

第三章

平板モデルを用いた Double Flow Control Device の基礎研究

3.1 本章の目的/概要

前章まででは、冷却孔 1 ピッチに対して 1 つの流れ制御デバイスを設置することで CRVP の制御を試みた。しかし、デバイスから発生する渦構造が弱く、CRVP の制御能力が高いとは言えず、Compound angle hole や、Shaped hole 程の流れ制御能力を有しているとは言えない。前章まででは、デバイスから発生する馬蹄形渦や、剥離渦が CRVP の制御にとって重要であることがわかったため、本章では、特に剥離渦の能力を向上させることを目的として研究を行った。具体的には、冷却孔 1 ピッチに対して流れ制御デバイスを 2 個斜めに設置することで、ボルテックスジェネレータのような形状を作成し、強い剥離渦を発生させ、流れ流れの制御を試みるものである。本研究では、このデバイス配置を Double Flow Control Device (DFCD) と呼称し、論じていく。

3.3 節では DFCD のベースモデル形状を用いた実験と数値解析結果を示しており、DFCD の有用性の検証や、流れ制御メカニズムの解明を試みている。また、冷却孔のピッチや、冷却孔形状自体を変化させることで、DFCD のさらなる性能向上や、冷却空気削減の可能性を探っている。3.4 節では、デバイスに対する主流流入角が、流れ場に与える影響を調査した。これは、タービンの作動条件によっては、本研究で提案している流れ制御のメカニズムにとって不都合な流れ場になる可能性が存在する。したがって、3.4 節では、流れ制御デバイスの性能を低下させると考えられる流れ場（流入角が変化した流れ場）に対して、どのような挙動を示すのか把握することを目的として研究を行った。

3.2 実験装置/計測手法

実験装置および計測手法は前章と同様であるが、データの処理方法が前節までとは異なっている。フィルム効率に関しては、前節までと同様に算出値を記載しているが、熱伝達率等のデータに関しては後処理方法を変更した。

3.2.1 熱伝達率

本研究では、熱流束低減率を算出することで、デバイスを設置した際の熱負荷がどのように変化するかを調査することを目的としている。しかし、本研究で使用している過渡応答法では、熱伝達率の算出領域は、二次空気の温度をステップ状に応答させた際に、壁面の温度上昇が発生する箇所に限定される。そこで、本研究では、熱伝達率の算出が行えない領域に関しては、平板の乱流境界層の熱伝達率の式から、 $x/d=0$ における熱伝達率を代表値として代入することで、面内の熱伝達率の評価を行った。今回の計測では、流れ方向の計測領域は、 $0 \leq x/d \leq 10$ であり、式(3.2.1)で計算される熱伝達率は $2[\text{W/mK}]$ 程度しか計測領域内に渡って変化しない。これは、計測の不確かさの範囲内程度の値である。したがって、 $x/d=0$ における熱伝達率を、代表としても問題ないと判断した。

$$h = 0.0296 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.33} \frac{\lambda}{L} \quad (3.2.1)$$

- Re : レイノルズ数
 Pr : 空気のプラントル数
 λ : 空気の熱伝導率
 L : シャープエッジからの距離

3.2.2 熱流束低減率 (Net Heat Flux Reduction : NHFR)

フィルム冷却の伝熱性能を真に評価するためには、フィルム効率と熱伝達率を組み合わせることで、熱負荷を計算する必要がある。フィルム冷却では、フィルム冷却の前後でどの程度熱流束が低減されているのかを示すための指標として以下の式で示される、熱流束低減率(Net Heat Flux Reduction : NHFR)を使用するのが一般的である。今回は、無次元メタル温度として、論文で一般的に用いられることの多い $\theta=1.44$ を使用した。

$$\text{NHFR} = 1 - \frac{h_f}{h_0} (1 - \eta\theta) \quad (3.2.2)$$

- h_f : フィルム冷却を行った場合の熱伝達率
 h_0 : フィルム冷却を行わない場合の熱伝達率
 η : フィルム効率
 θ : 無次元メタル温度

3.3 Double Flow Control Device ベースモデルの調査

3.3.1 調査方法

本節の目的は楕円形状を有する”流れ制御デバイス”を冷却孔上流に設置する。前節では、冷却孔1ピッチに対して、1個の流れ制御デバイスを設置しているが、今回は流れ制御デバイスを2つ設置することにより、より高度な流れ制御を目指した。本節で行った検証は以下の3つに大別される。

検証1

本節では、単純円筒型冷却孔の"Round hole"上流に、流れ制御デバイスを設置し、拡大型冷却孔である"Shaped hole"との性能比較を行う。これは、今日のフィルム冷却において広く使用されている"Shaped hole"は、比較的加工コストが高いことが欠点とされている。そのため、"Round hole"に流れ制御デバイスを取り付けることで、Shaped hole 程のコストをかけずに Shaped hole と同等の性能を引き出すことができるのかどうか、可能性を調査した。

検証2

本節では、Shaped hole 上流に、流れ制御デバイスを設置することによってフィルム冷却効率のさらなる高効率化を目指した。Shaped hole"の伝熱性能は、非常に高いことが知られており、実記のタービンでは一般的に用いられる冷却孔になっている。Shaped hole は冷却孔の開口面積の分だけ、冷却面積を広げることが可能であるが、Shaped hole の開口面積を広げすぎると、主流が冷却空気に入り込んでしまう可能性があるため、その性能に限界がある。そこで、本節では、Shaped hole の上流側に流れ制御デバイスを設置することで、Shaped hole 単体では限界のある冷却面積をさらに広げ、より高性能な冷却を提案することを目的としている。

検証3 (図 3.3.1)

本節では、冷却孔のピッチを変化させた試験を行うことで、冷却空気削減の可能性を模索した。流れ制御デバイスには、冷却空気を横方向に拡散させる効果が期待できる。したがって、1つの冷却孔が担う冷却のカバー領域を増加させる(b)ことで、冷却孔数を削減できる可能性がある。そこで、本節では、冷却孔のピッチを変化させることで、冷却のカバー面積を把握し、冷却孔数及び、冷却空気量削減の可能性を示すことを目的としている。

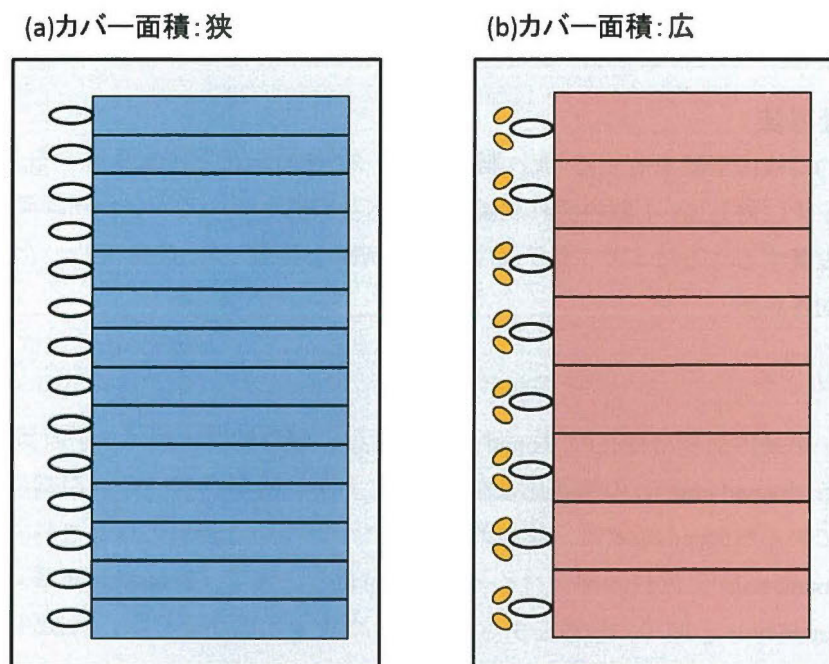


図 3.3.1 冷却孔および冷却空気削減のイメージ

3.3.2 供試体

3.3.2.1 供試体形状

図 3.3.2 に本研究で用いた供試体の概要を示す。供試体は平板タイプであり、前章までと同様に、基礎研究を行っている。この供試体は冷却孔形状、ピッチ、傾斜角といった複数のパラメータを可変とするために、はめ込み式を採用しており、冷却孔部分である Hole Block と、冷却孔部分をはめ込むための土台となる BASE Block から構成される。Hole Block の寸法は全長 $10d$ ×全幅 $17d$ ×厚さ $2d$ となっており、BASE Block の寸法は全長 $42d$ ×全幅 $22d$ ×厚さ $2d$ であり、冷却孔下流に最大 $30d$ の計測範囲を取ることが可能である。また、この供試体の厚みは温度浸透厚さの計算によって、過渡応答法の計測中に、供試体背面からの熱伝導を十分無視できる厚さであることを確認している。本研究で用いた冷却孔形状は"Round hole"と"Shaped hole"の二種類であり、詳しい形状を図 3.3.3 に示す。この"Shaped hole"はいわゆる"Round"タイプの"Shaped hole"であり、冷却孔が拡大し終わった冷却孔出口においても、冷却孔上流側に"Round hole"が残っているタイプとなる。この"Shaped hole"は Sakai ら⁽⁴⁾の使用しているものと同様のタイプであり、結果の比較を行いやすいという理由と、デバイス設置位置の特定が容易であるという理由からこの形状の"Shaped hole"を採用した。冷却孔直径 $d=20[\text{mm}]$ としており、傾斜角 $\alpha=35[\text{deg}]$ 、"Shaped hole"における拡大率 β , γ はそれぞれ $10[\text{deg}]$ としている。また、冷却孔空気削減の可能性を調査するために、冷却孔ピッチ $p/d=3.0$ と $4.5, 6.0$ のものを用意している。また、供試体表面には黒色塗料を塗布している。これは黒色塗料の放射率が約 1 であるため、表面の放射率をほぼ 1 に統一する目的と、3D-

LDV 等の光学計測を行う際の壁面反射防止の目的で塗布を行っている。

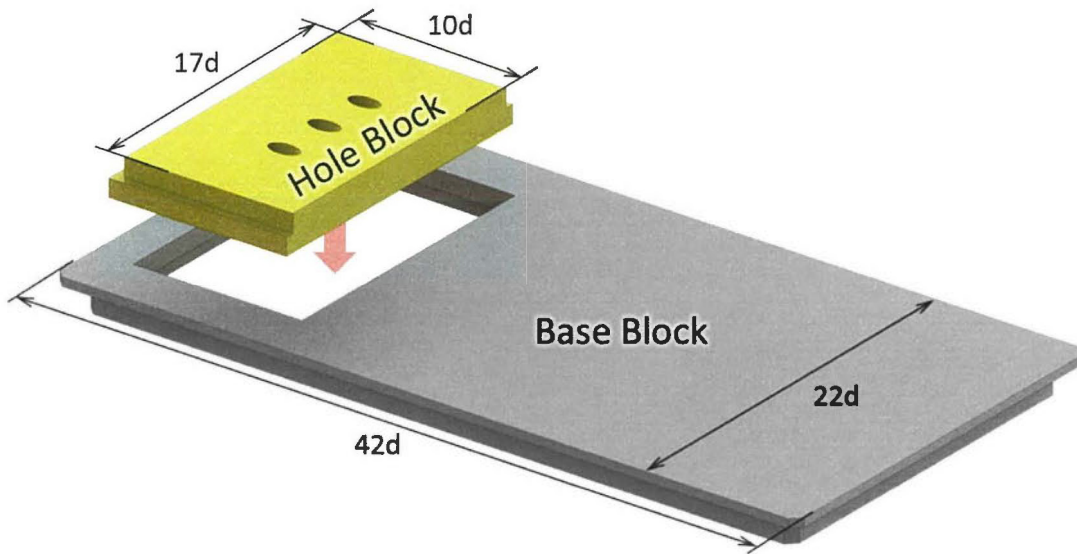


図 3.3.2 供試体形状俯瞰図

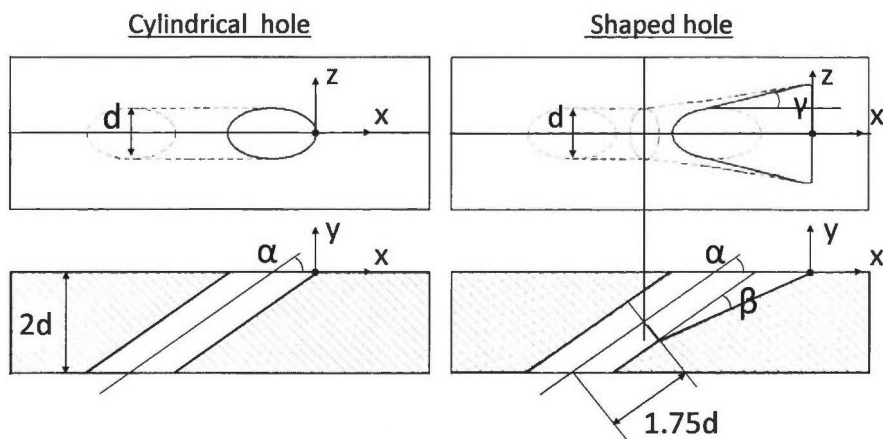


図 3.3.3 冷却孔形状

3.3.2.2 流れ制御デバイス形状

本研究において、流れ制御デバイスはフィルム冷却における流れ場を制御するために製作した。流れ制御デバイスの狙いは、冷却孔上流に設置することで、主流との干渉により縦渦を発生し、その縦渦で CRVP を抑制することにある。図 3.3.4、表 3.3.1 に、流れ制御デバイスの設計パラメータを示す。今回使用した流れ制御デバイスは三次元形状となっており、DFCD の曲面形状は楕円体の方程式によって決定した。デバイスの高さ、短辺、長辺はそれぞれ $0.5d$, $0.5d$, $2.0d$ となっている。また、デバイス底部にはフィレットが設けて

あり、フィレット半径は $0.15d$ である。製作は岩手大学工作センターの所有する三次元造型機にて行った。その際、流れ制御デバイスを7種類予備調査（平行置きや、デバイスの高さを変えるなど）をしたが、フィルム冷却性能の高かった一形態のみを使用している。また、デバイス製作に使用した樹脂材料も供試体と同様の ABS 樹脂であり、表面に黒色塗料を塗った後、試験を行った。

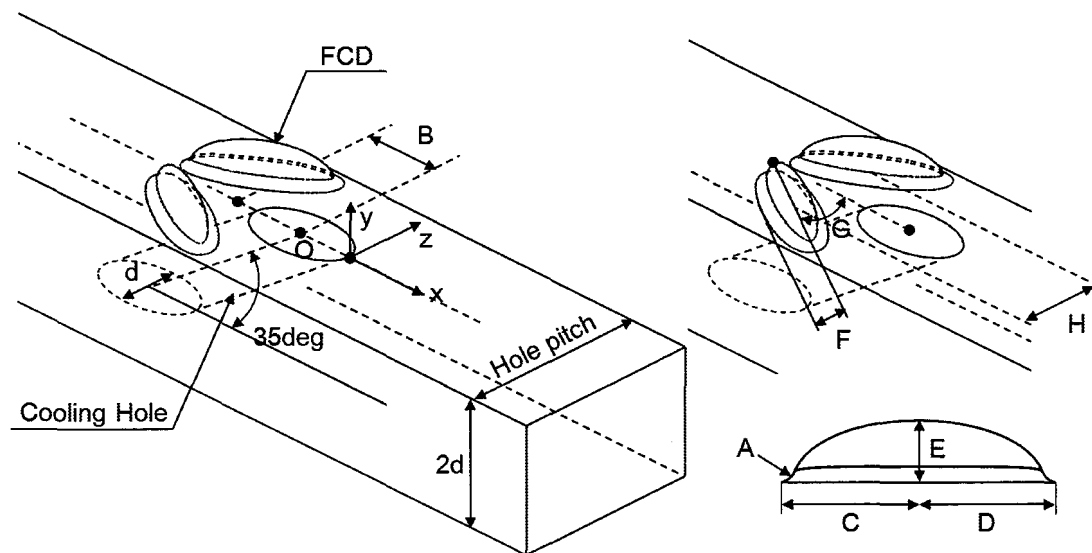


図 3.3.4 流れ制御デバイス形状・設計パラメータ

表 3.3.1 設計パラメータ

A	フィレット半径: $0.15d$
B	冷却孔出口中心から FCD 中心までの距離: $0.75d$
C	x 軸方向の FCD 半値幅 (上流): $1.0d$
D	x 軸方向の FCD 半値幅 (下流): $1.0d$
E	FCD 高さ: $0.5d$
F	z 軸方向の FCD 半値幅: $0.25d$
G	FCD の開き角度: 30deg
H	FCD 中心間距離: $0.75d$

3.3.3 試験条件

本節では、冷却孔形状、冷却孔ピッチ、流れ制御デバイスの有無、吹き出し比 ($BR=0.5,1.0$)を可変パラメータとして試験を行った。表 3.3.2 に詳細な試験条件を示す。

表 3.3.2 試験条件

	Hole geometry	p/d	DFCD	BR
RH	Round hole	3.0	×	0.5,1.0 (空力試験に関しては $BR=0.0$ も実施)
		4.5		
		6.0		
SH	Shaped hole	3.0	×	
		4.5		
		6.0		
RH DFCD	Round hole	3.0	○	
		4.5		
		6.0		
SH DFCD	Shaped hole	3.0	○	
		4.5		
		6.0		

3.3.4 実験結果

3.3.4.1 壁面フィルム効率

(1) 壁面フィルム効率

図 3.3.5、図 3.3.6 に実験で得られた冷却孔 1 ピッチ分の壁面フィルム効率分布を示す。コンター上の白線は供試体の継ぎ目である。図 3.3.5 には $BR=0.5$ における、壁面フィルム効率コンターを示す。図 3.3.5 (a) $p/d=3.0$ において、RH, SH は DFCD を設けない形態であるが、SH は冷却孔出口が流れ方向及び、スパン方向に拡大しているため、二次空気の運動量が低減され、壁面への付着性が向上しており、特に、冷却孔出口付近の局所的なフィルム効率が RH と比較して高くなっている。さらに、二次空気のスパン方向への拡散性も RH に比べると良好であり、拡大した冷却孔出口全体から二次空気が吹き出している様子を確認できるが、一方で冷却孔出口の幅以上に二次空気は広がることはできないこともわかる。また、DFCD を設けた RH DFCD, SH DFCD は RH, SH に比べ、二次空気のスパン方向拡散性が大幅に向上しており、隣の冷却孔から吹き出した二次空気と干渉している様子も見受けられる。さらに、上述した通り、DFCD 無しモデルでは、冷却孔の出口幅以上は二次空気を広げることができないが、DFCD を適用することで冷却孔の出口幅以上に二次空気を拡散させることに成功している。これは DFCD から発生した縦渦により、冷却孔下流の流れ場が二次空気の壁面付着性と、スパン方向の拡散性を向上させるような流れ場

を形成しているためであると考えられる。また、DFCD 無しのモデルと比較して、冷却孔出口付近における、局所のフィルム効率も若干向上していることがわかる。次に図 3.3.5(b), (c)において、 $p/d=4.5, 6.0$ に拡大したモデルに関しては、 $p/d=3.0$ と 1 ピッチ当たりで比較して RH, SH で二次空気の付着していない範囲が増加しているが、RH DFCD, SH DFCD では、DFCD を設置したことにより二次空気拡散性が向上しているため、 $p/d=4.5, 6.0$ においても、他の形態に比べて広い付着面積を維持していることを確認できる。特に、特に SH DFCD では拡散した二次空気端の領域においても高いフィルム効率を確認できる。しかしながら、FCD 適用モデルにおいては、その強い拡散性のために冷却孔出口付近における局所のフィルム効率は低下する傾向にあった。

図 3.3.6 には $BR=1.0$ における、壁面フィルム効率分布を示す。吹き出し比の増加に伴い、二次空気の運動量が増加し、CRVP が強まるために、全体的に二次空気の壁面付着性は $BR=0.5$ の条件に比べて低下している。特に、RH では、二次空気の lift-off 効果が顕著に表れ、全冷却孔ピッチに渡り、壁面付着性が著しく低下している。しかしながら、SH においては、冷却孔出口拡大による二次空気運動量の低減効果が発揮されたことと、Laid back の効果により、RH と比較して、付着性を維持しており、局所のフィルム効率も高い値を示している。また、DFCD を設けたモデルにおいては、 $p/d=3.0$ で特に DFCD の効果が発揮されており、吹き出し比が増加したにも関わらず、二次空気の付着性と拡散性ともに DFCD 無しのモデルに比べて向上しており、隣の冷却孔から吹き出した二次空気との干渉も確認することができる。RH DFCD に関しては、冷却孔形状が RH であり、RH は高吹き出し比条件でフィルム効率が極端に低下するものの、DFCD 無しのモデルに比べ、 BR が増加しても高い壁面付着性とスパン方向拡散性を維持している。次に図 3.3.6(b), (c)において、 $p/d=4.5, 6.0$ に拡大したモデルに関しては、 $BR=0.5$ の場合と同じような傾向を示しており、RH DFCD, SH DFCD では、DFCD を設置したことにより二次空気拡散性が向上しているため、 $p/d=4.5, 6.0$ においても、他の形態に比べてある程度の付着面積を維持できていることを確認できる。しかし、冷却孔ピッチの拡大に伴う、付着面積の減少が $BR=0.5$ に比べて大きいため、DFCD は吹き出し比が高く CRVP が大規模化するような条件では、DFCD から発生した縦渦が CRVP を制御しきれないため、効果を発揮しにくいと考えられる。

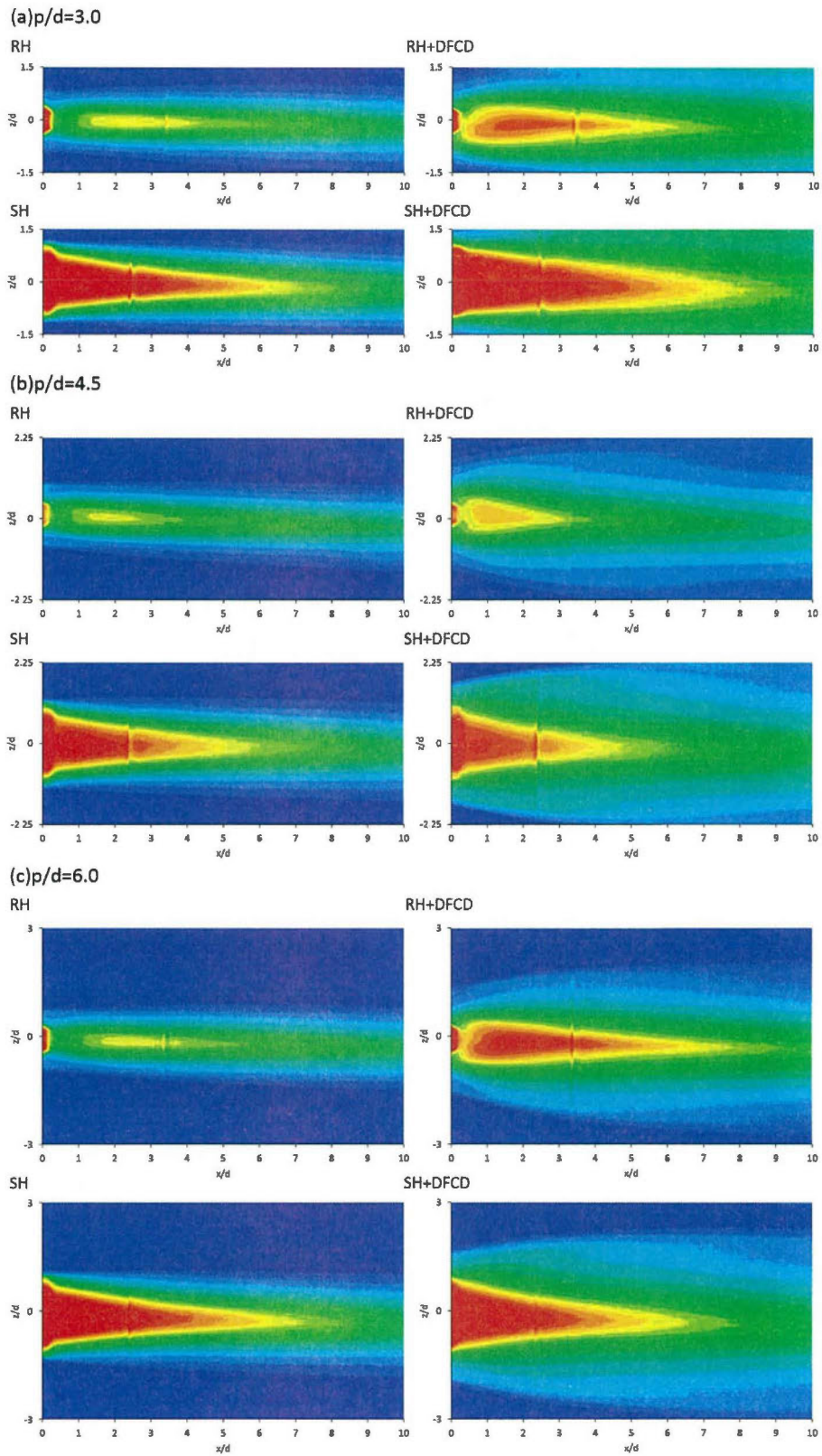


図 3.3.5 壁面フィルム効率($BR=0.5$)

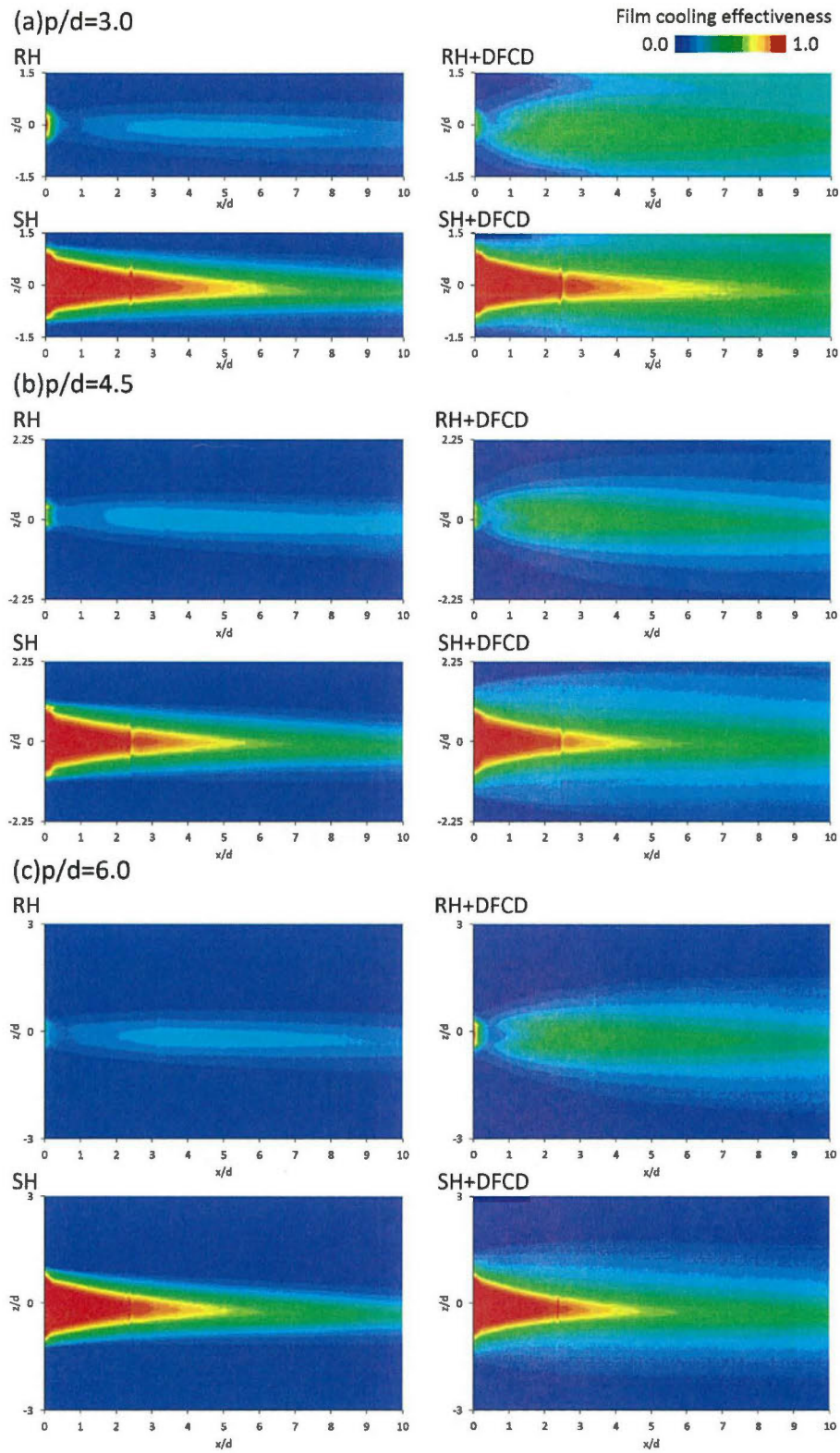


図 3.3.6 壁面フィルム効率($BR=1.0$)

図 3.3.7 には各ピッチにおけるスパン方向平均フィルム効率($0 \leq x/d \leq 10$)を示す。供試体をはめ込み式としているために、そのつなぎ目でグラフ中に若干不連続な箇所が見受けられる。前述の通り、DFCD は二次空気の拡散性を向上させる効果を持つが、グラフからは冷却孔形状にかかわらずスパン方向平均のフィルム効率自体も向上することがわかり、非常に有効に作用していると言える。すべてのピッチ条件において、SH DFCD が最も高いフィルム効率を示しており、その他の形態がそれに続くような傾向となっている。また、SH, SH DFCD は他の形態と比較して、冷却孔出口付近のフィルム冷却効率が大幅に高くなっていることがわかる。これは、冷却孔出口が拡大することで、二次空気の運動量を削減し、出口付近での lift-off が抑えられている効果である。しかし、SH はフィルム冷却効率の減衰が大きく、下流側のフィルム冷却効率は RH に近づいていく。RH DFCD では、RH と比較して、全領域でフィルム冷却効率の向上を確認することができる。また、RH DFCD では冷却孔下流領域におけるフィルム冷却効率の減衰が SH と比較して抑えられており、下流側においても RH DFCD のフィルム冷却効率は依然として SH を上回っている。 $BR=1.0$ においても、DFCD の効果は発揮されており、二次空気の lift-off により、二次空気の壁面付着性が低下し、フィルム冷却効率を大きく落とす RH からの効率上昇は非常に大きいと言える。SH と RH DFCD を比較すると、SH のフィルム冷却効率が極端に高くなる冷却孔出口付近より下流($BR=0.5$ では $x/d=2.0$, $BR=1.0$ では $x/d=3.5$ より下流)では RH DFCD のフィルム冷却効率が SH を逆転する結果になっており、DFCD の効果の高さを伺うことができる。

図 3.3.8, 図 3.3.9 へ示すように、 $p/d=4.5, 6.0$ においては、冷却孔ピッチが拡大したことで、 $p/d=3.0$ と比較して無冷却の領域が増えるため、平均フィルム冷却効率としては低くなる。しかしながら、フィルム冷却効率のグラフの傾向は $p/d=3.0$ の条件と同様の傾向を示しており、SH に対して、下流側では RH DFCD のフィルム効率が上回っており、優位性を示す結果となっている。

