

図 3.3. 59 には実験と CFD で得られた $BR=0.5$, $p/d=6.0$ の $x/d=3.0$ における空間温度場を示す。Case05 に関しては $p/d=3.0$ の場合と同様に局所的な無次元温度は低くなっている様子が分かる、Case06 では二次空気が縦渦によってスパン方向へ広く付着する様子が CFD 結果では捉えられている。付着する範囲に関しても実験、CFD とともに $-25 \leq z/d \leq 2.5$ の領域となっており、二次空気の拡散に関しては予測が出来ていた。一方で冷却孔センターラインでは局所的に無次元温度が高い領域が CFD で広がっており、温度の減衰に関しては CFD では十分な予測精度が得られなかった。Case07 に関しては Shaped hole の結果ではあるが、無次元温度のコアが実験よりも CFD の方が壁面法線方向へ移動しており付着性の低い温度場となっている。これに関しては CFD で与える二次空気流量が間違っている可能性についても確認する必要があるが、冷却孔内等で二次空気の剥離を十分に予測できないために二次空気の lift-off がこの条件では過大に評価された可能性もある。Case08 についてはデバイスを取り付けた条件であるが、実験で得られたような二次空気の拡散は CFD では予測できていない。

図 3.3. 60 には実験と CFD で得られた $BR=1.0$, $p/d=6.0$ の $x/d=3.0$ における空間温度場を示す。Case06 ではデバイスを取り付けた形態であるが、実験と比較すると縦渦による二次空気の拡散が過小に CFD では評価されていた。また、局所的な無次元温度も CFD では高くなっており実験とはかけ離れた結果となった。Case07 は Shaped hole だが、 $BR=0.5$ の場合と同様にこの条件では二次空気が lift-off する傾向が強くなっており、実験と CFD を比較すると CFD の方が二次空気の付着面積が明らかに小さくなっていることが分かる。Case08 でもデバイスを取り付けた形態であるが、二次空気の拡散が過小に評価されておりデバイスを取り付けた時の効果が正しく予測されていないことが分かる。

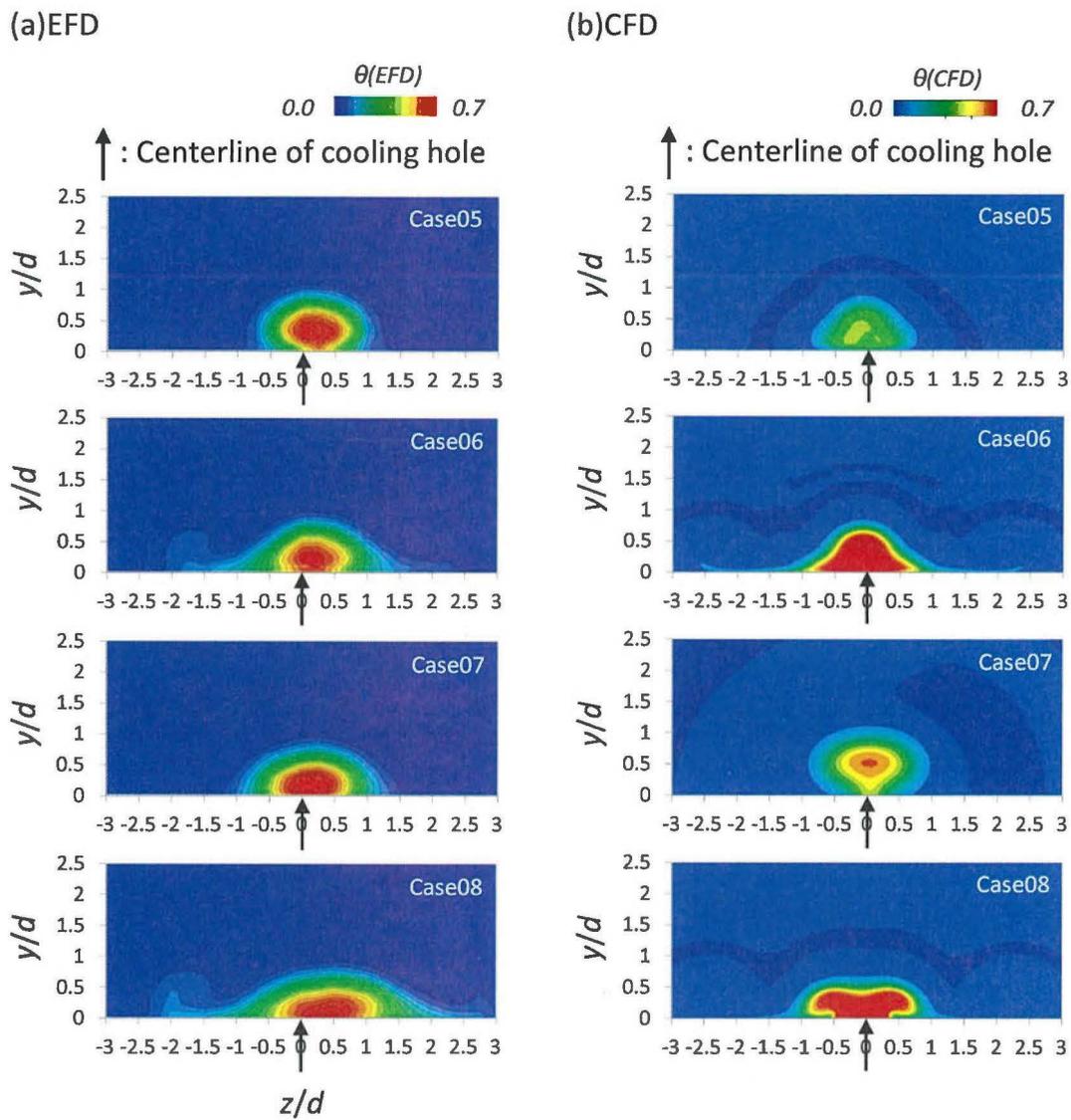


図 3.3.59 空間温度場 ($BR=0.5$, $p/d=6.0$)

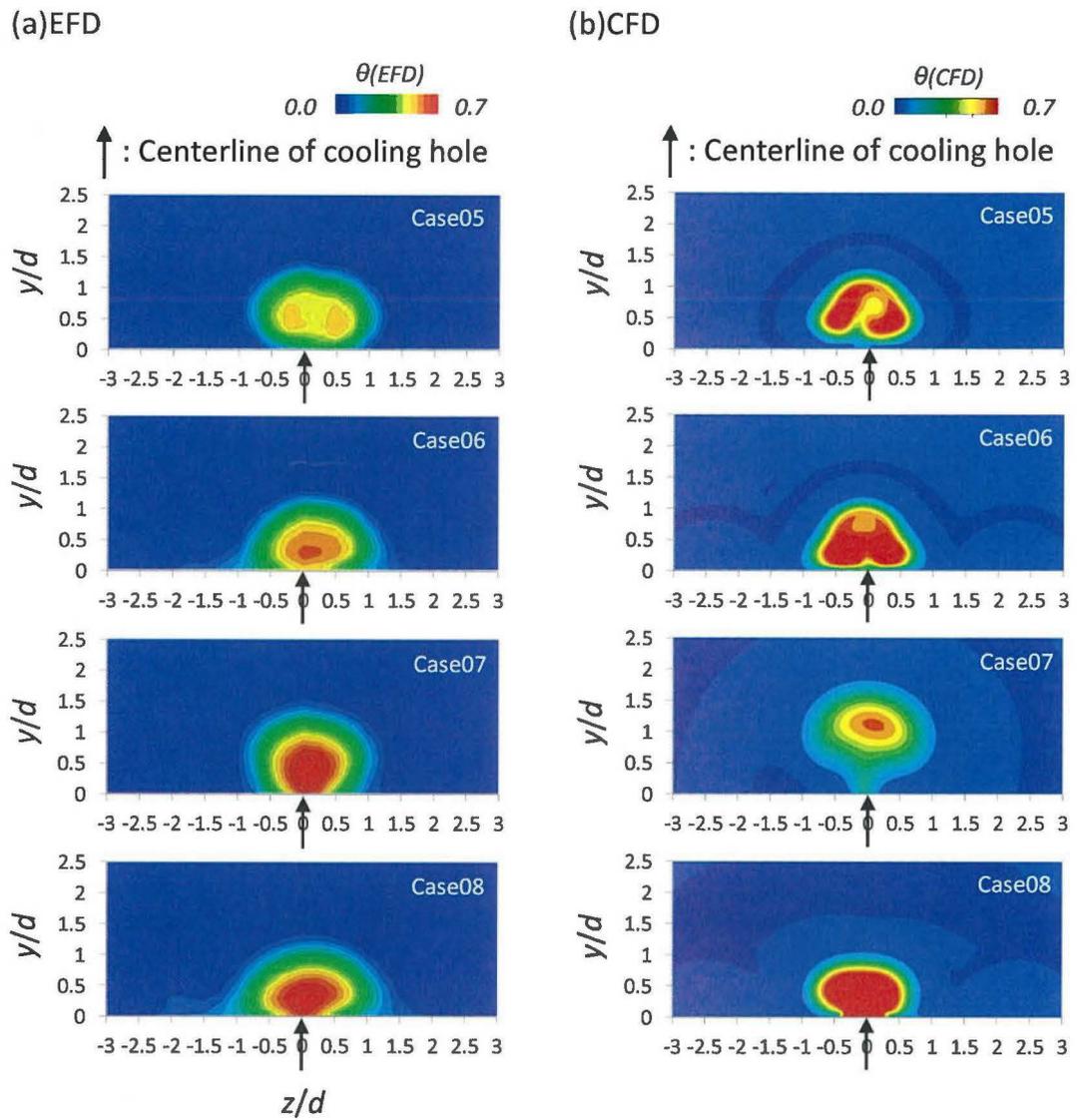


図 3.3.60 空間温度場 ($BR=1.0$, $p/d=6.0$)

図 3.3. 61(a)には $BR=0.5$, $p/d=3.0$ での $z/d=0.0$ における無次元温度プロファイルを示す。センターライン上での速度プロファイルを比較すると、Case01 では実験結果の方が無次元温度が高くなっている。壁面付近の領域に限っては無次元温度の値はほぼ一致を見せていたが、壁面法線方向に離れた位置では CFD ではピーク値付近がフラットになっているのに対して、実験値は 1 点のピーク値を持つ結果となった。Case02~Case04 においては、壁面付近の温度場は CFD の方が高くなっている。

図 3.3. 61 (b)には $BR=1.0$, $p/d=3.0$ での $z/d=0.0$ における無次元温度プロファイルを示す。Case01 では実験値において、ピーク値を 2 つ持つプロファイルとなっているが、CFD でも同様のプロファイルが予測されていることが分かる。しかし、CFD では全体的に温度場が付着している傾向が見られた。Case02 においては、CFD で 2 つのピーク値が確認されたが、実験値ではそのようなピーク値が見られず予測精度が悪い。ただし、壁面付近の局所的な点においてはフィルム効率の予測値が実験値と比較的一致を見せた。Shaped hole の結果を見ると、壁面付近の予測精度も空間的な予測精度も CFD では悪くなっていることが分かる。

図 3.3. 62(a) には $BR=0.5$, $p/d=6.0$ での $z/d=0.0$ における無次元温度プロファイルを示す。 $p/d=6.0$ の場合プロファイルの傾向は $p/d=3.0$ の場合と同様の傾向を示している。ただし Case05 では壁面付近の予測精度が低下している様子が観察された。

図 3.3. 62 (b) には $BR=1.0$, $p/d=6.0$ での $z/d=0.0$ における無次元温度プロファイルを示す。Case01 では比較的全領域において無次元温度のプロファイルが一致している傾向が見られるが $y/d=1.0$ 付近においては CFD 結果において強いピーク値が確認されており、実験結果とのかい離が大きい。Case06 においては、実験では二次空気が壁面付近へ付着するようなプロファイルとなっているが、CFD ではピーク値が壁面より離れており lift-off の傾向が強い。Shaped hole の結果に関してはデバイスの有無に関わらず壁面付近にピーク値を持つ温度場となっており、全体的に CFD 結果は実験結果に比べて温度の減衰を捉えきれていないことが分かる。

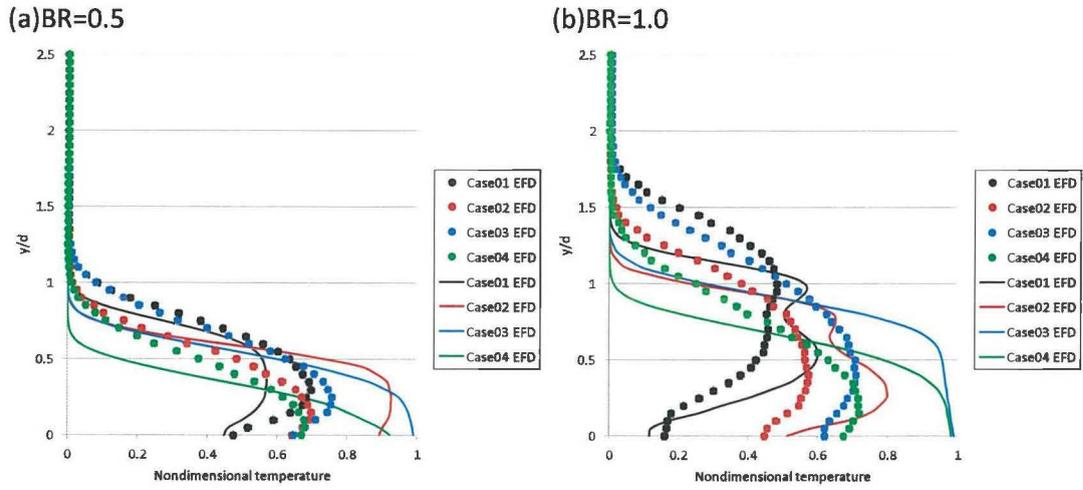


図 3.3. 61 無次元温度プロファイル ($z/d=0.0$, $p/d=3.0$)

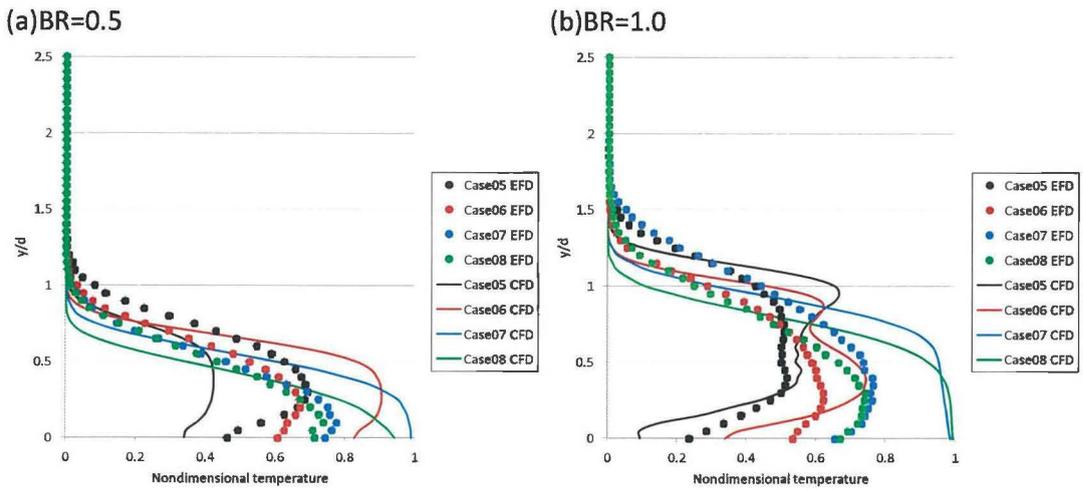


図 3.3. 62 無次元温度プロファイル ($z/d=0.0$, $p/d=6.0$)

(3) 速度場

図 3.3. 63(a)には $BR=0.5$, $p/d=3.0$ の $z/d=0.0$ における速度プロファイルを実験と CFD で比較した結果を示す. Case01 では実験結果においては $y/d=0.5$ で低速度の領域を確認することができ, プロファイル自体は実験結果と CFD 結果で一致した傾向を示した. Case02 では $y/d=0.25$ 付近に低速度な領域が確認できるが, CFD では低速度領域が $y/d=0.5$ 付近となっており, 速度プロファイルの一致が見られなかった. Shaped hole では, Cylindrical hole とは異なりデバイスの有無に関わらず実験では低速度のピーク値が確認されず, プロファイル上では滑らかな低速度領域が形成されている. CFD 結果と実験結果と比較すると, CFD ではプロファイルの大まかな形は捉えられているが, CFD の方が壁面付近の流速が高くなっており, 冷却孔から吹き出した後の二次空気の高くなっていることが分かる.

図 3.3. 63(b) には $BR=1.0$, $p/d=3.0$ の $z/d=0.0$ における速度プロファイルを実験と CFD で比較した結果を示す. 実験と CFD 結果を比較すると明らかに CFD 結果の方が速度プロファイルは壁面付近で高い値を示していることが分かる. Case01 では $BR=0.5$ と同様に $y/d=0.5$ 付近に低速度のピーク値が確認できたが, CFD においてはピーク値の位置が異なっている. 特に $y/d<0.75$ の領域において速度が高い領域が観察された. 壁面付近での挙動が実験と CFD で異なるのは, 入口強化に速度プロファイルが入っていないことや, 冷却孔内部での剥離が予測できていないこと等の原因が考えられる. Case02 でも実験結果には低速度のピーク値が見られたが, CFD ではピーク値の位置, 流れ方向流速値の傾向が異なる. Shaped hole においては, 全体的に速度プロファイルが高い値を示しており, このことが Shaped hole では二次空気が lift-off する傾向を強めたと考えられる.

図 3.3. 64(a) には $BR=0.5$, $p/d=6.0$ の $z/d=0.0$ における速度プロファイルを実験と CFD で比較した結果を示す. センターライン上での速度プロファイルの傾向は $p/d=3.0$ の場合とほとんど変化せず, Cylindrical hole では低速度のピーク値, Shaped hole では滑らかな低速度のプロファイルが確認できた. $BR=1.0$ でもこの傾向は変化しない.

