを使用することで各種の空力、伝熱試験を可能にしている。

#### テストセクションサイドプレート仕様

##### ・空力計測、楕形計測用サイドプレート

このサイドプレートは供試体付近には流れ方向に広いスリットが設けられており供試体周りに2軸トラバース装置を用いてプローブを動作させることができるようになっている。また、サイドプレート最下流には高さ方向に広いスリットが設けられており、供試体最下流で前縁モデルの空力損失を評価するための全圧プローブを挿入することができるようになっている。

##### ・赤外線カメラ計測用サイドプレート

このサイドプレートには赤外線透過ガラスが付けはずしできるようになっており、 $\phi 140\text{mm}$  の穴が開く形となっている。この穴では、赤外線透過ガラスのアタッチメントを挿入する。赤外線透過ガラスはサイドプレートの中間位置に設置しており、冷却孔出口から、下流側  $x/d=10$  程度の位置まで、赤外線カメラで撮影可能となっている。これは、赤外線透過ガラスの直径が狭いことと、赤外線カメラに取り付けられるレンズの仕様によるもので

ある。

### 2.2.2.10 大気圧計

本研究では流速等各物理量を計測する際に大気圧の値を用いることになるが、大気圧の計測にはセトラ社の大気圧計モデル 370 を用いた。詳細な仕様は以下に示す。

表 2.2.20 大気圧計仕様

イメージ	
	
圧力レンジ	60~1100[hPa]
精度	±0.02[%FS](21[°C]時)
温度影響	0[°C]~43[°C]の間でゼロシフト±0.004[%FS/°C], 感度シフト±0.002[%FS/°C]
再現性	±0.01[%FS]

## 2.2.2.11 断熱材

実験装置 I と II のチャンバー内にはヒートロスを低減するために断熱材を設置した。以下に断熱材の仕様を示す。

表 2.2.21 断熱材 (実験装置 I)

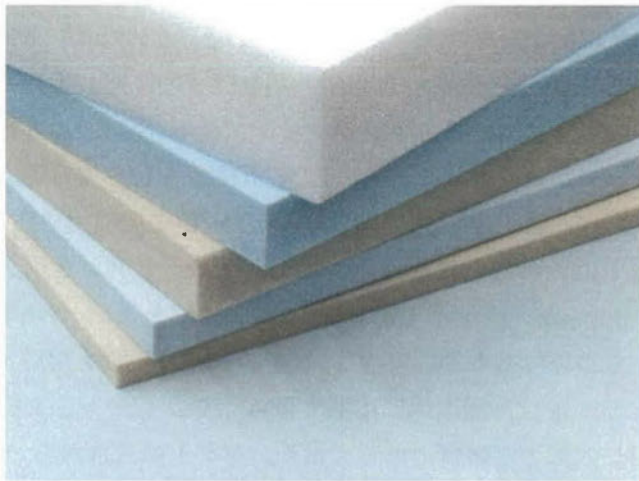
イメージ	
	
製造元	ダウ化工株式会社
品名	スタイロエース II
使用温度	80°C以下 (80°C以上で変形)
熱伝導率	0.028[W/mK]

表 2.2.22 断熱材 (実験装置 II)

イメージ	
	
製造元	アキレス株式会社
品名	キューワンボード
熱伝導率	0.021[W/mK]

実験装置 I と II では使用している断熱材が異なるが、これは実験装置を製作した時期が異なるためである。

### 2.2.3 実験装置 II

実験装置 II (図 2.2.5) は岩手大学所有の環境風洞を示しており、この実験装置も主流と二次空気の 2 つの空気系統を有している。主流供給に用いている風洞は回流型風洞であり、テストセクション周りには広いスペースが存在している。そのため、実験装置の周りに広いスペースの求められる LDV や PIV 等の光学計測を行うのに適している。テストセクションダクトの上流側に設置されているトランジションダクト (図 2.2.6 参照) には供試体側の側面にフォグチャンバーが設置されている。LDV 計測等を行う場合は、トレーサー粒子を供給し、フォグチャンバーを介して主流中にトレーサー粒子を噴出する。これにより、入口の境界層は実験装置 I に比べると厚くなっている。テストセクションダクトはアクリル製で幅 260mm×高さ 620mm×奥行き 1500mm の大きさである。テストセクションダクトを構成しているアクリル板は基本的に厚さ 15mm のアクリル板を用いているが、供試体の向かい側にあるアクリル板は計測用途に応じて数種類のプレートを交換する。ピトー管はダクトの上面から出し入れする機構になっており、ダクトの入口から 150mm 下流に位置する。実験装置 II の周囲にはレーザードップラー流速計を稼働させるための実験装置 (フォグタンク、フォグブロー、3 軸トラバース装置、レーザープローブ) が設置されている。二次空気は、実験装置 I と同様に二次空気ブローから供給し、層流流量計、ヒーターを介してプレナム部へ流入する。プレナム内部には伝熱試験時に発生するヒートロスを低減するためにポリウレタンフォームが挿入されている。

#### テストセクションサイドプレート仕様

##### ①赤外線透過ガラス設置用

壁面フィルム効率・熱伝達率計測用に ZnSe の赤外線透過ガラスを取り付けるためのプレートである。

##### ②LDV 計測用

肉厚 10mm のアクリルプレートであり、比較的肉厚を薄くしたプレートである。これはレーザの屈折を最小限にするためである。

##### ③トラバース計測スリット

トラバース装置を用いて計測プローブを供試体までトラバースするためのプレートである。流れ方向に広いスリットを設けてある。



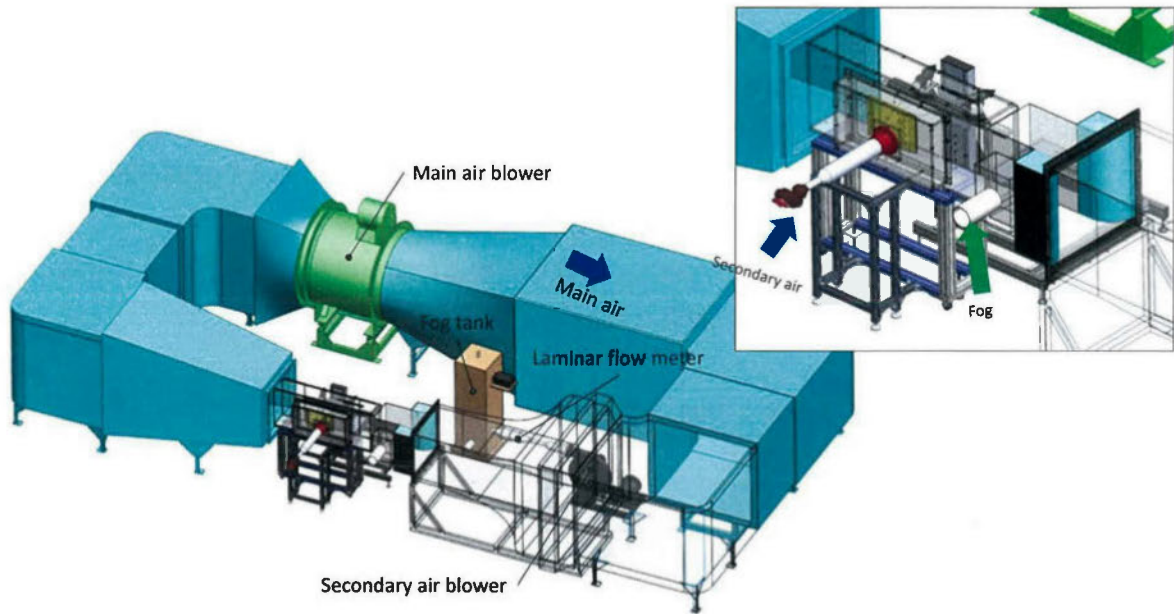


図 2.2.5 実験装置 II (外観図)

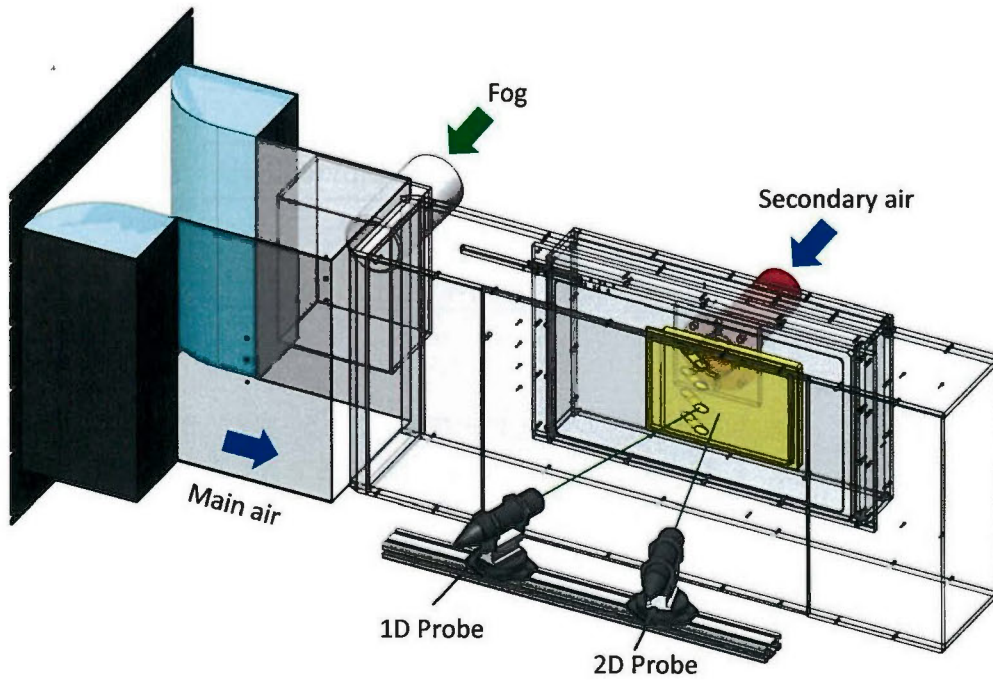


図 2.2.6 テストセクション拡大図

## 2.2.3.1 主流

実験装置Ⅱは回流型風洞であり、主流送風機から供給された空気は風洞内を回流する。風洞は密閉型と部分開放型の両方の仕様で使用することができるが、本研究ではテストセクションを自作するために部分開放型の仕様となっており、密閉型で使用する場合よりも最大流速が低くなっている。風洞内部には曲り部に案内羽根、流路中には整流網が取り付けられている。主流送風機はインバーター制御方式であり、実験装置Ⅰに比べるとバルブの振動による流速の変化が抑制されるために、実験中の流速の変動は非常に小さいものとなっている。詳細な仕様は表 2.2.23 と表表 2.2.24 へ示す。

表 2.2.23 実験装置Ⅱ主流用送風機仕様

型式	AIR 型
出力	30[kW]
製造元	株式会社 荏原製作所
流量	70000[m <sup>3</sup> /h]
回転速度	1055[ $\text{min}^{-1}$ ]

表表 2.2.24 実験装置Ⅱ主流用送風機インバーター仕様

型式	CIMR-AA00138A1000
製造元	安川電機
定格電圧	3 相式 200~240V(60[Hz])
制御方式	30[kW]
出力周波数範囲	3 相 200[V]

## 2.2.3.2 二次空気

実験装置Ⅱでも、送風機の制御はインバーターで行っている。また、送風機の吐出静圧も実験装置Ⅰと同様に高いものを使用した。基本的に実験装置Ⅰと二次空気系統に違いはないが、使用している装置の型式が異なる。型式に関しては以下に示す。

表 2.2.25 二次空気用送風機仕様

型式	VB-60-E2
出力	4.0[m <sup>3</sup> /min]
吐出圧	16.7[kPa]
出力	4.0[kW]
製造元	日立産機システム

表 2.2.26 二次空気用送風機インバーター仕様

型式	FREQROL-D700
製造元	三菱電機
電源	3相 200[V]

表 2.2.27 層流流量計仕様

型式	LFE-50B
定格流量範囲	50[l/s]
精度	±1.0[%FS]
使用温度範囲	0~80[°C]
製造元	司測研

表 2.2.28 ヒーター仕様

型式	SR-9N
電気容量	13.5[kW]
最高風速	13.0[m <sup>3</sup> /min]
製造元	株式会社加島

表 2.2.29 スライダック仕様

型式	S3P-240-45
製造元	山菱電機
電気容量	15.5[kW]

### 2.2.3.3 レーザードップラー流速計

本研究では入射光及び信号光を光ファイバーで伝送するプローブタイプの後方散乱型三次元レーザードップラー流速計を用いた。実験装置は電源ボックス、レーザーヘッド、トランスミッター、光ファイバーケーブル、プローブ、BSA(Burst Spectrum Analyzer)、トラバース装置で構成されている。また、レーザーの出力がほとんど熱になるため、レーザーヘッドと電源ボックスに水を循環させることにより水冷を行っている。冷却水が不足していた場合、温度が適正範囲外の場合はレーザー電源が落ちるようになっている。6Wのアルゴンイオンレーザーからのレーザー光は、トランスミッターで緑(波長 514nm)、青(波長 488nm)、紫(波長 476nm)の3色に分光され、ビームスプリッターにて各色の2本のレーザーに分けられる。逆流をとらえることができるように、一方にはBSAにて40MHzの周波数シフトがかけられている。合計6本のレーザーがファイバーケーブルに導かれ、緑と青のレーザーが2次元プローブから、紫が1次元プローブから照射される。両プローブは流れに垂直な方向へ、それぞれ25°の入射角になるように固定し、ステッピングモータ

一で駆動する三次元トラバース装置に取り付けられている。BSA 及びトラバース装置の制御には BSA Flow Software v5.00 (Dantec 社) を用いた。レーザードップラー流速計の詳細な仕様を以下に示す。

表 2.2.30 レーザードップラー流速計レーザーシステム仕様

イメージ	
レーザーシステム仕様	
システム型式	Stabilite 2017 Laser System
Laser Head	Stabilite 2017
Power Supply	Stabilite 2550
Controller	Stabilite 2670
製造元	Spectra-Physics 社
プロセッサ(BSA)	
型式	BSA F60
製造元	Dantec 社

表 2.2.31 ファイバープローブ仕様

	2D Probe		1D Probe
Probe diameter[mm]	60		60
Focal length[mm]	401.1		400.7
Wave length[nm]	514.5	488.0	476.5
Color	Green	Blue	Violet
Calibrated velocity conversion factor[ms <sup>-1</sup> /MHz]	5.303	5.009	5.286

表 2.2. 32 三軸トラバース装置仕様

3D Traversing mechanism	
Dantec 41T33	
Range	1010 [mm]
Calibration factor	160 [Pulses]
Velocity (MAX)	25 [mm/s]

### 2.2.3.4 フォグおよびフォグジェネレータ

レーザー光の散乱粒子として、フォグジェネレータにより平均粒径  $1.068\mu\text{m}$  の粒子を供給した。フォグジェネレータから噴射された粒子は一時的にチャンバーに保管し、粒子がテストセクション内で拡散するように導いた。フォグジェネレータは内蔵されたタイマーにより間欠的に動作させており、粒子の供給量を調節している。これは、フォグを節約する意味もある。詳細な仕様は表 2.2. 33 に示した。フォグジェネレーターで発生させたフォグは小型ブロワー（表 2.2. 34）を用いて吸出しを行い、スモークチャンバー（図 2.2. 7）に貯蔵した後でダクトホースを通してテストセクションへ供給する。このような手法を取っている理由は、可視化・PIV 計測には大量のフォグを連続的に供給する必要があるためである。小型ブロワーは、主流や二次空気にフォグを送り出すために比較的高静圧のブロワーを選定した。

図 2.2. 8 にはスモークチャンバーを動作させる仕組みを示す。スモークチャンバー専用のブロワーの上流には直接フォグジェネレーターが取り付けられており、ブロワーでフォグを取り込むことが可能である。ブロワーの吹き出し口から吹き出したフォグはタンク内にいったん貯蔵され、タンク下部の配管からテストセクションへフォグを流入させる。

実験に際しては、使用しているトレーサー粒子に関して、ストークス数  $St$  を計算することで流れへの追従性を調査しておく必要がある。ストークス数は、流体を運動する微粒子について、流体への追従性を記述するために用いられる無地減数である。一般的に、ストークス数  $St \ll 1$  の場合には、微粒子の軌跡は流体の流線に一致するとされる。ここで、ストークス数は以下の式で表す。

$$St = \frac{\rho_p d^2 U}{18\eta L} \quad (2.2.1)$$

$\rho_p$  : 微粒子の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$d_p$  : 微粒子の直径 [m]

$U$  : 代表流速 [m/s]

$\eta_f$  : 流体の粘度 [ $\text{kg}/\text{m s}$ ]

$L$  : 代表長さ [m]

フォグの物性値に関しては、仕様書に記載している物性値もあるが、不明な点も多い。しかし、フォグ自体は油に似ていることから、不明な物性値に関してはオリーブオイルの物性値を代入する。オリーブオイルの物性値を使用するのは、PIVやLDVではトレーサー粒子にオリーブオイルを使う場合も多く、本研究で使用しているフォグも同様の性質を持っていると考えられるからである。微粒子の密度に関しては、オリーブオイルの密度を代入して、 $916[\text{kg}/\text{m}^3]$ とした。微粒子の直径は、フォグジェネレータの仕様(表 2.2.33)より、 $1.068[\mu\text{m}]$ とする。代表流速、長さに関してはレイノルズ数の定義で使用した値を用いて、 $13[\text{m}/\text{s}]$ 、 $0.02[\text{m}]$ にそれぞれ設定した。流体の粘性は、オリーブオイルの粘性を用いて  $101000[\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}]$ である。オリーブオイルの粘度は明確な記載がなかったが、水に対して2オーダー高いという記載があったため、水の100倍の粘度とした。以上を代入すると  $St=3.0\times 10^{-13}$ であり十分に小さい。そこで今回は、微粒子の追従性は十分と判断した。

表 2.2.33 フォグジェネレータ仕様

イメージ	
	
型式	SAFEX F2010
消費電流	220/230 [V] 50 [Hz] or 110 [V]/60 [Hz]
消費電力	1500 [W]
ヒューズ	8[Amp]
暖機時間	approx. 5 [minutes]
フォグタンク容量	330 [ml]
サイズ	length : 340 [mm], Width : 170[mm], Height : 14 [mm]
重量	approx. 6.5 [kg]
フォグ消費量	Min :10 [ml], Max : 85 [ml]
フォグ生成量	approx. 600 [m <sup>3</sup> /min]
フォグタイプ	STANDARD
フォグ耐久性	10 – 30 [minutes]
平均粒径	1.068 [μm]

表 2.2.34 フォグ吸い込みブロワ仕様

イメージ	
	
型式	U2V-30T
製造元	昭和電工株式会社
流量	1.0[m <sup>3</sup> /min]
静圧	9.3[kPa]
電源	3相 200[V]



図 2.2.7 スモークチャンバー



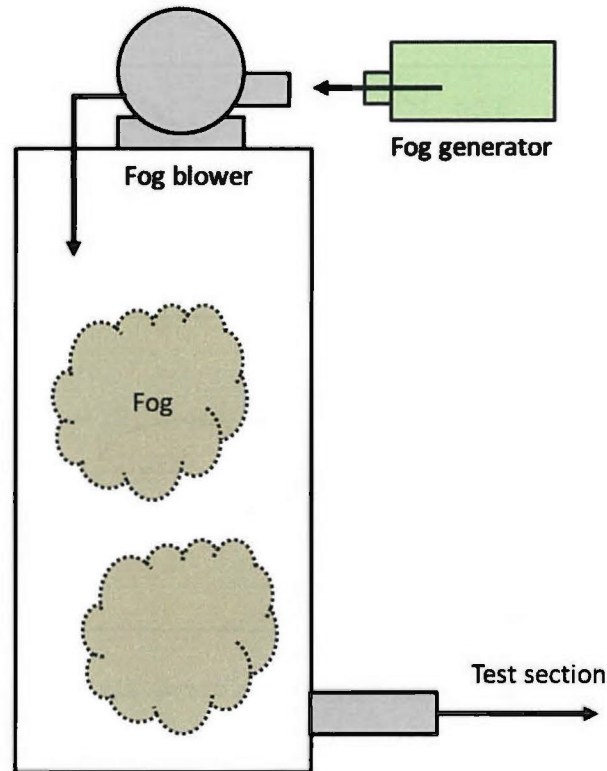


図 2.2.8 スモークチャンバーの仕組み

#### 2.2.4 供試体

冷却孔のベース形状は、過去の研究結果と比較することで装置のベンチマークを行うことが好ましい。本研究では、実験、数値解析共に検証が多く行われているモデルということから Kohli ら<sup>④</sup>の研究で使用した平板フィルム冷却モデル（図 2.2.9）を用いた。論文では、冷却孔の傾斜角が 35 度、55 度のモデルについて実験が行われていたが、今回はより汎用的な冷却孔に関して研究を進めるため、35 度の冷却孔を選択した。冷却孔ピッチや、供した厚みに関しても図中に示した通りである。

本研究では 2 種類の平板モデル供試体（供試体 I、供試体 II）を用いた。供試体 I はフィルム冷却の基礎研究を行うために最初に作成を行った供試体であり、冷却孔直径  $d$  とした時に、Kohli らのベース形状と同じピッチ  $3d$  となっている。供試体 II は、供試体 I で得られた研究データを基にさらなる研究の拡張のために作成した供試体であり、冷却孔ピッチや冷却孔形状を変化させることが出来るようになっている。

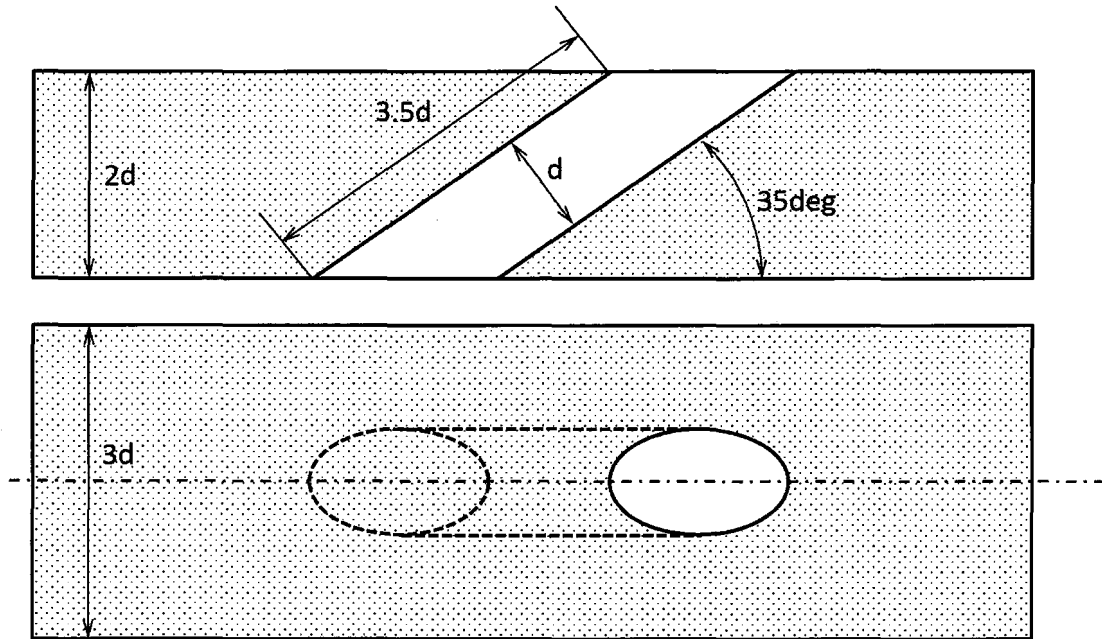


図 2.2.9 冷却孔形状 (Kohli らのモデル)

#### 2.2.4.1 供試体 I

供試体 I (図 2.2.10) は冷却孔直径  $d=20\text{m}$  の単純円筒型冷却孔を 4 ピッチ有する。冷却孔ピッチは  $3d$  となっている。本研究では、研究上設定する主流のレイノルズ数を平板モデル試験では  $Re=16,400$  としている。そのため、冷却孔の直径が大きいほど、主流の流速は小さい値を取ることが可能になる。平板モデル試験では将来的に PIV など、光学的な計測を実施することを検討し、主流の流速を最小限に抑えるために、冷却孔の直径は過去の研究と比較して、大きいものを用いた。また、これにより冷却孔付近の詳細な流れ場を観察することが可能である。冷却孔の直径はベースと同様に  $35^\circ$ 、供試体の肉厚は  $2d$  となっている。平板モデルには後に説明する三次元デバイスを取り付けるために、冷却孔の出口付近の平板部品は(a)と(b)の部分で取り外しが可能にしている。この際、供試体を組み合わせた時の段差は非常に小さいために実験には支障がないと判断した。平板モデル供試体の作成は切削加工を用いて行った。

本供試体は ABS 樹脂によって製作されており、ABS 樹脂とはアクリロニトリル、ブタジエン、スチレン の共重合合成樹脂の総称であり、二次空気を加熱する本研究においても、その温度に耐えうる程度の耐熱性を有している。また、剛性、硬度、加工性、耐衝撃性、曲げ疲労性など機械的特性のバランスに優れており、複雑な冷却孔形状の加工にも向いている。さらに、本研究においては、伝熱試験の際に背面からの熱伝導の影響が少ないことが望まれるため、熱伝導率の低い材料を採用することが求められるため、供試体材料として ABS 樹脂を採用した。また、ABS 樹脂とアクリルの二

材料については、比熱、熱伝導率、密度の詳細な計測を計測はアグネ技術センター(株)依頼しており、結果を表 2.2.35～表 2.2.37 に示す。比熱、熱伝導率、密度の計測は、それぞれ断熱連続法、熱線法、アルキメデス法で行われた。この結果はフィルム効率、熱伝達率の計算の際に使用しており、比熱は 20℃時、熱伝導率と密度は 25℃の時の物性値を用いた。

表 2.2.35 比熱測定結果

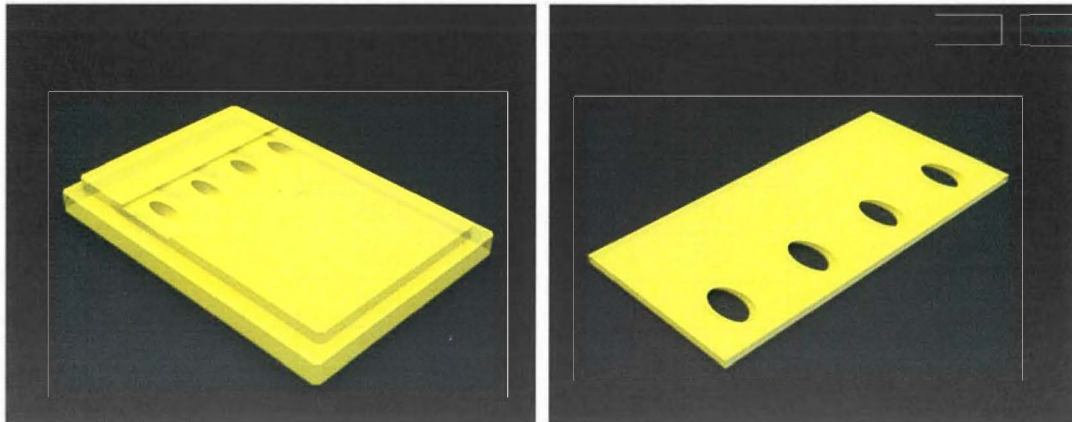
温度[℃]	比熱[J/g・K]	
	ABS 樹脂	アクリル
-40	1.19	1.17
-30	1.23	1.21
-20	1.28/	1.25
-10	1.32	1.30
0	1.35	1.33
10	1.39	1.36
20	1.42	1.40
30	1.45	1.43
40	1.49	1.46
50	1.52	1.49
60	1.57	1.53
70	1.62	1.57
80	1.67	1.62
90	1.72	1.67
100	1.76	1.73

表 2.2.36 熱伝導率測定結果

温度[℃]	熱伝導率[W/[m・K]]	
	ABS 樹脂	アクリル
-40	0.183	0.214
25	0.214	0.228
85	0.220	0.237

表 2.2.37 密度測定結果

温度[°C]	密度[g/cm <sup>3</sup> ]	
	ABS 樹脂	アクリル
25	1.031	1.186
50	1.022	1.178



(a)土台部

(b)冷却孔部

図 2.2.10 供試体 I 外観図

#### 2.2.4.2 供試体 II

供試体 I では冷却孔が単純円筒型、ピッチ  $3d$  の条件を固定した供試体となっていた。これに対し、供試体 II は冷却孔形状の効果、冷却孔ピッチの効果を観察する目的で作成した供試体である。図 2.2.11 には供試体 II の外観図を示す。供試体 II は Hole Block と Base Block の 2 つのパーツに分割されている。Hole Block は研究目的に応じて、冷却孔やピッチを変化させた Block を作成した。Base Block は Hole Block をはめ込むためのパーツとなっており、流れ方向に  $30d$  までの壁面フィルム効率・熱伝達率計測ができるだけのサイズとなっている。Base Block と Hole Block の肉厚は供試体 I と同じく、 $2d$  に固定した。HOLE BLOCK と B Base Block の材質は、供試体 I と同じ ABS 樹脂で、加工は全て切削加工を施した。Hole Block の種類に関しては、次節以降で説明を行う。

#### 2.2.4.3 流れ制御 Device の製作方法

本研究では次節以降に述べる、流れ制御 Device を供試体に取り付けることによって、フィルム冷却の高効率化を目標としている。流れ制御 Device は複数の設計パラメータを有するため、形状は多岐にわたって検討することが可能である。従って、研究の過程においては流れ制御 Device を低コストで作成することが求められる。上記の理由から、本研究では、冷却孔部と流れ制御 Device を同じパーツで製作するのではなく、流れ制御 Device だけを

別に製作し、供試体に取り付ける方法（図 2.2.12 参照）を採用した。

流れ制御 Device の作成は、岩手大学所有の 3D プリンター（Dimension Elite）で行った。以下の

表 2.2.38 に、3D プリンターの仕様を示す。流れ制御 Device の作成時は、積層ピッチを 0.178mm に設定して、製作を行っている。モデル内部は制御 Device の体積が小さいことから、ソリッドとした。

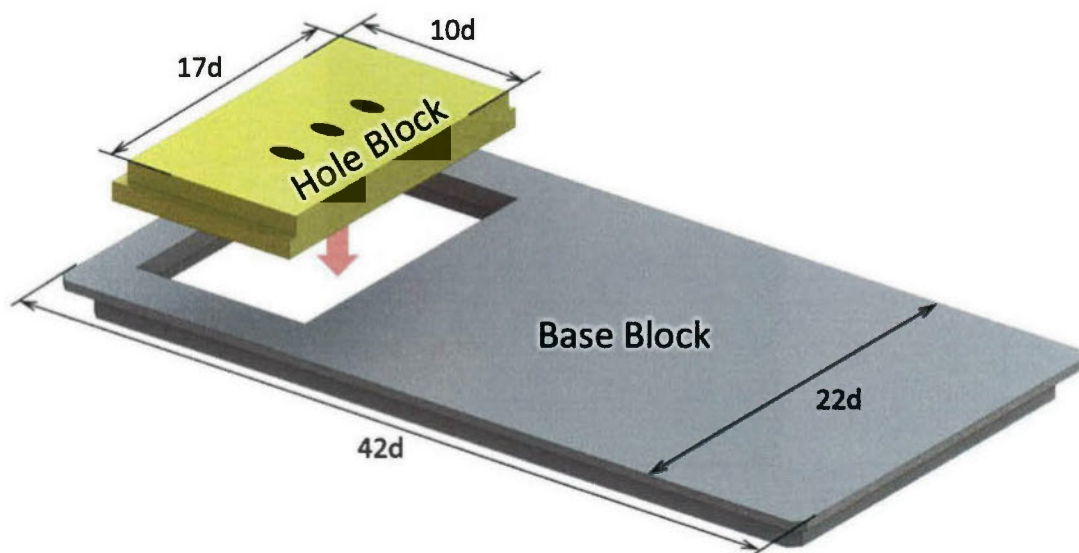


図 2.2.11 供試体 II 外観図

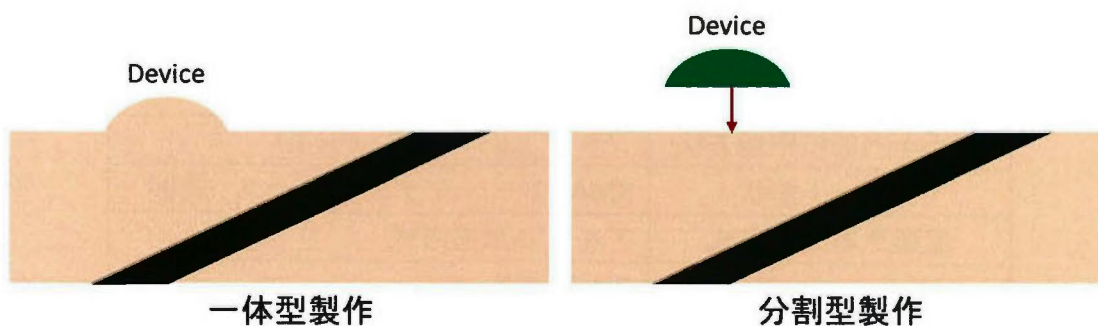


図 2.2.12 流れ制御 Device の取り付け

表 2.2.38 3D プリンター仕様

イメージ	
	
メーカー社	Stratasys
シリーズ	Dimension Elite
造形方式	熱溶解積層法 (FDM 法)
造形サイズ[mm]	W203×D203×H305
モデル材料	ABS Plus 樹脂
積層ピッチ[mm]	0.178/0.254
モデル内部の中埋方法	ソリッド/スパース (中空)
サポート形状	SMART/ベーシック/スパース /周囲
造形サポート方式	アルカリ水溶方式
ドライバソフト	CatalystEX
機械寸法[mm]	W686×D914×H1041
重量[kg]	136

材料供給方式	専用カートリッジ方式
--------	------------

## 2.2.5 テストセクション入口流れ場

本研究では、流れ制御 Device を取り付けた計測を実施するが、Device から発生する渦の挙動はテストセクション入口の流れ場に影響されると考えられる。従って、予めテストセクション入口流れ場の計測を行った。

### 2.2.5.1 主流乱れ度

テストセクション入口の主流乱れ度は、実験装置 I では熱線で、実験装置 II では LDV を用いて計測を行った。実験装置 I の熱線におけるサンプリング数は 1000Hz であり、 $2^{14}$  回のサンプリングを 1 回の計測で行い、これを 5 回繰り返した。実験装置 II では入口ピトー管位置で 750 回のサンプリングを LDV 計測で行った。計測によって得られた主流乱れ度は以下のとおりである。各装置の主流乱れ度は、流れ方向流速の変動を元にして算出した。

表 2.2.39 実験装置入口主流乱れ度[%]

	主流乱れ度
実験装置 I	0.64%
実験装置 II	0.34%

### 2.2.5.2 入口速度プロファイル

各実験装置の  $x/d=0$  の位置(図 2.2.13 参照)で、流れ方向速度プロファイルの計測を実施した。計測方法は両実験装置共に L 型のミニチュアピトー管である。流れ方向流速は  $y/d=2.5$  の位置での流れ方向流速で正規化した。図 2.2.14 には、実験で得られた  $x/d=0$  における無次元流れ速度プロファイルを示す。実験装置 I に比べて実験装置 II の境界層厚さは比較的大きい。これは、ダクト入口のシャープエッジから、計測位置までの距離が長く、境界層が成長したためである。表 2.2.40 には、99%境界層厚さを示す。