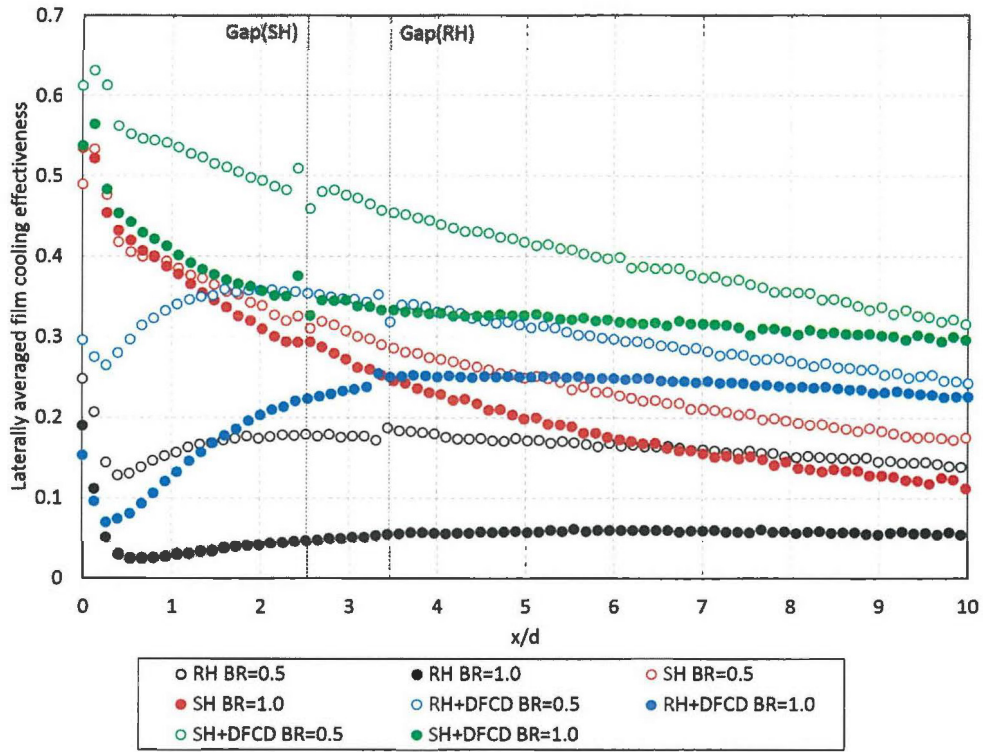


図 3.3.7 スパン方向平均フィルム効率($p/d=3.0$)

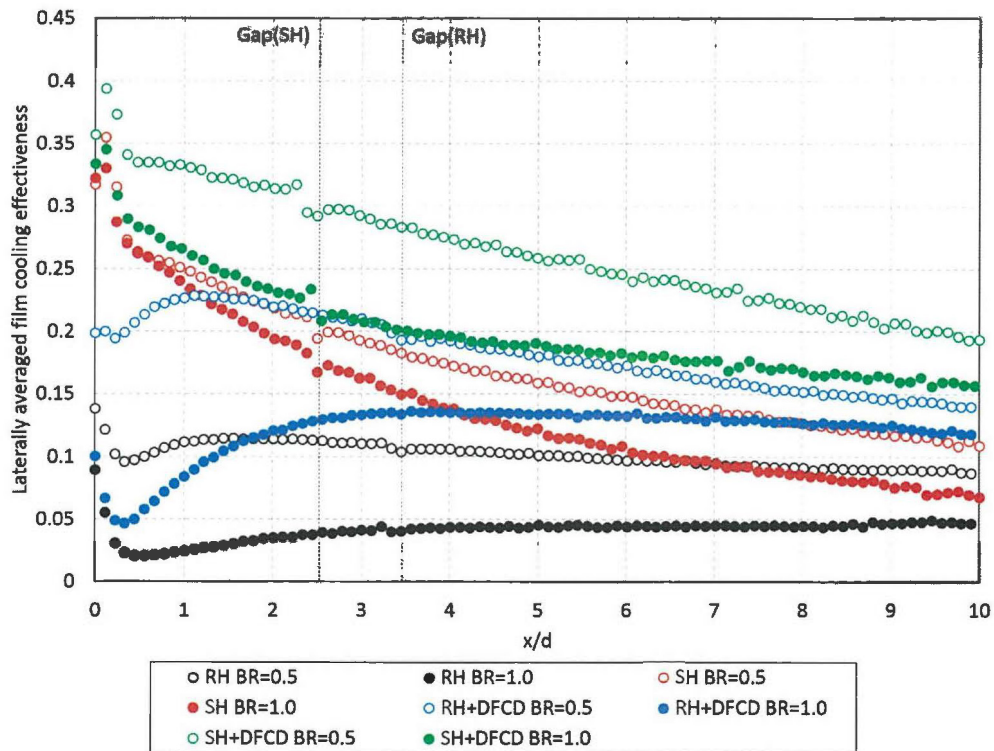


図 3.3.8 スパン方向平均フィルム効率($p/d=4.5$)

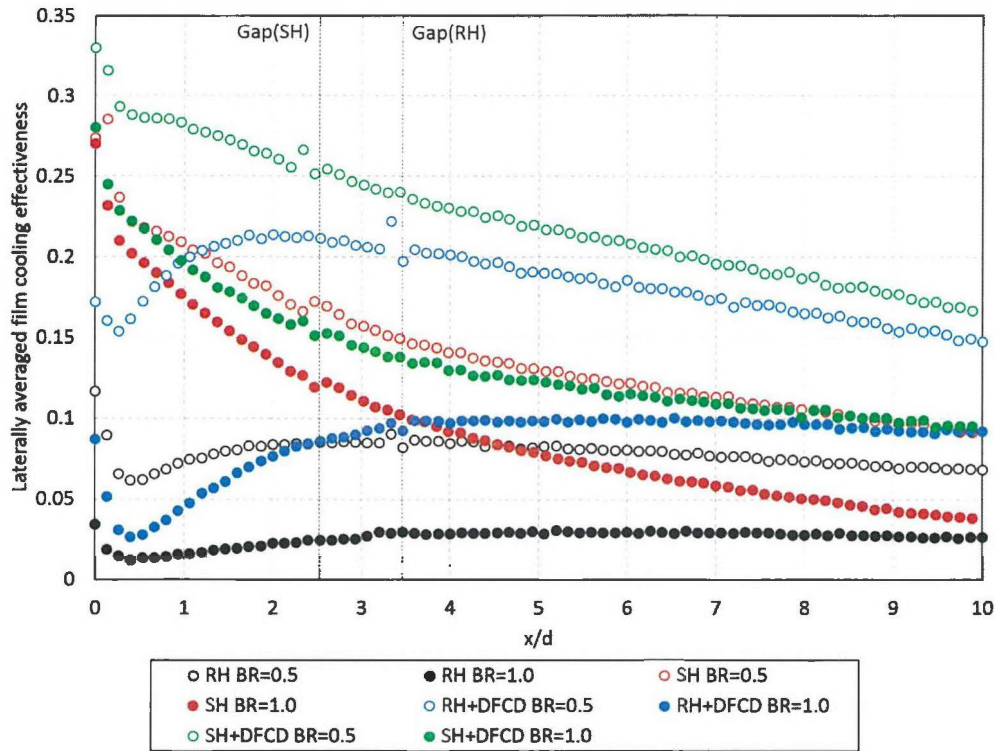
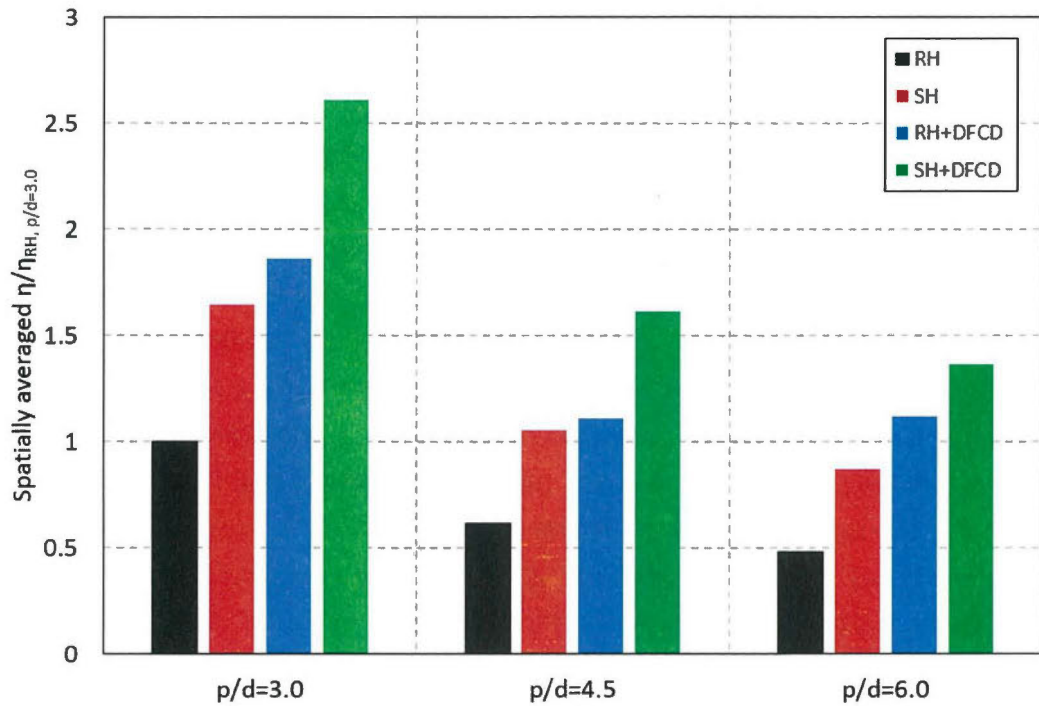


図 3.3.9 スパン方向平均フィルム効率($p/d=6.0$)

図 3.3.10 には各吹き出し比における,各ピッチ当たりの面平均フィルム効率($0 \leq x/d \leq 10$, スパン方向へは各ピッチ分)を示す. この結果は全て RH $p/d=3.0$ の結果で正規化している. また, $p/d=4.5, 6.0$ においては, 冷却孔ピッチがそれぞれ $p/d=3.0$ の 1.5 倍, 2 倍であり, 同じ吹き出し比でも, 検査体積内に入ってくる二次空気流量は $2/3$ または, 半分であるため, 全体的にフィルム効率は減少している. 図 3.3.10 (a)を見ると, $p/d=3.0 \sim 6.0$ の全ピッチにおいて, DFCD 無しの形態に比べ, DFCD を適用した形態では, FCD から発生した渦構造の効果により, 高いフィルム効率を示しており, RH DFCD については, 全ピッチに渡って, S.H.の効率を上回っている. 特に $p/d=3.0$ においては, DFCD 適用前に比べて 2 倍程度の効率上昇となっている. さらに, RH DFCD は, 冷却孔ピッチを拡大した $p/d=4.5, 6.0$ においても, DFCD 無し RH $p/d=3.0$ モデルより高いフィルム効率を示しており, 二次空気量が少なくても DFCD を適用することで効率良く冷却がなされていることを表している. さらに SH DFCD は全ピッチに渡り, 4 形態中で最も高いフィルム効率を示しており, 特に隣接した冷却孔から吹き出した二次空気どうしの干渉が強く起こる $p/d=3.0$ においては, RH の 2.6 倍程度フィルム効率が上昇していることから, SH に DFCD を適用した際の有用性を確認できる. また, SH DFCD は $p/d=4.5$ においても, SH $p/d=3.0$ のフィルム効率を上回っており, FCD を適用することで, 冷却孔ピッチを広げたとしても, 拡大する前と同等の性能を示すことがわかる. 図 3.3.10 (b)には $BR=1.0$ における,各形態の面平

均フィルム効率を示す。この結果についても、RH $p/d=3.0$ の結果で全て正規化した。 $BR=1.0$ においては、二次空気の lift-off により、RH の性能が極端に低下している関係で、相対的に SH, RH DFCD, SH DFCD は全ピッチで、高い面平均フィルム効率を示しており、特に $p/d=3.0$ においては、SH, RH DFCD は 4 倍以上、RH DFCD では 6 倍以上のフィルム効率となっている。 $BR=1.0$ においては、RH DFCD は SH の面平均フィルム効率を上回ることはできなかった。これは、SH は冷却孔出口が拡大しており、吹き出し比の変化に強いことから、 $BR=1.0$ の条件でもフィルム効率の低下が小さいためであることと、吹き出し比が高い条件では二次空気の運動量が増加し、lift-off が進むために DFCD が効果を発揮しにくいためである。しかしながら、RH DFCD は SH のフィルム効率に迫っており、全ピッチに渡り、SH と同等の性能を示している。また、SH DFCD においては、高吹き出し比に強い Shaped hole と DFCD との複合効果により、吹き出し比が増加したにも関わらず高いフィルム効率を維持し続けている。

(a) BR=0.5



(b) BR=1.0

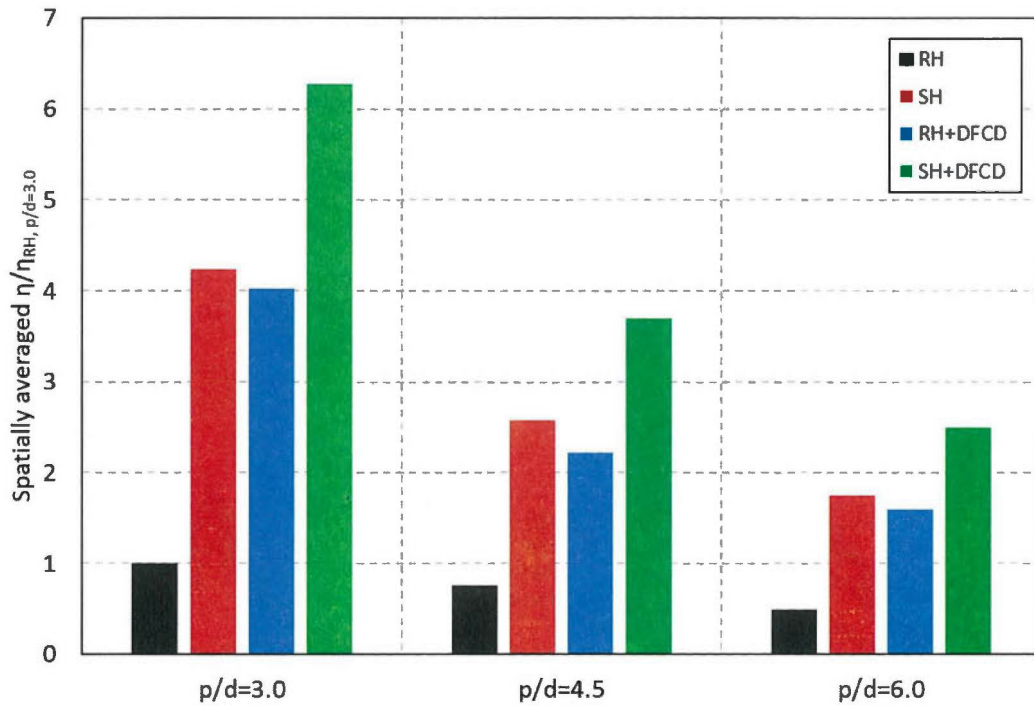


図 3.3.10 面平均フィルム効率 ($BR=0.5, 1.0$)

図 3.3.11 には $x/d=3.0, 6.0$ における、各冷却孔ピッチ 1 ピッチ分のスパン方向フィルム効率($p/d=3.0, 6.0$ について)を示す。まず、図 3.3.11 (a)では、 $z/d=0.0$ の冷却孔下流位置において、二次空気吹き出しによるフィルム効率のピークを確認できる。このピーク値は冷却孔形状が SH のほうが高くなっており、SH, SH DFCD のピーク値の大きさは同程度である。しかし、SH DFCD では、DFCD を設けない SH に比べて、フィルム効率がスパン全体に渡って分布しており、計測範囲両端においても、ある程度のフィルム効率を維持している。また、RH は、 $z/d=0.0$ におけるフィルム効率のピーク値が最も小さいが、DFCD を適用することで、ピーク値が向上することを確認できた。また、計測範囲全体にフィルムが付着していることから、SH DFCD と同様に二次空気のスパン方向拡散性が強まっていることがわかる。図 3.3.11 (b)でも、図 3.3.11 (a)と同様に $z/d=0.0$ の冷却孔下流位置において、二次空気吹き出しによるフィルム効率のピークを確認できるが、 $p/d=6.0$ であり、冷却孔の間隔が広がっているために、FCD 適用モデルにおいても計測範囲端ではフィルム効率が 0 となる領域が存在している。しかし、DFCD の効果は顕著に確認することができ、DFCD 適用モデルの RH DFCD, SH DFCD 両形態で、二次空気のスパン方向拡散性が向上していることがわかる。また、この二次空気の拡散性は下流側 $x/d=6.0$ においても維持されており、DFCD を設けない形態に比べて良好な付着面積を示している。このことから、SH と RH DFCD は面平均フィルム効率の値で見ると、同程度の性能ではあったが、付着面積で見ると RH DFCD のほうが優位であると考えられる。

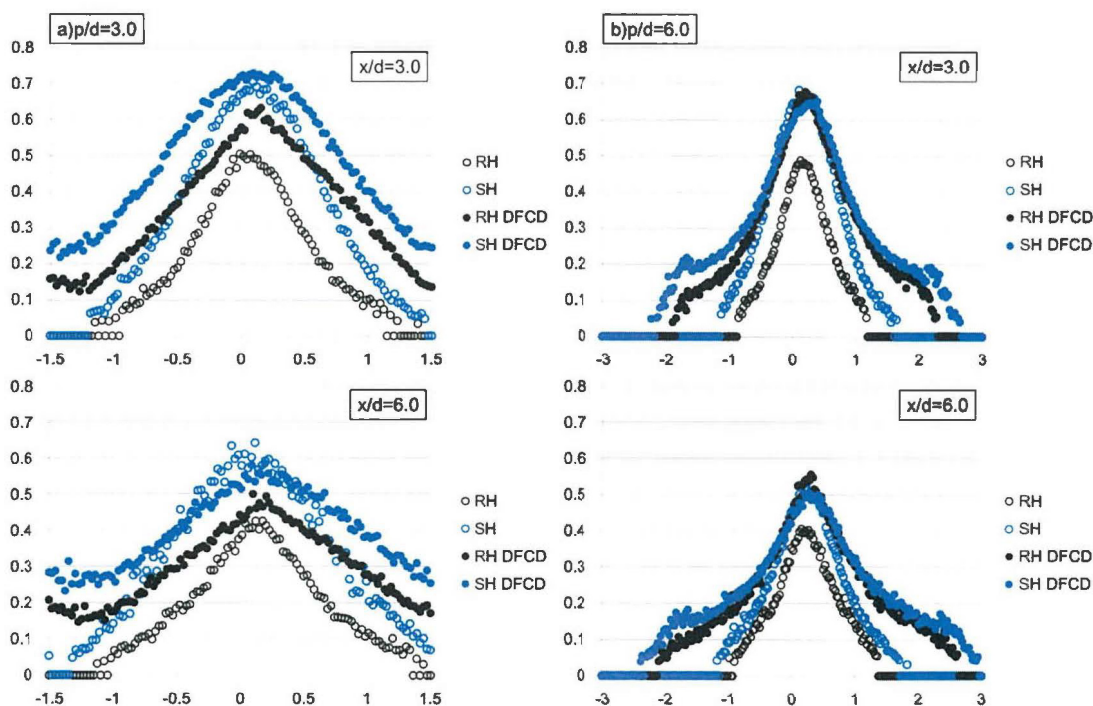


図 3.3.11 スパン方向フィルム効率($p/d=3.0, 6.0$ for $BR=0.5$)

(2) 熱伝達率

図 3.3.12 には、計測によって得られた $BR=0.5$ における熱伝達率分布を示している。熱伝達率の算出値は、 $x/d=0$ における、乱流境界層での熱伝達率の実験式を代入した。冷却孔のピッチの変化に対しては、熱伝達率の傾向が大きく変化することは無く、横方向に熱伝達率の分布が広がるのみであった。RH と SH を比較すると、SH の方が、冷却孔出口での二次空気の運動量が低減されているために、冷却孔出口領域における熱伝達率の上昇が比較的抑えられていた。一方で、DFCD を設置した条件では、全ての条件で熱伝達率を増加させており、特に RH+DFCD の条件ではスパン方向に広い領域で熱伝達率が高くなっている。SH に関しては、RH ほど DFCD による熱伝達率の増加量は多くなかった。SH+DFCD の条件に関しては、ピッチが狭い場合に限って熱伝達率が上昇している。これは、不確かさの影響か、スパン方向の二次空気の干渉を受けて熱伝達率が増加した効果が現れていると考えられる。

図 3.3.13 には、計測によって得られた $BR=1.0$ における熱伝達率分布を示している。DFCD が存在しない条件に関しては、二次空気が lift-off しているため、壁面で熱伝達率が高い領域は限定的に算出されている。SH に関しては、吹き出し比が増加することで、冷却孔出口領域の熱伝達率が $BR=0.5$ に比べて増加する傾向が観察された。DFCD を設置した条件に関しては、 $BR=0.5$ の場合よりも熱伝達率の高い領域が、流れ方向に広がっている様子が特に RH の条件で観察された。SH に関しても、DFCD を設置することで、熱伝達率が増加していたが、 $BR=0.5$ と同様に、熱伝達率の増加量は抑えられている。

図 3.3.14 には、 $p/d=3.0$ におけるスパン方向平均の熱伝達率を示している。熱伝達率の値が最も高かったのは、RH+DFCD であり、冷却孔の出口領域で最も高い値を示している。SH に関しては、全体的に低いオーダーで熱伝達率が推移しているが、DFCD を取り付けることで、RH+DFCD の熱伝達率に近づいてしまう。図 3.3.15、図 3.3.16 には、それぞれ $p/d=4.5$ 、 6.0 の結果を示しているが、基本的に上記の傾向は変化しない。ただし、無冷却の領域が多いため、必然的に各形態の差がピッチを広げるにしたがって小さく算出される。

図 3.3.17 には、面平均の熱伝達率の算出値を示している。RH+DFCD は、フィルム効率では SH を上回る条件も存在していたが、熱伝達率に関しては SH 単体よりも数倍高くなる条件も存在するため、熱伝達率は DFCD の弱点になっているといえる。

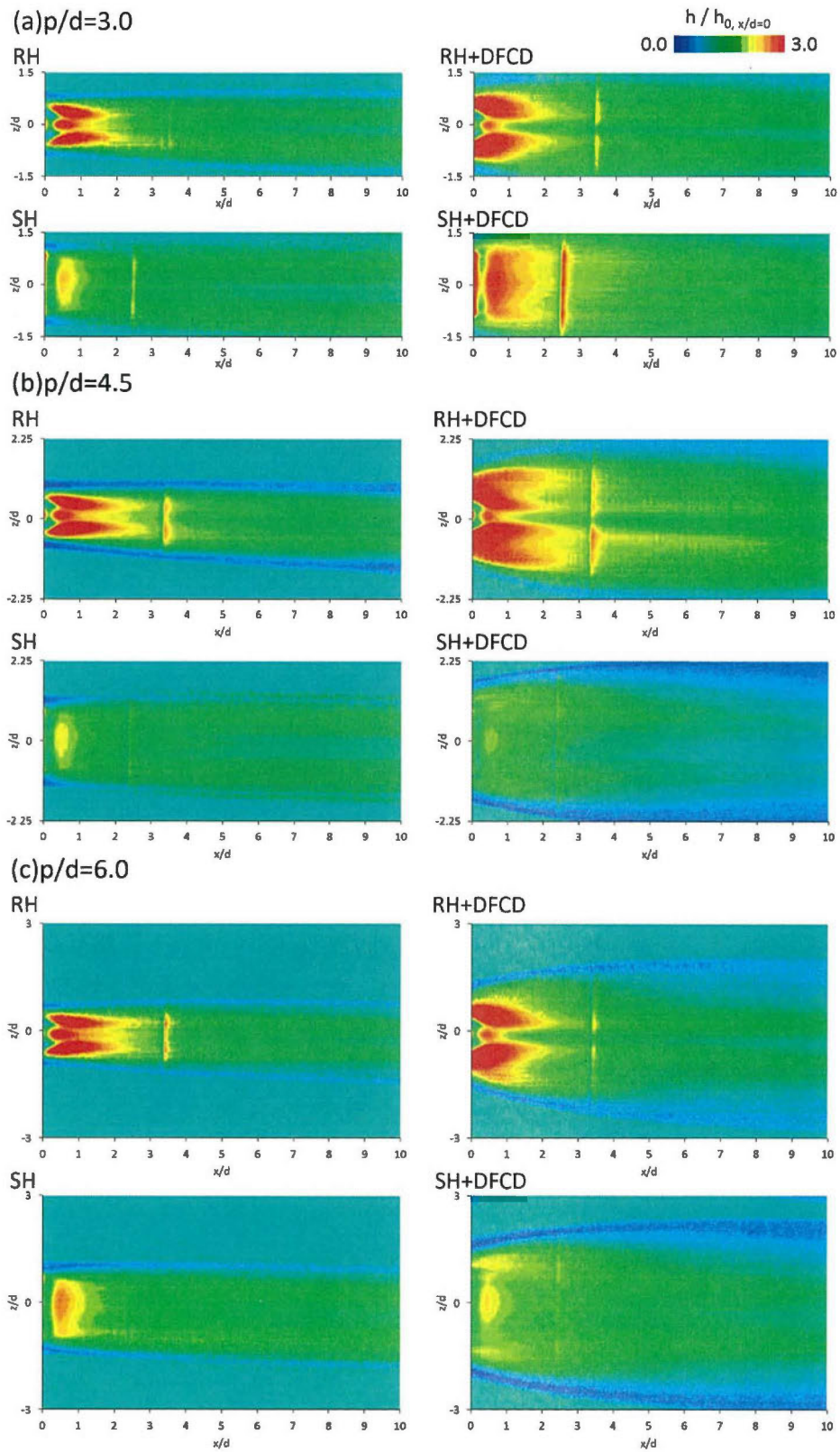


図 3.3.12 熱伝達率分布 ($BR=0.5$)

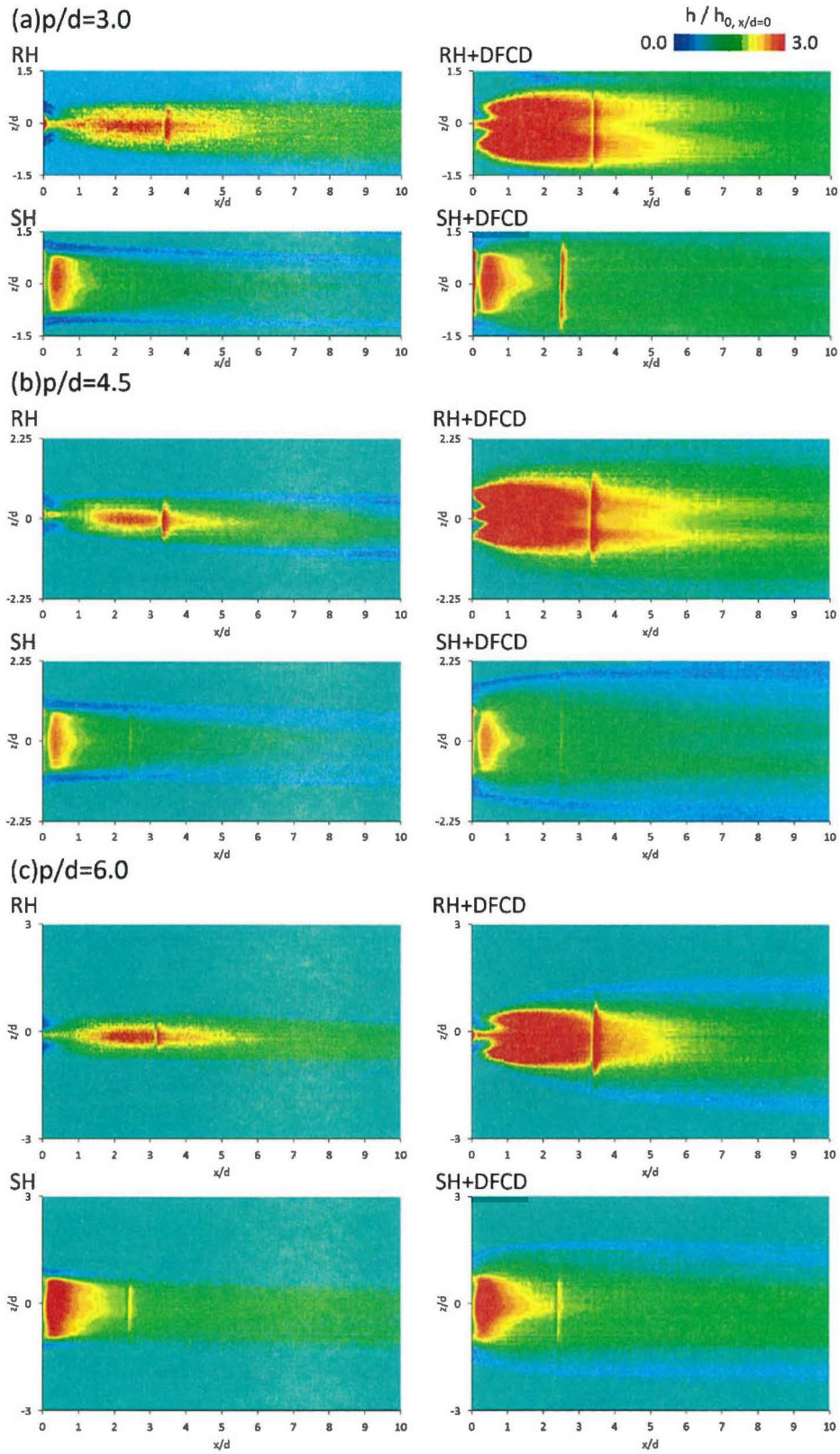


図 3.3.13 熱伝達率分布 ($BR=1.0$)