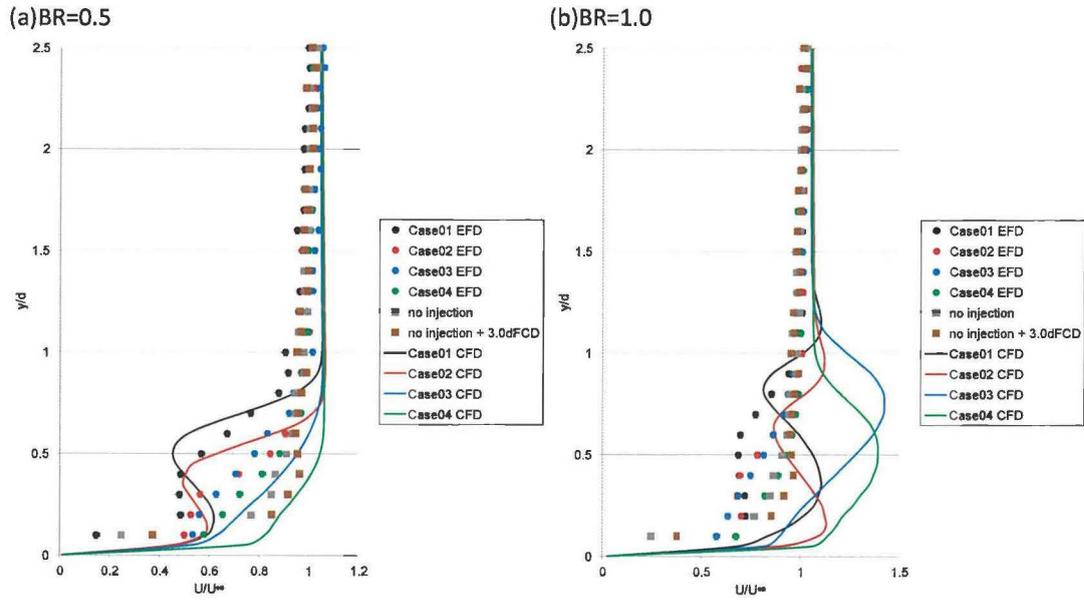


図 3.3.63 無次元流速 ($z/d=0.0$, $p/d=3.0$)

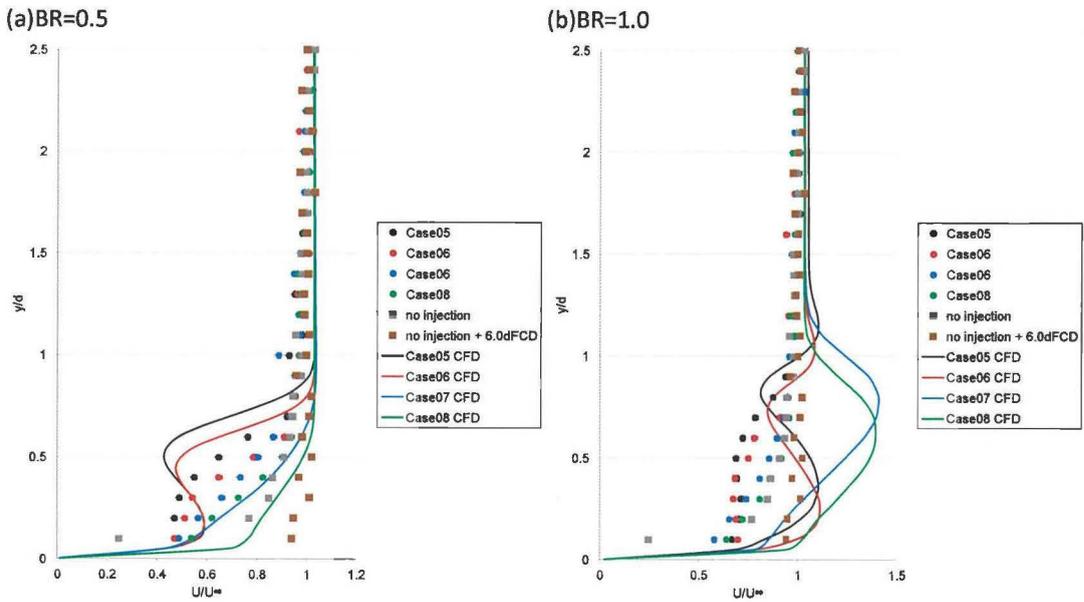


図 3.3.64 無次元流速 ($z/d=0.0$, $p/d=6.0$)

図 3.3. 65 には、流れ制御デバイス周りの主要な渦構造を示している。図中には限界流線と、各所の渦度分布を示した。A の渦は、冷却孔の上流側で発生する馬蹄形渦であり、デバイスの外側を通過して、下流側へ流れ、最終的には $BR=0.0$ の計算結果で示したように、巻き上がっていく渦である。B の渦は、デバイスの内側で主流が剥離することによって生じている渦度領域である。この A と B の渦が合流することで、下流側の縦渦は大規模化している。今回は吹き出しを伴う計算のため、冷却孔の内部からは、冷却孔のエッジ部で流れが剥離することによって生じる CRVP の起源が、C の渦として示されている。最後に、冷却空気の吹き出しで主流がブロックされることから生じている渦が、D に示した馬蹄形渦の構造である。

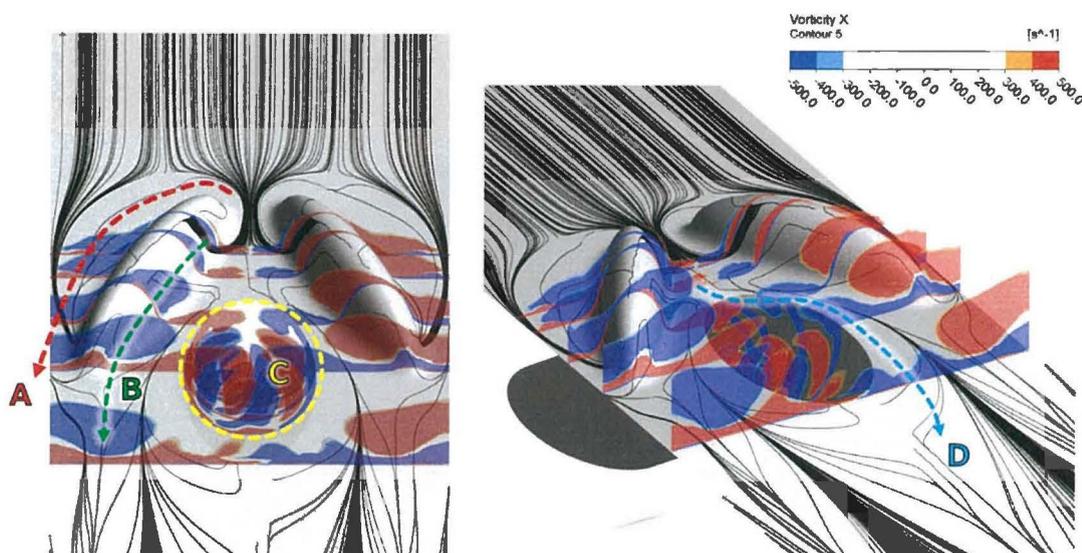


図 3.3. 65 デバイス周りの主要な渦構造

図 3.3. 66 には $BR=0.5$ における Q 値の等値面を示す。 Q 値の等値面は渦度で色づけを行っている。デバイスを取り付けた形態に関しては、デバイスの内側から渦構造が発達しておりこれが実験では縦渦として計測された渦構造であると考えられる。この渦構造は冷却孔の形状には依存せずに発達していることが分かる。一方で冷却孔から発生する CRVP は冷却孔の内部と、冷却孔の出口付近において発達していることが分かり、Cylindrical hole では冷却孔のセンターライン付近に渦ペアが近い位置で発達している。一方で Shaped hole では冷却孔の両端部分で僅かに渦構造が発達していることが分かり、これにより Shaped hole では CRVP のコアが互いに離れた位置に存在していると考えられる。

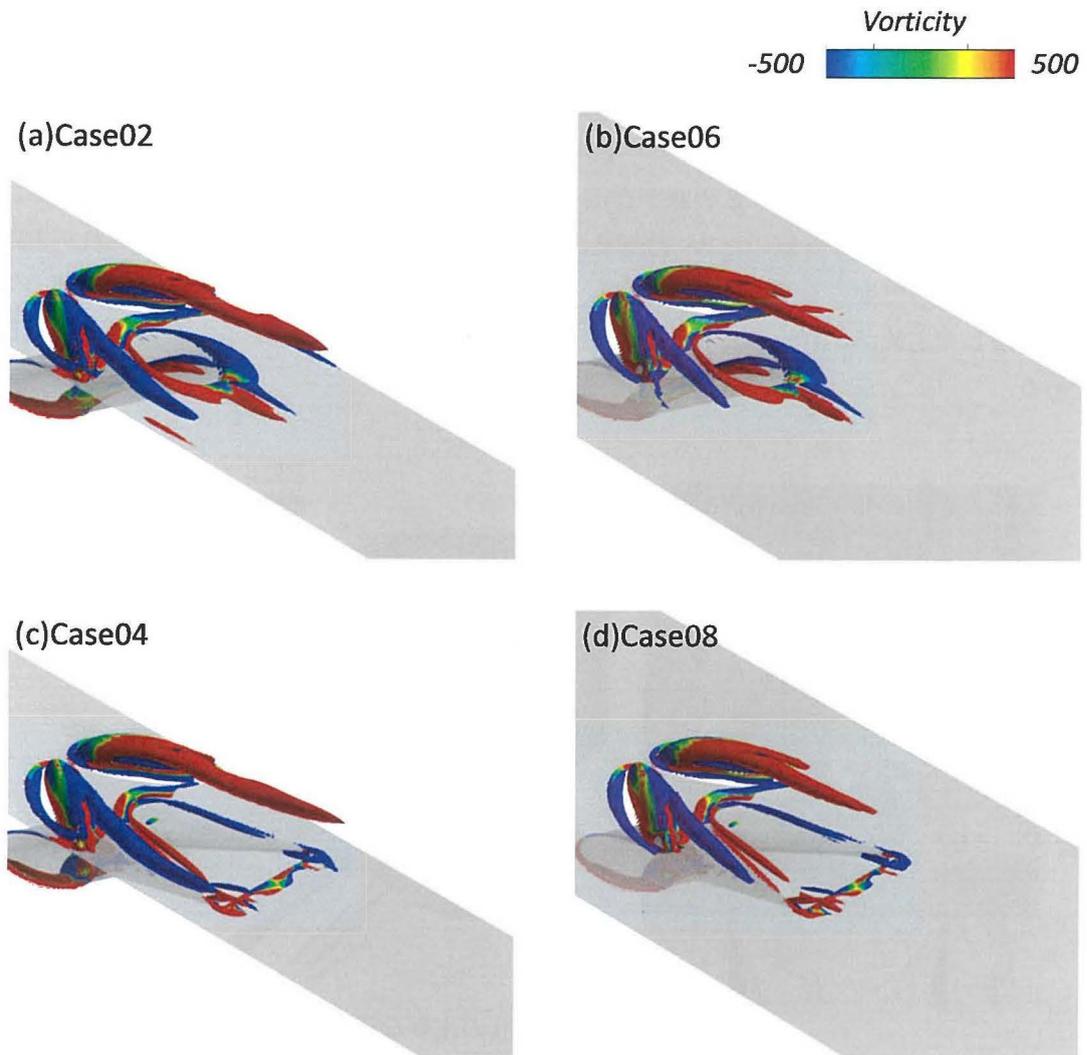


図 3.3.66 渦構造 (Q 値, $BR=0.5$)

図 3.3.67 には $z/d=0.0$ の面内での無次元流速を示す。ここでの U は絶対流速を示している。Case01 の場合 $BR=0.5$ では冷却孔の入口の領域において二次空気は冷却孔内で剥離し、冷却孔上面で二次空気が加速する。冷却孔内部では大規模な剥離が起こっているために CFD では冷却孔内部での剥離を十分に予測できていない可能性もある。冷却孔から出た二次空気は冷却孔出口のエッジ部分で剥離を起こしており、二次空気は付着していない。 $BR=1.0$ においても、二次空気は冷却孔の入口領域で剥離を起こしており、加速している領域は主流と同等の流速で吹き出すことになる。

Case03 の場合も Cylindrical hole の場合と同様に二次空気は冷却孔の入口領域で剥離し、

冷却孔の上面で加速している領域が観察される。また、Shaped hole では冷却孔内で面積が拡大しているために剥離領域が大規模化しており、Cylindrical hole よりも大規模な低速度領域が確認できる。さらに、冷却孔から出た二次空気は冷却孔の出口エッジであっても剥離を起こしておらず壁面への付着性が高くなっていることが分かる。BR=1.0 の場合、基本的な挙動は変化をせず、二次空気は冷却孔入口で剥離を起こしている。Cylindrical hole の場合と比較すると、冷却孔内が拡大している効果で低速度領域が拡大しており、低速度領域内の局所流速も Cylindrical hole より低い値を示した。冷却孔内から吹き出した二次空気の挙動を比較してみても、Shaped hole の方が二次空気の付着性が高くなっており Cylindrical hole よりも優位性をしめした。Shaped hole では冷却孔内の剥離領域が大規模化しているために、CFD では十分な予測精度が得られていない可能性も存在する。

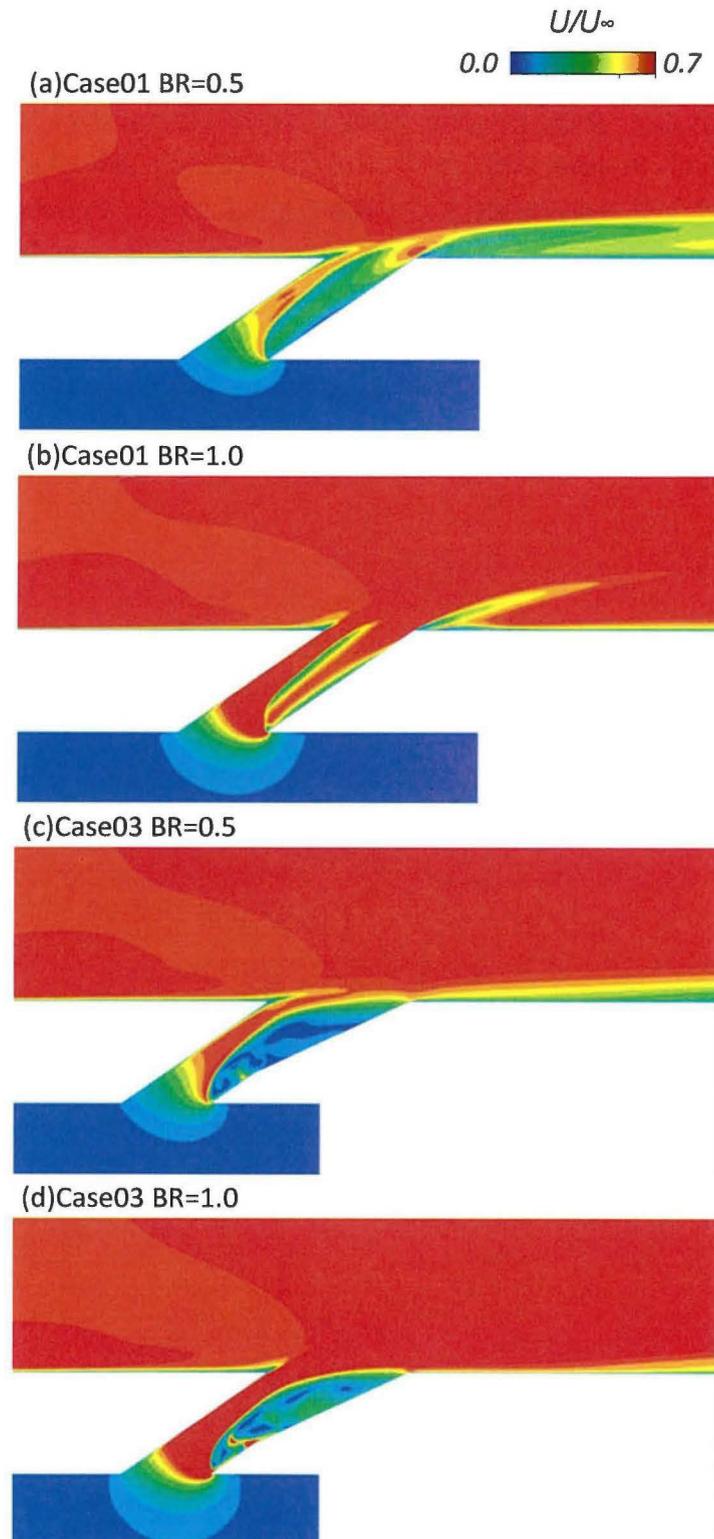


図 3.3. 67 冷却孔内部流速($z/d=0.0$ plane)

図 3.3. 68 には $BR=0.5$ の Cylindrical hole における冷却孔内での無次元流速を各 xz 平面で取得した結果を示す。ここでも U は絶対流速を示す。今回流速を取得した平面は 7 面である ($y/d=0.0$ は主流ダクト壁面位置)。 xz 平面内での流速を観察すると、三次元的な流速の変化を観察することが可能である。 $y/d=-1.75$ の面では冷却孔の入口領域であり、冷却孔の右端の領域では剥離の開始に伴う低速度領域が観察される。 $y/d \geq -1.50$ の領域では二次空気の剥離領域と、加速領域がはっきりと表れている。二次空気の加速領域は初期の段階では冷却孔の半分程度の領域を占めているが、出口に向かうにしたがって、剥離領域を取り囲むように発達を起こしている。最終的に剥離領域は冷却孔の右端から分離し、冷却孔の中央付近に寄る傾向が見られた。従って、冷却孔の出口エッジ付近では二次空気が剥離する現象が見られたと考えられる。また、剥離領域の形を見ると、低速度の領域は 2 つの領域に分けられているように見える。これは、冷却孔内で発達した CRVP によって剥離領域が 2 つに分かれていると考えられる。

図 3.3. 69 には $BR=1.0$ の Cylindrical hole における冷却孔内での無次元流速を各 xz 平面で取得した結果を示す。吹き出し比が高い条件においては二次空気の運動量が比較的高いため二次空気は加速した後に主流と同程度の流速に発達する。剥離領域の大きさ自体を $BR=0.5$ の場合と比較すると、 $BR=1.0$ での剥離領域の大きさは $BR=0.5$ とはほとんど変化せず、剥離領域の位置も $BR=0.5$ と変化していないことが分かる。 $BR=1.0$ においても、CRVP の発達に伴い、低速度領域は 2 つの領域に分かれている様子が観察できる。

図 3.3. 70 には $BR=0.5$ の Shaped hole における冷却孔内での無次元流速を各 xz 平面で取得した結果を示す。 Shaped hole においても、二次空気は冷却孔入口から剥離し、次第に加速領域と剥離領域に分割されている様子が観察される。 Cylindrical hole と比較すると、 Shaped hole では冷却孔出口が拡大しているのに伴って剥離領域が大規模化している。 Cylindrical hole では二次空気の加速領域が、出口に向かうにしたがって、剥離領域を取り囲むように発達したが、今回は剥離領域を完全に囲むような挙動は観察されなかった。 Shaped hole では冷却孔出口のエッジにおいて Cylindrical hole とは異なり、二次空気の剥離は起こらなかったが、今回は剥離領域が広いために冷却孔出口での剥離が起こらなかったと考えられる。剥離領域に関しては Cylindrical hole においては、2 つに分離するような挙動が観察され CRVP の存在が見られたが、今回は明確に分離する挙動が見られず CRVP のぞんざいは明確に観察することが出来なかった。

図 3.3. 71 には $BR=1.0$ の Shaped hole における冷却孔内での無次元流速を各 xz 平面で取得した結果を示す。吹き出し比が高い場合、二次空気の加速領域における局所的な二次空気流速が高くなる傾向が観察されたが、冷却孔の剥離領域の大きさに関しては殆ど変化が見られなかった。

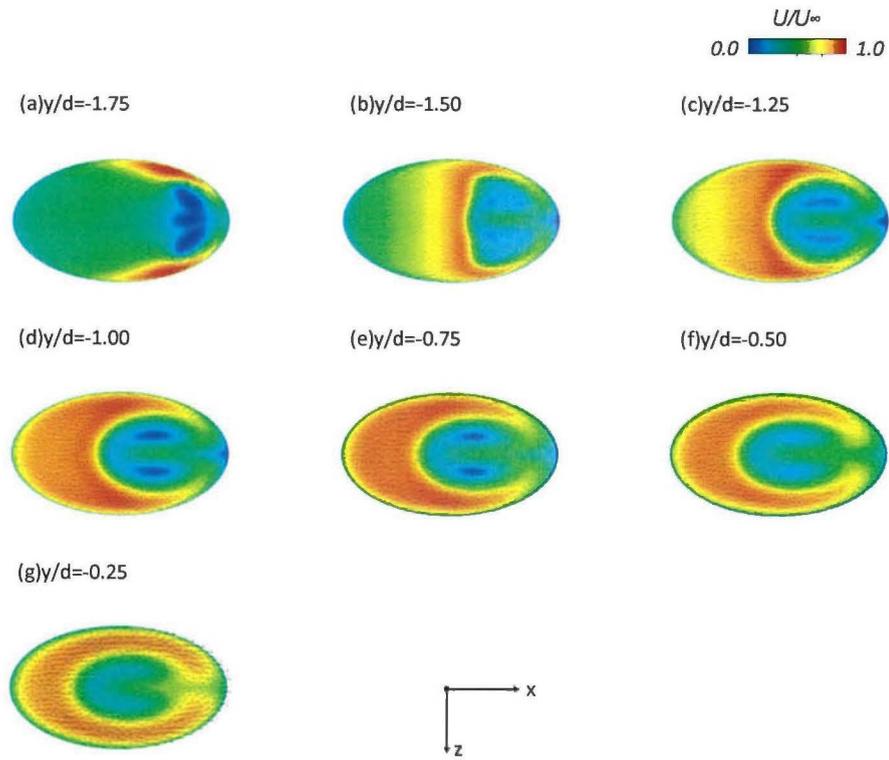


図 3.3.68 冷却孔内速度場(Cylindrical hole, $BR=0.5$)

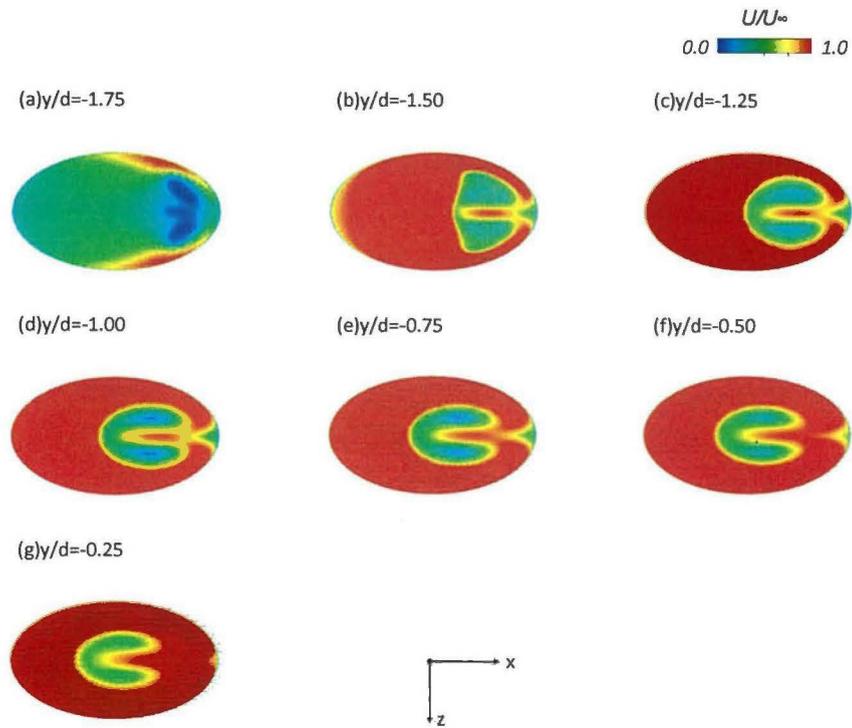


図 3.3.69 冷却孔内速度場(Cylindrical hole, $BR=1.0$)