図 2.2.13 座標系

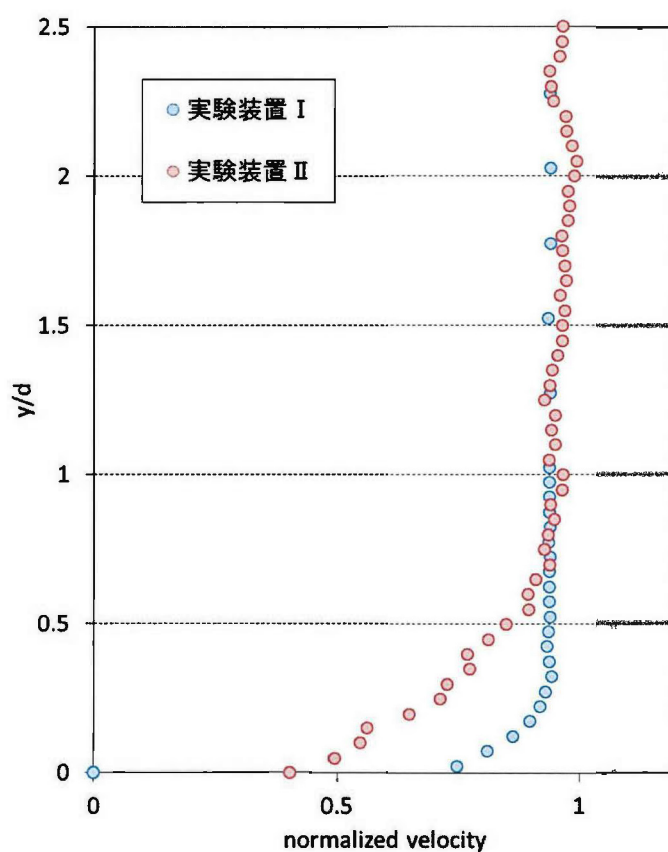


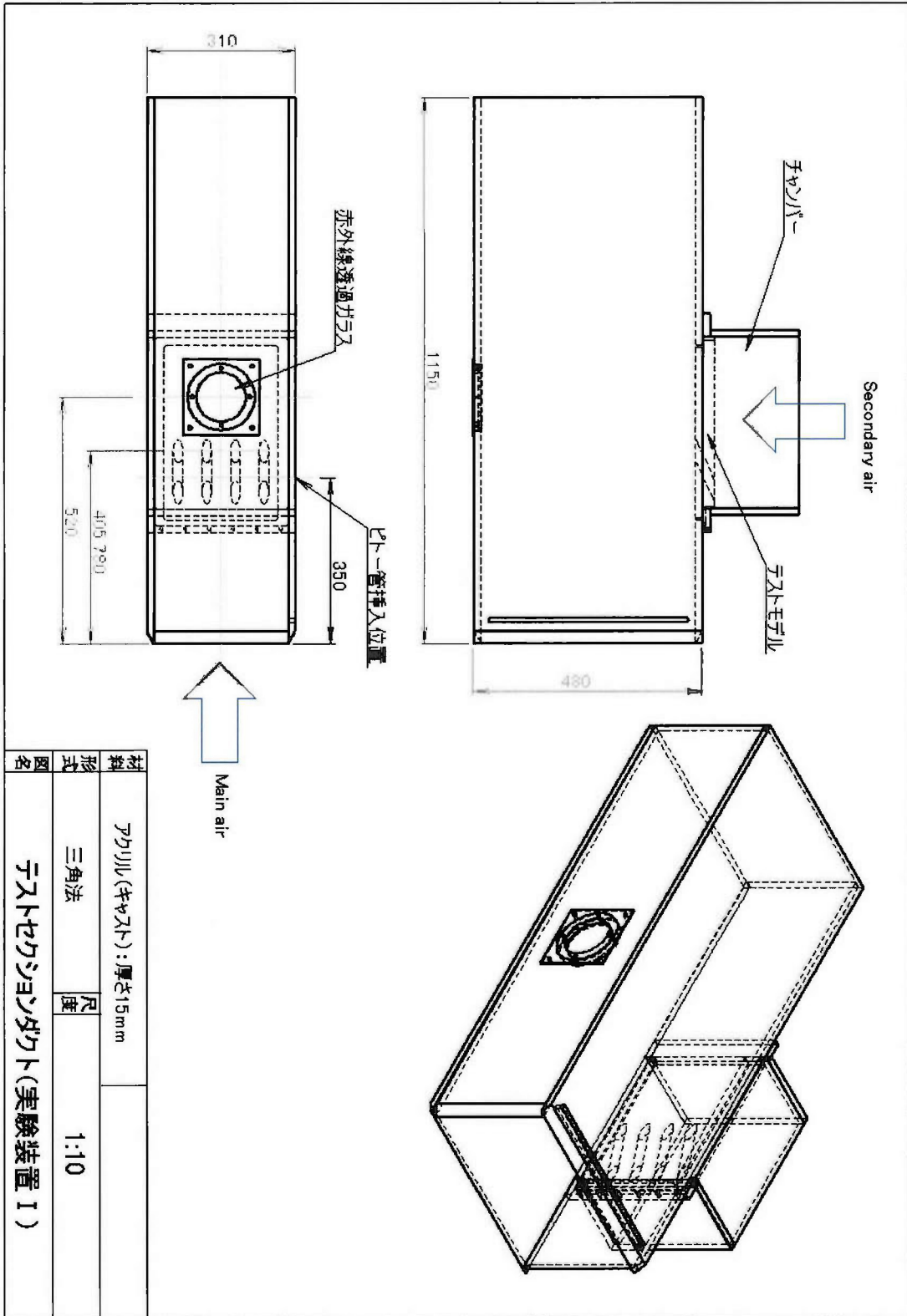
図 2.2.14 入口速度プロファイル( $x/d=0$ )

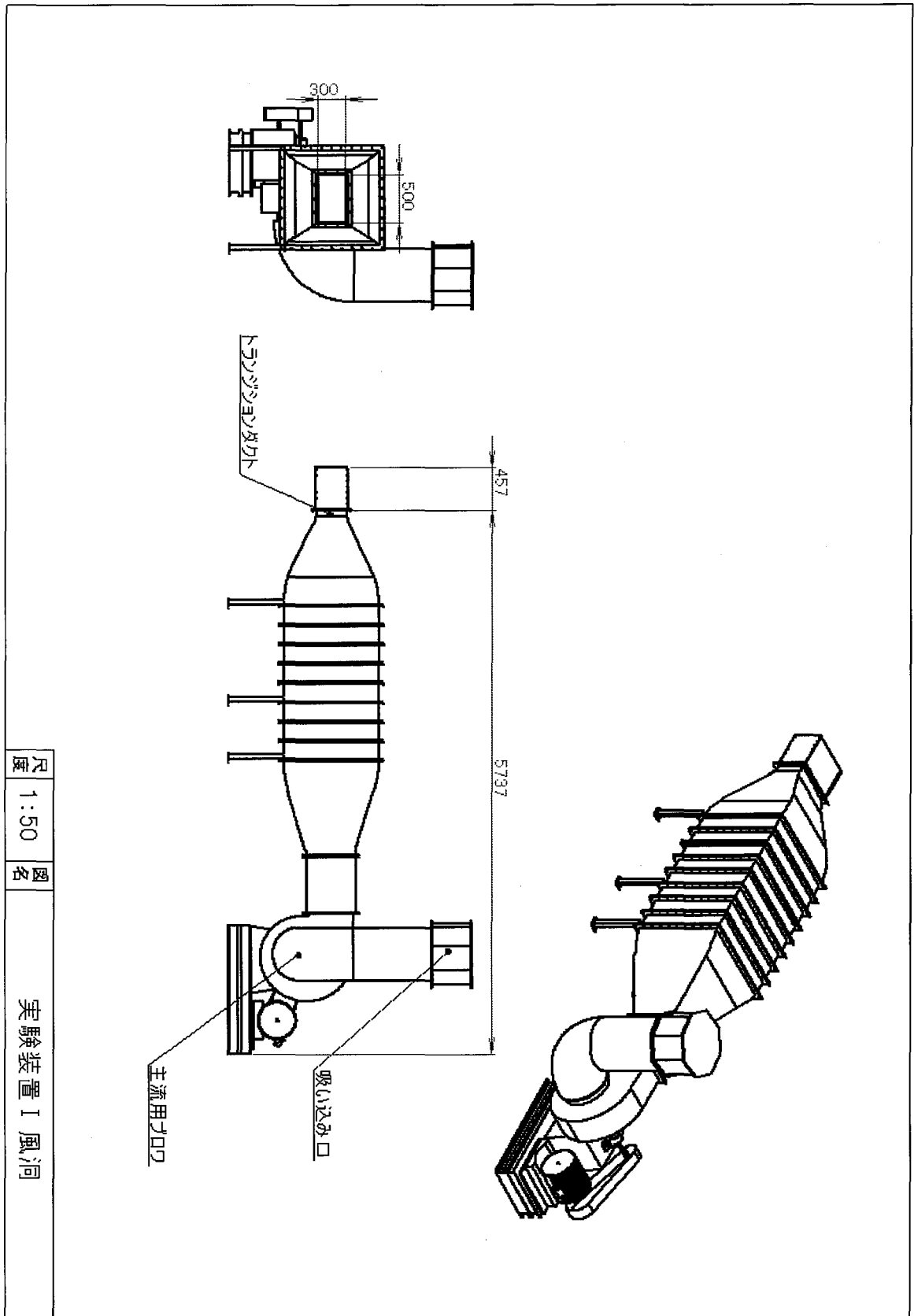
表 2.2.40 99%境界層厚さ( $x/d=0$ )

	99%境界層厚さ
実験装置 I	$0.3d$
実験装置 II	$1.0d$

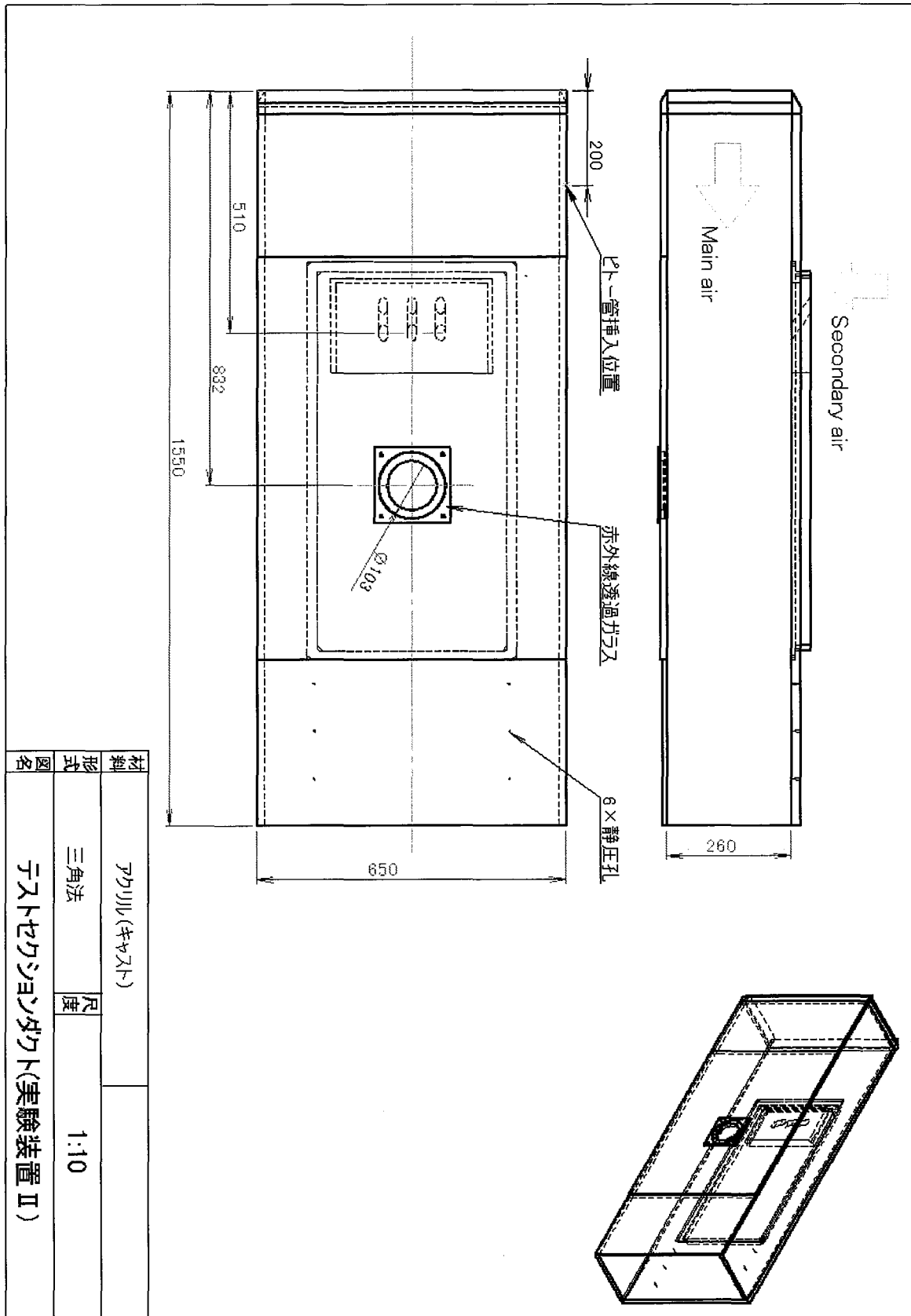


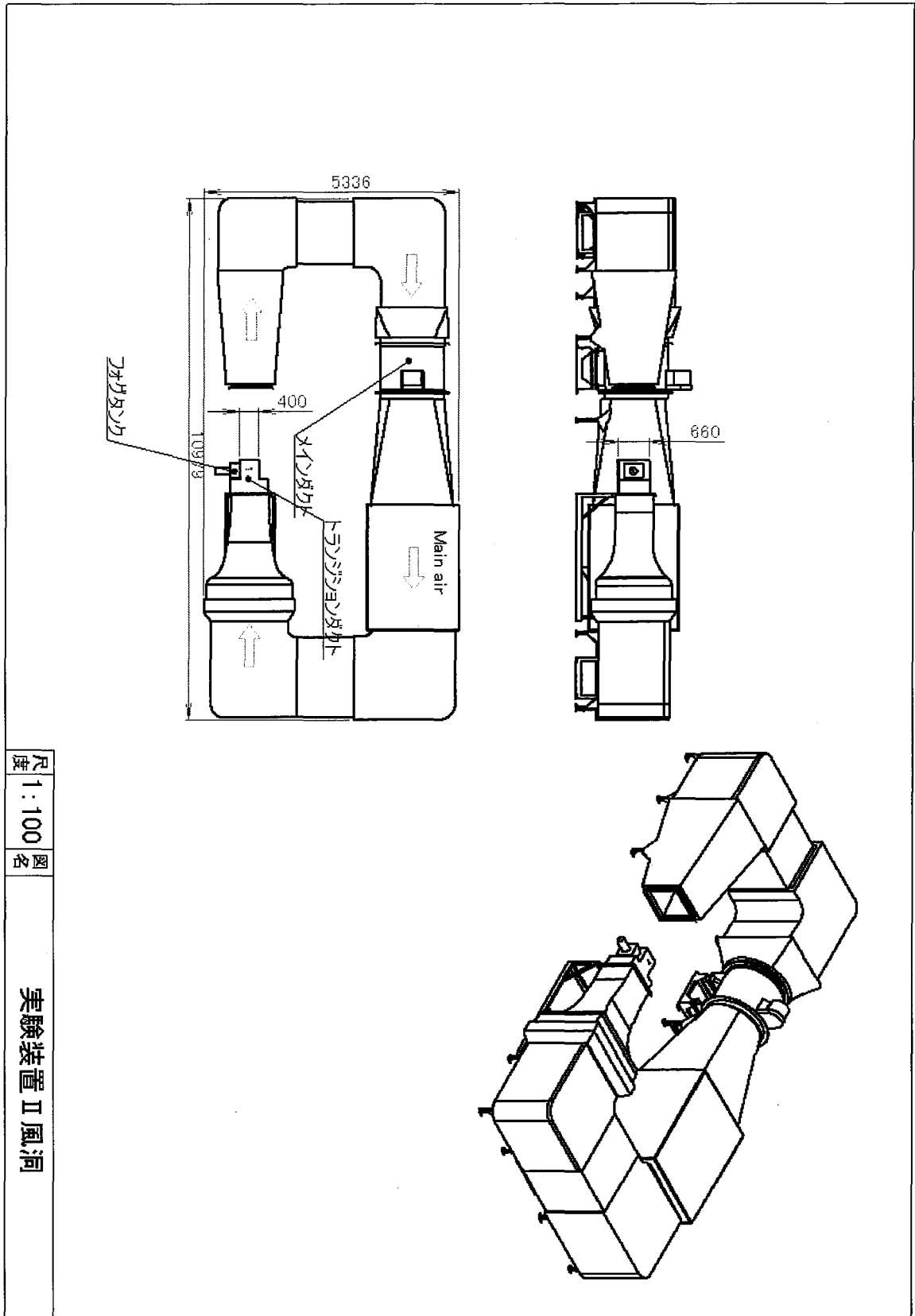
2.2.6 実験装置図面



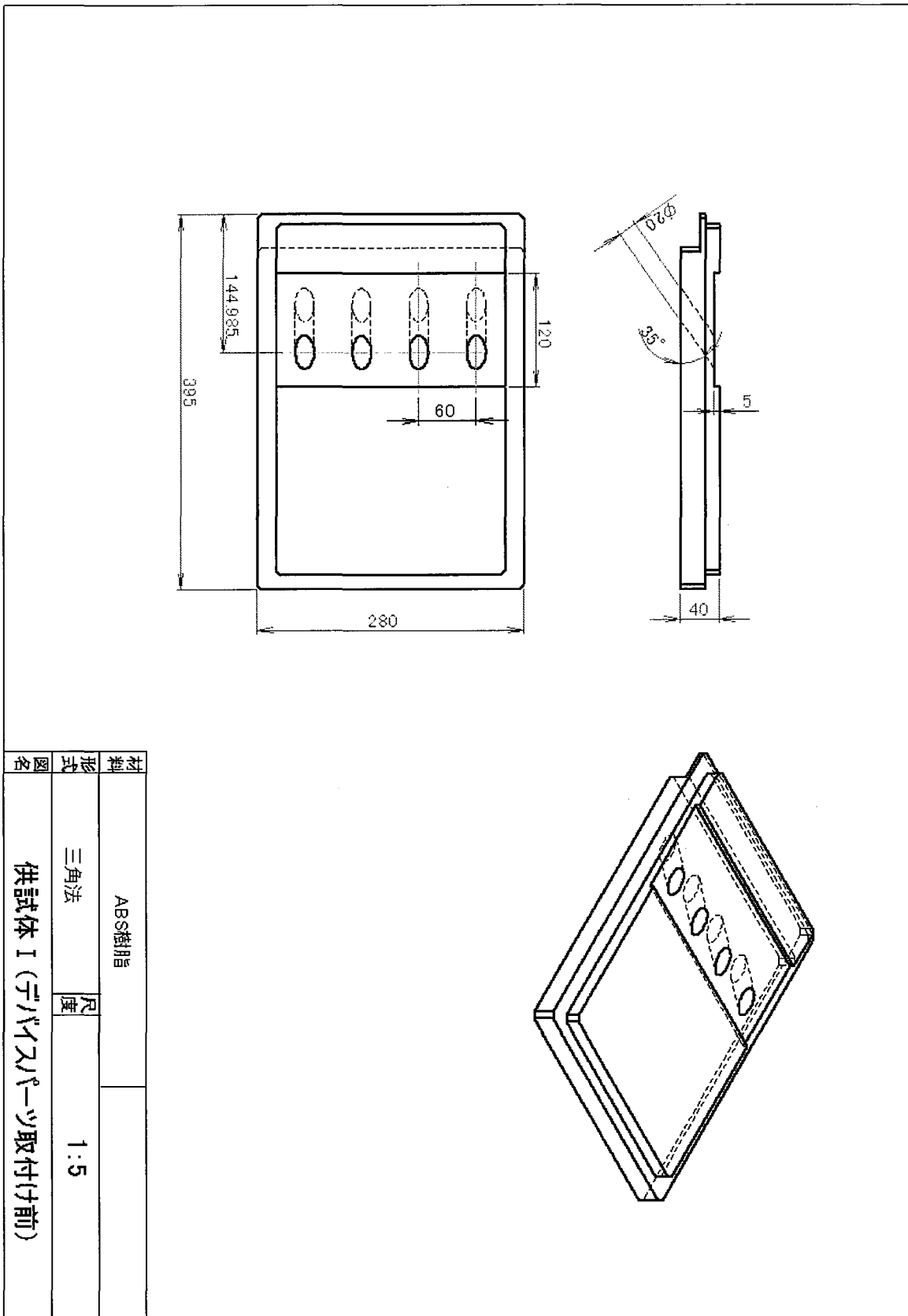


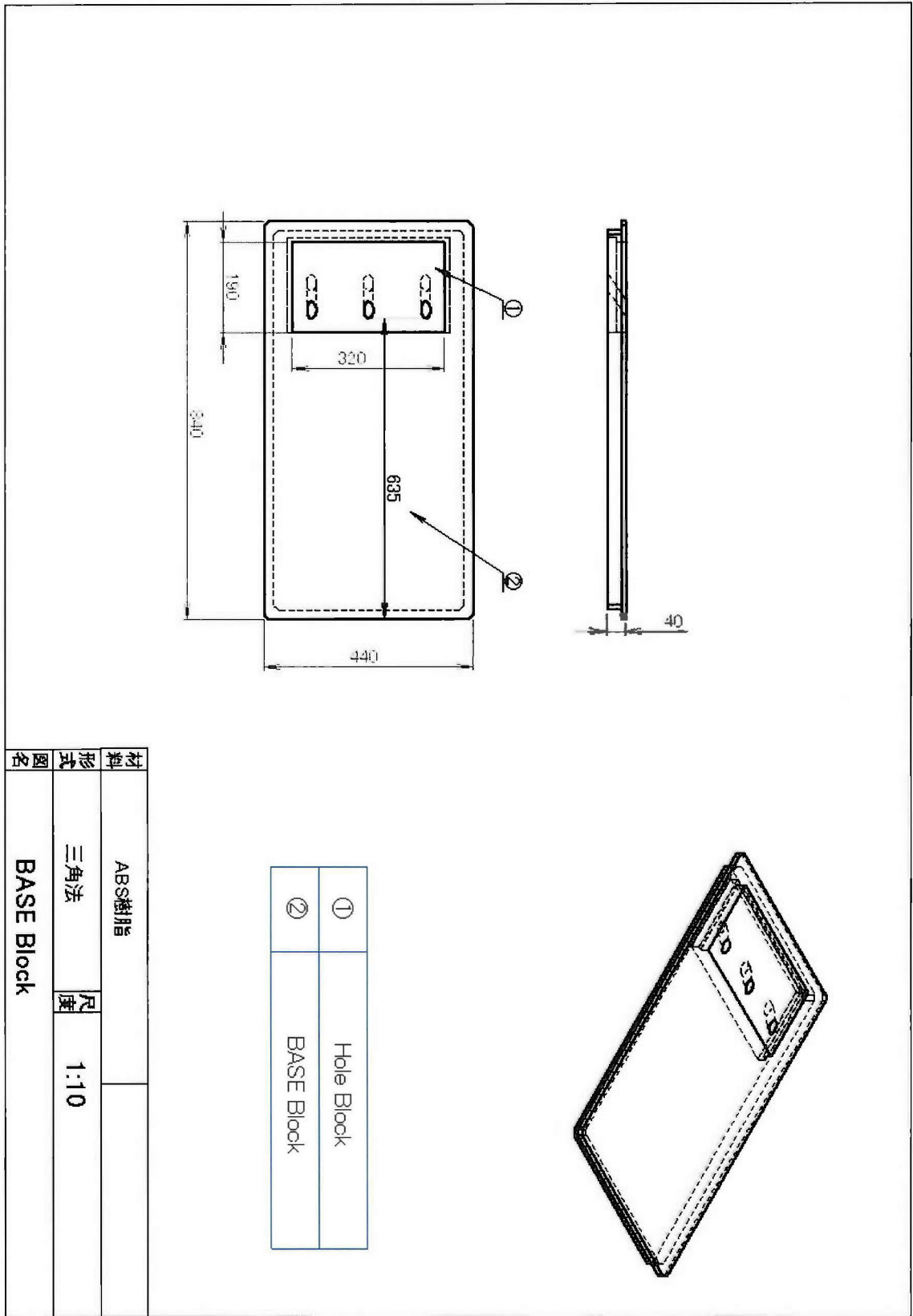
尺度	1:50	図名	実験装置 I 風洞
----	------	----	-----------

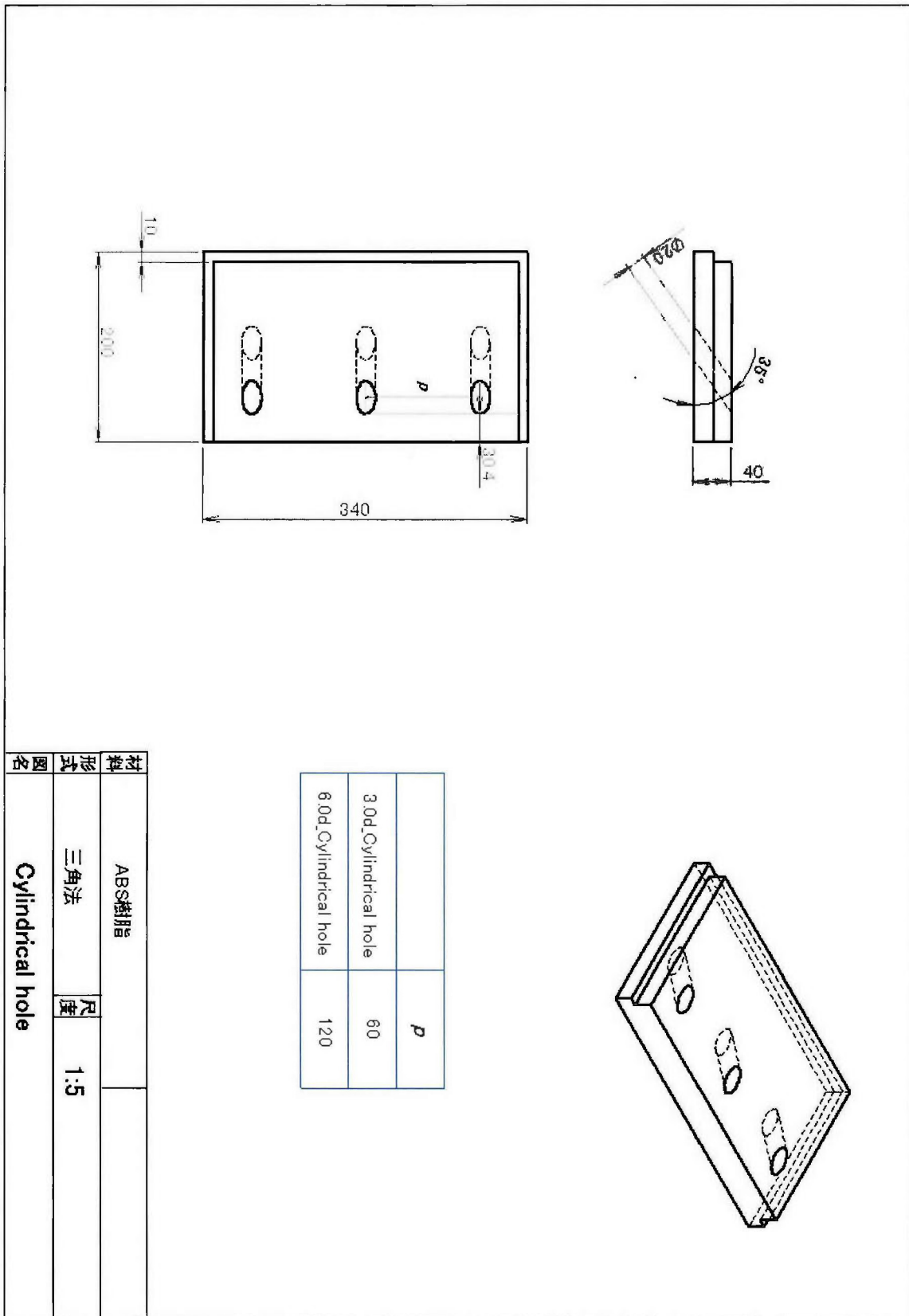


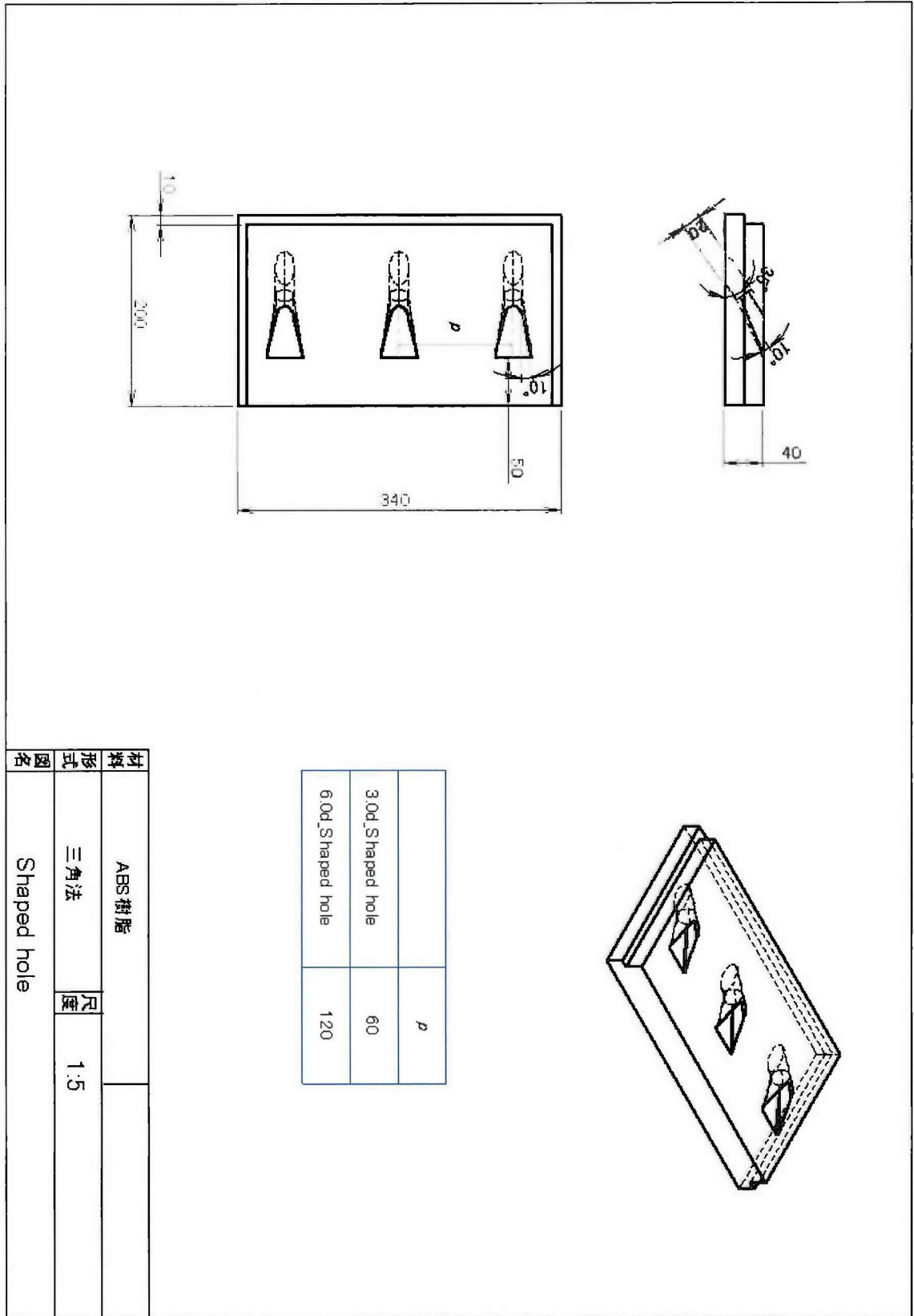


尺 寸	1:100
図 名	実験装置Ⅱ風洞











## 2.3 計測手法

### 2.3.1 概要

フィルム冷却を取り扱った研究では主にフィルム冷却効率や熱伝達率を計測することにより、モデル壁面への熱負荷を中心に伝熱特性を取り扱う研究が多い。しかし、壁面への熱負荷を支配しているものはモデル周辺の流れ場であり、フィルム冷却の特性を本質的に理解するには伝熱特性だけではなく、空力特性についても解明する必要がある。以上のような事実が有りながらも過去の研究において、伝熱特性のみを取り扱う研究が多いのは、流れ場計測が困難かつ、高コストであることが挙げられる。フィルム冷却の流れ場は非定常かつ、複雑な三次元流れ場であるため単純なL型ピトー管で計測できる流れ場ではない。しかも、熱線のような接触式のプローブを冷却孔の出口に近づけてしまうと、冷却孔周囲の流れ場に変化を及ぼしてしまうことになる。したがって、冷却孔出口周りの流れ場は、理想的には非接触の流れ場計測を行うのが理想である。本研究では、接触式プローブを用いた計測に加えて、LDVを用いた非接触の計測を行うことで、フィルム冷却の流れ場を詳細に計測することを試みている。

### 2.3.2 伝熱特性試験

フィルム冷却の伝熱特性を探るためには、主流と二次空気が存在する流れ場において壁面の温度測定を行い、フィルム効率、熱伝達率そして最終的には熱流束低減率を計算することが求められる。フィルム冷却の伝熱特性計測に関しては、O'Dowdら<sup>(8)</sup>の研究の中で計測手法の種類や、その精度が論じられている。壁面の断熱壁温度と、熱伝達率を同時に算出する方法には、壁面の熱流束と、温度の履歴を取得し、その傾きから熱伝達率を算出する方法<sup>(9)</sup>が1つには存在するが、カーブの傾きの精度が不明確であるため、この手法は採用していない。そこで、基本的に本研究ではEkkadら<sup>(10)</sup>用いている過渡応答法を用いることで、断熱壁温度と熱伝達率を同時に算出した。断熱壁面温度のみを算出する方法には、Pressure Sensitive Paint (PSP)を用いる手法<sup>(11)</sup>、熱伝達率のみを求める方法にはナフタレン昇華法<sup>(12)</sup>も存在するが、本研究で採用した手法では一度に断熱壁温度と、熱伝達率を算出できるメリットがある。

また、以上の試験を実施することでフィルム冷却の“伝熱性能”を評価することは可能であるが、さらに詳細な伝熱特性を探るために、本研究では流れ場内の空間の温度場を計測することとした。これにより、二次空気温度場の挙動を明らかにすることや、CFD結果との比較を壁面温度特性データよりもさらに詳細に行うことを可能にした。

#### 2.3.2.1 過渡応答法

##### (1) 熱伝達率、フィルム効率の算出方程式

供試体表面における熱伝達率とフィルム効率は、表面温度の時間的変化と温度上昇を利

用する、過渡応答法を用いて求める。過渡応答法のメリットは、測定時間が非常に短いため、測定する個所は周りの熱伝導の影響を受けず一次元半無限固体の逆解析に従うために熱伝達率の測定精度が高いことが挙げられる。また、気流の持続時間が短いため供試体としては耐熱性をあまり必要としない利点がある。先に述べたように、PSPを利用した伝熱計測手法も近年では提案されているが、過渡応答法よりも熱伝導の影響を供試体が受けないメリットがある一方で、熱伝達率は計測することができない。

初期状態において半無限物体及び半無限物体に接触する主流が一様温度  $T_i$  にあり、主流温度がステップ上に  $T_g$  まで上昇した際、物体表面で対流熱伝達が存在し、物体表面伝熱伝導が一次元で行われると仮定すると、物体表面温度  $T_w$  の時間的变化は次式の非定常熱伝導方程式によって与えられる。

$$\theta = \frac{T_w - T_i}{T_\infty - T_i} \quad (2.3.1)$$

$$\theta = 1 - \exp\left[\frac{h^2 t}{\rho c \lambda}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{h\sqrt{t}}{\sqrt{\rho c \lambda}}\right] \quad (2.3.2)$$

