

## 第四章

# 平板モデルを用いた Double Flow Control Device の最適化

### 4.1 本章の概要

本章では、DFCD の最適化に主眼をおいて論ずる。本章の目的の1つは、品質工学を用いることで、実際に DFCD の最適形状を探索することにある。もう1つの目的は、最適化手法自体の妥当性と信頼性に関して評価を行うことである。

### 4.2 DFCD の最適化（タグチメソッドの静特性解析）

#### 4.2.1 はじめに

4.2 節では品質工学：タグチメソッドの静特性を用いて DFCD の最適化を行った。また、最適化の精度検証も行う。フィルム冷却の最適化研究は例が少ないが、過去に冷却孔形状や冷却孔配置の最適化を行った研究例が知られている。Lee ら<sup>(1)(2)</sup>は、RANS 解析を用いることで、shaped hole 形状の多目的最適化を実施した。また、Johnson ら<sup>(3)</sup>は、RANS 解析と翼モデルを用いて、冷却孔配置の最適化を行っている。過去のフィルム冷却分野の最適化は、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化を数値解析手法で行っているのが特徴であり、数値解析でえられた最適解の信頼性に関しては言及が成されていない。

フィルム冷却の数値解析は実験値と一致しにくいことから、数値的に最適化を行った場合には解の信頼性評価が必要であると考えられる。数値解析の信頼性を評価するためには、実験的な調査を行うことが好ましいが、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法のように、

莫大なサンプル数が必要な最適化プロセス自体を実験で再現し、検証するのは現実的とは言えない。そこで、本研究では、最適化に必要とされるサンプル数が少ないタグチメソッドを用いた最適化を、数値解析で行い、これを実験で完全に再現、比較を行うことで、最適化手法自体の検証を行った。

#### 4.2.1.1 実験計画法 (4) (5) (6)

実験計画法とは、取り上げる対象の結果とそれに影響を与えると思われる要因の関係を調べるために、時間面、経済面の制約を考慮しながら実験（ここでは CFD による数値実験も含まれる）によりデータを得て、それを解析するための方法である。物理学、化学等の科学的精密実験においては、実験を行う条件などに気を配ることで結果のばらつきが出来る限り小さくなるようにする。すなわち、実験の誤差が存在しなくなることを目指す。これに対して実験計画法では、適切に実験が行われた場合の実験誤差の存在は認めたくなくて、数理統計学の力により種々の推論を行うものである。

実験計画法の発展は、次の 4 つに大別できる。まず 1 つ目の流れは、フィッシャー (Fisher, R. A.) に始まる伝統的な実験計画法の枠組みである。これには、要因計画、一部実施要因計画、ブロック計画 (乱塊法)、分割法等が含まれる。また、2 つ目の流れは、タグチメソッドである。使用条件、環境の変動に対して頑健な条件を探すという新たな枠組みを早期に提示し、その後種々の発展を見せている。3 つ目の流れは、ボックス (Box, G. E. P.) により始まった応答曲面法である。この方法は、量的因子を取り上げ応答との関係を効率的に推定する一連の流れを与える。4 つ目の流れが、Kiefer, J. が実験計画を数学的な視点からまとめた最適計画である。

フィッシャーの唱えた実験計画法の目的は「原因の寄与率の定量化」にあるのに対して、タグチメソッドの目的は「設計の最適化」にある。本研究では、ガスタービンの作動条件に対して頑健な条件を探しデバイス形状を最適化することを目的にしているため、上記の実験計画法の中でもタグチメソッドを用いた最適化を実施することとした。

#### 4.2.1.2 タグチメソッド

タグチメソッドにおけるシステム概念は、図 4.2.1 のように、出力  $y$ 、入力  $M$ 、設計パラメータ  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 、ノイズ  $z_1, z_2, \dots, z_k$  の 4 要素を持つものとして定義している。ここで、システムの出力  $y$  は、次の 2 つの性格をもつものと定義している。

- ① システムの出力  $y$  は、システムの目的 (すなわち機能) を表す量 (特性) である。
- ② システムの出力  $y$  は、システムの使われ方により目標値が変わる。

さらに、システムの入力  $M$  は次のものと定義している。

- ③ システムの入力  $M$  は、出力を変えるための信号である。

設計パラメータ  $x_1, x_2, \dots, x_n$  はシステム的设计で決まる値で、これらの値によっても出力は変化する。しかし、技術者の意図としては、目標値への調整は入力  $M$  で行いたい。

このように、システムの入出力  $y$  は、理想的には入力  $M$  と設計パラメータの値だけで決まっていきたい。しかし現実には、外部環境や材料のばらつき、さらには劣化などのノイズ  $z_1, z_2, \dots, z_k$  によっても変化することとなる。

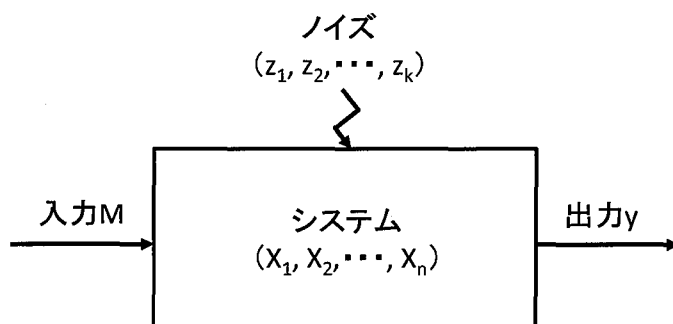


図 4.2.1 エンジニアード・システム

ここで、システムの変動させるノイズに対する対策は以下の 3 つの方法が存在する。

①ノイズの発見と除去

システムのばらつきや劣化の原因、すなわちノイズを見つけ、その変化を無くす方法である。しかし、生産工程などの条件変動や材料のばらつきに対してはこの方法を取れるが、ノイズが製品の使用条件や環境の変動である場合には利用できない。ノイズの変動を抑制するうえで何らかのコストアップが生じる。

②出力の補正

出力の変動やばらつきをフィードバックで補正する方法である。非常に有効な光学的方法であるが、フィードバック装置にコストがかかる上に、フィードバックをかける前のシステムに安定性がある程度なければ、フィードバックをかけることにより、かえって不安定になる場合もある。

③ノイズの影響の減衰 (図 4.2.2)

タグチメソッドの中心的手法は、この③の方法を行うことを意味する。この設計では、現行条件が存在せず、設計変更に伴うコストアップが存在しないという特徴がある。タグチメソッドではノイズに対して、設計パラメータを上手く設計することにより、ノイズの影響を受けにくくするための設計手法である。

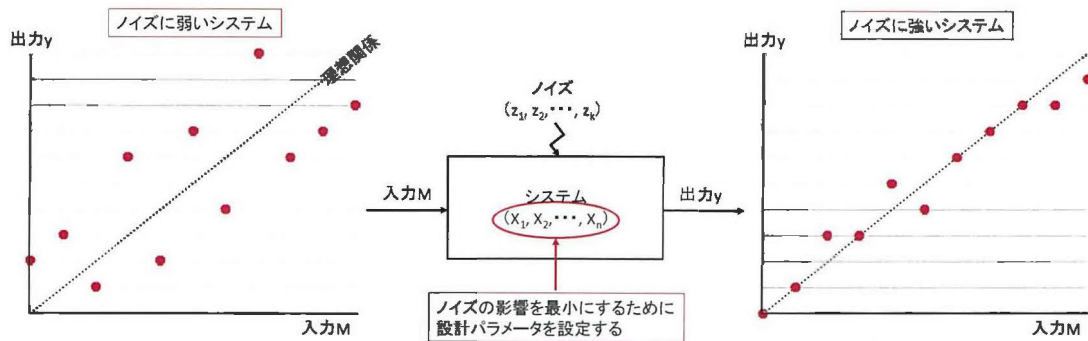


図 4.2.2 タグチメソッド

#### 4.2.1.3 研究の目的

近年、設計現場では CFD を用いて性能を予測する手法が非常に多く行われている。タグチメソッドを行う際にも、CFD による数値実験を行い、得られた最適解の性能を実験の実験によって確かめることが行われている。しかし、数値解析によって得られた最適解は必ずしも、実際の流体现象を再現できていないこともあることから“真の最適解”とは言えない可能性も考えられる。そこで、本研究では、タグチメソッドを行い実験的手法によりデバイスの最適化を行うと共に、数値解析を用いて数値的にタグチメソッドを行い、その結果を実験結果と比較することにより、数値解析での最適化手法の問題点等を明らかにすることを目的としている。

#### 4.2.2 設計パラメータと直行表への割り付け

図 4.2.3 には今回のタグチメソッドの適用対象モデルを示す。今回は、前章までで比較的性能が高いと分かった、スパン方向に流れ制御デバイスを 2 つ設置するフィルム冷却モデルを取り上げることにした。また、スパン方向に 2 個設置するデバイスは、流れ方向に角度を与えるモデルとした。説明のため、座標の原点は冷却孔の先端部分に取り、デバイスの設計パラメータは便宜上冷却孔の中心からの距離で表す。今回は実験的にタグチメソッドを検証するために、冷却孔付きの供試体を大量に製作することが困難であった。一方でデバイス自体は三次元造型機を用いて比較的低コストで大量に作成が可能である。従って、今回は主にデバイスの形状をさせるための寸法値を設計パラメータとして設定し、供試体自体の形状を変えるような寸法値（冷却孔の傾斜角等）は、固定する。以下に、固定する寸法値を示す。

- 冷却孔直径： $d(=20\text{mm})$
- 冷却孔傾斜角：35deg
- 冷却孔ピッチ： $3d$
- デバイス間の  $z$  方向距離： $1.5d$

これは冷却孔ピッチが  $3d$  であるために、 $z$  方向距離を設計パラメータに設定するとデバイ

ス同士がスパン方向に干渉してしまう場合が発生するためである。

タグチメソッドで設計パラメータとして設定する寸法値は以下の通りとし、以下“制御因子”と呼称する。デバイスの形状は以下の寸法値を決定後に、CAD 上でロフト機能を使用することにより楕円体形状を作成した。各制御因子とその水準は以下の表 4.2.1 に示す。

- Fillet : デバイスのフィレット半径を示す
- Distance1 : デバイスの中心から冷却孔の中心までの距離を示す
- Length1 : デバイスの  $x$  方向幅（前方長さ）を示す
- Length2 : デバイスの  $x$  方向幅（後方長さ）を示す
- Height : デバイスの  $y$  方向高さを示す
- Width : デバイスの  $z$  方向の幅を示す
- Angle : デバイスの  $x$  軸に対する角度を示す

タグチメソッドを行う際には上記の制御因子とその水準を直行表へ割り付ける必要がある。今回は制御因子の数と、水準の量を加味して、 $L_{18}$  直行表を用いた。表 4.2.2 には今回用いた  $L_{18}$  直行表を示す。表の第一列は実験 No.を示しており、合計 18 回の実験を行うことを示している。表の第一行には A~H 列が存在しているが、ここに記載しているアルファベットが表 4.2.1 で記載している制御因子のアルファベットと対応しており、今回は制御因子の数から、H 列は使用しないこととした。表中には 1~3 の数字が記載してあるが、“1”は表 4.2.1 での“第一水準”を示している。

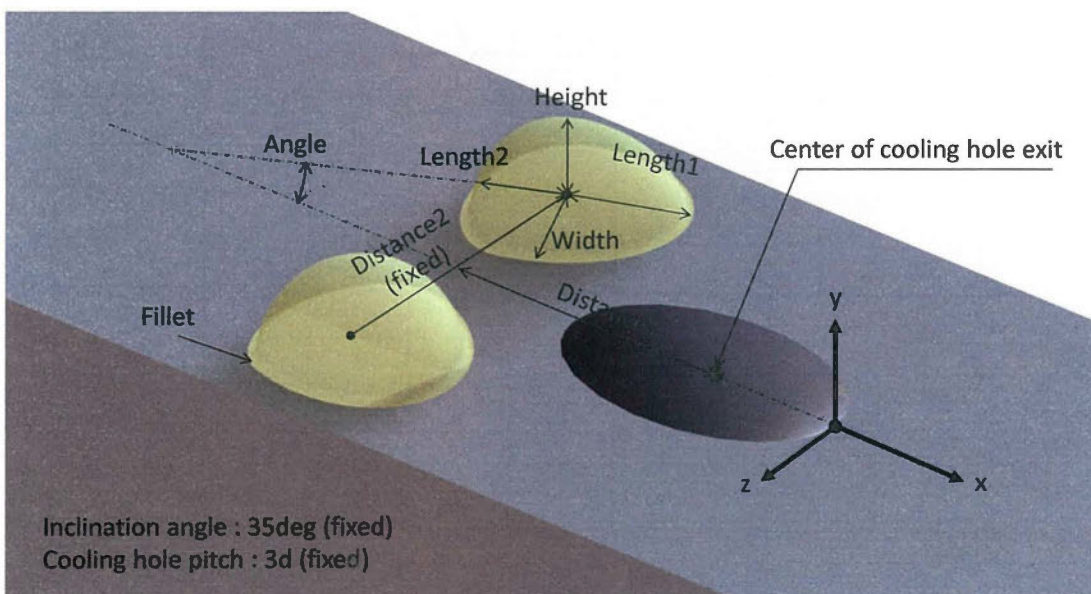


図 4.2.3 デバイス形状と設計パラメータ

表 4.2.1 制御因子とその水準

	制御因子	第一水準	第二水準	第三水準
A	Fillet	3mm	1mm	
B	Distance1	35mm	40mm	45mm
C	Length1	7mm	15mm	20mm
D	Length2	7mm	15mm	20mm
E	Height	3mm	6mm	10mm
F	Width	3mm	6mm	10mm
G	Angle	0deg	7.5deg	15deg

表 4.2.2  $L_{18}$  直行表

実験 No.	A 列	B 列	C 列	D 列	E 列	F 列	G 列	H 列 (不使用)
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

### 4.2.3 実験手法

#### 4.2.3.1 デバイス形状

本研究では岩手大学の所有する三次元造型機を用いてデバイスの成形を行った。成形したデバイスは実験 No.1~No.18 を実施するために 18 種類のデバイスを作成し、供試体には冷却孔は 4 ピッチ分設けられているために各 8 個ずつのデバイスを成形した。図 4.2.4 には直行表に従って作成したデバイス形状一覧を示す。図より、全ての形状は 1 ピッチの中に納まっており、デバイス同士の干渉が見られないことから問題なく実験ができると判断した。

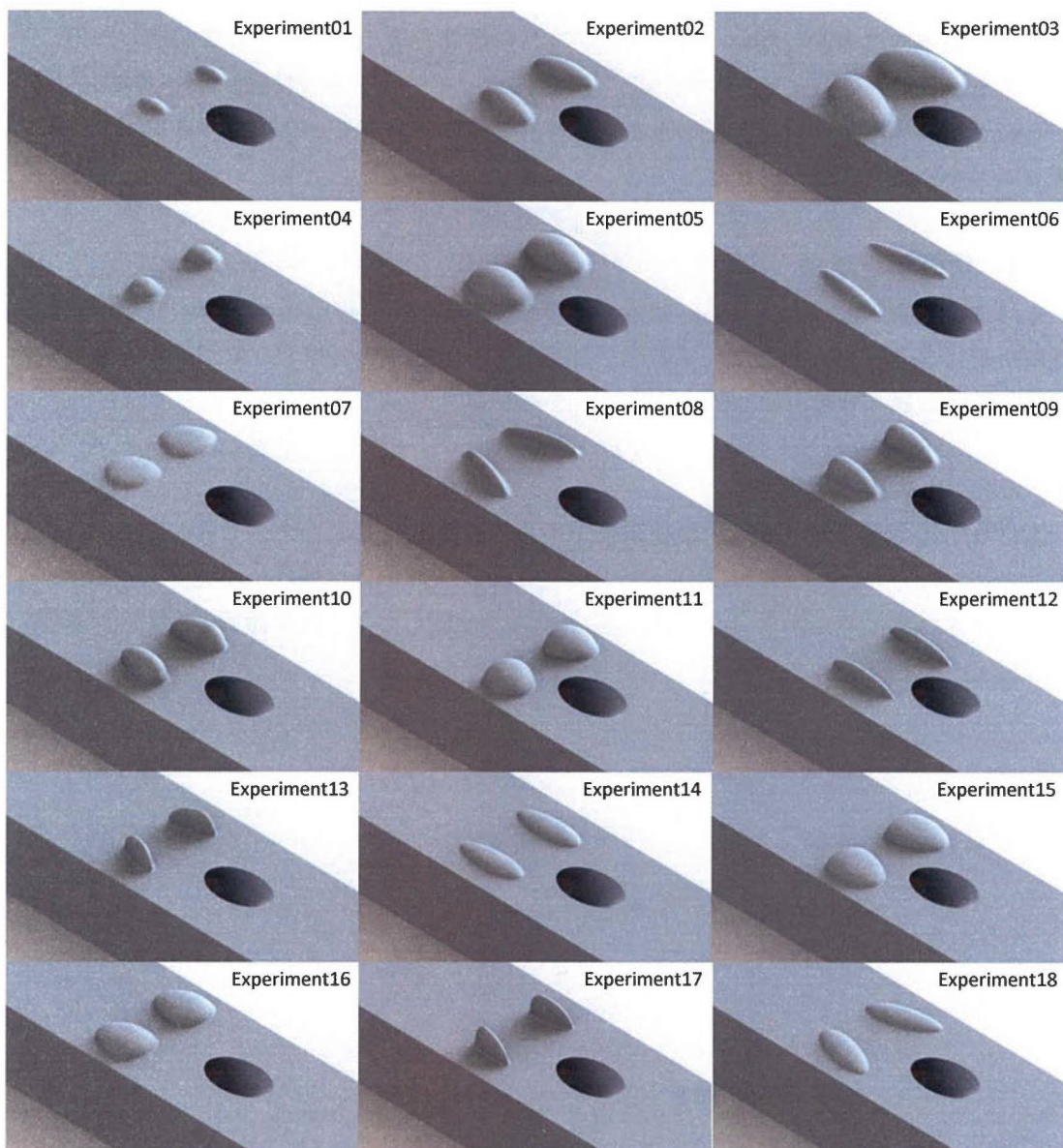


図 4.2.4 タグチメソッド検証用デバイス形状一覧

#### 4.2.3.2 フィルム効率・熱伝達率計測

今回のタグチメソッド検証ではフィルム効率を出力値としたシステムを考えることとする。今回は経験が乏しいために第一弾の実験としてフィルム効率を出力としてタグチメソッドを行うが、将来的には空力損失等の指標を出力として行うことも検討している。フィルム効率の計測には実験装置 I を用いて、過渡応答法による伝熱試験を行うことでフィルム効率と熱伝達率の計測を行った。今回は、フィルム効率を“出力”として取り扱うために、スパン方向平均のフィルム効率等の指標は用いずに  $0 \leq x/d \leq 10$  での面平均フィルム効率を算出し、これを出力とした。過渡応答法を用いた計測では同時に熱伝達率の算出も行うが、今回のタグチメソッドでは用いない。

検証用デバイスを取り付ける場合は、今回はデバイスの設置誤差によるノイズはタグチメソッドの中では考慮しない。従って、ノイズの影響を最小限にする必要があるため、デバイスを取り付ける際には、専用の紙に CAD によってデバイスの設置位置を印刷し、印刷した紙を供試体に張り付け、その上からデバイスを設置することによりできる限り正確にデバイスを設置するようにした。

#### 4.2.4 数値解析手法

本研究では実験だけではなく、数値実験の結果を用いてタグチメソッドの静特性と動特性解析を行う試みを実施した。この際、ノイズとして乱流モデルや、要素数等を扱うために数条件の数値実験を実施した。

##### 4.2.4.1 数値解析領域

本研究では前章までと同様の数値解析を用いて数値実験によるタグチメソッドを行った。数値解析には 1 ピッチ分の計算領域を用いており、主流の入口境界には速度プロファイルを挿入するために原点から  $10d$  上流の位置を入口位置とした。計算領域の概観図は以下の図 4.2.5 に示す。