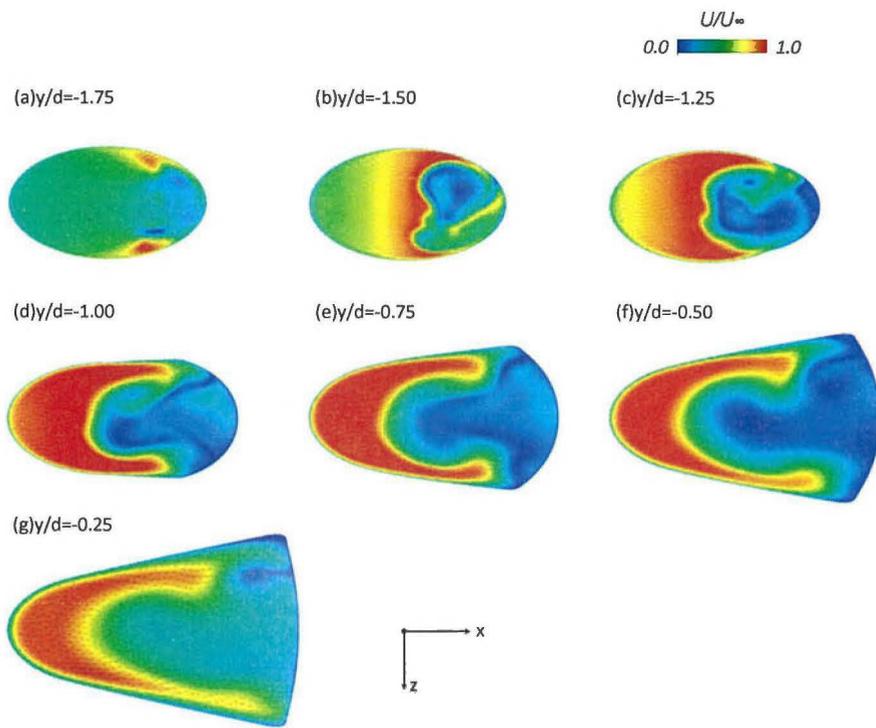


図 3.3.70 冷却孔内速度場(Shaped hole, $BR=0.5$)

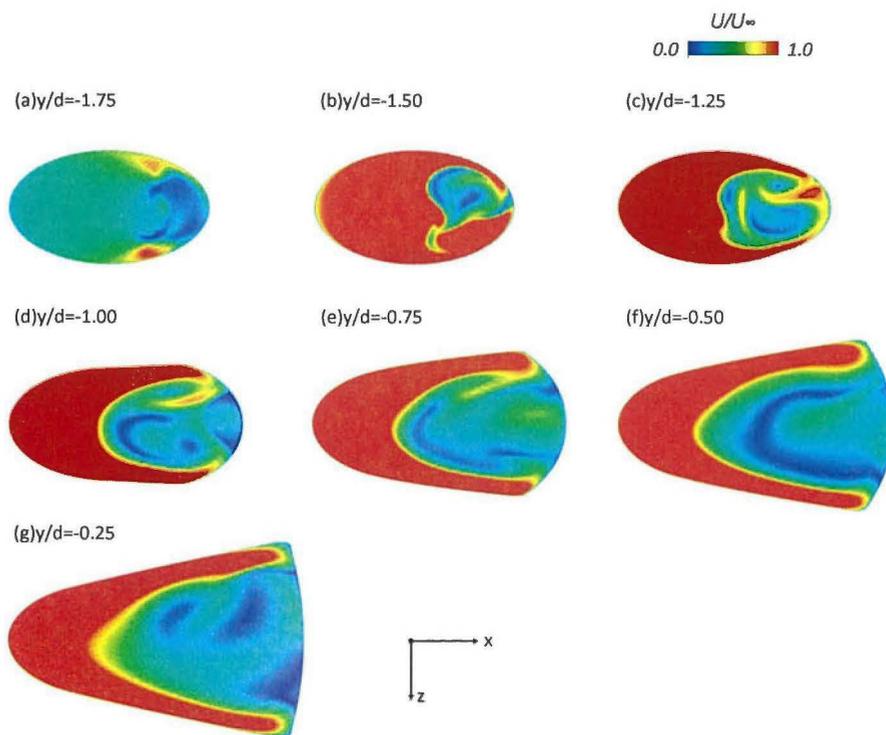


図 3.3.71 冷却孔内速度場(Shaped hole, $BR=1.0$)

図 3.3. 72 には図 3.3. 68～図 3.3. 71 において観察した面内の、面平均流速を示している。 $BR=0.5$ の場合、 $1.75 < y/d < -1.25$ の領域においては、Cylindrical hole でも Shaped hole でも冷却孔の形状が等しいために無次元流速はほぼ等しい値を示していたが、Shaped hole ではこれ以降に冷却孔の拡大が起こり剥離領域が拡大するために面平均流速は低下する。そのため、冷却孔出口での流速は低下し、実質的な吹き出し比が低下していると考えられる。 $BR=1.0$ の場合は特に Shaped hole での流速の減衰が激しい。この場合は、冷却孔が拡大することによる剥離領域の拡大によって、流速の著しい低下が起こっている。

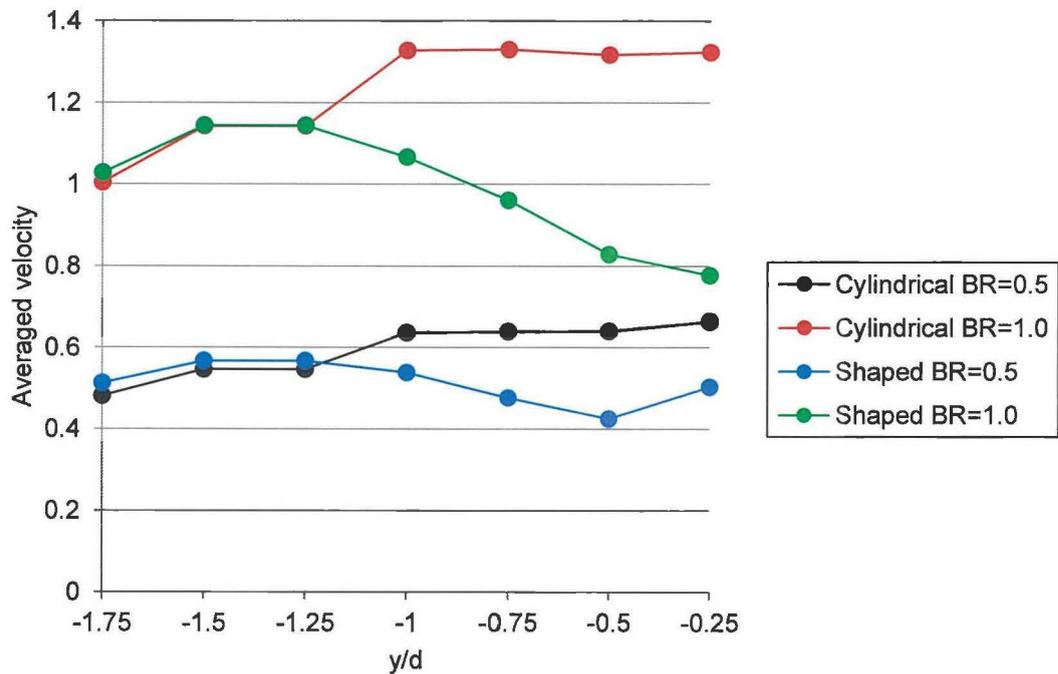


図 3.3. 72 冷却孔内速度 (面平均値)

(4) 熱伝達率の予測精度

図 3.3. 73, 図 3.3. 74 には, 実験と数値解析によって得られたフィルム効率分布を示している. Case01 については, 冷却孔の両サイドにおける熱伝達率が比較的高い値を示しており, これは実験と数値解析の両方で観察することができる. 数値解析結果に関しては, 冷却孔センターライン上の熱伝達率が明確に低い値を示しているが, 実験では数値解析結果ほど明確にこの傾向は観察されなかった. 吹き出し比の傾向を見ると, 実験と数値解析の両方で, BR の増加に従って局所の熱伝達率が増加する傾向が出ている. これは, CRVP の大規模化によるものであり, 定性的にはこの傾向が捉えられていると考えられる. Case03 では, 実験と数値解析結果の違いが比較的大きくなっていることが分かる. 特に, 冷却孔の両脇の領域では, 熱伝達率が低くなる傾向が数値解析では観察されるのに対して, 実験ではこの傾向がまったく確認されず, 冷却孔下流領域の熱伝達率はほとんどスパン方向に分布がつかなかった. 数値解析結果では, Case01 と Case03 で熱伝達率の低くなるスパン方向の位置が変化している. これは, 冷却孔から発生する CRVP が巻き上がるスパン方向の位置が異なるためであると考えられる (図 3.3. 75).

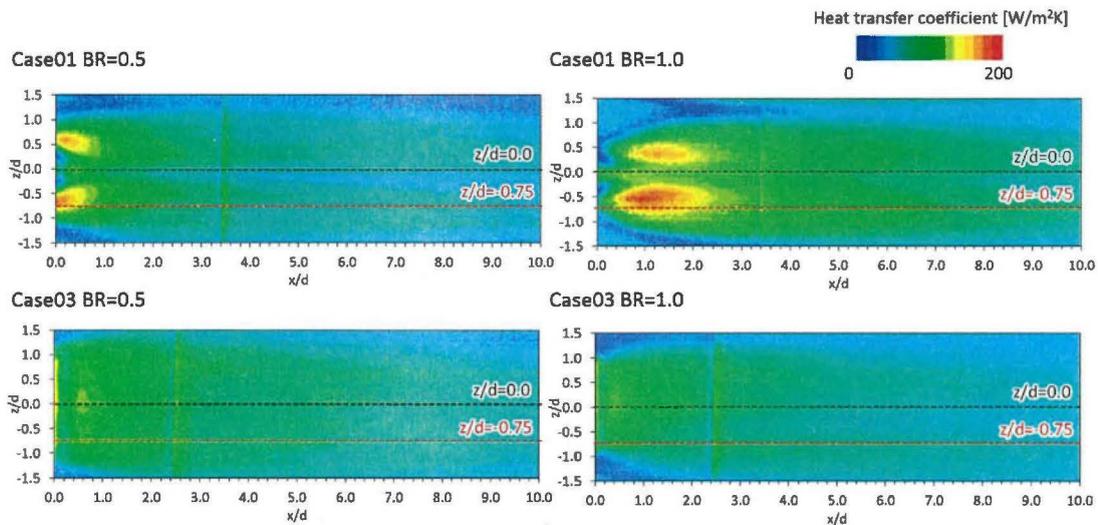


図 3.3. 73 熱伝達率分布(EFD)

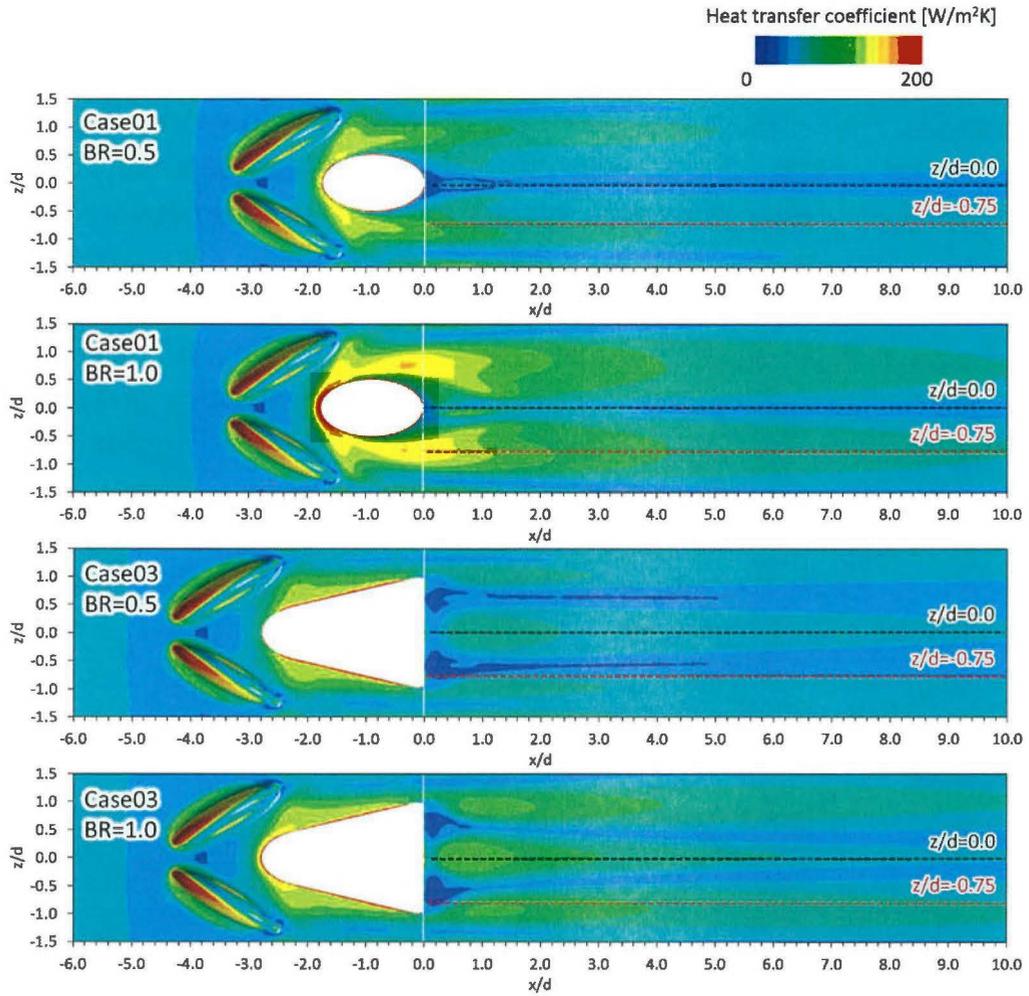


図 3.3.74 熱伝達率分布(CFD)

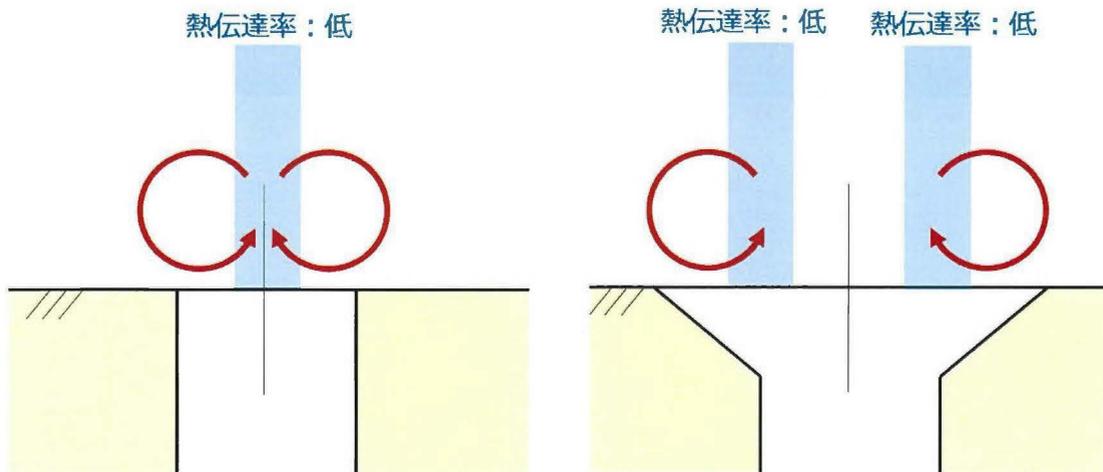


図 3.3.75 流れ場のイメージ

図 3.3.76 には, Case01 $BR=0.5$ における, 実験と数値解析によって得られた熱伝達率のプロファイルを示している. 実験と数値解析では, センターライン上での熱伝達率に比べると, $z/d=-0.75$ での熱伝達率の方が高い値を示している傾向が観察することができる. 一方で, 数値解析結果では, $z/d=-0.75$ の熱伝達率は比較的实验値に近い値を示しているのに対して, 冷却孔センターライン上での熱伝達率は実験に比べると非常に低く算出された. 図 3.3.77 には, Case01 $BR=1.0$ における, 実験と数値解析によって得られた熱伝達率のプロファイルを示している. 吹き出し比が高くなったため, 熱伝達率も同時に高くなっているが, $BR=0.5$ と同様に, 冷却孔センターライン上での熱伝達率は実験に比べると数値解析では過少に評価された. $z/d=-0.75$ 位置での熱伝達率は, $BR=0.5$ と同様に, 実験近いオーダーになる傾向も見られる. 図 3.3.78 には, Case03 $BR=0.5$ における, 実験と数値解析によって得られた熱伝達率のプロファイルを示している. 実験結果では, スパン方向の熱伝達率分布がほとんど見られないため, 各ライン上での熱伝達率は重なっている. 一方で, 数値解析では, 両ライン上での熱伝達率に差があることがわかる. 熱伝達率のオーダーに関しては, Case01 と同様に実験結果の方が比較的热伝達率を高く算出している. 図 3.3.79 には, Case03 $BR=1.0$ における, 実験と数値解析によって得られた熱伝達率のプロファイルを示している. この結果に関しては, 実験と数値解析結果が比較的近かったが, 熱伝達率の分布が異なっているため, 予測精度は十分でないと考えられる.