- $c$  : 比熱[J/kgK]
- $h$  : 熱伝達率[W/m<sup>2</sup>s]
- $k$  : 計測で取得するデータ数
- $t$  : 時間[s]
- $T_\infty$  : 主流温度[°C]
- $T_i$  : 供試体初期温度[°C]
- $T_w$  : 供試体壁面温度[°C]
- $\theta$  : 無次元温度
- $\rho$  : 密度[kg/m<sup>3</sup>]
- $\lambda$  : 熱伝導率[W/(mK)]
- $\operatorname{erfc}$  : 誤差関数

過渡応答法は通常ステップ上に主流温度  $T_\infty$  が変化する際 (図 2.3.1(a)) の表面温度  $T_w$  に関する一次元理論解を利用するが、実際の温度は滑らかに変化し、正確なステップ上の変化を与えることは困難である (図 2.3.1(b))。

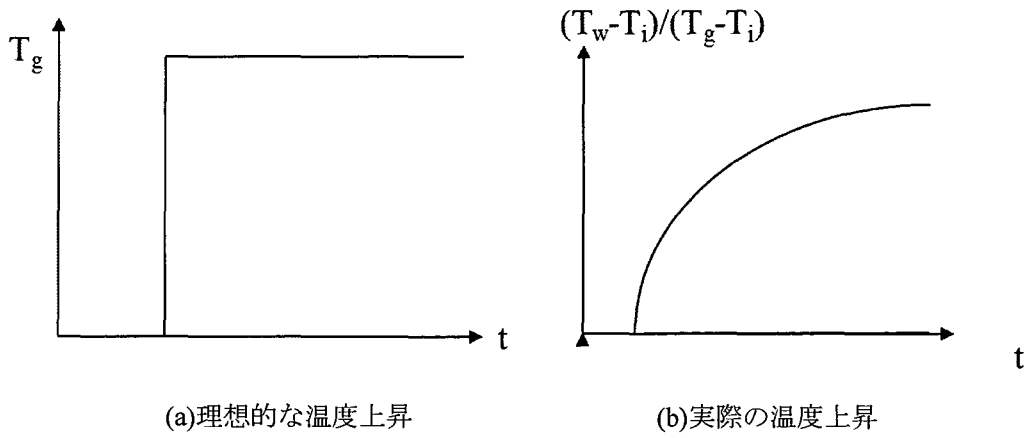


図 2.3.1 実験中の温度上昇

しかし、 $T_\infty$ がステップ上に変化しない場合でも、 $T_\infty$ の変化を階段状の変化で近似し、Duhamelの定理を適用することで、表面温度  $T_w$  を次のように表すことができる (図 2.3.2)。

$$T_w(t) - T_i = \sum_{j=1}^N U(t - \tau_j) (T_{\infty,j} - T_{\infty,j-1}) \quad (2.3.3)$$

$$U(t - \tau_j) = 1 - \exp(\beta) \operatorname{erfc}(\beta) \quad (2.3.4)$$

$$\beta = \frac{h\sqrt{t - \tau_j}}{\sqrt{\rho c \lambda}} \quad (2.3.5)$$

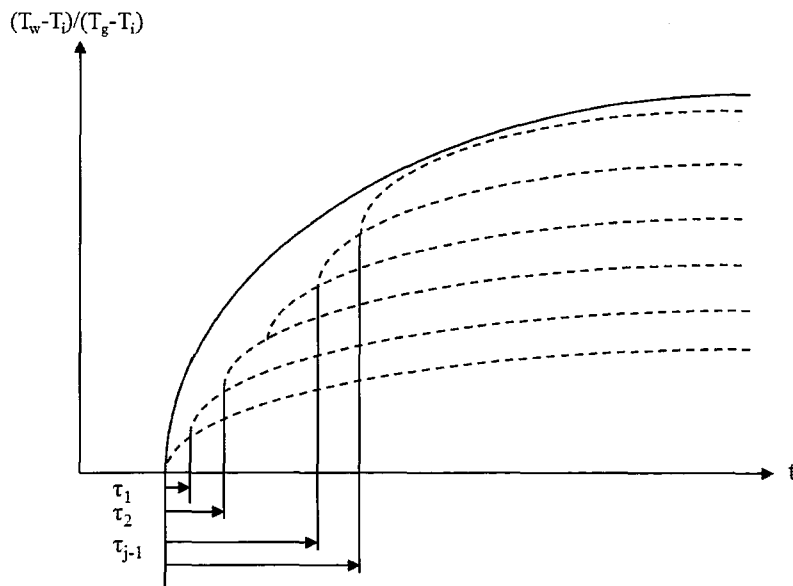


図 2.3.2 壁面温度の上昇

$\tau_j$  は  $T_\infty$  の時間的変化を一連のステップ変化で表すための時間遅れを表している。

フィルム冷却が存在する場合、フィルム効率  $\eta$  の算出式を以上の式と組み合わせることで、フィルム効率と熱伝達率を同時に求めることが可能になる。これは、1回の計測で壁面温度、二次空気温度の時系列データを取得することにより、フィルム効率と熱伝達率を同時に求められることを意味しており、フィルム効率と熱伝達率を別々の計測データから求めるよりも計測自体の時間を短縮できることを意味している。

フィルム冷却が存在する場合、式中の  $T_w$  を断熱壁温度  $T_{aw}$  に置き換える。フィルム効率  $\eta$  を

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (2.3.6)$$

と定義し、同じ実験で  $\eta$  と  $T_\infty$  が一定であると仮定すると式(2.3.6)を変形することで次式を得る。

$$T_{aw} = \eta T_2 + (1 - \eta) T_\infty \quad (2.3.7)$$

この関係が、小ステップに分解した場合も成立すると仮定すると、 $T_x$  以外は小ステップに分解することができるので式(2.3.7)は以下のように表すことができる。

$$T_{aw,j} = \eta T_{2,j} + (1 - \eta) T_\infty \quad (2.3.8)$$

$\eta$  と  $T_\infty$  は一定であることから、 $j$  回目の関係式から  $j-1$  回目の関係式の差を求めることで、

$$T_{aw,j} - T_{aw,j-1} = \eta(T_{2,j} - T_{2,j-1}) \quad (2.3.9)$$

を得ることができる。従って、(2.3.3)式を適用することが可能になり、以下の式を得る。

$$T_{aw}(t) - T_i = \eta \sum_{j=1}^N U(t - \tau_j)(T_{2,j} - T_{2,j-1}) \quad (2.3.10)$$

ある2つの時間  $t=t_a$ ,  $t=t_b$  における式(2.3.10)を求め、互いに除することで、

$$\frac{T_{aw}(t_a) - T_i}{T_{aw}(t_b) - T_i} = \frac{\sum_{j=1}^N U(t_a - \tau_j)(T_{2,j} - T_{2,j-1})}{\sum_{j=1}^N U(t_b - \tau_j)(T_{2,j} - T_{2,j-1})} \quad (2.3.11)$$

を得ることができる。この時フィルム効率は、 $t=t_a$ 、算出された熱伝達率を用いて以下のように表すことができる。

$$\eta = \frac{T_w(t_a) - T_i}{\sum_{j=1}^N U(t_a - \tau_j)(T_{2,j} - T_{2,j-1})} \quad (2.3.12)$$

以上の式(2.3.11)、(2.3.12)では未知数である  $\eta$  と  $h$  を求めるために、2つの状態( $t=t_a$ ,  $t=t_b$ )を用いて非線形方程式を形成している。この非線形方程式を解くために本研究では数値計算

手法の中でも逐次解法を用いている。計測中には複数の時間においてデータを取得することができるが、方程式中の  $t=t_a$  の状態は固定することとしている。そして  $t=t_{b,k}$  の値を時々刻々変化する温度データを  $k$  回方程式に入れることで  $h_k$  の値を複数回得ることができる。最終的に算出される熱伝達率  $h_{final}$  は  $h_k$  の平均値を用いることとなる。従って、有効な  $k$  回のデータを取得した場合に、“計測結果”として表されるフィルム効率  $\eta_{final}$  と熱伝達率  $h_{final}$  は以下の式で表される。

$$h_{final} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k h_k \quad (2.3.13)$$

$$\eta_{final} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k \eta_k \quad (2.3.14)$$

ここで述べている“有効なデータ”とは  $t=t_a, t=t_b$  においてそれぞれの断熱壁面温度  $T_a, T_b$  が、 $T_a < T_b$  となった時のデータのことである。

本研究では以上の方程式を解くことによりフィルム効率と熱伝達率を算出することができるが、計測装置の関係上フィルム効率がゼロの領域が存在し、この領域では壁面温度のデータを取得することができない。従って、この個所に関してはフィルム効率、熱伝達率ともに算出を行わないこととした。

## (2) 計測時間の決定方法

本研究では、供試体は半無限物体であるという仮定を行っているが、実際の供試体の厚さは有限である。従って、上記の方程式を満たすことのできる計測時間を検討する必要がある。本研究では計測壁面が熱伝導により計測平面の向こう側からの温度の影響を受ける時間を計測の限界として計測時間を決定することとした。そのために以下の式(2.3.15)で表される温度浸透厚さ  $\delta(t)[m]$  が供試体の厚さよりも小さい必要がある。

$$\delta(t) = \sqrt{12at} \quad (2.3.15)$$

このとき  $a$  は温度拡散率を表しており、

$$a = \frac{k}{\rho c} \quad (2.3.16)$$

で表す。

本研究の場合、供試体の厚さ（最大厚み）は 40.0mm であり、供試体の物性値を参考にすると  $k=0.181[W/(mk)]$ ,  $\rho=1230[kg/m^3]$ ,  $c=1080[J/(KgK)]$  を代入することができるので、 $\delta(t)=40.0mm$  に達するのは  $t=980[s]$  となる。したがって、半無限物体の仮定を行いつつ計測の後処理を行うために、計測の後処理には計測時間 2 分間のデータのみを用いることとした。ただし、冷却孔近傍の領域に関しては比較的早い温度浸透時間となるため注意が必要である。

### 2.3.2.2 定常法による壁面フィルム効率の算出

フィルム冷却効率 $\eta$ は以下の式(2.3.6)で定義することができた。熱伝達率の測定には時間のデータを取得する必要があるが、フィルム効率のみを求める場合は時間のデータは必要がない。従って、周流と二次空気を流し、定常状態に達した時点での壁面温度を測定すればフィルム効率のみを求めることができる。ただし、定常法による壁面フィルム効率を測定する場合には供試体壁面温度が熱伝導の影響を受けるのを最小限に抑える必要があるため、供試体の材料は低熱伝導率材料を選択する必要がある。O'Dowdら<sup>(8)</sup>は定常法と非定常法による熱伝達率の計測手法を比較しているが、この中でも比較的計測精度が良いとされる定常法によるフィルム効率算出方法を(一部の章で)本研究では実施することとした。ただし、定常法のフィルム効率算出精度は非定常法に比べると計測の不確かさは高くなるのが現状となっている。

### 2.3.2.3 壁面温度測定法～赤外線カメラを利用した過渡応答法～

#### (1) 赤外線サーモグラフィ

本研究では、壁面温度の計測に赤外線カメラを用いている。赤外線サーモグラフィは、物体から放射されている赤外線放射エネルギーを検出し、見かけの温度に変換して温度分布を画像表示する装置、あるいはその方法のことを指している。フィルム冷却の温度場計測においては、計測コストが安いことから感温液晶を用いた研究が多く行われてきた。一方で、感温液晶は計測することのできる温度域が制限されてしまうことや、液晶の劣化、本研究においては液晶の厚みを測定することができない等のデメリットが存在する。また、Temperature Sensitive Paint (TSP)による計測手法に関しては、計測温度のレンジが広い一方で、励起光の当てムラやペイントの厚みの影響、TSP自体の劣化の影響を受けるため、計測のプロセスが難しい。一方で、赤外線サーモグラフィは装置自体が高価であるが以下の利点を持っており、フィルム冷却の温度場計測に用いられる例が増えてきている。

- ・ 広い温度レンジでの温度場計測が可能になっている
  - ・ 同じ環境での温度場計測が行い易い
  - ・ 近年では計測ソフトも充実しており、画像から温度データを得ることが容易になった
- 本研究で用いた赤外線カメラは以下の表に示す。

表 2.3.1 赤外線カメラ仕様

イメージ	
	
型式	H2640
製造元	NEC Avio
温度レンジ	-20[°C]~60[°C], -40[°C]~120[°C], 0[°C]~500[°C]
測定波長	8~13 [μm]
最少検知温度差	0.06[°C]以下
測定精度	±2%または±2°C いずれか大きい方
視野角	水平 21.7°×垂直 16.4° (広角レンズにより計測時は視野角が 2 倍となる)

## (2) 赤外線透過ガラス

本計測で使用している赤外線カメラは市販のものであり、計測ソフトウェアも充実していることから壁面の温度測定自体は容易に行うことができる。しかし、本研究のような流体の流れ場を伴っている温度場を赤外線で捉えるためには注意が必要である。

本研究ではアクリルでテストセクションダクトを作ること、流体の流れる流路を製作しているがアクリルの外から赤外線カメラで供試体の撮影を行おうとしてもアクリルは赤外線を通さない材料であるために供試体壁面の温度場を撮影することは不可能である。従って、テストセクションダクトには赤外線を透過させるための計測窓を設ける必要がある。本研究で用いた赤外線カメラの測定波長は、先に示したように 8~13μm であり、この波長域の赤外線透過率が高いことが透過ガラスには求められる。赤外線を透過させる材料は複数存在するが以下のようなメリットとデメリットを生じる<sup>(13)</sup>。

・セレン化亜鉛（ジंकセレン，ZnSe）：図 2.3.3

セレン化亜鉛は淡黄色の固体で、真性半導体でもある。セレン化亜鉛は、温度による放射率のずれは少なく、反射防止コーティングを施さない状態でも 70%を超える高い赤外線透過率を得られる素材である。また、反射防止コーティングを施すことで 100%近い赤外線透過率を得ることが可能である。固体材料であるために後述するポリエチレンフィルムよりは計測窓の材料に適している。従って、本研究ではセレン化亜鉛を計測に採用することとした。セレン化亜鉛は酸と反応すると、有毒ガスであるセレン化水素を発生するために透過ガラスの取り扱いには細心の注意を払う必要がある。本研究では図 2.3.5 のように、テストセクションダクトの側面にセレン化亜鉛の計測窓を取り付けて計測を行った。赤外線透過ガラスの仕様は以下の表 2.3.2 に示す。本研究で用いた赤外線透過ガラスは、赤外線の透過率を高めるために AR コートを付与した透過ガラスを用いている。

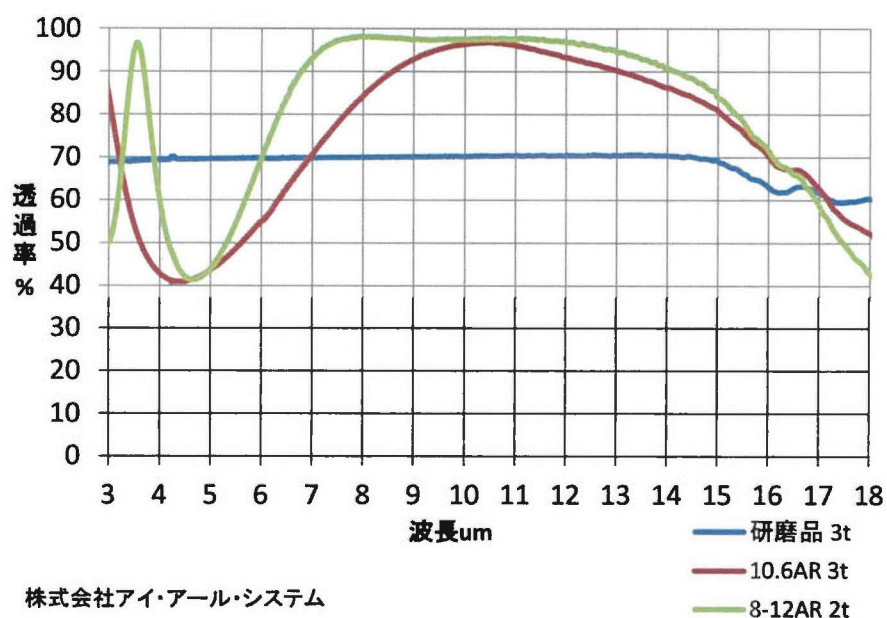


図 2.3.3 セレン化亜鉛の赤外線透過率

・ゲルマニウム：図 2.3.4

赤外線の吸収が少なく、コーティング無しで 50%程度の赤外線透過率だが、コーティングを施すことで 90%に近い赤外線透過率を得ることが可能である。比較的過去の研究でも赤外線透過ガラスとしての採用が多く、有用な素材であるといえる。



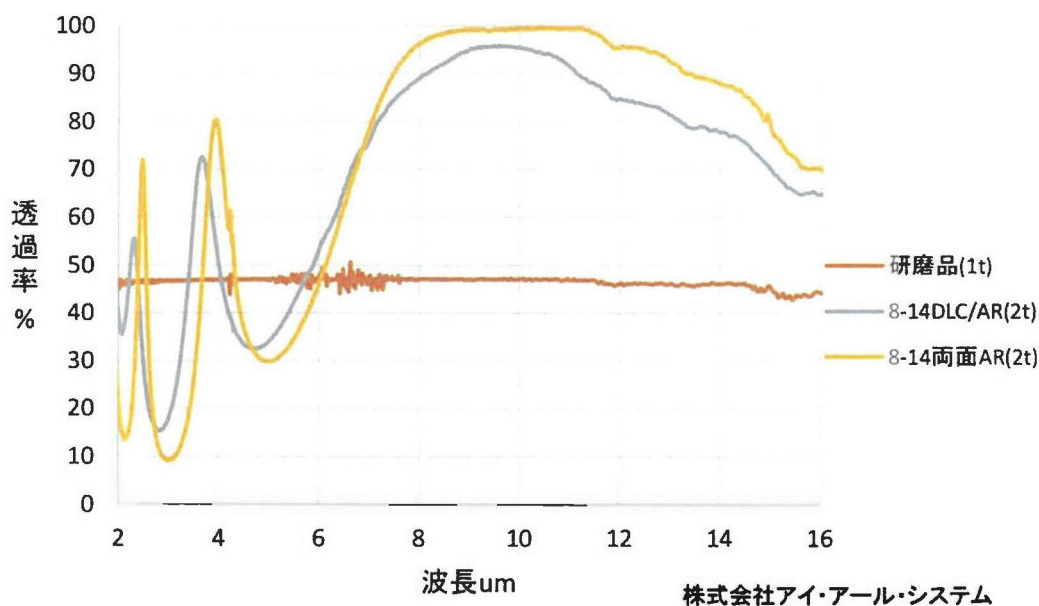


図 2.3.4 ゲルマニウムの赤外線透過率

#### ・ポリエチレンフィルム

ポリエチレンは身近なものではラップや、ごみ袋に使用される非常に安価な材料であり赤外線を透過する材料としては最も安価であるといえる。流体の流れない温度場を撮影する場合には、低コストで計測窓を製作することができると考えられるが、本研究のような流れを伴うような場所の計測窓としては、風による揺れが発生するために透過窓としてはあまりふさわしくない。

#### ・塩化ナトリウム

塩化ナトリウムはある程度の高度があり、安価な赤外線透過素材である。しかし、潮解性があるため、季節によっては計測に不向きな側面もある。

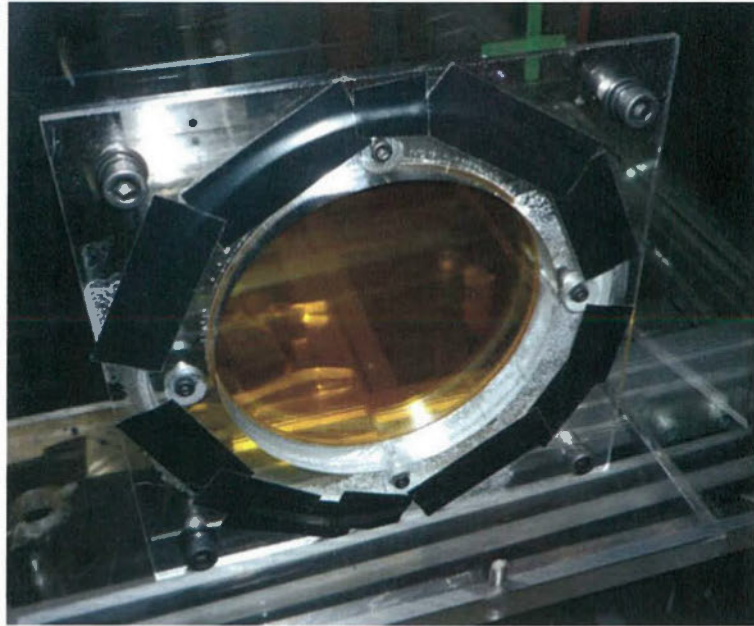
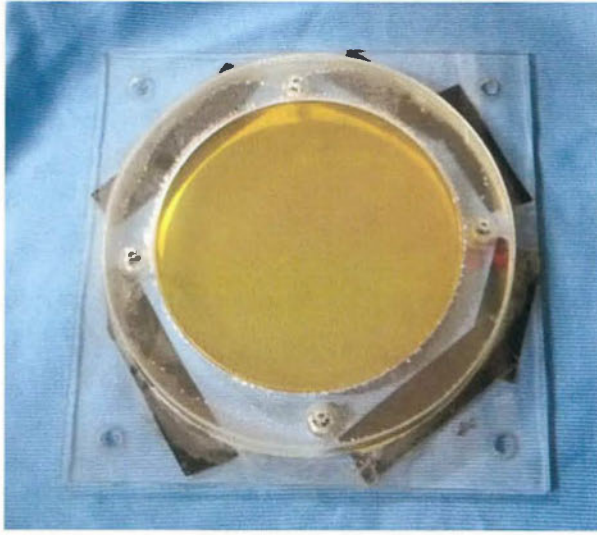


図 2.3.5 赤外線透過ガラス : 実験装置への取り付け方法

表 2.3.2 赤外線透過ガラス仕様

イメージ	
	
材質	セレン化亜鉛
直径	φ140[mm]
厚さ	4[mm]

### (3) 温度較正

赤外線カメラは供試体表面から放射される放射エネルギーを捉えることで温度場の撮影を可能にしているが、計測環境においては供試体表面から放射される放射エネルギーのみを捉えるとは限らない。以下の図 2.3.6 に示しているのは計測環境の外観図である。供試体表面は温度変化により赤外線放射エネルギーを放射する（赤の矢印）が、赤外線透過ガラスを通過することでそのエネルギーは減衰することになる（①の矢印）。また、テストモデルは周囲の環境から放射エネルギーを反射しているため環境反射エネルギー（緑の矢印）を赤外線カメラは捉えてしまうことになる。この環境反射エネルギーも赤外線透過ガラスで減衰を起こす（③の矢印）。さらに、透過ガラス自体も温度場を形成しているため赤外線放射エネルギーを放射する（②の矢印）。最後に、赤外線透過ガラスは周囲の放射エネルギーを反射するために、ここでも環境反射エネルギーを生じる（④の矢印）。

以上のことから、赤外線カメラでテストモデルの温度場を計測用としてもほかの放射エネルギーの影響を受けてしまうため、赤外線カメラを使用する際には温度較正が必要となる。理想的には、理論式を用いて外部環境からの放射エネルギーを計算によって求めればよいが、本研究では簡単に温度較正を行うために、外部環境によって何らかの温度較正係数が生じると考えて、複雑な計算による温度補正は行わないこととした。

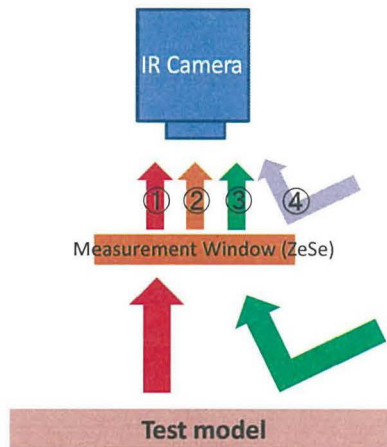


図 2.3.6 赤外線サーモグラフィの外観図

温度較正を行う際は、赤外線カメラで計測される温度を  $T_{IR}$ 、真の温度を  $T_{real}$  と定めた時、この 2 つの温度の関係は補正係数  $C_i$  を用いて以下の式で表されるものと仮定する。

$$T_{real} = C_i T_{IR} \quad (2.3.17)$$

ここで、温度較正係数に添え字  $i$  を用いたのは、温度較正係数は供試体温度によって変化を起こすためである。図 2.3.7 には予備の実験中に得られた実際の温度較正曲線を示す。温度較正曲線は線形の近似曲線を示しており、上記の関係式を用いることで十分温度較正が可

能であることが分かる。温度較正曲線は予め行った調査によって、線形になることが分かっているため温度較正曲線を作るためのデータは5点程度実験終了時に取得した。

次に較正の手順であるが、温度較正を行う際には上記の関係式を作成するために複数点の温度変化を発生させ、その様子をモニタリングする必要がある。しかし、温度変化を発生させる場合には、時々刻々と温度は変化を起こすために時間による較正誤差が発生することになる。そこで、本研究では、時間による誤差が発生しないように極力ゆっくりとした温度変化を起こすことで、較正誤差を最小限にするように配慮している。そこで、温度較正は以下の手順で行った。

- (1) 伝熱試験終了後、黒色塗料（供試体に塗布したものと同一もの）を塗布したステンレスボックスに熱湯を入れる。
- (2) ステンレスボックスに熱電対、その上から黒色塗料を塗布した銅箔テープを張り付ける。この熱電対で計測している温度が  $T_{real}$  に相当する。
- (3) ステンレスボックスを供試体の前に持つてくる。この際主流は流したままにする。
- (4) ステンレスボックスを赤外線カメラで撮影し、熱電対の位置の壁面温度を赤外線カメラで取得する。ここで取得する温度が  $T_{IR}$  である。
- (5) 熱湯はゆっくり時間をかけて温度低下を起こすため、この温度低下の様子を数点モニタリングすることで2つの温度の関係式を求める。

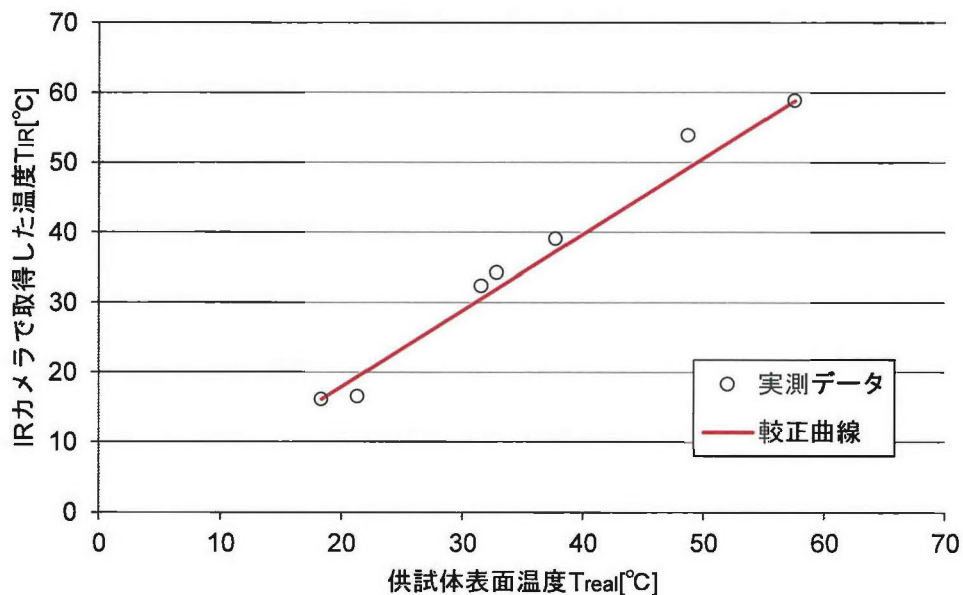


図 2.3.7 温度較正曲線（赤外線カメラによる計測）

#### (4) 計測環境

テストセクションの外観図を図 2.3.8 へ示す。赤外線カメラは平板モデル正面位置に設置した。赤外線透過ガラスは赤外線カメラの視野と重なるように設置しており、テストセクションダクトのミッドスパンの位置に設置し供試体中央での温度場計測が可能になっている。

赤外線透過ガラスは加工の関係上四角形にすることが困難であったため、円形のガラスとなっておりテストセクションダクトには固定アタッチメントとともに取り付ける形となっている。赤外線カメラはデフォルトの状態では視野が狭く、供試体全体を撮影するには大型の赤外線透過ガラスが必要となってしまう。そこで、本研究では赤外線カメラ2倍広角レンズを取り付けることにより視野を2倍の角度とし、赤外線透過ガラスの大きさが小さめになるようにした（コスト削減のため）。

温度計測は、主流と二次空気の温度を計測する必要があるが、主流は入口ピトー管位置、二次空気は冷却孔内部で計測を行った。冷却孔内部に熱電対を設置する場合は図2.3.9のように、冷却孔の中央部分に熱電対を折り曲げる形にし、粘着テープで固定する。ここで、冷却孔の出口付近に熱電対を設置しないのは、主流が冷却孔内部に入り込んでくる場合も考えられ、この場合は二次空気温度が低くなってしまい、熱伝達率が解析時に過大評価されるのを防ぐためである。

赤外線カメラとデータロガーの制御は異なる計測パソコンを用いている。これは、赤外線カメラは高いフレームレートで計測を行うために、パソコンへの負担が大きい。そのため、赤外線カメラとデータロガーを同じパソコンで制御してしまうと、赤外線カメラでの撮影処理が円滑に行われない場合があるためである。

二次空気の温度制御は各実験装置に備え付けてあるスライダックを用いて行っており、これは手動で操作する。この時の温度のモニタリングは常にデータロガーで行っており、三方バルブの直前の配管内に設置した熱電対を用いている。

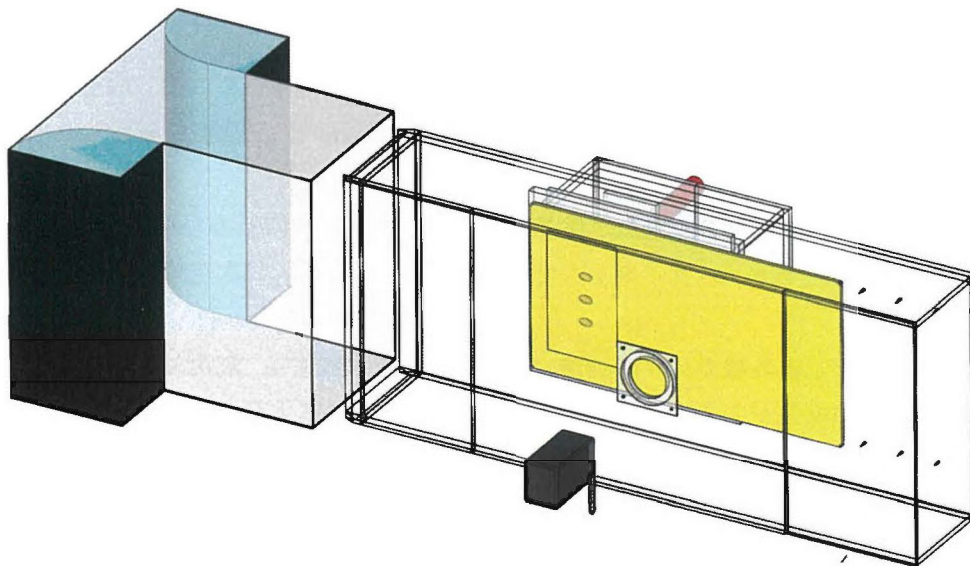


図 2.3.8 赤外線カメラ計測テストセクション

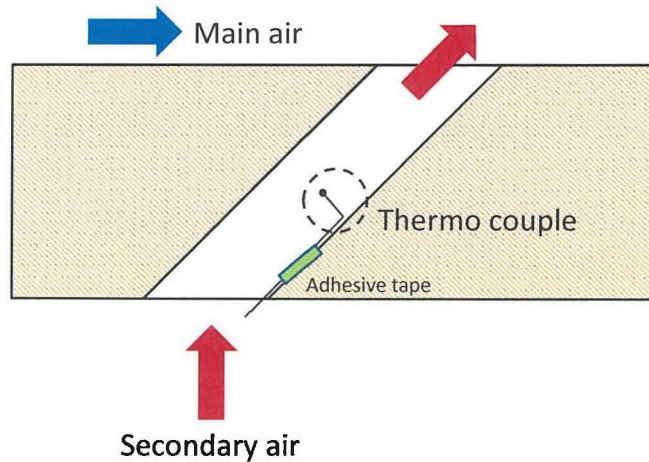


図 2.3.9 熱電対設置位置

### (5) 計測手順

以下に温度計測の手順を示す。感温液晶を用いた過渡応答法とほぼ同じ実験の手順であるが、赤外線カメラを用いた温度測定では周囲の環境によって温度校正曲線が変化することが考えられるため、実験を1回行うたびに温度校正の操作を含むこととした。

- (1) 圧力変換器 (Setra) ゼロ点補正を行い、主流送風機と二次空気送風機の電源を入れ、暖気を開始する。計測の1時間前を目安とするが、冬季は実験室内の気温も低いので必要に応じて暖気時間を長くとり、主流の温度を安定させる。二次空気は供試体内に入れないように、三方バルブを切り替えておく。
- (2) 計測機器、作動流体の暖気を終えたところで所定の主流レイノルズ数に合わせるためにミニチュアピトー管で取得している動圧を調整する。
- (3) その後、三方バルブを切り替え、二次空気を供試体内に流す。ここで二次空気を所定の条件に合わせるため流量の調整を行う。これは、供試体内に二次空気を流した場合は圧力損失が生じるためである。
- (4) 試験条件設定後、再び二次空気が供試体内に入らないように三方バルブを切り替え、ヒーターの電源を入れ、スライダックで電圧を調整しながら、二次空気の温度を所定の値に調整する。
- (5) 赤外線カメラ、赤外線カメラの制御ソフトウェアを起動する。熱電対を供試体壁面へ貼り付け、その様子を赤外線カメラにより撮影する。これにより温度校正曲線用のデータを1点だけ取得することになる。
- (6) 三方ボールバルブを切り替え、供試体へ二次空気を送り込む。壁面温度が変化する様子を撮影する。撮影時間は3分とする。同時に二次空気の温度も測定を行う。
- (7) 壁面の温度がある程度高い領域 (フィルムが付着している領域) に熱電対を取り付け、熱電対の温度を記録する。その様子を赤外線カメラで撮影する。この操作は複数回行う (温度校正曲線を作成するため)。

## (6) データ処理

本節では、過渡応答法におけるデータ処理方法の説明を行う。赤外線カメラを使用する際には感温液晶を使用する場合と異なっている。

### (1) 画像の切り出し

過渡応答法を行う場合には、時間と壁面温度のデータが必要となるが、時間のデータと壁面温度のデータは異なる計測機器から取得することとなる。データを処理する場合には最初に赤外線カメラレポート作成プログラムを用いて壁面温度を時系列に取得する。時系列に取得したデータはソフトウェアの関係上 Microsoft Excel 形式でエクスポートされる。感温液晶の計測においては発色する温度域が限定されるために温度のレンジが制限を受けてしまうが、赤外線カメラでの温度計測を行う場合には温度域の制限を行わずに壁面温度データを処理することとした。

### (2) 温度データの較正

赤外線カメラレポート作成プログラムでエクスポートされた温度データは較正が行われていない状態となっている。取得した温度データは温度較正のデータベースを基にし、温度較正される。