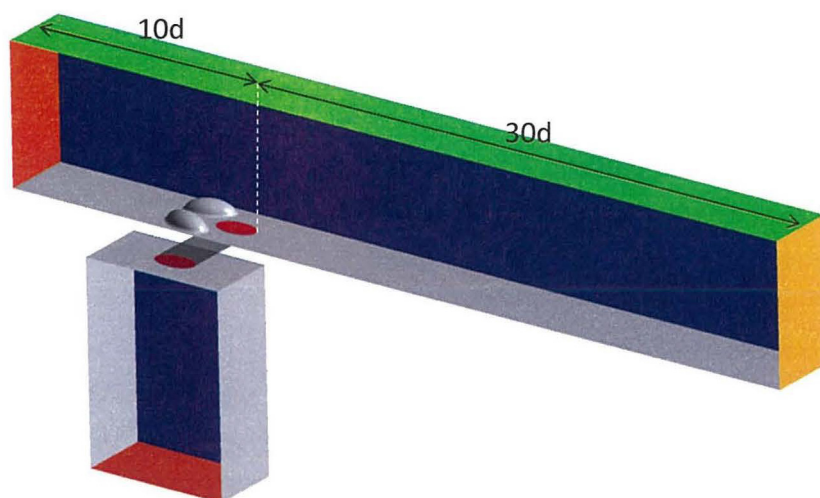


図 4.2.5 数値解析領域

#### 4.2.4.2 計算格子

本研究では、格子依存性の調査や、タグチメソッドの動特性解析において格子の要素数をノイズとして扱うことも念頭に、数種類の計算格子を準備した。計算格子の作成には ANSYS ICEM CFD を用いており、プログラムで計算格子の作成方法を読み込ませることで全ての 18 種類の計算格子を同じ作成方法で形成させた。計算格子は 3 種類準備しており、各要素数は表 4.2.3 に示した。図 4.2.6 には計算格子の全体図を示す。計算格子は基本的に非構造格子を用いて作成し、壁面近傍はプリズムメッシュを用いて作成した。各計算格子の特徴と、研究上の狙いは以下の通りである。

##### ■Grid 1

3 種類の計算格子の中では最も細かい計算格子を適用している。主流ダクトは壁面法線方向に  $2.5d$  の領域においてメッシュを細かくしており、デバイス周囲の流れを詳細に捉えることが出来るように配慮した。また、デバイスの高さは最大でも  $0.5d$  であり、 $2.5d$  の領域を細かくすることで十分周囲の流れ場を解像することができると判断した。また、 $x/d=0$  より下流の Surface mesh を細かくすることで、壁面近傍の流れを捉えることが出来るようにしている。

##### ■Grid 2

3 種類の計算格子の中では 2 番目に細かい計算格子を適用させた。主流ダクト中の壁面法線方向に  $2.5d$  の領域においてはメッシュサイズが Grid 1 と同じであるが、 $x/d=0$  より下流の領域での Surface mesh は Grid 1 の 2 倍程度サイズとなっており、壁面近傍での流れの解像度を下げている。

##### ■Grid 3

最も粗いメッシュである。主流ダクト中の計算格子サイズを大きくしており、デバイス

周囲の流れ場をあえて十分に解像できないようにメッシュを作成することにした。  $x/d=0$  より下流の Surface mesh のサイズは、Grid 1 と同じであり、壁面近傍の流れについてはある程度の空間解像度を有している。

■Grid 1～Grid 3 での共通事項

図 4.2.7 には壁面近傍に適用したプリズム格子の様子を示す。プリズム格子の厚みについては Grid 1～Grid 3 で全て共通にしている。プリズム格子は主流ダクト中では  $0.1d$ (21 層)、冷却孔内部では  $0.02d$ (12 層)の高さとした。また、全ての計算格子において  $y+<1$  となるようにした。

今回は 3 種類の計算格子を作成したが、格子品質が悪い場合、解が発散してしまう可能性がある。図 4.2.8 には、3 種類の計算で得られたモニタリング温度の収束状況を示したものである。今回、モニタリング温度は  $0 \leq x/d \leq 30$  での、壁面上の面平均温度とした。モニタリング温度を観察すると 300 step 程度から温度が収束していることが分かる。以上より、計算格子は 3 種類とも問題なく使用できると考えられる。

表 4.2.3 要素数一覧

	合計要素数[cells]
Grid 1	8,000,000
Grid 2	6,800,000
Grid 3	5,000,000

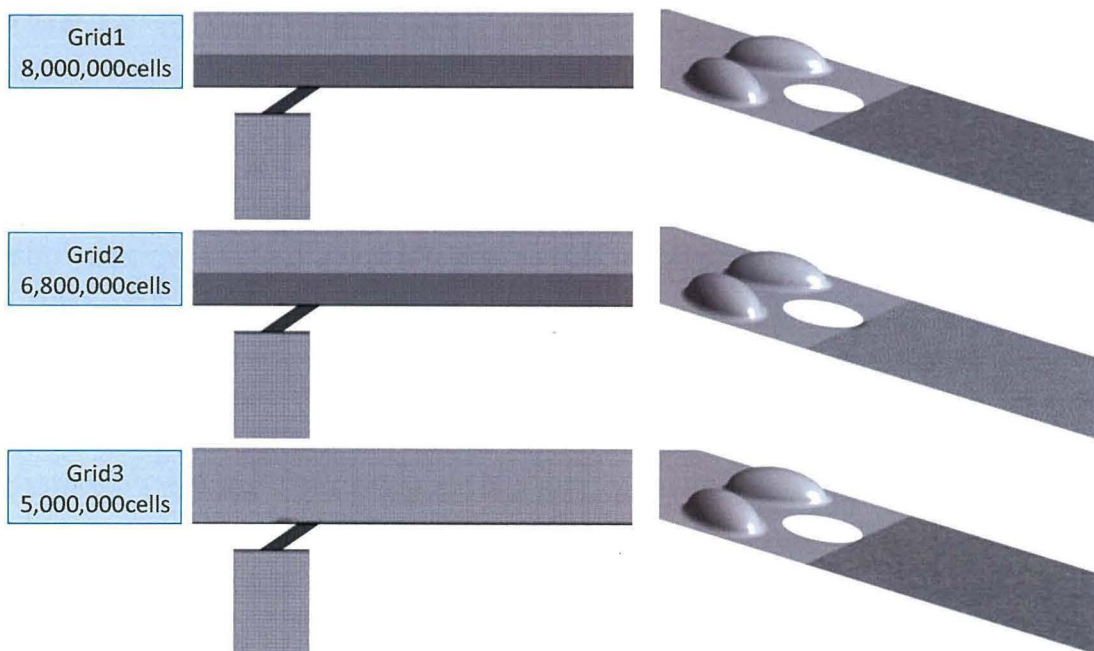


図 4.2.6 計算格子 (全体図)

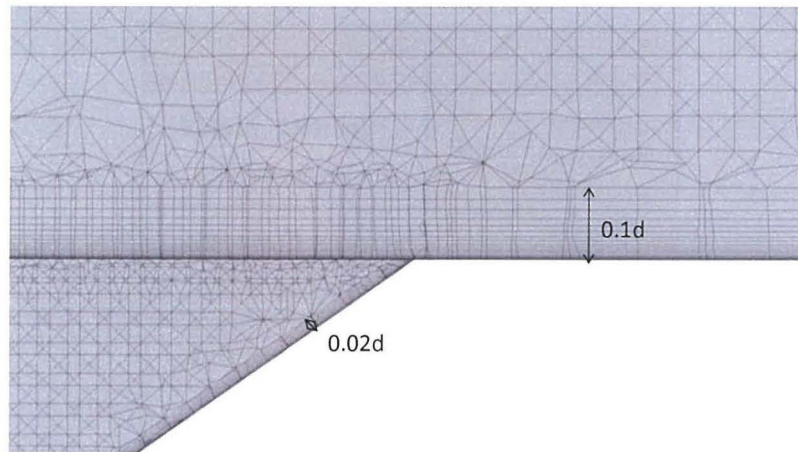


図 4.2.7 計算格子 (プリズム格子の様子)

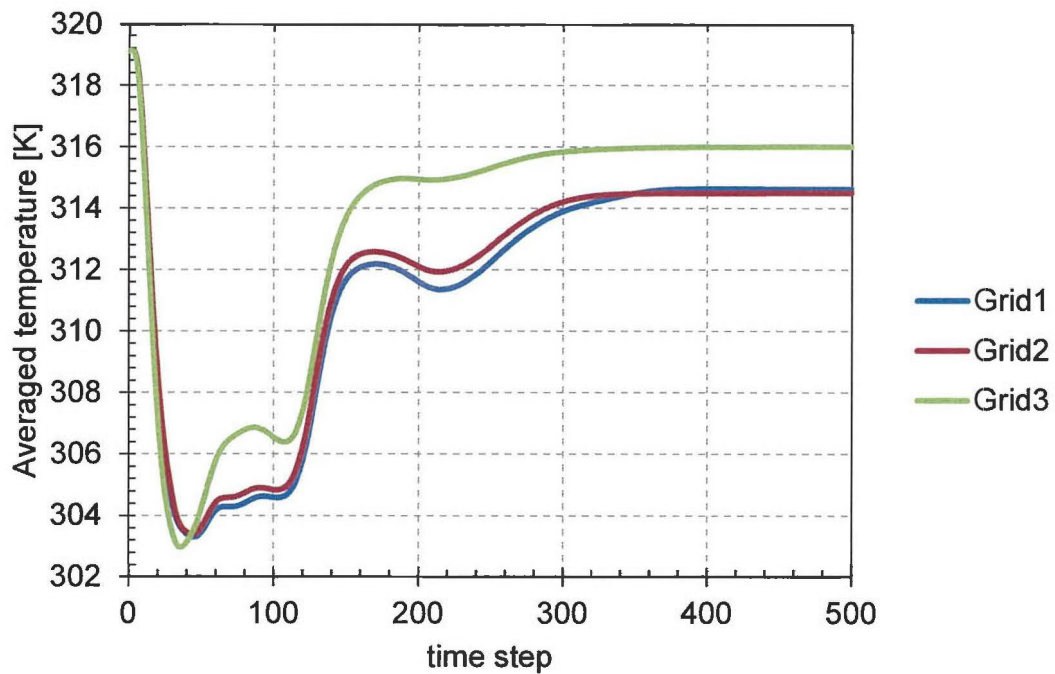


図 4.2.8 計算の収束状況

#### 4.2.4.3 境界条件

表 4.2.4 には、境界条件の一覧を示す。入口境界には実験で得られた流れ方向速度プロファイル (図 4.2.9) と、一様温度を入力した。二次空気入口境界には実験で得られた流量と温度を入力した。ダクト出口は静圧 0[Pa]、ダクト上面は対称境界、その他は断熱壁とした。

表 4.2.4 境界条件一覧

Location	Condition
Mainstream inlet	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Velocity profile</li> <li>▪Temperature</li> </ul>
Secondary air inlet	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Mass flow ratio</li> <li>▪Temperature</li> </ul>
Outlet	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Static pressure</li> </ul>
Upper surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Symmetry</li> </ul>
The others	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Adiabatic wall</li> </ul>

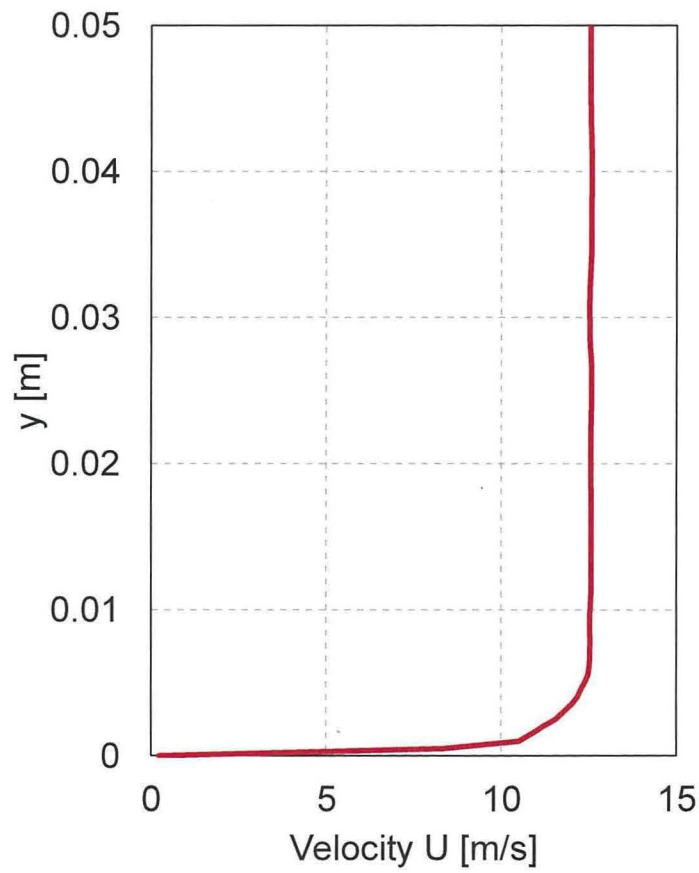


図 4.2.9 入口速度プロファイル

#### 4.2.5 タグチメソッド解析手法

##### 4.2.5.1 静特性のパラメータ設計

静特性でのパラメータ設計では、フィルム効率や空力損失に具体的な数値目標が無いため、今回は面平均フィルム効率を最大化するための設計を行うこととした。ノイズは吹き出し比とし、 $BR=0.5, 0.75, 1.0$  の3条件とした。解析を行うための面平均フィルム効率は以下の条件で取得した。

解析①：実験結果を用いた解析

解析②：数値解析結果（乱流モデル:SST, Grid 1）を用いた解析

解析③：数値解析結果（乱流モデル:SST, Grid 2）を用いた解析

解析④：数値解析結果（乱流モデル:SST, Grid 3）を用いた解析

解析⑤：数値解析結果（乱流モデル:RNG k- $\epsilon$ , Grid 3）を用いた解析

解析⑥：数値解析結果（レイノルズ応力モデル:BSL Reynolds Stress, Grid 3）を用いた解析

上記の解析①～⑥を行うことで、(1)計算格子の影響(①～③)、(2)モデルの効果(④～⑥)を検証する。静特性の望大特性を用いてSN比を計算する場合、SN比は以下の式で表される。

$$SN比 = -10 \log \left( \sum \frac{1}{y^2} / n \right) \quad (4.2.1)$$

今回は性能改善前の状態を表す参照条件として、各制御因子の第2水準と定める。

#### 4.2.6 フィルム効率分布

フィルム効率分布は昨年の報告書にも示しているが、議論に必要なため、昨年の報告書と同様のデータを一部掲載している。

##### 4.2.6.1 実験結果

図 4.2. 10～図 4.2. 12 には実験で得られたフィルム効率分布を示す。今回はフィルム効率算出のための過渡応答法による伝熱試験を各形態(18種)に対して、各1回ずつ実施した。図中に示している番号は、直行表における実験 No.を示している。フィルム効率分布がスパン方向へ広がっている実験傾向は No.13, 17 が特に顕著であった。また、この形態は吹き出し比が高くなった場合でも、スパン方向へ広いフィルム効率分布となっており、吹き出し比の変化に対して比較的頑健な性質を持っていると考えられる。

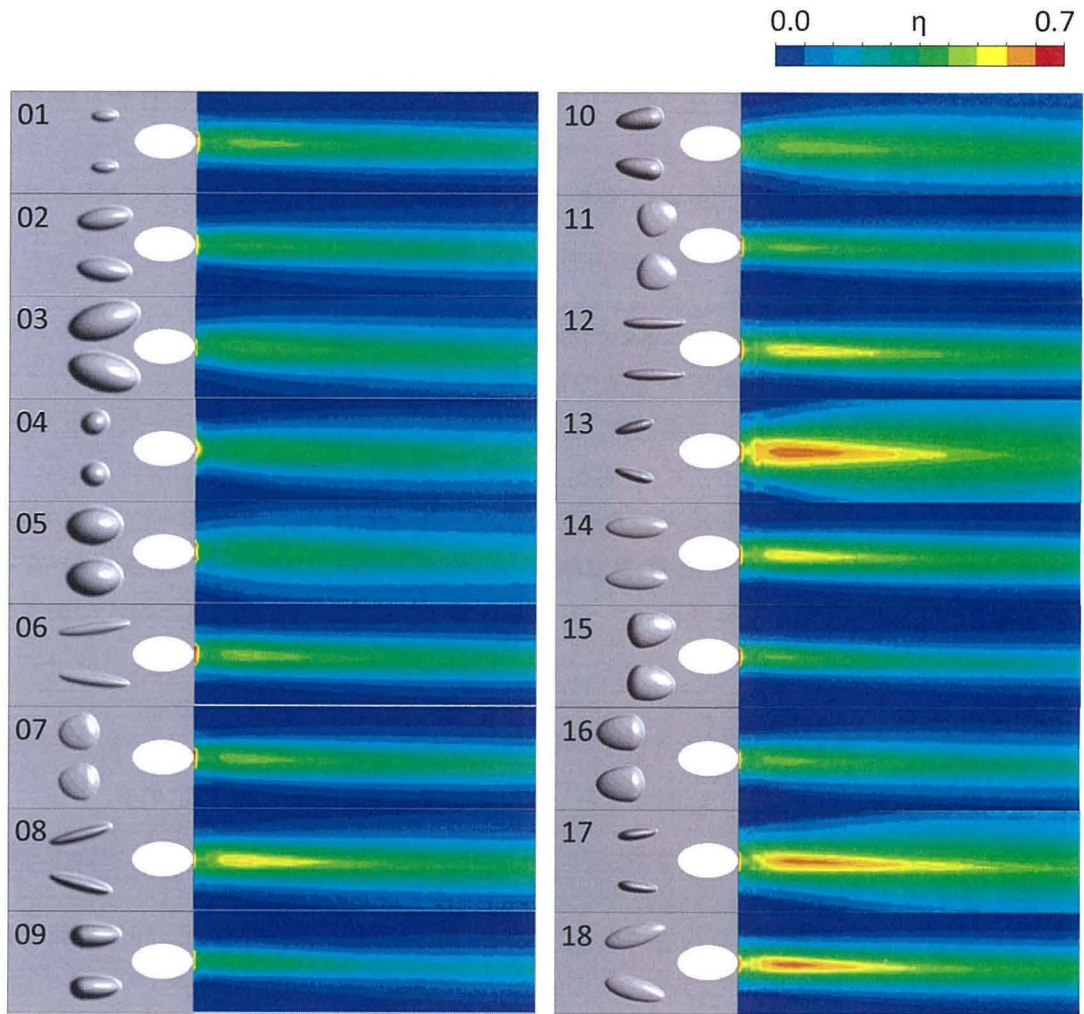


図 4.2.10 フィルム効率分布 (EFD,  $BR=0.5$ )

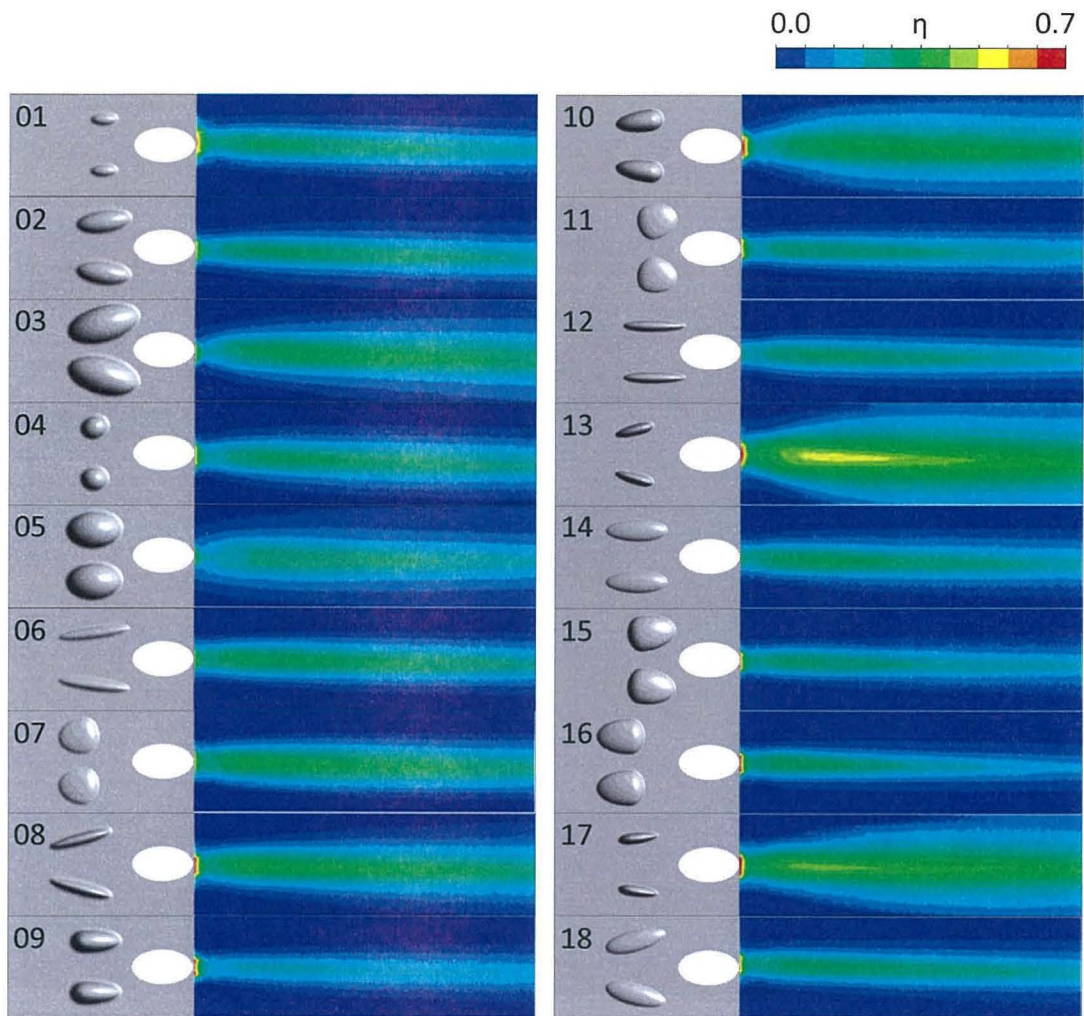


図 4.2.11 フィルム効率分布 (EFD,  $BR=0.75$ )