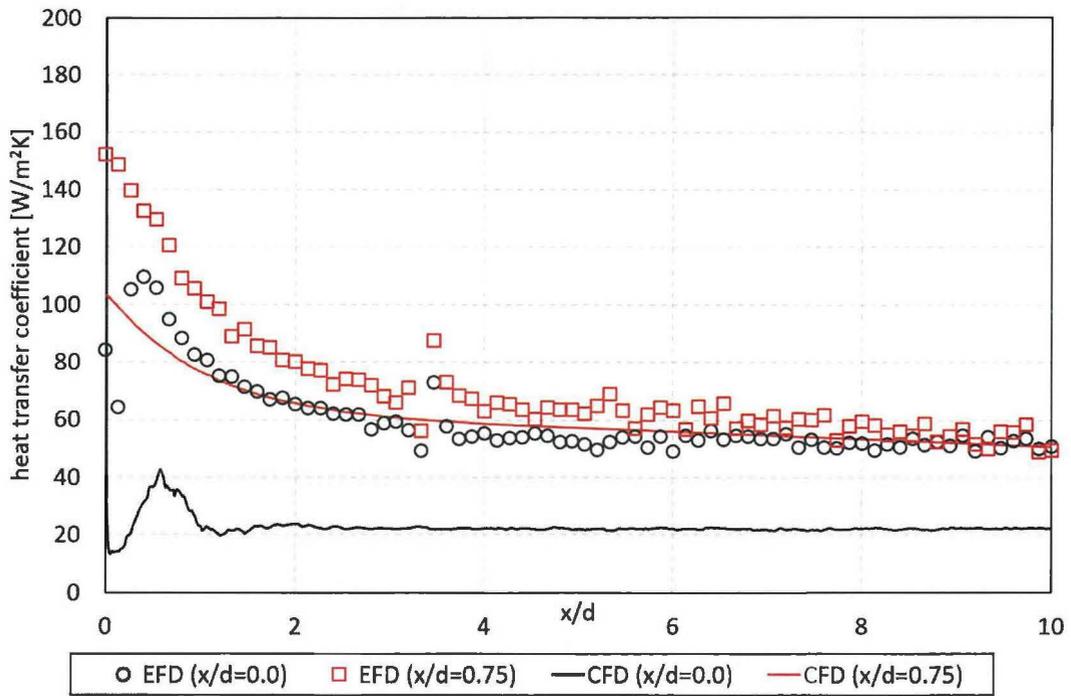


図 3.3.76 熱伝達率プロファイル(Case01 BR=0.5)

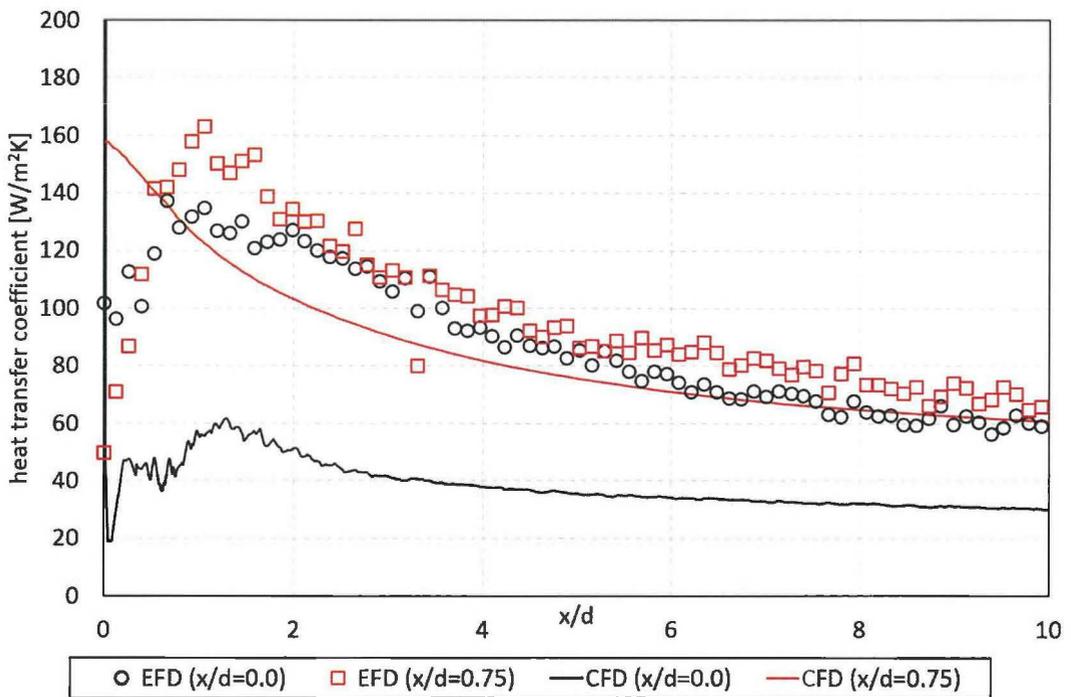


図 3.3.77 熱伝達率プロファイル(Case01 BR=1.0)

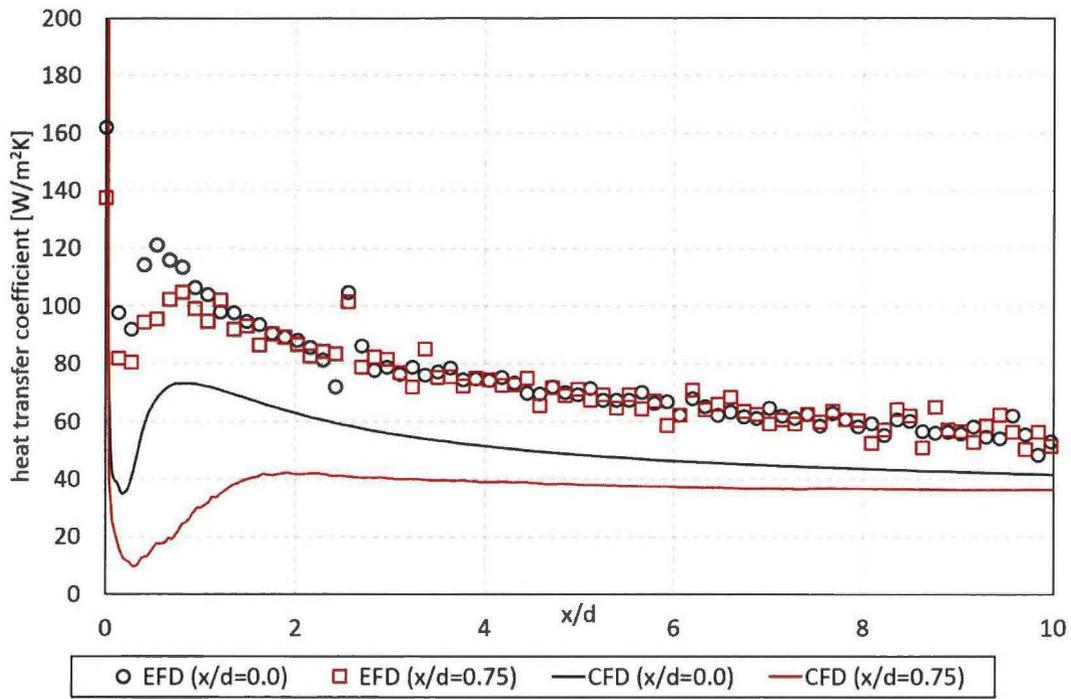


図 3.3.78 熱伝達率プロファイル(Case03 $BR=0.5$)

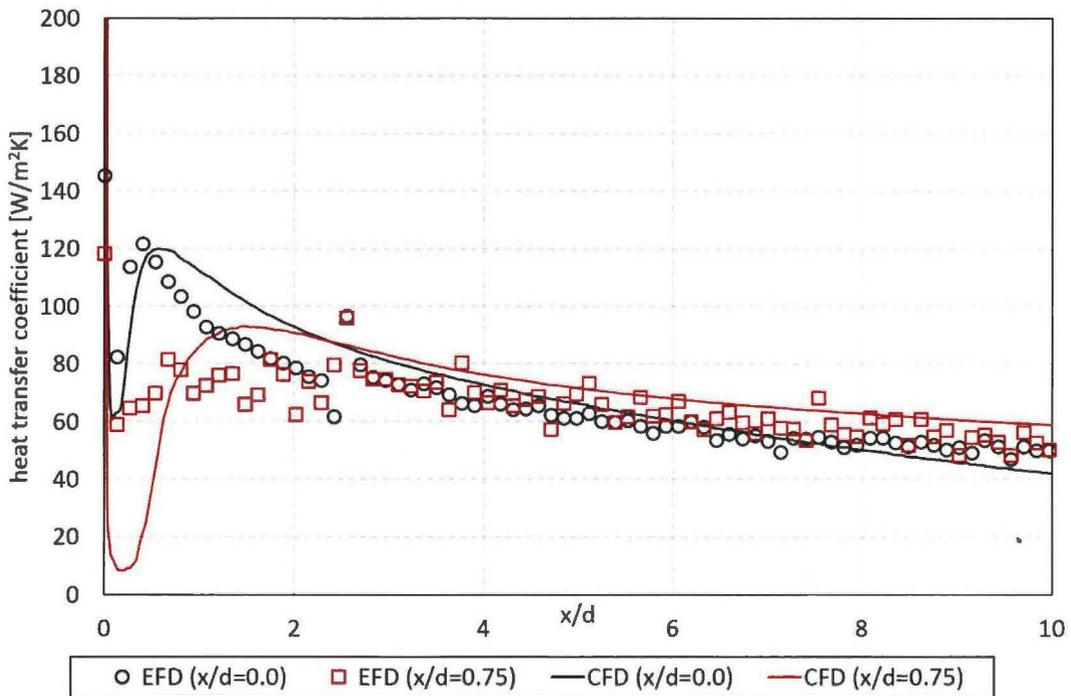


図 3.3.79 熱伝達率プロファイル(Case03 $BR=1.0$)

3.3.6.3 LES 解析結果

図 3.3.80 には、 Q 値(=0.01)の等値面を示している。計算結果は LES の瞬時解である。LES 結果のため、複数の細かい渦が観察されるが、代表的な渦構造は DFCD から発生している渦度、冷却孔から発生している渦である。冷却孔から吹き出した二次空気は、主流によるせん断のため、その領域でヘアピン渦が形成されている。DFCD においては、DFCD を通過する主流が剥離することによる剥離渦が、下流まで伸びている。ピッチが狭い場合には、周期境界を適用している影響で、隣のピッチの渦と干渉し、下流側で巻き上がり、壁面から渦コアが離れる。一方で、 $p/d=6.0$ の場合は、DFCD から発生する渦は、DFCD の傾いている方向へ流れ、下流領域で干渉を起こしている。冷却孔から発生する渦の巻き上がりの様子を確認するために、図 3.3.81 には、計算領域最下流から見た Q 値の等値面を示している。図を見ると、明らかに $p/d=3.0$ の場合は、渦コアが壁面から剥離している様子が観察され、この傾向は、LDV による流れ場計測で得た傾向と一致していることが分かる。

図 3.3.82 には、 $y/d=0.15$ の zx 平面内における z 方向の速度分布を示している。二次空気の存在する領域を識別するために、今回は $\eta=0.5$ の等値面を灰色で示している。今回は、DFCD から渦の発生している領域に関しては、スパン方向の速度成分が強く、主流と二次空気をスパン方向に移動させる効果があることが分かる。この速度領域は、冷却孔ピッチが広くなるに従って、スパン方向及び流れ方向に広がっている。これは、冷却孔ピッチが狭い場合は、DFCD から発生した渦同士が干渉し、スパン方向の速度成分が低下するためである。しかし、この速度領域が、必ずしも二次空気と干渉するとは言えないことも分かる。 $p/d=4.5$ の場合、DFCD から発生している図は、スパン方向に二次空気を移動させる速度成分を持っているが、二次空気とは干渉していない。 $p/d=6.0$ の条件に関しても、これは同様であり、 $x/d=5.0$ の領域では、二次空気をスパン方向に移動させる領域と、二次空気の存在領域は完全に離れている。これにより、実験結果では $p/d=6.0$ の場合に、完全に冷却孔ピッチの端まで広がることはなく、無冷却の領域が存在したと考えられる。以上のことから、DFCD の開き角度に関しては、最適な形態が他に存在すると考えられる。

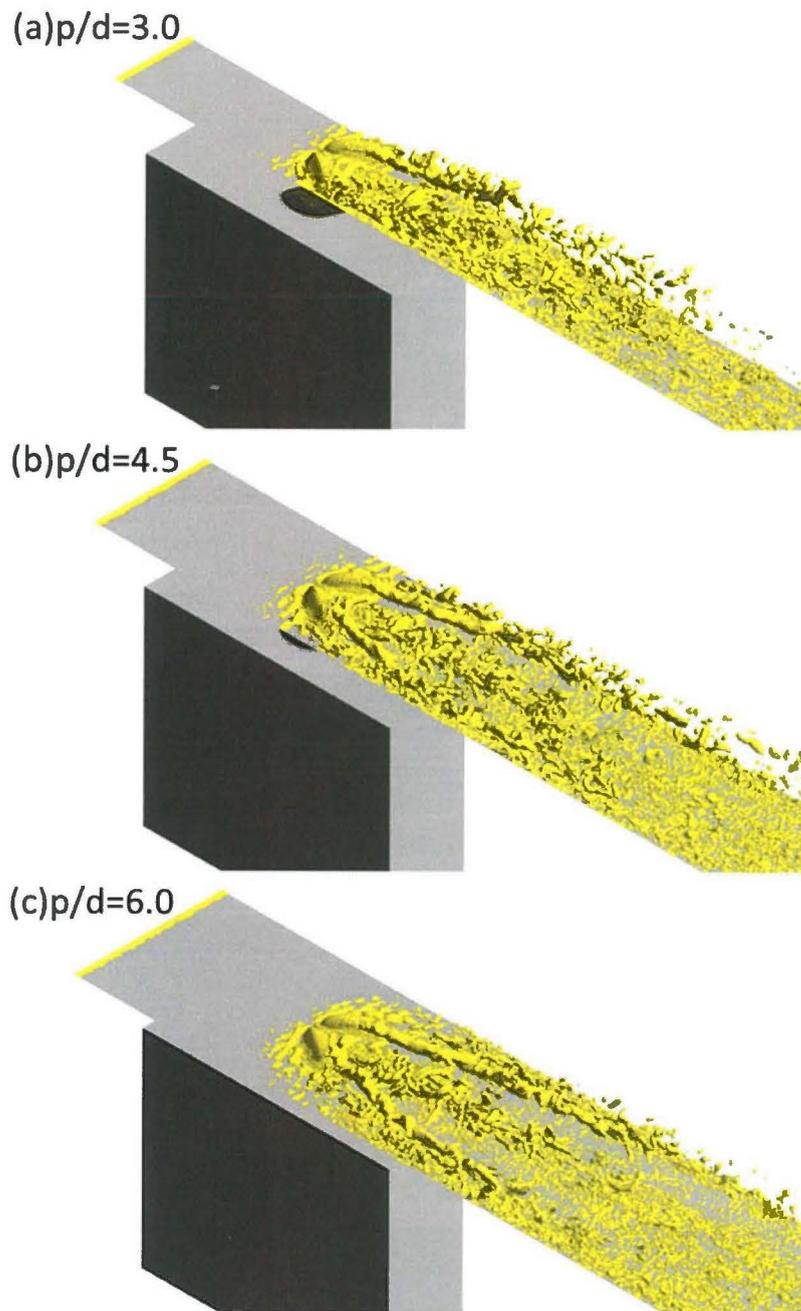


図 3.3. 80 Q 値の等値面 (斜視図, LES 瞬時解)

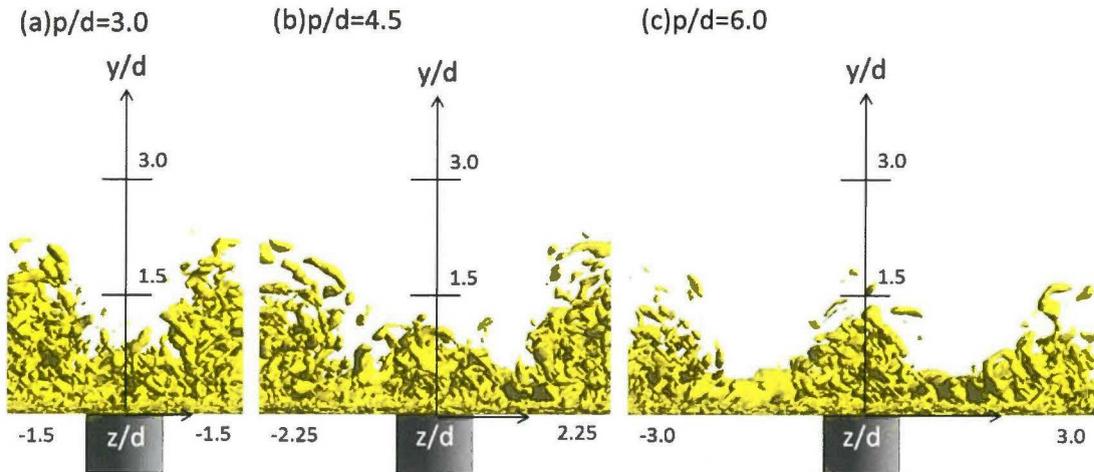


図 3.3.81 Q 値の等値面 (計算領域最下流から見た図, LES 瞬時解)

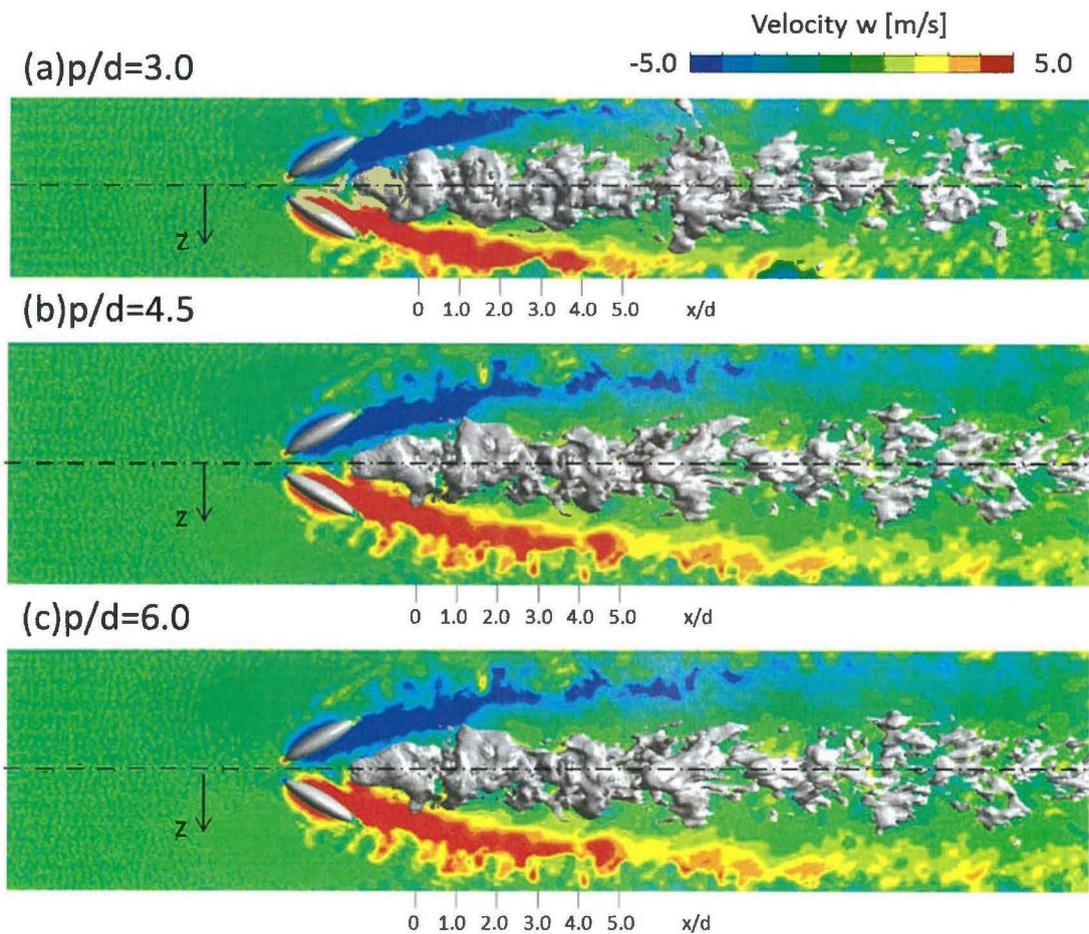


図 3.3.82 z 方向速度 ($y/d=0.15$ zx 平面)

次に，図 3.3. 83 に示すように，流れ方向流速 u と，壁面方向流速 v でなされる角度を δ と定義する． δ は，流れが壁面法線方向に対してどの程度の角度で流れているのか判別するために用いる．

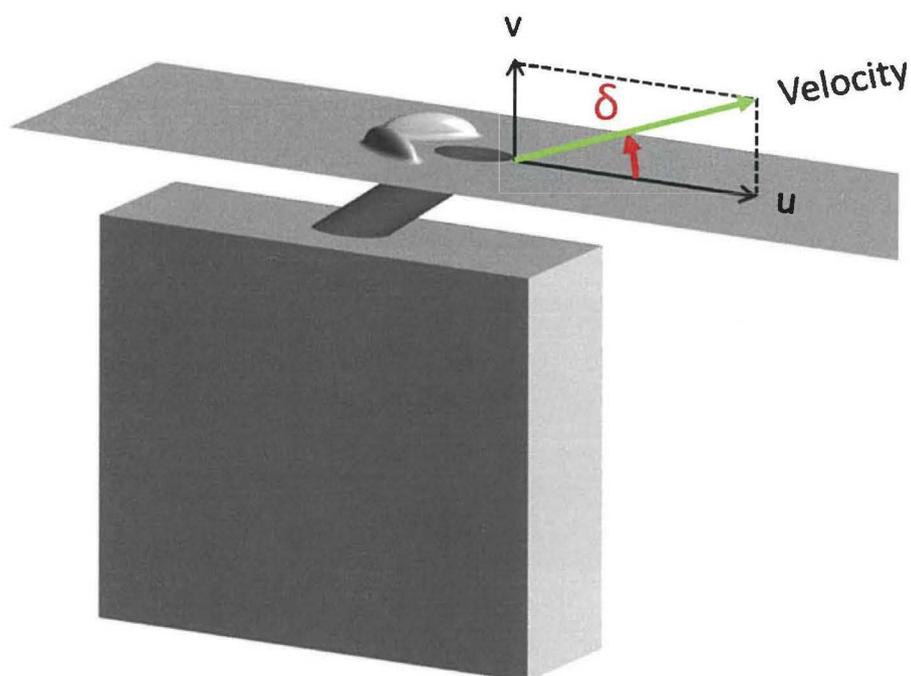


図 3.3. 83 角度の定義

図 3.3. 84 には，角度 δ の分布を示す．DFCD 付近の領域に関しては， δ が負の値となっており，壁面へ向かって流体を移動させる流れになっていることが分かる． $p/d=3.0$ においては，DFCD から発生した渦の存在する領域の中で， $x/d=1.0$ 付近までは δ の負の成分が比較的大きいが，それより下流の領域に関しては正と負の領域が混在する領域となっている．これは，DFCD から発生した渦同士が干渉するためである．ピッチがさらに広い条件では，二次空気と干渉するまでは δ の負の成分が強い．その後， $x/d=5.0$ 付近まで DFCD の存在するよう域では δ が負の領域となる．さらに下流領域では，渦崩壊によって，正と負の δ が混在する領域になっていると考えられる．