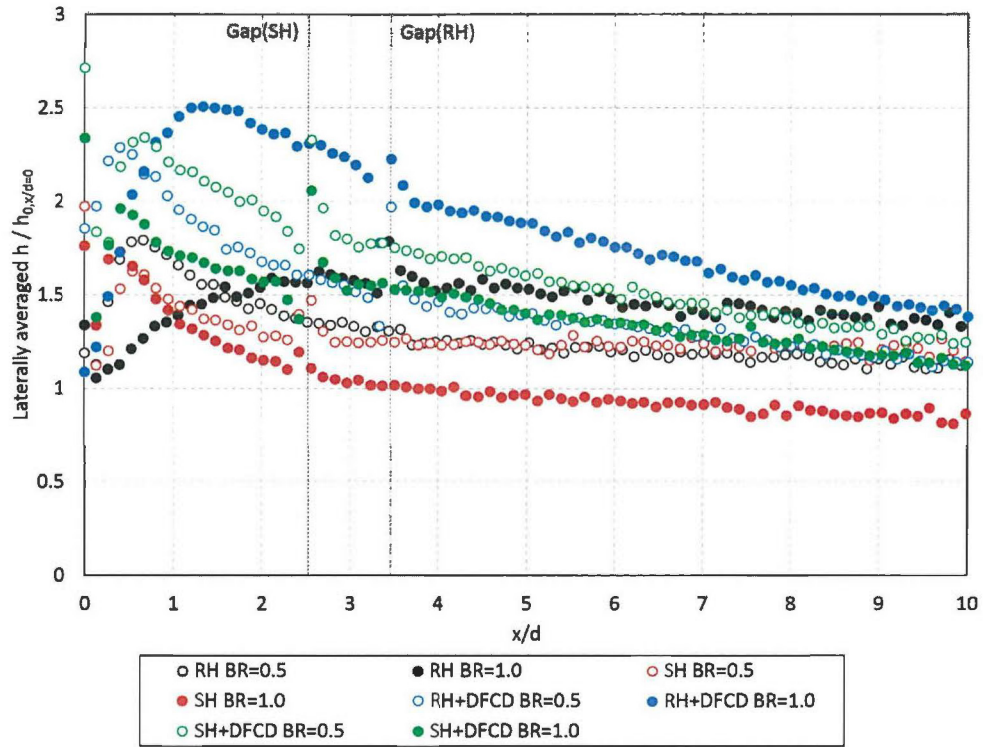


図 3.3.14 スパン方向平均熱伝達率($p/d=3.0$)

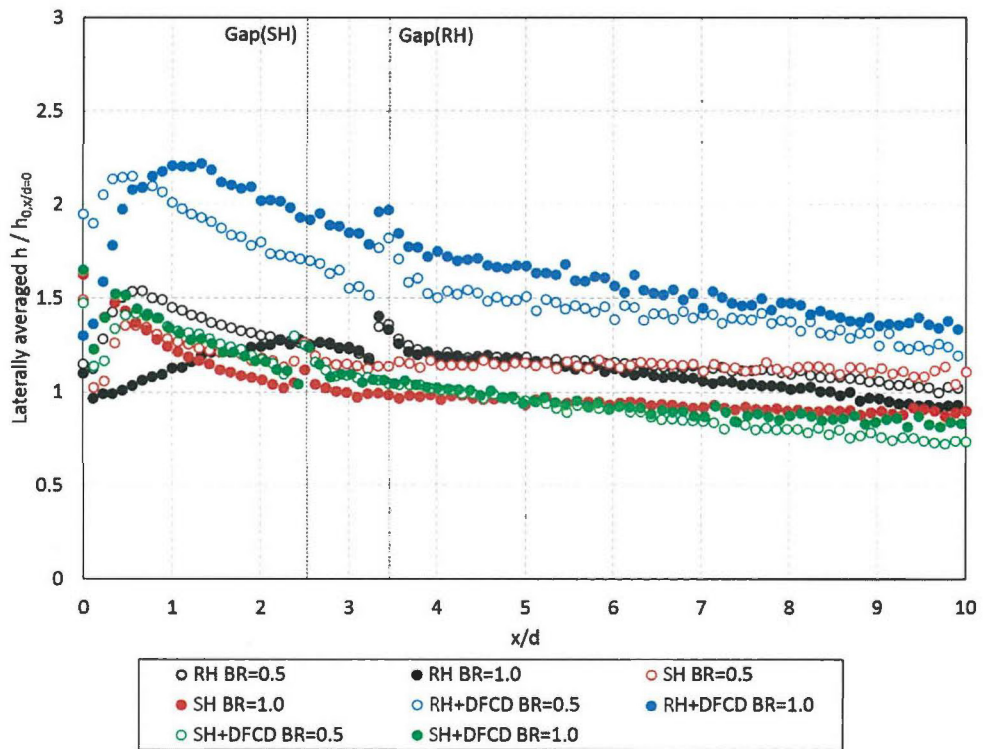


図 3.3.15 スパン方向平均熱伝達率($p/d=4.5$)

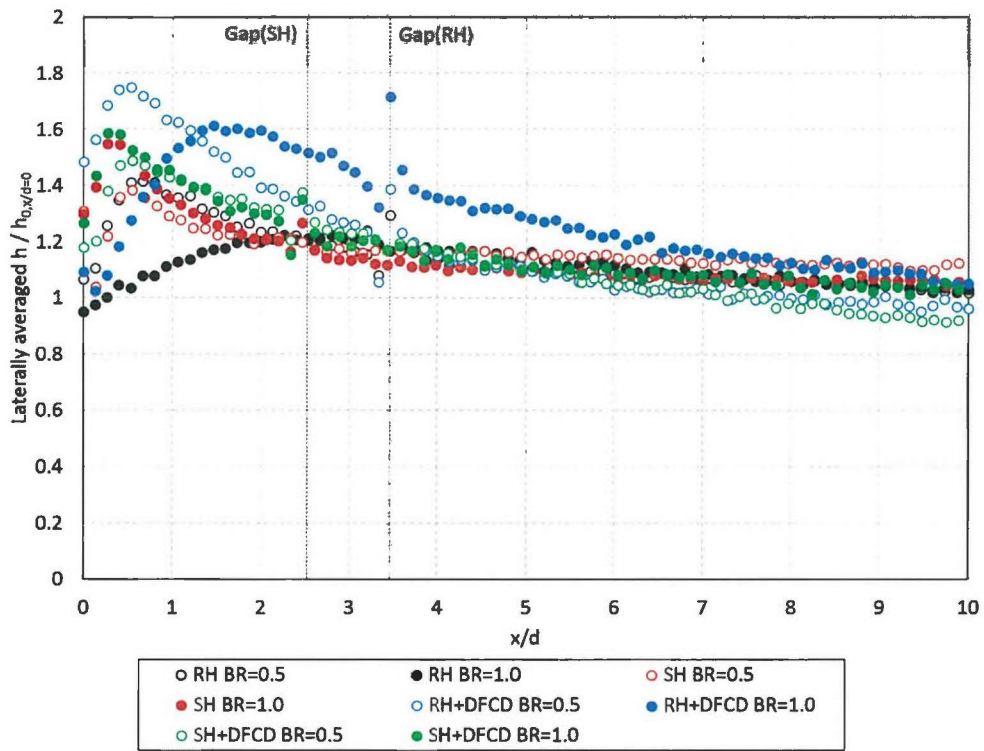
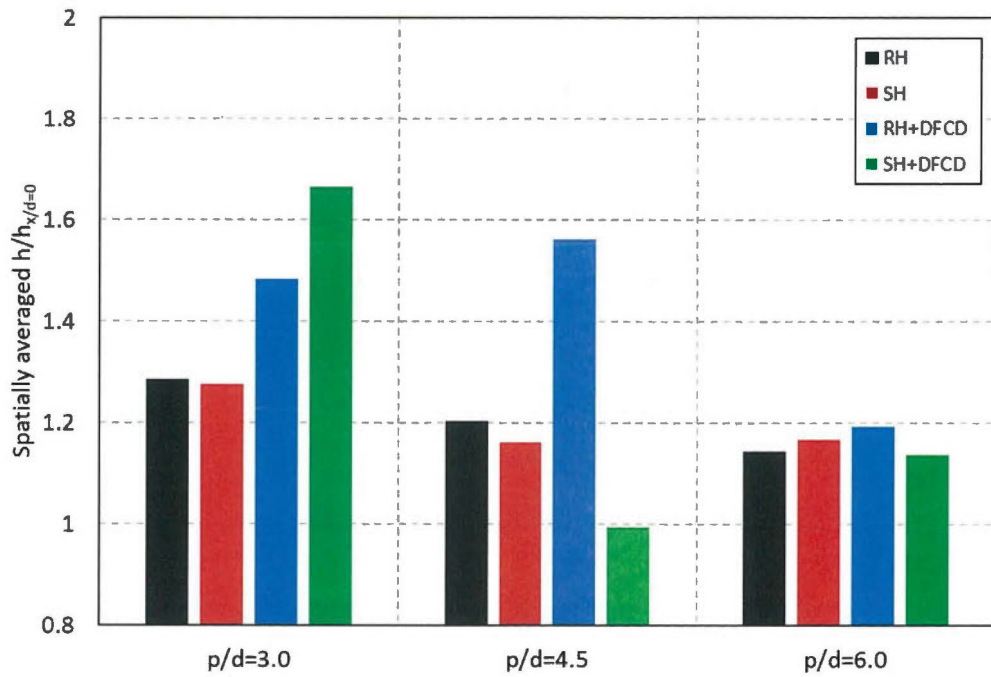


図 3.3.16 スパン方向平均熱伝達率($p/d=6.0$)

(a) BR=0.5



(b) BR=1.0

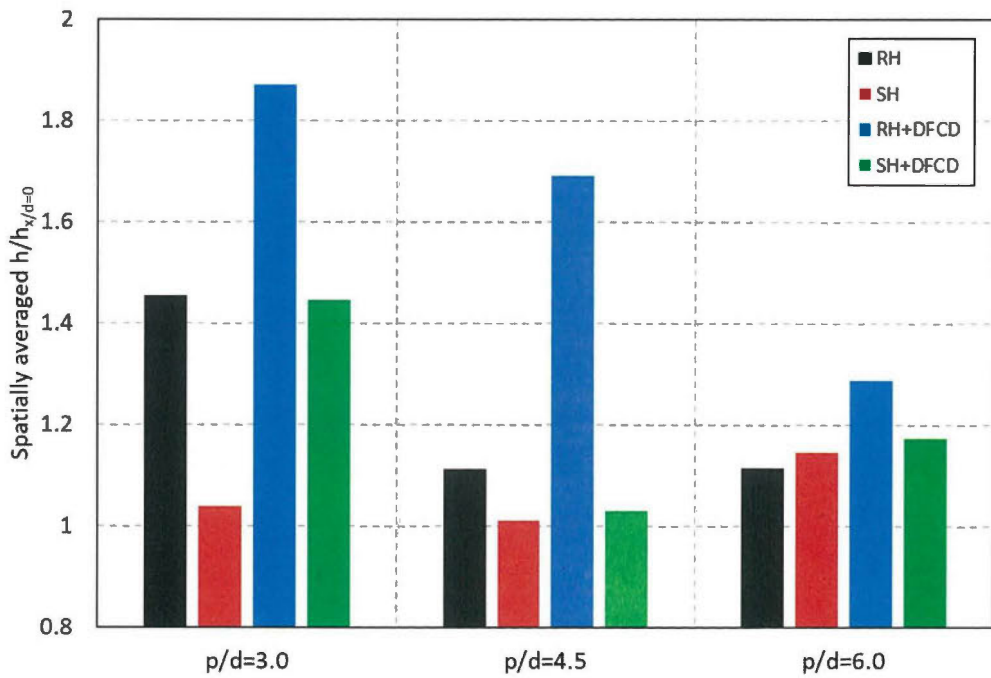


図 3.3.17 面平均熱伝達率 (BR=0.5, 1.0)

(3) 熱流束低減率

図 3.3.18 には、実験から得られた $BR=0.5$ における NHFR の分布を示している。DFCD を設置していない形態を見ると、RH と SH では、NHFR に大幅な差が現れた。RH に関しては、冷却孔の出口領域で、スパン方向に 2 つの NHFR が負の領域が現れており、冷却の効果が得られていない。一方で、冷却孔のセンターライン状については、スパン方向に狭い領域であるが、NHFR が正になっている。SH については、冷却孔のセンターラインで RH に比べると広い領域で NHFR が正になっている上、RH の冷却孔出口で見られた NHFR が負の領域が観察されなくなっている。RH に DFCD を設置した条件に関しては、冷却孔センターライン上のフィルム効率が高くなるに伴って、同領域で NHFR が正になる領域が拡大している。しかし、冷却孔出口付近の熱伝達率が負になる領域は、DFCD を設置した場合でも消えることは無かった。SH に関しては、DFCD を取り付ける前後で、コンターに大きな差は見られない。

図 3.3.19 には、実験から得られた $BR=1.0$ における NHFR の分布を示している。吹き出しが高い条件では、RH と SH で綺麗に傾向が分かれており、RH 系は NHFR が負の領域が多く、SH 系は NHFR が正の領域が多い。特徴的な傾向を今回示したのは、RH+DFCD で、この条件では DFCD を取り付けることによって、フィルム効率が向上し、冷却面積が増加したにもかかわらず、NHFR が負の領域が RH 単体と比べても大きくなってしまった。

図 3.3.20～図 3.3.22 には、スパン方向平均熱伝達率を示している。コンターでも見られたように、RH 系の場合は NHFR が負の領域が多くなっており、平均値で見ると下流まで NHFR が負になってしまっている場合もある。一方で、SH では逆に、DFCD を設置することで、NHFR はより正の方向にシフトする形で算出された。

図 3.3.23 には、面平均の NHFR の値を示している。 $BR=0.5$ の場合には、平均的に見ると DFCD の設置によって、概ね NHFR が増加している。しかし、 $BR=1.0$ に関しては、RH と SH で DFCD の効果が逆転しており、RH は DFCD が悪影響を及ぼし、SH は DFCD がより高い性能向上をもたらす可能性が示された。

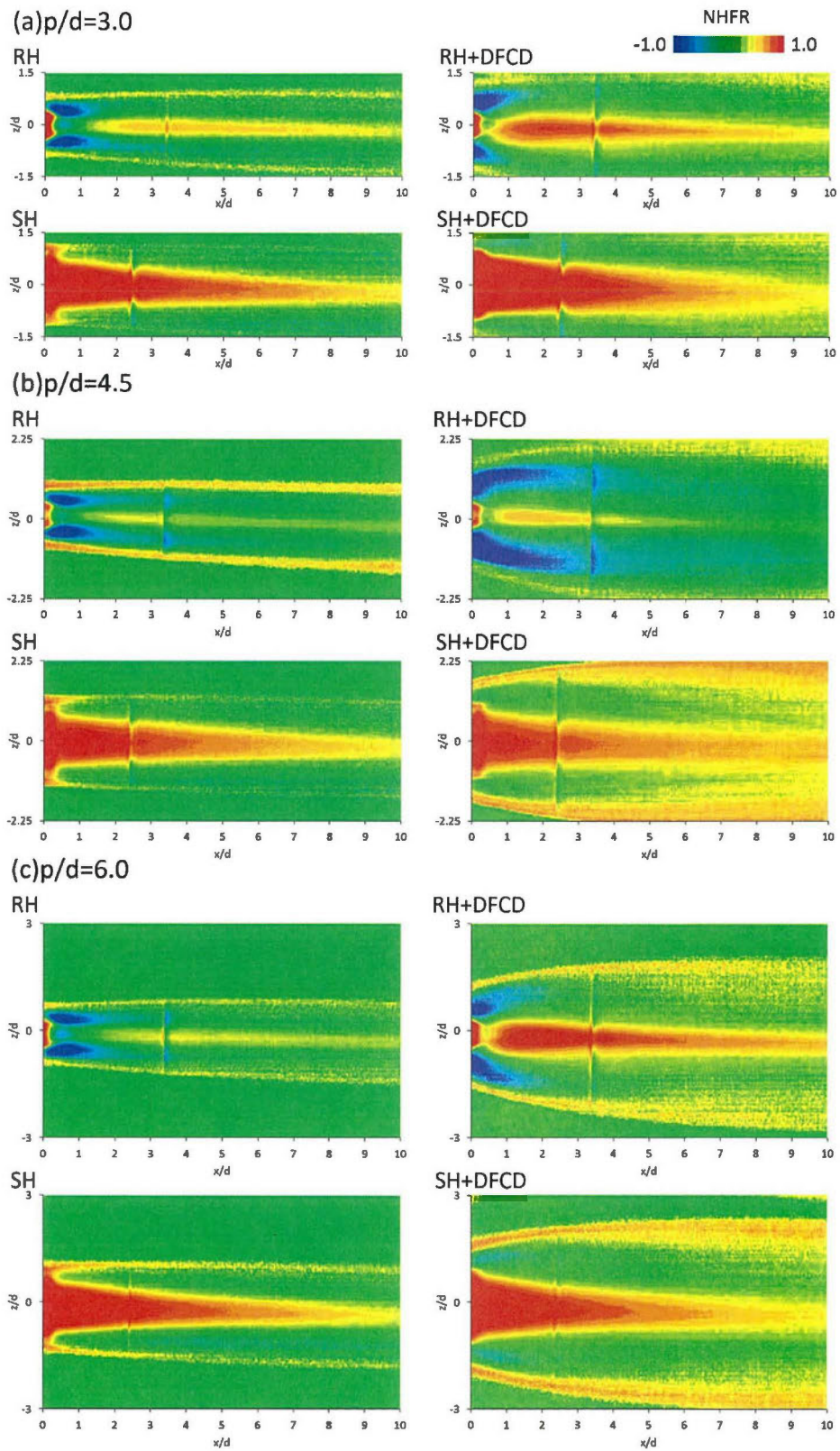


図 3.3.18 熱流束低減率分布 ($BR=0.5$)

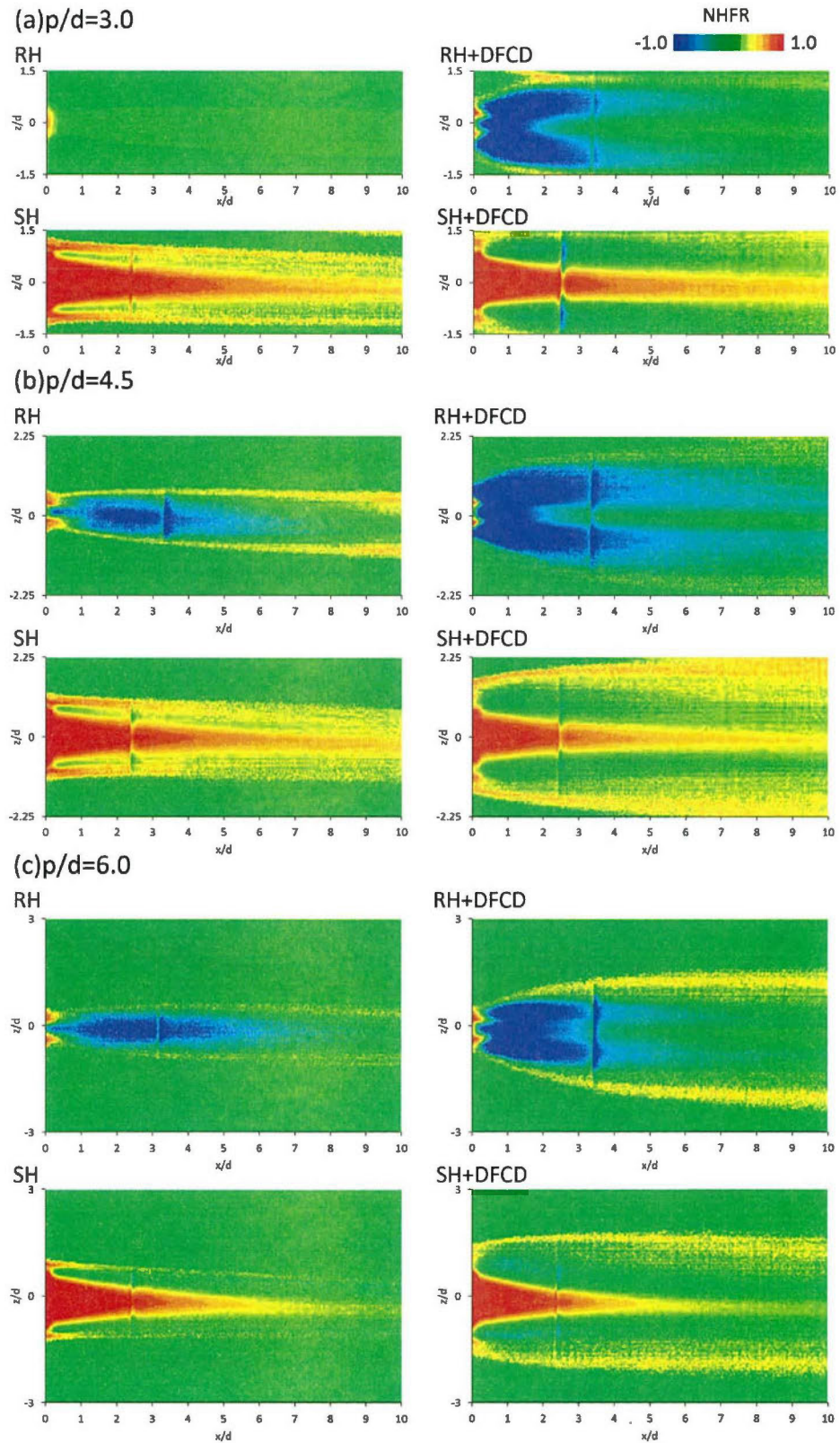


図 3.19 熱流束低減率分布 ($BR=1.0$)

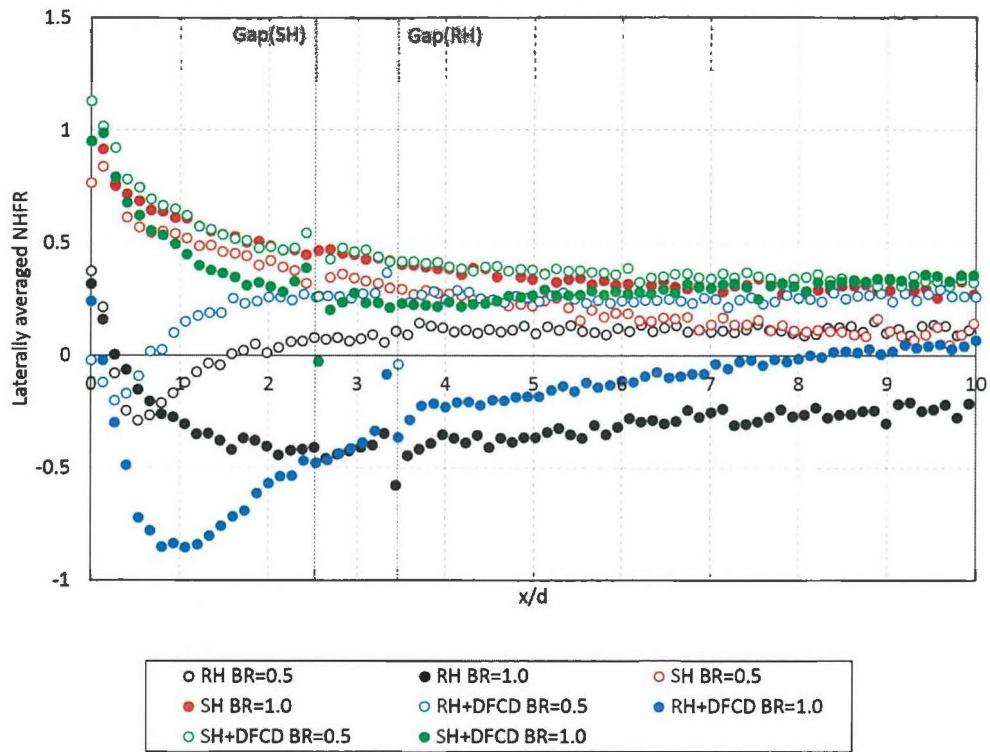


図 3.3.20 スパン方向平均熱流束低減率 ($p/d=3.0$)

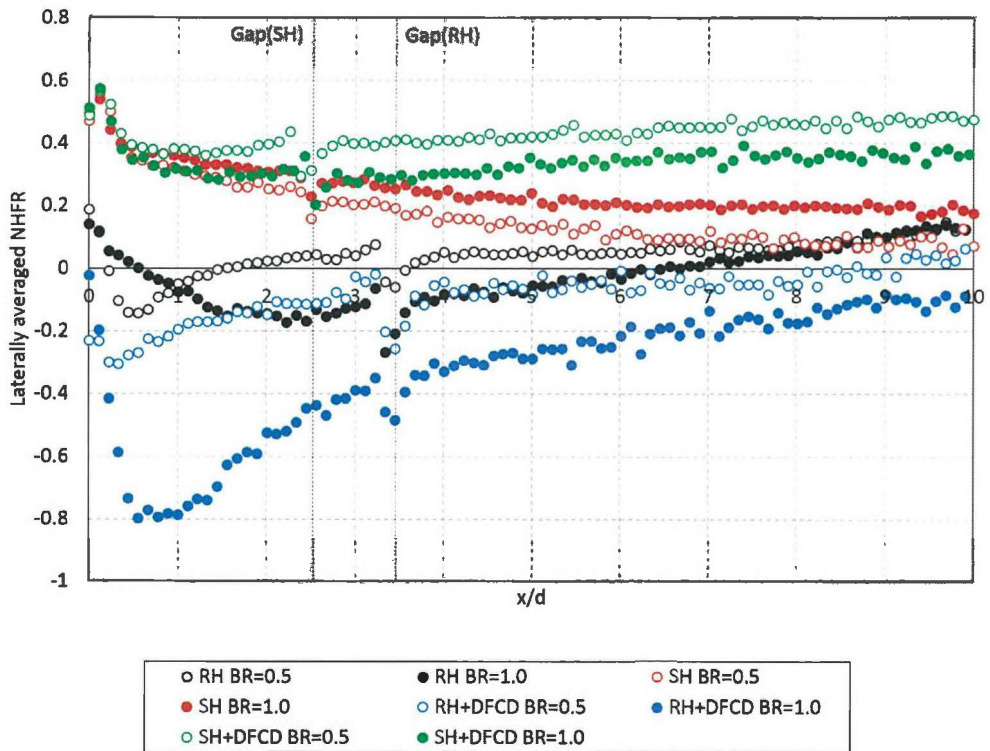


図 3.3.21 スパン方向平均熱流束低減率 ($p/d=4.5$)

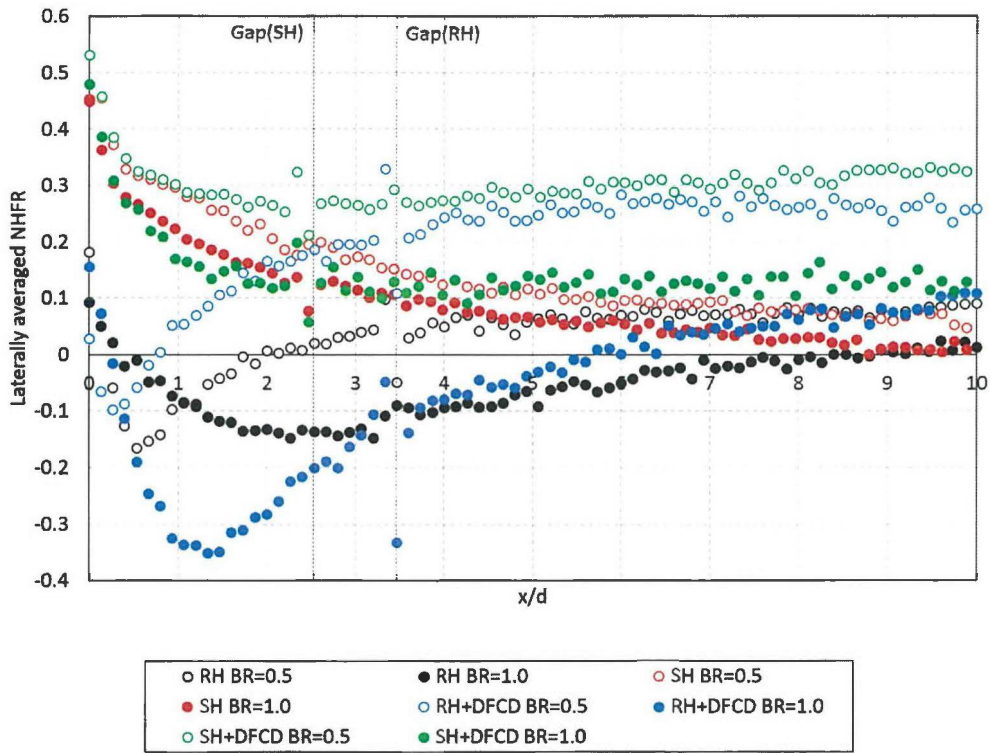
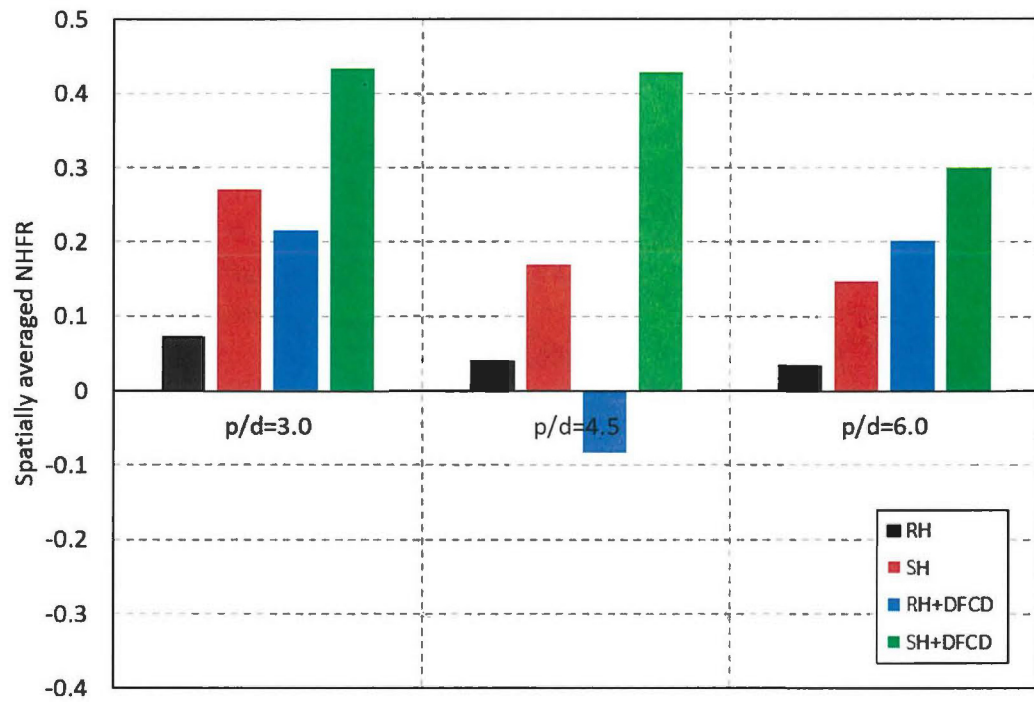


図 3.3.22 スパン方向平均熱流束低減率 ($p/d=6.0$)