### (3) 温度と時間のデータを組み合わせる

データロガーでは時間のデータを取得しているため、温度のデータとその温度データを取得した時間のデータを組み合わせることで、時間と温度のデータを一体にしたファイルを作成する。

### (4) 二次空気温度上昇データ取得

過渡応答法でフィルム効率と熱伝達率を算出するには、時間と壁面温度のデータセットに加えて、二次空気の温度上昇データを取得する必要がある(式(2.3.12)の分母)。計測中に取得した二次空気温度のデータは時間のデータとともに近似関数を用いて、取得できるようにデータ整理を行う。

### (5) 熱伝達率・フィルム効率の計算

過渡応答法のプログラムに壁面と二次空気の温度と時間のデータセットとを入力することにより、フィルム効率と熱伝達率を算出する。

### (6) エラーデータの削除

本研究で用いている過渡応答法の理論式では、二次空気の温度上昇を表現する項を含ん

### (1) 楕形熱電対

壁面法線方向の空間内で温度場を計測するには、単純に考えると 1 本の熱電対をトラバース装置を用いて壁面法線方向内でトラバースさせ、温度を計測すればよい。しかし、壁面法線方向内の空間をより高い解像度で計測しようとする、1 本の熱電対をトラバースさせるだけでは莫大な計測時間を要することとなる。従って、本研究では楕形に熱電対を設置することで複数点同時に温度場を計測することを試みた。ここで、熱電対を楕形にするのは、フィルム冷却の流れ場をブロックエッジの効果などにより変化させるのを防止するためである。図 2.3.11 には、本研究で使用した楕形熱電対を示す。楕部は直径 0.5mm ステンレス製の針によって構成されており、この針を 5mm 間隔で 20 本並べ、根元の直径 3mm のアルミニウム管 2 本に固定している。根元のアルミニウムは管状のものを使用することで、流れが乱れるのを防いでいる。熱電対はこれも流れ場を変化させることを防ぐ目的であるが、直径 1mm、素線径 0.1mm の極細 K 型熱電対を使用しており、ステンレス針に固定している。ステンレス針への固定は、針の根元部にはビニルチューブを用い、針の先端には熱収縮チューブを用い、チューブを熱収縮させることでステンレス針への強い固定を実現した。プローブ全体では 20 本のステンレス針が取り付けられているが、実際は中央の 16 本のみ熱電対を設置している。これは、プローブの両端の針に張り付けた熱電対に関しては、針同士が形成させる流れ場の影響をほかの熱電対とは違い受けたくないために、計測条件がわずかに異なるためである。従って、プローブの端から 2 本目までの熱電対（両サイドで合計 4 本）のステンレス針は一種のダミープローブのようにして機能することになる。

ステンレスの熱伝導率は SUS304 で  $16.7[\text{W}/(\text{mK})]$  であり、決して低い値とは言えない。計測中はステンレスによる熱伝導の影響で周囲の温度場が変化してしまう可能性があるが、今回は特に対策を行うことができなかつたため、計測結果にはわずかに熱伝導の影響が生じている可能性がある。また、熱電対の温接点同士の間隔も正確には 5mm とは言えず、 $\pm 1\text{mm}$  程度の誤差が生じている。しかし、 $\pm 1\text{mm}$  程度の誤差では計測する温度場に変化は生じないことがあらかじめ行った予備試験で明らかになっており、本計測では温接点同士の位置決め誤差が計測結果に与える影響はほとんど問題が無いものと考えた。



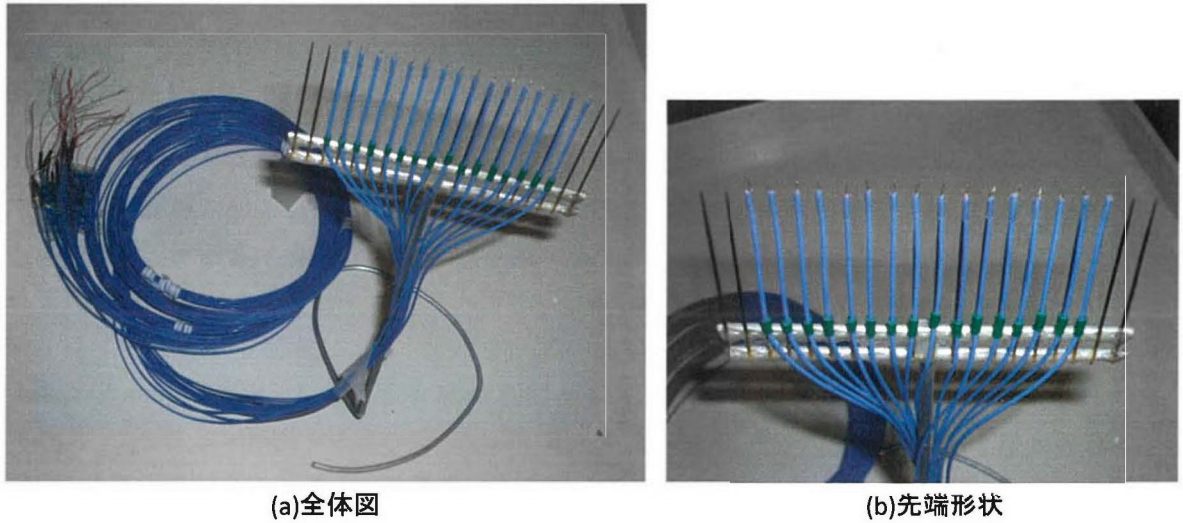


図 2.3.11 楕形熱電対

(2) 計測環境

平板モデル周りの温度場を計測するには図 2.3.12 のようなテストセクションダクトと計測装置を用いる。主流と二次空気の温度測定方法は 3.2.5 と同じである。楕形熱電対は供試体に対して垂直にプローブサポーターを挿入し、先端のみを曲げることで供試体に対して 30°の角度で楕形熱電対を最接近させることとした。このセッティングは実験装置 I, II 共通であり、異なる点はトラバース装置の駆動方法だけである。

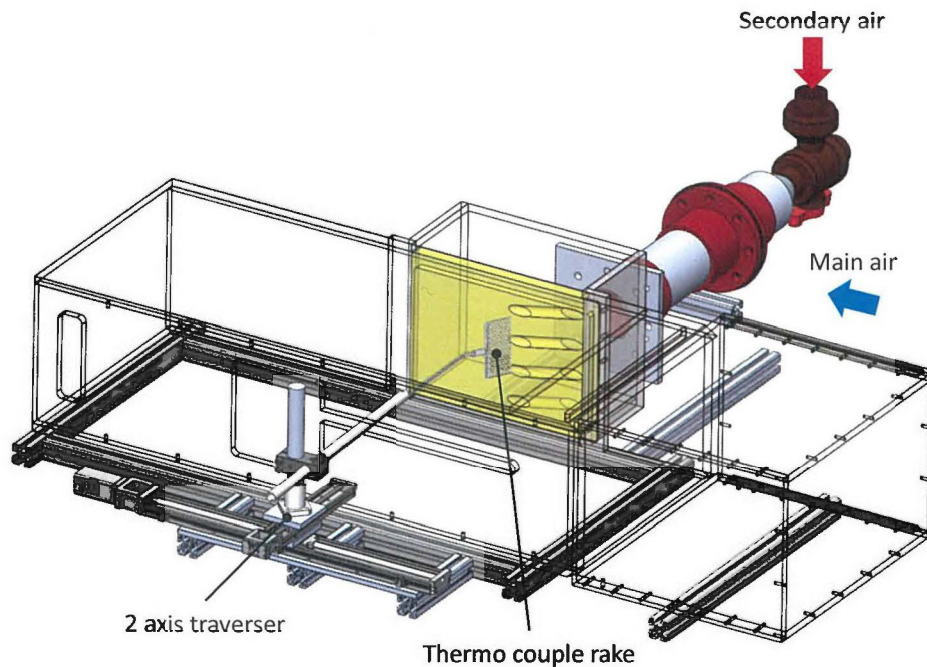


図 2.3.12 平板モデル楕形熱電対計測

### (3) 計測手順

以下に温度計測の手順を示す。

- (1) 圧力変換器 (Setra) ゼロ点補正を行い、主流送風機と二次空気送風機の電源を入れ、暖気を開始する。計測の1時間前を目安とするが、冬季は実験室内の気温も低いので必要に応じて暖気時間を長くとり、主流の温度を安定させる。また、二次空気も供試体へ流入させる。
- (2) 計測機器、作動流体の暖気を終えたところで所定の主流レイノルズ数に合わせるためにミニチュアピトー管で取得している動圧を調整する。二次空気は層流流量計の差圧を読み取り、流量を算出した後、既定の噴き出し比に合わせる。この時点で、楕形熱電対を計測開始点位置に合わせておく。
- (3) 主流と二次空気の温度差を生み出すために、二次空気を加熱する。本研究では二次空気を  $80^{\circ}\text{C}$  程度まで加熱し、密度比  $DR=\rho_2/\rho_m=0.85$  となるように二次空気温度をセッティングした。二次空気温度の上昇に伴い二次空気の密度は変化を起こす。従って、この時点で再度二次空気の流量調整を行い所定の噴き出し比に合わせる。
- (4) 計測座標にしたがって温度データの取得、トラバース装置による楕形熱電対の移動を繰り返し行う。この際、二次空気温度の調節はスライダックにより手動で行う必要があるが、ターゲットの温度からの誤差は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ となるようにしている。本研究では、温度データの取得は全点同時計測を行うことはできない(データロガーの性能により)。そのため、各点の温度データ取得の際には時間差が生じることとなる。本研究では1秒以内に楕形熱電対全ての計測点で温度のデータを取得するため時間差としては0.05~0.1秒程度の時間差が生じることとなる。従って、本研究で取得することのできる温度場は定常温度場に限られる。本研究では温度場の非定常な挙動に関してはCFDを用いて検証することとしているため、定常温度場の計測でも特に問題はないと考え、定常温度場の計測を行うこととしている。

計測を行う際の第一点は壁面温度となるが、楕形熱電対を壁面へ寄せる際には計測室を暗室とし、ライトを照らすことで楕形熱電対の影を見ることで楕形熱電対が壁面へ接近している様子を観察することとした。1点の計測には主流、二次空気、空間温度を10回計測することとし、10回の温度の平均のデータを用いることにより空間内の定常温度場を観察することとしている。

### (4) データ処理

本節では、楕形熱電対における定常温度場のデータ処理方法の説明を行う。以下に処理手順を説明する。

- (1) 空間内フィルム効率 (無次元温度) の算出

計測点での空間内フィルム効率（無次元温度）は以下の式を用いることで、各計測点毎に空間内フィルム効率を算出する。

$$\theta = \frac{T_f - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (2.3.18)$$

$T_f$  : 空間内の流体温度  
 $T_\infty$  : 主流温度  
 $T_2$  : 二次空気温度

## (2)結果の可視化

処理結果の可視化には FIELDVIEW12.1(Intelligent Light)を使用した。

### 2.3.3 空力特性試験

ガスタービンの中でもホットセクションと呼ばれる高圧タービンにおいては高い冷却の性能が求められるため、“性能”を評価するうえでは、伝熱特性試験は必要不可欠な試験である。一方で、更なる伝熱性能の向上のためには、流れ場の理解も必要不可欠な要素となっており、近年のガスタービン設計においてはフィルム冷却に伴う流れ場を理解することも求められている。特に、主流中に二次空気を流入させることによるロス<sup>14)</sup>は近年のフィルム冷却に関する研究の重要なトピックとなっている。Dibbon<sup>(14)</sup>らはフィルム冷却を行う際に発生するロス(Profile loss)を以下の2つの主要なメカニズムで説明している。

- ①全圧または温度の異なる主流と二次空気が混合することによる mixing loss
- ②境界層内の運動量損失(kinetic energy loss, wall losses)

本研究では以上のような近年の研究のトレンドを受けて、伝熱特性の解明だけでなく空力特性の解明も行うこととした。本研究では、

- ・伝熱性能を支配している流れ場の理解
- ・フィルム冷却を伴う流れ場の空力損失評価(①の loss について)
- ・CFD 結果との比較（予測精度の検証）

を目標として空力特性試験を行った。本節では以上の目的を達成するために行った空力特性試験についての手法を説明する。

#### 2.3.3.1 熱線計測（主流乱れ度計測）

熱線流速計はセンサの熱放散を利用した流速計であり、流速計自体が小型であるため境界層付近の流速を計測することも可能である。また、応答性が非常に高いために複雑な乱流場の計測にも適している。本研究では主流乱れ度を定義するために、熱線流速計で主流乱れ度を計測している。

### (1) 計測環境

主流乱れ度計測では DANTEC Stream Line を使用する。この CTA は温度補償等をコンピュータで自動的に行う。StreamLine へ温度データを入力するための温度補償プローブはテストセクションダクトの入口部へ固定することとした。熱線は DANTEC 製 I 型熱線プローブ 55P11 を使用し、専用のプローブサポータで熱線を固定する。プローブサポータとトラバース装置の固定はシャフトとシャフトホルダを用いており、ダクトの側面からプローブサポータを挿入する。ダクト側面にはスリットが設けられているため、流れ方向へ数点の位置で主流乱れ度を計測することとした。

### (2) 熱線の較正

StreamLine は較正器を付属していないために、流速の較正作業は計測毎に行う必要がある。加熱された金属に流体が当たるときに奪われる金属線の熱損失から流速が求められるが、StreamLine ではこの際に取得する電圧値を取得することができる。この際、取得した電圧値と別の計測器（本研究の場合は L 型ピトー管）で得られた流速器の関係式を StreamLine に読み込ませることで熱線の較正作業を行うこととした。流速を取得するピトー管は L 型ピトー管で、テストセクションダクト入口から 350mm 下流の位置（よどみ点から 210mm 上流の位置）へ設置した。熱線へ入力する電圧値、流速値は 8 点とし、8 点で取得した電圧値、流速値のデータを基に較正曲線を算出する。StreamLine では、温度補償プローブで取得したデータと、較正曲線のデータを基にして、流速を算出する。

#### 較正の手順

熱線の較正手順を以下に示す。

- (1) 較正のレンジ（最大値）を決めるため、これから計測を行う環境を想定して流速の最大値に主流の流速を合わせる。
- (2) StreamLine を起動、ソフトウェア内で熱線からの信号の有無を確認する。熱線から正しい信号が受信されていることを確認後、ピトー管を用いて温度較正の 1 点目の流速に合わせる（流速の最大値）。
- (3) ピトー管で取得した流速値、現在の主流温度を入力。ピトー管をテストセクションダクトからはずし、ピトー管によって流れ場が変化しないようにする。I 型熱線をピトー管の先端と同じ位置し、その時の電圧値を読み込み。
- (4) 手順 3 を 8 回繰り返す。その際、温度の最少レンジから最大レンジまでを 8 等分した流速で各点の流速と電圧値の関係を Stream Line に入力する。
- (5) 手順 5 で取得したデータを基にして、較正曲線を導き出す（これは StreamLine が自動的に行う）。較正曲線と、取得した 8 点のデータのずれが全て 1%以内であることを確認する。データのずれが 1%以上だった場合は熱線の較正をもう一度行う。

### (3) データ処理

以上の手順を基に、熱線の較正を完了し局所の流速を算出する。得られた局所流速から以下の式を用いて主流乱れ度を算出する。本研究では1回の計測でサンプリング数*i*回で主流乱れ度を求める操作を*j*回繰り返す、平均の主流乱れ度を算出した。

$$\overline{FSTI(j)} = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{\sum_0^{i \max} (u - u_{i,j})^2}{i \max}} \quad (2.3.18)$$

$$\overline{FSTI} = \frac{1}{j \max} \sum_{j=0}^{j \max} \overline{FSTI(j)} \quad (2.3.19)$$

#### 2.3.3.2 全圧損失計測

本研究では“フィルム冷却における空力損失”を定義するために全圧損失の計測を行っている。空力的な観点で損失を評価する方法には複数の方法があるが、評価方法を全圧損失としたのは以下の理由からである。

##### ①実際の計測が行い易いこと

乱流運動エネルギーやエントロピーを空力損失として定義することも可能であるが、乱流運動エネルギーやエントロピーはCFDにおいては定量的な評価を行い易い一方で、実際の計測が行いにくい欠点を持っている。本研究では、実験結果とCFD結果の比較も行うため、実験で取得し難いデータは空力損失として扱いにくい。

##### ②流れ場の変化をロバストに捉えられる量であること

境界層の厚さを空力損失として定義することも可能であるが(wall lossの評価)、境界層厚さの算出には積分のような操作を含むことになる。積分や近似のような操作は、流れ場の変化によって、変化を起こす何らかの空力損失値に操作を加えてしまうので、流れ場の変化をロバストに反映しにくい。従って、定義する空力損失の値は、近似や積分のような操作を行わない量である必要がある。

全圧損失は前節で述べたProfile lossのうちmixing lossのことを指している損失値である。全圧損失係数は、実際の計測においては圧力を計測するだけで求めることのできる量であり計測がしやすいメリットを持っている。さらに、全圧損失の定義方法は後に示すが、近似や積分のような操作を算出過程で伴わないために、流れ場の変化をロバストに反映することのできる量であると考えられる。以上の理由から、本研究では空力損失の評価量として全圧損失を定義することとした。

全圧損失係数の定義方法は、参照点での全圧を基準とし、参照点の基準全圧と計測点での全圧の差を求めることで、損失を定義するものであるが、フィルム冷却の流れ場において考

慮する必要のある参照点の全圧値は、主流に加えて二次空気の全圧である。全圧損失係数の定義方法はいくつか考えられるが、本研究では Abhari らの研究を参考にし、以下の定義式で全圧損失係数  $C_{p,t}$  を定義する。

$$C_{p,t} = \frac{P_{t,ref} - P_t}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (2.3.20)$$

参照点の全圧である  $P_{t,ref}$  は以下の式で定義する。

$$P_{t,ref} = \frac{m_2}{m_2 + m_\infty} P_{t,2} + \frac{m_\infty}{m_2 + m_\infty} P_{t,\infty} \quad (2.3.21)$$

$C_{p,t}$	: 全圧損失係数
$P_{t,ref}$	: 参照全圧
$P_t$	: 計測点での全圧
$m_2$	: 二次空気の質量流量
$m_\infty$	: 主流の質量流量
$P_{t,2}$	: 二次空気の全圧
$P_{t,\infty}$	: 主流全圧
$U_\infty$	: 入口での主流流速 (平均値)

ここで、二次空気の全圧はプレナム内で計測することが困難であったため、二次空気の全圧はプレナムより上流で、三方バルブ直後の位置で計測することとした。主流流速、主流全圧はテストセクションダクトの入口ピトー管の位置で計測した値を用いる。

ただし mixing loss は主流と二次空気が十分にミキシングしきった状態 (mix out) した状態で計測する必要がある<sup>(15)</sup>。

### (1) 全圧損失計測プローブ

本研究で用いた全圧プローブは2種類存在する。本研究では  $3d$  ピッチの冷却孔を有する供試体では、単管の全圧管を用いて全圧損失計測を行ったが、 $6d$  ピッチでの計測では計測点が増えるために楕形の全圧損失プローブを使用して計測を行った。

図 2.3. 13 には単管の全圧プローブを示す。単管の全圧プローブは鈴木精器工業所製のプローブであり、境界層内の全圧を測定することが出来るように先端がつぶれた形状となっている。プローブの先端部分の外形は 1mm のステンレス製である。

図 2.3. 14 には楕形全圧プローブを示す。楕形全圧プローブは岩手大学製であり、外径 1mm のステンレスチューブを  $90^\circ$  に折り曲げることで作成を行った。ステンレスチューブ同士の間隔は 10mm であり、9本のチューブで構成されている。しかし、全圧管の両端は隣の全圧管の流れの影響を受けず、計測条件が僅かに異なるためダミープローブとして取り扱う。従

って、楕形全圧プローブは中央 7 本のチューブで計測を行った。



図 2.3.13 単管全圧プローブ

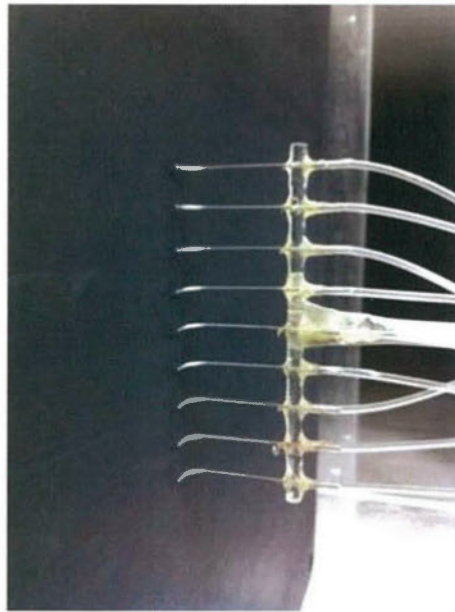


図 2.3.14 楕形全圧プローブ

## (2) 計測環境

全圧損失係数を計測する際に使用する全圧プローブは予め較正した（較正方法は別途説明を記載している）ものを用いている。しかし、温度の変化を考慮した較正は行わなかったため、二次空気の加熱は行わないこととした。全圧プローブはテストセクション側面に設置したトラバース装置によってあらかじめ定めておいた面内をトラバースさせ、全圧の計測を行う。本計測では取得する圧力の不確かさをできる限り低減するために、計測点毎に取得される圧力に最も近い圧力レンジの圧力変換器を使用して圧力計測を行った。使用した圧力変換器は圧力トランスデューサモデル 265 であり、以下の表 2.3.3 に使用した圧力変換器と、圧力レンジを示す。実験中の計測イメージ（実験装置 I）は図 2.3.15 に示した。

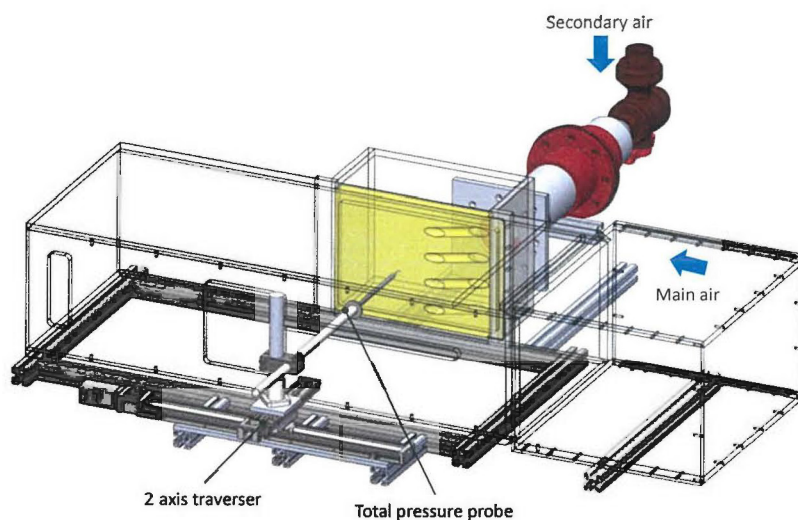


図 2.3. 15 テストセクション (平板モデル全圧損失計測)

表 2.3. 3 使用した圧力変換器

計測する圧力	レンジ
$P_t$	100[Pa]
主流流速	100[Pa]
二次空気流量	500[Pa]

### (3) 全圧プローブの較正

#### ①単管全圧プローブの場合

全圧プローブを使用するにあたり、予め較正作業を行っている。較正方法としては、入口ピトー管で取得した全圧値を参照の全圧値として、入口ピトー管の位置に全圧プローブを設置した時の全圧値を求めることで、ピトー管で取得した全圧値と、全圧プローブで取得した全圧値の関係式を算出する。先にも記したが、全圧プローブの較正を行う際には温度の影響を考慮しないこととした。図 2.3. 16 には全圧プローブの較正曲線を示す。赤のプロットは計測値を表しているが、線形に近似しても高い計測精度が得られることが分かったため、較正曲線は線形の式を用いることとした。



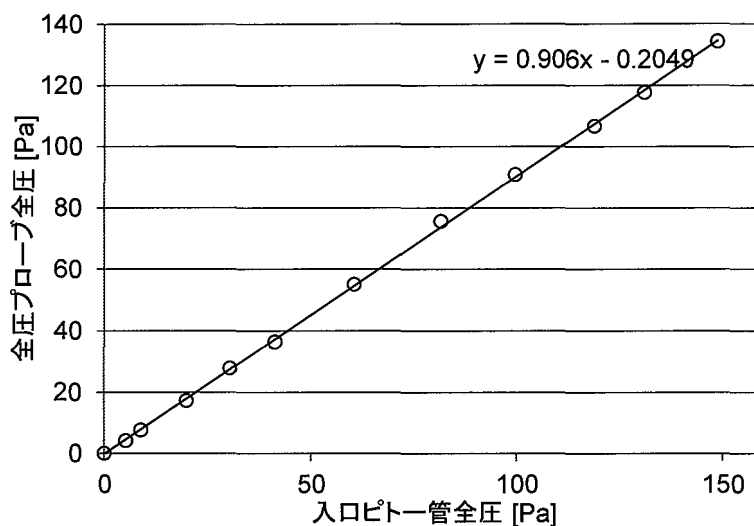


図 2.3.16 全圧プローブ較正曲線

### ②楕形全圧プローブの場合

楕形全圧プローブを使用する場合，較正方法は基本的に単管の全圧プローブと同様である。ただし，楕形全圧管は横方向に広いプローブとなっているため参照全圧の決定は慎重に行う必要がある。楕形全圧管の較正は実験装置Ⅱのテストセクションダクトで行ったが，予め計測を行った結果スパン方向に一樣な流れが確認されたため，参照全圧は代表点 1 点の全圧を使用した。較正手順を以下に示す。

- (1) ピトー管をテストセクションダクト中央位置に挿入し，全圧を計測する。この全圧が各ピトー管の参照全圧となる。
- (2) ピトー管をテストセクションダクトから取り出し，楕形全圧管を挿入する。各全圧管を，ピトー管を挿入した場所と同じ位置にトラバースして，計 7 チャンネル分計測を行う。また，この際圧力変換機はそれぞれピトー管とは別のものを使用する。
- (3) 圧力値を主流制御用インバータで変化させて，Ⅰ，Ⅱと同じ計測を複数回行う。本研究においては，計測圧力範囲の目安は，計測の最小，最大圧力が十分収まるようにしており，ピトー管計測時で 120Pa, 100Pa, 80Pa, 60Pa, 40Pa の計 5 点で計測を行った。
- (4) 計測によって得られた，全圧値を用い最小二乗法にて，較正曲線を作る。楕形全圧管とピトー管の示す全圧値は線形になることを確認しているため，直線での近似となる（図 2.3.21 と同様）。
- (5) 各全圧管について算出した較正係数を適用し，後処理を行う。

### (4) 計測手順

以下に温度計測の手順を示す。

- (1) 圧力変換器 (Setra) ゼロ点補正を行い，主流送風機と二次空気送風機の電源を入れ，暖気を開始する。計測の 1 時間前を目安とするが，冬季は実験室内の気温も低いので必要

に応じて暖気時間を長くとり、主流の温度を安定させる。また、二次空気も供試体へ流入させる。

- (2) 計測機器、作動流体の暖気を終えたところで所定の主流レイノルズ数に合わせるためにミニチュアピトー管で取得している動圧を調整する。二次空気は層流流量計の差圧を読み取り、流量を算出した後、既定の噴き出し比に合わせる。
- (3) 全圧プローブを予め決めた面内でトラバース移動させ、全圧の計測を行う。全圧の計測を行う際には圧力値が安定するまで待機する必要がある。予め行った予備計測の経験から、境界層付近は全圧値が安定するまでに比較的多くの時間を要するので、境界層付近の待機時間は長くしている。待機時間は以下の表 2.3.4 に示す。

表 2.3.4 計測位置・待機時間

壁面からの距離[mm]	待機時間[s]
0~2	59
3	35
4~7	30
8~15	20
16~20	15
21~25	10
26~30	7
31~35	5
36~	3

#### (5) データ処理

各点毎のデータを取得することで、スパン方向や高さ方向に全圧損失の分布を取得することは可能であるが、1つの供試体あたり空力損失を評価するために本研究では流量平均の全圧損失係数を算出する。流量平均とは流量に関する加重平均を行うことを意味しており、以下の式で流量平均の全圧損失係数  $\zeta$  を定義する。算出式を定義する便宜上、図 2.3.17 のような計測座標を用いた場合の定義式を示す。

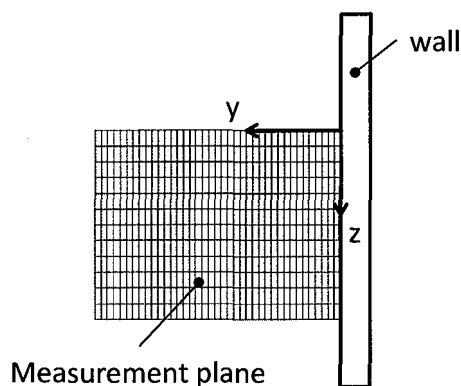


図 2.3.17 計測座標系

$$\zeta = \frac{\int_0^{z \max} \int_0^{y \max} C_{p,t}(y,z)V(y,z)dydz}{Q_{nond}} \quad (2.3.22)$$

$$Q_{nond} = \int_0^{z \max} \int_0^{y \max} V(y,z)dydz \quad (2.3.23)$$

以上の式から、流量平均の全圧損失係数を算出するには局所流速  $V(y,z)$  を算出必要がある。局所流速を求めるには熱線等の計測機器を使用すれば、直接的に計測することが可能であるが本研究では直接計測を行う場合は計測に莫大な時間を要するため、計測面位置での静圧を求め（テストセクションダクトに静圧孔を空けることによって計測可能になる）、全圧プローブで計測した全圧と静圧値の差を求めることで動圧（局所流速）を算出した。静圧孔はテストセクションダクト下面の亚克力板に設けており、各計測面の位置に静圧孔を空けている。

### 2.3.3.3 運動エネルギー損失

フィルム冷却のロスに関しては様々な定義方法が存在しており、先にて定義した全圧損失も代表的な定義方法の 1 つとして知られている。一方でターボ機械のロスの定義方法にはエントロピーの変化でロスを表現する<sup>(16)</sup>ものも存在している。本節で定義した、全圧損失係数は二次空気の全圧損失が考慮されているが、熱力学的観点での損失が含まれていない。そこで、本研究では一部の計測において運動エネルギー損失を求めることでロスを比較することとした。

二次空気の運動エネルギーを考慮しつつ、運動エネルギー損失係数を定義する場合、運動エネルギー損失係数は以下の式で示される。

$$\zeta = 1 - \frac{\text{Actual exit kinetic energy (KE)}}{\text{Isentropi KE of mainstream} + \text{Isentropic KE of second air}} \quad (2.3.24)$$

主流と二次空気の温度が等しい場合は、以下の式で運動エネルギー損失係数を表現する。

$$\zeta = 1 - \frac{\left(1 + \frac{m_{2nd}}{m_\infty}\right) \times \left(1 - \left(\frac{P_{s2}}{P_{t2}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)}{\left(1 - \left(\frac{P_{s2}}{P_{t1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right) + \frac{m_{2nd}}{m_\infty} \times \left(1 - \left(\frac{P_{s2}}{P_{t2nd}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)} \quad (2.3.25)$$

- $\zeta$  : 運動エネルギー損失係数  
 $P_{s2}$  : 計測点での静圧 (絶対圧)  
 $P_{t1}$  : 入口全圧 (絶対圧)  
 $P_{t2}$  : 計測点での全圧 (絶対圧)  
 $P_{t2nd}$  : 二次空気全圧 (絶対圧)  
 $m_{2nd}$  : 検査体積を通過する二次空気の質量流量  
 $m_\infty$  : 検査体積を通過する主流の質量流量  
 $\kappa$  : 比熱比

### (1) 計測プローブ

運動エネルギー損失計測には、全圧損失係数の計測で用いた楕形全圧プローブを用いた。これにより、主流中の全圧を計測している。主流入口の全圧計測には L 型ピトー管を用いた。

### (2) 計測方法

計測点での全圧、主流入口の全圧の計測方法は上記のプローブを用いて計測した。二次空気の全圧は、プレナムチャンバー内にプローブを入れて、計測するのが理想であるが、プローブ挿入の際に空気漏れが発生することを防ぐために、プローブは挿入せずに、プレナム内静圧を全圧の代わりに用いることとした。主流の流量は、主流入口流速から算出し、二次空気流量は流量計で計測した値を用いた。この際、吹き出した二次空気は全て検査体積内を通過するものと仮定している。

#### 2.3.3.4 三次元定常流れ場計測 (平板モデル試験)

フィルム冷却の流れ場では、主流が二次空気に対して貫通している挙動や kidney vortex 等のフィルム冷却の性能に対して支配的な流れ場を捉えることが現象理解に必要な不可欠である。しかし、冷却孔付近の流れ場はピトー管や熱線等の接触型のプローブを用いた計測では流れ場を変化させてしまう可能性があり、計測が困難である。本研究では、フィルム冷却の流れ場を測定することと、以上のような接触型の速度センサーの問題を解消するためにレ

ーザードップラ流速計 (LDV) を用いて三次元流れ場の計測を行っている。

### (1) レーザードップラ流速計

LDV とは、図 2.3. 18 に示すように、レーザーが交差した空間に生じる干渉縞を利用し、トレーサー粒子が干渉縞を通過した際に発する散乱光のバースト信号からトレーサーの通過速度を求めるものである。非接触測定法であるため、燃焼ガス中や微小隙間内の流れ、回転翼間の流れなど、これまでの測定法では計測しえなかった流れの詳細計測が可能である。

LDV のメリットとしては、トレーサー粒子の挙動を追うので、応答性が良いこと、校正や温度補償の必要がないことなどが利点として挙げられる。しかし、トレーサーが横切るときしか速度信号が取得できないためデータレイトがトレーサーの速度に依存し、低速な流れではデータレイトを高くするのが難しい。また、計測点に対してレーザーを照射するために計測対象周りに広いスペースや計測窓を設ける必要があるため、実験装置自体の制約も存在している。

近年では PIV を用いた流れ場計測も盛んに行われるようになってきているが、A らは PIV と LDV でフィルム冷却の流れ場の計測精度を比較したところ、LDV の方が CFD との良好一致を示していると報告していることから、本研究でもフィルム冷却の流れ場計測に用いることとした。

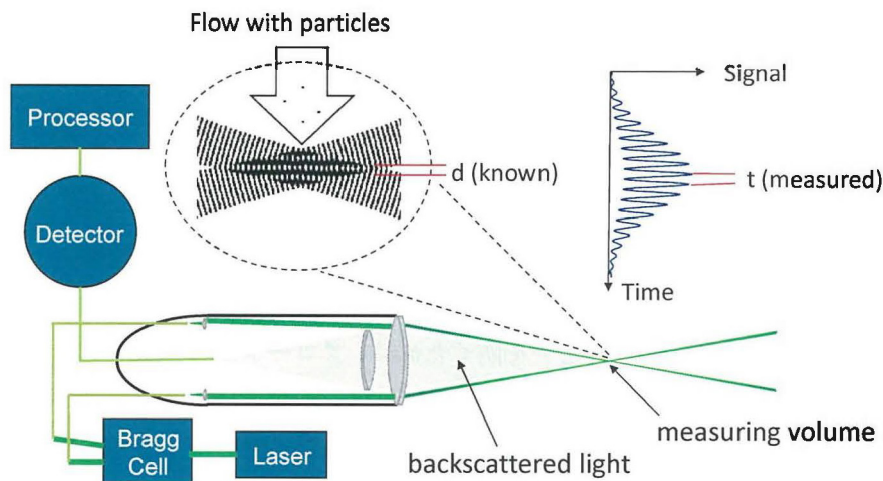


図 2.3. 18 LDV 外観図

### (2) 計測環境

図 2.3. 19 には LDV 計測で用いたテストセクションを示す。テストセクションには主流と二次空気の空気系統が設けられているうえ、トレーサー粒子を主流中に噴出させるための孔が縮流ダクトに設けられている。トレーサー粒子は主流中には常に噴射するのではなく、停止時間 15 秒、噴射時間 20 秒で間欠的に供給することとした。計測を行う冷却孔は 4 ピ