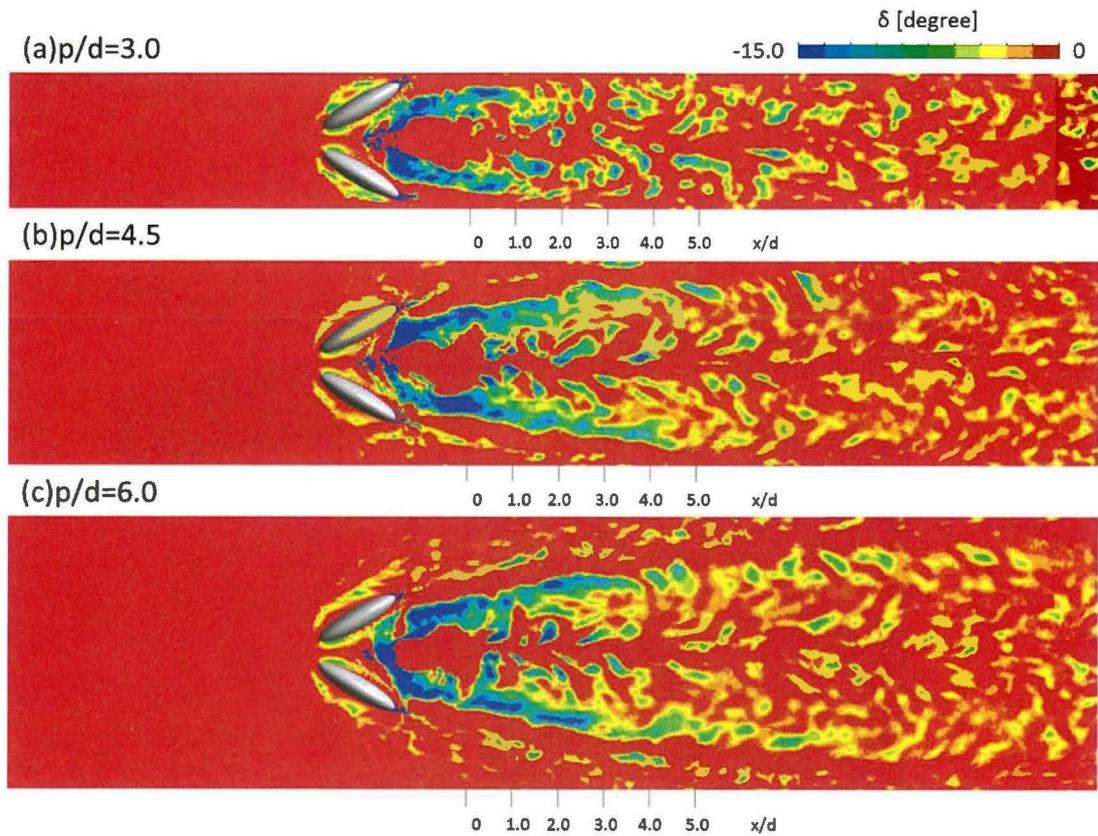


図 3.3. 84 δ 分布 ($y/d=0.15$ zx 平面)

参考文献 (3.3 節)

- (1) Sakai, E., Takahashi, T., Agata, Y., 2012, "Experimental Study on Effects of Internal Rib and Rear Bump on Film Effectiveness" ASME Turbo Expo 2012, GT2012-68268.

3.4 流入角の効果

3.4.1 はじめに

本節の目的は前節で有用性が示された”流れ制御デバイス”の実機適用を狙って、実機適用までに障害となると思われる要因について調査を行うことである。本節では、デバイスに対する主流流入角が変化した際の影響調査と、デバイスの開き角度が変化した際の調査、デバイス自体の耐久性向上へのアプローチとして、デバイス冷却に関して検討を行った。本節の目的は以下の通りである。

1. デバイスへの主流流入角が変化した際に、フィルム効率へ与える影響を詳細に調査すること。
2. デバイスの開き角度を変化させていったときの、フィルム効率、全圧損失等の性能への影響を調査すること。
3. 上流側の冷却孔から吹き出した冷却空気を用いて、下流側の冷却孔に設置したデバイスを冷却することをコンセプトに CFD での検討を行うこと。
4. Shaped hole の冷却孔長さや、出口形状を変化させて、フィルム冷却性能に与える影響を調査すること。

流入角の影響調査については、実験では主流の流入角を変化させることは装置の都合上難しいため、供試体冷却孔をスパン方向に傾けることで、疑似的に流入角の変化を再現し、実験を行った。

3.4.2 供試体

3.4.2.1 供試体形状

図 3.4.1 に本研究で用いた供試体の概要を示す。供試体は 2.4 節と同様の平板タイプであり、冷却孔ピッチは $p/d=3.0$ となっている。流入角モデルは、それぞれ Round hole と Shaped hole の冷却孔形状を用意しており、主流に対する傾きは 0deg, 5deg, 10deg である。0deg モデルに関しては前節の結果を参照する。

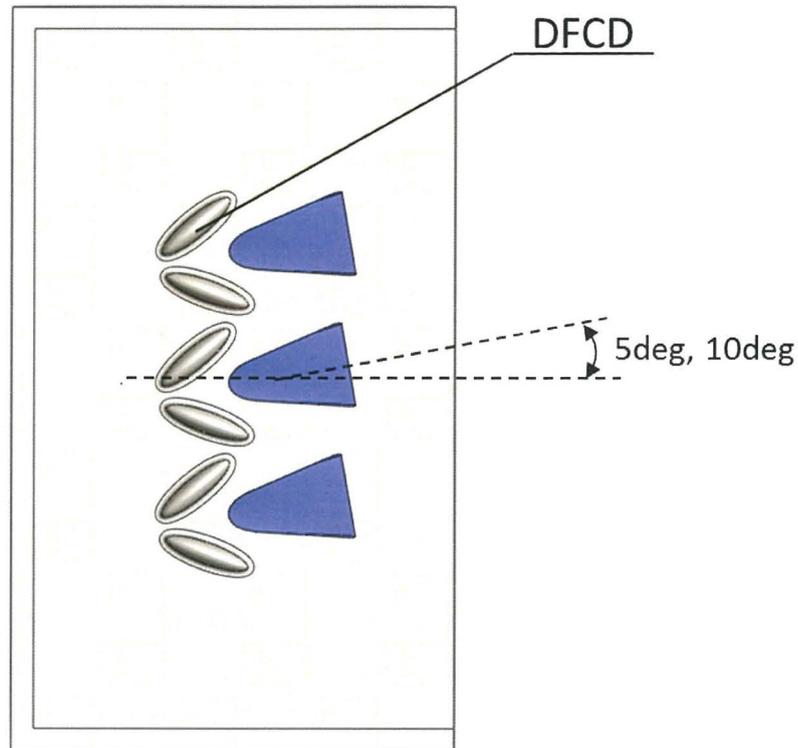


図 3.4.1 流入角モデル供試体形状

3.4.2.2 流れ制御デバイス形状

流入角を変化させた試験では、前節で使用した流れ制御デバイスと同様の形状、配置のデバイスを使用。デバイスの開き角度に関する調査では、デバイスの形状は前節と同じであるが、開き角度を従来の 30deg から変化させている。

3.4.3 流入角を変化させた試験・試験条件

本節では、冷却孔ピッチを $p/d=3.0$ で固定し、流入角、デバイスの有無、吹き出し比を可変パラメータとして試験を行った。表 3.4.1 に詳細な試験条件を示す。

表 3.4.1 試験条件

	Hole geometry	p/d	FCD	Angle	BR
RH	Round hole	3.0	×	0deg	0.5, 1.0 (空力試験時は $BR=0.0$ も実施)
				5deg	
				10deg	
SH	Shaped hole	3.0	×	0deg	
				5deg	
				10deg	
RH DFCD	Round hole	3.0	○	0deg	
				5deg	
				10deg	
SH DFCD	Shaped hole	3.0	○	0deg	
				5deg	
				10deg	

3.4.4 流入角を変化させた試験・実験結果

3.4.4.1 壁面フィルム効率・熱伝達率

(1) 壁面フィルム効率分布

図 3.4. 2, 図 3.4. 3 に実験で得られた壁面フィルム効率分布を示す。コンターは流入角 0deg に関しては $p/d=3.0$ を記載しており, 5deg, 10deg に関しては流入角変化の影響を確認するために $p/d=6.0$ で処理を行っている。コンター上の白線は供試体の継ぎ目である。図 3.4. 2 には $BR=0.5$ 条件における, RH, RH DFCD の壁面フィルム効率分布を示す。RH では, コンターに目立った変化は現れていないが, 若干冷却孔出口付近のフィルム効率が低下している。また RH DFCD の 5deg, 10deg において, 0deg と比較すると出口直後の局所的に高いフィルム効率を示していた領域が顕著に減少していることがわかる。さらに, RH DFCD 5deg, 10deg では, 下流側領域におけるフィルム効率の減衰が早くなっており, 流入角の変化により, 冷却孔から発生した CRVP や縦渦に何らかの変化があったと考えられる。

図 3.4. 3 には, $BR=1.0$ のフィルム効率分布を示す。 $BR=0.5$ ではコンター上で大きな変化の見られなかった DFCD 無しの形態において, $BR=1.0$ では下流側での二次空気の壁面付着性及び, 拡散性が向上していることがわかる。これは, 流入角の変化により, CRVP の対称性が崩れ, どちらかの渦度が卓越し始めたために, 壁面付着性, 拡散性の向上につながっているものと考えられる。また, RH DFCD では, 下流側での壁面付着性と拡散性の向上だけでなく, 冷却孔出口付近における局所のフィルム効率も, 流入角が増加するほど向上していく傾向にあった。

図 3.4. 4 は冷却孔形状が SH であり, 図 3.4. 2, 図 3.4. 3 に比べると全体的にフィルム

効率が增加していることがわかる。図 3.4.4 は、 $BR=0.5$ のフィルム効率分布を示しており、DFCD 無し SH では、下流側における付着面積の増加と、冷却孔出口付近に見られる局所的に高いフィルム効率を示している領域が下流側まで拡大している。しかしながら、SH DFCD では、流入角 0deg の条件で確認された高い局所フィルム効率は、流入角 5deg 、 10deg では、出口付近に存在するのみとなっており、 0deg に比べて減衰していると考えられる。また、下流側のフィルム効率も低下しており、 0deg と比較すると、DFCD 設置による大幅なフィルム効率の向上は確認できない。

図 3.4.5 は、 $BR=1.0$ のフィルム効率分布を示している。流入角 0deg では、下流側領域でフィルム効率が減衰し付着面積が減少していくが、流入角増加に伴い、下流側での付着面積が増加し、フィルム効率が向上している様子が見られる。SH DFCD では、冷却孔出口付近の局所フィルム効率の減衰は 0deg モデルに比べると早い、スパン方向へ広く拡散しており、特に流入角 10deg では下流側におけるフィルムの付着面積も向上している。

図 3.4.6 には、RH におけるスパン方向平均フィルム効率を示す。デバイスを設置しなかった場合、流入角の増加にともないフィルム効率はそれぞれの吹き出し比でわずかに変化をしているが、デバイスを設置した場合には、フィルム効率の変化量が大きく、 $BR=0.5$ ではほぼ全ての計測領域に渡って、 $BR=1.0$ では冷却孔近傍のフィルム効率が大きく変化する。図 3.4.7 には、SH におけるスパン方向平均フィルム効率を示しているが、SH の場合には局所的にフィルム効率に変化するのではなく、流入角の変化に伴いほぼ全ての計測領域で影響が出てくることが分かった。

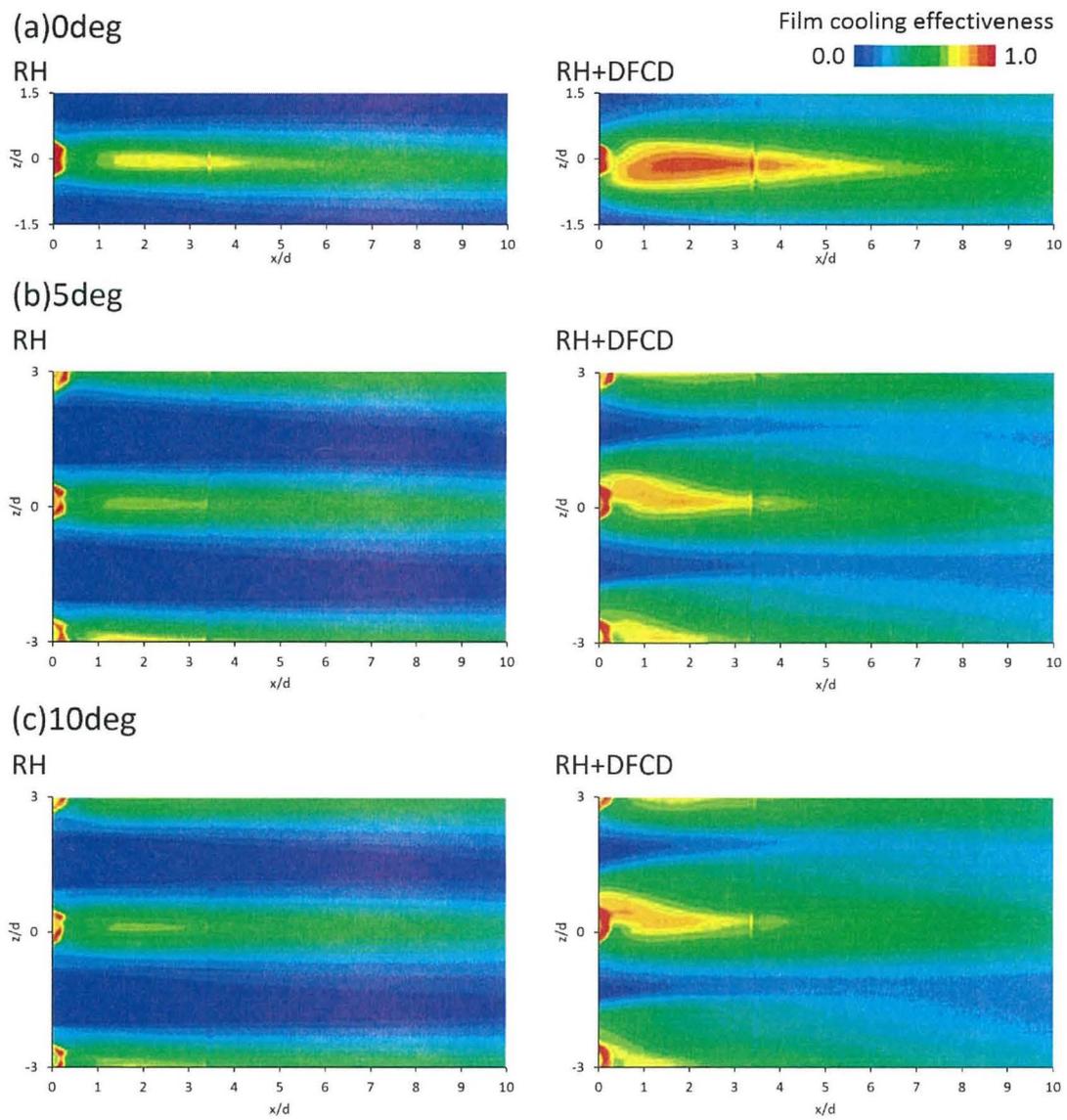


図 3.4.2 壁面フィルム効率分布 (RH, $BR=0.5$)

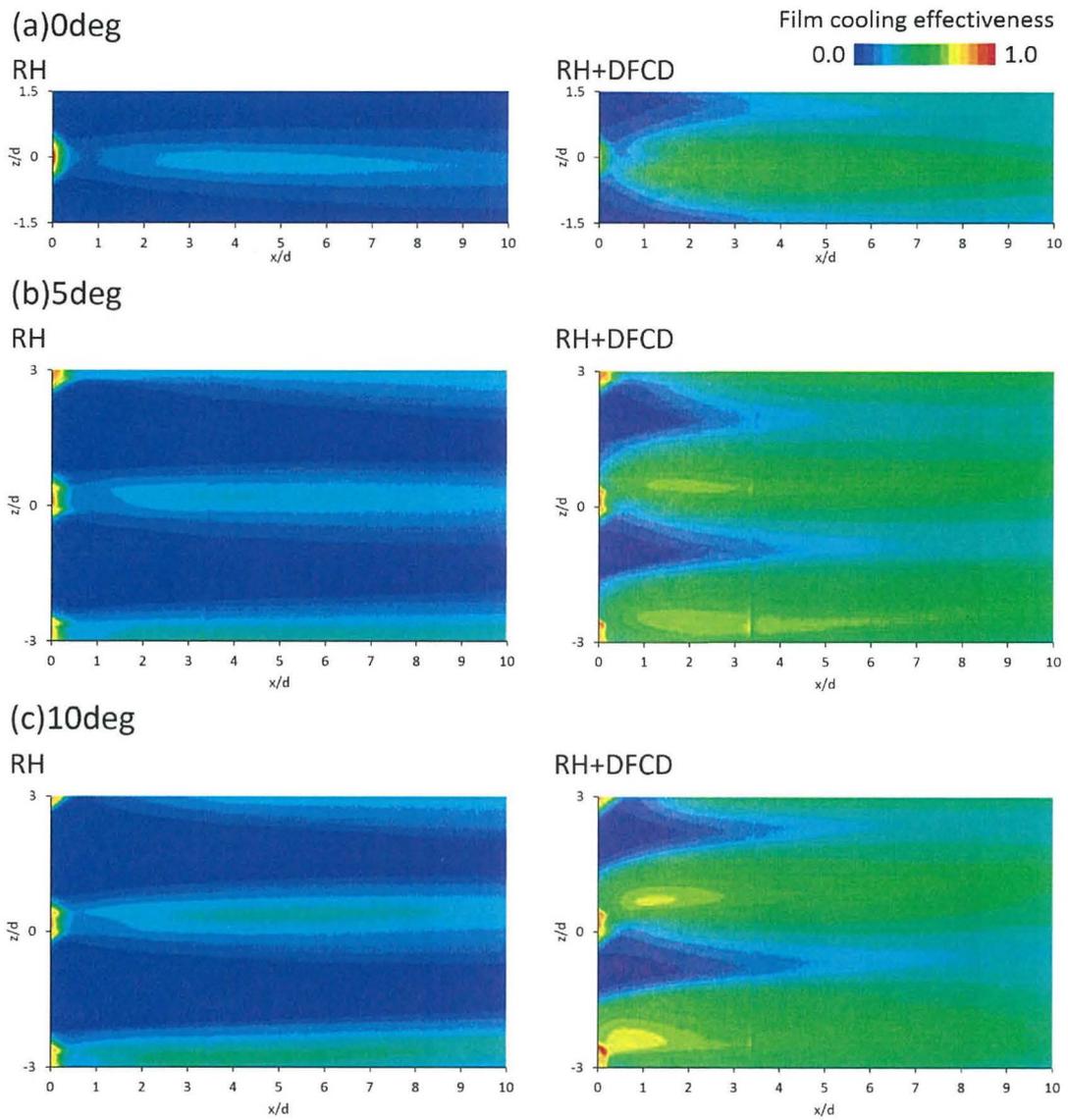


図 3.4.3 壁面フィルム効率分布 (RH, $BR=1.0$)