(a) BR=0.5



(b) BR=1.0

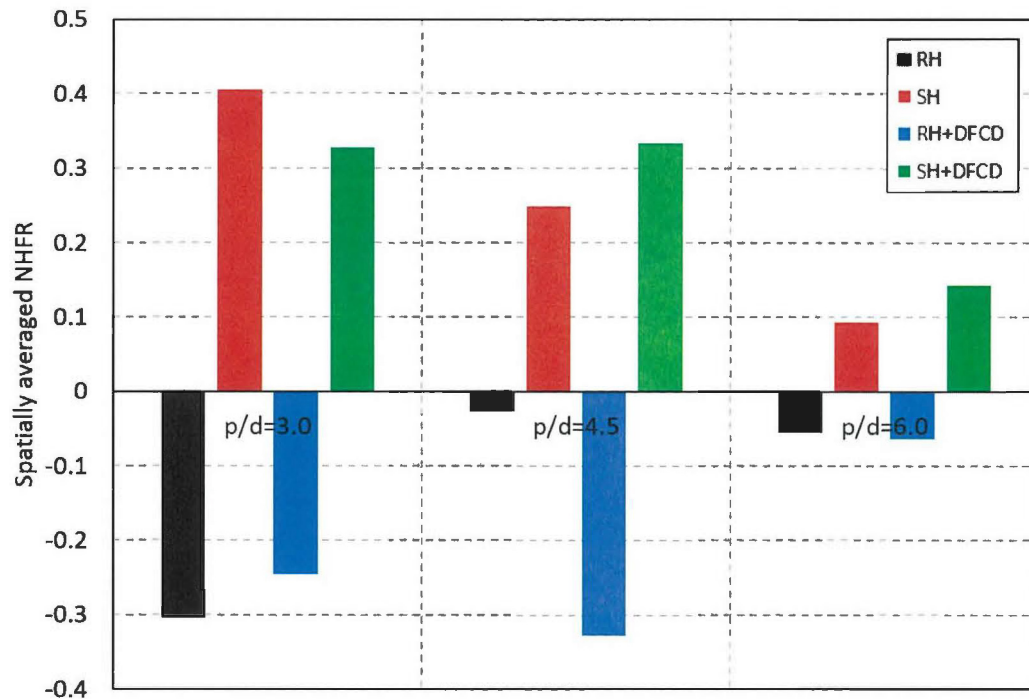


図 3.3.23 面平均 NHFR (BR=0.5, 1.0)

(4) 1 個置きデバイスとの性能比較 ($p/d=3.0$ for $BR=0.5, 1.0$)

今回使用した 2 個置きデバイスの性能を、前章で行った 1 個置きデバイスの研究結果と比較した。図 3.3. 24 には、各吹き出し比条件における、スパン方向平均のフィルム効率を示す。これを見ると、両吹き出し比条件において、今回使用した 2 個置きデバイスは 1 個置きデバイスよりも高いフィルム効率を示していることがわかる。また、2 個置きデバイスは $BR=1.0$ においても、 $x/d=3.0$ 以降においては、1 個置きデバイスの $BR=0.5$ と同等のフィルム効率を示している。このため、高吹き出し比条件においても 1 個置きデバイスに比べ、CRVP の制御がなされていると考えられる。

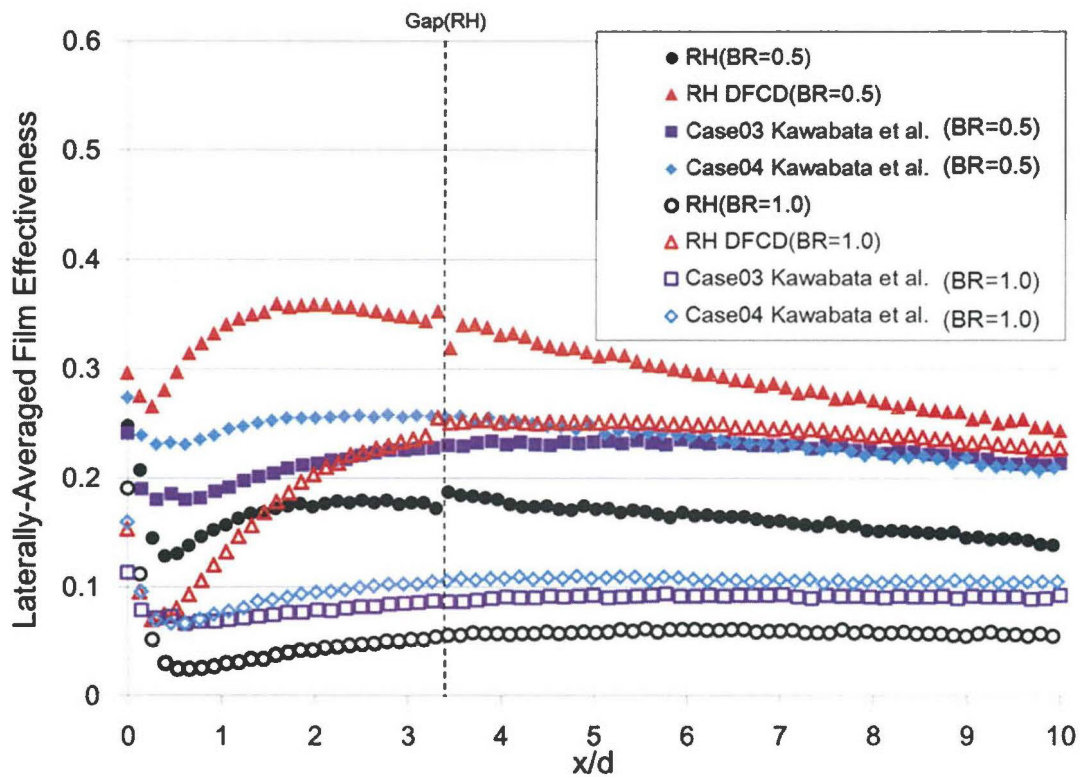


図 3.3. 24 スパン方向平均フィルム効率($p/d=3.0$ for $BR=0.5$) : 1 個置きデバイスとの比較

3.3.4.2 空間温度場分布

(1) 3 次元無次元温度分布

図 3.3. 25 には実験で取得した $BR=0.5$ における、各形態の 3 次元無次元温度場分布と、 $x/d=3.0$ での yz 平面を示す。3 次元無次元温度場分布では、色付けは無次元温度で行っており、それぞれのコンターに $\theta=0.15, 0.4, 0.6$ の 3 つを重ねて描いている。また、冷却孔ピッチは $p/d=3.0$ であり、計測範囲内に冷却孔が 3 つ存在しているために、それぞれのコンターに、両端の冷却孔から吹き出した二次空気を確認できる。RH と SH を比較すると、RH に比べ、

冷却孔出口が拡大している SH では二次空気の lift-off が抑制されるために、壁面付着性が高く、無次元温度の高い領域も壁面寄りに存在している。さらに、RH に比べ温度場はスパン方向に広く拡散していることがわかる。このことより、前述したとおり壁面フィルム効率でも RH よりも高い値を示したと考えられる。DFCD を適用した形態では、冷却孔下流領域において、DFCD から発生する縦渦によって二次空気のスパン方向拡散性と、付着性が顕著に向上しており、隣り合った冷却孔から吹き出した二次空気同士が互いに干渉し合っている様子が確認できる。特に SH DFCD では、RH DFCD と比較しても、二次空気がさらに壁面近くに温度場が存在しており、二次空気干渉領域における無次元温度の値も高くなっていることから、冷却孔形状と DFCD の複合効果が発揮されていると考えられる。また、RH DFCD, SH DFCD の yz 平面での領域(A)においては、二次空気の巻き上がりを確認できる。これは FCD から発生した縦渦どうしが干渉し合っていることを示している。

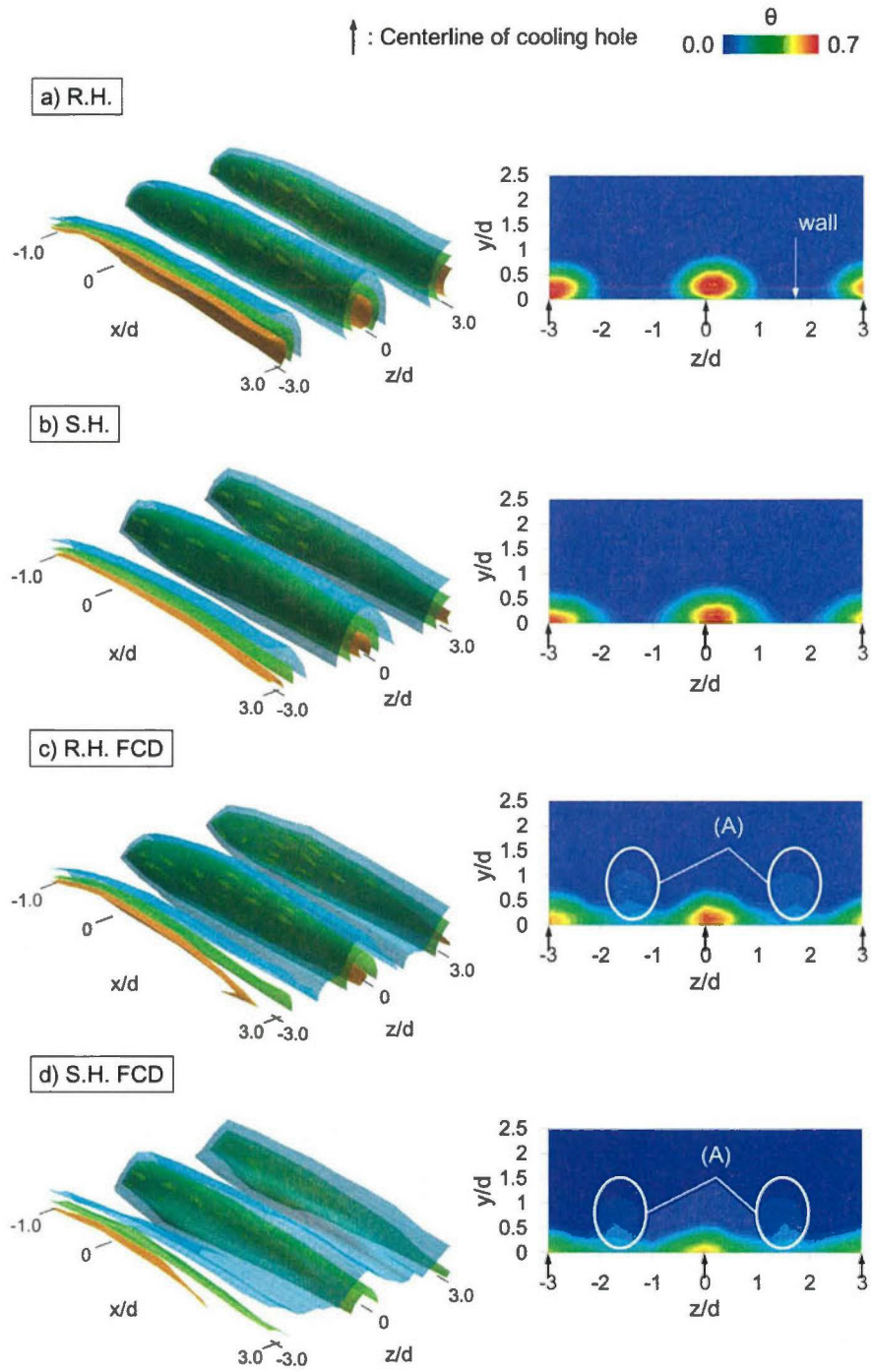


図 3.3.25 三次元無次元温度分布, YZ 平面無次元温度場($p/d=3.0$ for $BR=0.5$)

(2) YZ 平面無次元温度分布

図 3.3. 26 には $p/d=4.5, 6.0$ における yz 平面の無次元温度分布を示す。 $p/d=4.5, 6.0$ においては、 $p/d=3.0$ の条件と同様に SH は、 RH に比べて二次空気の付着性が高くなっており、無次元温度の高い領域がより壁面近くに存在していることがわかる。また、DFCD を設置した形態では、二次空気の付着性、スパン方向拡散性ともに向上しており、温度場のコアは壁面寄りに存在している。さらに、温度場の端では二次空気の巻き上がりがわずかに確認できるが、 $p/d=3.0$ と違い、DFCD から発生した縦渦どうしの干渉が起こっていないために、二次空気の巻き上がりも弱くなっている。図 3.3. 27 には $BR=1.0$ における、各冷却孔ピッチにおける yz 平面の無次元温度分布を示す。吹き出し比の増加に伴い、CRVP が強まるために、 $BR=0.5$ の条件と比べて全体的に温度場が壁面から離れていることが分かる。また、RH では無次元温度コアの値自体も低くなっており、主流とのミキシングが盛んに行われることで、より多くの低温流体を巻き込んでいるためであると考えられる。しかしながら、SH では BR が増加しても、壁面付近に無次元温度の高い領域が存在し、二次空気の付着性を保っている。また、DFCD を適用した形態では、RH DFCD において、二次空気のコアは若干壁面から離れるものの、DFCD の効果により、付着性を維持しており、高い拡散性のため、二次空気どうしの干渉も確認できる。SH DFCD では RH DFCD よりも付着性が強く残っており、二次空気干渉領域における無次元温度の値が高いだけでなく、コアの温度も高いことがわかる。SH と RH DFCD は前述の通り、同等のフィルム効率を示していたが、二次空気の付着面積としては RH DFCD のほうが、全ピッチに渡って、優位性を示す傾向にあった。

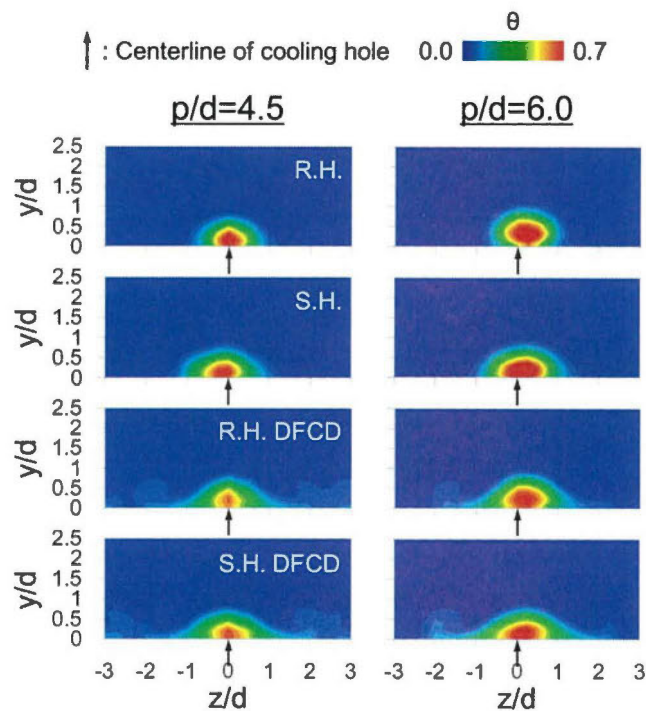


図 3.3. 26 YZ 平面無次元温度場($p/d=4.5, 6.0$ for $BR=0.5$)

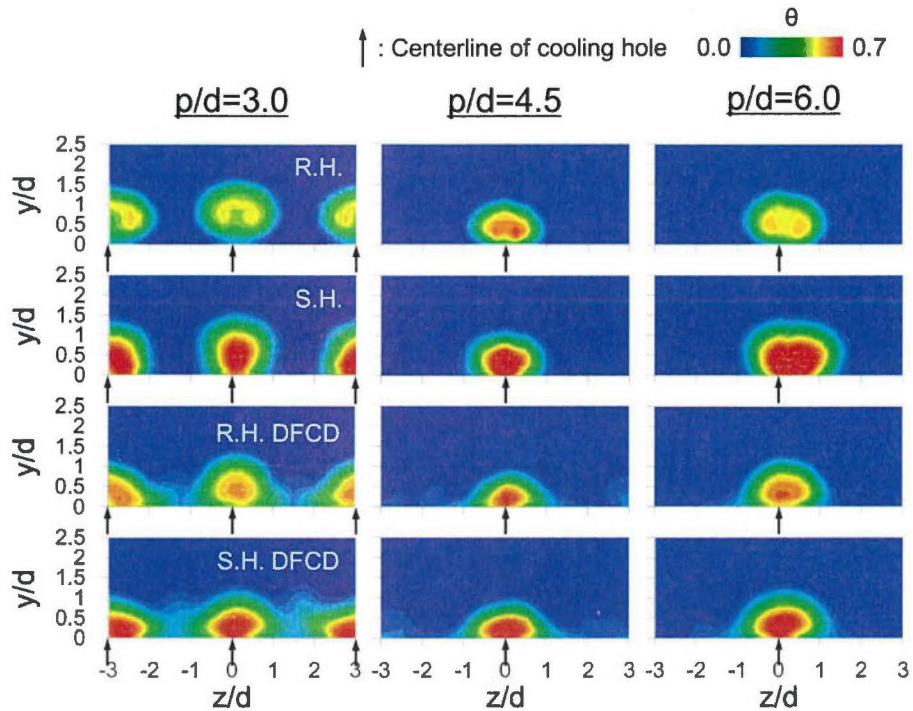


図 3.3.27 YZ 平面無次元温度場($p/d=3.0, 4.5, 6.0$ for $BR=1.0$)

(3) YZ 平面：冷却孔付近の無次元温度分布

DFCD から発生する縦渦と CRVP との干渉効果をより詳細に調査するために、冷却孔付近($x/d=-1.0, -0.5, 0.0, 0.5$)の無次元温度分布を図 3.3. 28 に示す。図中の破線は冷却孔のスパン方向幅($1.0d$)を示している。RHDFCD は RH と比較して、CRVP による二次空気の lift-off が抑制されていることがわかる。これは、冷却孔から吹き出した二次空気が早い段階から、デバイスから発生した縦渦の効果で壁面に押さえつけられていることを示している。また、RH DFCD は、RH に比べて若干二次空気のスパン方向拡散性が向上しており、この後さらに縦渦の影響を受けて二次空気がスパン方向に拡散していくと考えられる。

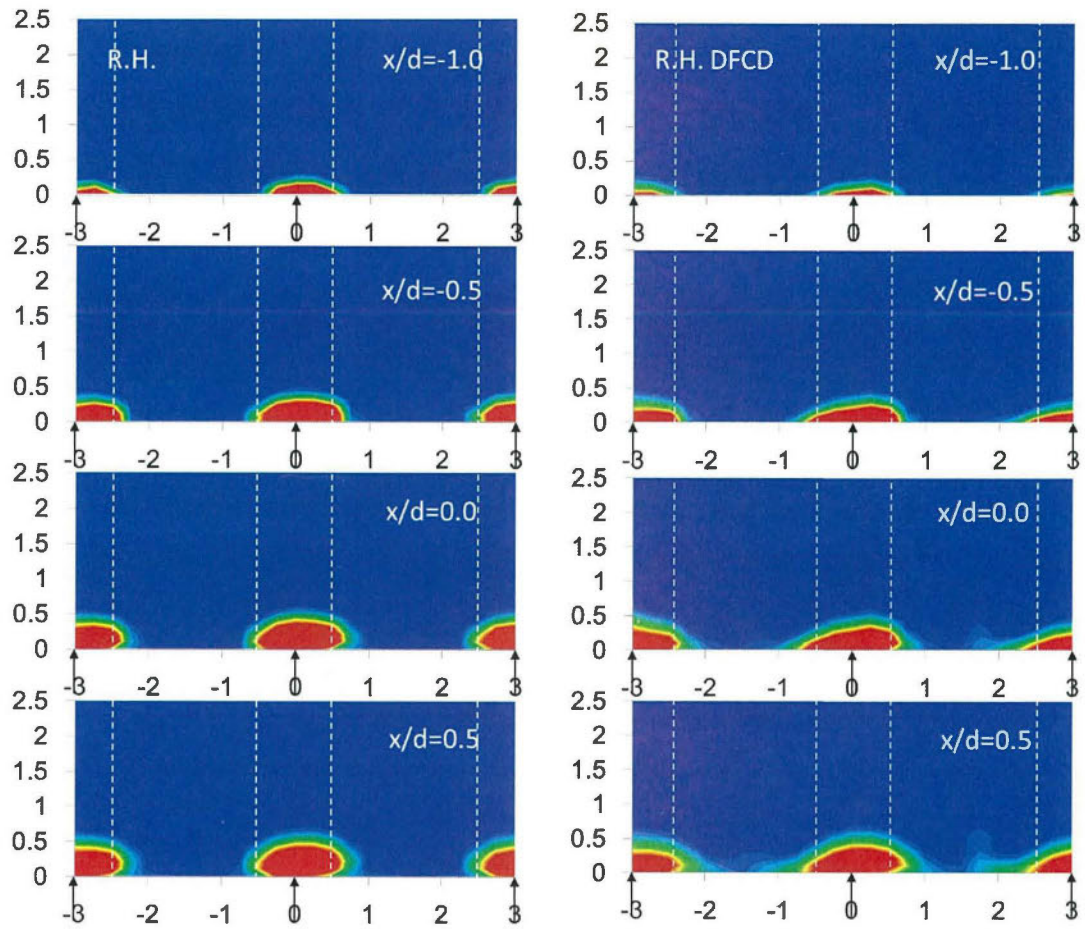


図 3.3.28 RH, RHDFCD YZ 平面無次元温度場($p/d=3.0$, for $BR=0.5$) 冷却孔付近

3.3.4.3 全圧損失係数計測

図 3.3.29(a)に実験で取得した全圧損失係数の分布を示す。これは吹き出し無しの条件で取得した全圧損失係数である。DFCD を設けない条件での壁面付近の全圧損失は境界層の損失によるものであり、壁面付近に高い損失が集中している。また、DFCD を設けた条件においては特徴的な損失分布となっており、DFCD の存在する領域の下流で損失が壁面から離れた領域まで存在していることが分かる。これは DFCD から発生した縦渦により巻き上げられた境界層が、主流とミキシングを起こしているためであると考えられる。ピッチ毎の損失分布をみると、 $p/d=3.0\sim 6.0$ で、冷却孔ピッチが狭い条件ほど、損失コアが壁面から離れる傾向にあった。これは、冷却孔ピッチが狭い条件においては、DFCD から発生した縦渦どうしの干渉が強くなり、その干渉領域の境界層を巻き上げる効果が強いためであると考えられる。

DFCD 設置条件においては、全ピッチにおいて、境界層部分の損失が薄くなっており、こ

これは DFCD から発生した縦渦が、境界層を巻き上げているためであると考えられる。図 3.3. 29 (b)に各冷却孔ピッチにおける、 $BR=0.5$ の全圧損失係数の分布を示す。 $p/d=3.0$ の条件では、それぞれ二次空気吹き出しによる全圧損失のコアが三つ確認できる。RH と SH を比較すると、SH のほうが二次空気吹き出しによる損失のコアの低さが低く、スパン方向に広く分布していることが分かる。また、SH では、わずかに境界層部分の損失領域が厚くなっている。DFCD を設置した両条件においては、DFCD を設けない RH, SH とは大きく異なる損失分布となっており、DFCD から発生した縦渦による損失分布が支配的となっている。しかしながら、壁面に近い領域での損失が吹き出し無しの条件に比べてわずかに増加しており、これは二次空気吹き出しによる損失の増加であると考えられる。

$p/d=4.5, 6.0$ では冷却孔ピッチが拡大するに伴い、隣接する DFCD どうしの距離も開いていくために、縦渦の干渉が起きずに損失の領域が計測領域両端に広がっていく傾向にある。この損失領域の間に冷却孔が存在しているために、二次空気吹き出しによる損失は、DFCD から発生した縦渦による損失領域の間に表れている。しかし、縦渦が境界層を巻き上げることで、この領域においては境界層が薄くなっているために、吹き出しによる損失の高さは DFCD を適用しない条件に比べて低くなっていることがわかる。図 3.3. 29 (c)に各冷却孔ピッチにおける、 $BR=1.0$ の全圧損失係数の分布を示す。RH と SH では、吹き出し比の増加に伴い、損失領域が壁面から離れた位置にまで拡大している。しかし、RH では境界層部分の損失が小さくなっており、特に $p/d=3.0$ で顕著に現れている。また、DFCD 設置条件においても、二次空気吹き出しによる損失高さの増加が確認できるが、 $BR=0.5$ と同様に、DFCD 無しの条件と比較すると損失領域は壁面近くに存在している。また、縦渦起因の損失領域にほとんど変化はなく、冷却孔からの二次空気吹き出しとは独立していることがわかる。

定量的な空力性能の評価を行うために、 $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$, $0 \leq y/d \leq 2.5$ の範囲で流量平均した全圧損失係数を、冷却孔ピッチ毎に図 3.3. 30(a), (b), (c)に示す。各冷却孔ピッチにおける結果は全て、二次空気吹き出しを行わず、DFCD を設けない場合の結果で正規化している。全冷却孔ピッチにおいて、二次空気の吹き出しを行わない場合でも、DFCD を設置した条件では、DFCD から生成した縦渦と主流とのミキシングが起こるため、DFCD 無しの条件と比較して、全圧損失が増加しており、 $p/d=4.5$ の時の損失が最も大きくなっていた。

図 3.3. 30(a) $p/d=3.0$, $BR=0.5$ においては、RH と SH を比較すると SH のほうが損失が大きくなっていた。さらに DFCD を設置した形態については、DFCD を設けない形態に比べて損失が大きくなっていることがわかる。これは、二次空気吹き出しによる二次空気と主流とのミキシングによる全圧損失と、DFCD から発生する縦渦と主流空気とのミキシングによる全圧損失のためであると考えられる。 $BR=1.0$ においては、 $BR=0.5$ と比較して SH の損失は同程度であるものの、RH の損失が減少していた。これは、RH では局所の吹き出し比が大きいことで、主流に運動量を与えている可能性がある³⁾ためであると考えられる。図 3.3. 30(b), (c)は $p/d=4.5, 6.0$ の形態であり、この計測範囲に存在する冷却孔は1つであるので、先ほどの $p/d=3.0$ に比べて、単位面積当たりの二次空気流量は少なくなっている。しかしながら、

基本的な損失の傾向は $p/d=3.0$ の条件と変わらず，DFCD を設けた形態では損失が比較的高くなっており，吹き出し無し条件と比較して，約 1.4 倍~1.6 倍程度の損失増加となっていた。また，損失は $p/d=6.0$ の条件で最も小さくなっていた。

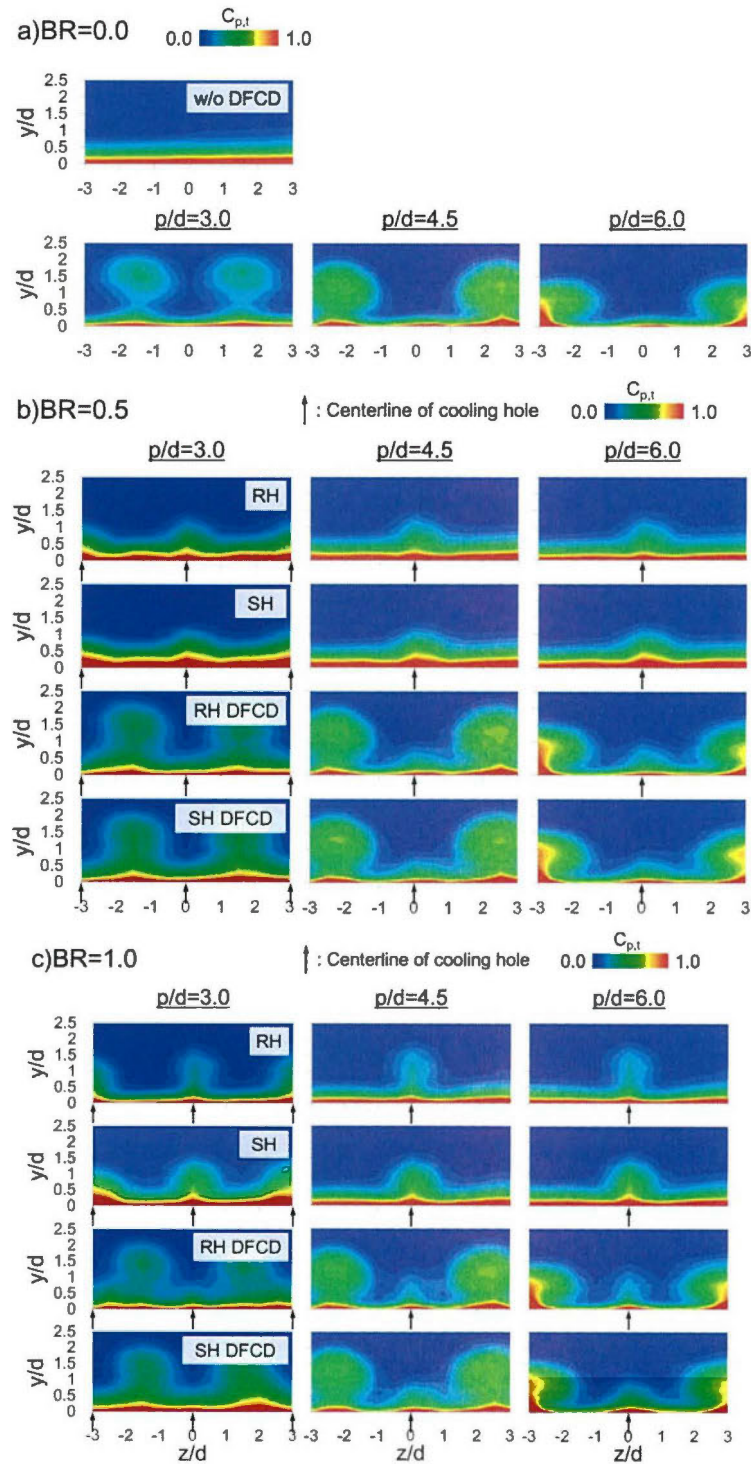


図 3.3.29 全圧損失分布: a) $BR=0.0$, b) $BR=0.5$, c) $BR=1.0$

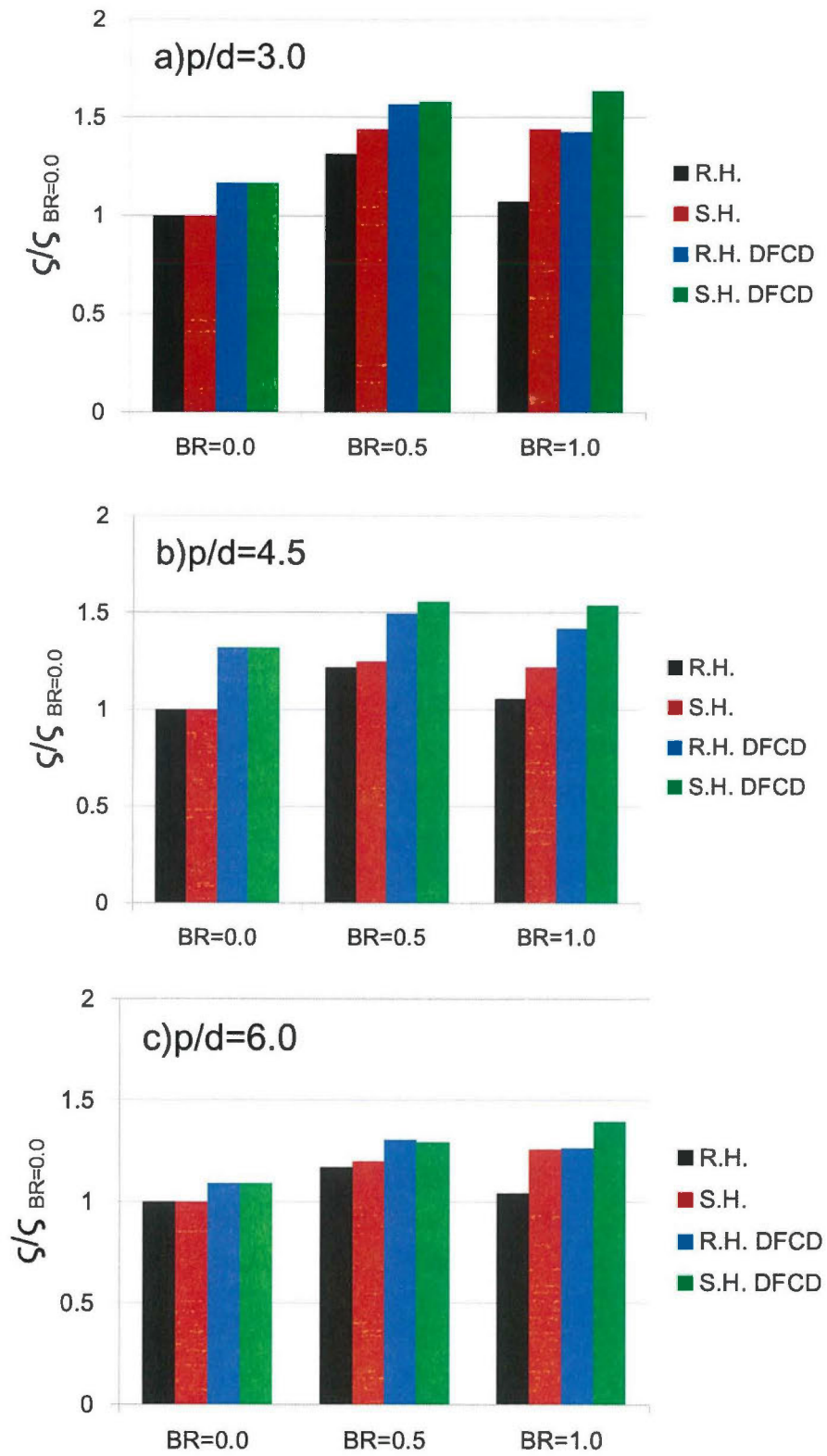


図 3.3.30 流量平均全圧損失係数: a) $p/d=3.0$, b) $p/d=4.5$, c) $p/d=6.0$

3.3.4.4 流れ場計測

(1) 渦度分布

図 3.3.31～図 3.3.33 には $x/d=3.0$ における、渦度分布を示す。図中の赤、青はそれぞれ正負の渦度を示している。

図 3.3.31 は吹き出し無しの場合であり、DFCD 無しの場合においては、主だった渦は確認することができない。しかし、DFCD を設置した場合においては、 $p/d=3.0\sim 6.0$ まで全ての条件で、DFCD 存在位置下流において渦のペアを確認することができる。これは DFCD から発生した縦渦であり、特に、 $p/d=3.0$ においては、DFCD どうしの間隔が狭いために、隣り合ったデバイスから発生した渦どうしが強く干渉している。この渦は互いに強め合うような渦構造であるため、 $p/d=4.5, 6.0$ に比べ渦が大きくなっている。ピッチが拡大するにつれて、DFCD どうしの間隔が離れていくために、この縦渦は小規模化し、壁面付近に存在する傾向にある。しかしながらこの縦渦間の流れ場は、どの冷却孔ピッチにおいても二次空気を壁面に押さえつけ、スパン方向への拡散を促進するような向きになっている。また、渦どうしが干渉している部分では、二次空気を巻き上げる向きの渦度となっている。