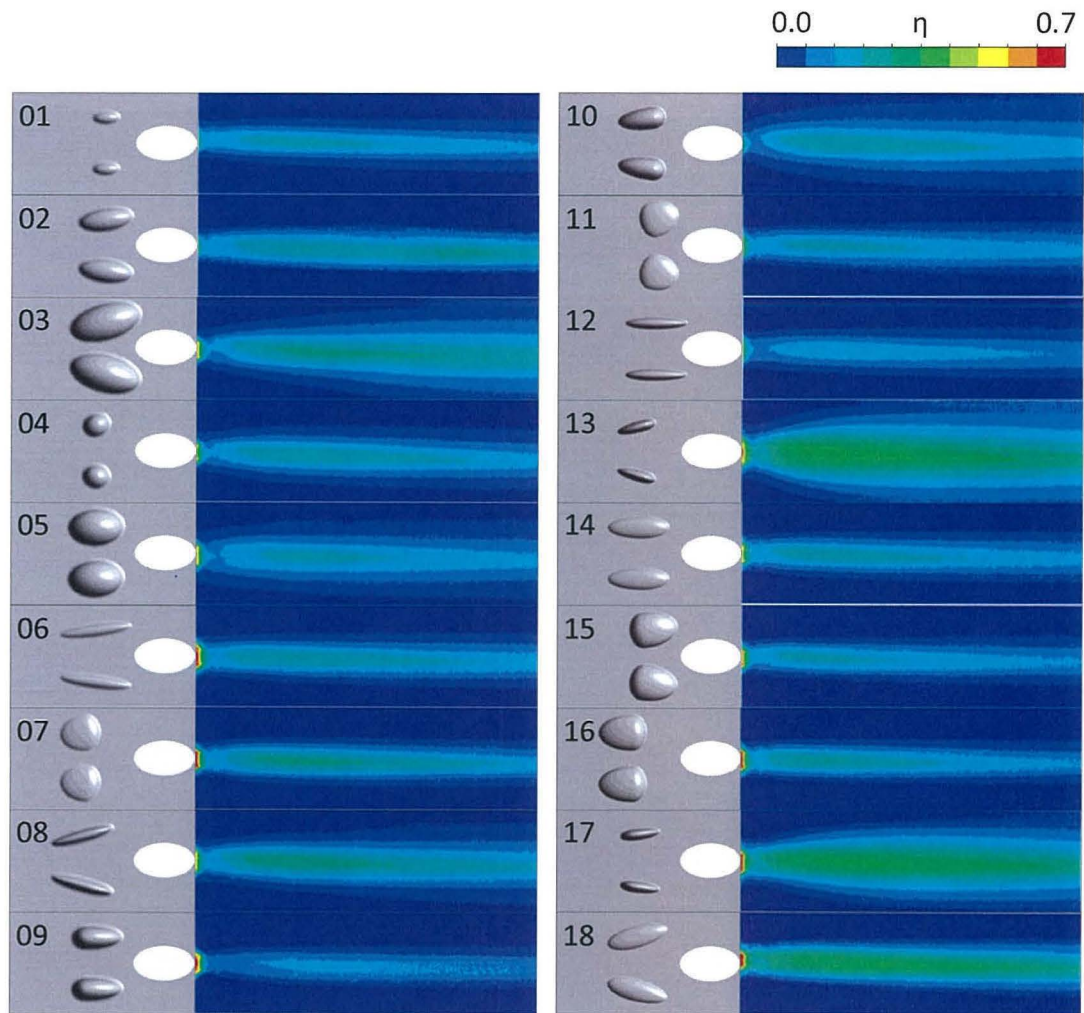


図 4.2.12 フィルム効率分布 (EFD,  $BR=1.0$ )



#### 4.2.6.2 数値解析結果（乱流モデル SST, Grid1）

実験と CFD の流れ場を比較する場合、最も格子解像度の高い Grid 1 と比較することが有効であると考えられるため、今回は Grid 1 の結果を示す。Grid 2, Grid 3 の結果については昨年度の報告書に示している。

図 4.2. 13～図 4.2. 15 には、CFD（乱流モデル：SST）によって得られた  $0 \leq x/d \leq 10$  でのフィルム効率分布を示す。結果は 3 種類の計算格子で得られた結果をそれぞれ示している。BR=0.5 では、二次空気の付着性が比較的高いことが予想されるが、この場合は 3 種類の計算格子でフィルム効率分布にほとんど違いが表れていない。実験で得られたフィルム効率分布と比較すると、定量的には局所的なフィルム効率は CFD では高く予想されているが、定性的な分布の傾向は一致しているように見える。BR $\geq$ 0.75 の条件では、冷却孔出口付近において、二次空気の付着性にわずかな変化が見られた。特に、BR=1.0 では Grid3 ではフィルム効率分布が見られない領域が広がっている。Grid3 では、デバイス下流側の空間的な格子解像度が不足しているために、格子解像度の影響を受けて二次空気の付着が見られない領域が存在していることが分かる。

#### 4.2.6.3 数値解析結果（乱流モデル RNG k- $\epsilon$ , Grid3）

図 4.2. 16～図 4.2. 18 には、CFD によって得られた乱流モデルを RNG k- $\epsilon$  model にした時のフィルム効率分布を示す。乱流モデルを SST にした場合と比較すると、全体的にフィルム効率が低く予測されていることが分かる。冷却孔近傍の局所のフィルム効率が低いことから、この場合においては温度場が減衰しているのではなく、二次空気の lift off がより大きく予測されてしまっていると考えられる。BR が高い条件になると、RNG k- $\epsilon$  の場合は、フィルム効率がスパン方向に広く広がっていない形態が観察される。このことから、RNG k- $\epsilon$  の場合は、lift off が過大に評価されていることがうかがえる。

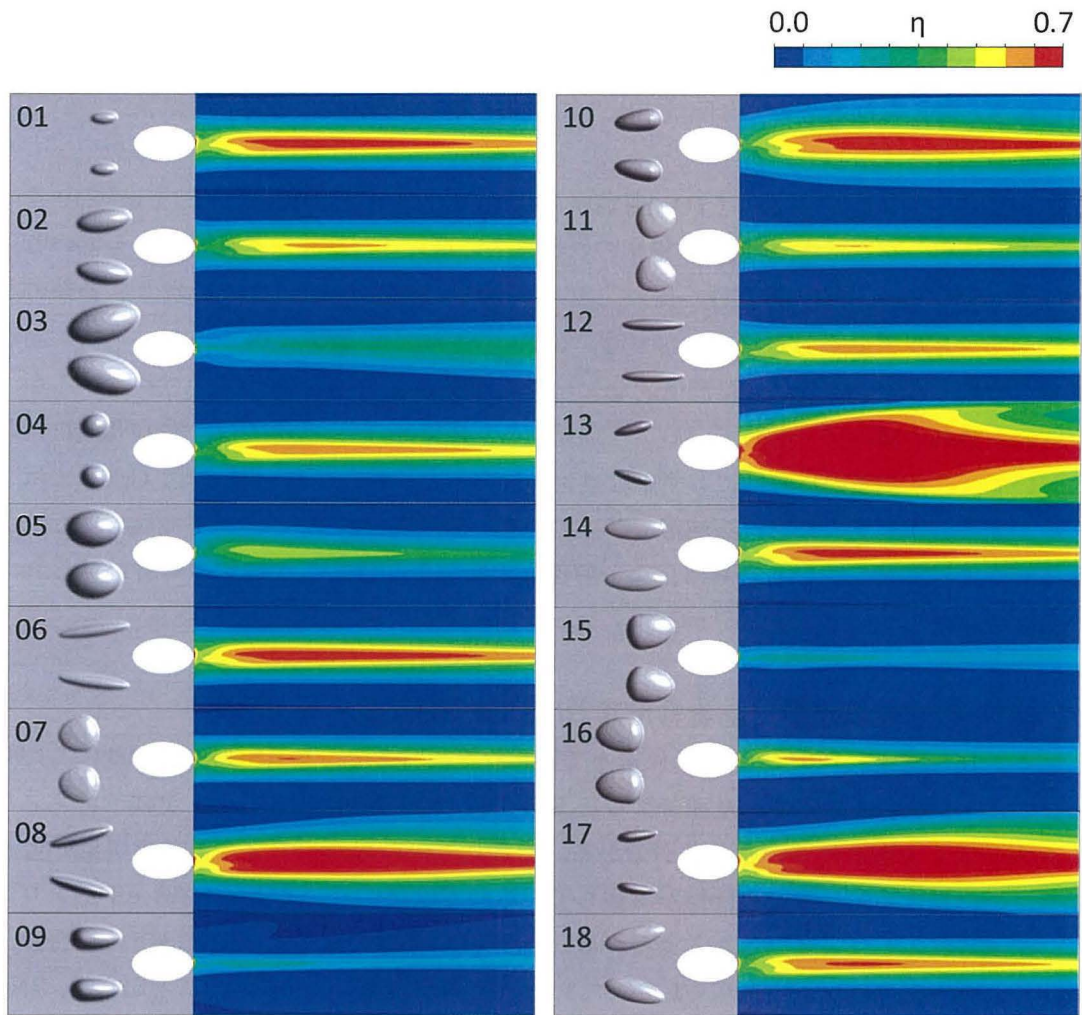


図 4.2.13 フィルム効率分布( $BR=0.5$ , 乱流モデル:SST, Grid1)

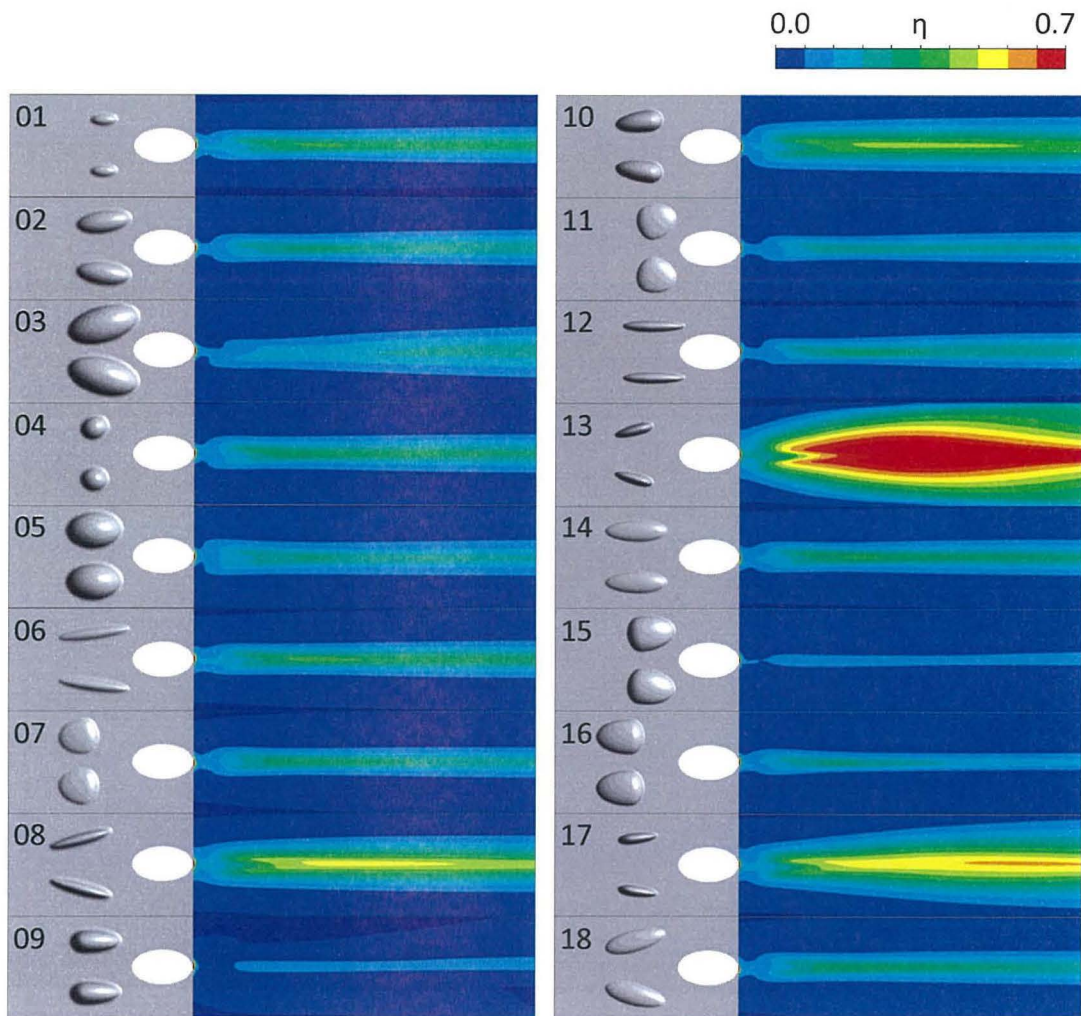


図 4.2.14 フィルム効率分布( $BR=0.75$ , 乱流モデル:SST, Grid1)

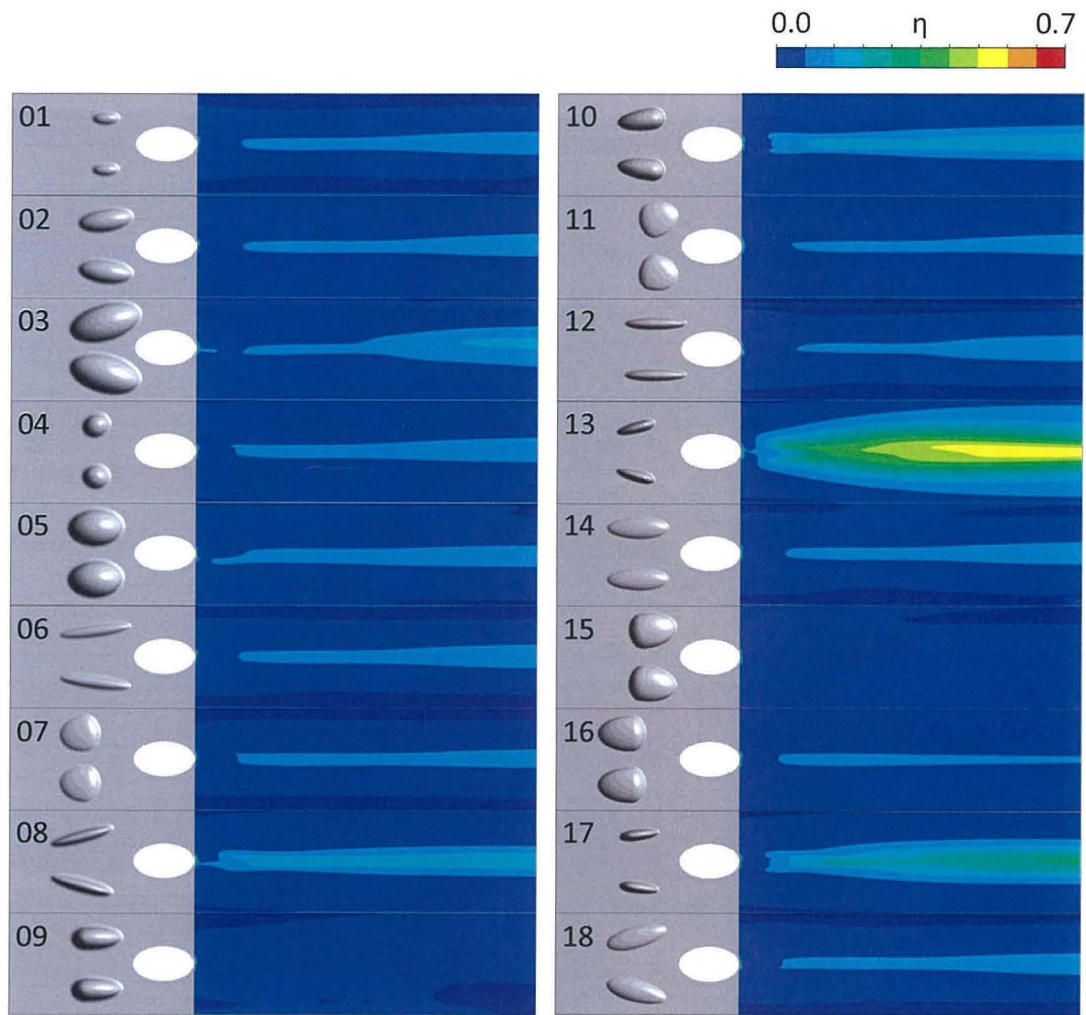


図 4.2.15 フィルム効率分布( $BR=1.0$ , 乱流モデル:SST, Grid1)

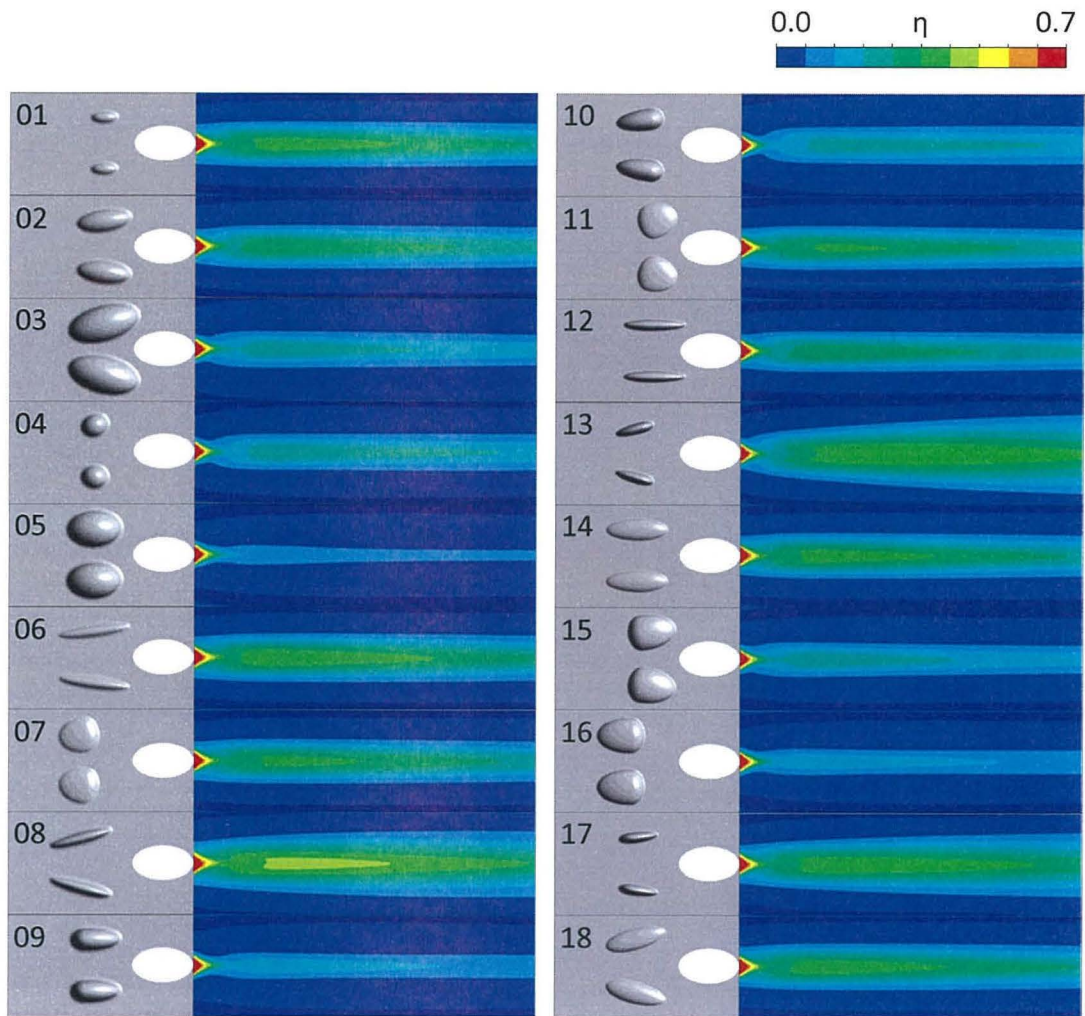


図 4.2.16 フィルム効率分布( $BR=0.5$ , 乱流モデル:RNG k- $\epsilon$ , Grid3)