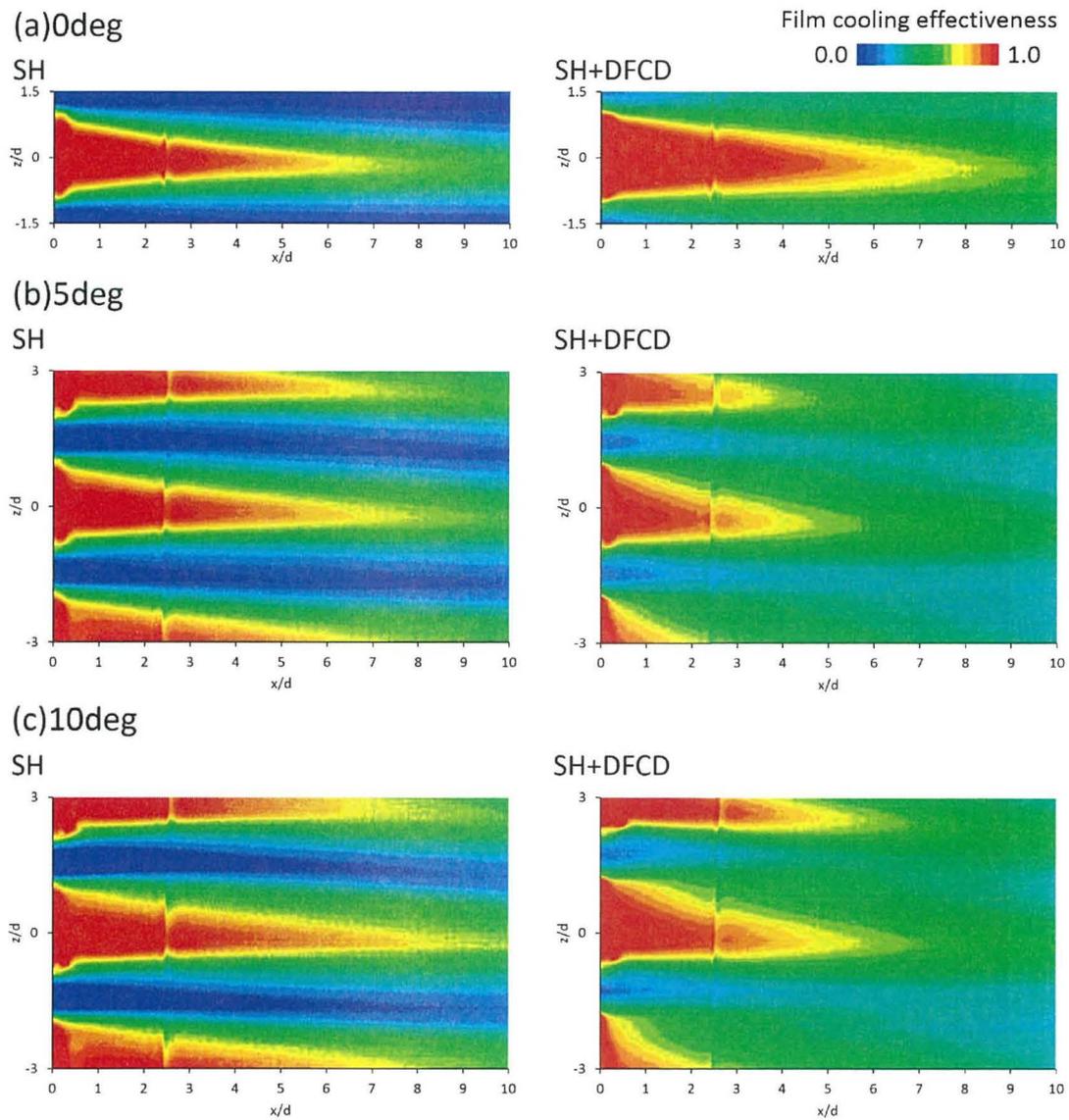


図 3.4.4 壁面フィルム効率分布 (SH, $BR=0.5$)

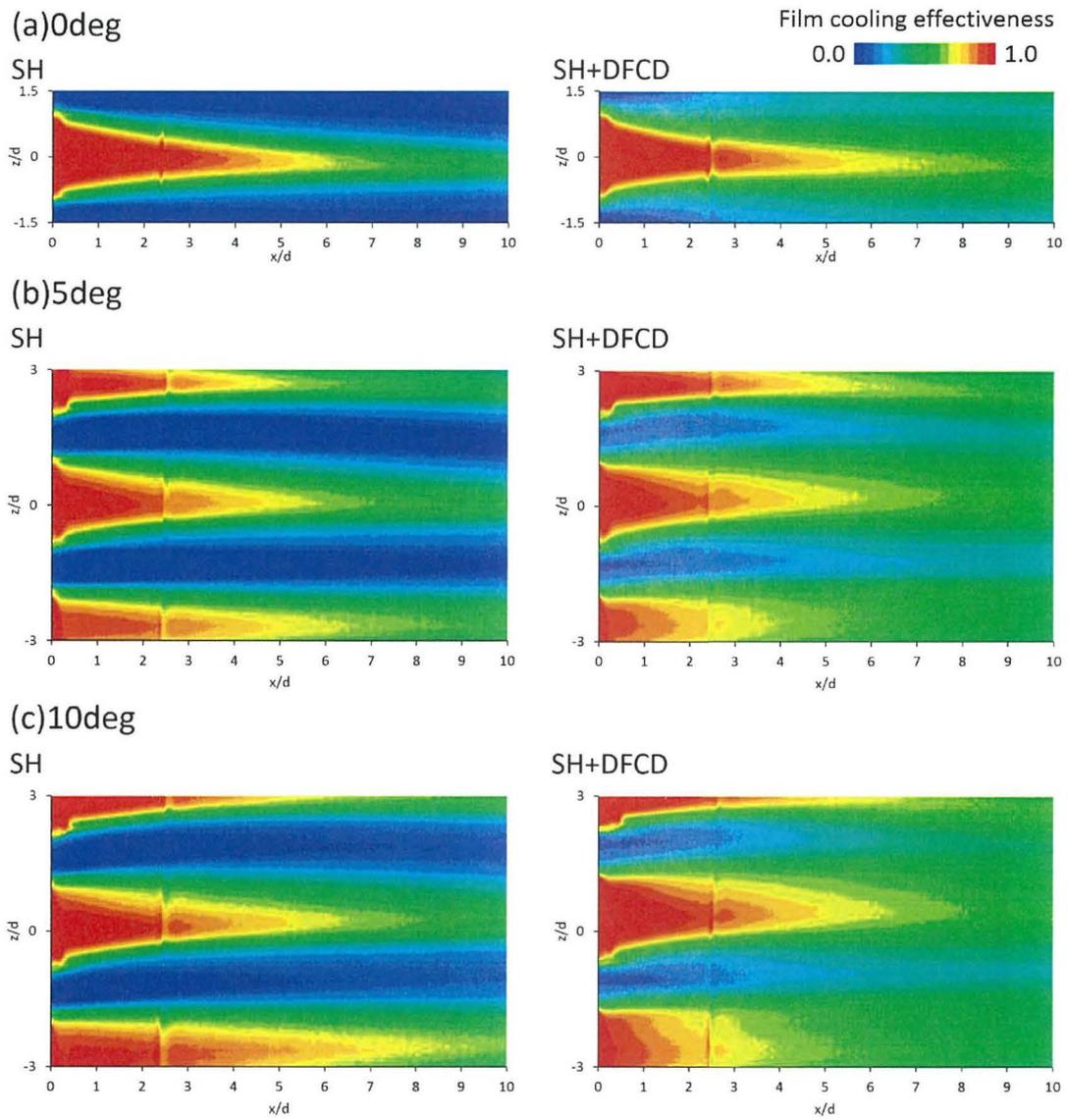
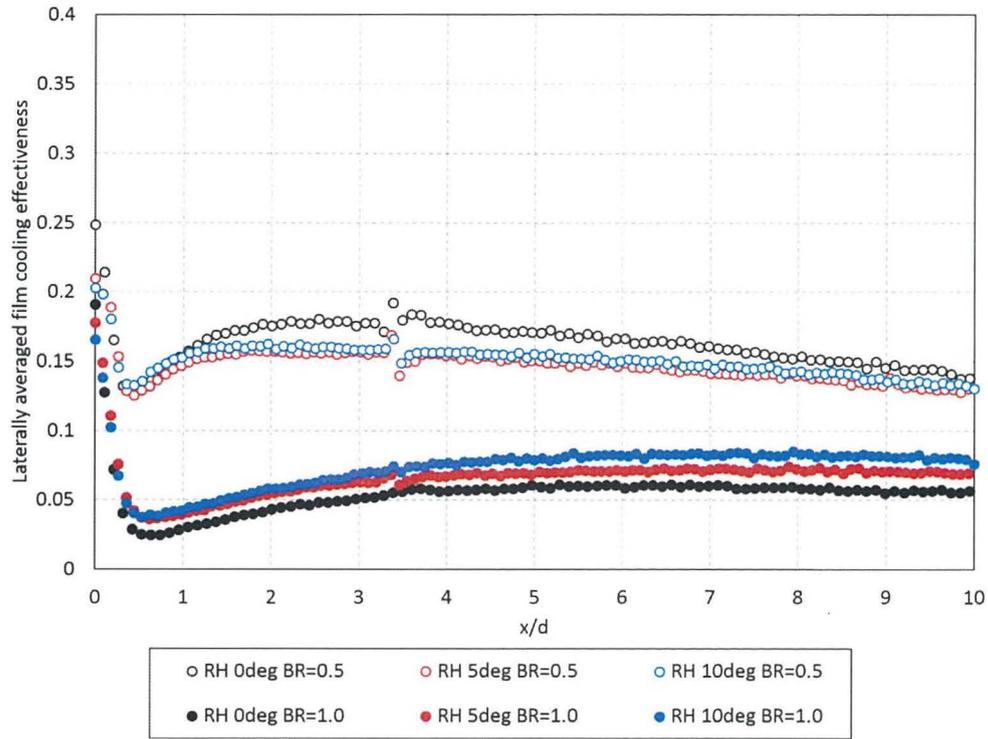


図 3.4.5 壁面フィルム効率分布 (SH, $BR=1.0$)

(a) Without DFCD



(b) With DFCD

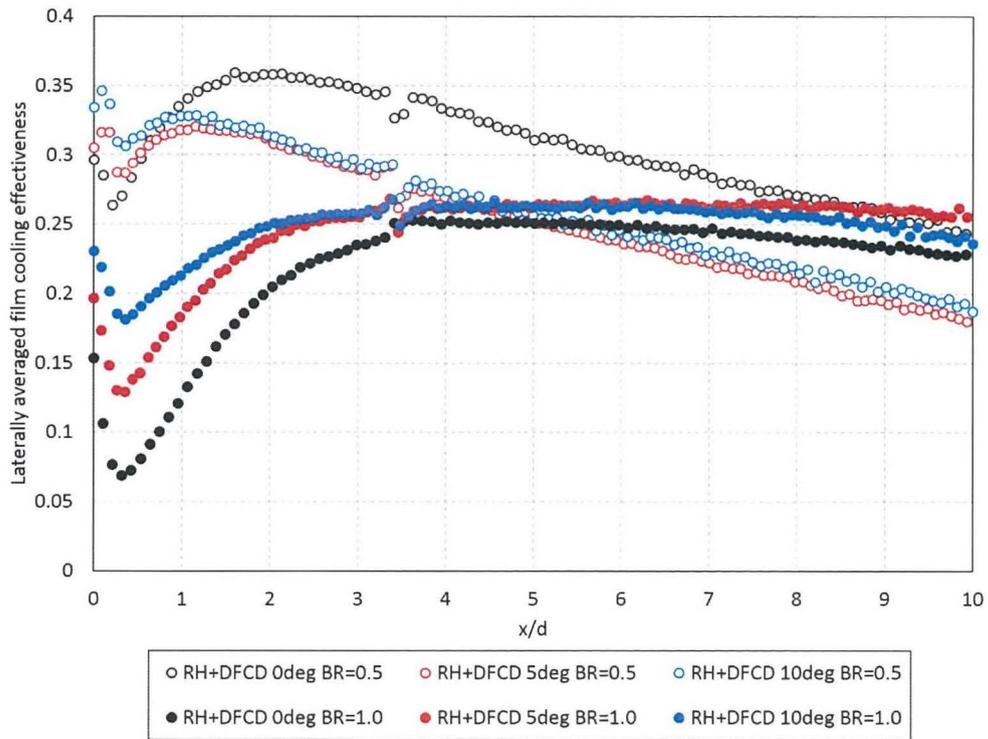
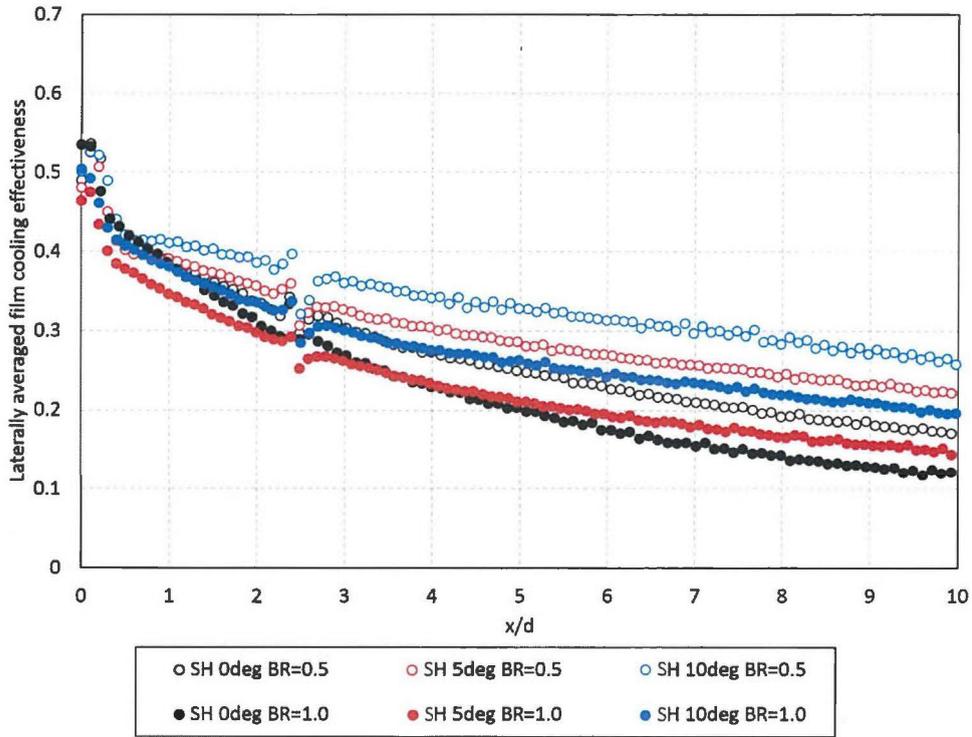


図 3.4.6 スパン方向平均フィルム効率 (RH)

(a) Without DFCD



(b) With DFCD

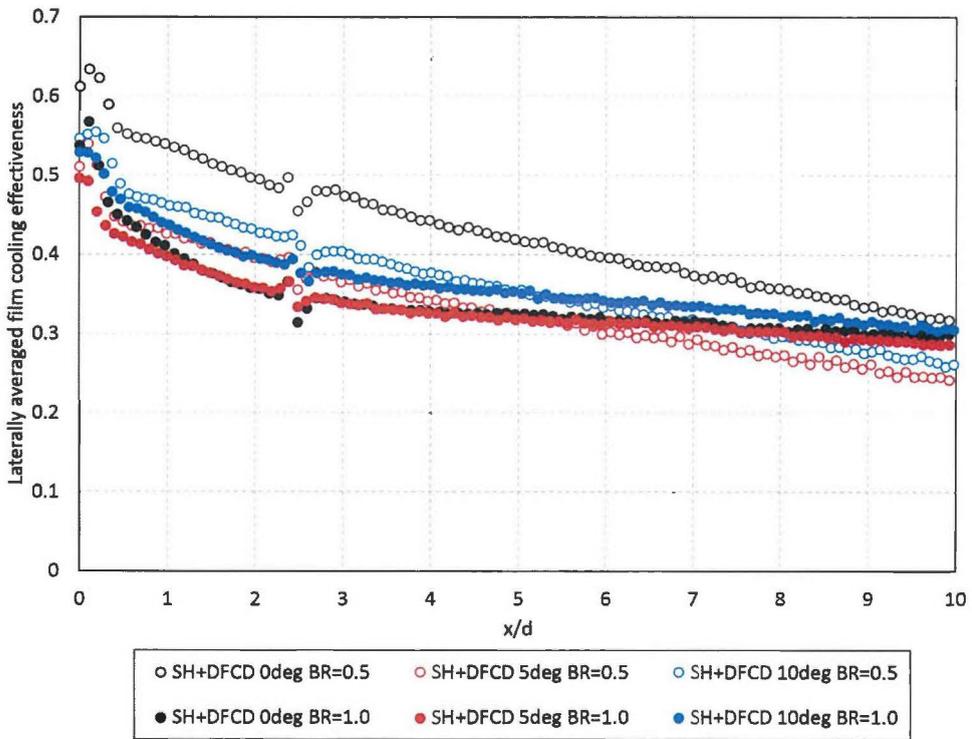
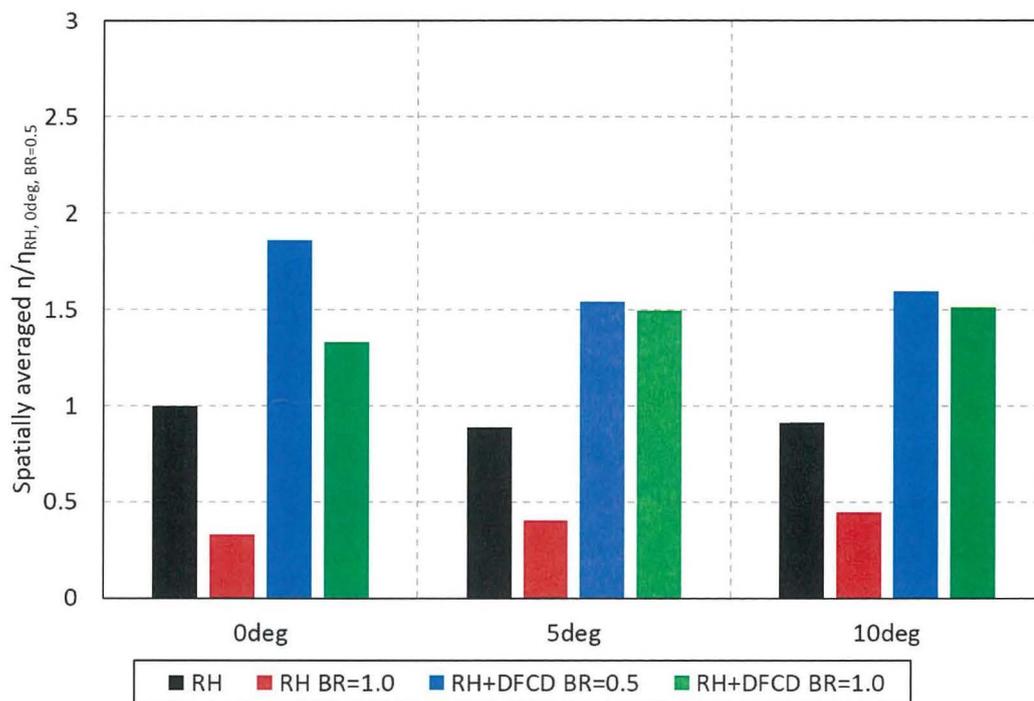


図 3.4.7 スパン方向平均フィルム効率 (SH)

図 3.4.8 には各条件における面平均フィルム効率($0 \leq x/d \leq 10$)を示す。RH $BR=0.5$ では、流入角の増加に伴い、コンター上で局所フィルム効率がわずかに減少している様子が確認できたことから、流入角 5deg, 10deg では面平均フィルム効率が減少している。しかし、 $BR=1.0$ では、流入角増加に伴い、徐々にフィルム効率が増加している。SH では、RH と異なった傾向を示しており、 $BR=0.5, 1.0$ 両条件で、流入角増加とともに、フィルム効率が増加していた。このフィルム効率上昇は、フィルム効率分布で確認された、下流側での壁面付着性と拡散性の向上や、冷却孔出口付近における局所のフィルム効率が下流側まで伸びていたことに起因すると考えられる。DFCD 有り条件については、流入角を設けた条件では、RH, SH 共に $BR=0.5$ と $BR=1.0$ でフィルム効率の値がほぼ等しくなることが特徴である。RH DFCD, SH DFCD とともに、 $BR=0.5$ では流入角 0deg の条件と比化繰ると、面平均フィルム効率は低くなった。これは、フィルム効率分布で確認された、出口付近の局所フィルム効率が低下したことと、下流側でのフィルム効率の減衰が早まっていたことに起因すると考えられる。しかし、 $BR=1.0$ では 5deg, 10deg において、徐々にフィルム効率が向上する傾向が見られた。

図 3.4.9 には、流入角条件における、0deg からのフィルム効率の変化率を示した表を示す。特に流入角 10deg の時に効率変化が大きくなる傾向にあり、RH $BR=1.0$ では、40%程度の効率上昇が確認された。しかし、もともと RH $BR=1.0$ はフィルム効率としてかなり低いため、他の形態と効率が逆転することはなかった。SH では両吹き出し比において、3~25%程度の効率上昇が見られた。