図 3.3.32 には $BR=0.5$ の渦度コンターを示す。RH, SH を見ると、冷却孔センターライン位置にそれぞれ、二次空気吹き出しによる CRVP が形成されていることが分かる。この CRVP は二次空気の壁面からの lift-off を促進し、冷却性の悪化を招く原因となっている。しかしながら、SH では RH と比較して CRVP を構成する時計回り、反時計回りの渦が離れて存在していることと、CRVP の強度自体も弱くなっていることから付着性の高い流れ場を形成していると考えられる。また、DFCD を設置した RH DFCD, SH DFCD については、図に示すように、渦(A)は二次空気吹き出しにより発生した CRVP であり、渦(B)は DFCD から発生した縦渦である。この渦(B)は渦(A)CRVP と逆回転の渦になっているために、CRVP を抑制するものと考えられ、実際にコンターからも DFCD を設けた形態では、DFCD 無しの場合と比べて、CRVP が弱まっている。このことから、DFCD を設置することで、DFCD から発生する縦渦が CRVP を抑制し、フィルム効率改善に寄与していると考えられる。

図 3.3.33 に $BR=1.0$ の渦度コンターを示す。吹き出し比が増加したことにより、 $BR=0.5$ に比べ、冷却孔から発生する CRVP が強まっていることがわかり、この傾向は特に RH において顕著に表れ、SH における CRVP は RH と比較すると小規模であることがわかる。また、DFCD を適用した場合において、縦渦間に存在する CRVP は DFCD 無しの場合と比較すると、小さくなっており、CRVP 抑制効果を発揮されている。また、 $BR=0.5, 1.0$ で縦渦の大きさはほとんど変わっておらず、この縦渦の生成は吹き出しの大きさによらないものと考えられる。

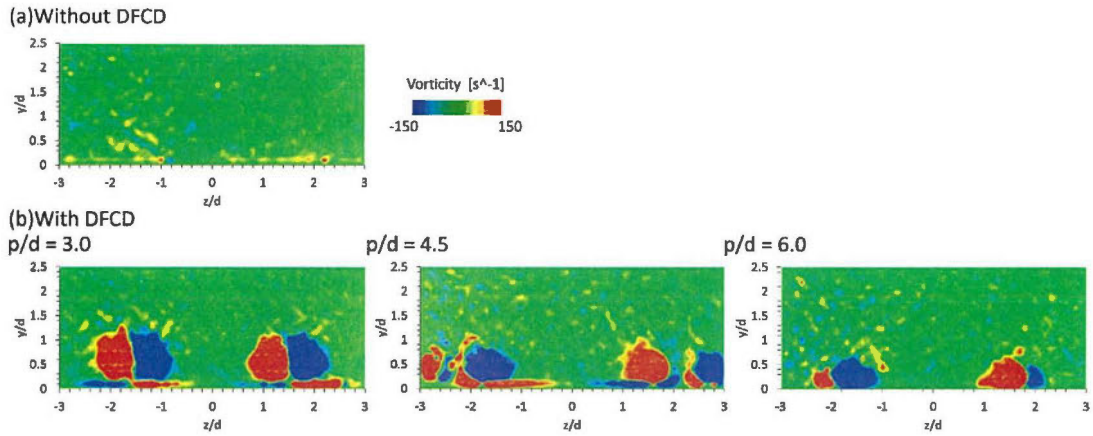


図 3.3.31 渦度分布 ($x/d=3.0, BR=0.0$)

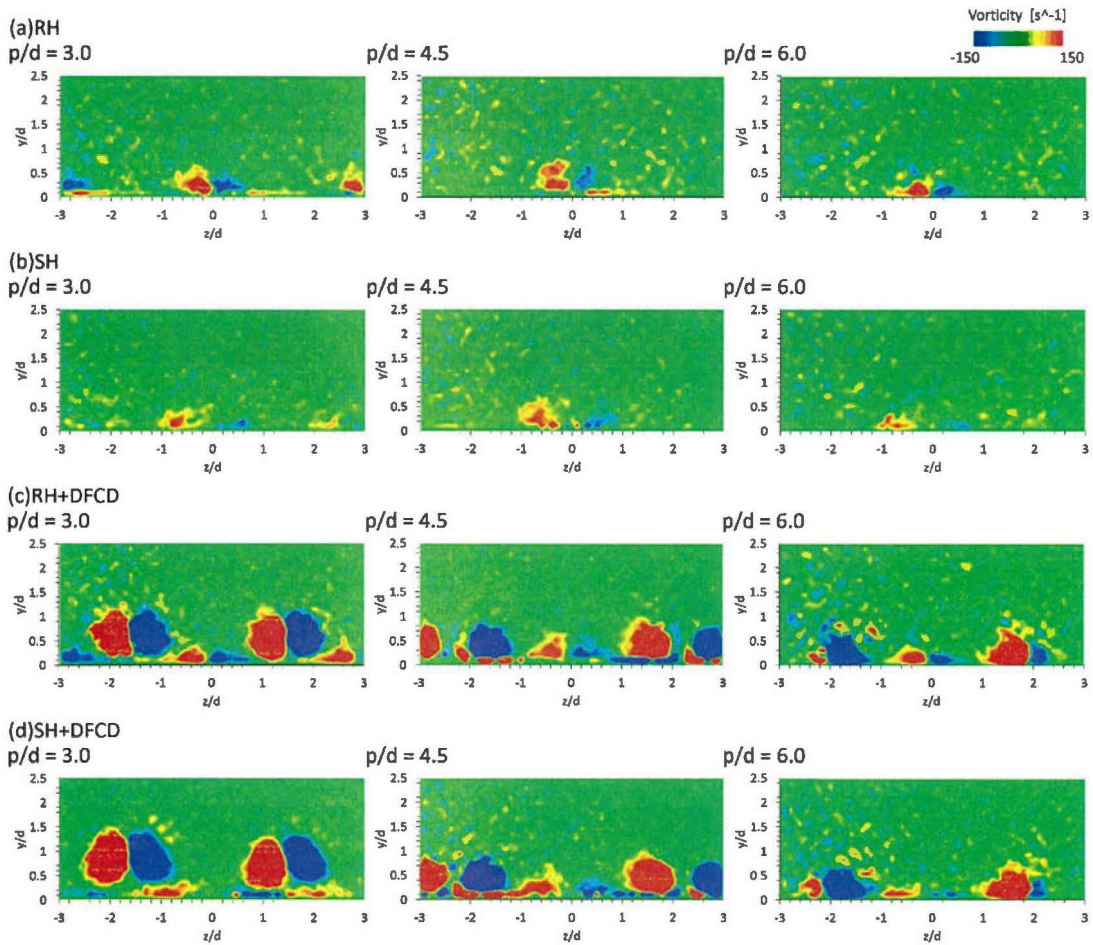


図 3.3.32 渦度分布 ($x/d=3.0, BR=0.5$)

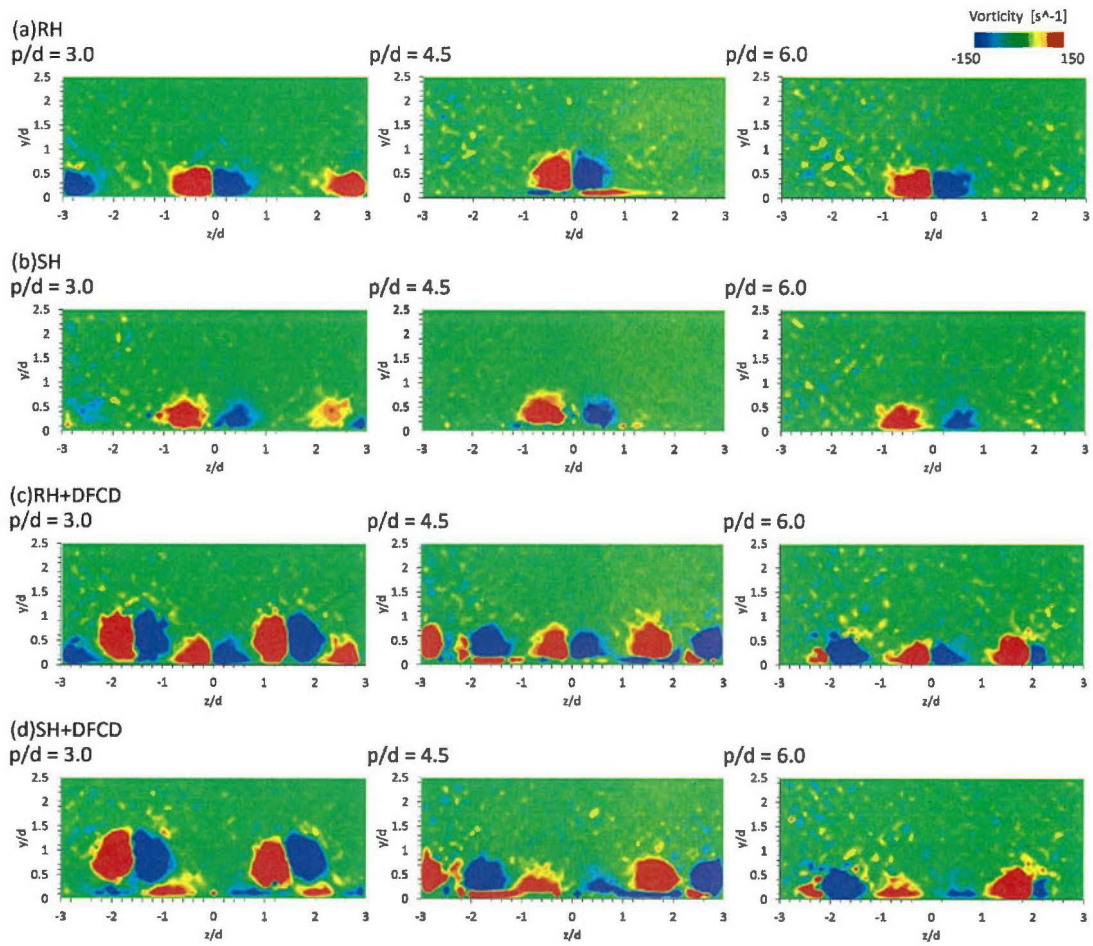


図 3.3.33 渦度分布 ($x/d=3.0, BR=1.0$)

(2) 速度変動 RMS

図 3.3. 34 には、実験で得られた $BR=0.0$ における無次元流れ方向速度 U/U_∞ の速度変動 RMS を示す。 $p/d=3.0$ で DFCD を設置した条件では、冷却孔と冷却孔の間の領域に、高い速度変動領域が観察される。これは、デバイスから発生した渦が存在しているよう域であり、先の渦度分布で示したように、デバイスから発生した渦同士が干渉している領域である。ピッチ $3.0d$ よりも広げた場合には、RMS のピーク値が全体的に低下しており、流れ方向の速度変動は低減していることが分かる。

図 3.3. 35 には、実験で得られた $BR=0.5$ における無次元流れ方向速度 U/U_∞ の速度変動 RMS を示す。DFCD を設置していない条件では、冷却孔のセンターライン状に速度変動の大きい領域が存在する。これは、二次空気の吹き出しに伴う速度変動を示している。RH と SH を比較すると、SH の結果ではいずれのピッチでも、速度変動が小さくなっており、熱伝達率が RH よりも低い原因のひとつになっていると考えられる。DFCD を設置した条件では、特に $p/d=3.0$ の条件において、デバイスから発生する渦同士が干渉する領域で速度変動分布に違いが見られる。SH では、冷却孔の間の領域における速度変動が大きくなっており、高さ方向にも広い領域で大きい速度変動領域が形成されていた。

図 3.3. 36 には、実験で得られた $BR=1.0$ における無次元流れ方向速度 U/U_∞ の速度変動 RMS を示す。吹き出しの量が多くなると、今回のレンジでは速度変動には全体的に変化が見られなかったが、SH+DFCD では、冷却孔の間の高 RMS 領域の分布形状が変化している。

図 3.3. 37 には、実験で得られた $BR=0.0$ における無次元壁面法線方向速度 V/U_∞ の速度変動 RMS を示す。DFCD を設置した条件を見ると、速度変動の大きさは流れ方向流速よりも大きくなっていることが分かる。また、ピッチの変化に応じて、高速度変動領域の形状が変化しており、渦度のコンターで示した、デバイスから発生した渦が存在する領域で速度変動が大きくなっていることがわかる。図 3.3. 38, 図 3.3. 39 には吹き出しを伴う条件に関して同様のコンターを示しているが、吹き出しに伴う速度変動領域よりも渦による速度変動領域の方が支配的になっている。RH 系, SH 系のコンターを比較すると、この成分の流速に関しても、SH の方が速度変動が小さくなっていることが分かる。

図 3.3. 40 には、実験で得られた $BR=0.0$ における無次元壁面法線方向速度 W/U_∞ の速度変動 RMS を示す。W 方向の速度変動に関しても、デバイスから発生する渦の領域で高くなっている。ピッチの効果に関しては、ピッチが狭くなるにしたがって、壁面法線方向に高 RMS 領域が広がる様子が見られた。図 3.3. 41, 図 3.3. 42 には、吹き出しを伴う場合のコンターを示しているが、W 方向の速度変動に関しては、冷却孔センターラインの位置でも小さい値となっており、他の速度成分とは異なって、変動が小さい。

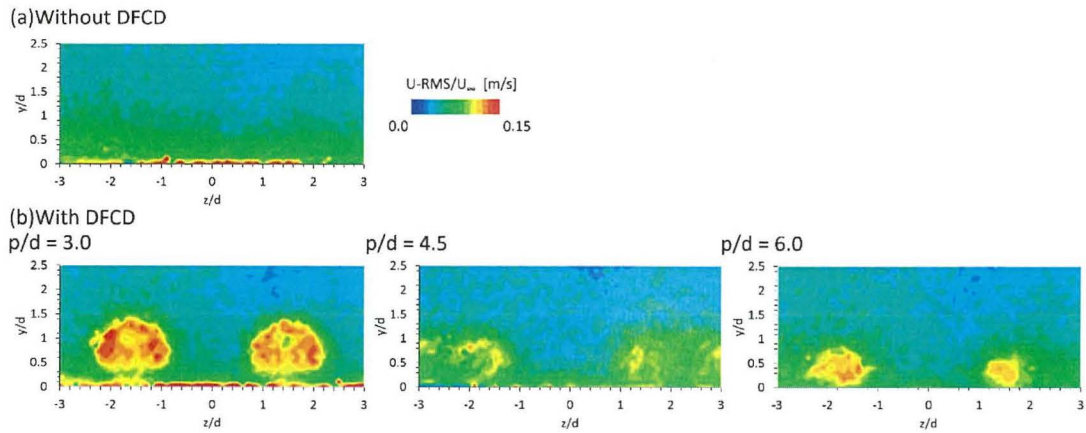


図 3.3.34 速度変動 $U\text{-RMS}$ 分布 ($x/d=3.0, BR=0.0$)

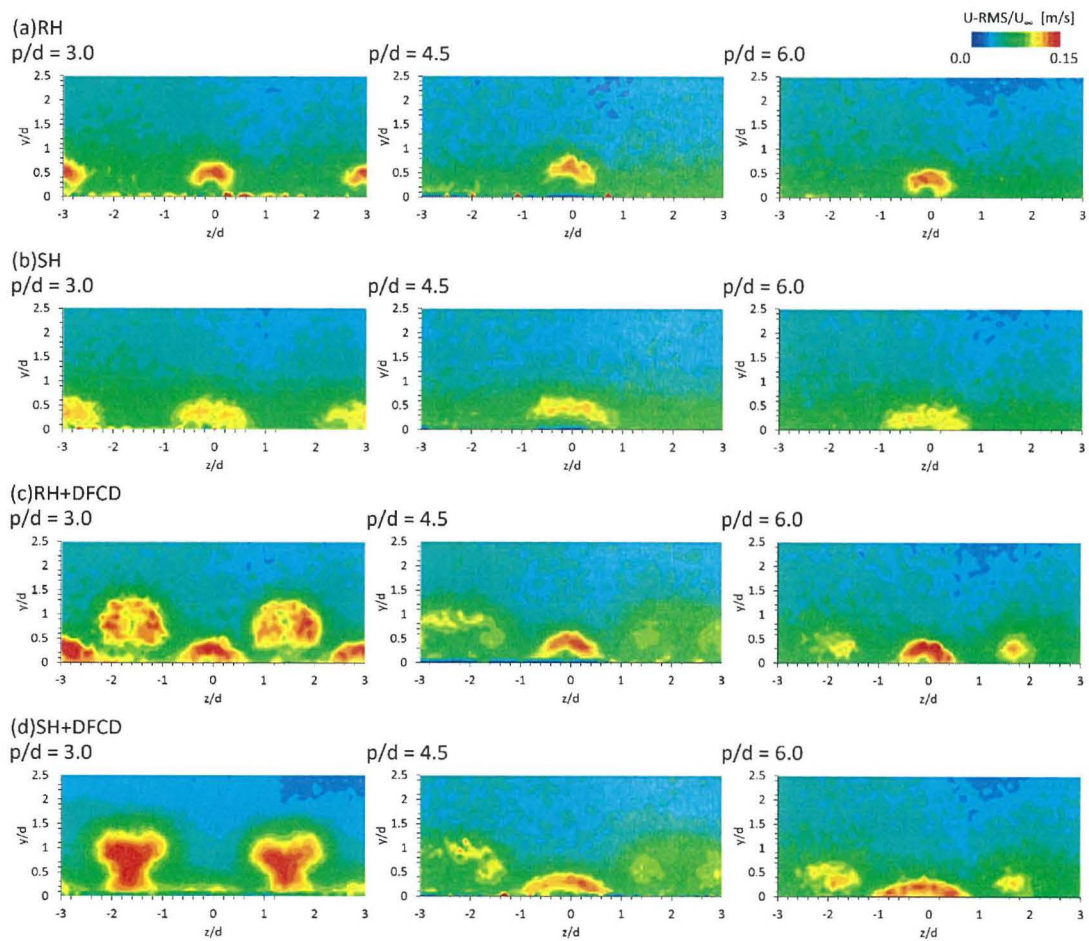


図 3.3.35 速度変動 $U\text{-RMS}$ 分布 ($x/d=3.0, BR=0.5$)

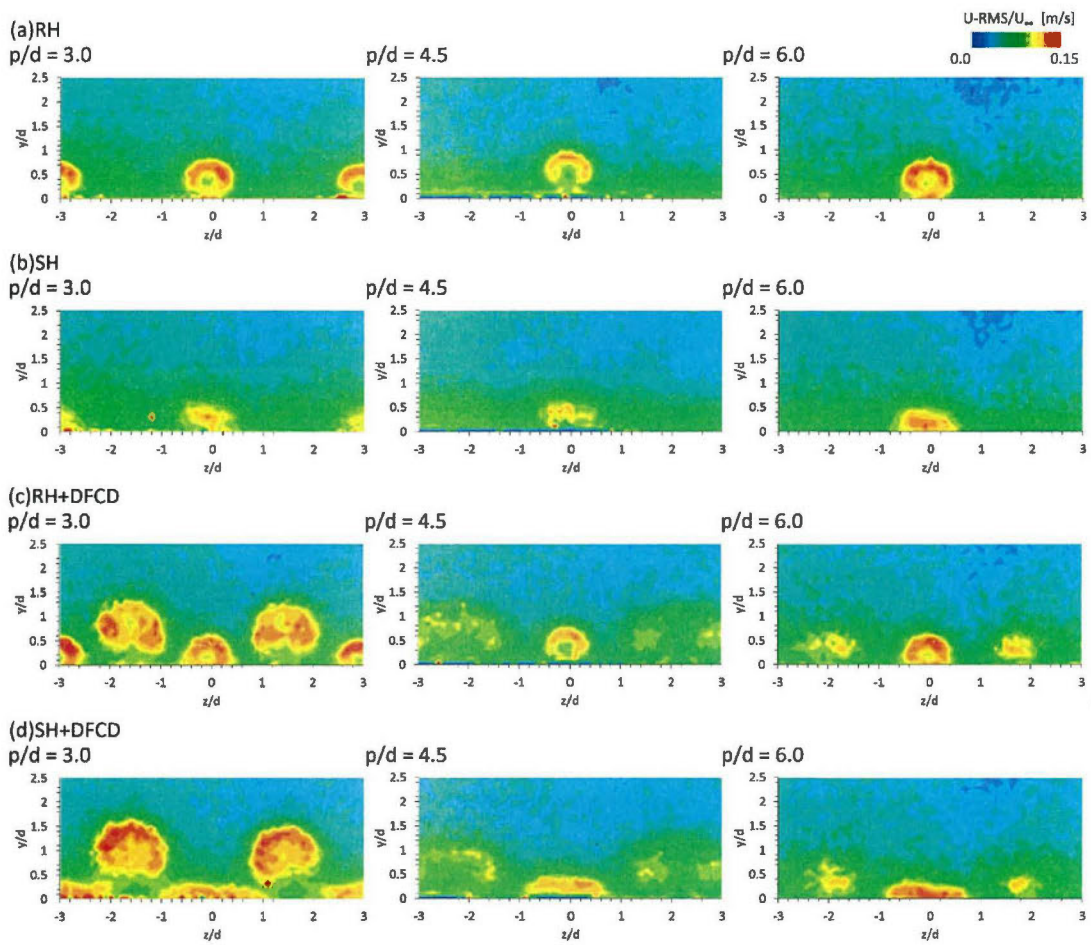


図 3.3.36 速度変動 $U\text{-RMS}$ 分布 ($x/d=3.0, BR=1.0$)

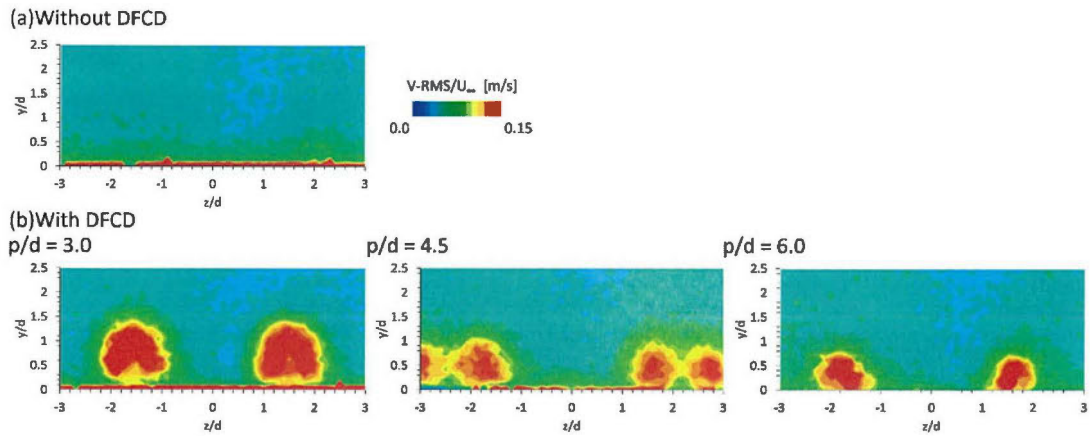


図 3.3.37 速度変動 V -RMS 分布 ($x/d=3.0, BR=0.0$)

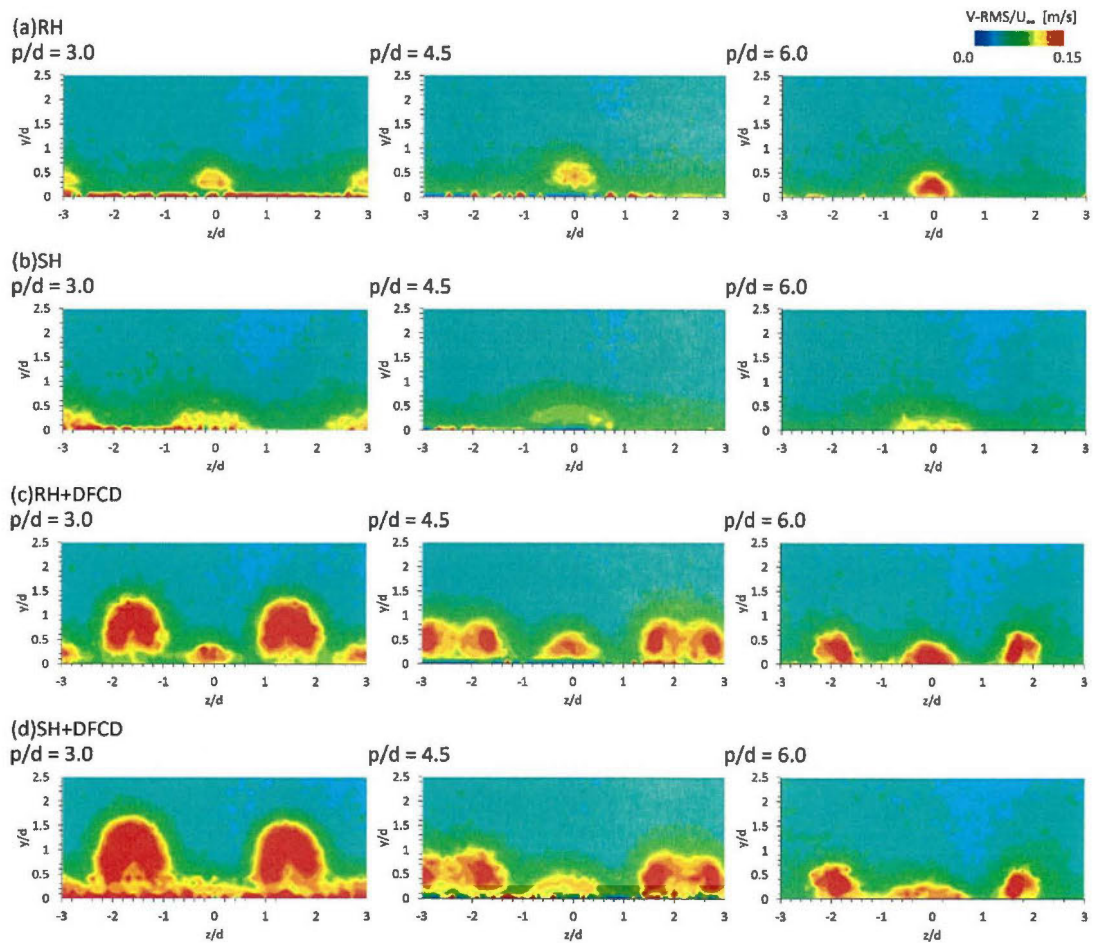


図 3.3.38 速度変動 V -RMS 分布 ($x/d=3.0, BR=0.5$)

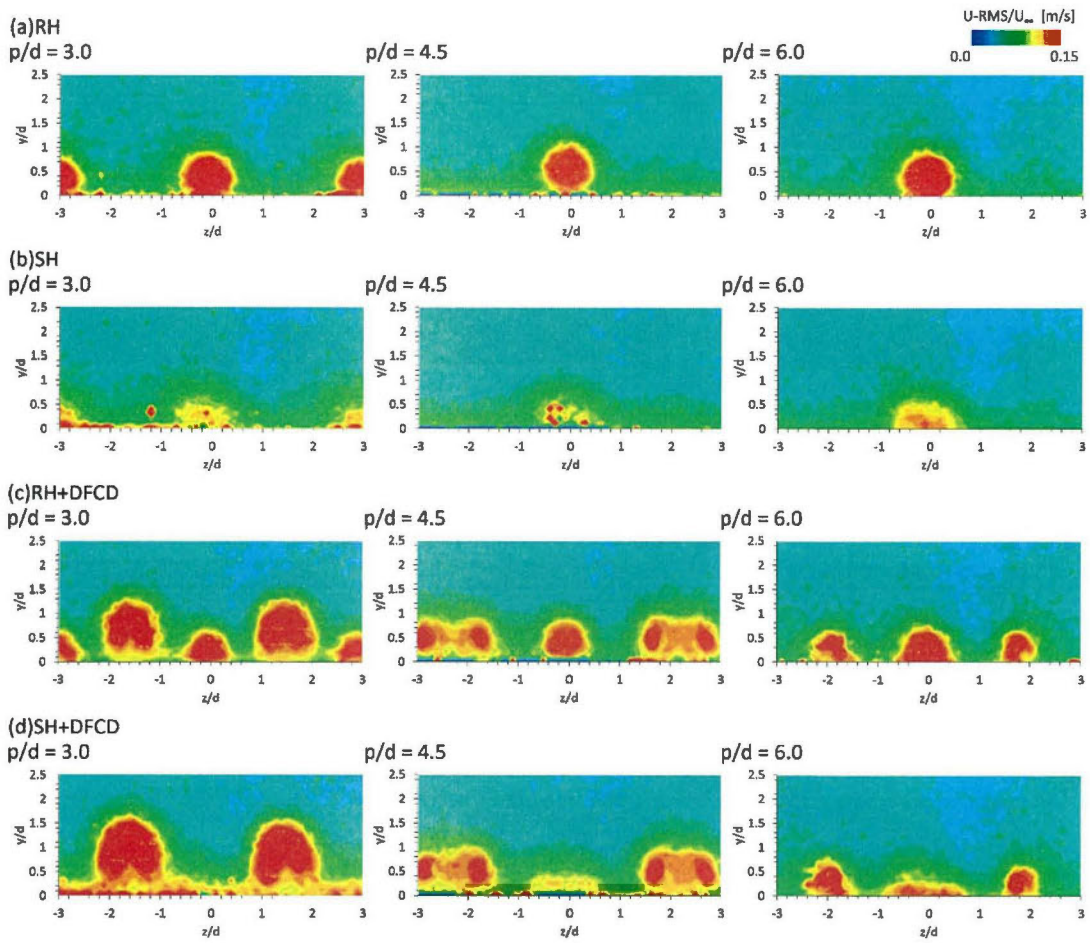


図 3.3.39 速度変動 V -RMS 分布 ($x/d=3.0$, $BR=1.0$)