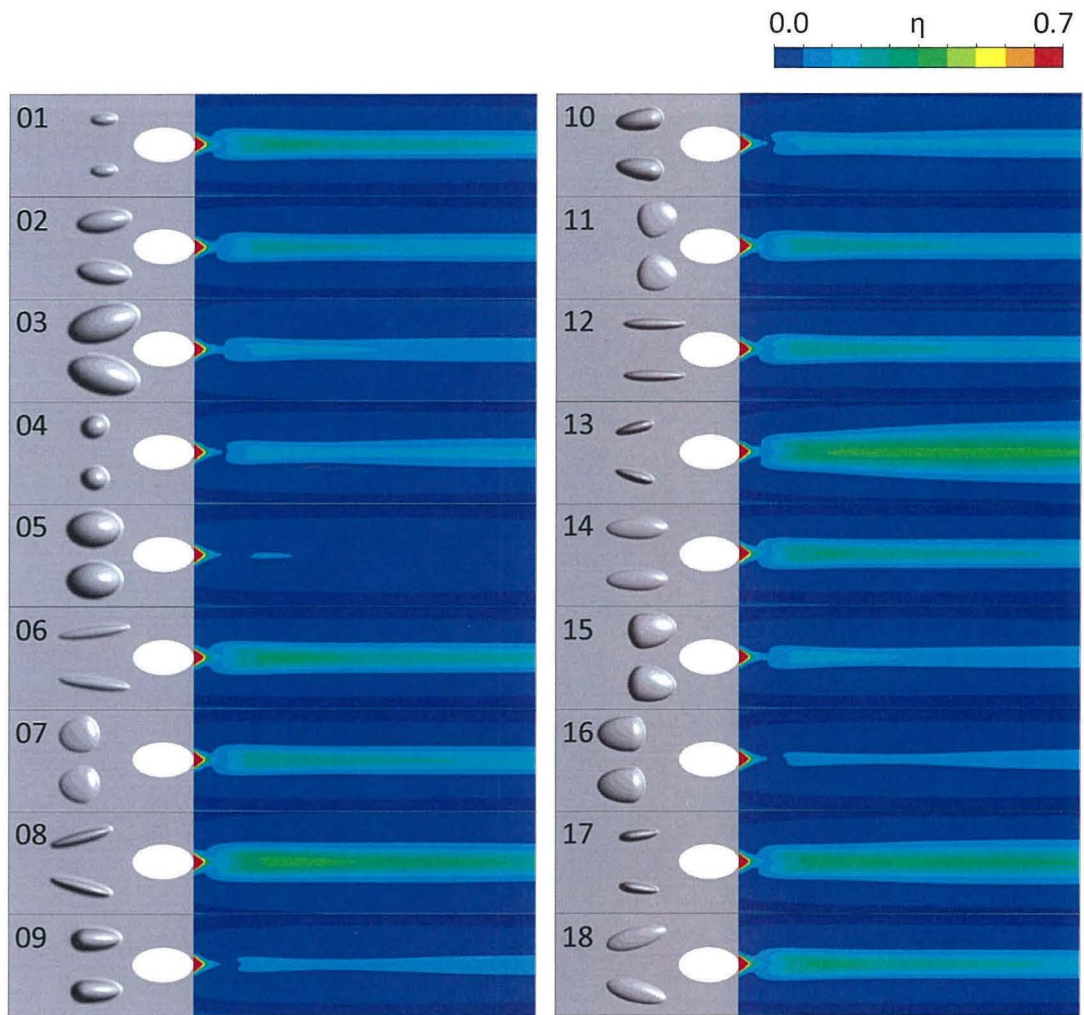


図 4.2.17 フィルム効率分布( $BR=0.75$ , 乱流モデル:RNG k- $\epsilon$ , Grid3)

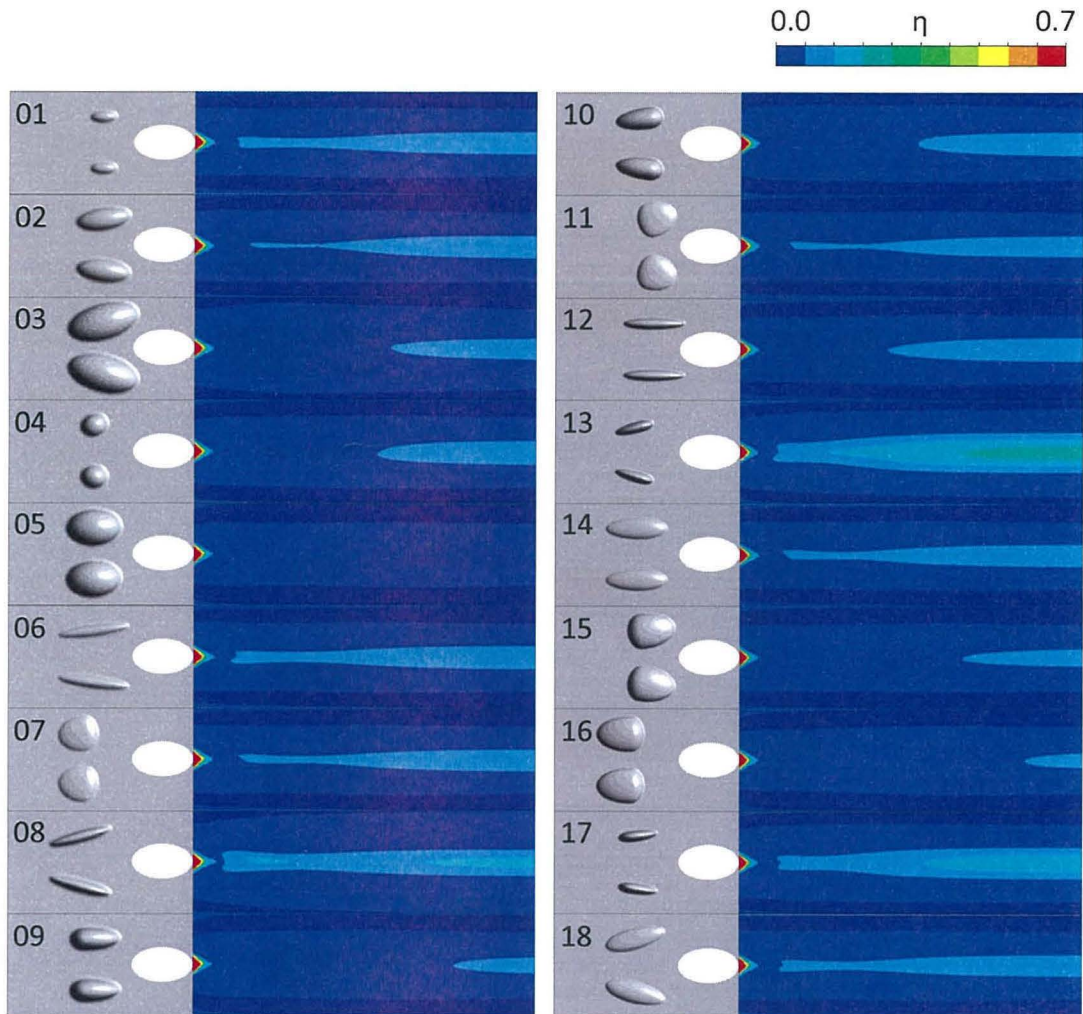


図 4.2.18 フィルム効率分布( $BR=1.0$ , 乱流モデル:RNG k- $\epsilon$ , Grid3)

#### 4.2.7 最適形態の比較

表 4.2.5～表 4.2.7 には、タグチメソッド解析を行った結果最適形態として選ばれた水準を示している。表中のオレンジ色の水準が最適形態として選択された水準を示している。実験と CFD 結果を比較すると、実験結果と乱流モデルを SST モデルにした場合の数値解析結果は一致することが示された。フィルム効率分布をみると、SST モデルではフィルム効率を実験結果に比べると過大に評価していることから、フィルム効率の最大化だけをターゲットに最適化を行った場合は、最適化の目的を達成することができるが、完全に定量的な性能予測までは難しいことが分かる。

RNG k- $\epsilon$  モデルの結果を比較してみると、これは実験結果との差異が表れた。このモデルの結果では、実験結果と定性的なフィルム効率分布の一致が見られなかったため、最適化の目標を達成できなかったものと考えられる。

表 4.2.5 フィルム効率を最大にする水準（実験結果）

Fillet	3mm	1mm	
Distance1	35mm	40mm	45mm
Length1	7mm	15mm	20mm
Length2	7mm	15mm	20mm
Height	3mm	6mm	10mm
Width	3mm	6mm	10mm
Angle	0°	7.5°	15°

表 4.2.6 フィルム効率を最大にする水準（SST, Grid 1）

Fillet	3mm	1mm	
Distance1	35mm	40mm	45mm
Length1	7mm	15mm	20mm
Length2	7mm	15mm	20mm
Height	3mm	6mm	10mm
Width	3mm	6mm	10mm
Angle	0°	7.5°	15°

表 4.2.7 フィルム効率を最大にする水準（RNG k-ε）

Fillet	3mm	1mm	
Distance1	35mm	40mm	45mm
Length1	7mm	15mm	20mm
Length2	7mm	15mm	20mm
Height	3mm	6mm	10mm
Width	3mm	6mm	10mm
Angle	0°	7.5°	15°



## 4.2.8 冷却孔出口流れ場

### 4.2.8.1 渦度分布(EFD vs CFD)

図 4.2.19 には、実験と CFD で得られた最適形態(case13 に等しい)の  $x/d=3.0$  における流れ方向渦度の分布を示す。実験結果中の A の渦ペアは、冷却孔から発生した CRVP を示している。一方で、図中の B で示される渦ペアは、DFCD から発生した縦渦を示している。B の渦の回転方向を見ると、A の回転方向と逆方向になっており、二次空気が lift off するのを抑制していることが分かる。さらに、渦の強さに関しても、CRVP よりも強い渦が発生していることが分かった。CFD 結果と実験結果を比較すると、SST モデルでは、定性的に渦度分布を精度よく予測できているのに対して、RNG k- $\epsilon$  モデルでは、渦度分布の定性的な傾向が実験結果と異なっており、冷却孔から発生した CRVP が支配的な流れ場となっていることが分かる。他に実験結果と異なる点としては、壁面近傍の渦度が実験では捉えられていないことが挙げられる。これは、LDV 計測においては、壁面付近の計測においてレーザーが反射してしまうため、計測が十分に行えなかったためである。今回、RNG k- $\epsilon$  モデルでは、CRVP の両脇に縦渦が弱く形成されていたため二次空気がスパン方向に広がらず、二次空気が lift off しているように予測されてしまっていたと考えられる。この傾向は、壁面フィルム効率分布からも、同様に読み取ることが可能である。

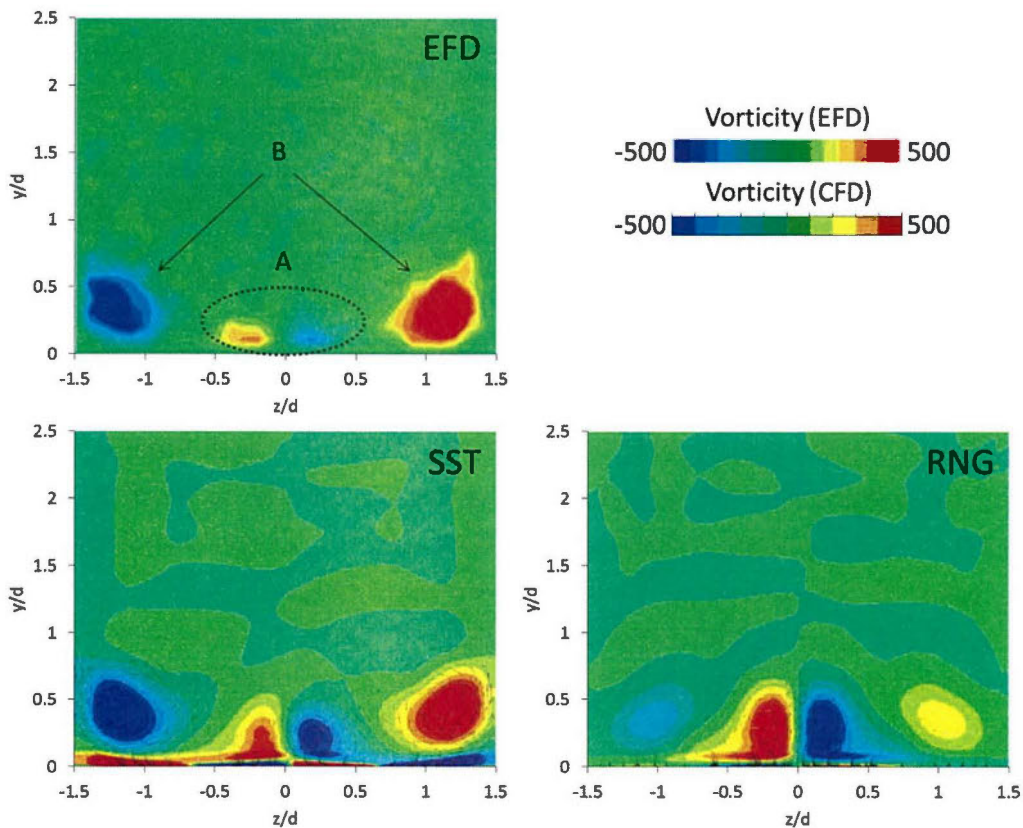


図 4.2.19 渦度分布( $x/d=3.0$ , case13,  $BR=0.5$ )

図 4.2. 20 には、比較のため case01 における  $x/d=3.0$  における流れ方向渦度分布を示す。Case13 の場合と比較すると、Device から発生した縦渦の分布がほとんど見られず、渦ペア A のみが観察された。この傾向は、CFD 結果でも同様に観察することができる。

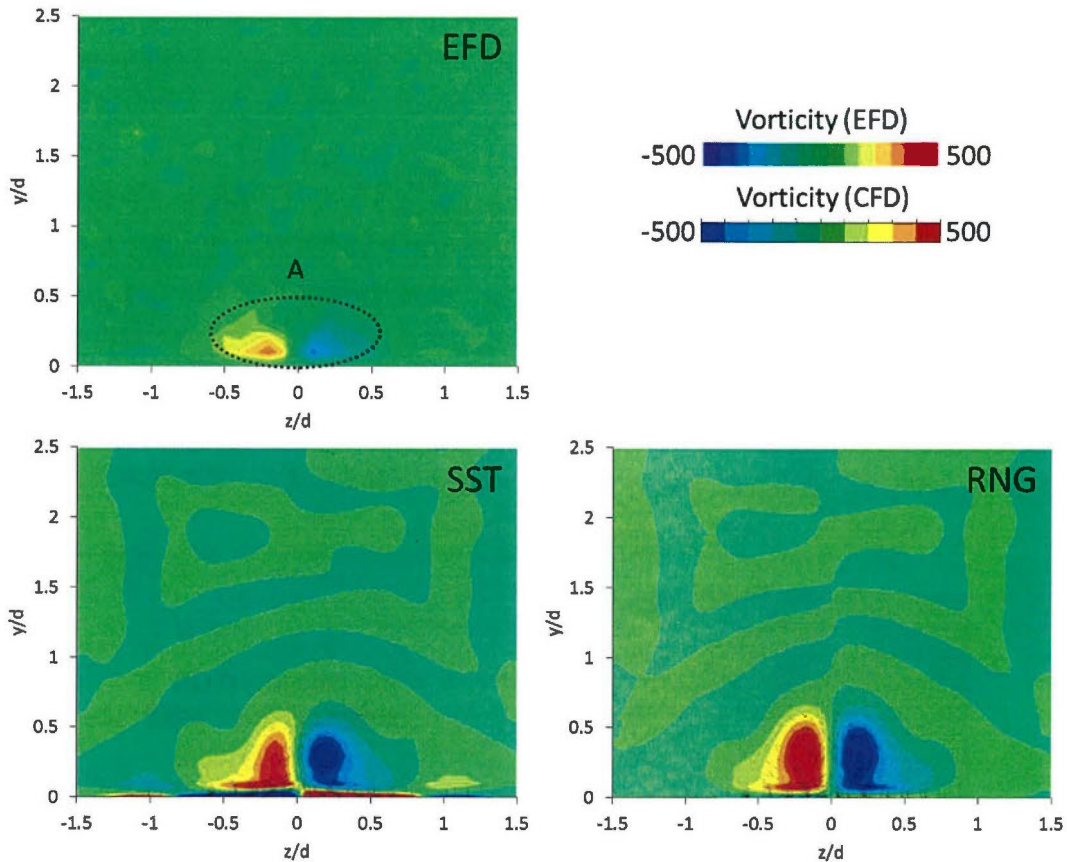


図 4.2. 20 渦度分布( $x/d=3.0$ , case01,  $BR=0.5$ )

他にフィルム効率の高かった形態として、図 4.2. 21 には case17 下流側の渦度分布を示す。Case17 の渦度分布においては、case13 と同様に CRVP の両脇に Device から発生した縦渦が観察される。しかし、case13 と比較すると渦度自体は弱くなっていることが分かる。これにより、case17 ではスパン方向へフィルム効率分布が広がるが、case13 よりはフィルム効率が低くなったと考えられる。CFD と実験結果を比較すると、CFD でも、case13 に比べると case17 の方が縦渦の渦度が低くなることが予測されており、SST モデルの計算結果は実験結果と定性的に一致していることが分かる。

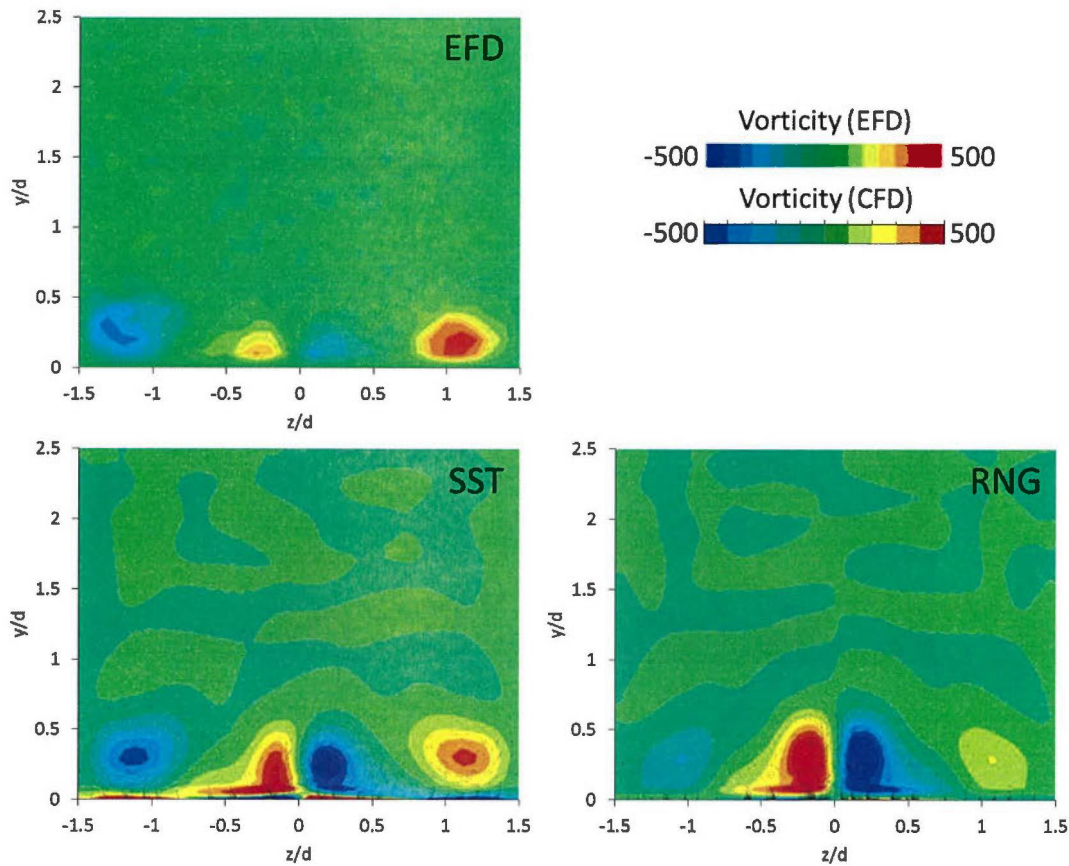


図 4.2. 21 渦度分布( $x/d=3.0$ , case17,  $BR=0.5$ )