ツチ設けられている内、上から3番目の冷却孔としている。トレーサー粒子を主流中に噴射する場合は、主流に流される形となるため壁面からある程度の距離まではトレーサー粒子が到達しやすいが、壁面から離れた位置に関してはトレーサー粒子が到達し難く、データレートが低下する傾向がある。この場合、トレーサー粒子を供給するための送風機の出力を上げることで壁面から離れた位置にトレーサー粒子を到達させることが可能であるが、主流の流れ場を変化させてしまうために、送風機の出力はある程度低くしている（具体的な出力値に関しては予め調査している）。実験中にトレーサー粒子のデータレートは剥離領域等で低下してしまうが、本計測ではその領域に関しての実験のやり直しはしておらず、データレートが少ない領域は“エラー”として後処理を行うこととした。

主流と二次空気の温度、流速、流量は計測中には常にモニタリングしているが常時記録は行わず、30分ごとに記録を行った。しかし、主流の流速に関しては、ダクト内にL型ピトー管を挿入したままにしておくことで主流の流れ場を変化させる可能性があるため、実験の最初に流速を規定値に設定した後はピトー管をダクト内からはずし、それ以降は実験の終了まで主流の流速は計測しない。

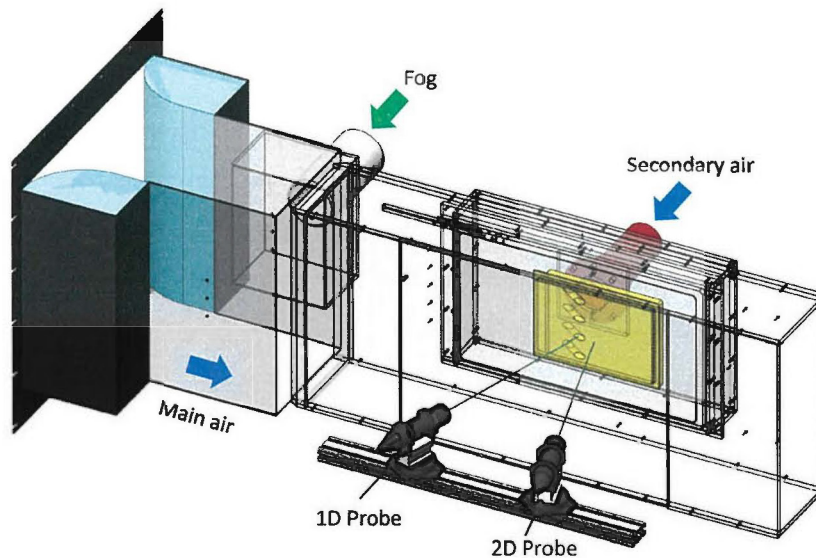


図 2.3.19 テストセクション（平板モデル LDV 計測）

### (3) 出力調整とアライメント

LDV では較正が必要ないが、レーザーの干渉性を良くするため、レーザーの出力調整とアライメントが非常に重要である。これが良好でないと、データレートが下がり、3次元での計測が困難になる。光学的な調整は光の強さを目で見えて調整していくしかないため、ある程度経験を積むことが必要である。出力調整はテストセクションからトラバース装置に設置された Probe をいったん離して行う。以下の手順で出力調整等を行った後に流れ場計測を

開始することとなる。

#### (1)レーザーヘッドでの出力調整

レーザーヘッド内には球面状のミラーがあり、その向きを Control Panel のつまみで調整し、レーザーの出力が最大になるようにする。これを怠ると、いくらコントローラーで出力を上げようとしても実際にレーザーの出力が上がらず、必要な出力を得ることができなくなる可能性がある。

#### (2)トランスミッターのアライメント

トランスミッターをアライメントモードに切り替えると、内部のミラーでレーザーが反射され、トランスミッター入口のシート上で入射光と反射光が重なる。レーザーヘッドから照射されたレーザーが真っ直ぐトランスミッターに入るよう、トランスミッターの足のネジで高さや向きを調整し、入口で重なったレーザー光が同心円を描くよう調整する。

#### (3)マニピュレーターでの出力調整

トランスミッターから出力される 6 本のレーザーをそれぞれファイバーケーブルに導くため、マニピュレーターが設置されている。1 本のレーザーにつき 5 つの調整ネジがあり、レーザーの出力が最大となるよう調整する。また、同色のレーザーの強さが同等になっていることを確認する。

#### (4)レーザー焦点のアライメント

最後に、2次元プローブと1次元プローブの焦点を合わせる。図 2.3.20 に示すように、トラバース装置にピンホール ( $\phi=50\mu\text{m}$ ) を取り付け、レーザーがピンホールを通るようステージ位置を調整した。まず、2次元プローブに合わせてピンホールを調整し、次にそのピンホールにレーザーが通るように 1次元プローブを調整する。最終的に 6 本すべてのレーザーがピンホールを通過していることを確認する。

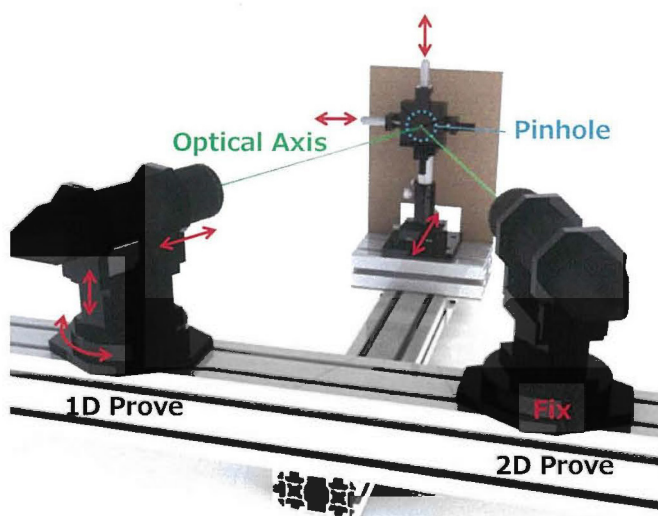


図 2.3.20 ピンホールセッティング

## (4) 出力調整とアライメント

測定原理からわかるように，LDV で計測できるのは干渉縞に対して垂直な方向の速度成分である．本来であれば，計測座標系に合わせて3次元のレーザーが互いに直角に交差するよう設置すべきであるが，今回は図 2.3. 21 のように平板モデルに対してプローブをそれぞれ  $25^\circ$ 傾けて ( $\alpha_1=\alpha_2=25^\circ$ ) 入射させ計測を行った．プローブの傾きを  $25^\circ$ に設定したのは，装置の装置や供試体の関係上レーザーの傾き角度によって，計測できる領域が制限を受けるためであり，今回は計測できる領域をできるだけ広く設定している．また，トラバース装置の置きやすさなど，実験と装置自体の使い勝手の良さからプローブの幾何関係を決定した．そのため，計測から直接得られる速度  $u_1, u_2, u_3$  を計測座標系に基づく速度成分  $u, v, w$  に変換する必要がある． $u, v, w$  は変換行列  $C$  を用いて次式のように表せる．変換行列の各値は，予め制御ソフトウェアに入力しており，LDV 計測中には制御ソフトウェア内に入力された変換行列の値に基づいて流速を出力することとなる．従って，装置の制約などを受けて，プローブの傾きが変化した場合でも変換行列の値を正しく入力することで流速の計測は可能になる．なお，変換行列の値がたとえ間違っていたとしても，データの生値は取得することができるので計測後に変換行列の値を決定してもよい．

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (2.3.26)$$

図 2.3. 21 のように，計測座標系に対して2次元プローブ，1次元プローブを入射角  $\alpha_1, \alpha_2$  で照射した場合，変換行列  $C$  は以下の式のように表せる．

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sin \alpha_2}{\cos(\alpha_1 + \alpha_2)} & \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ 0 & \frac{\cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} & \frac{-\cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \end{bmatrix} \quad (2.3.27)$$

特に， $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$  の場合は次の式のように書き換えられる．

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2 \cos \alpha} & \frac{1}{2 \cos \alpha} \\ 0 & \frac{1}{2 \sin \alpha} & \frac{-1}{2 \sin \alpha} \end{bmatrix} \quad (2.3.28)$$



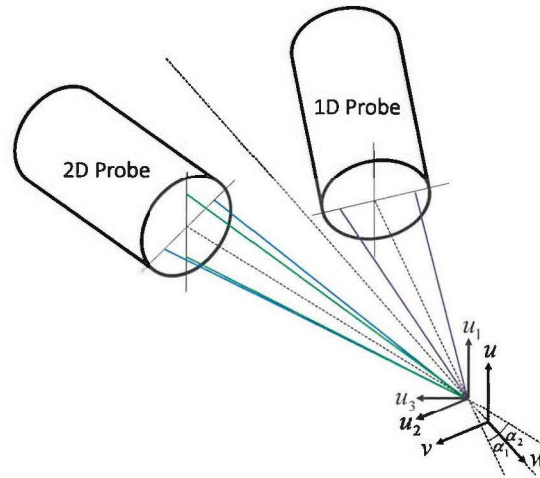


図 2.3.21 座標変換

### (5) データ処理

実験で得られる評価パラメータと、その算出方法を以下に示す。

#### 時間平均流速

$$\overline{U_{x,y,z}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N U_i \quad (2.3.29)$$

#### Root mean square (RMS)

$$RMS_{u,v,w} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \overline{U_{x,y,z}})^2} \quad (2.3.30)$$

#### レイノルズ応力テンソル

$$\overline{u'v'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) \quad (2.3.31)$$

$$\overline{u'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(w_i - \bar{w}) \quad (2.3.32)$$

### 2.3.3.5 流れの可視化計測

2.3.3.3 に示したようにレーザードップラー流速計を用いた流れ場計測では非接触で流れ場の計測を行うことが可能になり、流れの計測には有用である。しかし、レーザードップラー流速計を用いた計測では、①定常流れ場の計測にとどまる、②1点毎の計測のため高解像度の計測には莫大な計測点を必要とする、というようなデメリットも同時に持っている。そ

ここで本研究では流れ場の非定常性を高解像度に把握するために流れの可視化計測を行っている。流れの可視化計測に用いたデータは同時に PIV を行うことも将来的に可能になる。

### (1) 高速度カメラ

可視化・PIV 計測では高速度カメラによりトレーサー粒子の挙動を撮影している。可視化計測時に使用したカメラは Vision Research 社製 Phantom v9.1 である。高速度カメラでは撮影画素数を狭めるほど最大撮影速度を上げることが可能なため、必要に応じて画素数と撮影速度を調整している。また、露光時間も状況に応じて適宜調整を行っている。撮影の際に使用するレンズは撮影範囲や条件に応じて使い分けている。本計測で主に使用したレンズは下記の 2 つである。高速度カメラの仕様は以下に示す。

- ・ Nikon Ai Nikkor 50mm f/1.2S
- ・ Nikon Ai Micro-Nikkor 105mm f/2.8S

また、撮影条件に応じて接写リングを適宜使用している。

表 2.3.5 高速度カメラ仕様

イメージ	
	
型式	Phantom v1210
センサー	1,280×800 ピクセル, モノクロ
撮影速度	12,000 コマ/秒 最高撮影速度 820,000 コマ/秒*1
レンズマウント	Nikon F-mount
サイズ	248H×190W×274Dmm
重量	7.9[kg]

## (2) レーザー発振器 (図 2.3. 22)

高速度カメラでトレーサー粒子を撮影する際、撮影速度を早くすると露光時間を短く設定せざるを得ず、トレーサー粒子を撮影できなくなる。そのため、強力なレーザー光をトレーサー粒子に照射することで粒子の輝度を上げ、短い露光時間でも粒子の撮影が出来るようにしている。可視化計測に使用したレーザー発振器は Dantec 社製 RayPower2000, PIV 計測に使用したレーザー発振器は Dantec 社製の RayPower5000 である。このレーザーの波長は 532nm であり、最大出力がそれぞれ 2W と 5W である。本計測では特殊なレンズを用いてレーザーをシート状に広げ、撮影に使用している。また、このレーザーはパルス信号によりカメラの撮影とタイミングを同期して発光させることが可能だが、本研究では連続光として使用している。

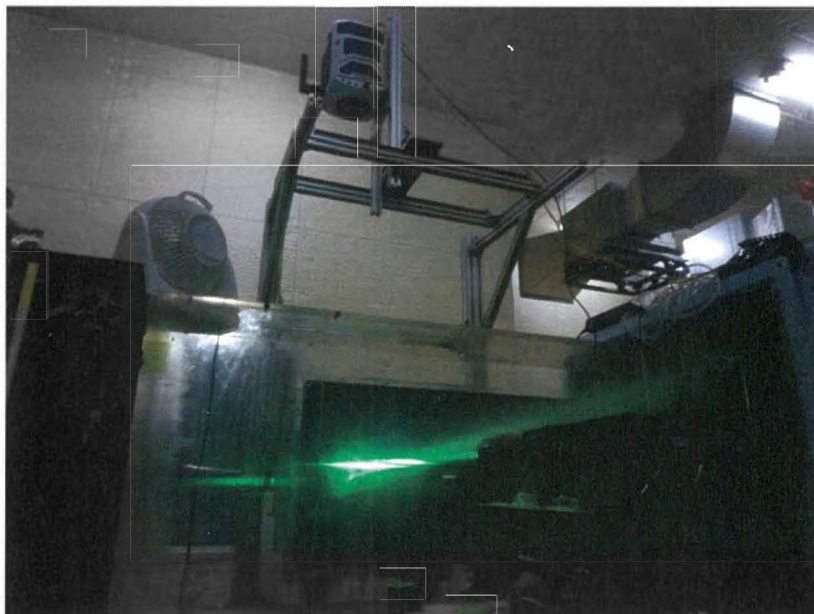


図 2.3. 22 レーザーシート

## (3) 計測環境

図 2.3. 23 には流れの可視化計測におけるテストセクションの外観図を示す。流れの可視化計測は計測機器の設置にスペースが必要になるために、実験装置 II を使用して行った。供試体正面にはレーザーシートを設置し、テストセクションダクト情報には高速度カメラを設置し、冷却孔周囲の流れに対して焦点を合わせる形にする。図 2.3. 24 には空気系統図を示す。可視化に必要なトレーサー粒子は、フォグブローワーから供給し、主流と二次空気に混入している。これによって、二次空気にトレーサー粒子を流入させる場合は層流流量計のラミナーに粒子が付着するのを防ぐために、層流流量計の下流側より粒子を流入させる必要がある。そのため、トレーサー粒子を流入させる場合は既定の吹き出し比から僅かにずれる

ことになるが、今回は定性的な傾向を捉えるために流量の僅かなずれは無視して計測を行った。

トレーサー粒子の撮影時にはサンプリングレートを20,000[fps]、露光時間を50[μs]としており、冷却孔周囲の $x/d=3\sim 4$ 程度の寸法がフレームに収まるようにしている。撮影は10秒程度行い、データを閲覧後に必要な動画データを切り取る。

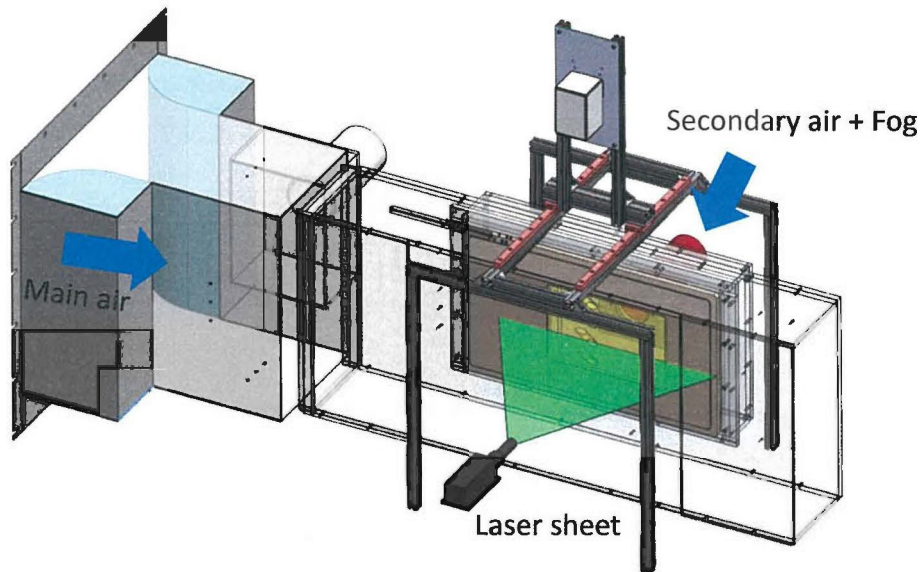


図 2.3.23 可視化装置外観図

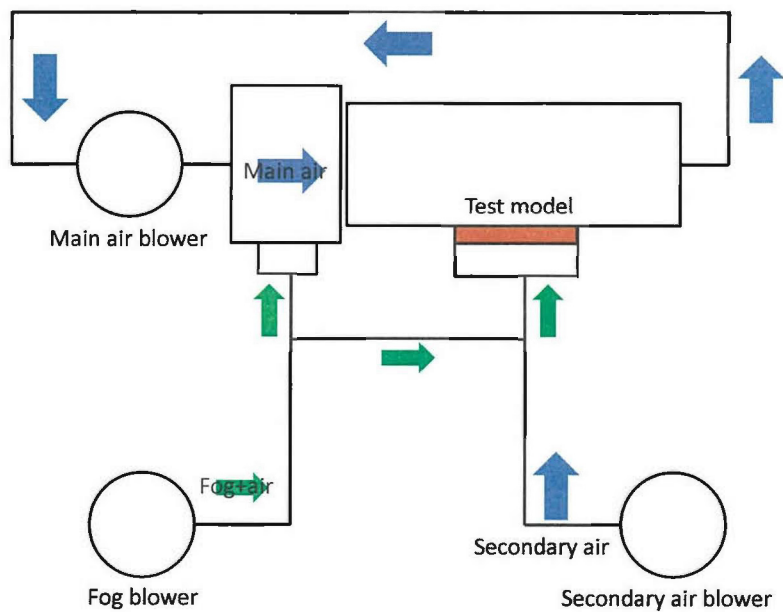


図 2.3.24 空気系統図

## 2.3.3.6 計測の不確かさ解析

本研究で計測したフィルム効率、全圧損失係数の不確かさについて評価を行った。

## (1) フィルム効率と熱伝達率の不確かさ（非定常法）

過渡応答法を用いたフィルム効率算出の不確かさに関しては Alok ら<sup>(17)</sup>の方法を用いて評価を行った。フィルム効率の不確かさを求める際には、不確かさの値が比較的高くなると考えられる  $\eta=0.2$  を想定して不確かさの評価を行った。この時、主流温度、二次空気温度、壁面温度はそれぞれ実験条件を参考に  $T_\infty=15^\circ\text{C}$ 、 $T_2=50^\circ\text{C}$ 、 $T_w=18.5^\circ\text{C}$  を想定した。フィルム効率の不確かさは以下の式(1)で表されるが、フィルム効率の不確かさを求める際には熱伝達率の不確かさを求める必要がある。熱伝達率の不確かさは式(2.3.34)で表される。

$$\frac{u(\eta)}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{u(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u(T_2 - T_\infty)}{T_2 - T_\infty}\right)^2 + \left(\frac{u(T_w - T_\infty)}{T_w - T_\infty}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2} \quad (2.3.33)$$

$$\frac{u(h)}{h} = \sqrt{\left(\frac{u(T_2 - T_\infty)}{T_2 - T_\infty}\right)^2 + \left(\frac{u(T_w - T_\infty)}{T_w - T_\infty}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2} \quad (2.3.34)$$

二次空気と主流の温度差の不確かさに関しては、熱電対の温度測定誤差を考慮して以下のように算出する。

$$\left(\frac{u(T_2 - T_\infty)}{T_2 - T_\infty}\right)^2 = \left(\frac{0.7/\sqrt{3}}{35}\right)^2 = 0.0005 \quad (2.3.35)$$

壁面温度と主流温度の不確かさに関しては、赤外線カメラの温度測定誤差を考慮して以下のように算出する。

$$\left(\frac{u(T_w - T_\infty)}{T_w - T_\infty}\right)^2 = \left(\frac{1.0/\sqrt{3}}{3.5}\right)^2 = 0.027 \quad (2.3.36)$$

計測時間は 120 秒間であり、測定誤差は最大  $\pm 5$  秒として、

$$\left(\frac{u(T_2)}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{5/\sqrt{3}}{120}\right)^2 = 0.005 \quad (2.3.37)$$

供試体の熱伝導率と比熱の不確かさは Alok らと同様の値を用いて、

$$\left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2 = 0.0018 \quad (2.3.38)$$

以上より  $\frac{u(h)}{h} = 0.17$  となり、熱伝達率算出の不確かさは±17%程度である。

上記の熱伝達率の不確かさの値を上記の式(2.3.34)へ代入すると

$$\frac{u(\eta)}{\eta} = 0.195 \quad (2.3.39)$$

よって±20%と評価した。

### (2) フィルム効率の不確かさ (定常法)

定常法でフィルム効率を算出する場合には、不確かさに影響を与えるファクターをまとめると以下ようになる。

$$\frac{u(\eta)}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{u(T_2 - T_\infty)}{T_2 - T_\infty}\right)^2 + \left(\frac{u(T_w - T_\infty)}{T_w - T_\infty}\right)^2} \quad (2.3.40)$$

不確かさの算出に用いる各項の値は、非定常法と同様であるので、

$$\frac{u(\eta)}{\eta} = 0.165$$

よって±17%と評価した。

### (3) 損失計測の不確かさ

損失計測において、不確かさに影響を与えるファクターをまとめると以下ようになる。

$$\frac{u(C_{p,t})}{C_{p,t}} = \sqrt{\left(\frac{u(\dot{m}_\infty)}{\dot{m}_\infty}\right)^2 + \left(\frac{u(\dot{m}_2)}{\dot{m}_2}\right)^2 + \left(\frac{u(P_{t,\infty})}{P_{t,\infty}}\right)^2 + \left(\frac{u(P_{t,2})}{P_{t,2}}\right)^2 + \left(\frac{u(P_t)}{P_t}\right)^2 + \left(\frac{u(U_\infty)}{U_\infty}\right)^2} \quad (2.3.42)$$

主流の流量と流速は、ピトー管計測したダクトの入口流速と断面積から算出し  $m_\infty = 2.47 \text{ kg/s}$ ,  $U_\infty = 13.6 \text{ m/s}$  とする。主流流量の測定誤差は入口流速の測定誤差と等しく、これは圧力変換器の測定誤差から求める。圧力変換器の測定誤差は±1.25Pa であるので、主流の質量流量は±0.15kg/s、流速は±0.08m/s の測定誤差の影響を受ける。

$$\left(\frac{u(\dot{m}_\infty)}{\dot{m}_\infty}\right)^2 = \left(\frac{0.015/\sqrt{3}}{2.47}\right)^2 = 1.23 \times 10^{-5} \quad (2.3.43)$$

$$\left(\frac{u(U_\infty)}{U_\infty}\right)^2 = \left(\frac{0.08/\sqrt{3}}{13.58}\right)^2 = 1.16 \times 10^{-5} \quad (2.3.44)$$

二次空気流量の不確かさは  $BR = 0.5$  を想定して算出することとし、 $m_2 = 0.0096 \text{ kg/s}$  とする。二次空気流量の不確かさも主流流量の計測の用いているものと同じ圧力変換器の計測誤差

に起因するため、二次空気の質量流量は $\pm 9.4 \times 10^{-5} \text{kg/s}$ の測定誤差の影響を受ける。

$$\left( \frac{u(\dot{m}_2)}{\dot{m}_2} \right)^2 = \left( \frac{9.4 \times 10^{-5} / \sqrt{3}}{0.0096} \right)^2 = 3.2 \times 10^{-5} \quad (2.3.45)$$

主流と二次空気の全圧は $BR=0.5$ の計測時の値を用いて $P_{t,\infty}=106\text{Pa}$ ,  $P_{t,2}=250\text{Pa}$ とする。主流と二次空気全圧の測定時にも上記と同じ圧力変換器の誤差の影響を受けるため、圧力の測定誤差は $\pm 1.25\text{Pa}$ である。

$$\left( \frac{u(P_{t,\infty})}{P_{t,\infty}} \right)^2 = \left( \frac{1.25 / \sqrt{3}}{106} \right)^2 = 0.0068 \quad (2.3.46)$$

$$\left( \frac{u(P_{t,2})}{P_{t,2}} \right)^2 = \left( \frac{1.25 / \sqrt{3}}{250} \right)^2 = 0.0029 \quad (2.3.47)$$

計測全圧は不確かさが最も大きくなると考えられる、壁面最接近点での計測全圧 $P_t=20\text{Pa}$ を用いることとした。計測点全圧も、誤差 $\pm 1.25\text{Pa}$ であるので、

$$\left( \frac{u(P_t)}{P_t} \right)^2 = \left( \frac{1.25 / \sqrt{3}}{20} \right)^2 = 0.036 \quad (2.3.48)$$

以上より

$$\frac{u(C_{p,t})}{C_{p,t}} = 0.038 \quad (2.3.49)$$

よって $\pm 3.8\%$ と評価した。

#### (4) LDVによる三次元流れ場計測における不確かさ

LDVによる三次元流れ場計測における不確かさは、Bタイプの不確かさ算出方法で求めた。不確かさは、壁面付近と壁面から十分離れた位置で不確かさが変化する可能性を考慮するために図 2.3. 25 に示すような 2 つの位置での評価①, ②を行った。各評価位置での計測は合計 10 回流速の計測を行った結果を用いているが、位置決めの不確かさを考慮するために互いに 0.5mm 離れた 2 点での計測データを用いることとし、各位置で 5 点ずつの計測を行った。今回、y 方向にだけ位置決め誤差を考慮したのは、実際の計測においては、目視での位置決めを行うために、最位置決め誤差が発生しやすいためである。計測の不確かさは B タイプの不確かさを用いるために、式(4.8)で表す。

$$u(U_{LDV}) = \frac{U_{LDV,measure}}{\sqrt{3}} \quad (2.3.50)$$

$U_{LDV,measure}$  は計測データの上限值と下限値の半値幅を表している。

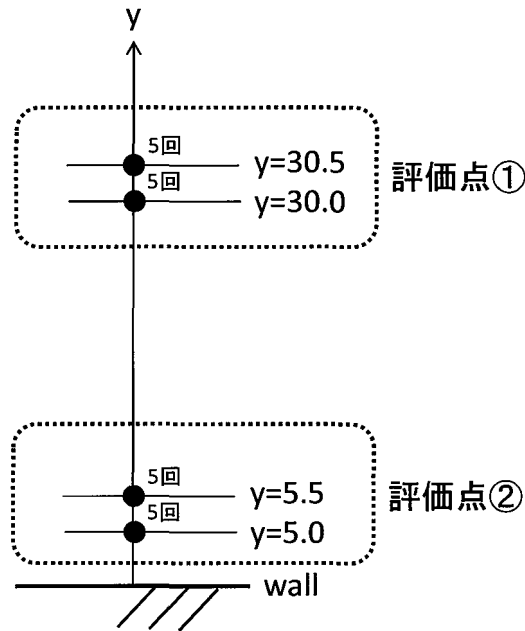


図 2.3.25 不確かさの評価位置

#### 4.4.3.1 評価点①での不確かさ

表 2.3.6 に計測点①における主要な不確かさ算出値を示す。フィルム冷却の流れ場では主流の流れ方向の速度成分が大きいため、相対的に流れ方向流速の不確かさが大きい値を示した。供試体のスパン方向、壁面法線方向の不確かさが非常に大きい値を示しているのは、計測点①は壁面から十分に離れた位置であり、主流の流れ方向以外の速度成分が殆どゼロに等しいためである。したがって、評価点①では  $V$ 、 $W$  に関しては不確かさの算出は殆ど意味が無いと考えられる。

#### 4.4.3.2 評価点②での不確かさ

表 2.3.7 に計測点②における主要な不確かさの算出値を示す。評価点①と比較すると、壁面付近の流れ場においては、境界層の影響により流れ方向流速が低下するために相対不確かさの値が高くなっている。また、境界層内ではスパン方向や、壁面法線方向の速度成分が評価点①よりも強くなるために、 $V_{mean}$ 、 $W_{mean}$  の相対不確かさは低くなる。



表 2.3.6 評価点①での不確かさ一覧

計測値	不確かさ [m/s]	計測値 [m/s]	相対不確かさ [%]
$U_{mean}$	0.21	12.39	1.7
$V_{mean}$	0.06	-0.007	824
$W_{mean}$	0.06	-0.031	186
$U-RMS$	0.07	0.519	13.3

表 2.3.7 評価点②での不確かさ一覧

計測値	不確かさ [m/s]	計測値 [m/s]	相対不確かさ [%]
$U_{mean}$	0.18	9.61	2.0
$V_{mean}$	0.18	-0.62	29.8
$W_{mean}$	0.20	0.35	57.2
$U-RMS$	0.12	1.45	8.3

## 参考文献 (2.2, 2.3 節)

- (1) Shinha, A. K., Bogard, D. G. and Crawford, M. E., 1991, "Film-Cooling Effectiveness Downstream of a Single Row of Holes With Variable Density Ratio", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 113, pp442-449.
- (2) 武石賢一郎, 1995, ガスタービン翼のフィルム冷却に関する研究, 大阪大学博士論文, pp14-63.
- (3) Kohli, A. and Bogard, D. G., 1997, "Adiabatic Effectiveness, Thermal Fields, and Velocity Fields for Film Cooling with Large Angle Injection", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 119, pp352-358.
- (4) Yu, Y., Yen, C. H., Shih, T. I. P., Chyu, M. K. and Gogineni, S., 2002, "Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient Distributions Around Diffusion Shaped Holes", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 124, pp820-827.
- (5) Barigozzi, G., Franchini, G., and Perdichizzi, A., 2007, "The Effect of an Upstream Ramp on Cylindrical and Fan-Shaped Hole Film Cooling – Part1: Aerodynamic Results", ASME Turbo Expo 2007, GT2007-27077.
- (6) Bernsdorf S., Rose, M. G. and Abhari, R. S., 2010, "Modeling of Film Cooling –Part1: Experimental Study of Flow Structure", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 128, pp141-149.
- (7) Laveau, B. and Abhari, R. S., 2010, "Influence of Flow Structure on Shaped Hole Film Cooling Performance", ASME Turbo Expo2010, GT2010-23032.
- (8) O'Dowd, D. O., Zhang, Q., He, L., Ligrani, P. M. and Friedrichs, S., 2009, "Comparison of Heat Transfer Measurement Techniques on a Transonic Turbine Blade Tip", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 133, 021028.

- (9) Oldfield, M. D. G., Jones, T. V. and Schultz, D. L., 1978, "On-Line Computer for Transient Turbine Cascade Instrumentation", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., AES-14(5), pp738-749.
- (10) Ekkad, S. V., Ou, S. and Rivir, R. B., 2004, "A Transient Infrared Thermography Method for Simultaneous Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient Measurements From a Single Test" ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 126, pp 597-603.
- (11) Li, S. J., Yang, S. F. and Han, J. C., 2014, "Effect of Coolant Density on Leading Edge Showerhead Film Cooling Using the Pressure Sensitive Paint Measurement Technique", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 136, 051011.
- (12) Fukui, S. and Morishita, T., 1962, "Measurements of Heat Transfer Coefficient by Sublimation of Naphthalene", Journal of the J.S.M.E., Vol. 65, pp120-127.
- (13) <http://www.irsystem.com/product/irparts/window/window.html>
- (14) Dibbon K. Walters and James H. Leylek, 1999, "Impact of Film-cooling jets on turbine aerodynamic losses", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 122, pp537-545.
- (15) Aga, V., Mansour, M. and Abhari, R. S., 2009, "Aerothermal Performance of Streamwise and Compound Angled Pulsating Film Cooling Jets", ASME Journal of Turbomachinery, Vol.131, 041015.
- (16) Denton, J. D., 1993, "Loss Mechanisms in Turbomachinery," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 621-656.
- (17) Alok, D., Lu, Y., Phillips, W., Ekkad, S. V. and Heidmann, J., 2007, "Film Cooling From a Row of Holes Supplemented with Anti Vortex Holes", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 131, 021007.