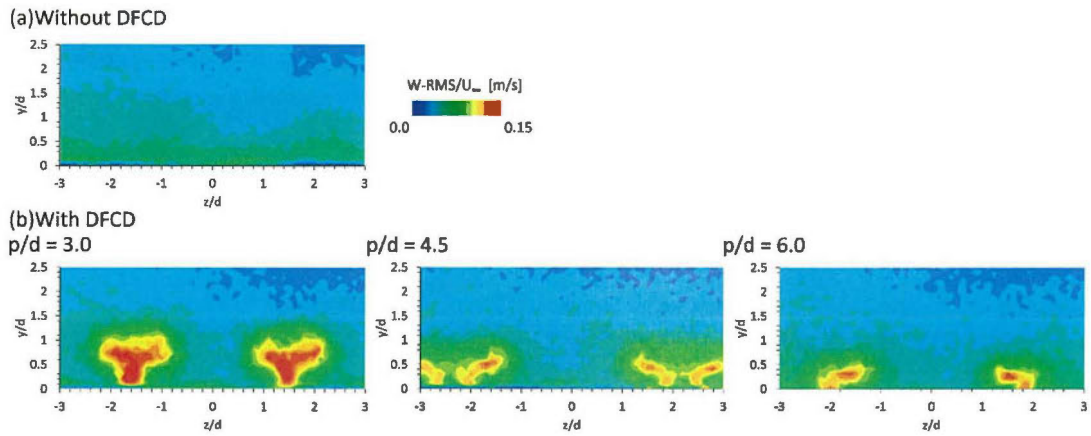


図 3.3.40 速度変動 W -RMS 分布 ($x/d=3.0, BR=0.0$)

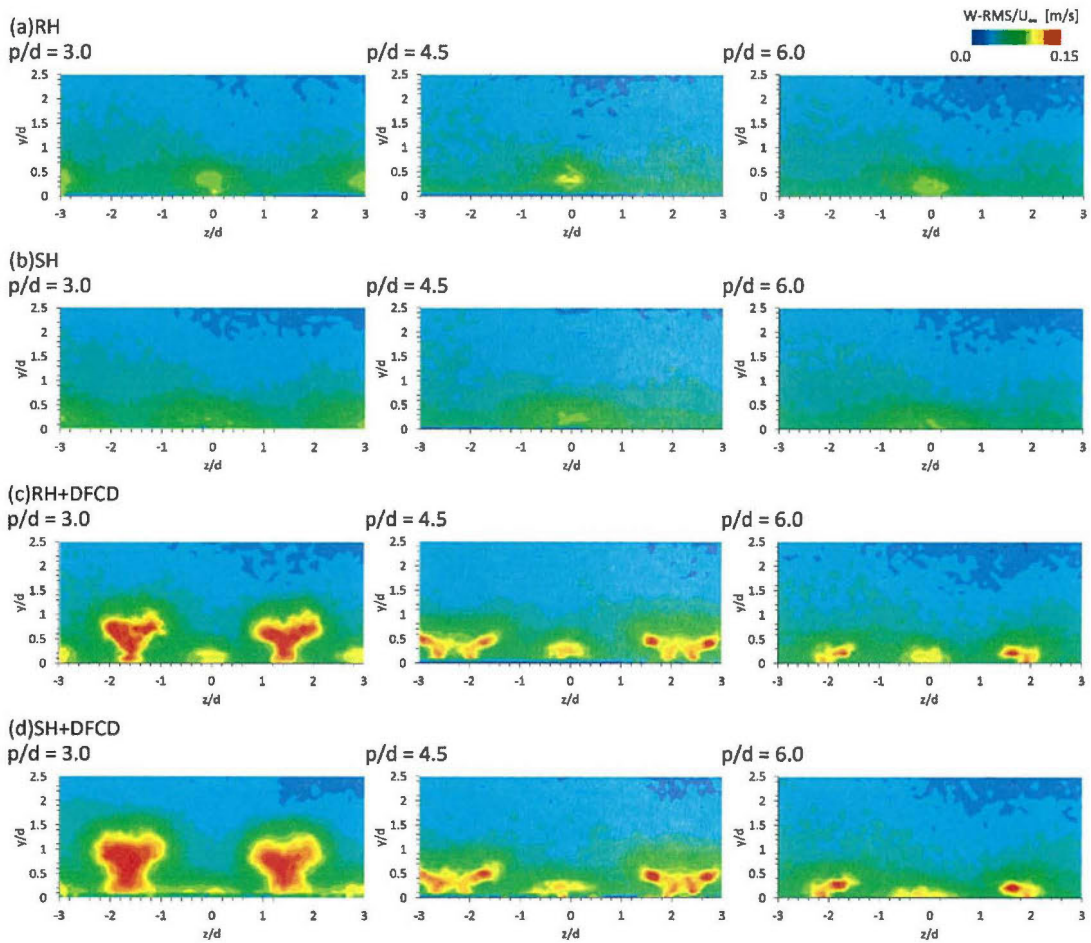


図 3.3.41 速度変動 W -RMS 分布 ($x/d=3.0, BR=0.5$)

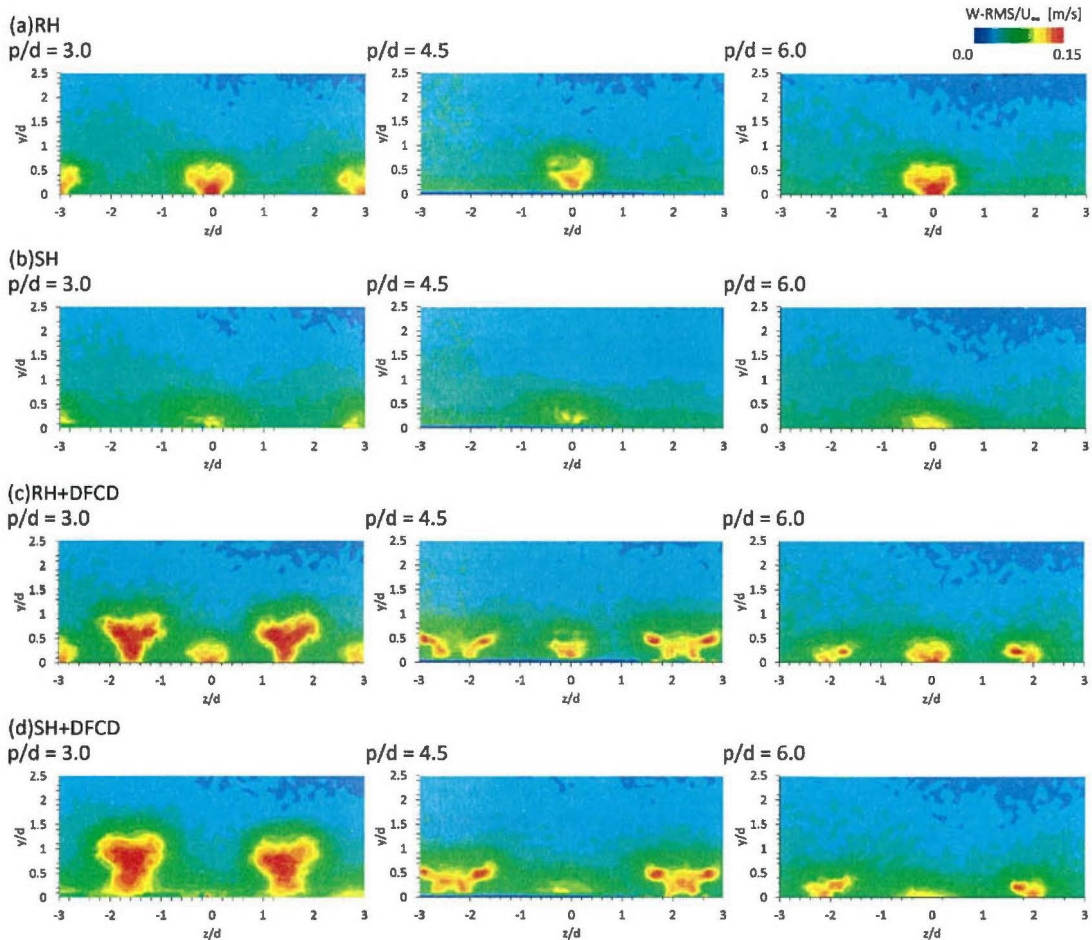


図 3.3.42 速度変動 W -RMS 分布 ($x/d=3.0, BR=1.0$)

3.3.5 数値解析（吹き出しを伴わない場合）

本研究では、DFCD 周りの流れ場を数値解析を用いることで分析しているが、本節では吹き出しを伴わない流れ場に関する考察を行う。これは、以下の目的によるものである。

1. 二次空気の吹き出しを伴う流れ場は、吹き出しによって複雑な渦構造が生じてしまう、そこで、流れ場の考察を行いやすくするために、吹き出しを伴わない流れ場の数値解析を実施する
2. 吹き出しを行わない場合、数値解析に用いる計算格子は構造格子で作成することができ、より高精度な計算を実施することが可能であるため、吹き出しを伴う計算とは異なる計算格子を用いるため

3.3.5.1 解析要領

(1) 解析領域

図 3.3.43 には、本研究でも用いた解析領域を示す。吹き出しを伴わない解析の場合、ス

パン方向の長さは実験を模擬して $3d$ の幅を設定した。その他の領域の大きさに関しては、図に示すとおりであるが、吹き出しを伴わない計算を行う場合は、後述する吹き出しを伴う計算の計算領域よりもドメインの大きさが小さい。これは、DFCD 周辺の流れをできる限り高解像度で捉えることを目的としているためである。

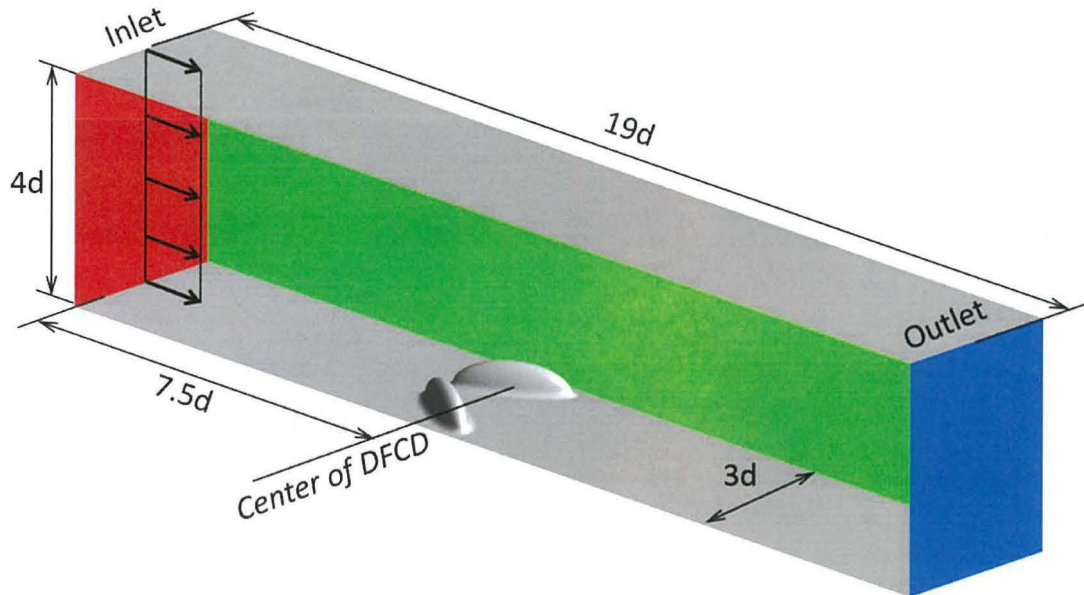


図 3.3.43 解析領域

(2) 計算格子

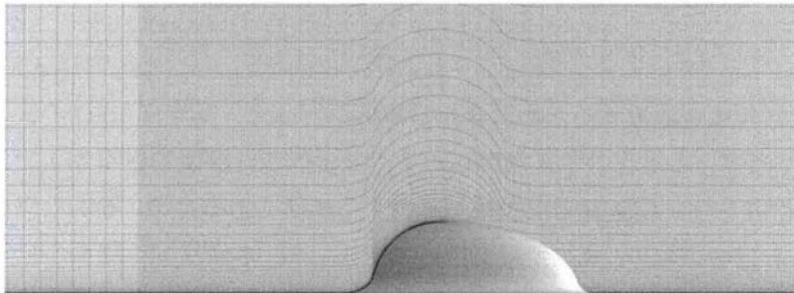
図 3.3.44 には計算格子のスナップショットを示す。(a)の全体図に示したように、計算格子全体は構造格子で作成しており、DFCD の形状を精度良く再現するために、DFCD 周辺の計算格子は密に配置している。また、DFCD より下流の領域に関しても、上流側と比較すると高い解像度になっている。これは、DFCD から発生する、非定常な渦構造を捉えることを意図したものである。(b)には、DFCD センター面での計算格子の様子を示している。構造格子を DFCD 上に配置するために、今回は DFCD 上の計算格子には全体的にひずみが生じる形となった。(c)には DFCD 自体の壁面における計算格子を示している。今回は、DFCD の形状を再現するために、スパン方向、流れ方向ともに密に計算領域を配置しているため、DFCD の形状は十分に捉えられている。

計算格子の依存性については、比較用の実験データが存在しないため、できる限り解像度が高くなる計算格子を選択する形で調査を行った。今回は、流れ方向、スパン方向の計算格子数を調整した結果、総要素数は 1500 万セル程度で、デバイスから発生する渦構造が十分に捉えられていると判断し、上記の格子を採用して計算を行うこととした。

(a) 全体図



(b) デバイス上の面内



(c) デバイス自体

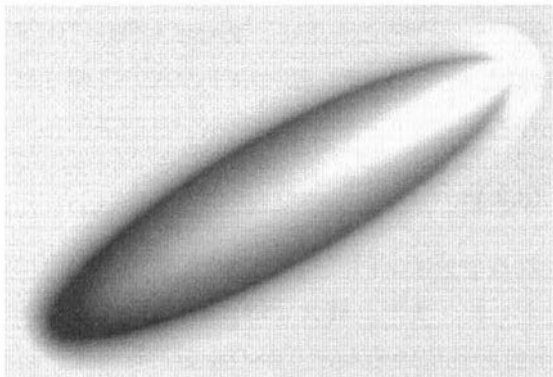


図 3.3.44 計算格子

(3) 解析手法・境界条件

表 3.3.3 には解析に用いた境界条件一覧を示す。本解析における解析条件は定常，非定常計算共通の境界条件を用いている。後述する吹き出しを伴う解析と異なる点は，壁面を等温壁としていることである。これは，壁面を等温壁にすることで，DFCD 周辺の流れ場解析をするだけでなく，壁面における熱伝達率の観察も同時に行うことを意図したものである。

表 3.3.3 境界条件一覧

領域	境界条件
主流入口	一様流速，温度
ダクト出口	静圧 0[Pa]

ダクト上面	対称境界
壁面	等温壁
ダクト側面	周期境界

(4) RANS 解析

本節では RANS と非定常計算の両方の解析を行っている。RANS の解析の際には乱流モデルに SST モデルを使用した計算を実施した。RANS の解析は、LES 解析を実施するための初期解を取得する役割で計算した側面もある。

(5) LES 解析

本研究では流れの非定常現象を観察するために非定常解析を行った。非定常 CFD の最大の特徴は、RANS CFD では捉えることのできなかつた小さな渦構造を解像できることである。しかし、計算格子の作成方法には経験的な知見が影響する側面もあるため、適切な決め方が明確に決まっているわけではない。そこで最低限の措置として、本研究では壁面の格子が $y^+ < 1$ を満たすようにすることと、非定常 CFD を行う際には最も要素数の多い計算格子を用いることとした。計算が妥当に行われているかどうかは実際に計算を行った際にモニタリングすることの可能な最大クーラン数を見て判断することとし、RANS CFD に比べて最大クーラン数が 1 に近い値を取るよう留意した。クーラン数は以下の式で定義される指標であり、計算の妥当性を評価する指標となる。

$$CFL = \frac{\lambda \Delta t}{\Delta} \quad (3.3.1)$$

今回は本研究では計算を行った際に算出されるドメイン内での最大 CFL 数が 1 以下になるように計算格子・時間刻みを設定することとした。また、最大 CFL 数のほか、計算領域内での CFL 数コンターを描き、妥当な計算が行われているかどうかの確認を行った。以上より、本解析における無次元時間刻みは以下のように設定した。

$$t_{LE,LES}^* = 2.025 \times 10^{-3} d_{LE} / U_{\infty} \quad (3.3.2)$$

また、LES 解析を行う際の SGS モデルはダイナミックモデルを用いており、移流項には中心差分、時間進行法には二次精度後退差分法を用いた。

3.3.5.2 解析結果

図 3.3.45 には、RANS 解析によって得られた Q 値の等値面（オレンジ色の等値面）と、ドメインの壁面から描かせた流線を示している。 Q 値の等値面を観察すると、デバイスの上流領域では、境界層が巻き上がることで馬蹄形渦が発生していることがわかる。デバイスの外側を通過した馬蹄形渦は、図中の A の領域で巻き上がり、最終的には CRVP を制御する渦構造になっている。また、デバイスの上流で剥離する流線も B で観察できる。デバイス上部で剥離した箇所からは剥離渦が生じており、これも CRVP を制御する渦の起源となっていることが分かる。A, B での流線は、最終的に下流側で絡めあうように流れており、2 つの渦構造が合流することで、より強い渦構造が形成されていると考えられる。

図 3.3.46 には、LES 解析によって得られた Q 値の等値面による渦コアの可視化結果を示す。渦コアはヘリシティーで色付けした。非定常計算では、より細かい渦構造が改造されているが、RANS の計算でも見られたような主要な渦構造を観察することができる。非定常な流れ場では、馬蹄形渦、デバイス上流での剥離渦は、細かなヘアピン渦の構造をしており、下流に放出されている。ヘリシティーによって、渦の回転方向を見ると、各デバイスで発生した渦構造は、CRVP とは逆回転渦構造となっており、時間平均的に CRVP を制御できることが示唆される流れ場となっている。

図 3.3.47 には、壁面における圧力変動の RMS 値と、時間平均の熱伝達率を示している。熱伝達率の高い値は、特にデバイスの上流領域となっている。デバイスの周辺では、比較的高い圧力変動が生じており、この箇所における熱伝達率も上昇していた。

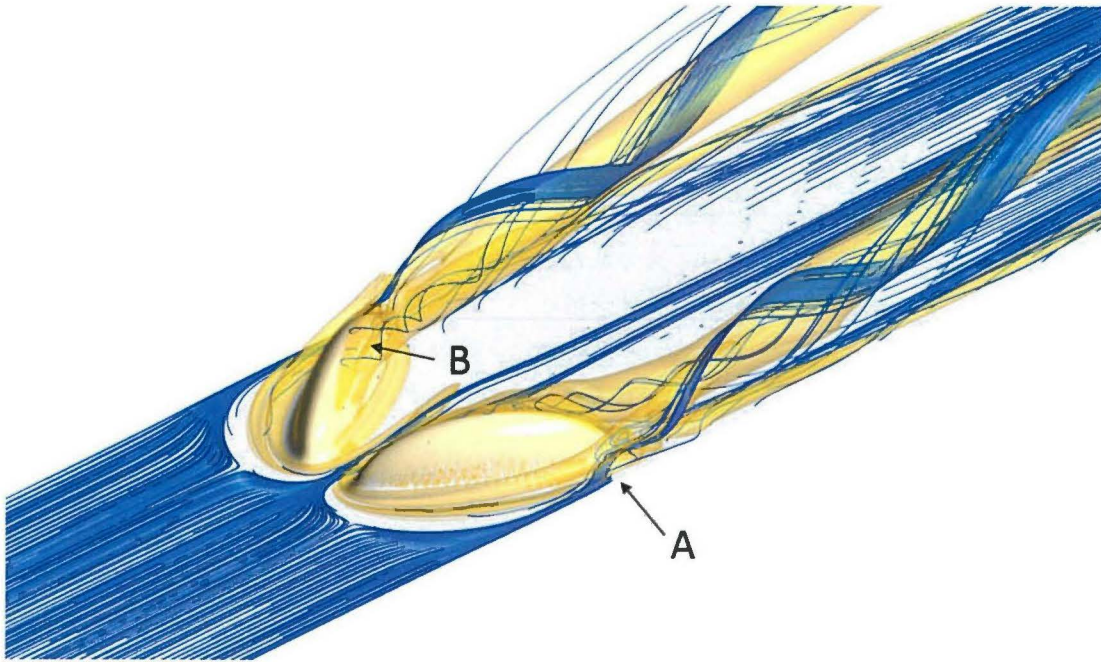


図 3.3.45 デバイス周りの渦コアと流線

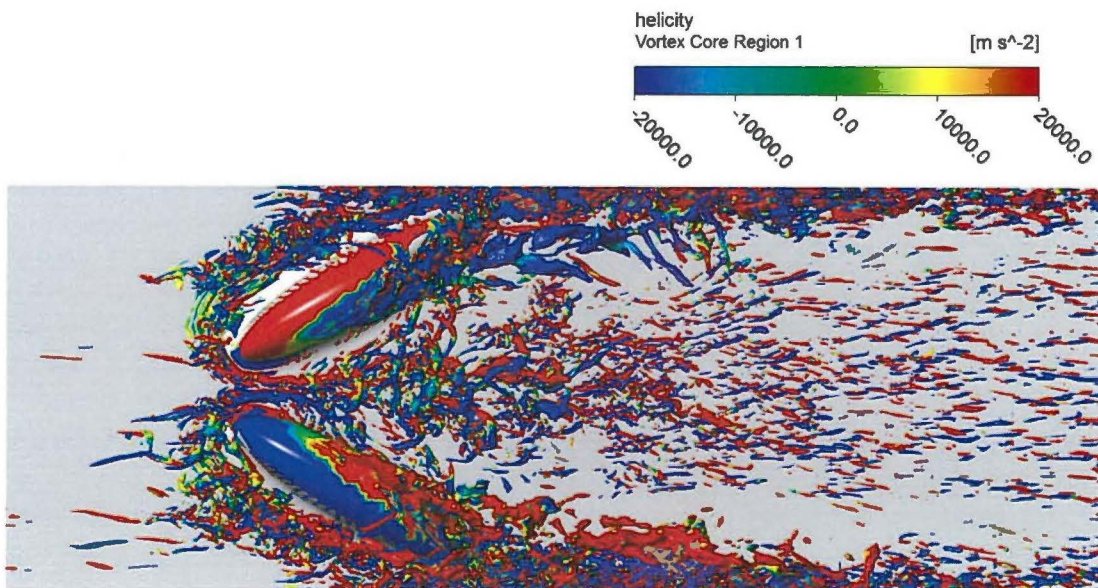


図 3.3.46 非定常流れ場での渦構造 (LES 解析結果より)

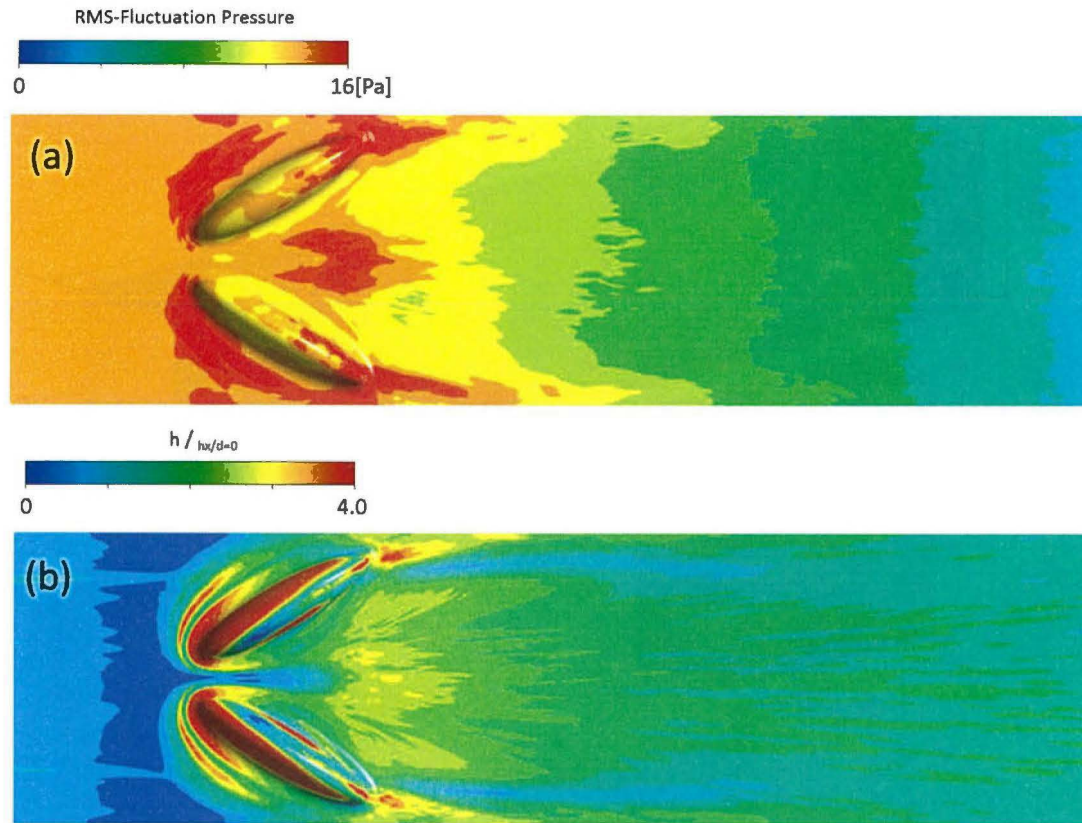


図 3.3.47 圧力変動と熱伝達率

3.3.6 数値解析（吹き出しを伴う場合）

本節では、冷却孔ピッチを変化させた時の流れ場に関して CFD 解析を行った結果を示す。DFCD 形状は実験と同じものを使用し、解析領域をピッチ方向に変化させ、その効果を観察することにした。

3.3.6.1 解析要領

(1)解析領域

図 3.3.48 には、今回の解析の解析領域を示す。解析領域は実験装置を模擬した計算領域となっており、入口境界の位置は実験で入口速度プロファイルを取得している位置である。計算領域の出口境界は冷却孔から十分に離れた位置である。解析領域はスパン方向に 1 ピッチであるが、冷却孔ピッチを変化させることができるように、図中の p の大きさを $3.0d$ 、 $4.5d$ 、 $6.0d$ の 3 条件に変化させる。ピッチ方向の解析領域の大きさは、主流ダクトのみ変化させており、プレナムのスパン方向の長さは $3d$ としている。これは、プレナムの大きさを各解析で統一し、条件を揃えることで、冷却孔から吹き出した後の流れの違いのみを観察するためである。境界条件の説明で後述するが、ダクトの上面は対称境界を用いるため、ダクトの高さは $6d$ としている。

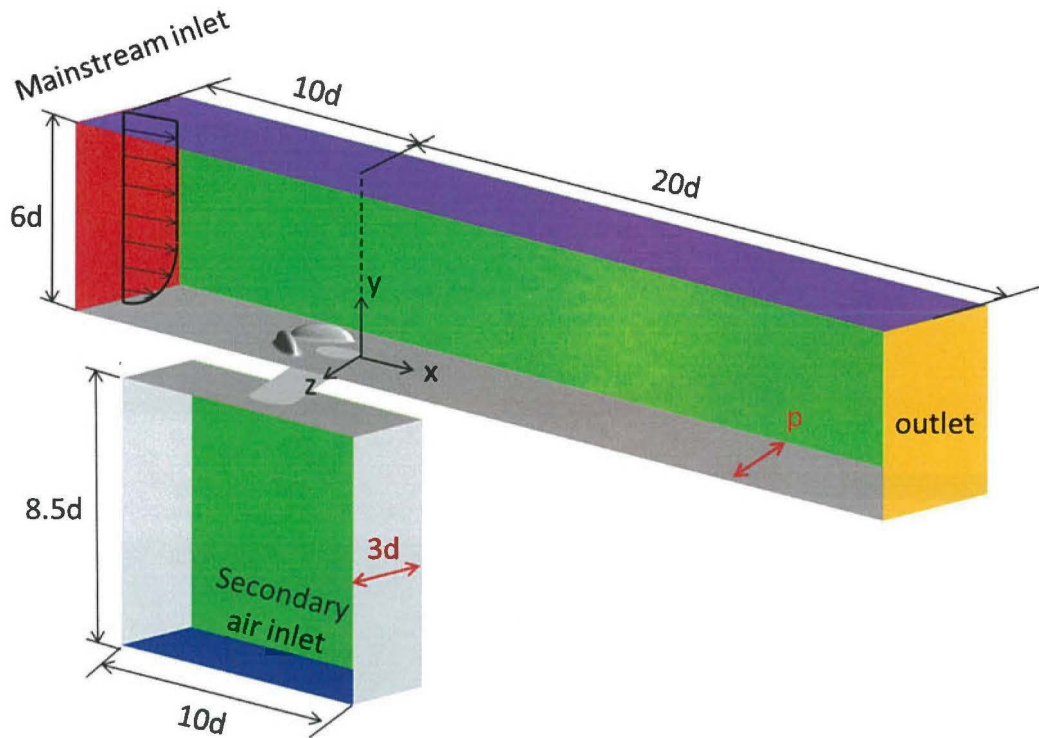


図 3.3.48 解析領域

(2)計算格子

図 3.3.49 には、計算に用いた計算格子を示す。計算格子は ANSYS ICEM CFD ver13 で作成しており、非構造格子で作成している。計算領域の空間部分は Tetra mesh を用いて作成を行っているが、壁面付近は Prims mesh を用いて作成している。主流ダクトは、計算領域全体の Tetra mesh 全てを密に配置することができなかつたため、二次空気のジェットが存在すると考えられる領域(壁面から $2.5d$ 離れた位置まで)の、格子を密に配置することにした。Prism mesh の厚さは、主流ダクト内で約 $0.125d$ 、冷却孔内で $0.05d$ とした。冷却孔内で、Prism mesh のサイズが小さいのは、Prism mesh の厚さが大きいと、計算格子に歪みが生じてしまうためである。