図 4.2. 22 には、実験と CFD で得られた case01,  $BR=1.0$  の渦度分布を示す。実験結果を見ると、 $BR=0.5$  の条件と比較すると、CRVP の規模が吹き出し比の増加と共に大きくなっている様子が観察される。CFD 結果においても同様に、 $BR$  の増加と共に CRVP の規模が大きくなることが観察された。CRVP の様子を CFD 結果同士で比較すると、SST モデルの方が、渦度分布が壁面寄りに形成されているのに対して、RNG k- $\epsilon$  モデルの計算結果は、渦度分布が  $y$  方向に引き伸ばされる形の分布になっていることが分かる。

図 4.2. 23 に、実験と CFD で得られた case13,  $BR=1.0$  の渦度分布を示す。Device から発生する縦渦による渦度分布については、 $BR=0.5$  の場合と比較すると若干の差異が表れており、縦渦による渦度分布が小さくなっていることが分かる。これは、Device から発生する縦渦と、CRVP の干渉の形態が吹き出し比の増加と共に変化したからであると考えられる。Case01,  $BR=0.5$  の条件と渦度分布を比較すると、冷却孔センターライン上の CRVP は両ケースで殆ど違いが表れていなかった。

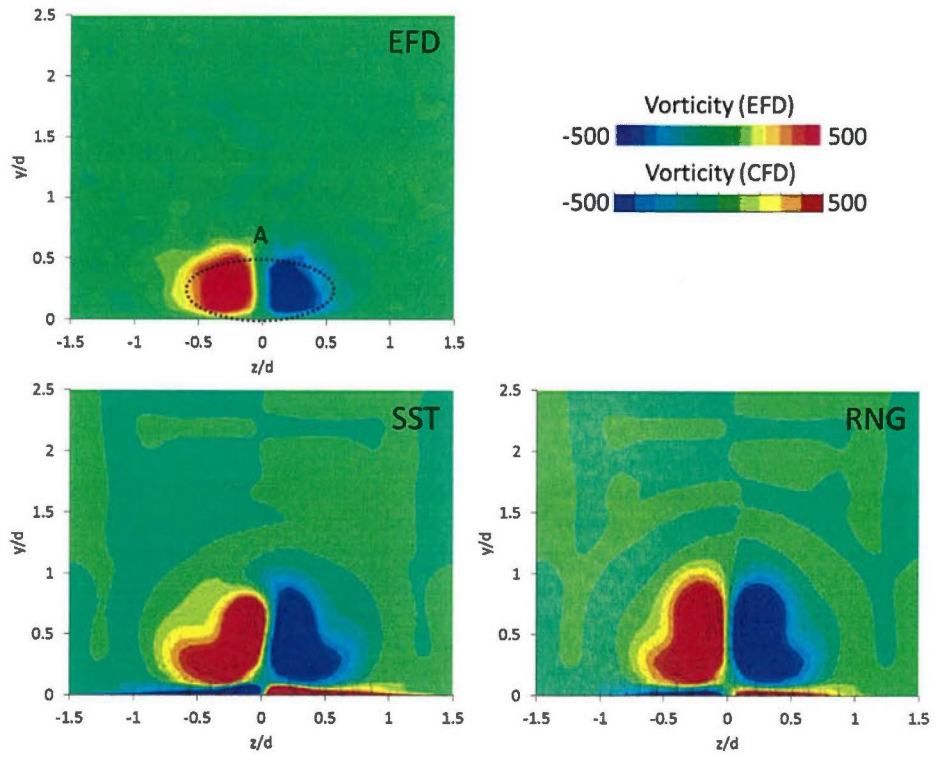


図 4.2.22 渦度分布( $x/d=3.0$ , case01,  $BR=1.0$ )

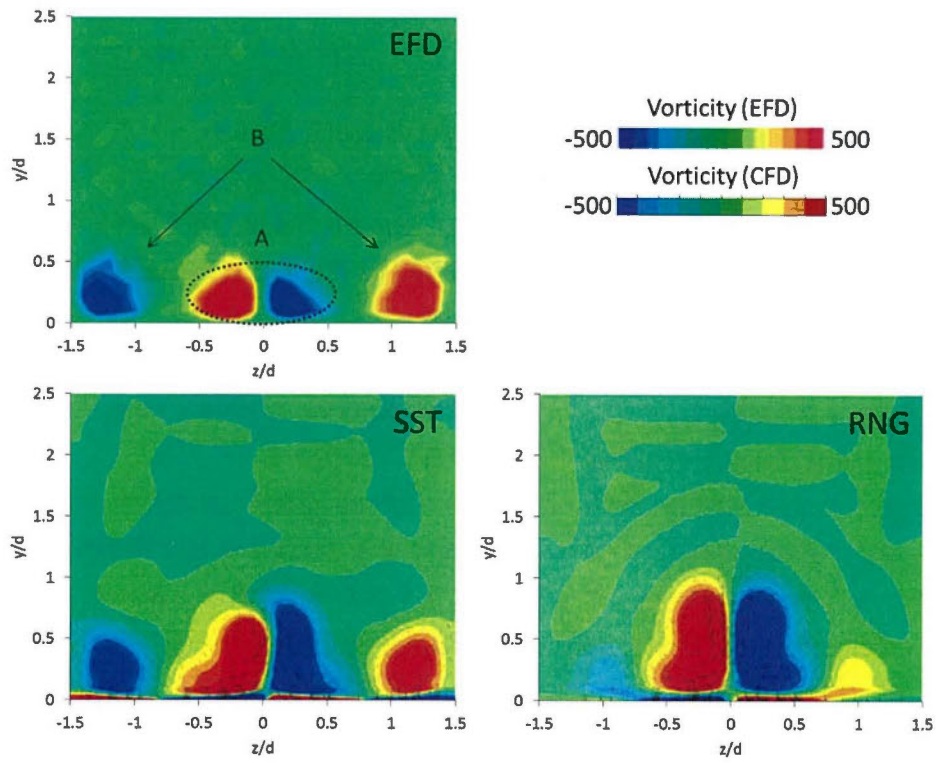


図 4.2.23 渦度分布( $x/d=3.0$ , case13,  $BR=1.0$ )

#### 4.2.8.2 流れ場計測結果（渦度以外，実験と CFD の比較）

図 4.2.24 には，実験で得られた  $x/d=3.0$  における無次元流れ方向流速分布を示す．Case01 の場合，冷却孔センターライン付近に観察される低速度領域は，CRVP によるものである．また，壁面付近にスパン方向へ広く低速度領域が分布しているが，これは境界層による低速度領域を示している．Case13 の場合，冷却孔センターライン上の低速度領域に加えて，その両脇にも低速度領域が観察される．これは，Device から発生した縦渦による低速度領域を示している．また，CRVP による低速度領域を Case01 と比較すると，低速度領域自体事態が壁面へわずかに寄っていることが分かる．これは，Device から発生した縦渦が二次空気の lift-off を抑制していることを示している．これらの低速度領域は，二次空気の存在領域とほぼ等しいと考えられ，Case13 の場合では，二次空気がスパン方向へ広く分布していることが速度分布からも予想される．

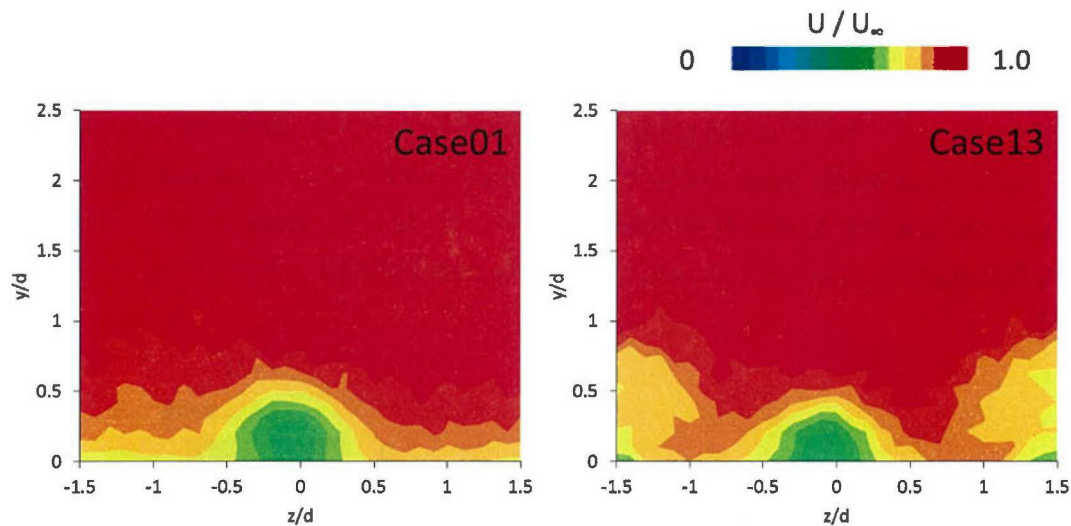


図 4.2.24 無次元流れ方向流速( $x/d=3.0, BR=0.5$ )

図 4.2.25 には，実験で得られた， $x/d=3.0$  における無次元流れ方向速度変動 RMS の分布を示す．主流中の速度変動 RMS に比べると壁面付近は二次空気が存在することや，境界層の影響により，速度変動 RMS が増大していることが分かる．特に Case01 の，冷却孔のセンターライン上では，RMS が高い値を示している箇所が観察できる．これは，冷却孔から発生した CRVP によって主流と二次空気の混合が促進されているため，速度変動 RMS は高い値を示していると考えられる．Case13 の速度変動 RMS を比較すると，Device から発生した縦渦により速度変動 RMS は増加している領域が観察されるが，CRVP 自体の速度変動 RMS と比較すると速度変動 RMS の値は小さくなっていることが分かる．

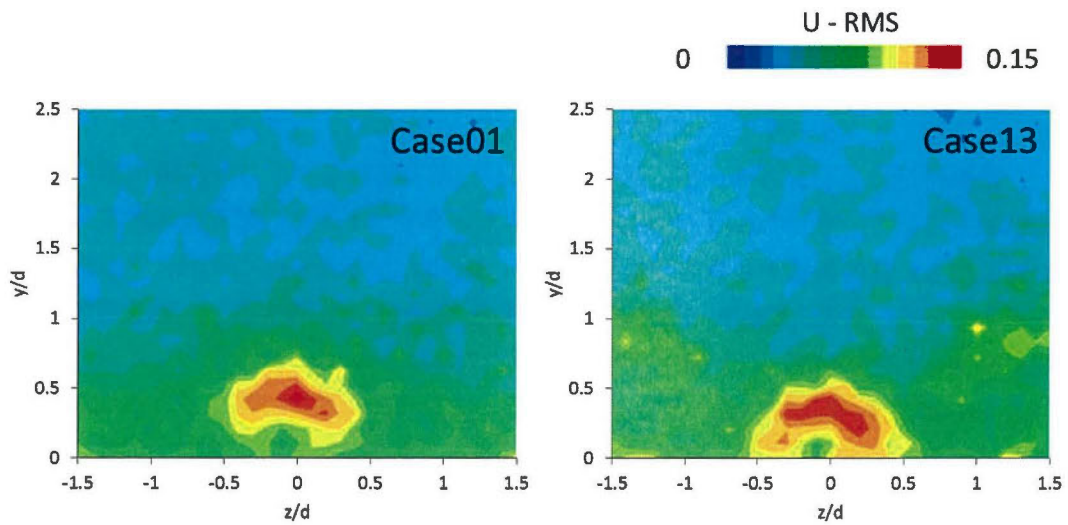


図 4.2. 25 流れ方向速度変動 RMS( $x/d=3.0, BR=0.5$ )

図 4.2. 26 には、スパン方向速度変動 RMS の分布を示している。速度の値自体が異なるため、流れ方向速度変動 RMS とはレンジが異なっているが、スパン方向速度に関しては、Case13 での速度変動 RMS の増加が顕著に表れている。従って、冷却孔センターライン上の速度変動 RMS と、Device による縦渦の速度変動 RMS は同程度になっていることが観察される。

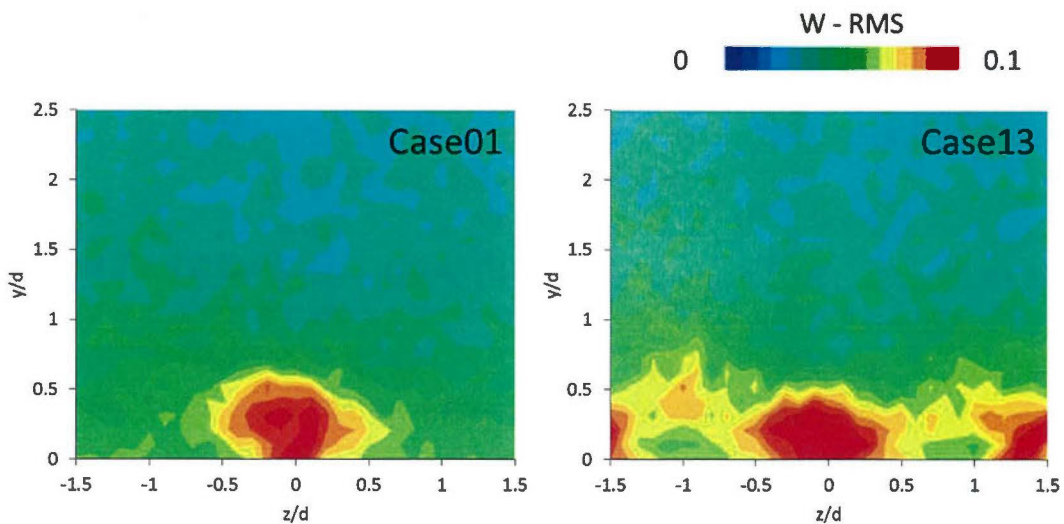


図 4.2. 26 スパン方向速度変動 RMS( $x/d=3.0, BR=0.5$ )

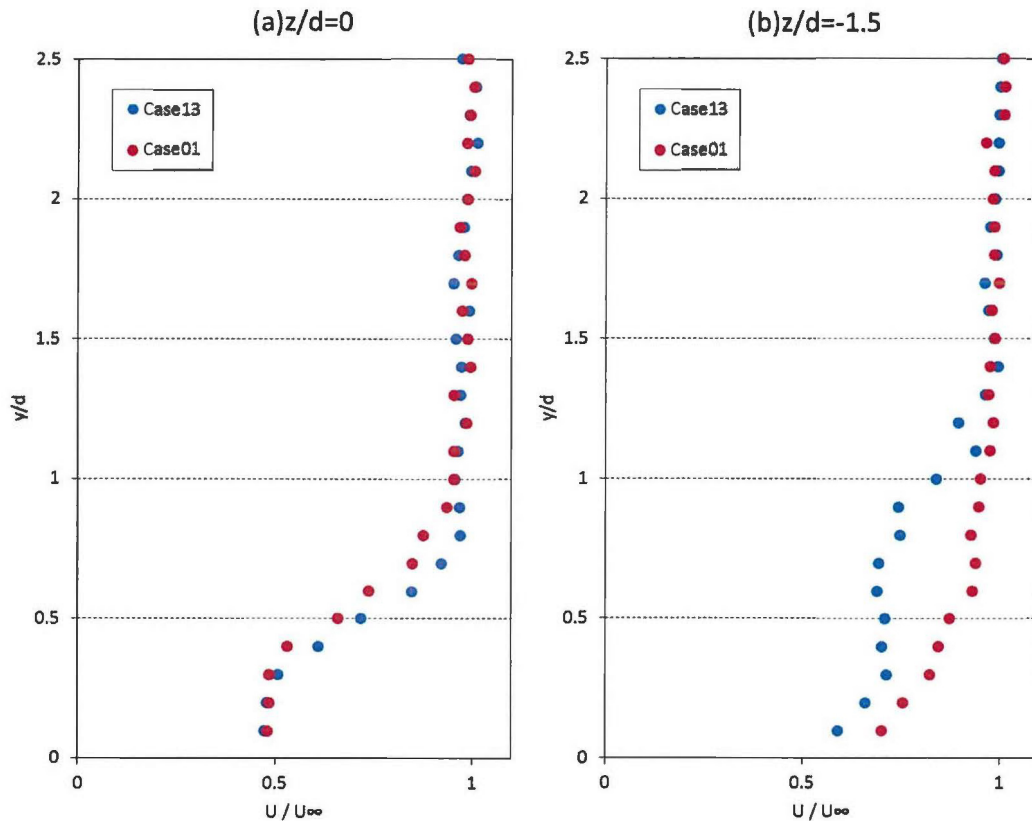


図 4.2.27 無次元流れ方向速度プロファイル( $BR=0.5$ , EFD)

図 4.2.27 には、実験で得られた無次元流れ方向速度プロファイルを示す。冷却孔のセンターライン位置(a)では、Case13 と Case01 で速度プロファイルに殆ど違いが表れていない。従って、定量的にも Device から発生する渦により流れ方向流速は影響を受けていないことが分かる。  $z/d=-1.5$  の位置においては、速度プロファイルに差が表れている。Case01 においては、二次空気がスパン方向へ広がらず、この位置では二次空気が存在しないと考えるため、速度プロファイルは境界層の部分で低速度を示しているだけである。一方で、Case13 の場合は、縦渦が存在しており、二次空気がスパン方向へ拡散しているために、Case01 に比べて低速度な領域が壁面法線方向に比六部分布していることが確認できる。

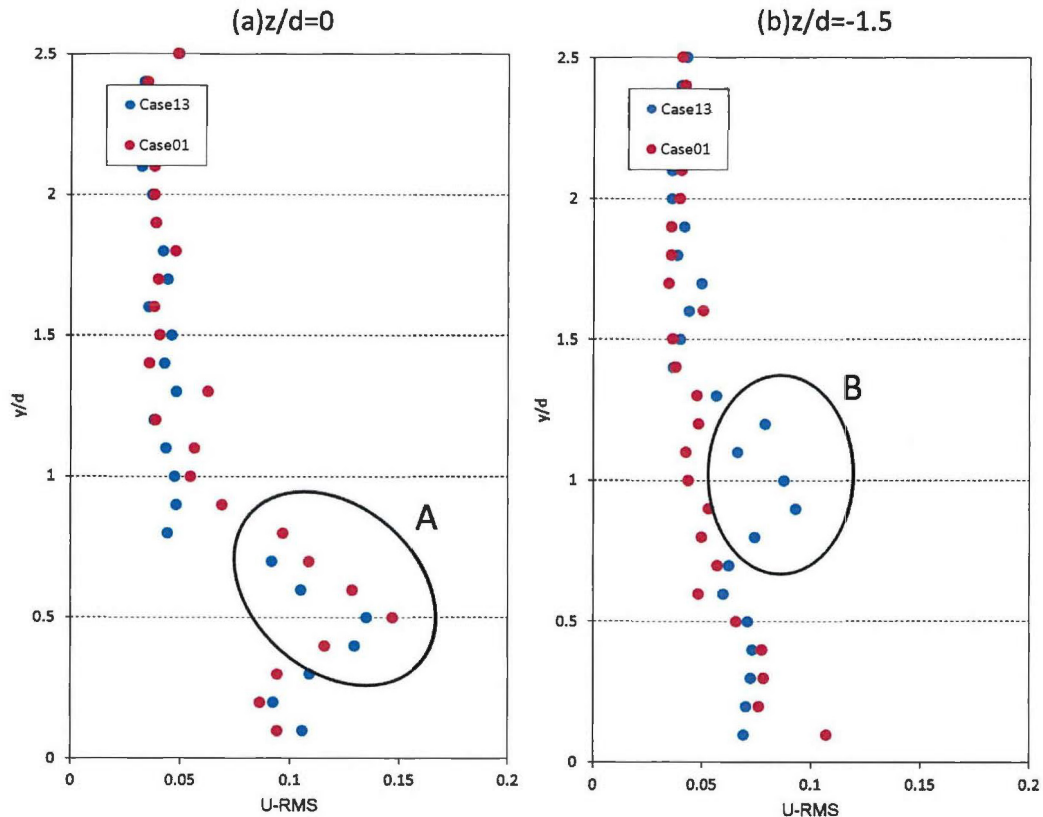


図 4.2.28 無次元流れ方向速度 RMS プロファイル( $BR=0.5$ , EFD)