## 2.4 流れ制御デバイスの三次元化

### 2.4.1 概要

本研究では突起形状の流れ場制御デバイスを用いてフィルム冷却の高効率化を図っている。突起形状はいくつかの 카테고리分けを行い研究を行ったが、本章で取り上げるのは比較的大型で単純な突起形状を有する流れ制御デバイスであり、冷却孔直径  $d$  に対し、壁面法線方向の高さが  $2d$  となっている。また、従来研究が行われてきた二次元形状から三次元形状の突起へ変形を試みた。

三次元の突起形状に関しては、様々な作成方法が考えられるが、本節ではある軸に対して半楕円形状を回転させ、半分にカットする方法を採用した。これは、回転で三次元形状を作成する場合には、設計パラメータが少なく済むため、形状の定義が行いやすいためである。

本節では、このような作成方法で定義した突起形状を冷却孔上流側に設置することで流れの制御を試みた。研究は実験と数値解析を用いて実施しており、壁面フィルム効率だけでなく、壁面法線方向の空間内で温度場、速度場を計測することでより詳細な現象の解明を試みている。

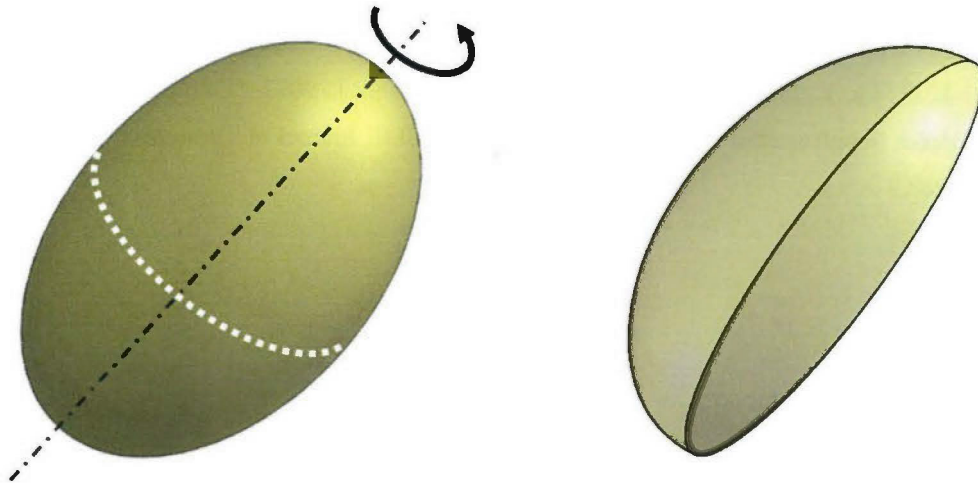


図 2.4.1 突起形状の作成方法

### 2.4.2 供試体・デバイス形状

#### 2.4.2.1 平板モデル供試体

流れ制御デバイスを適用する場合には、基礎研究を行う目的でフィルム冷却の平板拡大モデルを用いた。図 2.4.2 には本研究で用いた平板フィルム冷却拡大モデルを示す。供試体は冷却孔直径  $d=20\text{mm}$  の単純円筒型冷却孔を 4 ピッチ有しており、1 ピッチは  $3d$  となっている前節でも述べたベースモデルである。本研究では、研究上設定する主流のレイノルズ

数を平板モデル試験では  $Re=16,400$  としている。そのため、冷却孔の直径が大きいほど、主流の流速は小さい値となる。平板モデル試験では将来的に PIV など、光学的な計測を実施することを検討し、主流の流速を最小限に抑えるために、上記のように冷却孔の直径を大きくしている。また、これにより計測プローブを用いた計測では高解像度の計測が実現でき冷却孔付近の詳細な流れ場を観察することを可能としている。平板モデルには三次元形状のデバイスを取り付けるために、冷却孔の出口付近の平板部品は取り外しが可能にするために供試体に溝を設けている (図 2.4.2 参照)。この際、供試体を組み合わせた時の段差は非常に小さいために実験には支障がないと判断した。

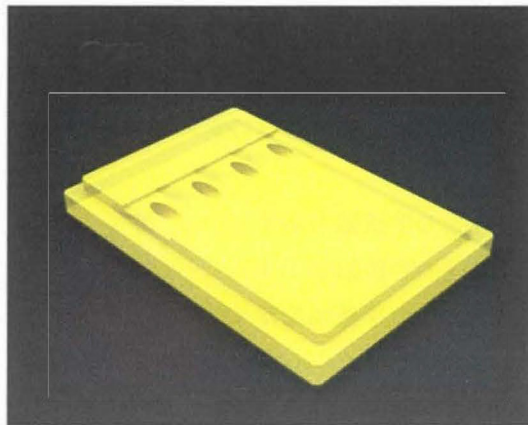


図 2.4.2 平板フィルム冷却モデル

#### 2.4.2.2 三次元デバイス形状

本研究では冷却孔周辺の流れを制御するために、冷却孔周囲に三次元形状をした流れ制御デバイスを取り付ける。冷却孔に取り付けるデバイスの設計パラメータは無数に検討することが可能であるが、今回は過去にデバイスを製作した経験が少ないために設計パラメータはある程度代表的なものに絞ることとした。以下の図 2.4.3 にデバイスの設計パラメータを示す。

デバイスの各寸法値に関しては、過去の研究を参考に、非現実的なオーダーにならないように配慮した。Lu ら<sup>(1)</sup>は、Trench 形状に関して研究を行っており、流れ方向の幅は  $2d \sim 3d$ 、溝の深さは  $0.5d \sim 1.0d$  の範囲で変化させることでパラメトリックスタディーを行っている (図 2.4.4)。また、Ruwan ら<sup>(2)</sup>も、冷却孔上流側に構造体を取り付けているが、構造体の高さは  $1d$  を超えないようにしている (図 2.4.5)。そこで、本研究においても構造体の高さに関しては高さ  $1d$  を超えない設計パラメータとしている。

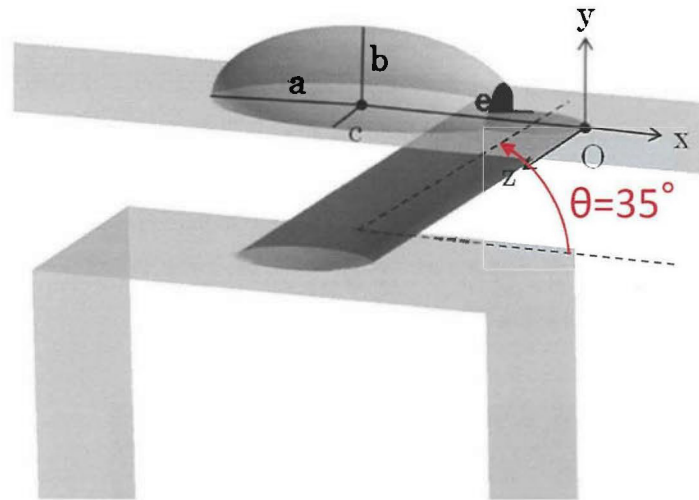


図 2.4.3 デバイス設計パラメータ

設計パラメータ

- a : デバイスの流れ方向の半値幅を示す
- b : デバイスの高さ方向の半値幅を示す
- c : デバイスのスパン方向の半値幅を示す
- e : デバイスの  $x/d=0$  からデバイスの中心までの距離を示す

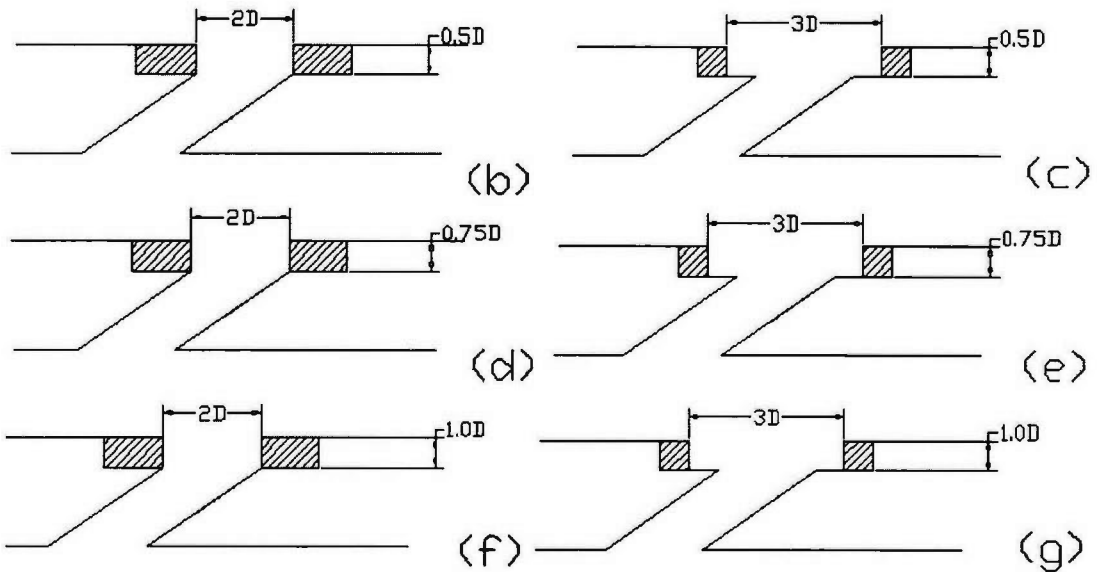


図 2.4.4 Trench の設計パラメータ

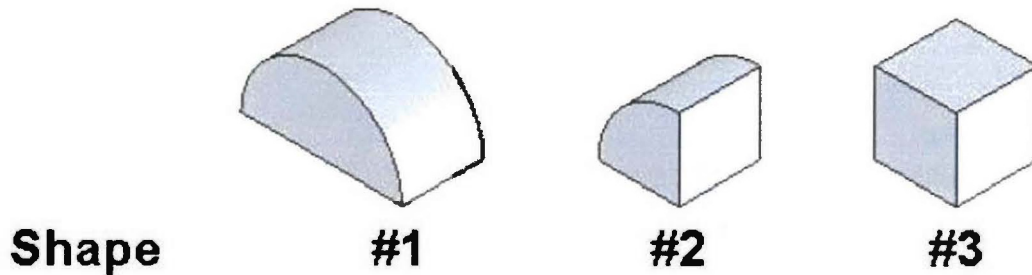


図 2.4.5 構造体形状

以上のように設計パラメータを決定し、実際にデバイスの成形を行った。デバイス成形の前には RANS による解析を行っており、フィルム効率が高い形態を選択した。各デバイスの寸法を表 2.4.1、特徴を以下に示す。

表 2.4.1 デバイス設計パラメータ

形態名	設計パラメータ寸法			
	a	b	c	e
BASE(Without デバイス)	0	0	0	0
3D Device1	$1.5d$	$1.0d$	$1.0d$	$1.5d$
3D Device2	$1.5d$	$1.0d$	$1.0d$	$0.75d$
2D Device	$1.5d$	$1.0d$	$\infty$	$0.75d$

#### 各デバイスの特徴

図 2.4.6 には三次元デバイス形状を有する供試体パーツを示す。図で示した供試体パーツは供試体の土台部分（図 2.4.2）の溝部に取り付けることで冷却孔周辺にデバイスを取り付けた状態となる。このパーツも伝熱試験を実施することを考慮し供試体の土台部分と同じ ABS 樹脂で作成している。

##### (a)BASE

何も流れ制御デバイスを付けていない形態であり、供試体の土台部分と組み合わせると単純円筒型の冷却孔を有するモデルとなる。デバイスを取り付けていない形態と比較を行うために製作を行った。

##### (b)3D Device1

上記の寸法のようにデバイスの設計パラメータを設定したが、デバイスは冷却孔に半分重なる形態となっている。

## (c)3D Device2

デバイスの形状は 3D Device1 と同じであるが、冷却孔からの距離が 3D Device1 とは異なっている。

## (d)2D Device

二次元形状のデバイスは広義に解釈すれば Trench と呼ばれる形態にも見ることができるために、予め行った CFD ではあまり多くの検査を行ってはいない。2D Device は過去の Trench と同様にフィルム効率は高くなると予想されるが、空力損失は高くなると考えられる。この形態と 3D デバイスを比較することで、三次元形態と二次元形態で発生する現象を比較することを目的としている。

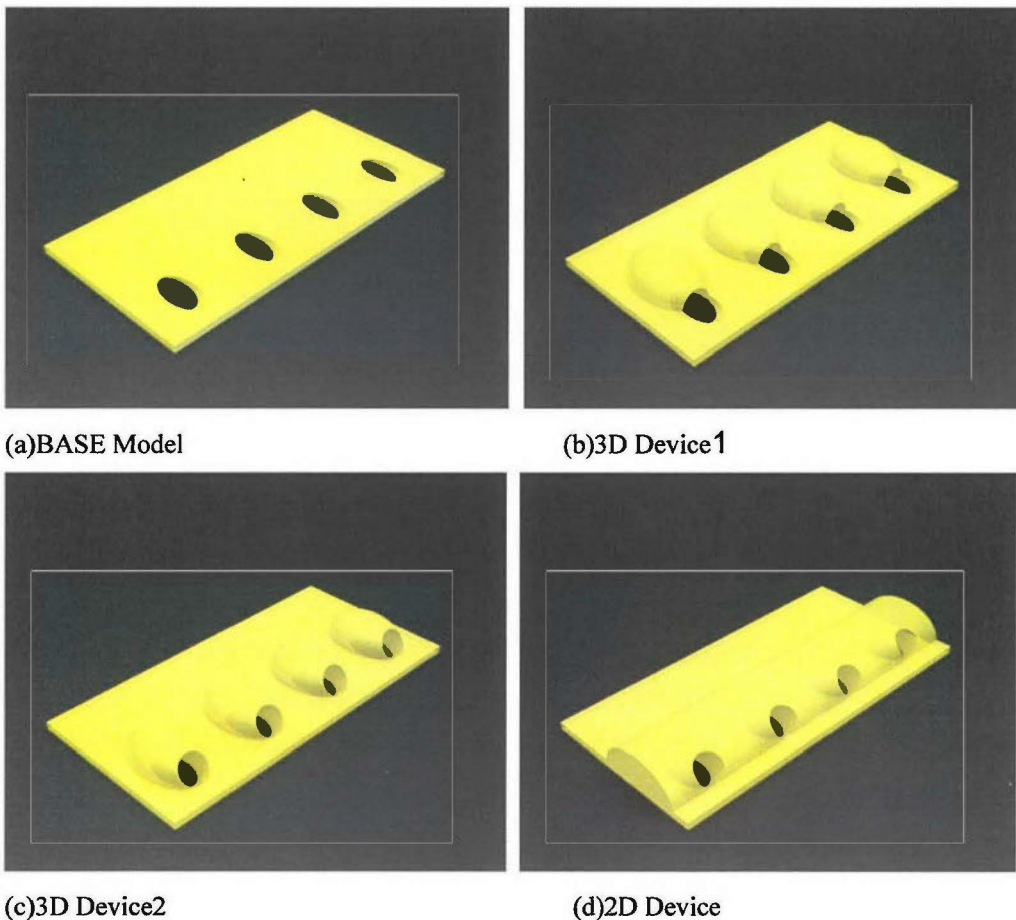


図 2.4.6 三次元デバイス形状

## 2.4.2.3 流れ制御のコンセプト

図2.4.7には、本節で取り上げる流れ制御デバイスのコンセプトを示す。今回用いる流れ制御デバイスでは、突起上を通過した主流が吹き降ろす効果を狙ったものであり、二次空

気に吹き降ろしの空気を衝突させることで、二次空気が壁面に付着するのを促進できるようにした。

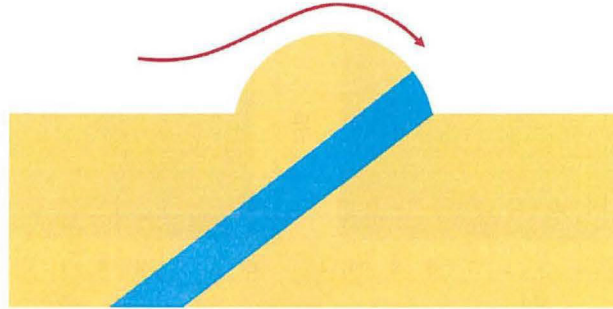


図 2.4.7 流れ制御のコンセプト

### 2.4.3 壁面・空間フィルム効率

図2.4.8と図2.4.9には実験で得られた壁面フィルム効率分布を示す。BR=0.5については、BASEはスパン方向にフィルム効率の拡散は比較的に見られないが、流れ方向(x方向)へのフィルム効率分布の広がりが見られる。一方でデバイスを取り付けた形態では壁面フィルム効率分布がスパン方向へ拡散している様子が分かる。しかし、スパン方向への拡散が見られる一方でフィルム効率の流れ方向の減衰はBASEに比べると著しく、冷却孔から吹き出した二次空気のミキシングがデバイスを取り付けた形態では強くなっていると考えられる。デバイスを取り付けた形態を比較すると、2D Deviceのフィルム効率分布の拡散は他のデバイスを取り付けた形態よりも大きくなっている。2D Deviceは従来のフィルム冷却の研究で取り上げられたTrenchと呼ばれる形状と似ていると考えられ、デバイスをTrenchと同様に見なすと、デバイスの下流側は剥離領域が形成されていると考えられる。この領域には二次空気が拡散するために2D Deviceではフィルム効率分布の拡散が大きくなったと考えられる。

BR=1.0に関しては、BR=0.5の場合と比較するとフィルム効率分布の広がりが見られない。また、コンターが見られる領域はフィルム効率の値自体が低くなっている。BASE形態に関しては、BR=0.5と比較するとフィルム効率分布の値自体は低くなっているが、流れ方向に低いフィルム効率分布を確認できる。これは吹き出し比の増加に伴い、二次空気が壁面からlift-offすることに起因する。3次元形状のデバイスはBASEと比較してもフィルム効率分布の広がりが見られなくなっている。そのため、3次元形状のデバイスは吹き出しの増加に伴い二次空気を壁面から剥離させるのを促進させていると考えられる。一方で、局所的ではあるが3次元形状のデバイスは冷却孔付近でスパン方向へ広いフィルム効率分布を確認できた。二次元形状のデバイスは3次元形状のデバイスに比べるとフィルム効率分布の広がりが見られ、BASEよりもフィルム効率の値自体が高くなっている。さらに、冷却孔付近ではフィルム効率分布は低い値を示しているが、下流側に進むにしたがってフィルム効率分布のスパン方向への広がりが大きくなっていることが分かる。そのため、冷却孔から吹き出した二次空気は下流側で再付着を起こしていると考えられる。



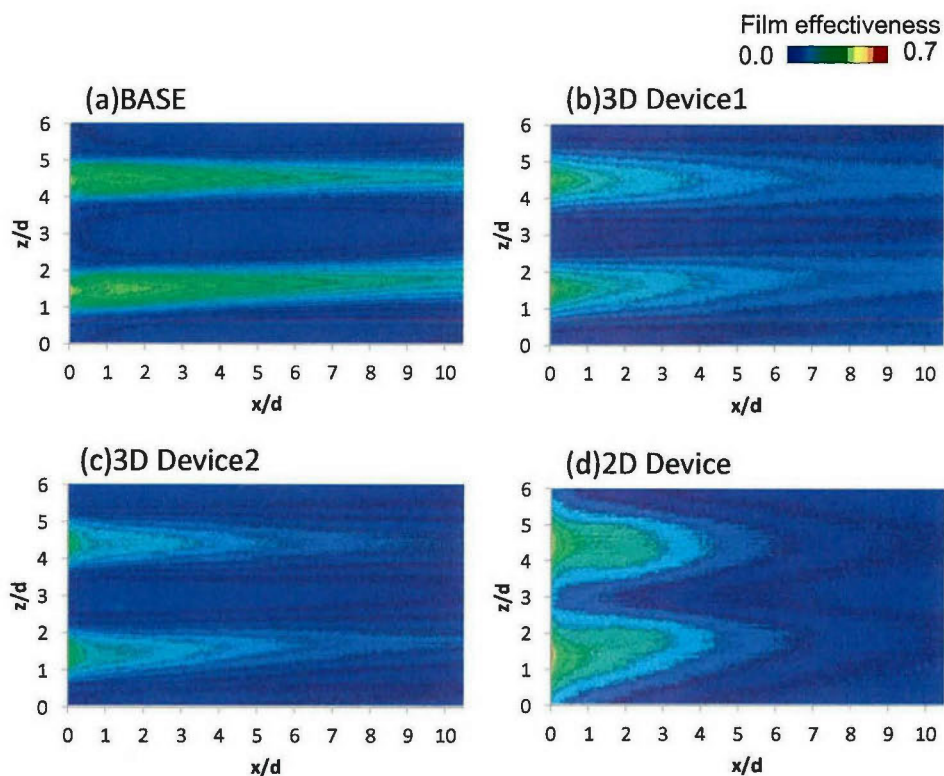


図 2.4.8 壁面フィルム効率 ( $BR=0.5$ )

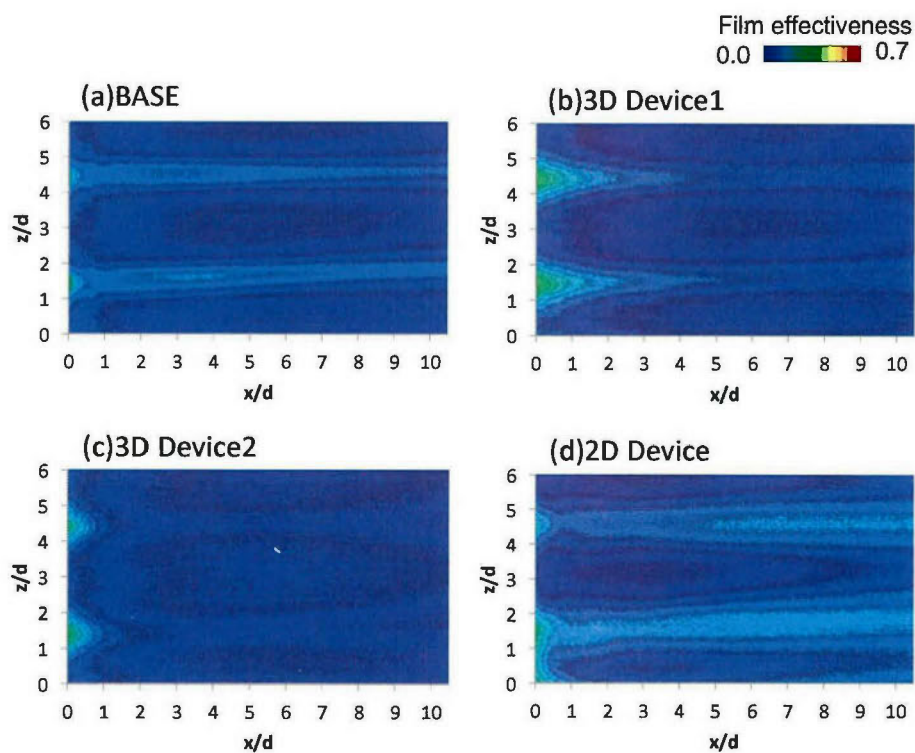


図 2.4.9 フィルム効率分布 ( $BR=1.0$ )

図 2.4. 10 には実験によって得られたスパン方向平均フィルム効率を示す。BR=0.5 においては、2D Device は冷却孔出口付近でフィルム効率が BASE よりも高くなっていたがそれ以外の形態に関してはフィルム効率がどの領域においても BASE よりも下回っている様子が観察されたが、下流側でのフィルム効率の減少率が高くなっていることもわかる。これは、2D Device においては、デバイス起因の流れ場により主流と二次空気の混合作用が比較的強いためであると考えられる。BR=1.0 においては、二次空気の壁面法線方向の運動量が高くなるために二次空気が lift-off し、スパン方向平均フィルム効率は全体的に低い値となった。BASE とデバイスを取り付けた形態を比較すると三次元形状のデバイスを取り付けた場合は BASE と同等のフィルム効率となったが、2D Device に関しては BASE のフィルム効率を大幅に上回っている様子がわかる。

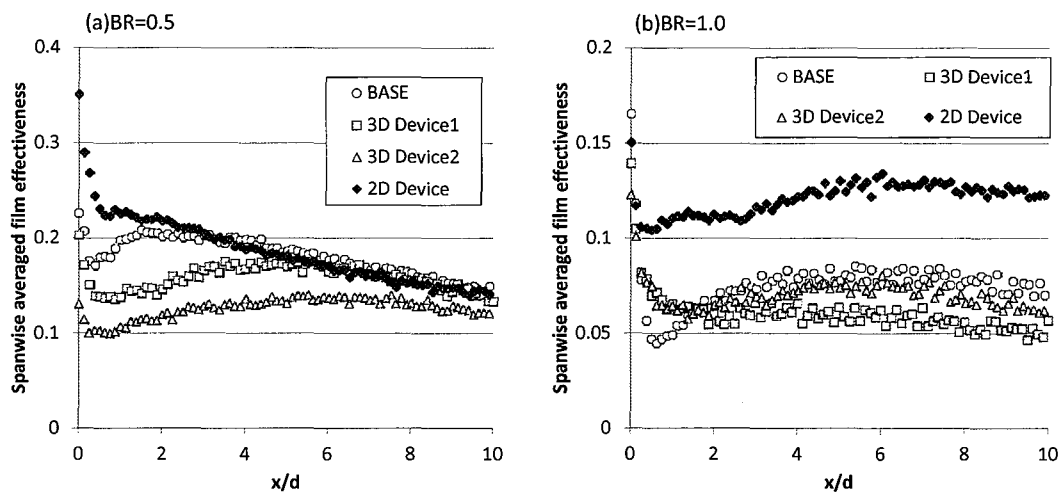


図 2.4. 10 スパン方向平均フィルム効率：(a)BR=0.5, (b)BR=1.0

図 2.4. 11 には面平均したフィルム効率分布を各吹き出し比毎に示す。各面平均のフィルム効率は BASE で得られたフィルム効率の面平均値で無次元化している。フィルム効率を面平均した領域はスパン方向へ 2 ピッチ、 $0 < x/d < 10$  の領域である。BR=0.5 に関しては、デバイスを取り付けた形態ではフィルム効率の面平均値は BASE よりも低い値を示していた。デバイスを取り付けた形態に関しては、冷却孔近傍ではスパン方向へフィルム効率分布が広がることによりフィルム効率の値は BASE よりも高くなると考えられるが、下流側でのフィルム効率の減衰が起こるのに伴い面平均のフィルム効率の値は BASE よりも低くなっていると考えられる。BR=1.0 では 3D Device2 のフィルム効率は特に BASE よりも低くなり、デバイスを取り付けることによるメリットは見られなかった。一方で 2D Device に関しては下流側でフィルム効率分布が広がることにより BASE よりも面平均フィルム効率は高い値を示していた。

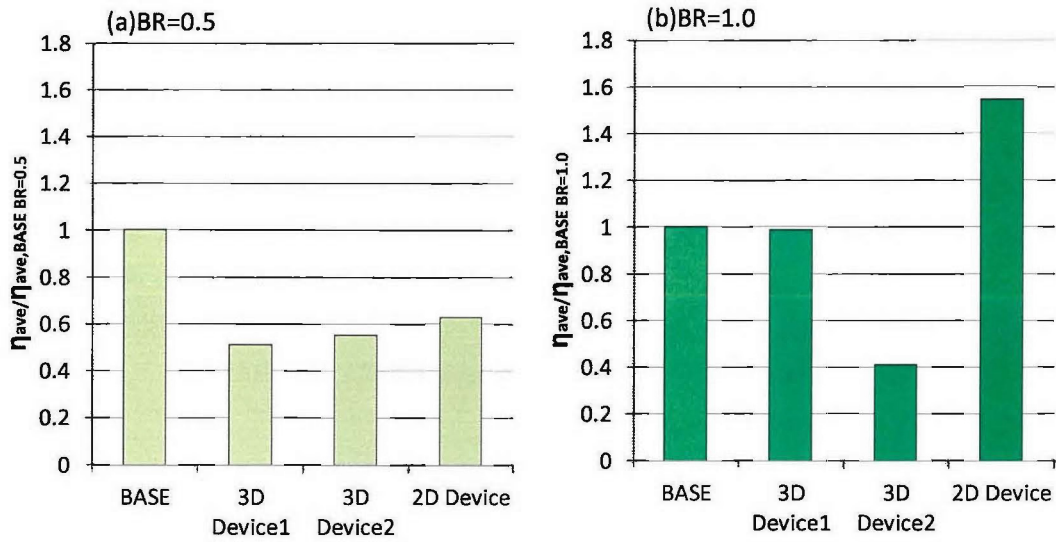


図 2.4.11 面平均フィルム効率

図2.4.12には $x/d=5.0$ で計測した無次元温度分布を示す。 $BR=0.5$ ではBASEでは無次元温度のコアが他のデバイスを取り付けた場合より高い値を示していることが分かる。BASEは壁面フィルム効率分布の結果よりスパン方向へのフィルム効率分布の広がりが見られなかったが、無次元温度分布もスパン方向への広がりが見られない。一方でデバイスを取り付けた形態に関してはBASEと比較すると無次元温度のコアの値が低くなっていることが分かる。これは主流と二次空気のみキシングが促進されたことに起因する。スパン方向への拡散性を比較すると3D Device1, 3D Device2と比較すると高い無次元温度の領域が2D Deviceは壁面方向へ付着していることが分かる。

$BR=1.0$ では、 $BR=0.5$ と比較すると無次元温度の領域は壁面法線方向へ離れていることが分かる。無次元温度のコアの値自体に関しては $BR=0.5$ と同様にBASEでは高い無次元温度の値を示しているが、他の形態ではコアの値は低くなっている。このことから吹き出し比の増加では無次元温度のコアに与える影響は少なく、デバイスを取り付けることに起因して主流と二次空気のみキシングが強められることが分かる。温度場の付着性に関しては三次元形状のデバイスを取り付けたものは壁面法線方向への温度場の剥離が見られるが、三次元形状のデバイスに関しては温度場壁面へ付着していることが分かる。

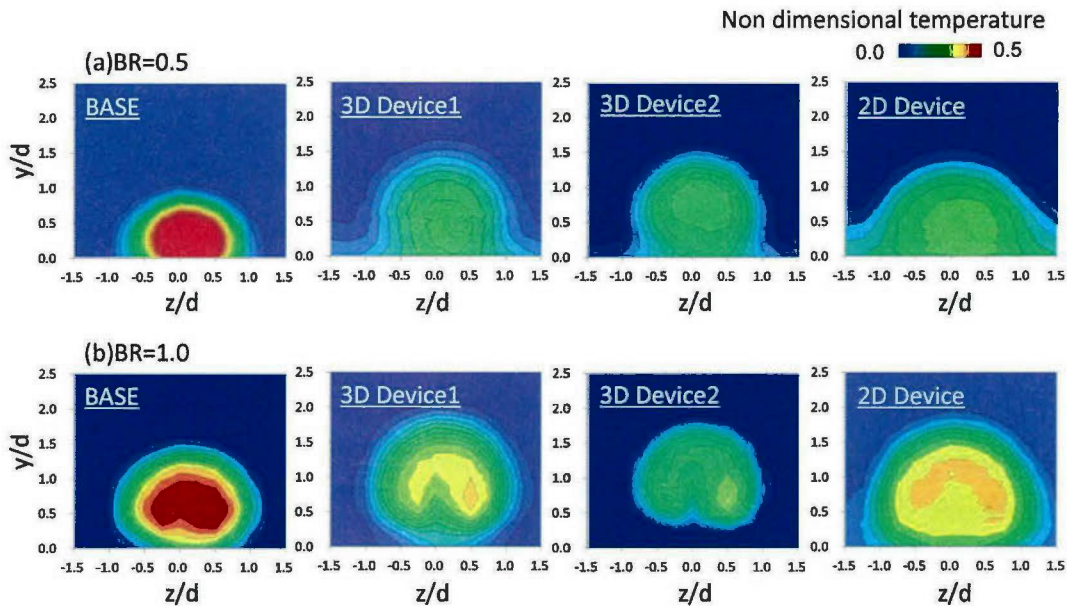


図 2.4.12 空間温度場

#### 2.4.4 全圧損失係数

図 2.4.13 には実験で得られた全圧損失係数分布を示す。各形態毎に全圧損失係数分布を見ると、BASE では no injection の流れ場では壁面付近に全圧損失係数の高い領域が観察できる。これは、入口境界層の影響を計測によって捉えたものである。BR=0.5 では吹き出しを行うのに伴い全圧損失係数の分布が壁面法線方向へ広がる様子が分かる。BR=0.5 では吹き出した二次空気が壁面付近で主流と混合することにより高い全圧損失係数の値を示している。BR=1.0 では冷却孔から吹き出した二次空気の運動量が高いために二次空気が BR=0.5 の場合よりも壁面から離れた位置に存在すると考えられ、それに伴い全圧損失係数の高い領域は BR=0.5 の場合よりも高さ方向に高い領域にまで広く分布するようになっている。BR=0.5 と比較すると全圧損失係数の値自体は低い領域が多くなっており、壁面付近の全圧損失係数分布は BR=0.5 よりも壁面付近に寄せられる形となっていた。三次元形状のデバイスを取り付けた形態では両デバイスともに同様の全圧損失係数分布を確認することができた。no injection の流れ場では上流側に位置しているデバイスの影響を受けるために全圧損失係数の値が高くなっている領域が確認できる。全圧損失係数が高くなっている領域はデバイスの存在しているセンターラインの位置ではなく、デバイスの両サイドの位置となっていた。吹き出しを行った場合は BASE と同様に全圧損失係数分布は冷却孔の設けられているセンターの位置で特に高い値を示しているが、両サイドの全圧損失係数の高い領域に変化は見られなかった。BR=1.0 の場合も BASE と同様に全圧損失係数の分布はセンター付近で法線方向へさらに高い位置になる。しかし BR=0.5 の場合とは異なり両サイドの位置の全圧損失係数の分布は壁面方向へ縮小する傾向が見られた。二次元形状のデバイスでは no

injection の場合、デバイスがスパン方向へ二次元的に広がっているために全圧損失係数分布はデバイスの高さと同じ領域まで広がりを見せた。二次空気の吹き出しを行う場合、中心付近の全圧損失係数分布は壁面法線方向へ高くなり、センター付近の領域では全圧損失係数の値自体も高くなっている。他の領域に関しては全圧損失係数分布に特に変化は見られない。吹き出し比が高くなると全圧損失係数分布はさらに壁面法線方向へ高い位置に上昇する。一方で中心付近から離れた領域では全圧損失係数分布は壁面付近へ縮小する傾向が見られた。二次元形状のデバイスは他の形態に比べると、全体的に高い全圧損失係数の値が見られるうえ、全圧損失係数 $>0$  の領域が計測面に広く分布しており空力損失は特に高くなっていることが分かる。従って、空力損失の面ではデバイスを取り付けた形態ではデメリットが存在することが分かる。空力損失を発生させる原因としては、デバイスから発生する渦構造と、それに伴い強められた二次空気の CRVP と考えられる。(詳細は三次元流れ場の計測結果で示す)

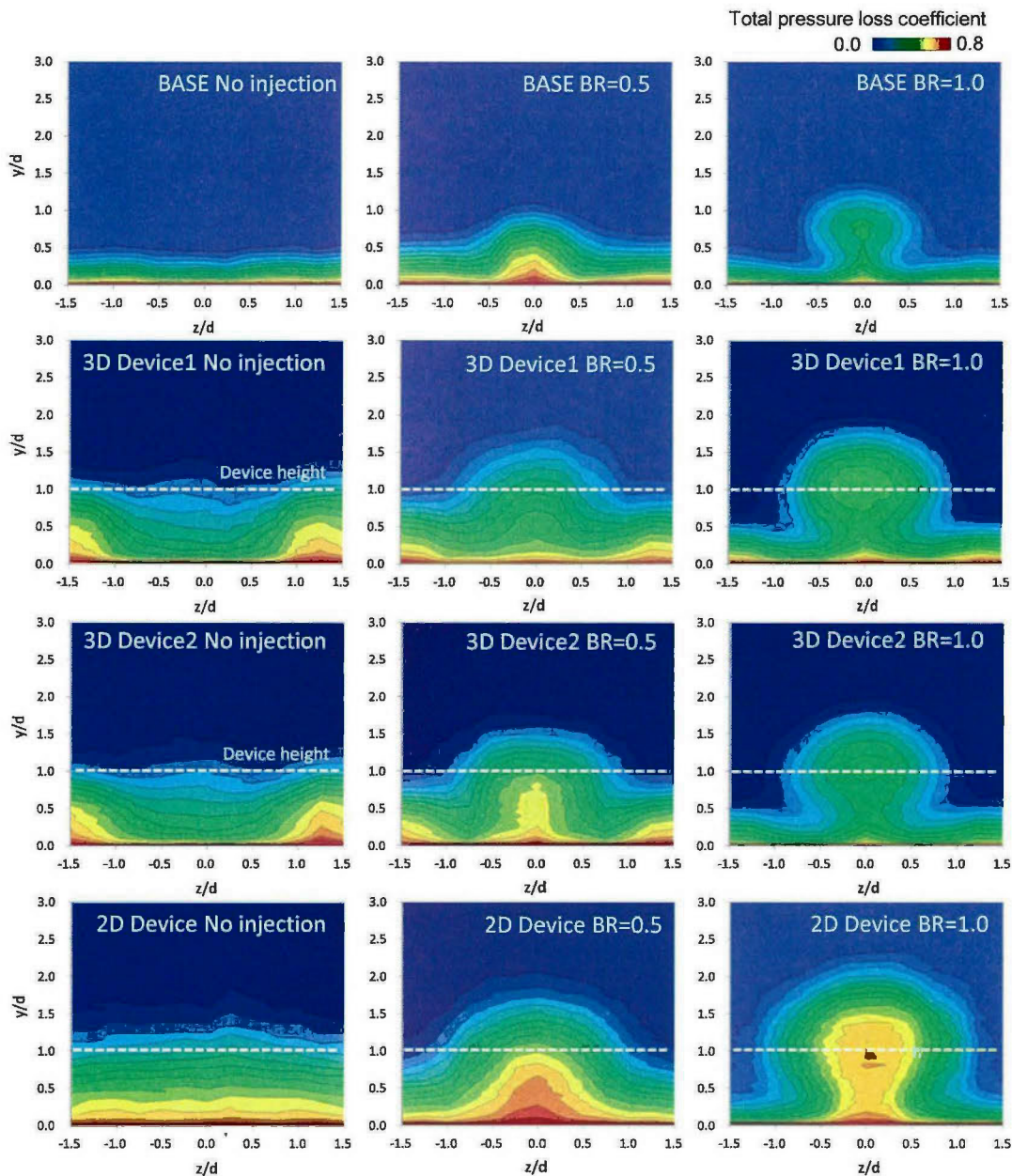


図 2.4.13 全圧損失分布

図 2.4.14 にはスパン方向平均の全圧損失係数を示す。BR=0.5 では高さ方向に滑らかに全圧損失係数の値が上昇する形となっている。平均値を見ると、デバイスを取り付けた 3 形態では全圧損失係数の値自体に大きな変化は見られておらず全圧損失係数の値はデバイスの形にあまり依存しないことが分かる。BR=1.0 では全圧損失係数の平均値はそれぞれの形態で壁面かなられた位置ピーク値を持つことが分かる。ピーク値の位置は BASE 形態に関しては二次空気の存在位置と一致していると考えられる。しかし、他の形態に監視はデバ