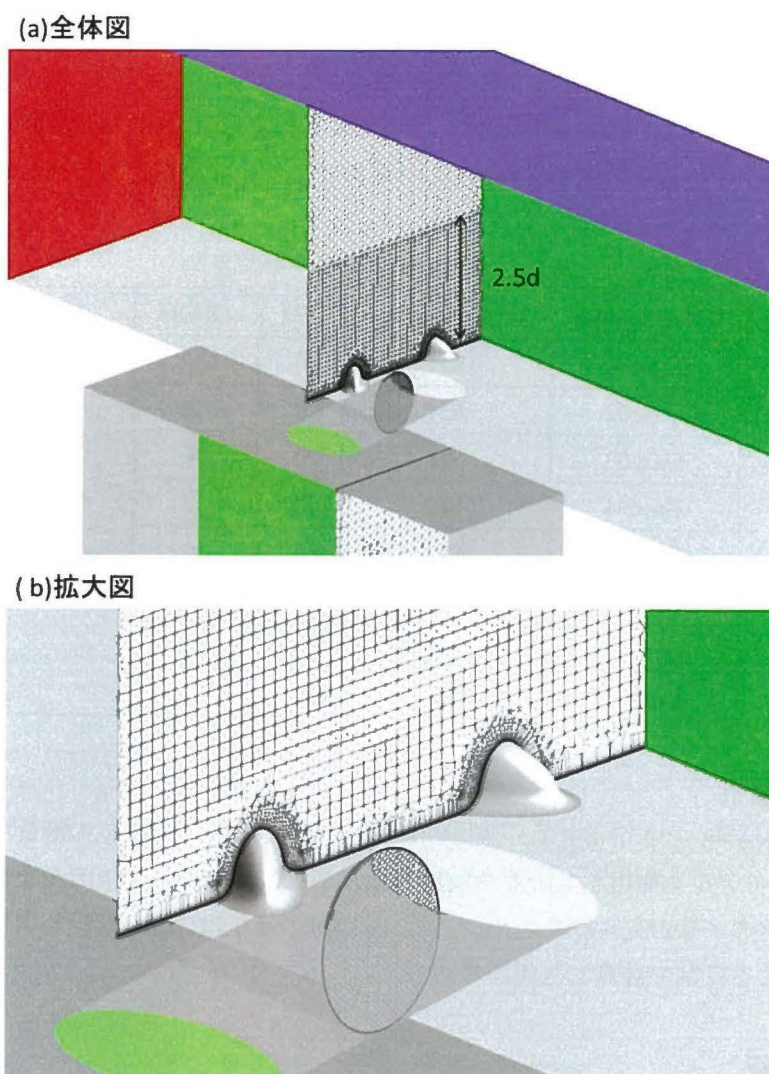


図 3.3.49 計算格子

(3)解析手法・境界条件

表 3.3.4 には解析に用いた境界条件一覧を示す。本解析における解析条件は定常，非定常計算共通の境界条件を用いており，基本的に実験値を用いて境界条件を定めている。

表 3.3.4 境界条件一覧

領域	境界条件
主流入口	一様流速，温度
二次空気入口	質量流量，温度
ダクト出口	静圧 0[Pa]
ダクト上面	対称境界

壁面	断熱壁面/等温壁面
ダクト側面	周期境界

数値解析は主要な条件のみで行った。今回は以下の表で示す 8 つの形態に関して計算を実施した。各ケースはそれぞれ、 $BR=0.5, 1.0$ の 2 条件の計算を行っている。

表 3.3.5 数値解析条件のまとめ

Case number	Hole geometry	p/d	DFCD	BR
Case01	RH	3.0	×	0.5 1.0
Case02	RH	3.0	○	
Case03	SH	3.0	×	
Case04	SH	3.0	○	
Case05	RH	6.0	×	
Case06	RH	6.0	○	
Case07	SH	6.0	×	
Case08	SG	6.0	○	

(4) RANS 解析

本節では RANS と非定常計算の両方の解析を行っている。RANS の解析の際には乱流モデルに SST モデルを使用した計算を実施した。これは、他の乱流モデルを使用した時よりも実験結果との一致が見られたためである。RANS の解析は、LES 解析を実施するための初期解を取得する役割で計算した側面もある。

(5) LES 解析

今回は本研究では計算を行った際に算出されるドメイン内での最大 CFL 数が 10 程度になるように計算格子・時間刻みを設定することとした。また、最大 CFL 数のほか、計算領域内での CFL 数コンターを描き、妥当な計算が行われているかどうかの確認を行っている (LES では計算領域内で二次空気の存在する領域で CFL 数が 1 以下になるようにしている)。以上より、本解析における無次元時間刻みは以下のように設定した。

$$t_{LE,LES}^* = 2.025 \times 10^{-3} d_{LE} / U_{\infty} \quad (3.3.3)$$

また、LES 解析を行う際の SGS モデルはダイナミックモデルを用いており、移流項には中心差分、時間進行法には二次精度後退差分法を用いた。

3.3.6.2 RANS 解析結果

(1) 壁面フィルム効率

図 3.3. 50 には実験と CFD で得られた $p/d=3.0$, $BR=0.5$ でのフィルム効率分布を示す。実験と CFD を比較すると CFD のフィルム効率分布は局所的なフィルム効率の値が大きくなっている。Case01 ではそのような傾向が見られなかったが、Case02~Case04 までは特に局所的なフィルム効率が高い領域が実験結果と比べると広がっており、二次空気の付着性の高い流れ場では局所的なフィルム効率を過大評価していることが分かる。定性的な傾向を比較すると Case01~Case04 ではフィルム効率の定性定期的な傾向は十分予測できているように見えるが、Case04 では中心付近のフィルム効率が直線状に高くなっており定性的な傾向まで十分に捉えているとは言えない。

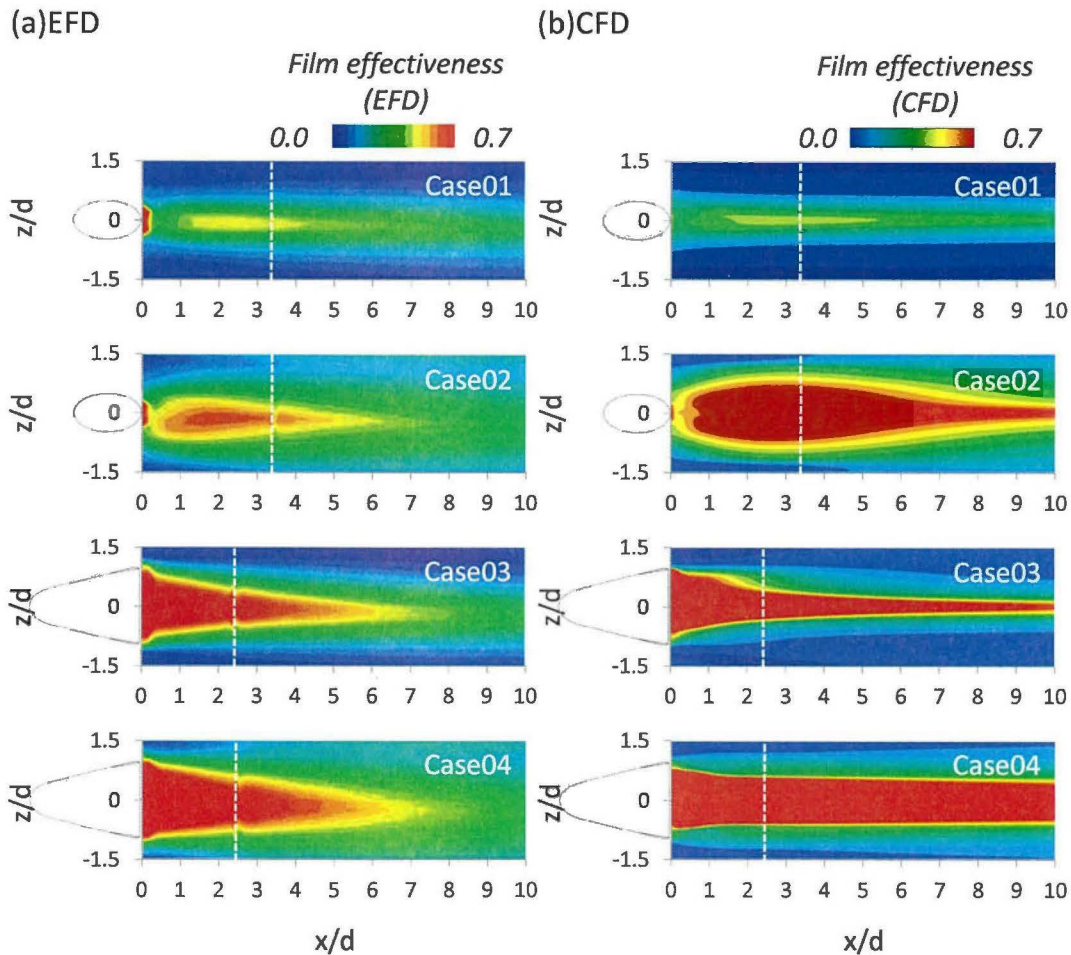


図 3.3.50 フィルム効率分布 ($BR=0.5$, $p/d=3.0$)

図 8.1 には実験と CFD で得られた $p/d=3.0$, $BR=1.0$ でのフィルム効率分布を示す。Case01 では $BR=0.5$ の場合と同様に局所的なフィルム効率の値は実験と CFD で同様の傾向を示していたが、定性定期的な傾向は一致しているとは言えず二次空気の lift-off を捉えきれていないと考えられる。Case02, Case03 では定性的な傾向は捉えており、局所的なフィルム効率は CFD で過大評価しているが、スパン方向のフィルム効率の広がりには捉えられている。Case04 ではデバイスを取り付けた結果であるが、二次空気の拡散が実験よりも過小に評価されており、定性的な傾向も捉えられていない。

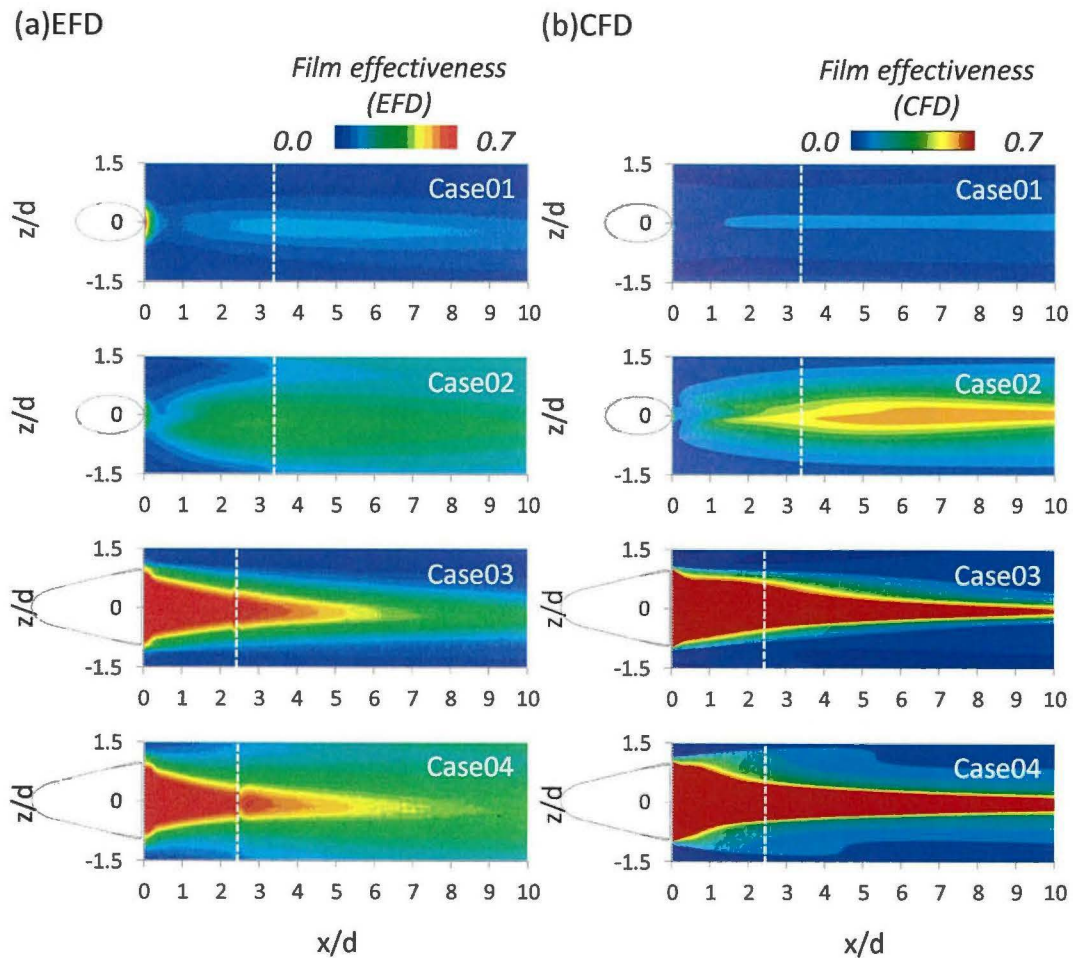


図 8.1 フィルム効率分布 ($BR=1.0$, $p/d=3.0$)

図 3.3. 51 には実験と CFD で得られた $p/d=6.0$, $BR=0.5$ でのフィルム効率分布を示す。ピッチを広げた場合、二次空気のスパン方向への広がりと比較してみるとデバイスを取り付けた Case06, Case08 では共に CFD の方が二次空気の拡散を過大に評価していることが分かる。ただし、Case08 では二次空気の拡散は過大に評価しているが、局所的なフィルム効率は実験値の方が高くなっている。デバイスを取り付けない形態に関しては CFD でも定性的な傾向は実験値と一致した。

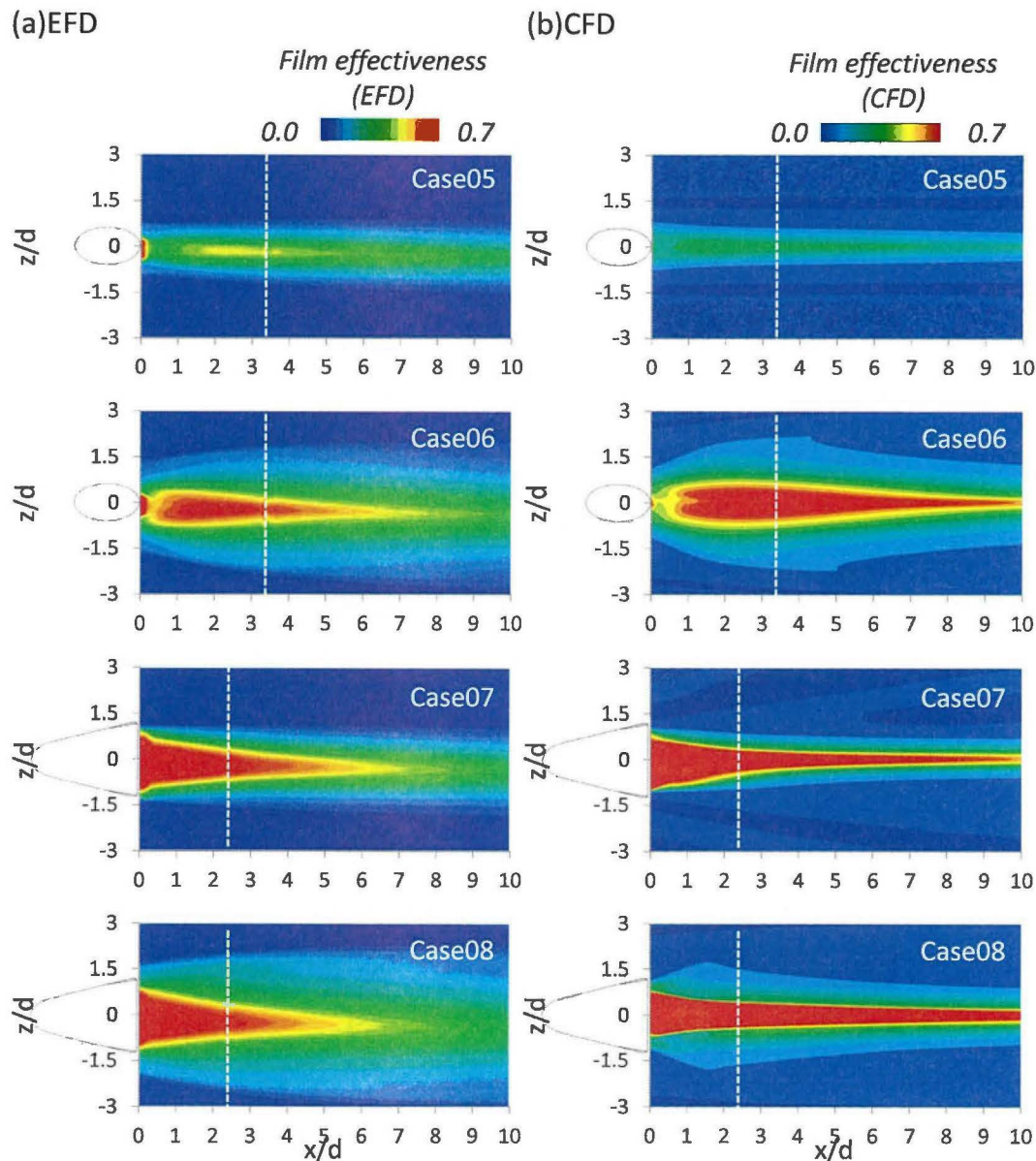


図 3.3. 51 フィルム効率分布 ($BR=0.5$, $p/d=6.0$)

図 3.3.52 には実験と CFD で得られた $p/d=6.0$, $BR=1.0$ でのフィルム効率分布を示す。吹き出し比が高くなった場合、定性的な傾向は Case07 では CFD でも予測できている様子が見て取れるが、その他の形態では二次空気の lift-off に伴い予測精度が低下していることが分かる。

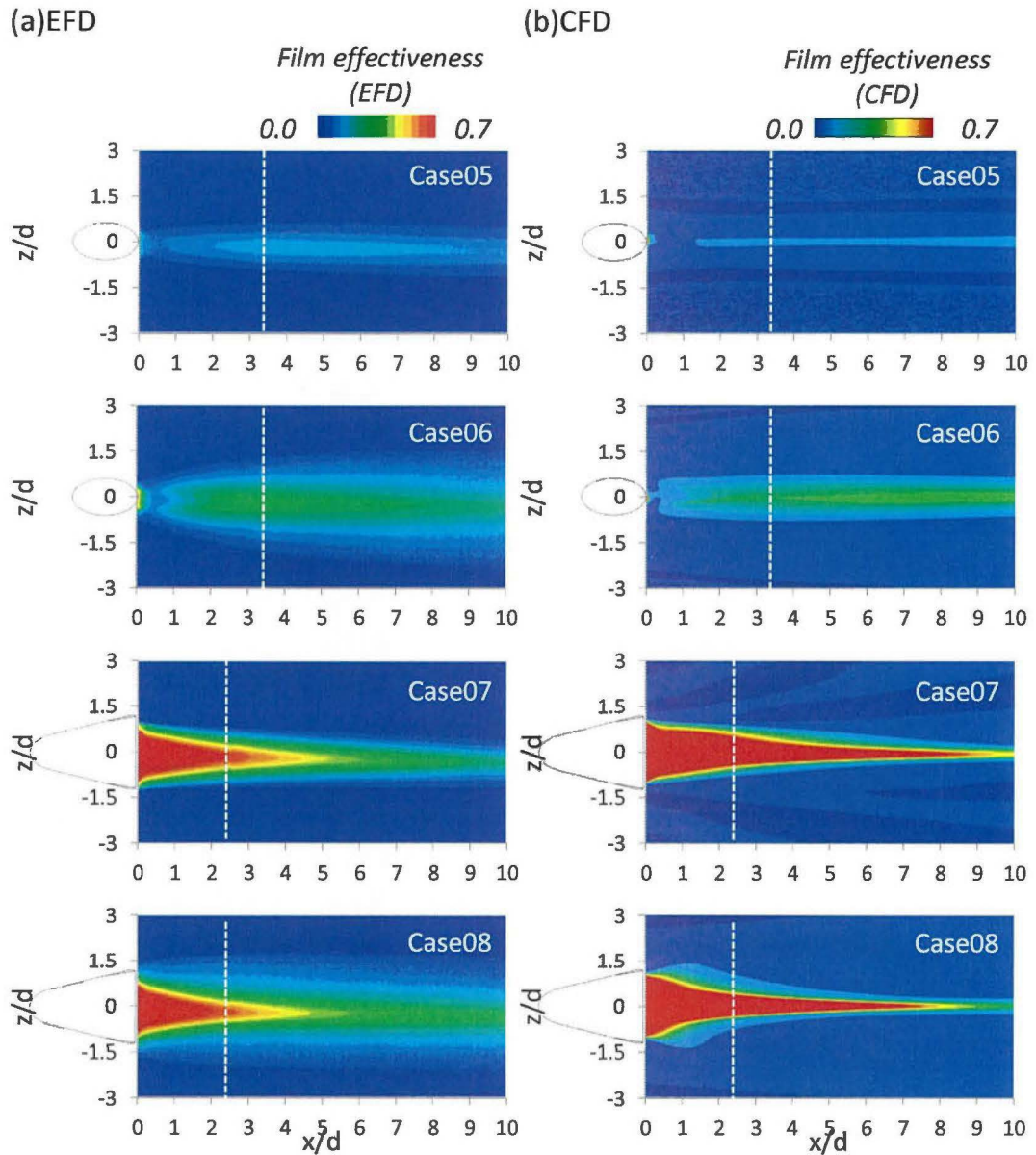
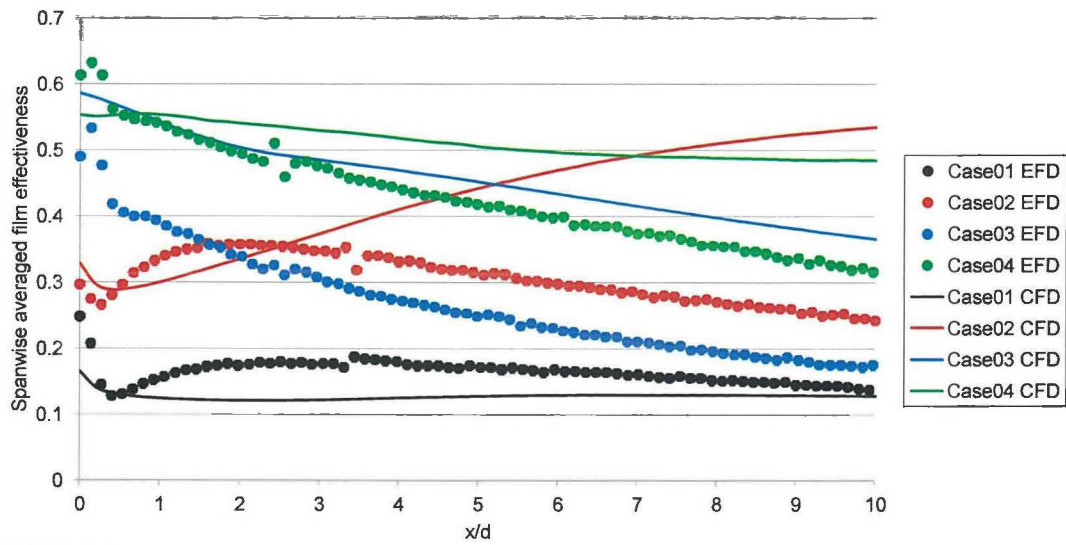


図 3.3.52 フィルム効率分布 ($BR=1.0$, $p/d=6.0$)

図 3.3. 53 (a)には実験と CFD で得られた $p/d=3.0$, $BR=0.5$ での 1 ピッチ分のスパン方向平均フィルム効率を示す。定量的にもフィルム効率の予測精度が比較的高かったのは Case01 のみであった。今回は Case01 での計算格子をベースに他の形態の計算格子を作成しているが、Case01 のような単純円筒型である程度フィルム効率の定量的な一致が見られても、他の形態では同じ計算格子作成のノウハウが通用しないことが分かる。Case02 の CFD 結果では下流側でフィルム効率が次第に上昇する結果となったが、実験ではそのような結果が得られておらず最も定量的にかけ離れた結果となった。Case02 の CFD 結果は定性的にはフィルム効率の傾向が捉えられていたため、下流側での温度の減衰が捉えられないためにフィルム効率の減衰が見られなかった。Case03 ではフィルム効率の局所的な値が高くなっているが、実験に比べると CFD の平均フィルム効率は平行移動した形となっており、比較的フィルム効率の傾向を捉えられていると言える。Case04 では冷却孔近傍のフィルム効率は実験と CFD で一致しているが、下流側でのフィルム効率の減衰が小さい。これは特にセンターライン付近でのフィルム効率の減衰が捉えられていないことに起因する。

図 3.3. 53(b) には実験と CFD で得られた $p/d=3.0$, $BR=1.0$ での 1 ピッチ分のスパン方向平均フィルム効率を示す。 $BR=0.5$ の結果と比較すると Case02 では $BR=0.5$ と同様に下流側でフィルム効率が上昇する傾向が見られている。 $BR=1.0$ でも Case02 は定性的にはフィルム効率分布が実験値と一致しているために、下流側でのフィルム効率の減衰が捉えられないことがスパン方向平均のフィルム効率の予測精度を著しく低下させていることが分かる。Case01 ではフィルム効率のスパン方向平均値は実験値よりも低くなっており、 $BR=1.0$ では Cylindrical hole においてはフィルム効率のスパン方向平均値を低く予測する傾向が見られた。これは Cylindrical hole においては二次空気の lift-off の傾向を捉えきれないためであると考えられる。Shaped hole での結果ではデバイスの有無にかかわらず、スパン方向平均のフィルム効率は CFD の方が 2 倍程度高い値を示した。Case04 よりも Case03 のフィルム効率が低い傾向は CFD でも予測できていたが、フィルム効率の減衰率は Case03 の方が捉えられていない。以上より、フィルム効率分布の定性的な傾向が実験結果と一致している様子が見られても、定量的には傾向が全く一致しない場合が存在する(特に Case02)ことが分かった。

(a)BR=0.5



(b)BR=1.0

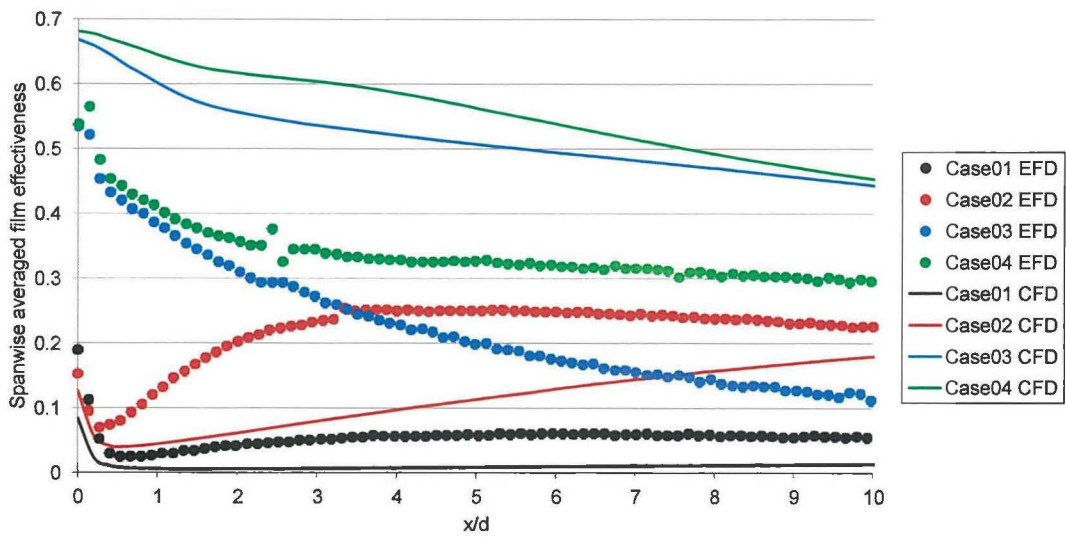


図 3.3.53 スパン方向平均フィルム効率 ($p/d=3.0$, EFD vs CFD)

図 3.3. 54(a) には実験と CFD で得られた $p/d=6.0$, $BR=0.5$ での 1 ピッチ分のスパン方向平均フィルム効率を示す。 $BR=0.5$ では $p/d=3.0$ の結果と比較すると、比較的スパン方向平均フィルム効率の傾向が CFD でも捉えられているように見える。特に Case07 ではスパン方向平均フィルム効率の実験値と定量的にも一致している。 Case07 ではフィルム効率分布も実験結果と似た傾向を示していたため、予測精度が比較的高くなっていることが分かった。 Case06 では $p/d=3.0$ の場合はフィルム効率の下流側の減衰が捉えられない傾向が見られていたが、 $p/d=6.0$ の場合は下流側でのフィルム効率の減衰まで捉えられておりスパン方向平均フィルム効率の傾向も一致している。今回は計算格子の作成法は $p/d=3.0$ と $p/d=6.0$ では一致させているため、特に $p/d=3.0$ のようなピッチが狭い形態ではデバイスを取り付けた時に発生する縦渦の干渉などの予測精度が低下していると考えられる。 Case08 では $p/d=3.0$ の時とは異なり、スパン方向平均フィルム効率を実験値よりも低く予測する傾向が見られた。これは Case08 の CFD 結果ではフィルム効率のスパン方向への拡散性が十分に予測できず、低いフィルム効率の領域が広がったためである。従って、縦渦と二次空気の干渉に伴う二次空気の付着が十分に予測できなかつたと考えられる。

図 3.3. 54(b) には実験と CFD で得られた $p/d=6.0$, $BR=1.0$ での 1 ピッチ分のスパン方向平均フィルム効率を示す。 Case05 ではフィルム効率のスパン方向平均値は実験値よりも低く予測されており、二次空気の lift-off を CFD では過大に評価していると考えられる。 Case06 では実験と同様のスパン方向平均フィルム効率の推移が確認できたが、定量的には僅かにかけ離れている。 Case07 と Case08 では Case08 の方がフィルム効率の減衰率を CFD では高く予測しており、下流側の領域に置いて Case08 のスパン方向平均フィルム効率は Case07 を下回る結果となり、実験とは異なる結果を示している。 Case07 においては $BR=0.5$ と同様に定量的にもフィルム効率の予測が可能であることが分かった。