図 4.2.28 には、実験で得られた無次元流れ方向速度 RMS プロファイルを示す。冷却孔のセンターライン位置では、A の位置において速度変動 RMS が高い値を示している。図 4.2.27 では、 $y/d=1.0$  の付近で、速度勾配が急になっているがこの位置で主流と二次空気がせん断している領域であると考えられる。今回、速度変動 RMS が高くなった位置は、このせん断領域と一致しており、主流と二次空気のせん断により発生する非定常な流れ場が、高い速度変動 RMS を生み出していると考えられる。(b)の領域では、B の領域において、速度変動 RMS は比較的高い値を示している。この位置では、二次空気が渦によって巻きあげられている領域であると考えられ、この領域でも主流と二次空気のせん断領域において速度変動 RMS が高くなっていると考えられる。速度変動 RMS の絶対値を(a)と(b)の領域で比較すると、(b)では 2 倍程度速度変動 RMS が低くなっており、CRVP による高い速度変動 RMS が支配的になっていることが分かる。



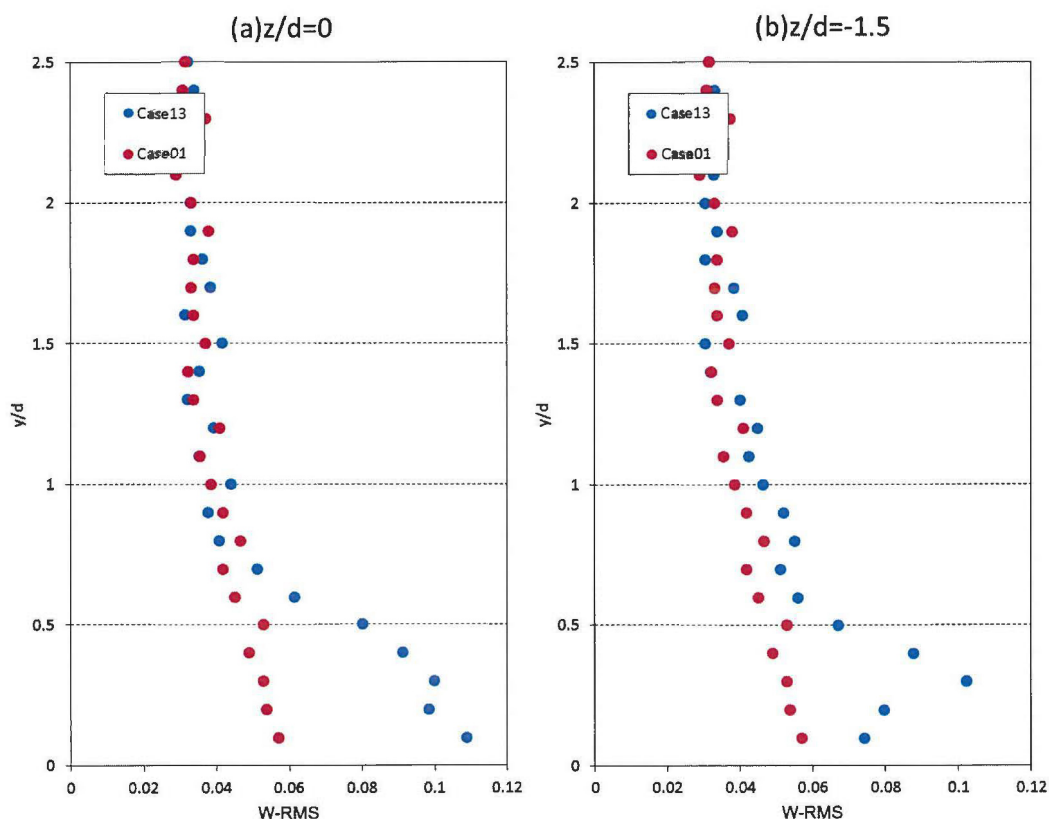


図 4.2. 29 無次元スパン方向速度 RMS プロファイル( $BR=0.5$ , EFD)

図 4.2. 29 には , 実験で得られた無次元スパン方向速度 RMS プロファイルを示す。冷却孔のセンターラインでの速度変動 RMS を比較すると, 流れ方向の速度変動 RMS では Case13 と Case01 で違いが殆ど表れていなかったが, 今回は両ケースで違いが表れていた。これは, Device から発生した渦により, スパン方向速度の速度変動が影響を受けているためである。速度変動 RMS の高い領域に関しては, 壁面付近に寄っている。これは CRVP と Device から発生した渦の相互作用によるものである。(b)の領域においては, (a)と同様に速度変動 RMS が高くなっている領域が壁面付近で観察される。速度変動 RMS の絶対値を比較すると, 流れ方向速度変動 RMS では, (a)と(b)の領域に差が表れていたが, スパン方向速度変動 RMS については(a)と(b)の領域で, 差が表れていることが観察できる。

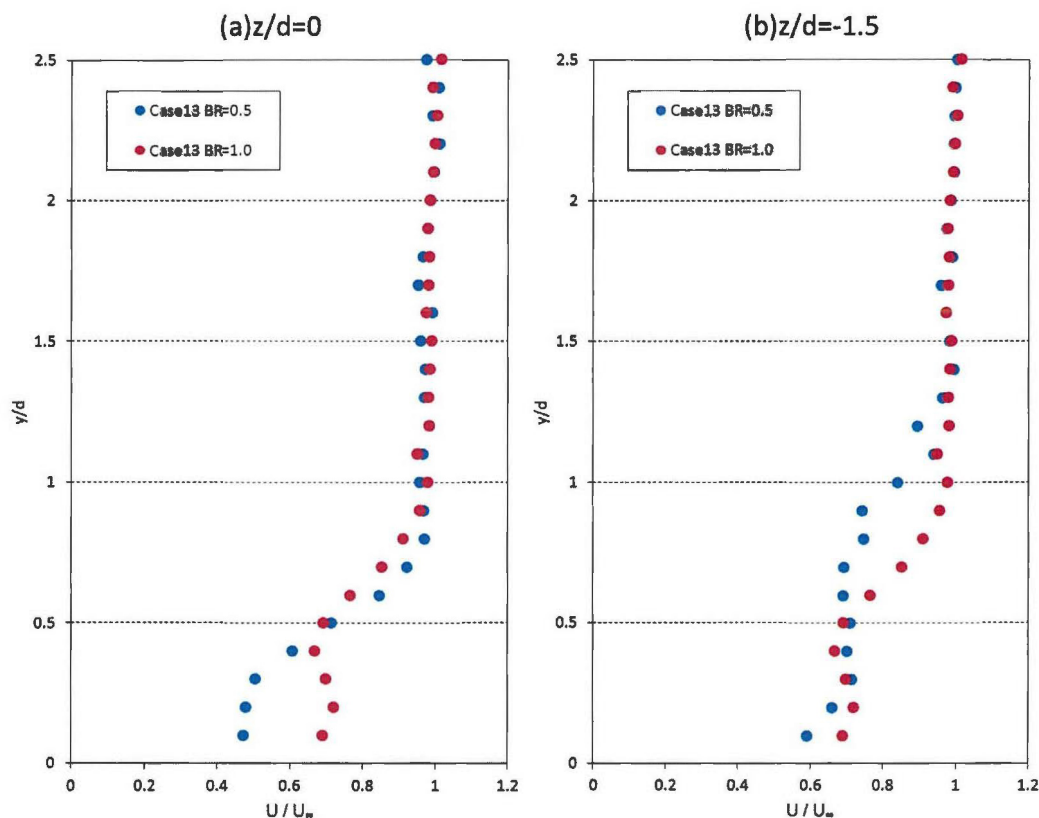


図 4.2.30 無次元流れ方向速度プロファイル(Case13,  $BR=0.5$ vs $1.0$ , EFD)

図 4.2.30 には、実験で得られた無次元流れ方向速度プロファイルを示す。(a)と(b)の領域で、 $BR=0.5$  と  $1.0$  を比較すると、壁面付近の低速度領域に差異が表れていることが分かる。これは、 $BR$  の違いにより、二次空気が lift-off する様相が異なるためである。(b)の領域においては、Case13 の方が、低速度領域が比較的少なくなっている。

図 4.2.31 には、実験で得られた無次元流れ方向速度 RMS プロファイルを示す。(a)の両機において、 $BR$  による違いを観察すると、高い RMS 領域がわずかに  $BR=1.0$  において、壁面法線方向に高い位置になっていることが分かる。これは、 $BR=1.0$  では二次空気が lift-off するために、主流と二次空気のせん断領域が、壁面法線方向に高い位置になることに起因している。一方で、(b)の領域においては速度変動 RMS には  $BR$  による違いが表れていなかった。

図 4.2.32 には、実験で得られた無次元スパン方向速度 RMS プロファイルを示す。(a)の領域においては、スパン方向の速度変動 RMS が全体的に高くなっていた。これは、二次空気が存在する領域において CRVP が強くなるために、スパン方向の速度変動が大きくなったためと考えられる。(b)の領域については、殆ど速度変動 RMS に違いは表れていなかった。

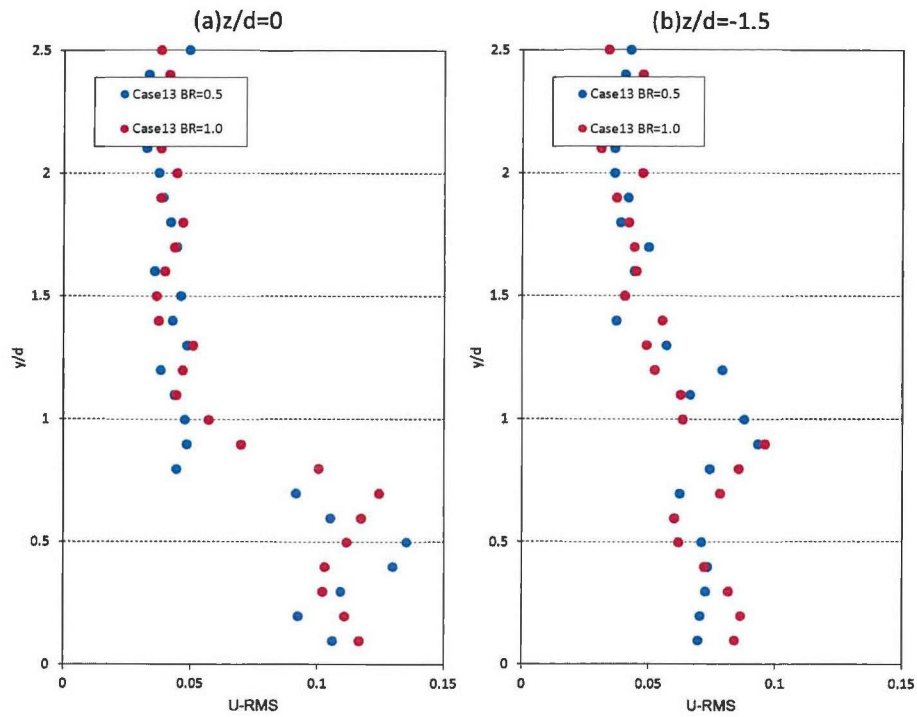


図 4.2.31 無次元流れ方向速度 RMS プロファイル(Case13,  $BR=0.5$ vs $1.0$ , EFD)

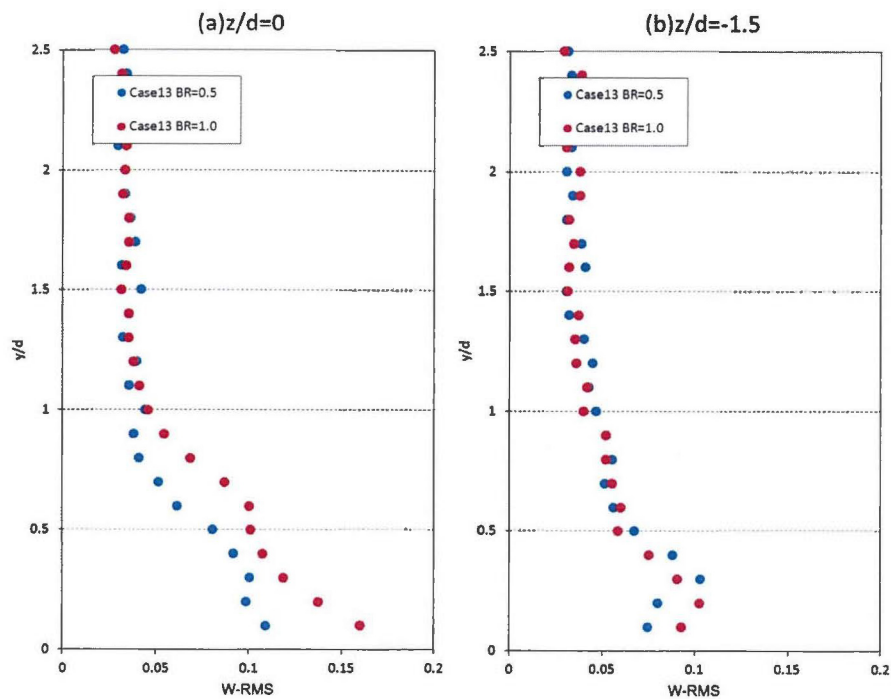


図 4.2.32 無次元スパン方向速度 RMS プロファイル(Case13,  $BR=0.5$ vs $1.0$ , EFD)

図 4.2. 33 には、実験と CFD で得られた  $BR=0.5$  の無次元流れ方向流速分布を示す。CFD 結果は、縦渦の存在領域の無次元速度に差異が表れている。SST モデルの計算結果は、渦度が強く、渦自体の巻き上がりが強いいため、低速度領域も壁面法線方向に巻き上がりが確認できる。それにより、冷却孔センターライン上の低速度領域が壁面へ付着している。一方で RNG k- $\epsilon$  モデルの計算結果では、縦渦による低速度領域が壁面へ付着している。実験と CFD の傾向を比較すると、SST モデルの方が定性的な傾向が一致している。

図 4.2. 34 には、実験と CFD で得られた  $BR=1.0$  の無次元流れ方向流速分布を示す。 $BR=1.0$  の実験では、冷却孔のセンターライン脇に縦渦による低速度領域が確認されるうえ、CRVP による低速度領域は  $BR=0.5$  と比べると、壁面法線方向へ広がっている。CFD 結果については、冷却孔センターライン上の低速度領域に実験と CFD の両方で違いが表れた。特に、冷却孔センターライン上に  $U/U_\infty=1$  となっている領域が確認されており、二次空気が lift-off する挙動が CFD においては、十分な予測ができなかったと考えられる。

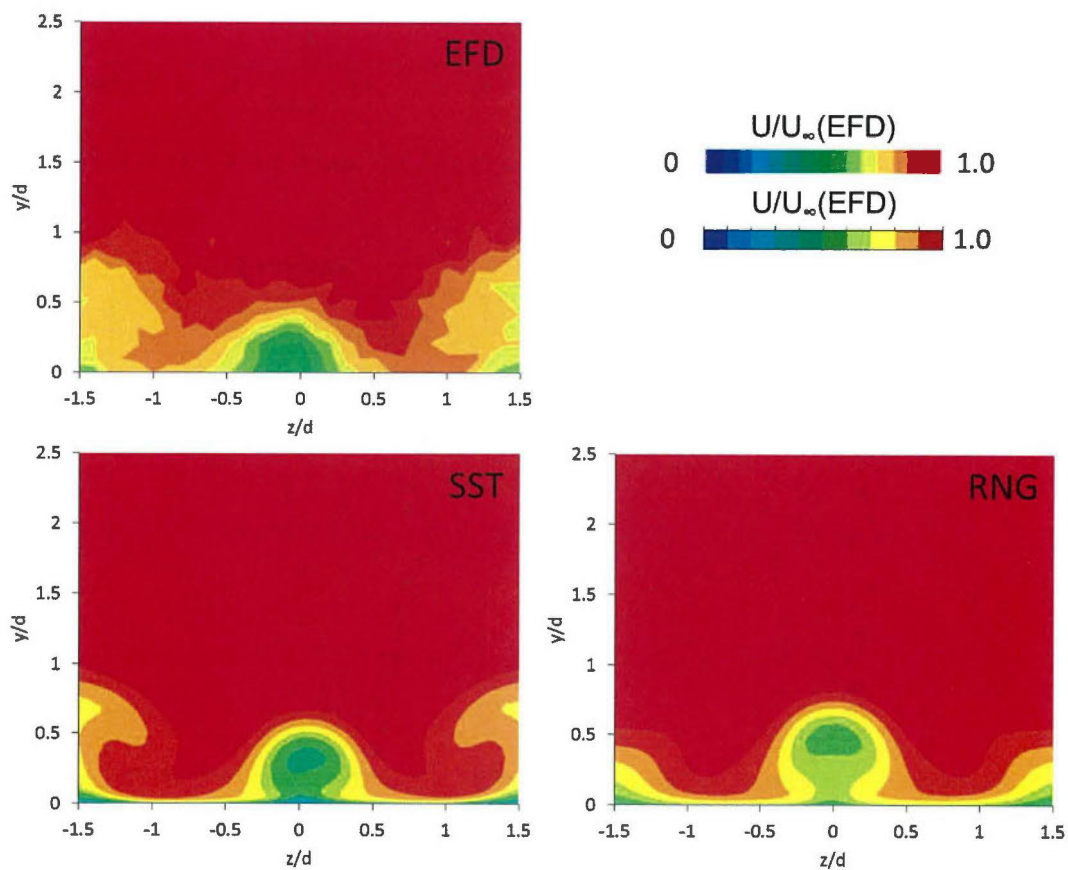


図 4.2. 33 無次元流れ方向流速(EFD vs CFD,  $BR=0.5$ )

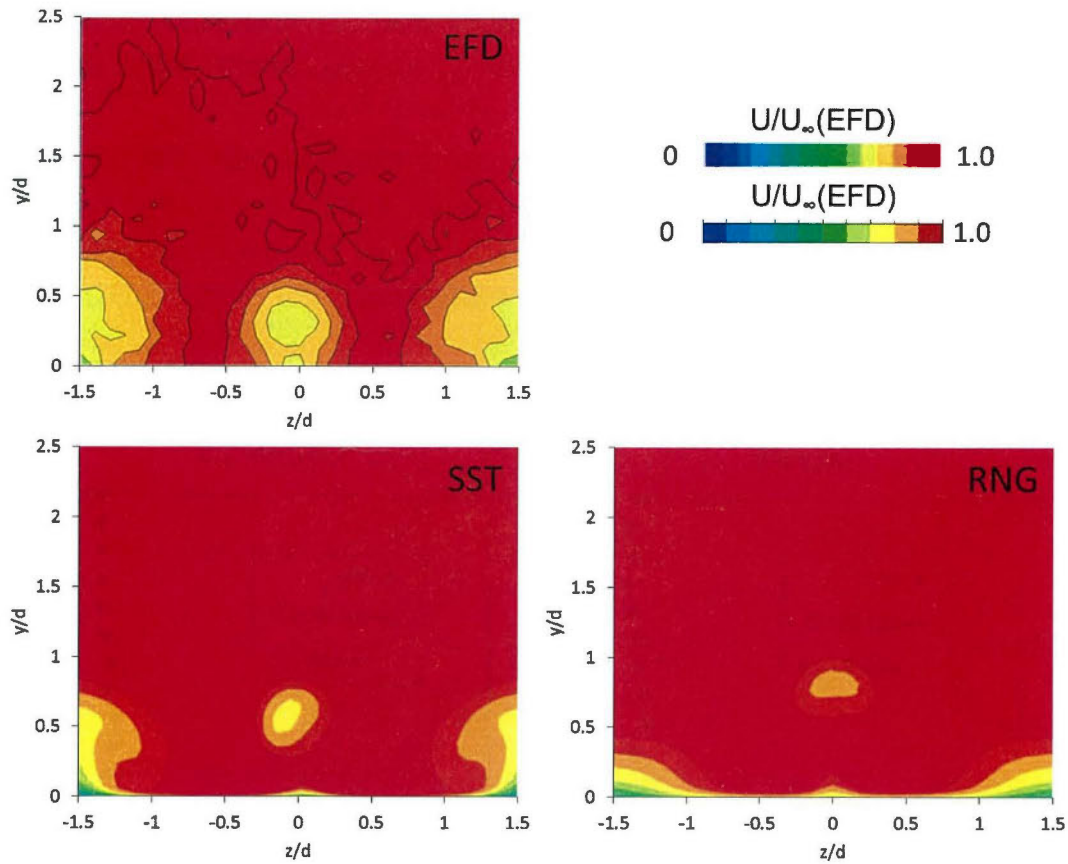


図 4.2.34 無次元流れ方向流速(EFD vs CFD,  $BR=1.0$ )