(a) Round hole



(b) Shaped hole

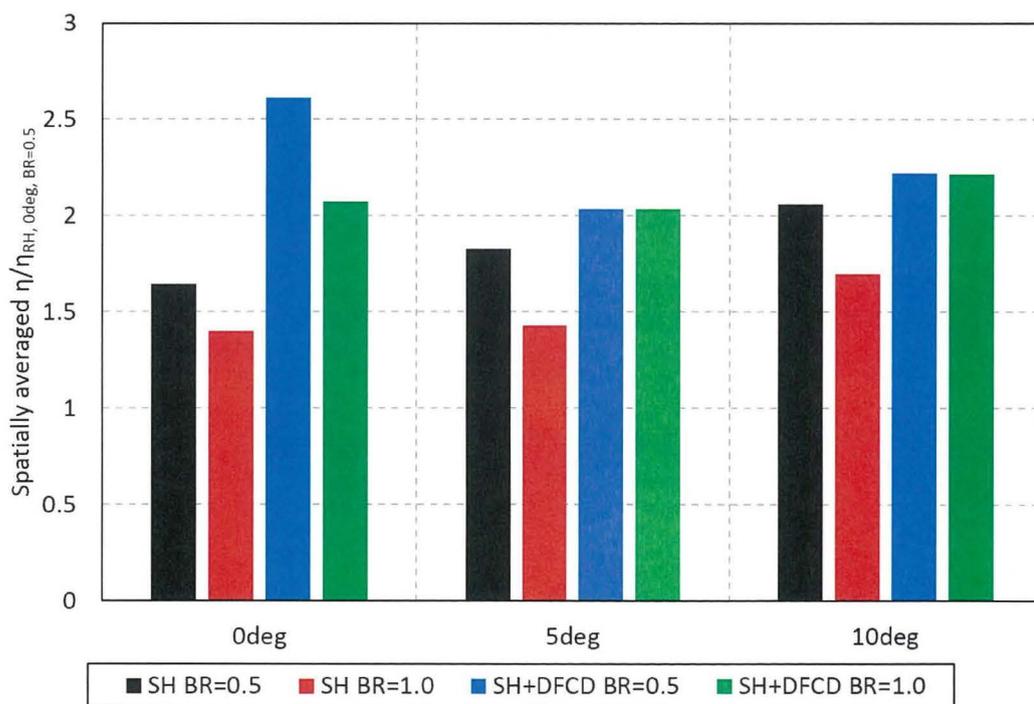
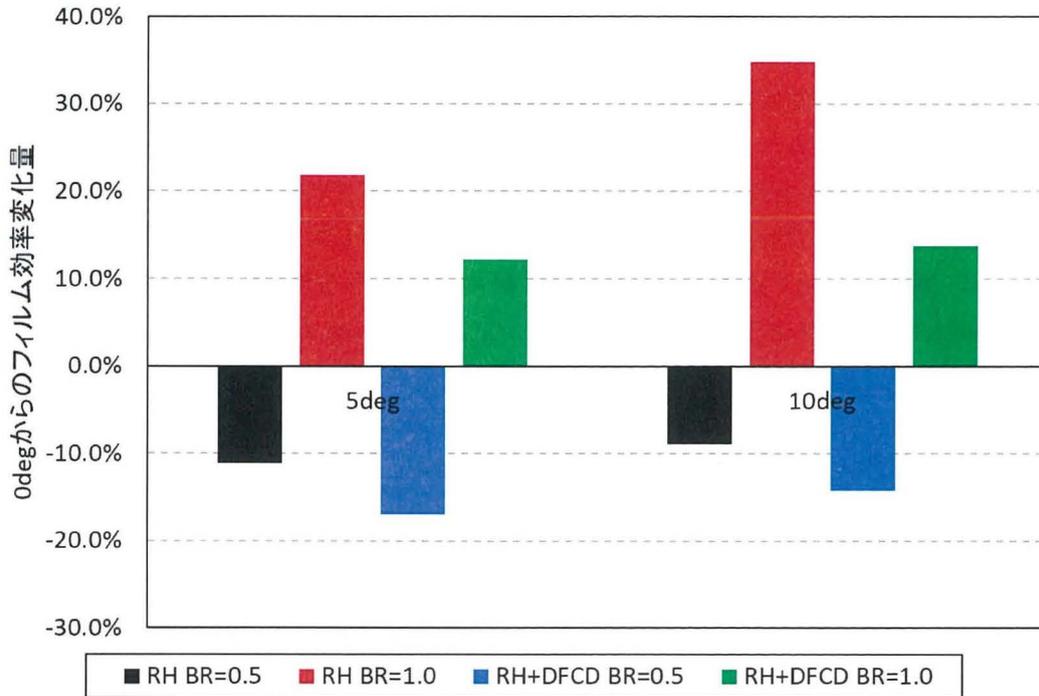


図 3.4.8 面平均フィルム効率

(a) Round hole



(b) Shaped hole

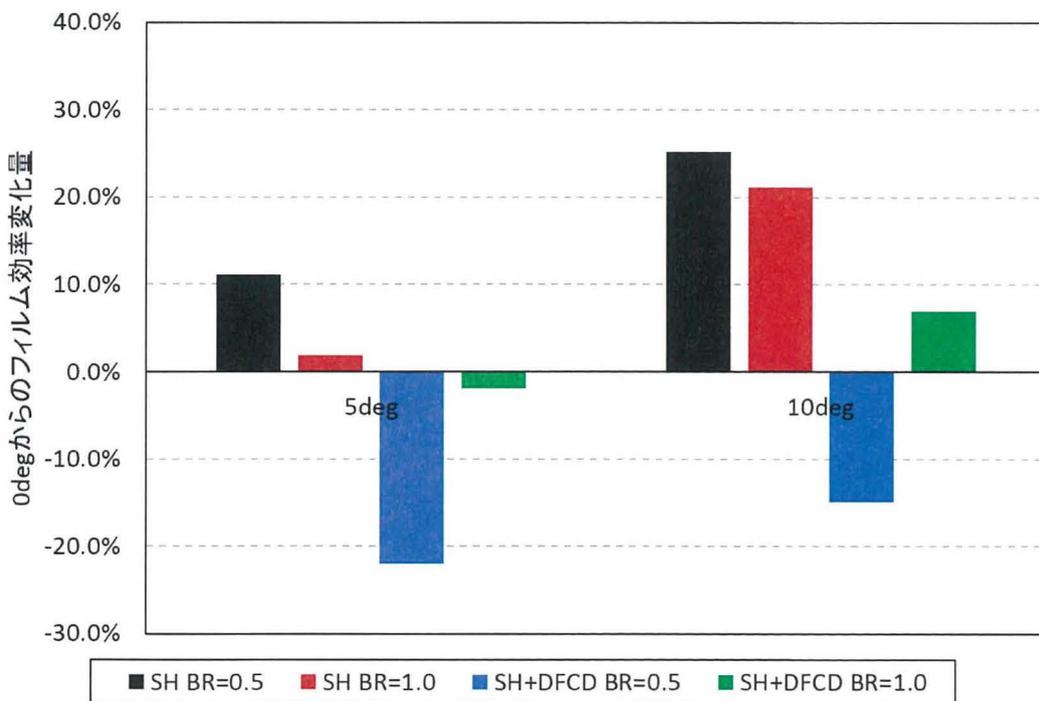


図 3.4.9 面平均フィルム効率 (0deg 条件からの変化量)

(2) 熱伝達率

図 3.4. 10, 図 3.4. 11 には各吹き出し比条件における, RH, RH DFCD の熱伝達率分布を示す. コンターは流入角 0deg に関しては $p/d=3.0$ の結果を記載しており, 5deg, 10deg に関しては流入角変化の影響を確認するために $p/d=6.0$ で処理を行っている. $BR=0.5, RH$ 0deg, RH DFCD 0deg では二次空気吹き出しの影響を受け, 冷却孔下流の領域で熱伝達率が高くなっている. 特に RHDFCD では, 前述の通り縦渦が存在している領域で熱伝達率が高くなっている. RH 5deg, 10deg では, 熱伝達率分布が非対称となっており, 各冷却孔の下流視左手側の方で熱伝達率が局所的に高くなる領域が確認される. これは, 流入角を設けたことで, 正の渦度が大規模化したために, 正の渦度の存在領域である各冷却孔の下流側において, 熱伝達率の局所的な増加が見られたと考えられる. RH DFCD 5deg, 10deg では, 熱伝達率分布に大きな変化は見られないが, 流入角条件において若干, 熱伝達率が局所的に高い領域の減衰が早いように見える. また, $BR=1.0$ では, 二次空気運動量が増加したことで, 全体的に熱伝達率の増加が見られる. しかし, RH 5deg, 10deg では, 0deg に比べると熱伝達率の低下している様子が確認される. 流入角を設けることで CRVP のうち正の渦度が支配的となるが, 吹き出し比増加に伴い, さらにそれが顕著となったため, 正負の渦度の干渉は 0deg に比べると小さくなると考えられる. それに対し, 0deg においては CRVP が対称に存在しているために, 正負の渦度の干渉が盛んに行われ, 熱伝達率が増加したものと考えられる. RH DFCD では, 下流視右手側において, 熱伝達率が局所的に高い範囲がスパン方向に拡大している. しかし, この下流視右手側の熱伝達率は下流側へ持続性は流入角 0deg に比べると弱くなっている. また, 下流視左手側の熱伝達率領域は, スパン方向の拡散性こそ弱いものの, 下流側への持続性は下流視右手側と比べて高い. これは, DFCD から発生する縦渦の強弱に起因していると考えられ, 正の渦度が大規模化する縦渦の領域では, スパン方向への拡散性が強まり, 負の渦度の存在する領域では, 正の渦度が存在する領域に比べるとミキシングが弱いために, 下流側まで局所熱伝達率が持続していたものと考えられる. 図 3.4. 12, 図 3.4. 13 には SH における熱伝達率分布を示しているが, RH ほど特徴的な分布ではなく, スパン方向に非対称にはなっているが, 局所的な熱伝達率の増加・減少はほとんど発生していない様子が分かる.

図 3.4. 16, 図 3.4. 17 には面平均熱伝達率と, 熱伝達率の変化量を示している. 熱伝達率の変化に関しては全てが同様の傾向になっており, 流入角の増加と共に全て熱伝達率が低減する結果となった. したがって, 冷却孔のセンターラインに対して対称な流れよりも, より非対称な流れ場の方が, 熱伝達率の低減効果があることが分かった.

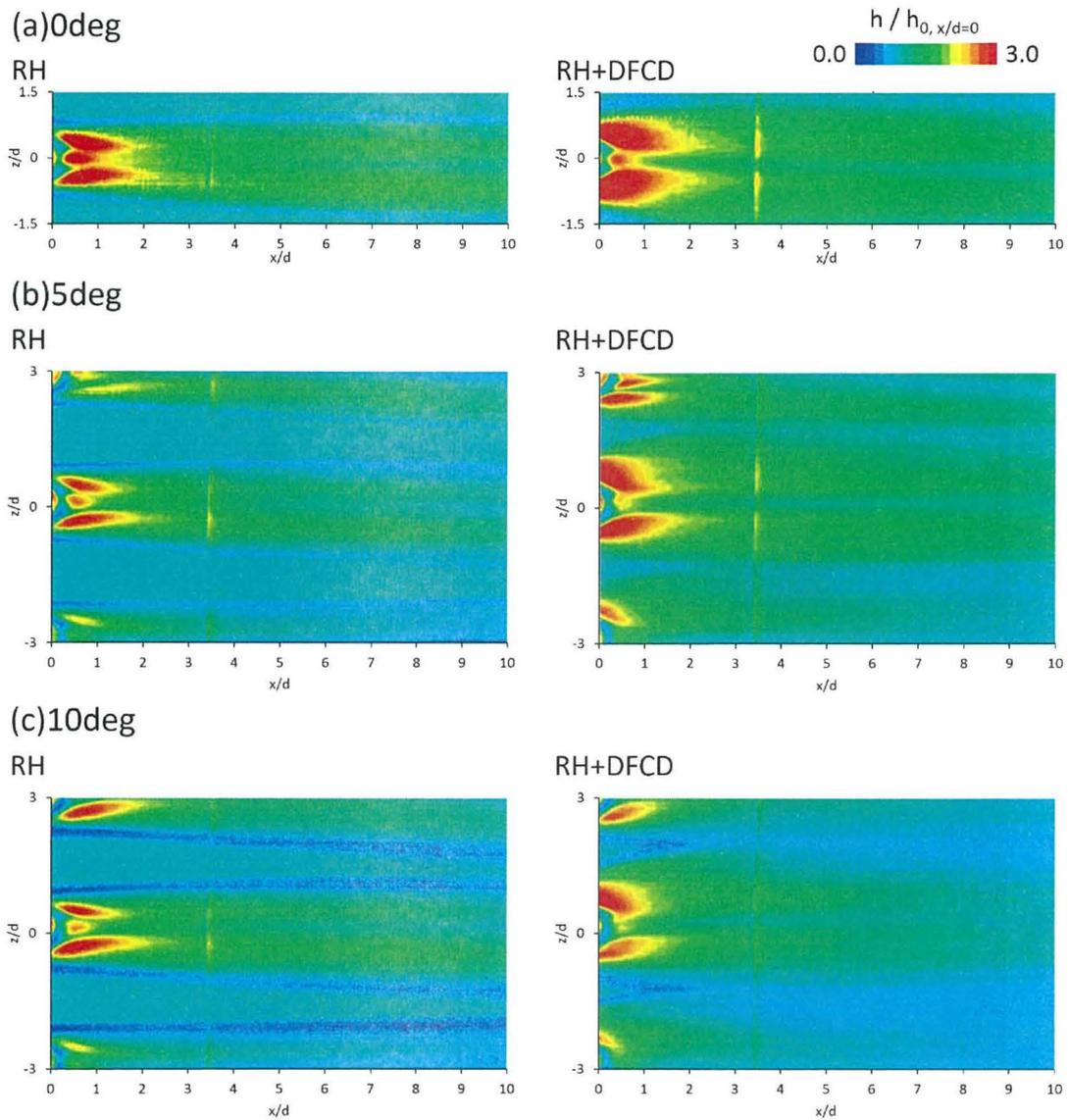


図 3.4.10 熱伝達率分布 (RH, $BR=0.5$)

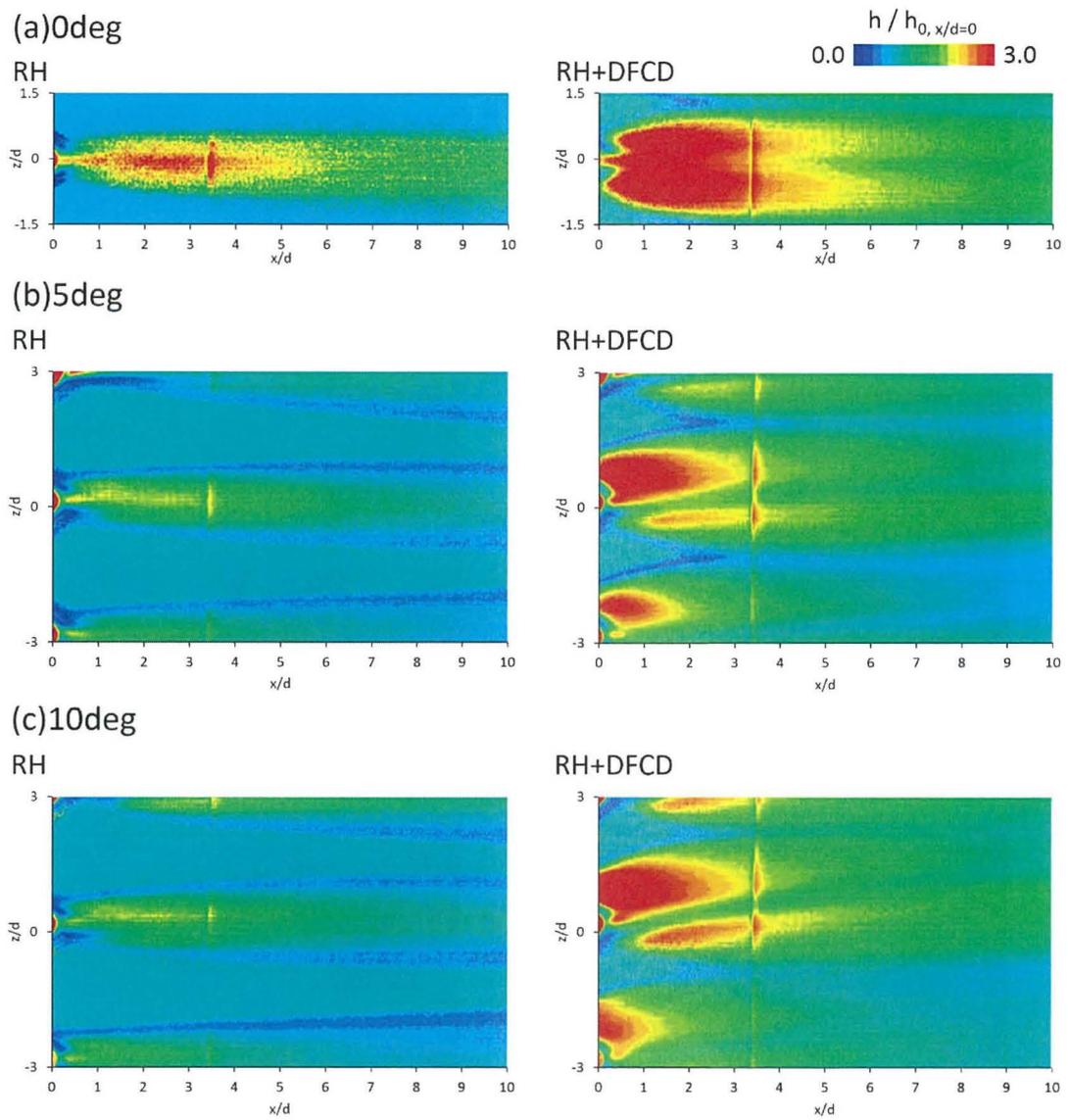


図 3.4.11 熱伝達率分布 (RH, $BR=1.0$)

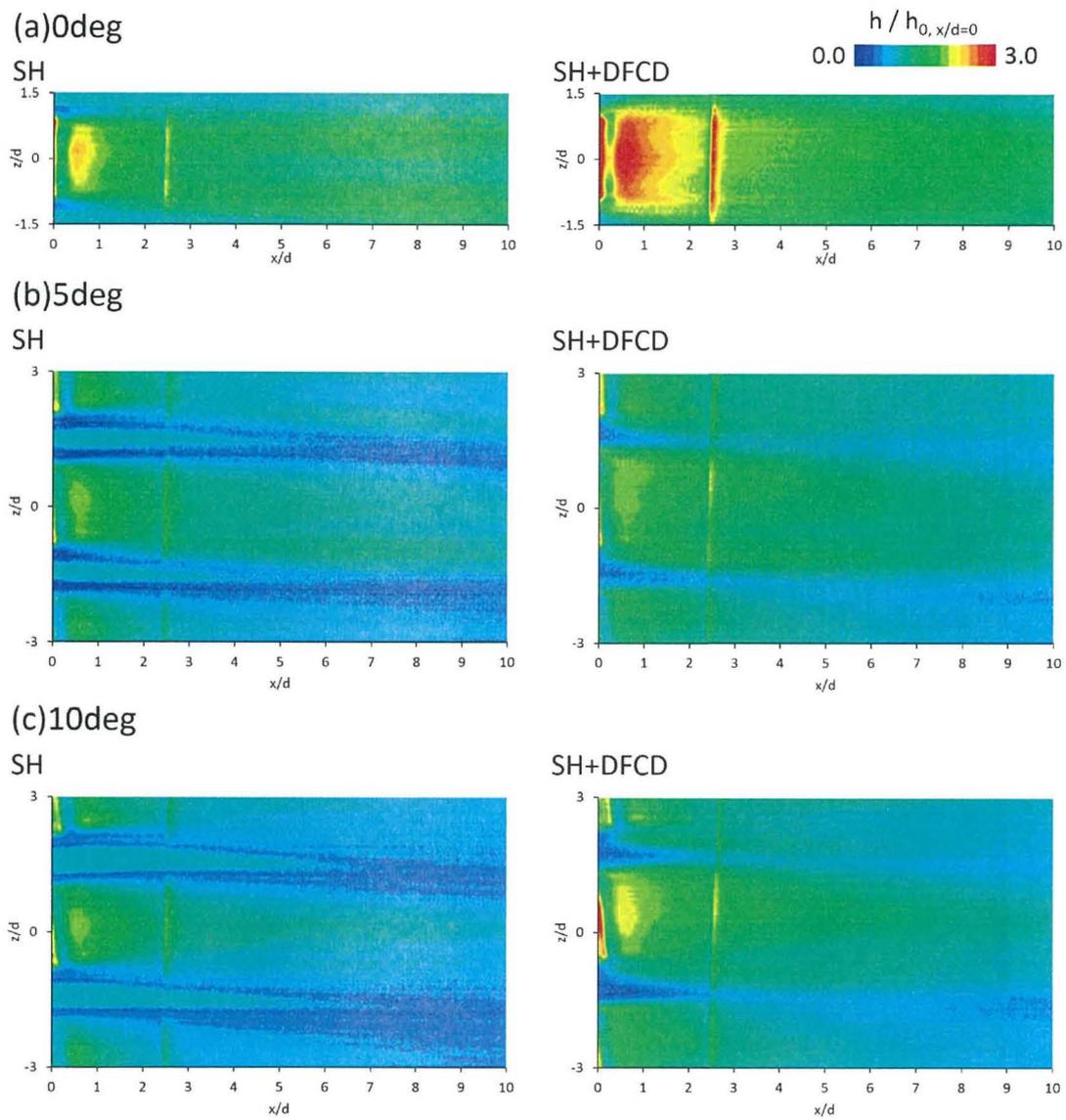


図 3.4.12 熱伝達率分布 (SH, $BR=0.5$)