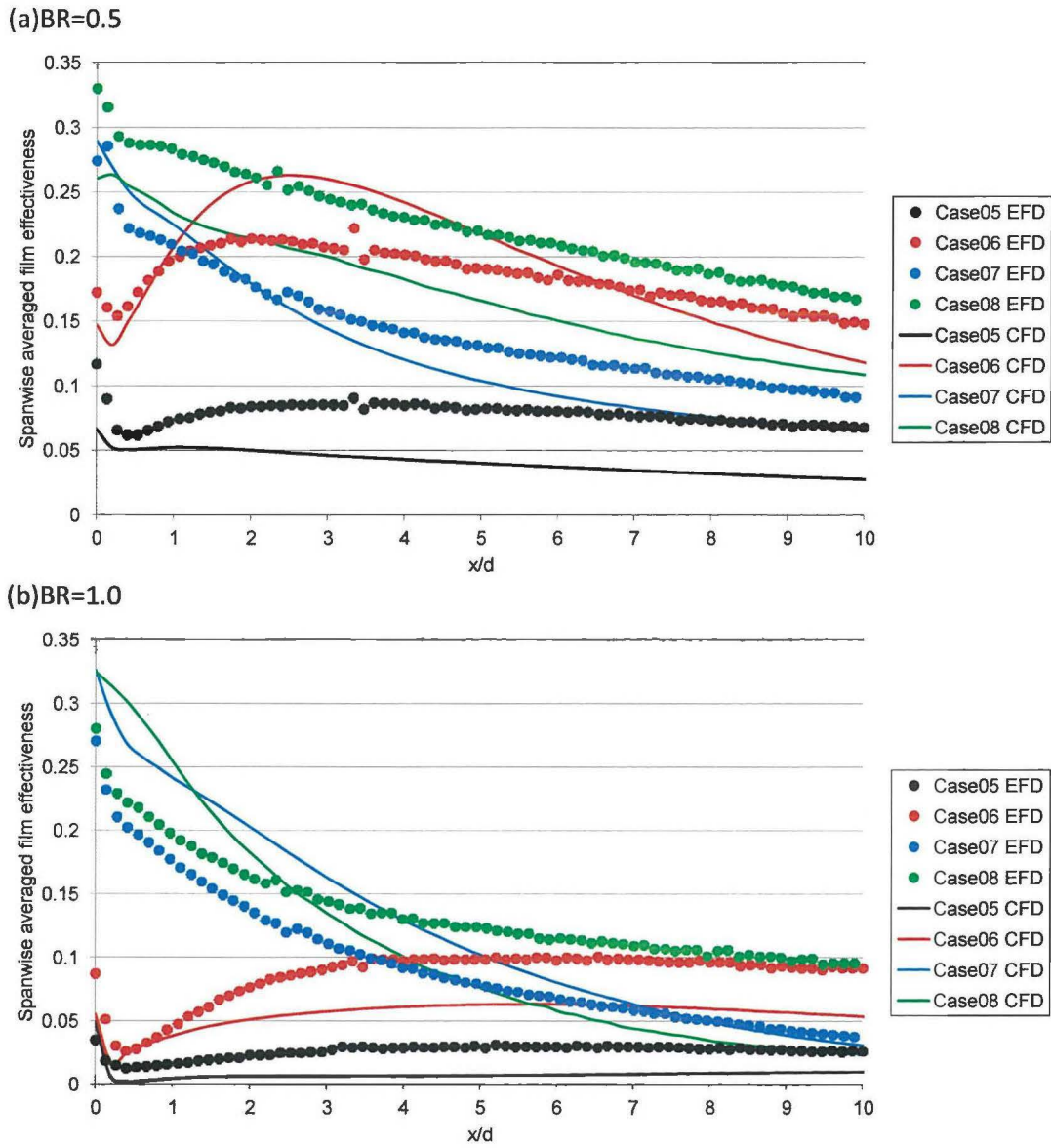


図 3.3.54 スパン方向平均フィルム効率 ($p/d=6.0$, EFD vs CFD)

図 3.3. 55 (a)には実験と CFD で得られた $p/d=3.0$, $BR=0.5$ での $z/d=0.0$ 上の局所フィルム効率を示す。センターライン上でのフィルム効率を比較すると最も実験結果と CFD 結果との一致が見られたのは Case01 であったが、下流側の領域ではフィルム効率の減衰が実験値よりも過小に評価されており、これがスパン方向平均尾フィルム効率の予測精度を低下させる要因となっていると考えられる。その他の形態を比較すると Case02~Case04 までは局所的なフィルム効率が過大評価されていることが分かる。 $p/d=3.0$ では Case02 においてスパン方向平均フィルム効率は下流側で次第に上昇する傾向が見られたが、センターライン上のフィルム効率に関しては減衰が観察されている。従って、スパン方向平均フィルム効率を上昇させたのは下流側でフィルム効率が拡散している領域においてフィルム効率が過大に評価されているためであると考えられる。Case03 では下流側のフィルム効率が減衰する傾向が実験と CFD では一時溜地区異なっていた。

図 3.3. 55(b) には実験と CFD で得られた $p/d=3.0$, $BR=1.0$ での $z/d=0.0$ 上の局所フィルム効率を示す。吹き出し比が高い条件においても局所的なフィルム効率は Case01 で実験と CFD で良い一致が見られた。Case02 では冷却孔近傍の領域において実験と CFD で一致する傾向が観察されたが、下流側で CFD 結果は上昇し、局所フィルム効率の減衰も小さい。そのため、下流側でのフィルム効率の実験と CFD との差が非常に大きくなっている。Case02 ではスパン方向に広い領域でフィルム効率の減衰が $BR=1.0$ でも CFD 結果では小さくなっていると考えられる。Shaped hole の結果ではデバイスの有無に関わらず、下流側でのフィルム効率の減衰傾向が実験と CFD では異なっている様子が分かる。

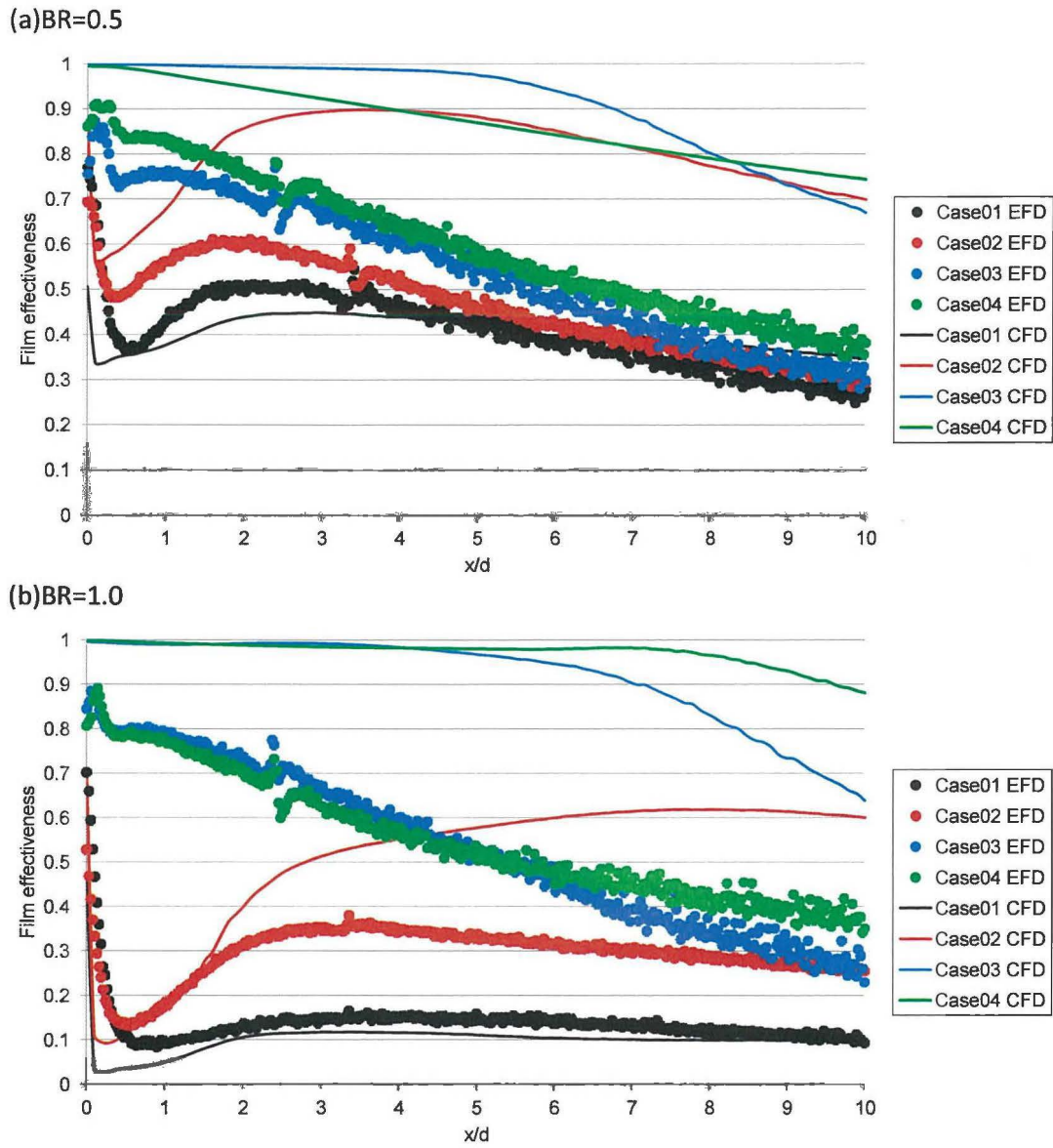


図 3.3.55 局所フィルム効率 ($z/d=0.0$, $p/d=3.0$, EFD vs CFD)

図 3.3. 56(a) には実験と CFD で得られた $p/d=6.0$, $BR=0.5$ での $z/d=0.0$ 上の局所フィルム効率を示す. Case05 では $BR=0.5$ と同様にセンターライン上でのフィルム効率は実験と CFD 結果では比較的一致が見られている. しかし, スパン方向平均値では CFD 結果が過小に評価されていることから, スパン方向に離れた位置での二次空気の付着性や拡散性の予測精度が低くなっていると考えられる. Case06 ではセンターライン上のフィルム効率は冷却孔付近で実験と CFD で一致が見られたが, 下流側でのフィルム効率の減衰が十分に捉えられておらずスパン方向平均のフィルム効率の予測精度も低下した. Case07 ではスパン方向平均のフィルム効率では実験と CFD 結果が比較的一致を見せていたが, センターライン上のフィルム効率に関しては実験と CFD では値のかけ離れが非常に大きい. $p/d=6.0$ では無冷却の領域が広く, スパン方向平均のフィルム効率は必然的に低下することに伴いフィルム効率が過大評価するのが低減されるのと共に, スパン方向に離れた領域においては比較的フィルム効率の減衰が予測できていると考えられる. Case08 ではフィルム効率の減衰量が実験値とかけ離れている.

図 3.3. 56(b) には実験と CFD で得られた $p/d=6.0$, $BR=1.0$ での $z/d=0.0$ 上の局所フィルム効率を示す. 吹き出し比が高い条件ではあるが, Case05 では $BR=0.5$ と同様に比較的良好な予測精度が得られていることが分かる. Case06 に関しても $BR=0.5$ と同様に冷却孔近傍の領域においてはフィルム効率の予測精度が高くなっているが, 下流側での減衰が捉えられていない. スパン方向平均フィルム効率に関しては CFD の方が Case06 では低いために, 二次空気の拡散に関する予測精度も Case06 では低くなっていることが分かる. Case07 では, スパン方向平均フィルム効率が実験と CFD で比較的一致する傾向がこの条件でも見られているが, センターライン上でのフィルム効率は CFD の方が非常に高い値を示した.

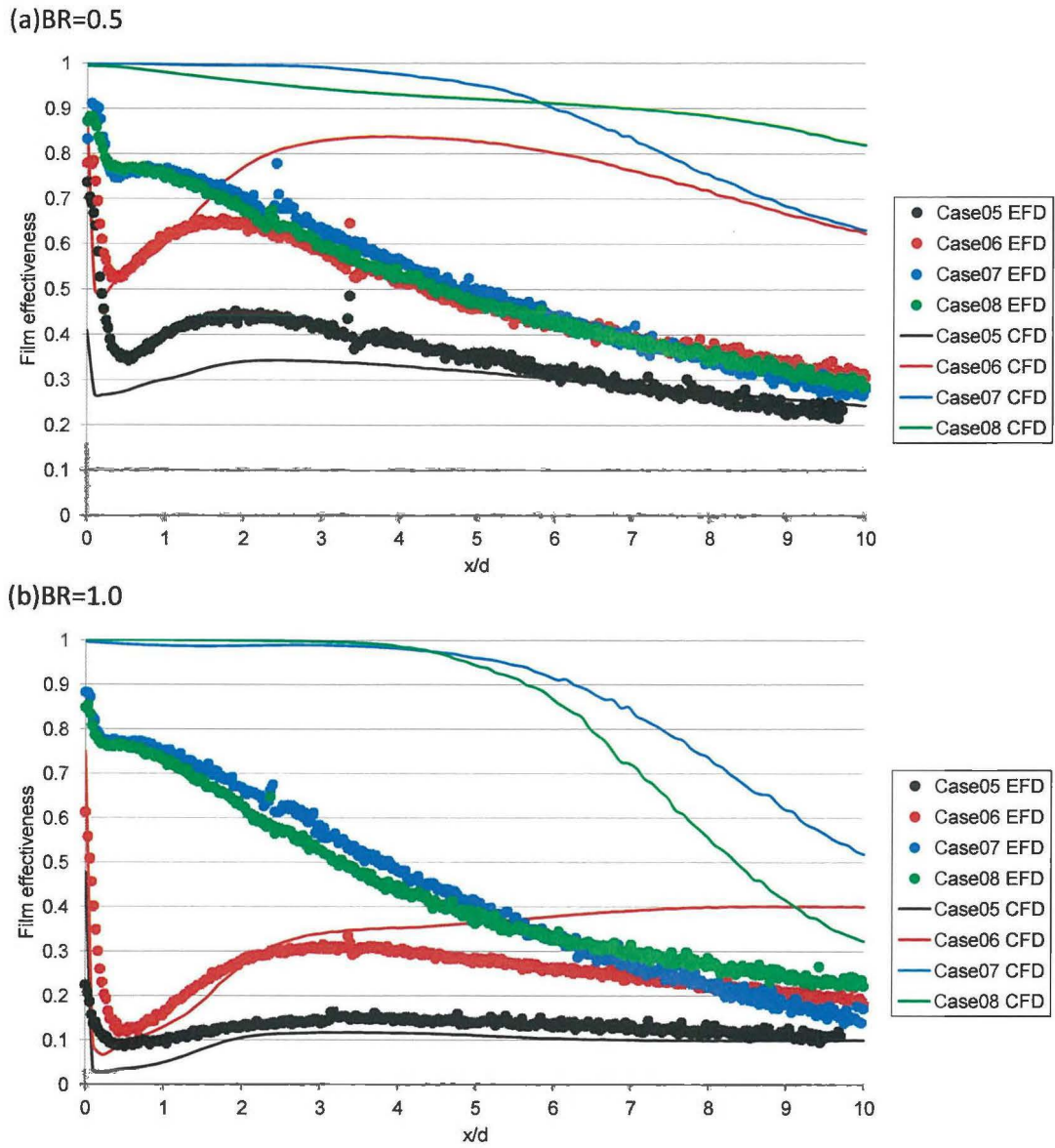


図 3.3.56 局所フィルム効率 ($z/d=0.0$, $p/d=6.0$, EFD vs CFD)

(2) 空間温度場

図 3.3. 57 には実験と CFD で得られた $BR=0.5$, $p/d=3.0$ の $x/d=3.0$ における空間温度場を示す。Case01 では局所的なフィルム効率¹⁾は CFD の方が低く予測しており、空間的な温度分布も形状が異なっている様子が分かる。Case02 では Case01 とは異なり、局所的な無次元温度が高い領域は CFD の方が多くなっている。無次元温度の空間的広がりを観察すると、実験結果では比較的フィルム効率の低い領域が広がっており、空間的にも温度の拡散が起きていることが分かるが、CFD 結果では低いフィルム効率の領域が狭く、温度の拡散が十分に起きていることが分らない。二次空気同士が干渉する領域においては低いフィルム効率が破棄面から離れた領域まで分布している結果が実験では得られたが、CFD 結果では壁面から無次元温度場が離れた位置まで拡散するものの、実験よりも壁面に近い位置で温度場は留まっている。Case03 の Shaped hole の結果では空間的にも Cylindrical hole よりも、付着性の高い温度場を観察することが出来たが、実験値の方がスパン方向に広くフィルム効率の減衰を捉えており、CFD ではフィルム効率の減衰を捉えきれない。Case04 ではデバイスから発生する縦渦によって、CFD では付着性の高い温度場が予測されている。局所的な無次元温度に関しては先の形態と同様に、高い値を示しており、温度の減衰の予測精度は悪い。更に二次空気が干渉する領域においては Case02 では隣の冷却孔からの二次空気の影響を受けて二次空気の干渉が発生しているように見えるが、Case04 では二次空気同士の干渉が起こっておらず、スパン方向に広いフィルム効率分布の予測が出来ていなかったことが分かる。

図 3.3. 58 には実験と CFD で得られた $BR=1.0$, $p/d=3.0$ の $x/d=3.0$ における空間温度場を示す。吹き出し比が高くなった条件では、特に無次元温度の高くなった領域が目立っており、吹き出し比が高くなるとさらに無次元温度の減衰が CFD では捉えきれなくなっていることが分かる。Case01 では冷却孔から発生する CRVP²⁾によって温度の塊の中に二つの温度コアが発生する様子を捉えたが、Case02 を観察すると、Case02 ではデバイスを設置しているために実験結果では隣り合った冷却孔から吹き出した二次空気が干渉している様子が観察できるが、CFD では隣り合った冷却孔からの二次空気の干渉は確認することが出来ない。これは Case04 でも同様であり、デバイスから発生し縦渦の予測精度や、縦渦と二次空気から発生する渦構造の予測に関しては十分でないと考えられる。

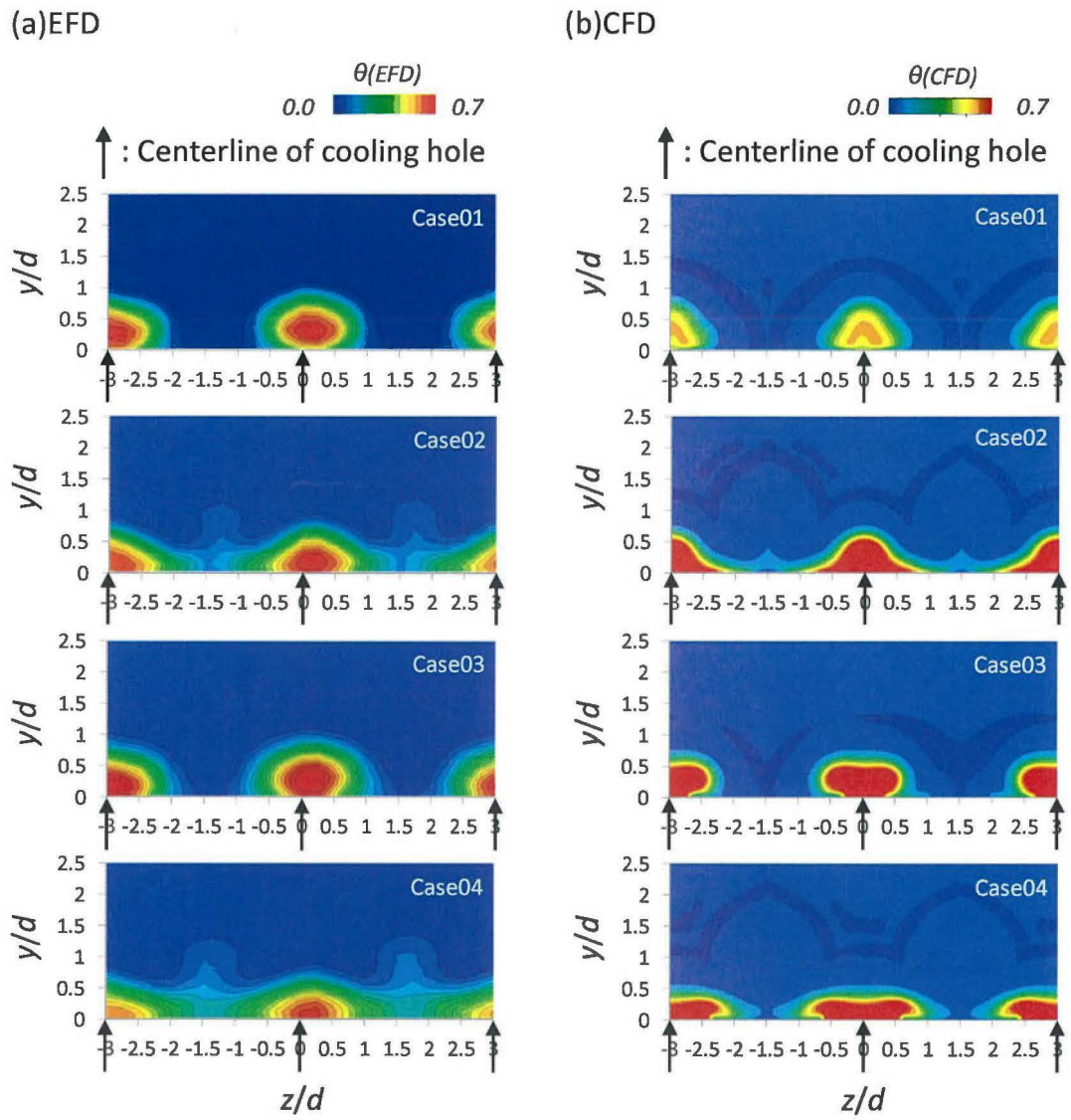


図 3.3.57 空間温度場 ($BR=0.5$, $p/d=3.0$)

(2) 空間温度場

図 3.3. 57 には実験と CFD で得られた $BR=0.5$, $p/d=3.0$ の $x/d=3.0$ における空間温度場を示す。Case01 では局所的なフィルム効率¹⁾は CFD の方が低く予測しており、空間的な温度分布も形状が異なっている様子が分かる。Case02 では Case01 とは異なり、局所的な無次元温度が高い領域は CFD の方が多くなっている。無次元温度の空間的²⁾は広がり³⁾を観察すると、実験結果では比較的フィルム効率の低い領域が広がっており、空間的にも温度の拡散が起きていることが分かるが、CFD 結果では低いフィルム効率の領域が狭く、温度の拡散が十分に起きていることが分らない。二次空気同士が干渉する領域においては低いフィルム効率が破棄面から離れた領域まで分布している結果が実験では得られたが、CFD 結果では壁面から無次元温度場が離れた位置まで拡散するものの、実験よりも壁面に近い位置で温度場は留まっている。Case03 の Shaped hole の結果では空間的にも Cylindrical hole よりも、付着性の高い温度場を観察することが出来たが、実験値の方がスパン方向に広くフィルム効率の減衰を捉えており、CFD ではフィルム効率の減衰を捉えきれない。Case04 ではデバイスから発生する縦渦によって、CFD では付着性の高い温度場が予測されている。局所的な無次元温度に関しては先の形態と同様に、高い値を示しており、温度の減衰の予測精度は悪い。更に二次空気が干渉する領域においては Case02 では隣の冷却孔からの二次空気の影響を受けて二次空気の干渉が発生しているように見えるが、Case04 では二次空気同士の干渉が起こっておらず、スパン方向に広いフィルム効率分布の予測が出来ていなかったことが分かる。

図 3.3. 58 には実験と CFD で得られた $BR=1.0$, $p/d=3.0$ の $x/d=3.0$ における空間温度場を示す。吹き出し比が高くなった条件では、特に無次元温度の高くなった領域が目立っており、吹き出し比が高くなるとさらに無次元温度の減衰が CFD では捉えきれなくなっていることが分かる。Case01 では冷却孔から発生する CRVP⁴⁾によって温度の塊の中に二つの温度コアが発生する様子を捉えたが、Case02 を観察すると、Case02 ではデバイスを設置しているために実験結果では隣り合った冷却孔から吹き出した二次空気が干渉している様子が観察できるが、CFD では隣り合った冷却孔からの二次空気の干渉は確認することが出来ない。これは Case04 でも同様であり、デバイスから発生し縦渦の予測精度や、縦渦と二次空気から発生する渦構造の予測に関しては十分でないと考えられる。

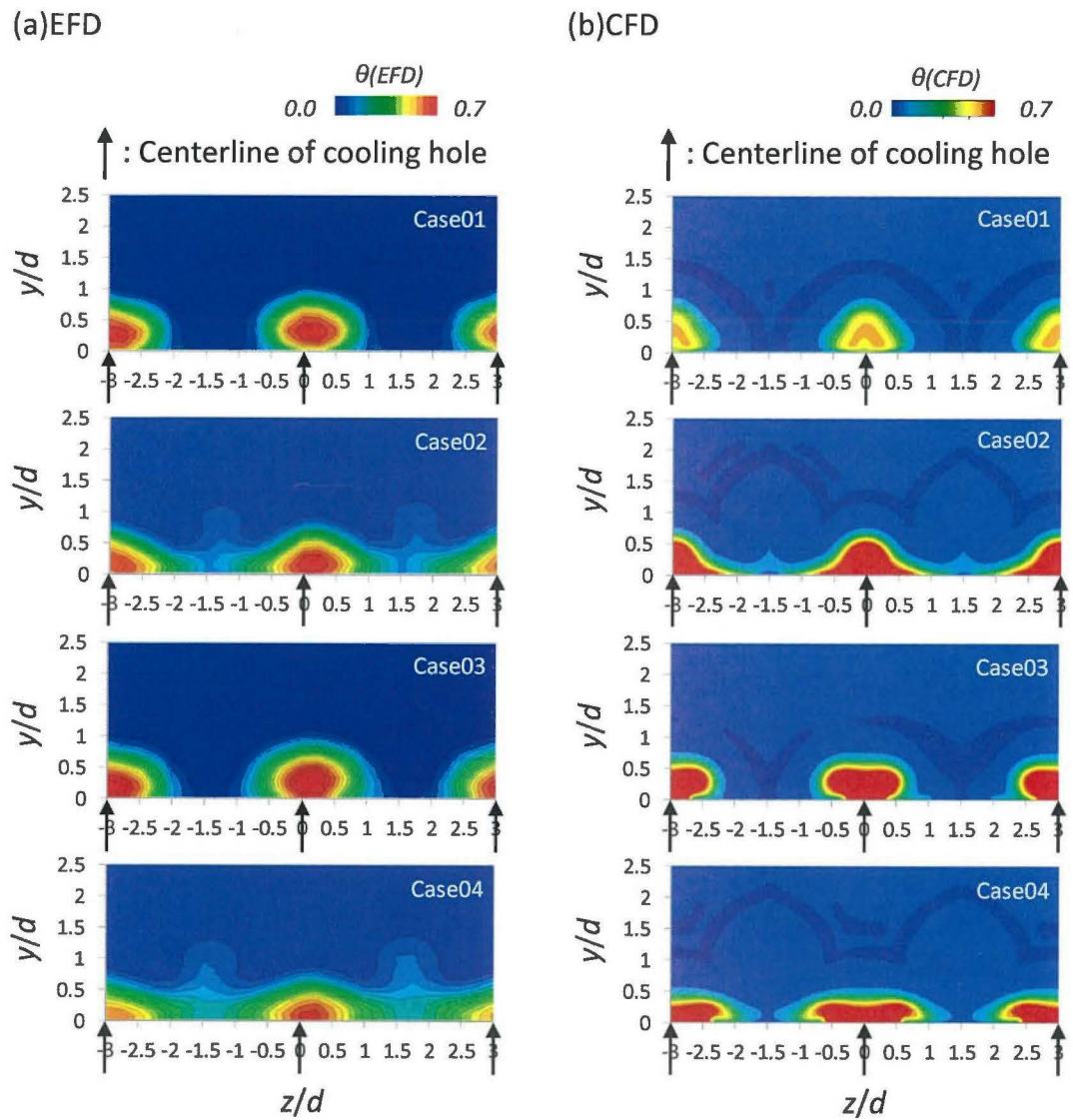


図 3.3.57 空間温度場 ($BR=0.5$, $p/d=3.0$)

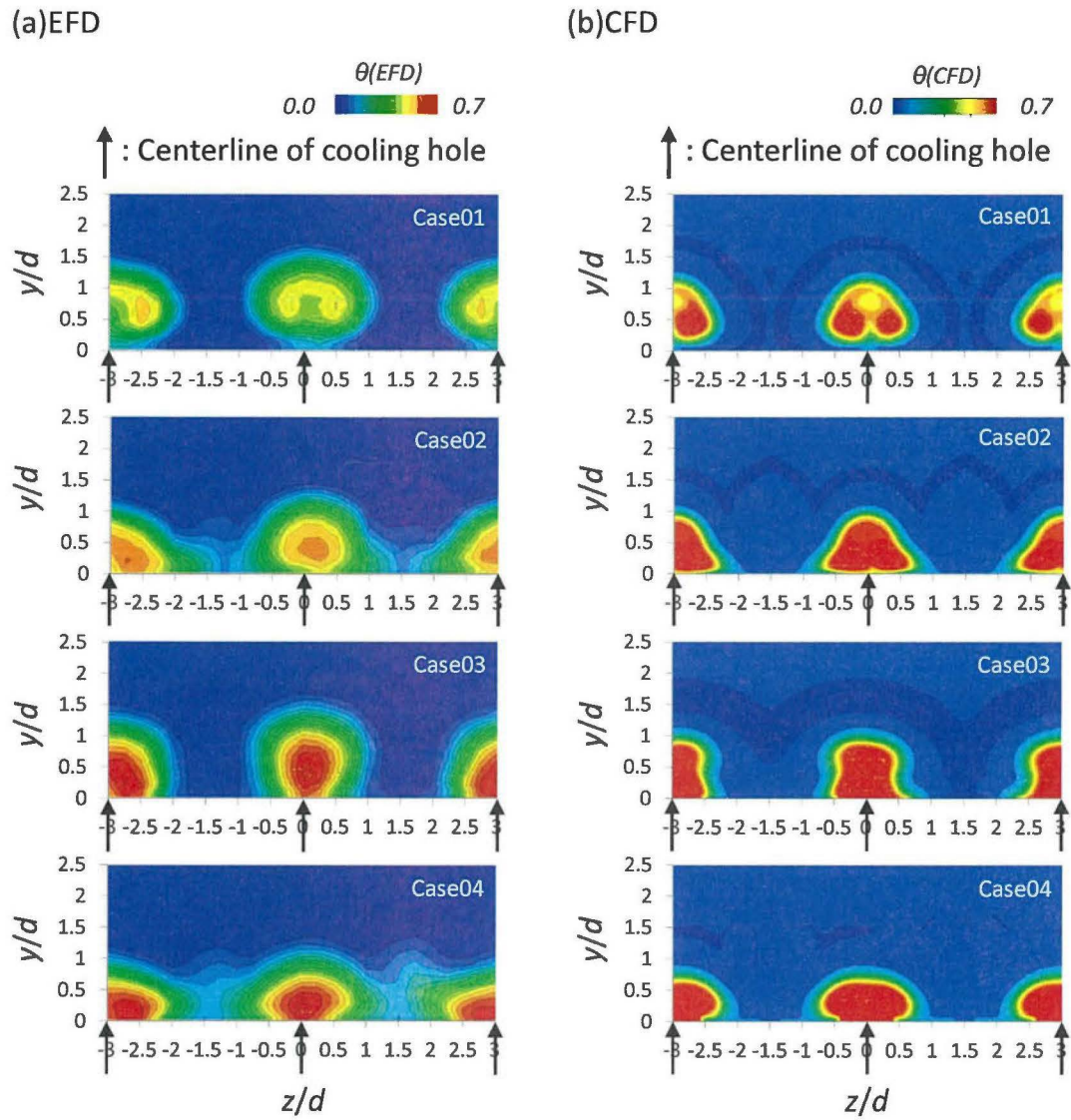


図 3.3.58 空間温度場 ($BR=1.0$, $p/d=3.0$)