図 4.2.35 には、実験と CFD で得られた流れ方向無次元速度プロファイルを各位置で示す。(a)の領域においては、実験と CFD 結果を比較すると、SST モデルの計算結果ではおおむねプロファイルが一致している。一方で、RNG  $k-\epsilon$  モデルの計算結果においては、低速度領域が壁面法線方向へ広く分布しており、主流と二次空気のせん断領域が異なっている。従って、RNG  $k-\epsilon$  モデルの計算結果では二次空気の lift-off を十分に予測できなかったと考えられる。(b)の領域においても、実験と CFD 結果を比較すると SST モデルの計算結果ではおおむね実験結果と似た傾向を示していた。しかし、厳密には低速度領域の予測に差異が生じており、壁面法線方向の渦の巻き上がりについて予測精度の影響が表れたと考えられる。RNG  $k-\epsilon$  モデルの計算結果については、定性的にも実験結果とは一致しない速度プロファイルとなっていた。

図 4.2.36 には、実験と CFD で得られた流れ方向無次元速度プロファイルを各位置で示す。(a)の領域においては、特に  $0 \leq y/d \leq 0.75$  の領域で速度プロファイルに差異が表れた。実験結果では、壁面付近に低速度領域が広がっているのに対して、CFD 結果では壁面付近に速度が 1 に近い領域が形成されている。図 4.2.37 には  $z/d=0$  における、無次元流れ方向速度プ

ロファイルを示す。流れ方向速度の分布を観察すると、 $BR=1.0$  の条件においては二次空気が lift-off している様子が分かる。 $z/d=0$  付近の、速度が回復している領域に関しては、lift-off した二次空気の wake 領域となっていることが分かる。この wake 領域が、実験と CFD で差が表れたものと考えられる。

図 4.2.36 (b)の領域は、SST モデルの計算結果において実験の傾向を概ね予測できていた。この領域は Device から発生した縦渦の存在領域であり、冷却孔のセンターラインよりも予測精度が高くなっていることが分かる。これにより、Device から発生した渦の方が、冷却孔から発生した CRVP よりも非定常性が弱く、予測精度が高くなっていることが分かる。

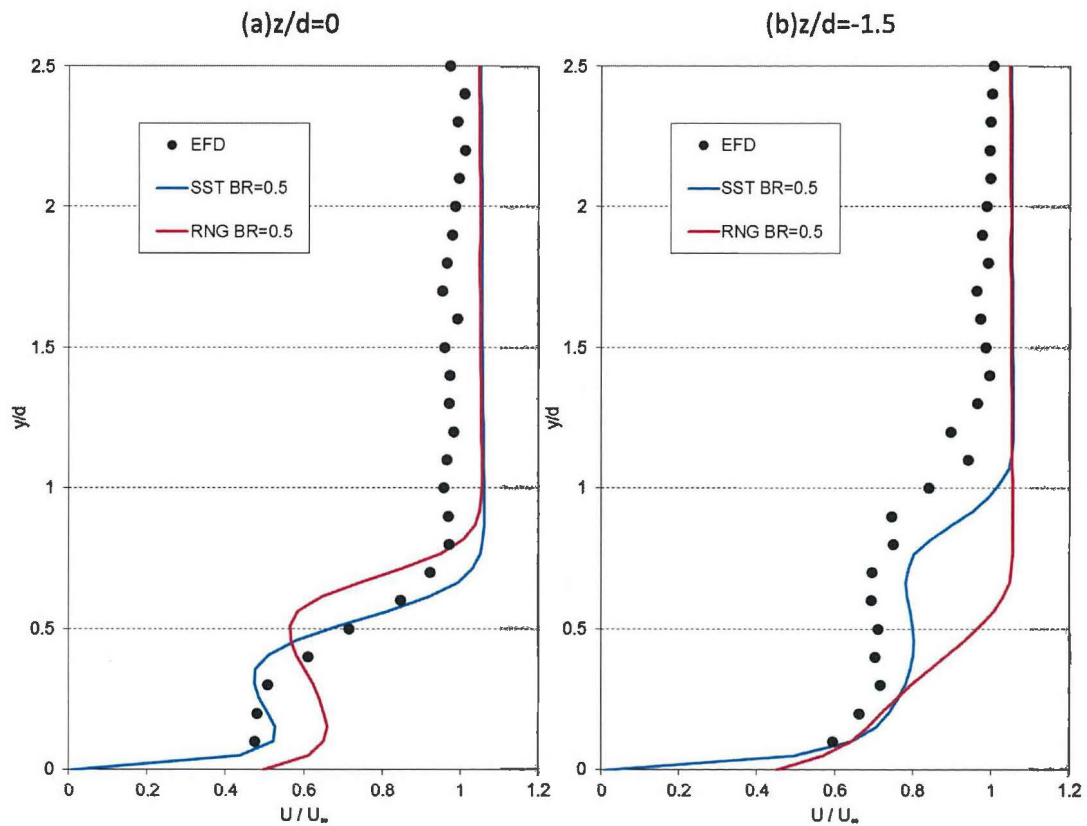


図 4.2.35 無次元流れ方向速度プロファイル( $BR=0.5$ , EFDvsCFD)

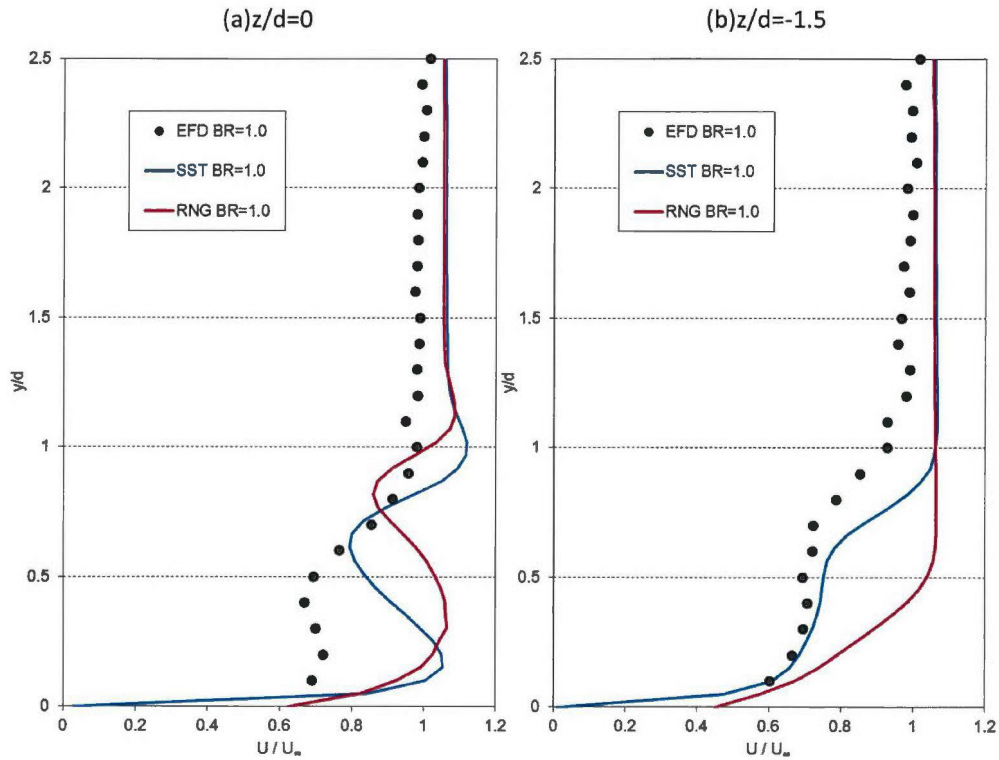


図 4.2.36 無次元流れ方向速度プロファイル( $BR=1.0$ , EFDvsCFD)

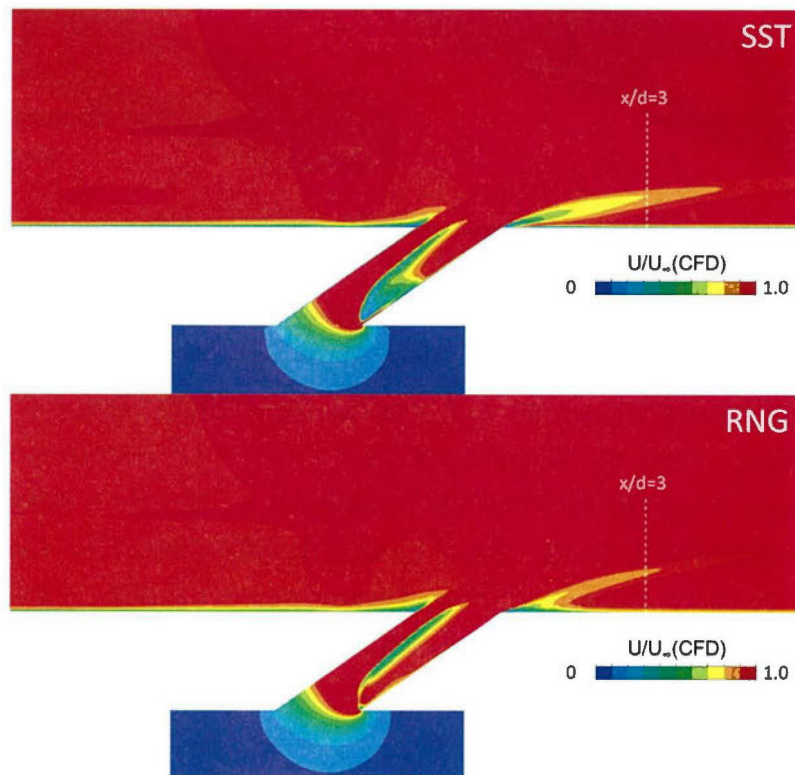


図 4.2.37 無次元流れ方向速度プロファイル( $BR=1.0$ ,  $z/d=0$ )

図 4.2. 38 には, CFD で得られた  $z/d=-0.75$  の領域における無次元速度分布を示す.  $z/d=-0.75$  は Device を通過する  $xy$  平面内の速度を示しており, Device を主流が通過する際に形成される剥離領域が低速度領域として形成されている. SST モデルと RNG  $k-\epsilon$  モデルを比較すると, SST モデルの計算結果は剥離が大規模に予測されているのに対して, RNG  $k-\epsilon$  モデルの計算結果は主流が壁面に付着するような速度分布が形成されていることが分かる. 同図の下部には  $x/d=1$  における, 渦度分布を示しているが, SST モデルで Device から発生する渦度が強く予測されたのは, Device を通過する際の主流の剥離が渦度の期限になっているためであると考えられる. これによって, SST モデルでは Device から発生した渦が強くなり, CRVP の抑制効果が RNG  $k-\epsilon$  モデルよりも発揮されたと考えられる.

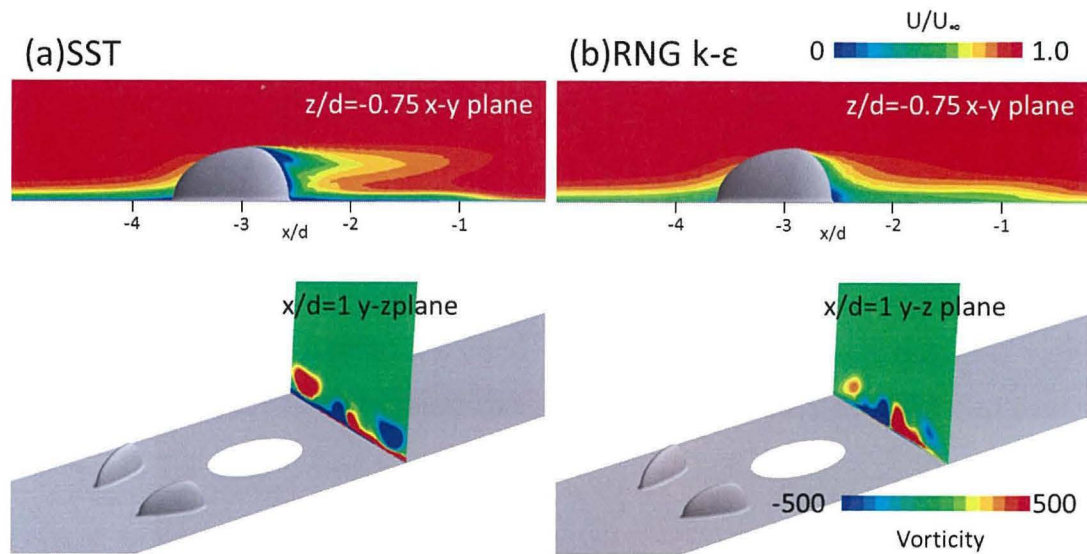


図 4.2. 38 Device 上の無次元速度( $BR=0.5$ )

図 4.2. 39 には, CFD で得られた,  $Q$  値の等値面を示す. 等値面は渦度で色付けを行っている. Case01 については冷却孔のセンターライン上において渦が観察される. これは冷却孔から発生した CRVP を示している. 一方で Device 周辺の流れ場を観察すると, Device からは殆ど渦が発生しておらず, Device の効果は低くなっていることが分かる. Case13 では Device から発生した渦が強くなっている様子が観察される. 渦はスパン方向に広く分布しており CRVP の脇に存在している. さらに CRVP 自体の強さに関しても, Case01 とは異なり, 強くなっていることが分かる. これは, Device から発生した渦度と CRVP が干渉することにより渦が誘起されているためである. Case17 を観察すると, この場合は Case13 よりも Device から発生する渦は小規模である. さらに, CRVP との相互作用により CRVP が拡大する様子がこの場合は観察されなかった.



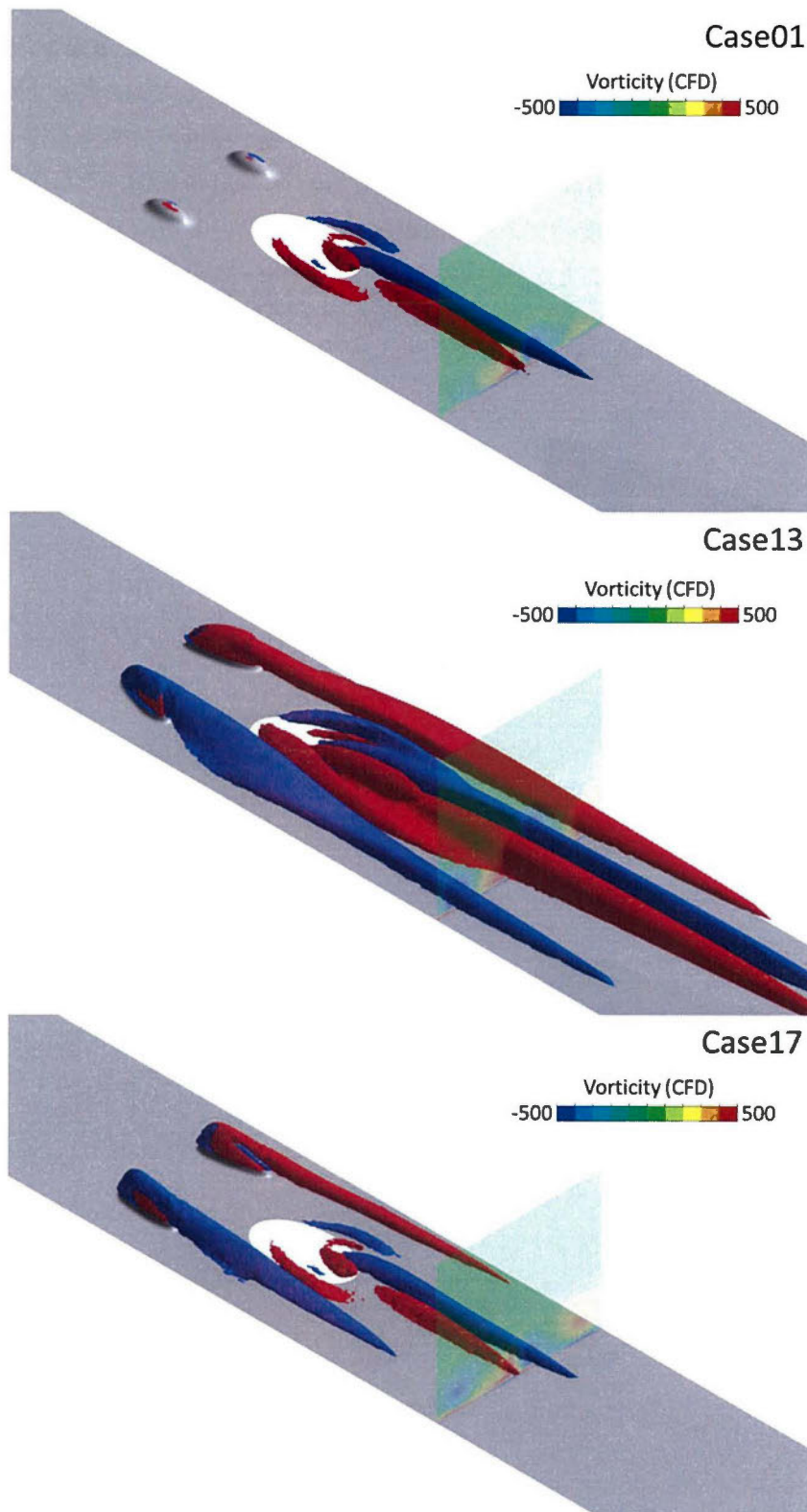
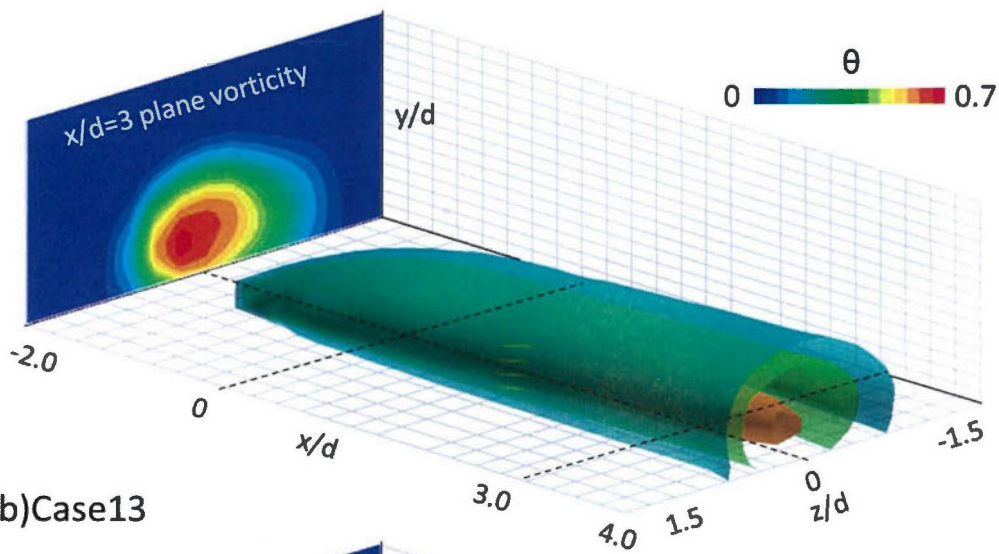


図 4.2.39 Q 値の等値面(SST モデル,  $BR=0.5$ )

### 4.2.8.3 空間温度場

図 4.2. 40 には、実験によって得られた  $BR=0.5$  における三次元空間温度場を示す。また、代表平面として  $x/d=3$  における温度場も同時に示した。Case01 と Case13 を比較すると、Case13 は三次元温度場において、上流側の領域から温度場が壁面へ付着する様子が観察され、下流側の領域ではスパン方向へ温度場が拡散している。  $x/d=3$  における温度場を観察すると、Case01 では二次空気温度のコアが壁面から lift-off しているのに対し、Case13 は温度のコアが壁面へ付着していることが分かる。これは、Device から発生した縦渦によって、二次空気温度のスパン方向への拡散性や、付着性が向上したためである。