イスの高さを超える位置でピーク値が確認できる。吹き出し比が増加すると平均全圧損失係数の体にはデバイスによる差異が大きくみられるようになっており、三次元形状のデバイスと二次元形状のデバイスでは、二次元形状のデバイスの方が全圧損失係数の値が高くなっている。このことから、三次元形状のデバイスに関しては冷却孔の位置と全圧損失係数の値は関連性が少なくなっており、デバイスのスパン方向の形状によって全圧損失係数の値が大きく変化することが分かる。

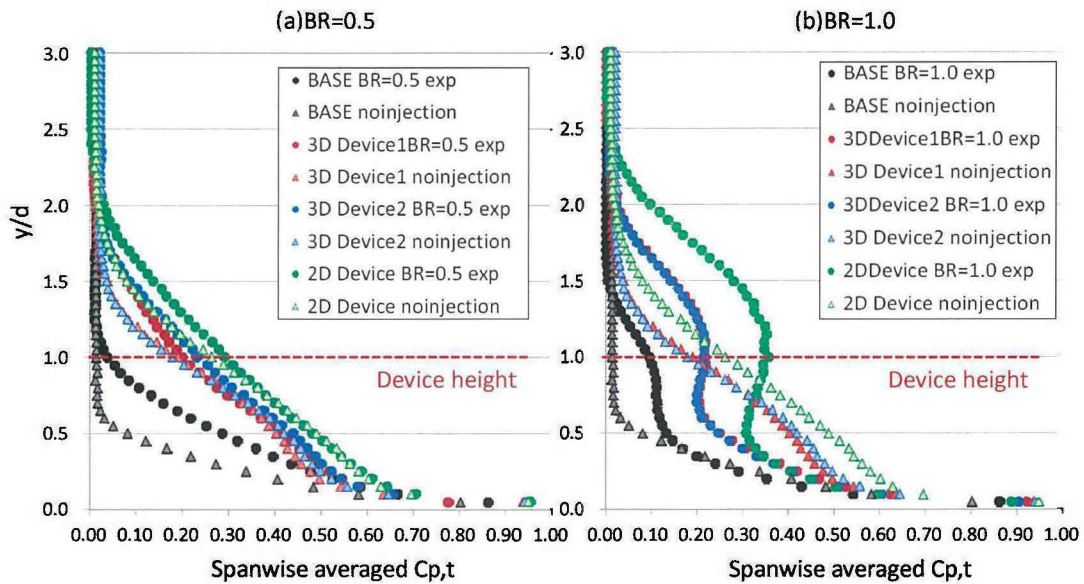


図 2.4.14 スパン方向平均全圧損失係数

図 2.4.15 には面平均した全圧損失係数の値を示す。各値は BASE の no injection の結果で無次元化しておりフィルム冷却を行わない場合の BASE 流れ場と全圧損失係数を比較することを目的としている。全圧損失係数の値を比較すると、吹き出し比と増加に伴い全圧損失係数は単調に増加するわけではなく、吹き出しによって全圧損失の値は上下することが分かる。これは、吹き出した二次空気の挙動によって変化するものと考えられ、吹き出した二次空気が壁面より離れた位置に存在する場合は全圧損失係数の値自体は低くなること分かる。これは三次元形状のデバイスでも同様の知見が得られた。しかし、三次元形状のデバイスを取り付けた場合は吹き出しを何も行わない no injection の場合よりも全圧損失係数の値が低くなる場合が存在した。これは二次空気の吹き出しに伴い、デバイスから発生した渦構造と二次空気が干渉することで損失の低減効果があることが分かる。二次元形状のデバイスではほかの形態とは異なり、単調に全圧損失係数の値が上昇することが分かった。

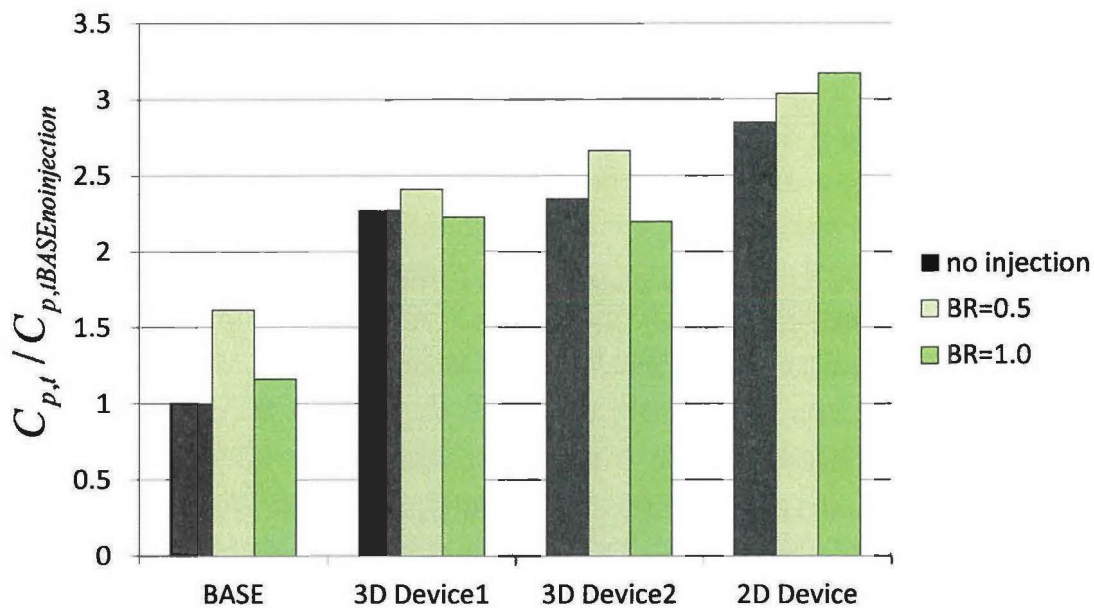


図 2.4.15 平均全圧損失係数

### 2.4.5 三次元流れ場

本研究ではデバイスの取り付けられた流れ場を詳細に観察するためにLDVによる三次元流れの測定を行っている。図 2.4.16 には  $x/d=1.0$  での  $yz$  平面内の無次元速度分布を示している。計測では二次空気の吹き出す挙動を詳細に観察するために全圧損失係数の場合と同様に二次空気の吹き出しを行わない場合の流れ場との比較も行っている。吹き出しを行わない場合、デバイスの形に沿って流れ方向の低速度領域が観察された。三次元形状のデバイスを取り付けた場合は 3D Device1 と 3D Device2 ではわずかに低速度領域の値に差が見られたが、デバイスの外形は同じであるために低速度領域の形状自体は両者での違いは見られなかった。2D Device はデバイスの外形に沿う形に低速度領域が観察される。BR=0.5 の吹き出し比を伴う場合、流れ方向の低速度領域は壁面付近の境界層領域と、(山形になっている部分の) 二次空気が存在している領域に確認できる。二次空気の吹き出しに伴い三次元形状のデバイスの低速度領域の外形は No injection の場合よりは変化が見られなかったが、No injection よりも局所的な流速は低くなっていた。一方で二次元形状のデバイスは No injection の場合と比較すると低速度領域の外形に変化が見られ、山形になっていた。低速度領域の面積自体はデバイスを取り付けることにより BASE より広がっているのはどの形態でも共通して観察することができた。

BR=1.0 の流れ場に関しては、BASE とデバイスを取り付けた形態では変化が見られた。BASE では冷却孔から BR=0.5 の場合よりも高い運動量の二次空気が吹き出す (BR=1.0 では計算上、主流と吹き出す二次空気の流速は等しい) ために流れ方向の低速度領域は全体的に小さくなっている。3D Device1 と 3D Device2 でも、流れ方向の低速度領域は壁面へ向か



う方向へ縮小する形となっており、全体的に主流と同じ流速の領域が増える形となっている。2D Device に関しては流れ方向の低速度領域はスパン方向に  $BR=0.5$  よりも拡大する形となっていた。高さ方向にも低速度領域は縮小するのが観察されたが、デバイスの領域よりも低速度領域が縮小するまでには至らなかった。

図 2.4.17 には  $x/d=5.0$  の領域で流れ方向の無次元速度分布を示す。No injection の場合は、 $x/d=1.0$  の流域での計測結果と同様にデバイスの形状に沿う形で流れ方向の低速度領域が分布していた。 $BR=0.5$  の場合では、二次空気が  $x/d=1.0$  の領域よりも主流とミキシングを起こすために流れ方向の低速度領域は  $x/d=1.0$  の領域よりも全体的に広い形で分布していることが分かる。一方で、 $BR=1.0$  では二次空気が壁面より lift-off するために、 $x/d=1.0$  の場合とは見た目が異なる流れ方向の無次元速度分布を示していた。冷却孔のセンターライン上に位置している円形の低速度領域は壁面から lift-off した二次空気によって形成されている低速度領域と考えられ、 $x/d=1.0$  よりも明確に壁面より離れた低速度の流れ場観察することができた。センターラインの低速度領域のコアの高さを比較すると、BASE と比較してデバイスを取り付けた形態ではコアの大きさ自体が大きく、コアの高さも壁面法線方向より高い位置に分布していた。このことから、コアの面積が大きいため主流と二次空気の混合が起こる領域はデバイスを取り付けた形態では広がっており、コアの高さが BASE よりも高い位置にあることからデバイスを取り付けた形態では BASE に比べると二次空気の壁面からの lift-off を促進する作用がデバイスには存在していることが分かる。

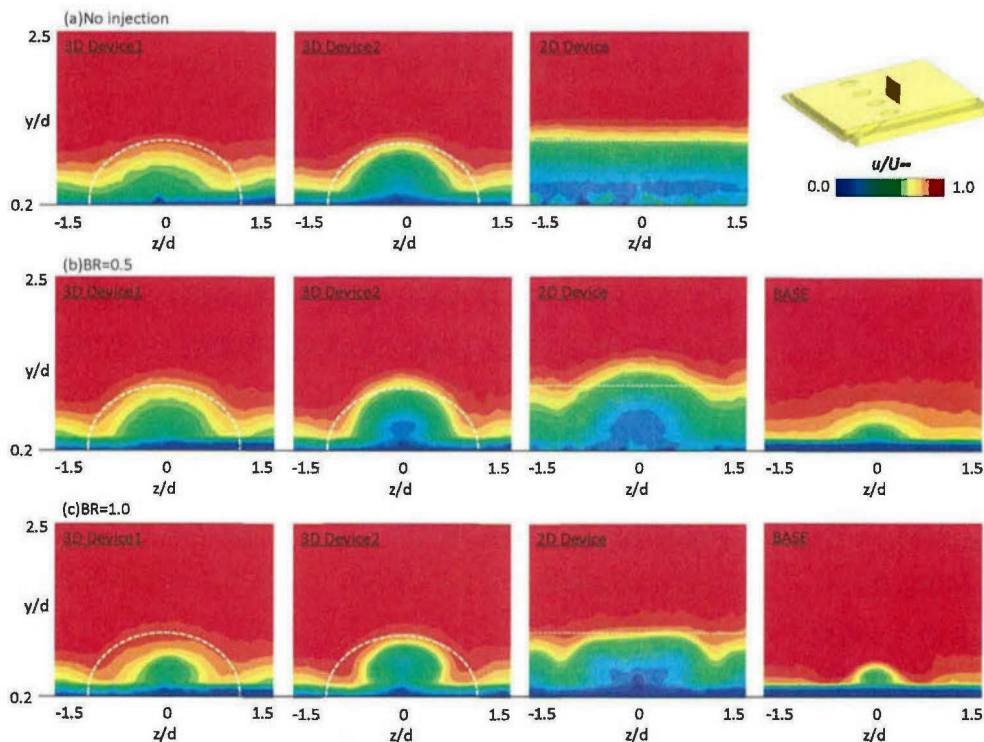


図 2.4.16 無次元速度分布  $u/U_x(x/d=1.0)$

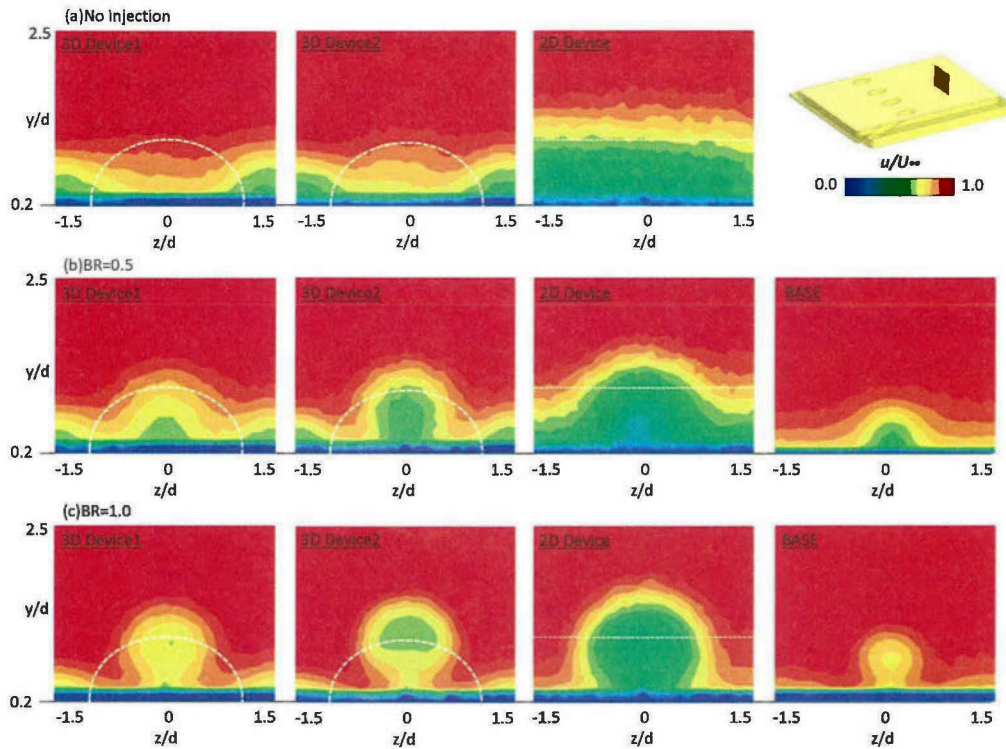
図 2.4.17 無次元速度分布  $u/U_{\infty}(x/d=5.0)$ 

図 2.4.18 には、 $x/d=3.0$ 、 $z/d=0.0$  のラインで取得した流れ方向の無次元流速を示す。No injection の場合、BASE では境界層、デバイスを取り付けた形態に関しては境界層とデバイス下流側の剥離領域によって低速度領域が形成されている。壁面のごく近傍では主流中にトレーサ粒子が十分に入り込まず、十分な計測精度が得られていない可能性がある。低速度領域の最大高さは局所流速が主流流速と等しくなる点を見ると、BASE では  $y/d=1.0$  程度、3D Device1 では  $y/d=1.5$  程度、2D Device では  $y/d=2.0$  程度となっており、デバイスの大きさがスパン方向に広がるに従って徐々に高くなっていることが分かる。二次空気の吹き出しを行った場合、 $BR=0.5$  では No injection と比較すると、二次空気の吹き出しによって形成される低速度領域（図 2.4.18A）が観察され、速度プロファイルは垂直に立っている。同じ吹き出し比でも低速度領域の局所的な流速が異なるのは、冷却孔内部で二次空気の流速が変化したことや、主流と二次空気の干渉によって局所流速が変化したためであると考えられる。 $BR=1.0$  でも、 $BR=0.5$  と同様の傾向を示す低速度領域（図 2.4.18B）が形成されているが、局所的な流速は吹き出し比が  $BR=0.5$  の 2 倍であるために、局所流速も 2 倍程度となった。また、二次空気の吹き出しに伴って、局所流速が主流の 99%程度に達する  $y$  方向の位置は変化が無いことが分かる。

図 2.4.19 には、 $x/d=3.0$ 、 $z/d=-1.0$  のラインで取得した流れ方向の無次元流速を示す。吹き出しが行われていない場合、 $z/d=-1.0$  のラインでも低速度領域が確認され得るが、局所流速

が主流と等しくなる点は 2D Device で  $y/d=1.5$  となっており,  $z/d=0.0$  の場合と僅かに異なっている. 吹き出しを行った場合, この位置での速度プロファイルは BASE と三次元形状のデバイスを取り付けた場合でほとんど一致していた. これは, デバイスを取り付けた形態でも, 二次空気がスパン方向に拡散しなかったために, 境界層による低速領域のみが形成されているためである. それに対して, 2D Device では低速領域が広く形成されている. これは, 二次空気下流側の剥離領域と, 白衣領域内に拡散する二次空気を捉えたものである.  $BR=1.0$  の場合は  $BR=0.5$  の場合とは異なり, 速度プロファイルは殆ど全条件で重なっている様子が確認される.

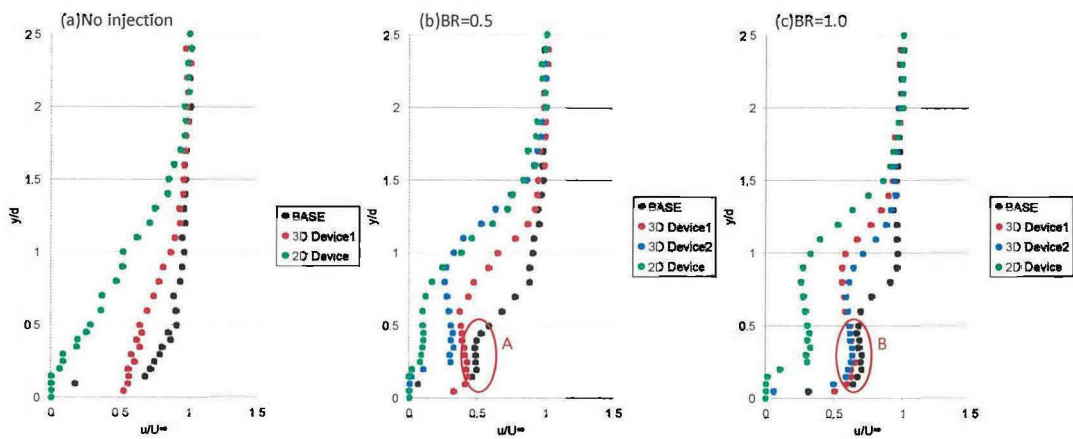


図 2.4.18  $u/U_x$  ( $x/d=3.0, z/d=0.0$ )

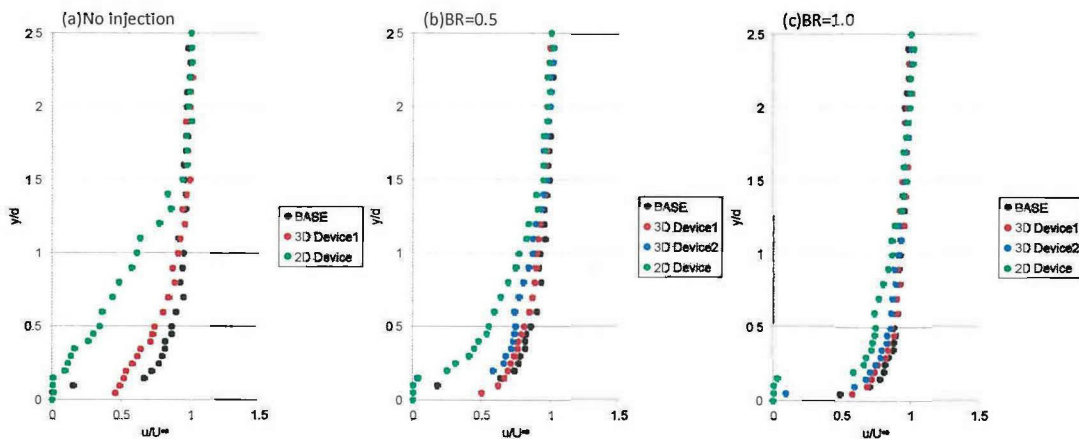


図 2.4.19  $u/U_x$  ( $x/d=3.0, z/d=-1.0$ )

図 2.4.20 には,  $x/d=3.0, z/d=0.0$  のラインで取得した壁面法線方向の無次元流速を示す. 吹き出しを行わない場合は, BASE や三次元形状のデバイスを取り付けた場合は壁面法線方向の流速は殆どゼロに近いが, 2D Device ではデバイスの下流側で剥離領域が形成されてい

るために壁面近傍では正、その上側では負の時間平均速度が計測された。二次空気の吹き出しを行った場合、冷却孔のセンターライン上では、CRVP の中心が存在する。そのため、壁面法線方向の速度は正の値を取っており、BASE, 3次元形状のデバイス, 二次元形状のデバイスの順番に正の速度領域が拡大している様子が確認できる。これは、低速度領域内に二次空気の吹き出しを行うために二次空気が主流に対して貫通していることを示している。BR=1.0 の場合、二次空気の運動量が大きくなるために壁面法線方向の速度はさらに大きな値を取るようになった。

図 2.4. 21 には、 $x/d=3.0$ ,  $z/d=-1.0$  のラインで取得した壁面法線方向の無次元流速を示す。冷却孔のスパン方向から離れた位置では No injection では速度プロファイルに変化が見られなかったが、BR=0.5 以上の吹き出しを行う場合では、速度プロファイルに変化が表れた。これは、センターラインの CRVP は、 $z/d=0.5$  以上では渦の回転により、流体が壁面へ押し下げられるためである。この傾向は BR=1.0 でも同様に確認することが出来る。

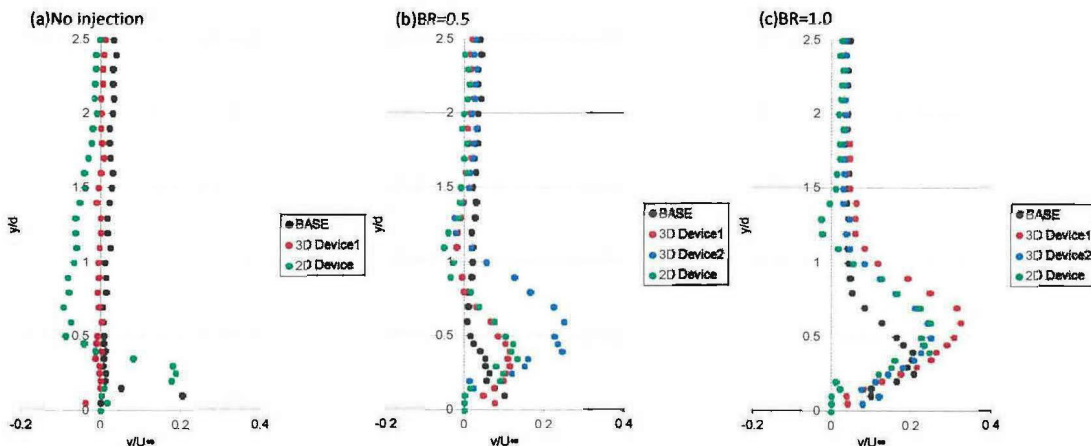


図 2.4. 20  $v/U_x$  ( $x/d=3.0$ ,  $z/d=0.0$ )

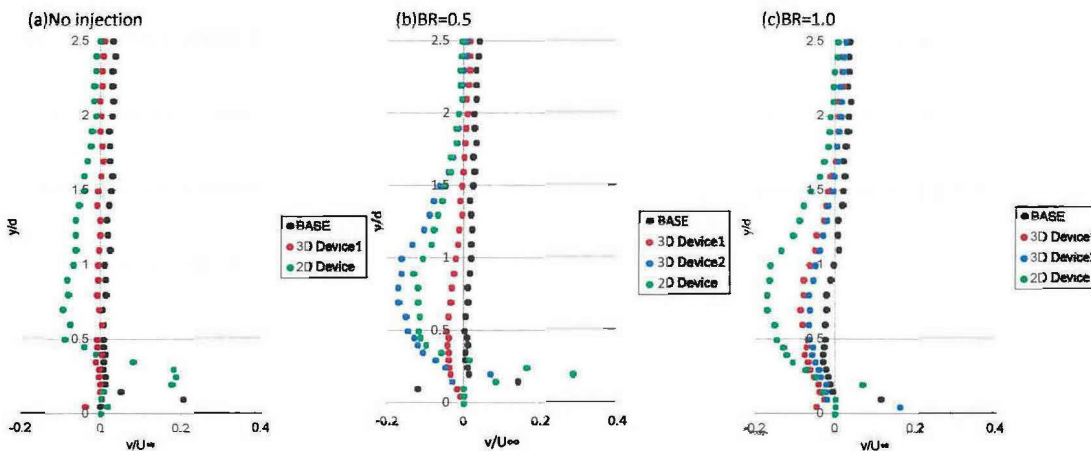


図 2.4. 21  $v/U_x$  ( $x/d=3.0$ ,  $z/d=0.0$ )

図 2.4. 22 には壁面法線方向の速度を主流の入口流速で無次元化した無次元流速分布を示す。図中の負の値で示された流れ場は壁面へ向かう流れ場となっており、二次空気の壁面への付着を促進させる。一方で、正の値で示された流れ場は壁面から離れる流れ場を示すことになり二次空気の壁面への付着性を低下させることとなる。No injection の流れを見ると全体的に負の領域で覆われていることがわかる。この領域はデバイス起因の流れ場しかとらえられない領域であるため、デバイス単独での流れ場は主流を壁面へ向かう方向へ導いていることが分かる。負の領域の大きさに関しては 3D Device1, 3D Device2, 2D Device の順に増大している。しかし、フィルム効率自体は 3D Device1 と 3D Device2 では 3D Device1 の方が高い値を示しているため、負の領域の大きさとフィルム効率高さに強い関連性は無いと考えられる。吹き出しを行った場合  $BR=0.5$  では壁面付近に正の方向の無次元速度が観察できた。これは、二次空気の吹き出しに伴う製の速度を表しており、二次空気が壁面から離れる様子を示している。BASE と非比較すると、デバイスを取り付けた流れ場では正の方向の流速が BASE よりも比較的高い値を示しておりデバイスを取り付けることにより二次空気の lift-off 自体は促進されたと考えられる。しかし、デバイスを取り付けた形態では、依然として負の領域が広くみられており、 $x/d=1.0$  の領域では lift-off が促進されたとしても、デバイスに起因する壁面に主流を向かわせる流れ場により二次空気が壁面から lift-off するのを防止していると考えられる。

$BR=1.0$  の流れ場では中心付近の壁面から離れる方向の無次元速度の値が高くなっており、デバイスを取り付けることにより促進された二次空気の lift-off 促進効果により二次空気は壁面から lift-off し易くなっていると考えられる。この際、主流を壁面へ押し下げる効果よりも二次空気の付着性を低下させる効果が打ち勝つことにより二次空気の lift-off が発生していると考えられる。そのため、無次元速度が負の領域を突き破る形で正の領域が存在していることが分かる。

図 2.4. 23 にはさらに下流側での壁面法線方向の無次元速度分布を示す。No injection の流れ場では孔の領域でも二次空気を壁面へ付着させる効果が見られ、速度の負の領域が広がっていた。 $BR=0.5$  の場合、デバイスを設けた形態では lift-off が促進される効果により正の無次元速度領域は下流側で広がりを見せている。この領域では三次元形状のデバイス同士でも明確に無次元速度の値に差が見られている。このことから、冷却孔とデバイスの位置関係により二次空気の lift-off 促進効果の強さが決まっていると考えられ、冷却孔とデバイスの流れ方向の位置関係が一致している 3D Device2 と 2D Device は中心付近の無次元速度が高い傾向は変化が見られず、3D Device1 と 3D Device2 では流れ方向の冷却孔とデバイスとの位置関係が異なるために lift-off の促進効果に差が見られることが分かる。デバイスと冷却孔が近い位置に位置している三次元形状のデバイスと二次元形状のデバイスは中心付近の無次元速度が大きいことからデバイスと冷却孔の位置を近づけることにより lift-off の促進効果が表れてくると考えられる。

吹き出し比が増加した場合、 $x/d=1.0$  の平面で計測を行った時と同様に二次空気の運動量

が高くなるために壁面から離れる方向へ無次元速度は高くなっていることが分かる。デバイスを取り付けた形態と、取り付けていない形態を比較した場合、無次元速度が高い領域はデバイスを取り付けた形態の方が大きくなっているためにデバイスを取り付けた方が二次空気の lift-off を促進していることが  $BR=0.5$  の場合と同様に観察することができる。センターラインの正の無次元速度の領域の両サイドには負の速度領域も同時に存在しているが、フィルム効率はこの場合は低い値を示していたためこの負の速度領域は二次空気の壁面への付着を促進することはできない流れ場であることが分かる。2D Device に関しては、 $x/d=1.0$  の領域では正の速度場が負の速度場を貫通するような速度分布が見られたが、下流側では負の速度分布が正の速度分布を覆う形となっている。3D Device2 ではこのような傾向は見られなかったことから、冷却孔の位置関係で lift-off の促進効果が見られたとしても、2D Device はデバイスを起因とする、主流を壁面へ押し下げる効果により吹き出した二次空気の再付着を促進させ、 $BR=1.0$  では壁面フィルム効率が BASE よりも高い値を示したと考えられる。

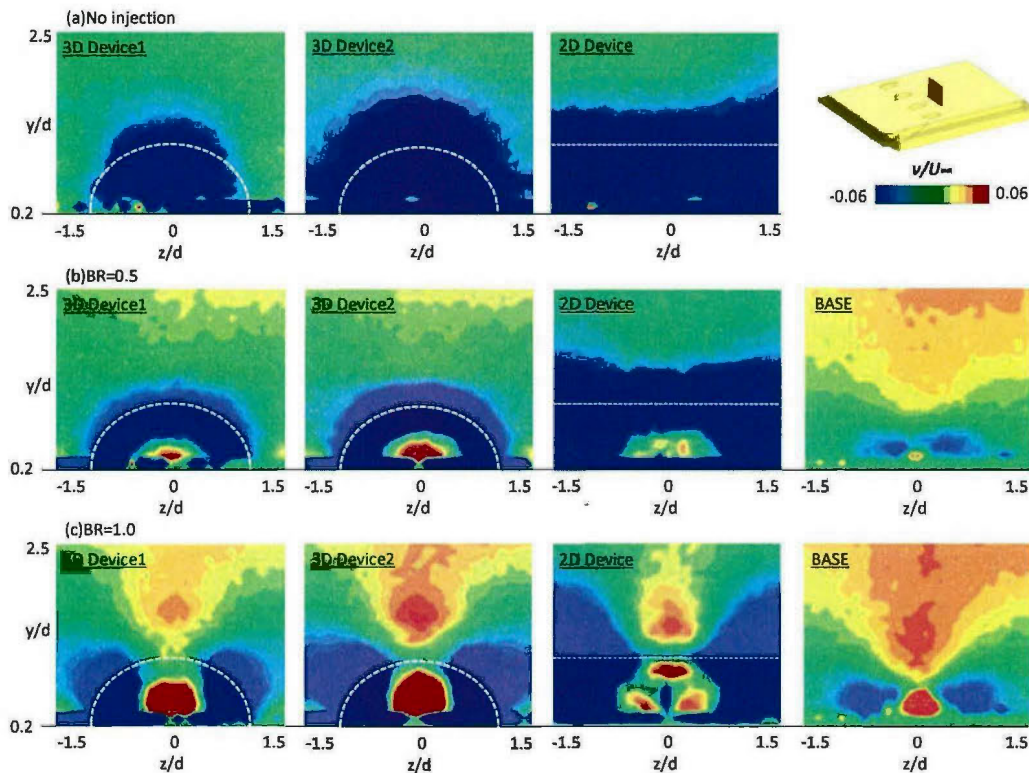


図 2.4.22 無次元速度分布  $v/U_{\infty}(x/d=1.0)$

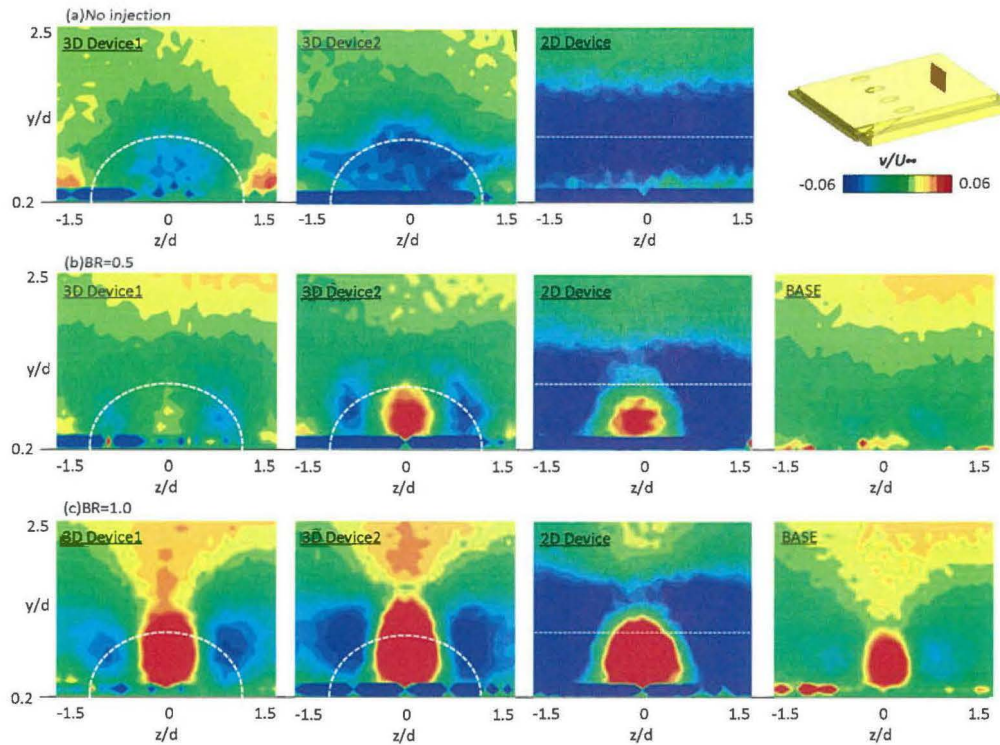
図 2.4.23 無次元速度分布  $v/U_\infty(x/d=5.0)$ 

図 2.4.24 には、スパン方向の無次元速度分布を示す。この図では図中の右側に向かう流れを正、図の左側に向かう流れを負としており、主に大まかな渦構造を捉えるために計測を行った。また、図中には計測で得られた速度から算出した二次流れベクトルも同時に記載している。No injection の流れ場では二次流れベクトルの向きから壁面付近へ向かう流れとなっていることが分かるが、それと同時に主流は三次元形状のデバイスの両サイドを流れて下流側に向かうために冷却孔の中心付近による形となっている。二次元形状のデバイスではそのような流れ場が存在しないために実験装置に起因した流れ場が見られる。吹き出しを伴う場合、3D Device2、2D Device、BASE では CRVP の発生が観察できる。特に、2D Device では無次元速度の値が高い値を占めているために強い CRVP が発生していることが分かる。一方で 3D Device2 と BASE でも CRVP の発生は観察することができるが 2D Device ほどの強さは持っていない。しかし BASE と 3D Device2 を比較すると、3D Device2 の方が強い CRVP の速度成分が確認できる。従って、デバイスを取り付けることによる lift-off の促進効果とは CRVP を強める効果であることが伺える。一方で 3D Device1 は強い CRVP の速度成分はほとんど見られなかった。

BR=1.0 では BR=1.0 よりも顕著に CRVP のスパン方向の速度成分が大きくなっていることが分かる。この場合三次元形状のデバイスは両者とも似たような CRVP を示しており、二次空気の lift-off が促進されてしまうと考えられる。一方で 2D Device は高いスパン方向の無

次元速度成分が 2 つ確認することができる。これにより、二次元形状のデバイスでは三次元形状のデバイスよりも強く、大規模な渦構造をデバイスで発生させることが分かった。

図 2.4. 25 にはさらに下流の領域でのスパン方向の無次元速度分布を示す。この計測面では  $x/d=1.0$  と同様な無次元速度分布が得られているが、発達した CRVP が形成された跡が見られている。特に  $BR=1.0$  ではどの形態でも CRVP が発達している様子が見られるが、デバイスを取り付けた形態では CRVP のスパン方向の速度成分が BASE よりも強くなっており、デバイスを取り付けることにより促進された CRVP が二次空気の壁面からの lift-off を促進していることが分かる。

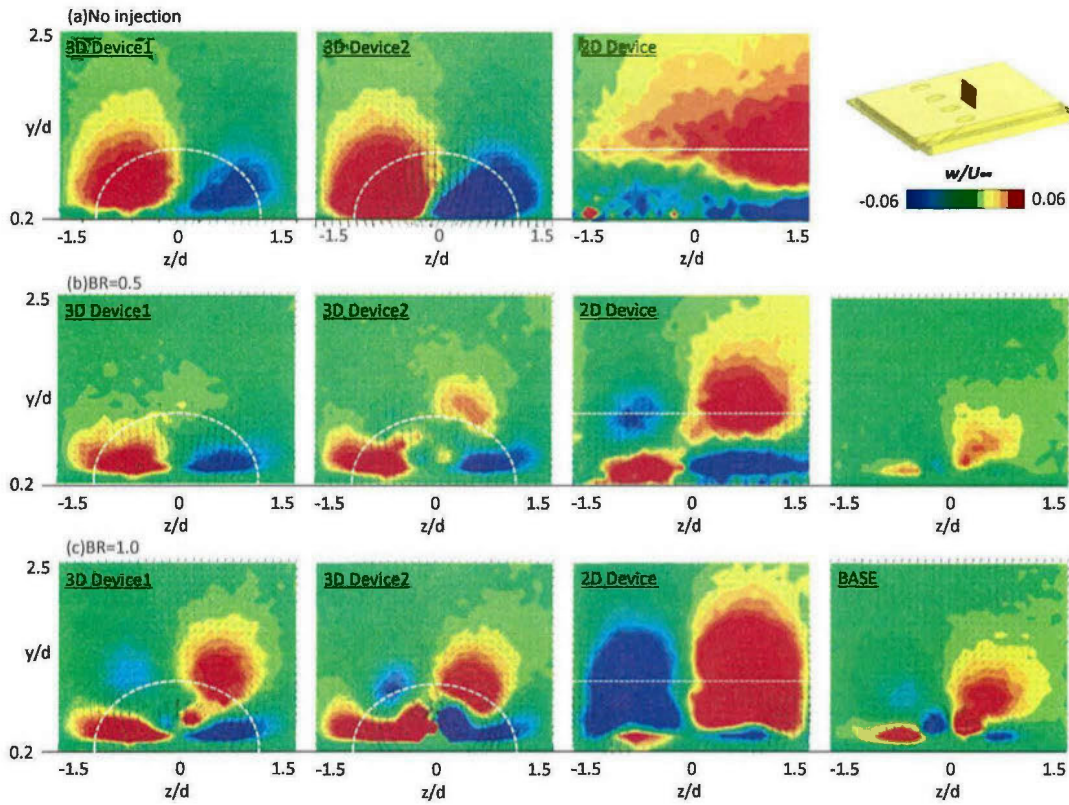


図 2.4. 24 無次元速度分布  $w/U_x(x/d=5.0)$



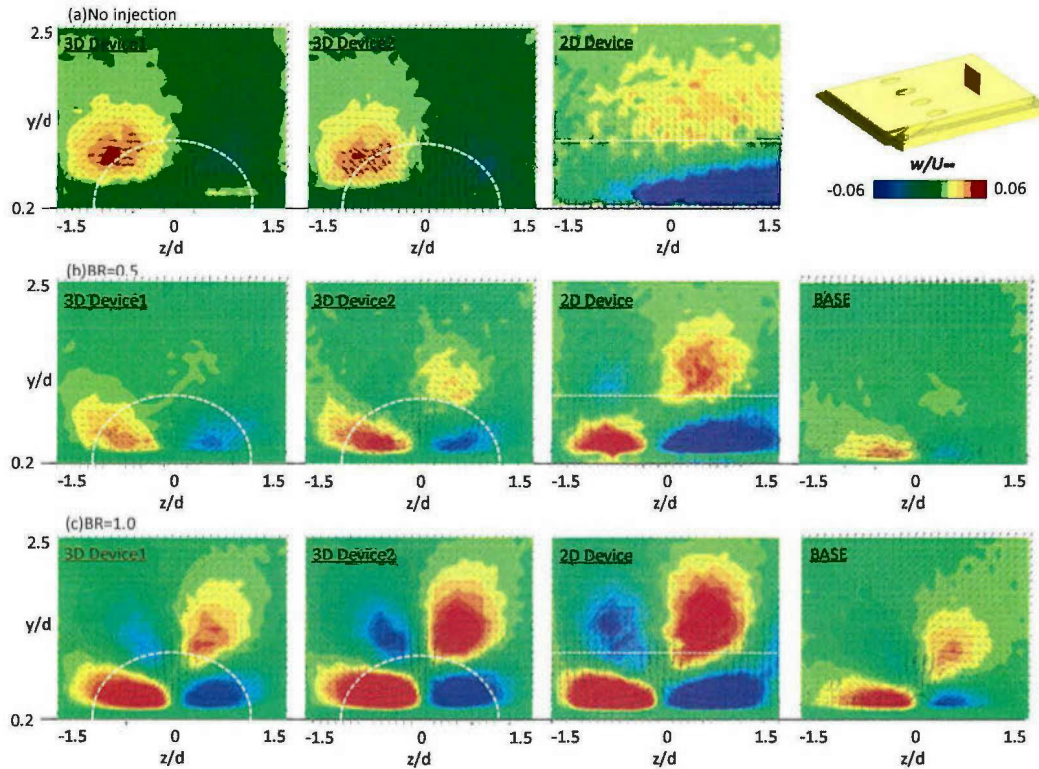
図 2.4.25 無次元速度分布  $w/U_\infty(x/d=5.0)$ 

図 2.4.26 には流れ方向の速度の変動を調査するために流れ方向の速度成分の速度変動 RMS を示す。No injection の流れ場の場合、高い RMS 領域はデバイスの直下に位置していた。二次元形状のデバイスは他のデバイスとは傾向が異なっており、デバイスの高さの位置で高 RMS コンターを見ることができた。二次空気の吹き出しを行った場合、 $BR=0.5$  では RMS 領域に変化が見られた。 $BR=0.5$  では三次元形状のデバイスを取り付けた形態では両者ともに RMS は RMS の高い領域が縮小している。これは、三次元形状のデバイスから発生する流れ場と、二次空気の吹き出しによる干渉で RMS の高い領域が減少したと考えられる。 $BR=1.0$  の場合、三次元形状のデバイスを取り付けた形態では、三次元形状のデバイスの形態に関係なく高 RMS 領域は壁面付近で観察することができない。これは、主流と吹き出した二次空気のミキシングしている領域を表していると考えられる。2D Device は No injection,  $BR=0.5$  と吹き出しが大きくなるにしたがい、高 RMS 領域は減少しており、主流とデバイスに起因する流れ場の干渉により高 RMS 領域は変化を見せることが分かる。

図 2.4.27 には、さらに下流側の領域における流れ方向の速度成分の無次元速度変動 RMS を示す。RMS の比較的高い領域はデバイスを設けた形態ではデバイスの外形と一致しており、デバイスを取り付けることで下流側は乱流化され高い RMS 領域を発生させている。また、デバイスの高さや外形とは無関係に、デバイスの高さよりも高い位置で高い RMS 領域を確認することができる。二次空気のせん断領域で高い RMS 値を表していると考えられる。

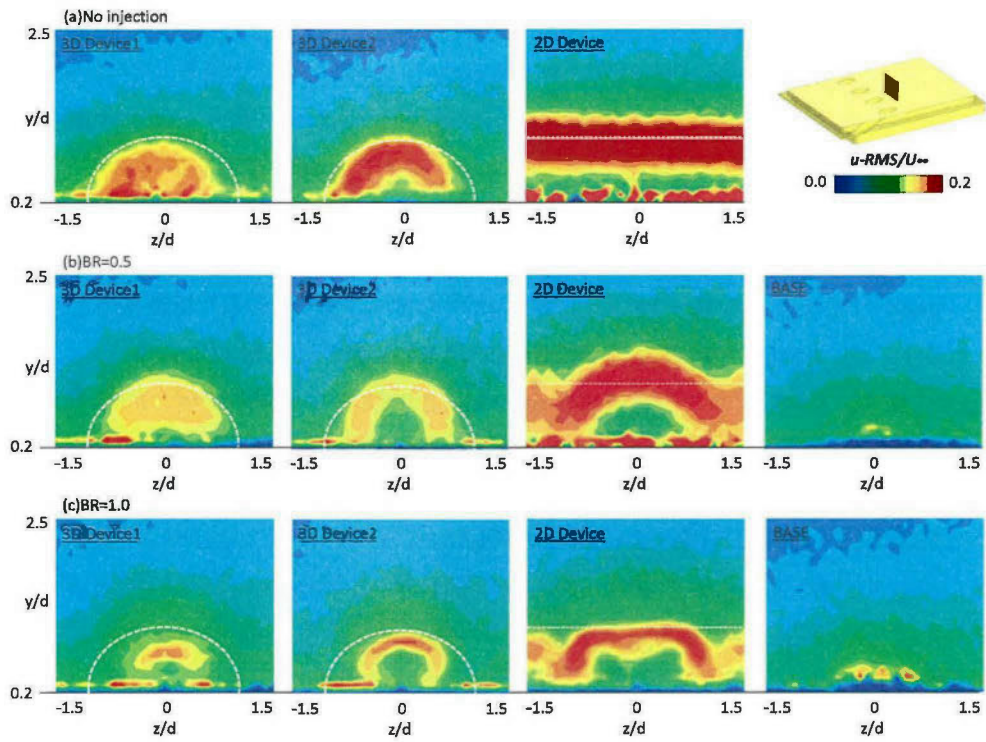


図 2.4.26 無次元速度変動 RMS  $u-RMS/U_\infty(x/d=1.0)$

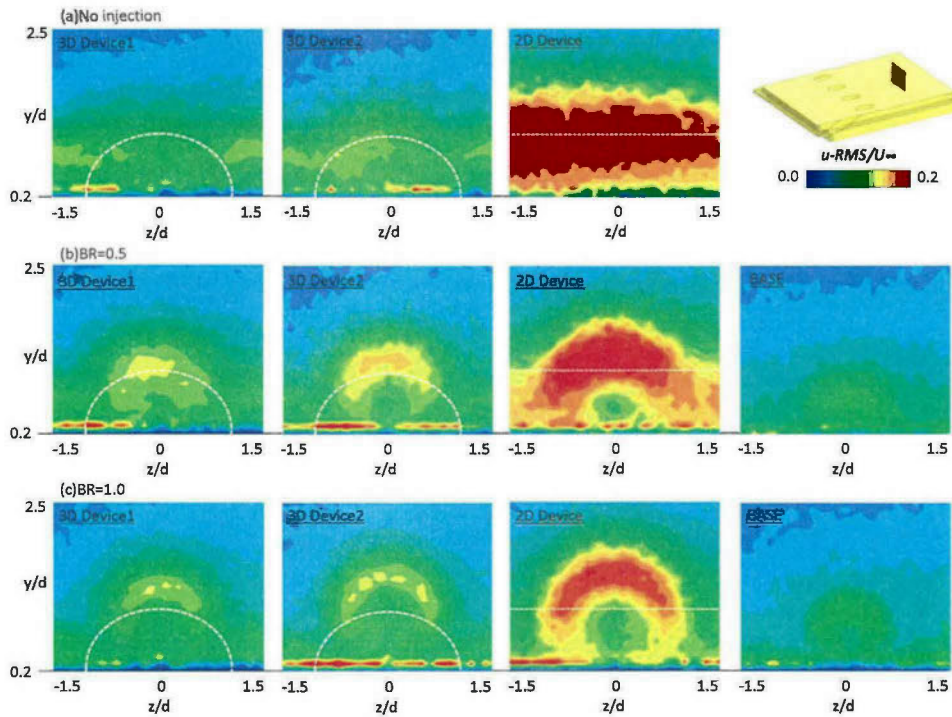


図 2.4.27 無次元速度変動 RMS  $u-RMS/U_\infty(x/d=5.0)$

図 2.4.28 には  $x/d=3.0, z/d=0.0$  での流れ方向流速無次元速度変動 RMS を示す。No injection の場合、壁面付近では境界層や、トレーサー粒子の吹き出しによって RMS が高くなっているが、壁面から十分離れた領域においては  $u-RMS/U_x=0.05$  となっており、十分に低い。これに対して、三次元形状のデバイスを取り付けた場合は、RMS が高い領域が壁面法線方向の高い位置に移動している。これは、デバイスから発生した渦によるものであり、 $y/d=0.75$  付近にピーク値が存在しており、デバイスの高さより僅かに低い位置にピーク値が確認できる。2D Device の場合、デバイスがスパン方向に広く比較的大きな剥離領域が形成されるために、RMS は最も大きな値となった。さらにそのピーク値はデバイスの高さと一致している。しかし、2D Device では壁面近傍の領域では RMS 値が低くなっている。

$BR=0.5$  の場合、RMS 値のピークは No injection と比較すると壁面法線方向に押し上げられている。これは主流と二次空気のせん断領域で RMS 値が高くなるためである。BASE は二次空気が壁面付近に存在しているので RMS 値のピーク値は壁面に近いが、デバイスを取り付けた形態では二次空気が壁面から離れた領域に吹き出されるためにせん断領域が  $y$  方向に高くなっている。 $BR=1.0$  の場合、CRVP が強まり、二次空気はさらに壁面法線方向へ高く押し上げられるのと同時にせん断領域も  $y$  方向に高くなるために、RMS のピーク値も  $y$  方向に高くなっている。

図 2.4.29 には  $x/d=3.0, z/d=-1.0$  での流れ方向無次元 RMS を示す。No injection の場合、 $z/d=0.0$  と比較するとスパン方向に分布がついていないために RMS プロファイルには殆ど変化が見られなかった。 $BR=0.5$  の場合、二次空気がスパン方向に拡散していない場合には RMS 値が  $z/d=0.0$  の場合のプロファイルと比較すると全体的に低い値を示している。また、主流と二次空気のせん断も低いために、RMS のピーク値も低い値となった。2D Device に関しては、二次空気がスパン方向に最も拡散するために RMS 値が最も高い。 $BR=1.0$  では、 $BR=0.5$  の RMS 値が全体的に高くなったようなプロファイルを示している。ピーク値の位置は  $BR=0.5$  と殆ど変化しなかった。

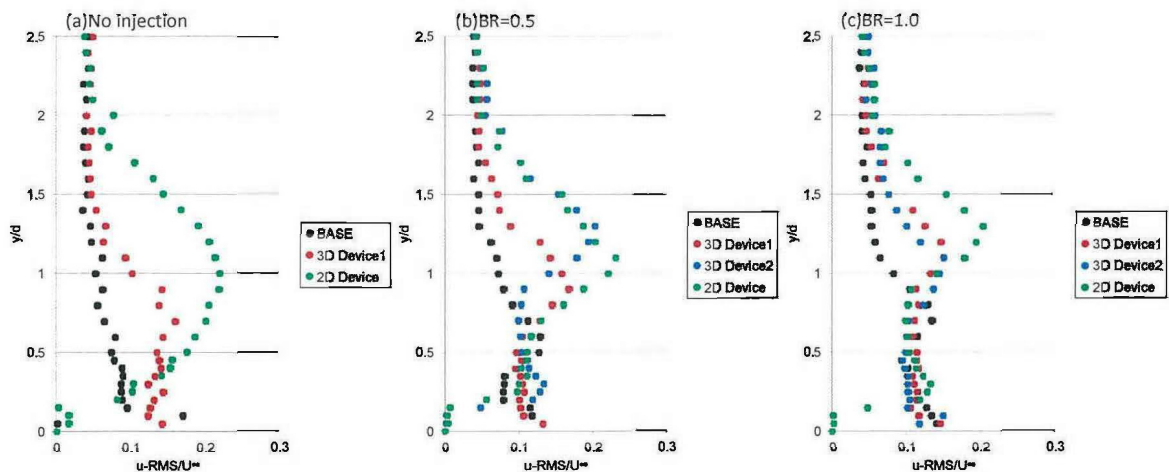


図 2.4.28  $u-RMS/U_x$  ( $x/d=3.0, z/d=0.0$ )

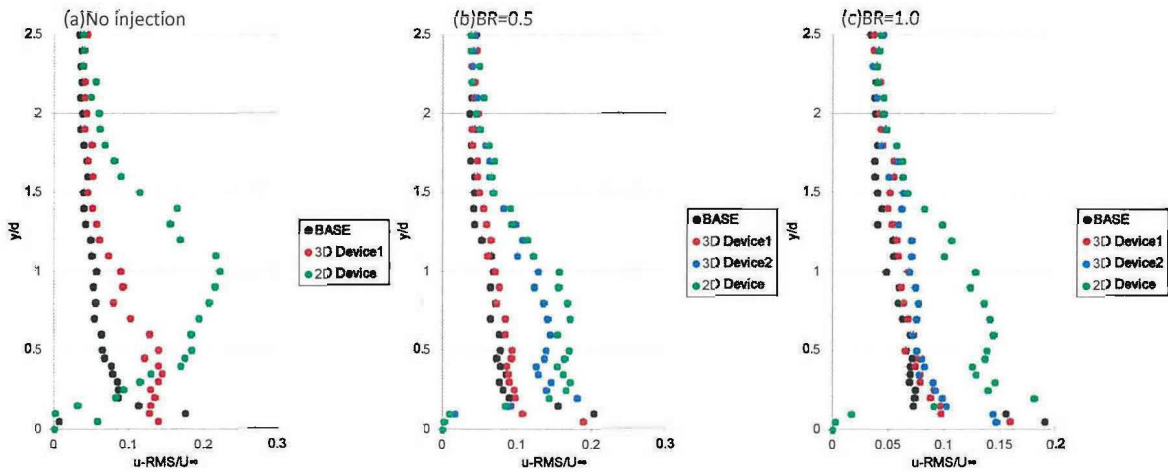


図 2.4.29  $u\text{-RMS}/U_\infty$  ( $x/d=3.0, z/d=-1.0$ )

図 2.4.30 には  $z/d=0.0$  の  $xy$  平面内での流れ方向の無次元速度を示す。No injection の流れ場ではデバイスの高さ程度の領域に低い無次元速度領域が広がっており、デバイス直後の剥離領域を示していると考えられる。BR=0.5 の場合、二次空気の吹き出しを行うことにより低運動量の流体が吹き出すために壁面付近の低速度領域は拡大することとなる。BASE と比較すると低速度領域の大きさはデバイスを取り付けた形態の方が大きくなっており、二次空気がデバイス下流側の低速度領域内で拡散していることが分かる。BR=1.0 では高い運動量の流体が流入するために全体的に無次元速度の領域は縮小し、値自体も高くなるほか、二次空気が壁面から lift-off するのに伴って  $x/d=5.0$  の付近では高さ方向にも高い位置で二次空気が存在すると考えられる低速度領域が存在している。

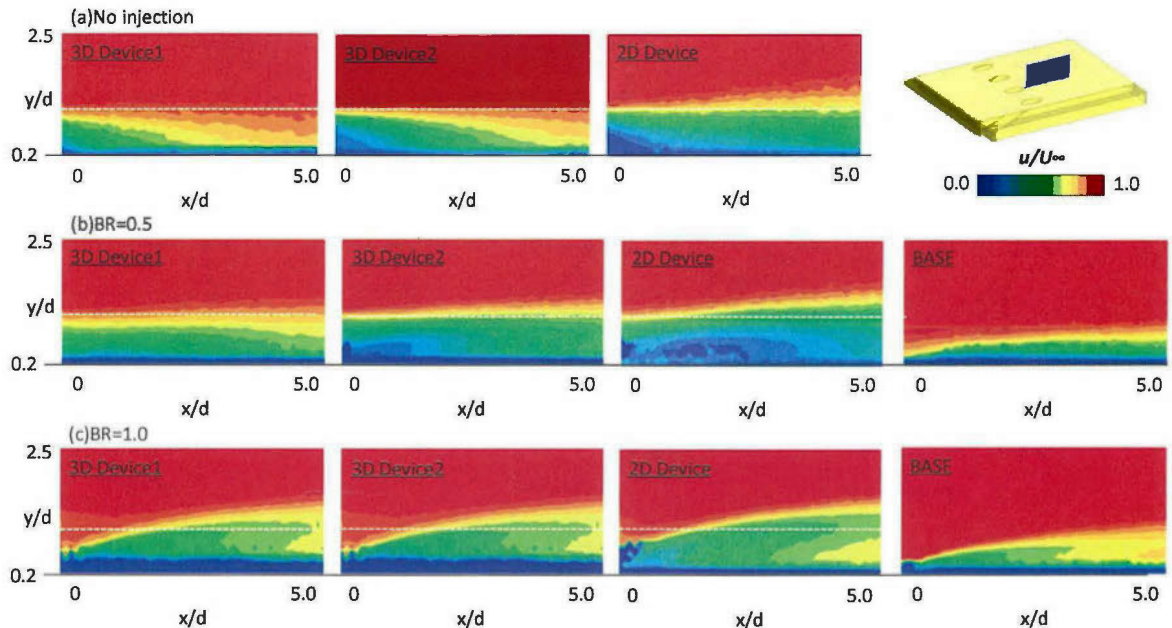
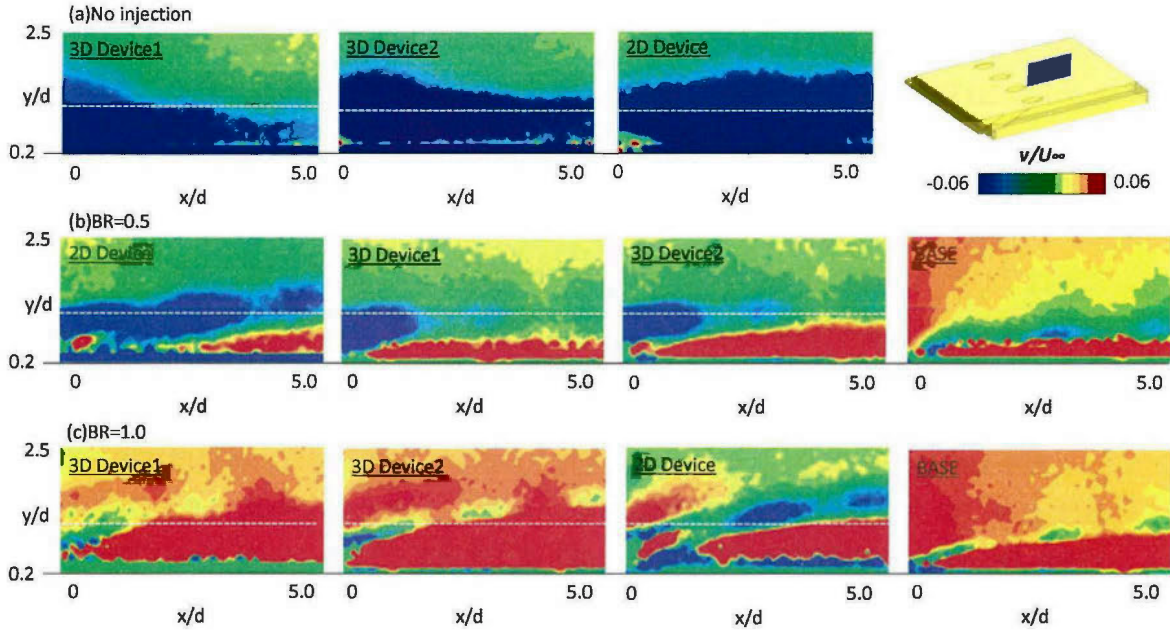
図 2.4.30  $u/U_x(z/d=0.0)$ 

図 2.4.31 には高さ方向の無次元流速を  $z/d=0.0$  の  $xy$  平面で描かせた無次元速度分布を示す。No injection の場合デバイスのセンターラインを流れた主流はデバイスを乗り越えると壁面付近へ向かう流れ場となる。そのため、負の無次元速度領域が存在することとなる。負の速度領域の大きさはデバイスの形状によって依存しており、スパン方向に広い形態であるほど壁面付近へ強く主流を押し下げることとなる。そのため広い負の速度領域が 2D Device の下流側では観察することができる。吹き出しを伴った場合は正の速度成分が観察することができた。正の速度成分は特に下流側の領域に向かうに従ってわずかに増加をしている。しかし、デバイスに起因する負の速度成分が下流側の領域では見られないために壁面法線方向へ二次空気を lift-off させていると考えられる。BR=1.0 の場合は、下流側での正の速度成分が BASE よりも強くなっていることが分かる。これはデバイスを取り付けたことによって強められた CRVP の効果によって二次空気が壁面から lift-off するためである。しかし、2D Device はデバイスに起因する負の速度成分(No injection)の強さが大きいため、正の速度成分のほかにも負の速度成分の値も観察することができた。

図 2.4.31  $v/U_x(z/d=0.0)$ 

## 2.4.5 可視化計測

### 2.4.5.1 計測条件

本研究では可視化計測用装置を用いて  $xy$  平面内での流れの可視化を行った。トレーサー粒子は二次空気に流入させており、吹き出し比は  $BR=0.5, 1.0$ 。計測平面は  $z/d=0.0, 1.0$  の2面とした。 $z/d=1.0$  の計測平面を撮影するのは、この面内へ流入する二次空気の量を確認するためであり、二次空気がスパン方向へ拡散している様子を確認するためである。

### 2.4.5.2 可視化計測結果

図 2.4.32 には BASE での可視化計測結果を示す。 $BR=0.5$  の場合、二次空気はセンターライン上に存在しており、壁面に二次空気が付着している様子が確認できる。一方で  $z/d=1.0$  の面内での計測結果を見ると、二次空気の存在が確認できない。このため、二次空気はスパン方向へ拡散していないことが確認できる。 $BR=1.0$  では二次空気の運動量が高くなるために、二次空気は壁面法線方向へ押し上げられ、付着性が低くなっていることが分かる。 $z/d=1.0$  の面内でも二次空気の存在は確認できず、 $BR=0.5$  の場合と同様に二次空気のスパン方向への拡散は低いことが分かる。

図 2.4.33 には 2D Device での流れの可視化結果を示す。 $BR=0.5$  では冷却孔出口から二次空気が吹き出しているが、これは壁面より離れた位置に吹き出しており、lift-off に近い状態となっている。一方でその下流側の領域では二次空気が再循環している領域が広く観察される。 $z/d=1.0$  の平面内での可視化結果を確認すると、 $z/d=0.0$  での再循環領域と同じ領域で二次空気が確認することが出来る。この再循環領域はデバイスの高さが高いために主流が、

デバイスを通じた際にデバイス下流側で形成される剥離領域と一致すると考えられる。このため、二次空気は再循環領域内で広くスパン方向へ拡散していることが分かる。このために、2D Device ではスパン方向へ広い伝熱面積が確保されたと考えられる。また、主流と二次空気の境界面では速度せん断により、Kelvin-Helmholtz 不安定が発達している。吹き出し比が高くなると、速度せん断が増大するために界面の局所的な不安定性が大きくなり、ストリークが形成される。このような不安定現象は BASE よりも大きくなっている。これはデバイスを取り付けた場合にはデバイスを設置したことにより主流と二次空気の速度せん断が BASE よりも強くなるためである。このせん断領域は図 2.4.26 の高 RMS 領域と一致している。

図 2.4.34 には 3D Device1 での可視化計測結果を示す。3D Device1 では 2D Device と同様に二次空気は主流に貫通する形で吹き出されているが、下流側で広い再循環領域が形成されており二次空気の付着が行われている。また、主流と二次空気のせん断界面では Kelvin-Helmholtz 不安定が吹き出し比の増加と共に発達している。しかし、2D Device とは異なり、 $z/d=1.0$  の面内では二次空気が殆ど観察されない。そのため、3D Device では形成されている再循環領域が 2D Device よりも小さくなっており、二次空気のスパン方向への拡散性は 2D Device よりも低くなっていると考えられる。

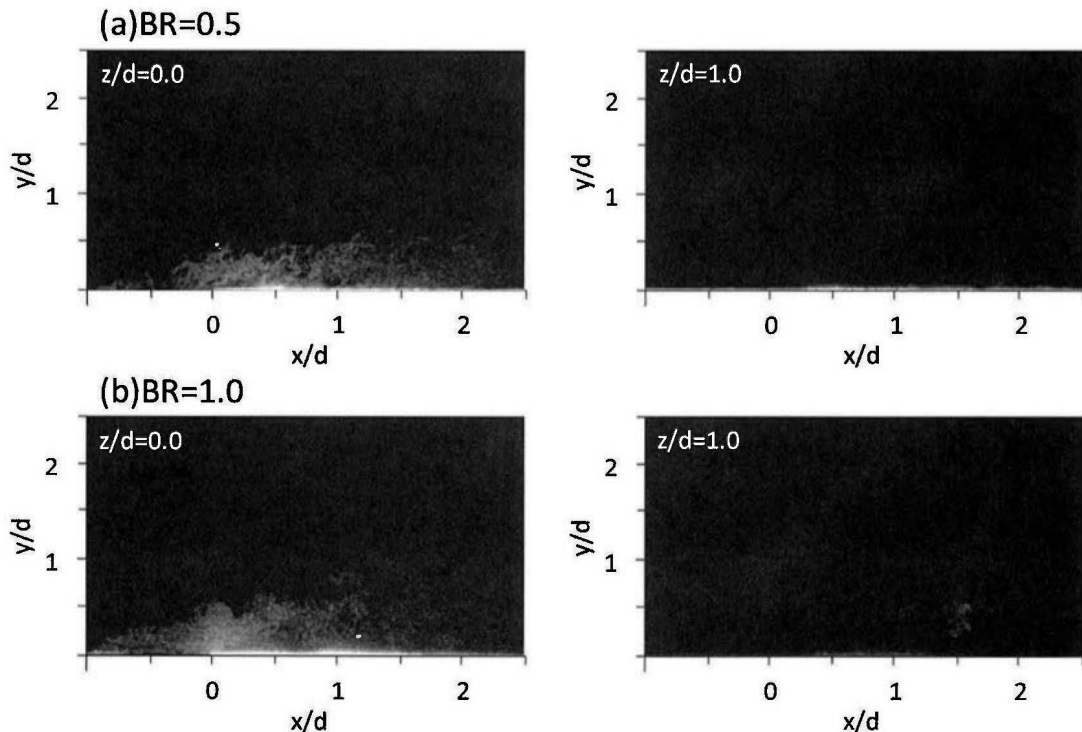


図 2.4.32 可視化計測結果(BASE)

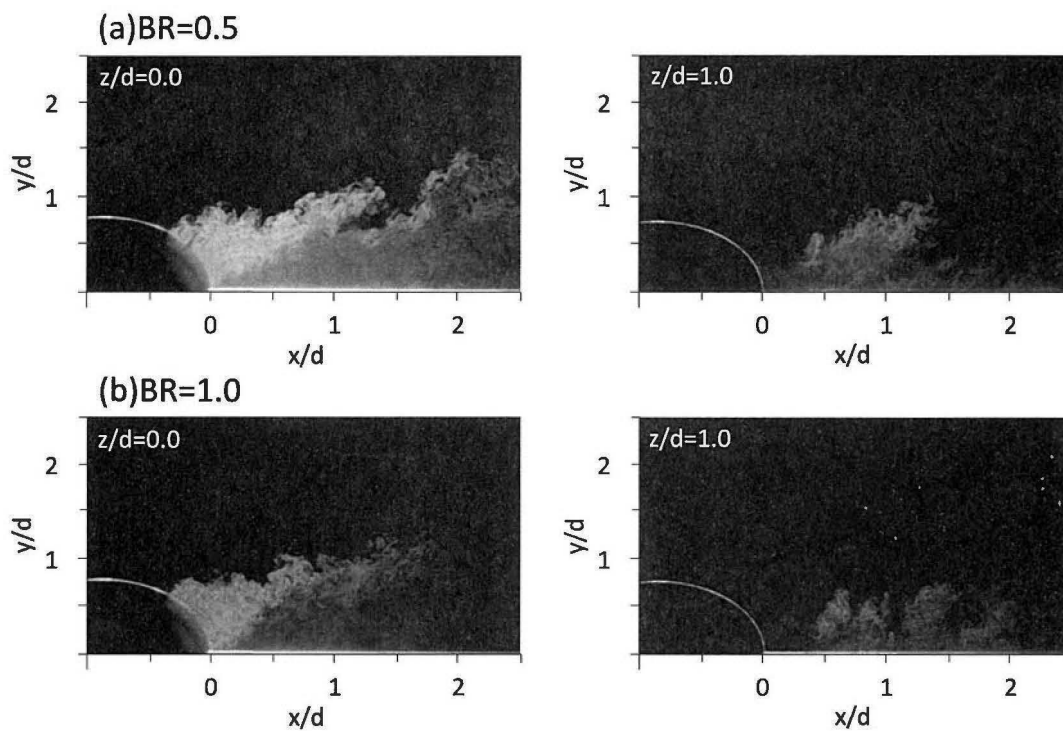


図 2.4.33 可視化計測(2D Device)

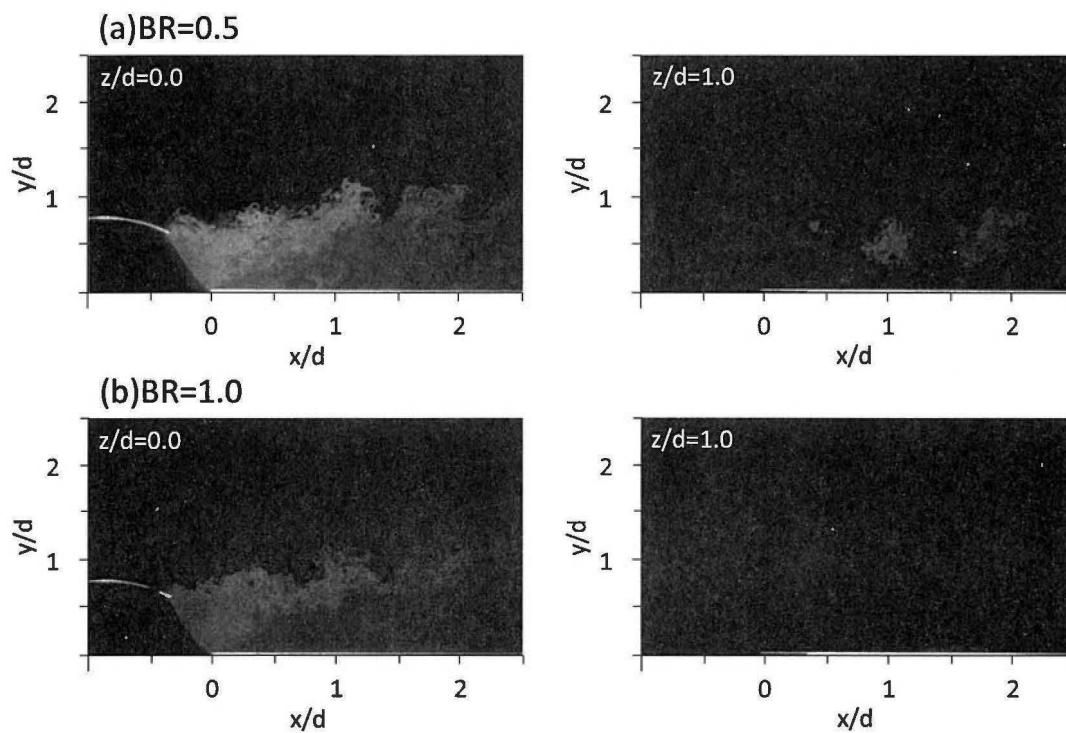


図 2.4.34 可視化計測結果(3D Device1)