(a)Case01



(b)Case13

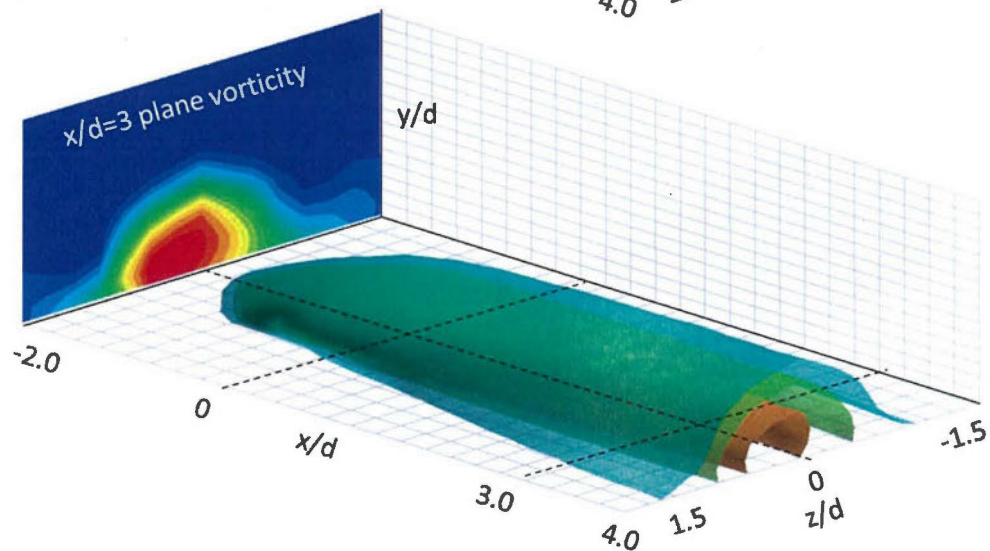


図 4.2. 40 三次元空間温度場(EFD,  $BR=0.5$ )

図 4.2.41 には、実験によって得られた、 $BR=0.5$  の  $x/d=3$  における無次元温度分布を示す。実験結果と CFD 結果を比較すると、実験結果はスパン方向に温度場が拡散しているが、この様子は SST モデルの計算結果で定性的な一致が確認される。一方で、RNG k- $\epsilon$  モデルの計算結果においては、スパン方向への温度場の広がりも過少に評価されている。これは、RNG k- $\epsilon$  モデルの計算結果では Device から発生する縦渦が過少に評価されているためである。

図 4.2.42 には、実験によって得られた、 $BR=1.0$  の  $x/d=3$  における無次元温度分布を示す。 $BR=1.0$  の温度は、実験と CFD に違いが大きく表れており、CFD では実験結果で得られた傾向が予測できていないことが分かる。スパン方向への温度場の広がりに関しては、実験においては、壁面付近の領域でわずかに温度場が拡散する様子が観察される。CFD 結果に関しては、実験と同様に壁面付近で温度場がスパン方向へ拡散する様子が観察されるが、冷却孔センターラインでの温度場の形状が、実験と CFD で異なっている。

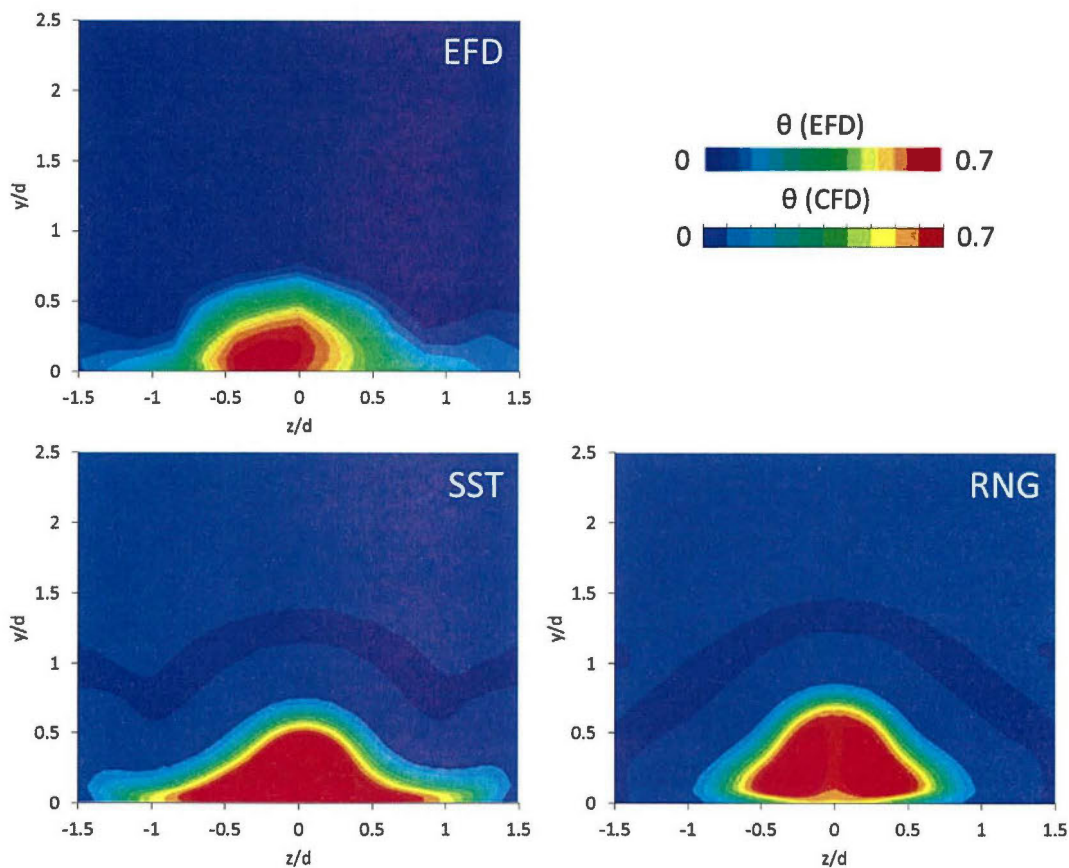


図 4.2.41 無次元温度分布( $x/d=3, BR=0.5$ )

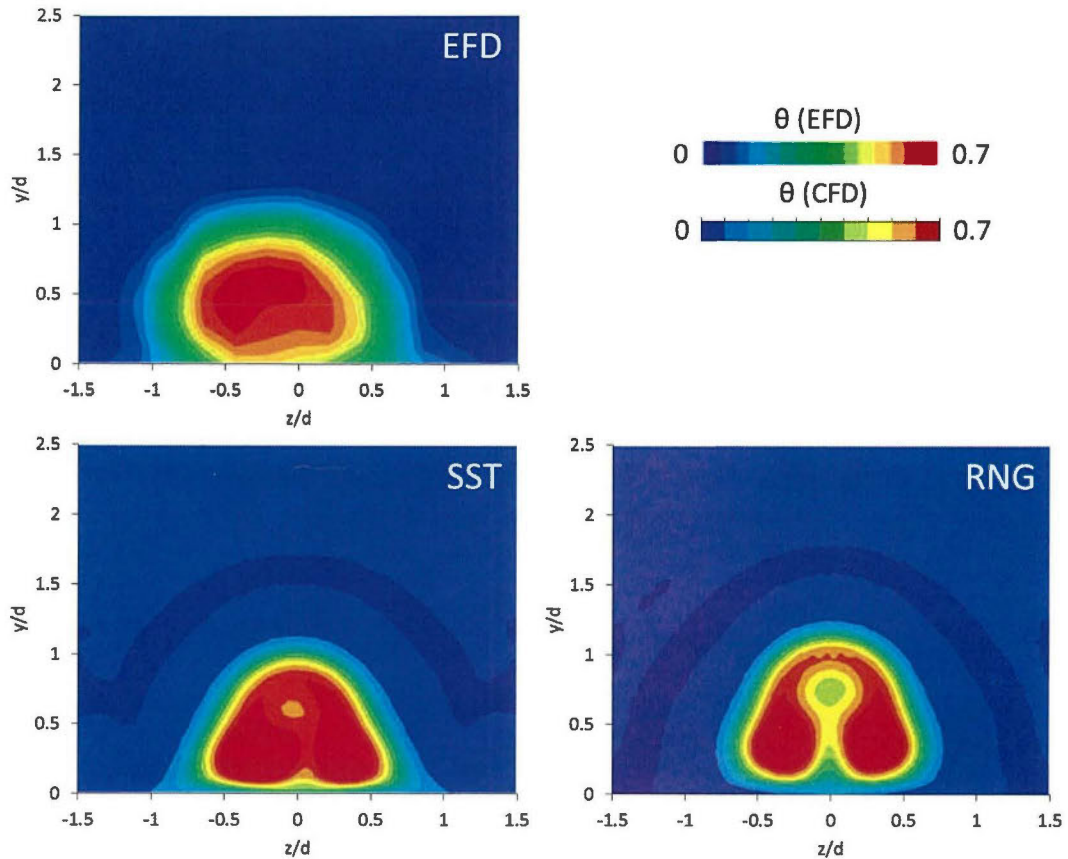


図 4.2.42 無次元温度分布( $x/d=3, BR=1.0$ )

図 4.2.43 には、実験によって得られた  $z/d=0$  における無次元温度プロファイルを示す。実験と CFD 結果を比較すると、プロファイルの傾向は定性的な一致が確認できなかった。これは、無次元速度プロファイルとは異なる傾向である。温度の付着性に関しては、SST モデルを用いた計算結果の方が実験結果に比較的近い傾向を予測しているが、全体的に温度の拡散が予測できていないため、定量的には温度を過大に評価している。一方、RNG  $k-\epsilon$  モデルの計算結果では、無次元温度の値自体は、実験値に近くなっているが、温度の高い領域は壁面から離れているために、定性的な傾向は実験とはかけ離れている。

$BR=1.0$  の場合、無次元温度のプロファイルは全体的にフラットな形状を示している一方で、CFD 結果においては、無次元温度のピーク値が二つの領域で観察される。これは、冷却孔センターライン上に発生している CRVP による温度場の変形を捉えているものと考えられる (図 4.2.42 参照)。

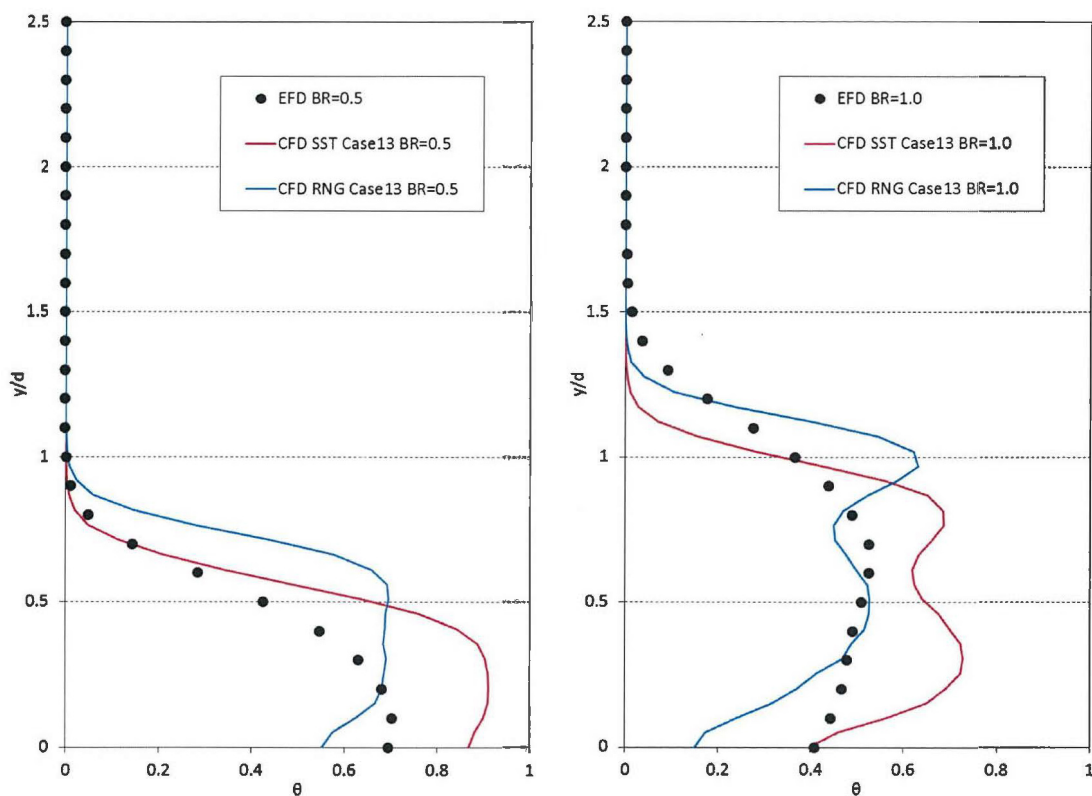


図 4.2.43 無次元温度プロファイル( $z/d=0$ , EFDvsCFD)

## 4.2.9 LES 解析

### 4.2.9.1 数値解析領域・計算格子

今回は、RANS の解析結果との比較を行うために計算領域、計算格子は RANS と同じものを使用した。計算格子に関しては、詳細な渦構造を解像するために Grid1 を採用することとした。

### 4.2.9.2 数値解析手法

LES 解析を行う際には、SGS モデルに Dynamic smagorinsky model を用いた。タイムステップに関しては、無次元タイムステップとして  $0.05d/U_\infty$  を与えており、時間平均解の取得には、計算領域内を主流が 3 週通過する時間だけ時間平均解の取得を行った。本研究では、Case13 について  $BR=0.5$ ,  $0.0$  の 2 条件の解析を行っている。これは、2 つの条件の解析を行うことにより、より現象を理解し易くするためである。

### 4.2.9.3 解析結果

図 4.2.44 には、実験と CFD で得られたスパン方向平均フィルム効率を示している。RANS の解析結果に関しては、フィルム効率を実験に比べて極めて過大に評価しており、2 倍以上のフィルム効率が局所的に観察される。一方で、LES の解析結果に関しては、実験と CFD 結果が比較的近い値を示していることが分かる。特に、冷却孔センターライン上のフィルム効率が、LES 結果においては、下流側で減衰しており、下流側での温度の拡散が LES では比較的良好に予測できていることが分かる。

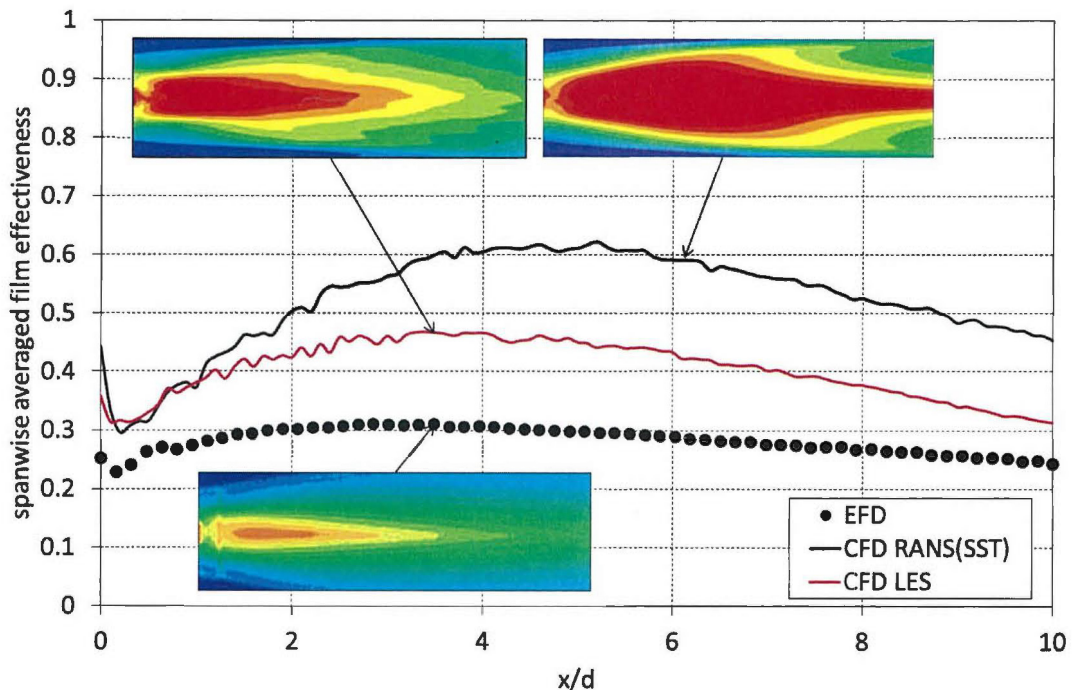


図 4.2.44 スパン方向平均フィルム効率 (EFDvsCFD)

図 4.2.45 には、LES の瞬時解によって得られた  $Q$  値の等値面を示している。 $Q$  値の等値面に関しては、LES 解析については、非常に細かい渦構造を改造し、現象の理解が難しいために、 $BR=0.0$  の解析結果と、 $BR=0.5$  の解析結果の両者を示す。 $BR=0.0$  の解析結果においては、境界層内で非常に細かい渦が観察されるほか、Device を通過する際に主流が剥離することによって発生する剥離渦が観察される。個の剥離渦は、下流側にまっすぐ伸びており、時間平均的には、縦渦として、CRVP と逆回転の速度成分を持つ渦として改造されているものである。一方で、吹き出しを行った場合( $BR=0.5$ )、Device から発生する渦のほかに、冷却孔から周期的にヘアピン渦が下流側に放出されている。このヘアピン渦は、時間平均的には、CRVP となって実験や、RANS 解析において解像されるものである。

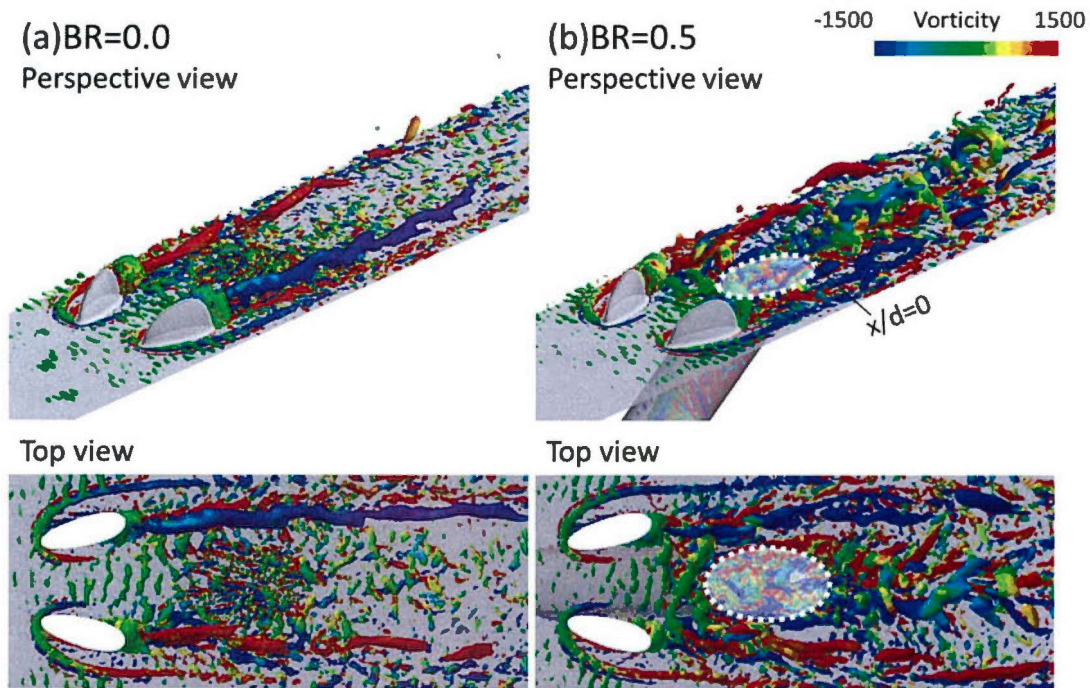


図 4.2.45  $Q$  値の等値面(LES 結果)

参考文献 (4.2 節)

- (1) Lee, K.D. and Kim, K.Y., 2010, "Shape Optimization of a Laidback Fan-Shaped Film-Cooling Hole to Enhance Cooling Performance", ASME Turbo Expo2010, GT2010-22398.
- (2) Lee, K.D., Kim, S.M. and Kim, K.Y., 2011, "Multi-Objective Optimization of Film Cooling Holes Considering Heat Transfer and Aerodynamic Loss", ASME Turbo Expo2011, GT2011-45402.
- (3) Johnson, J.J., King, P.I., Clark, J.P. and Ooten, M.K., 2013, "Genetic Algorithm Optimization of a High-Pressure Turbine Vane Pressure Side Film Cooling Array", ASME Journal of Turbomachinery., Vol.136, 011011.
- (4) 山田秀樹, 2007, 実験計画法-方法編-, 日科技連出版社
- (5) 松岡由幸, 加藤健郎, 2013, ロバストデザイン, 森北出版株式会社
- (6) 立林和夫, 2004, 入門タグチメソッド, 日科技連出版社