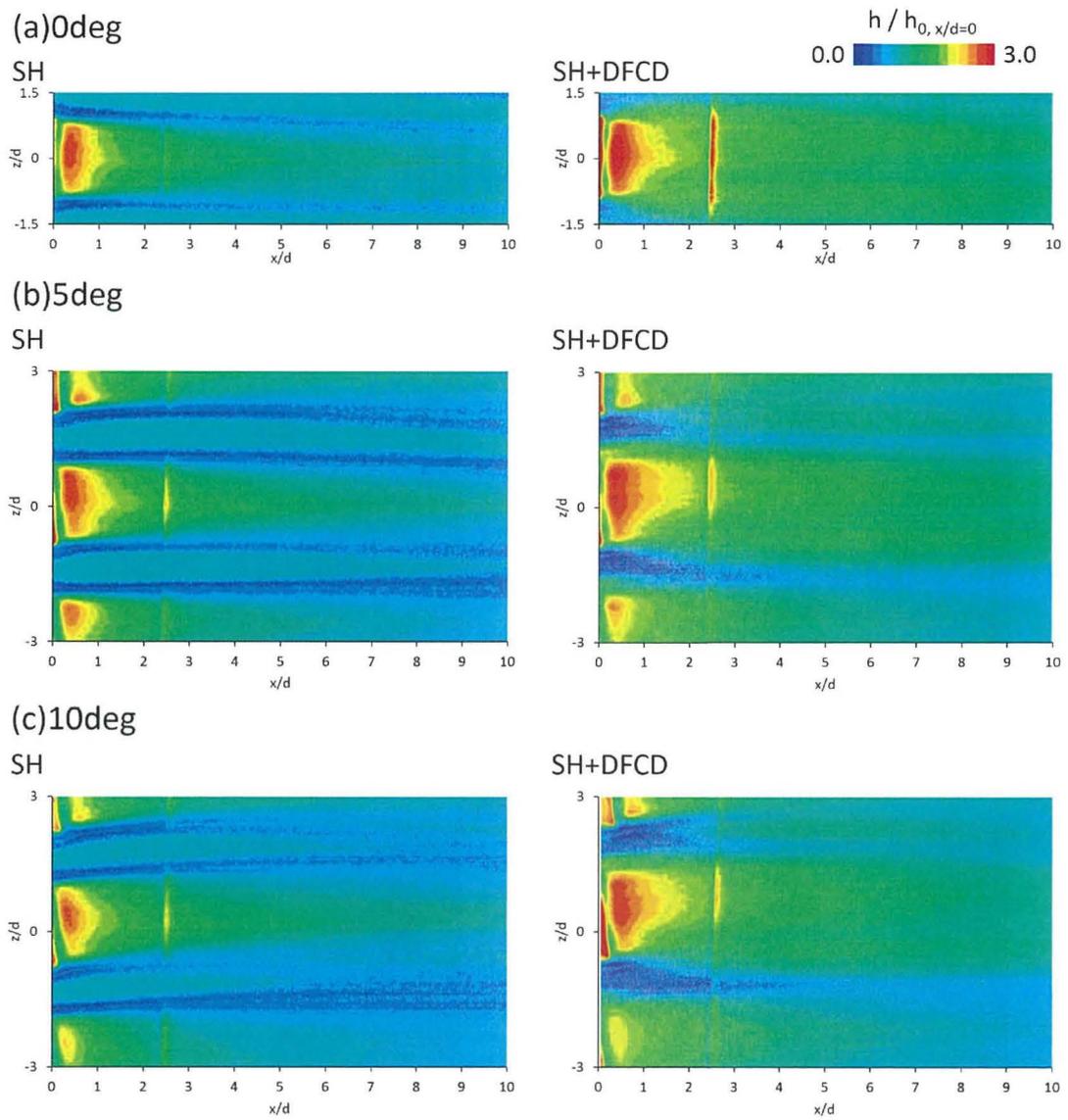
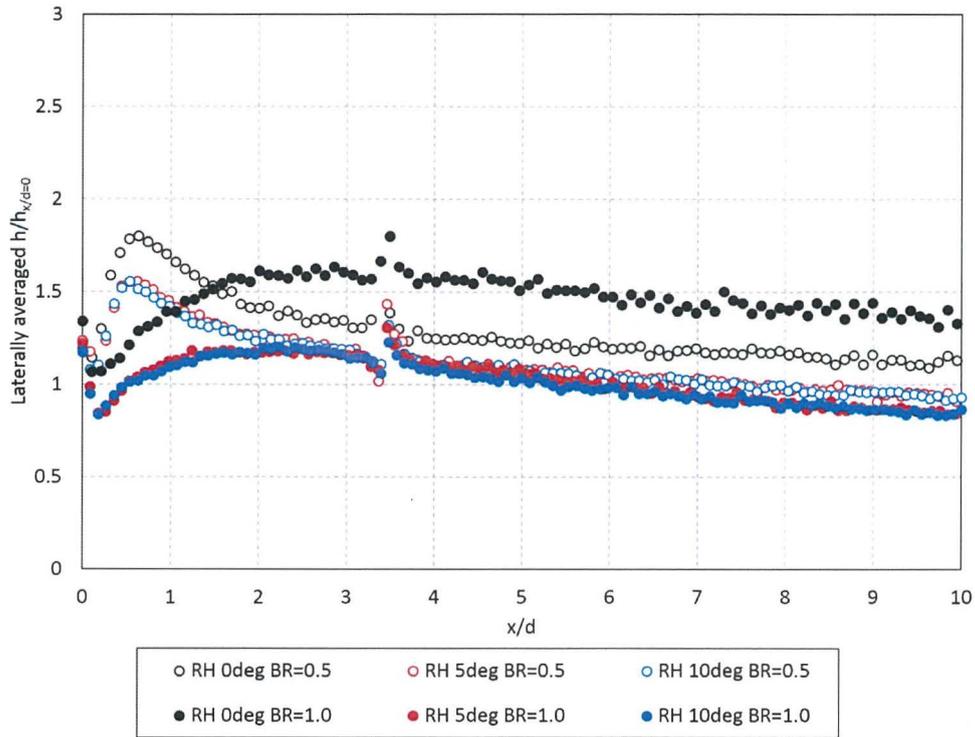


図 3.4.13 熱伝達率分布 (SH, $BR=1.0$)

(a) Without DFCD



(b) With DFCD

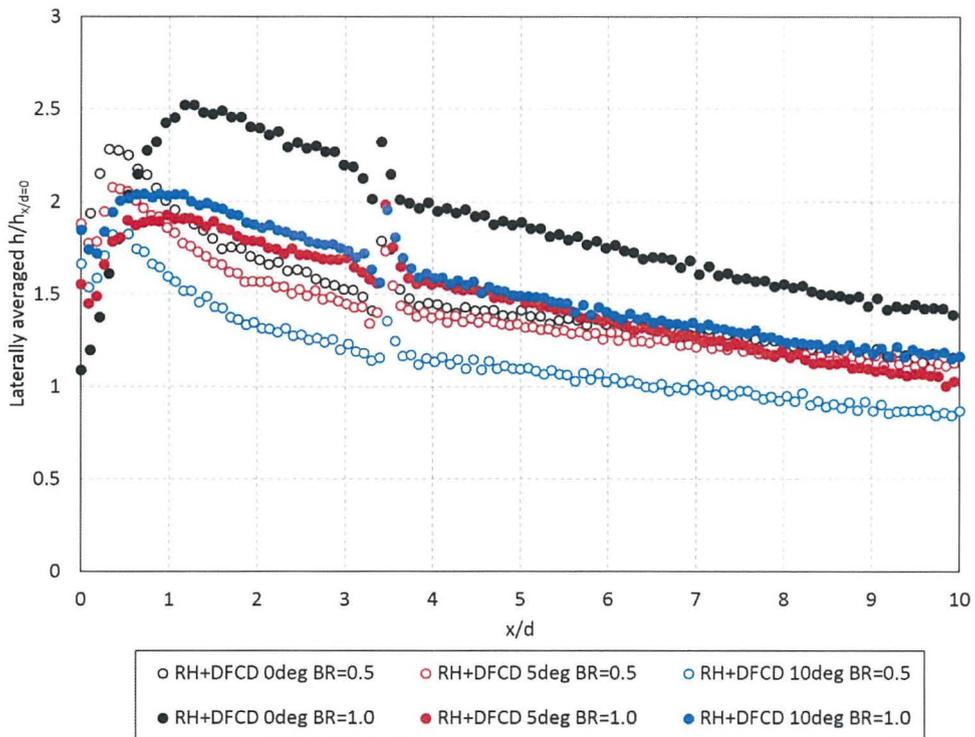
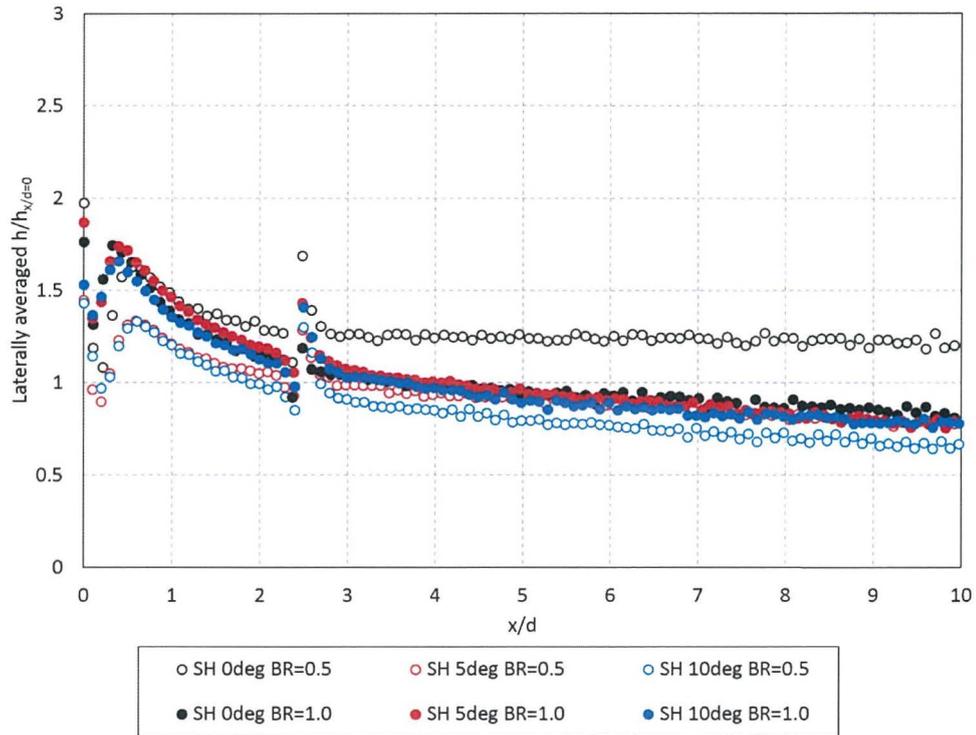


図 3.4.14 スパン方向平均熱伝達率 (RH)

(a) Without DFCD



(b) With DFCD

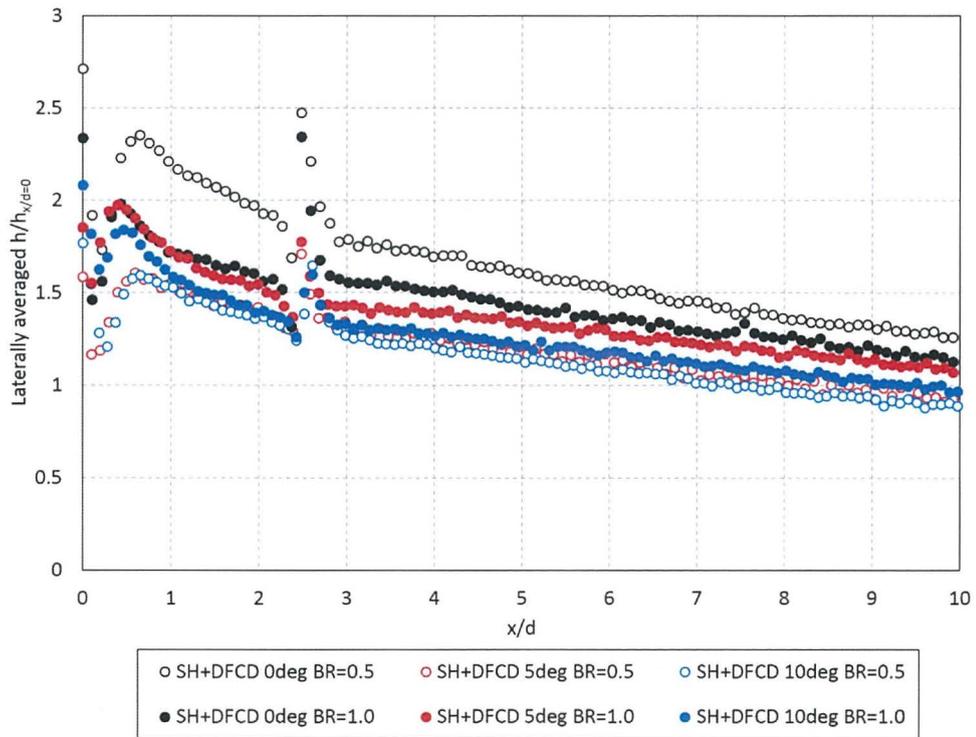
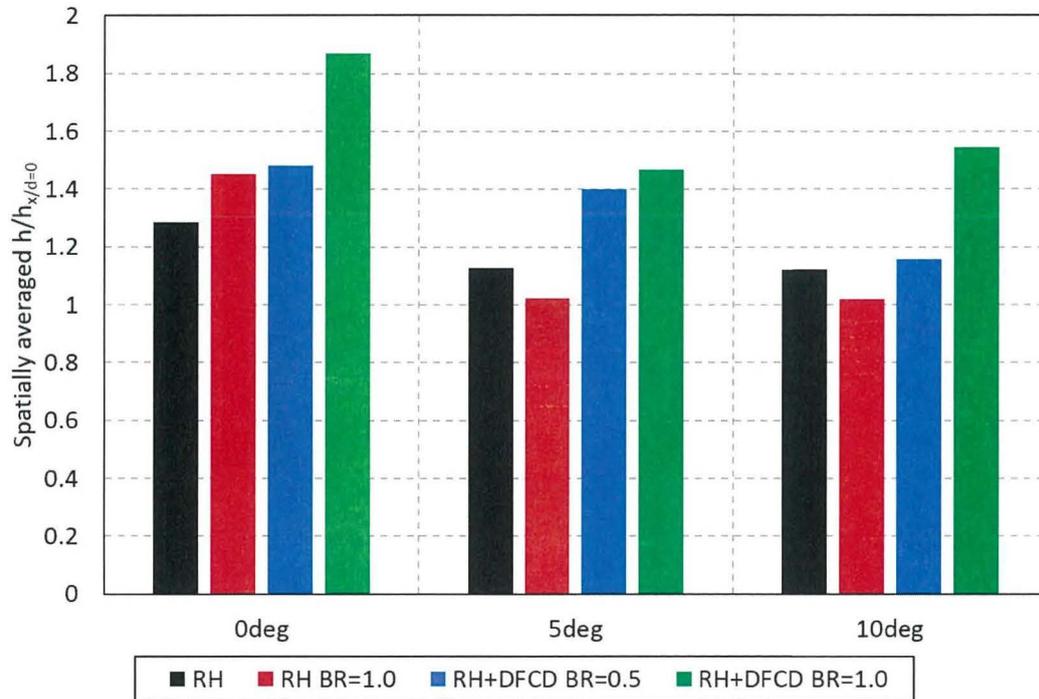


図 3.4.15 スパン方向平均熱伝達率 (SH)

(a) Round hole



(b) Shaped hole

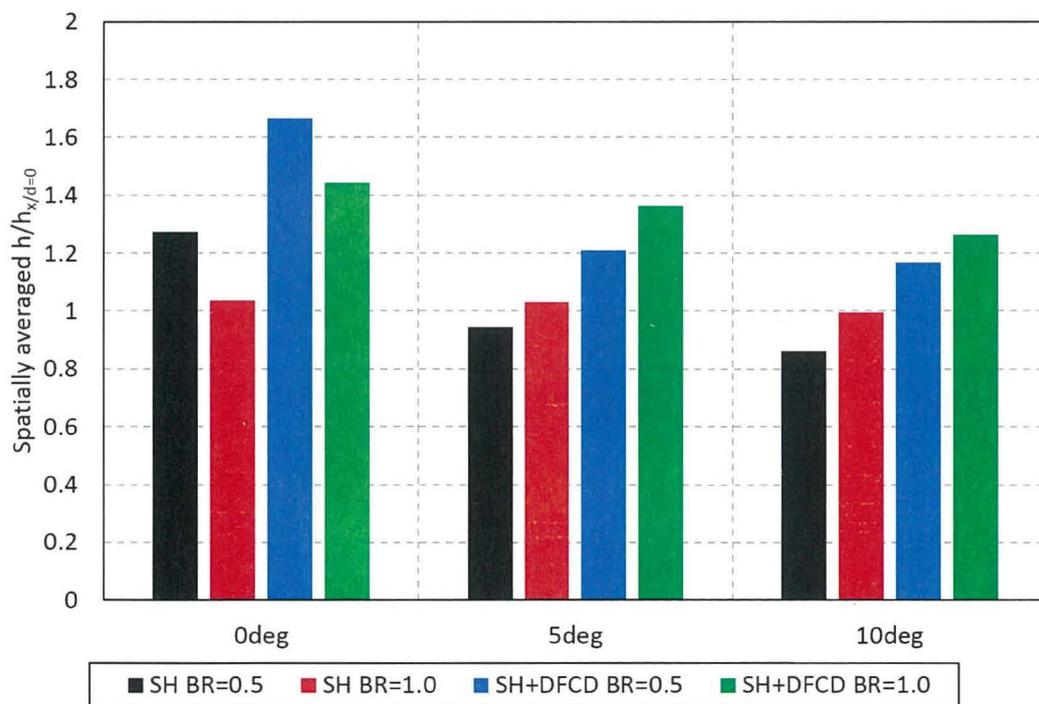
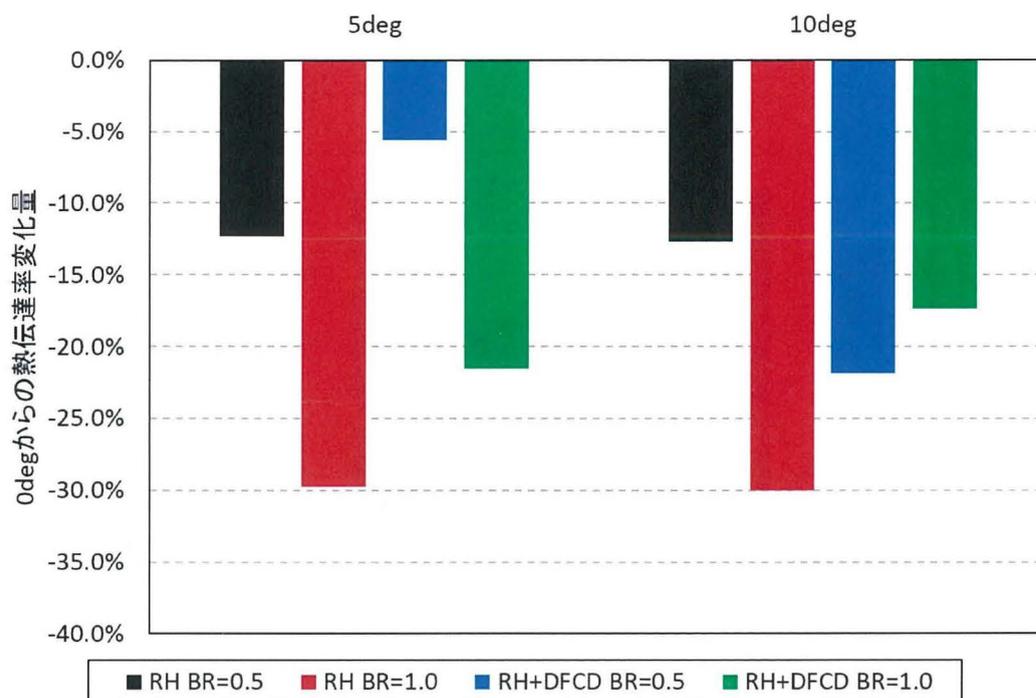


図 3.4.16 面平均熱伝達率

(a) Round hole



(b) Shaped hole

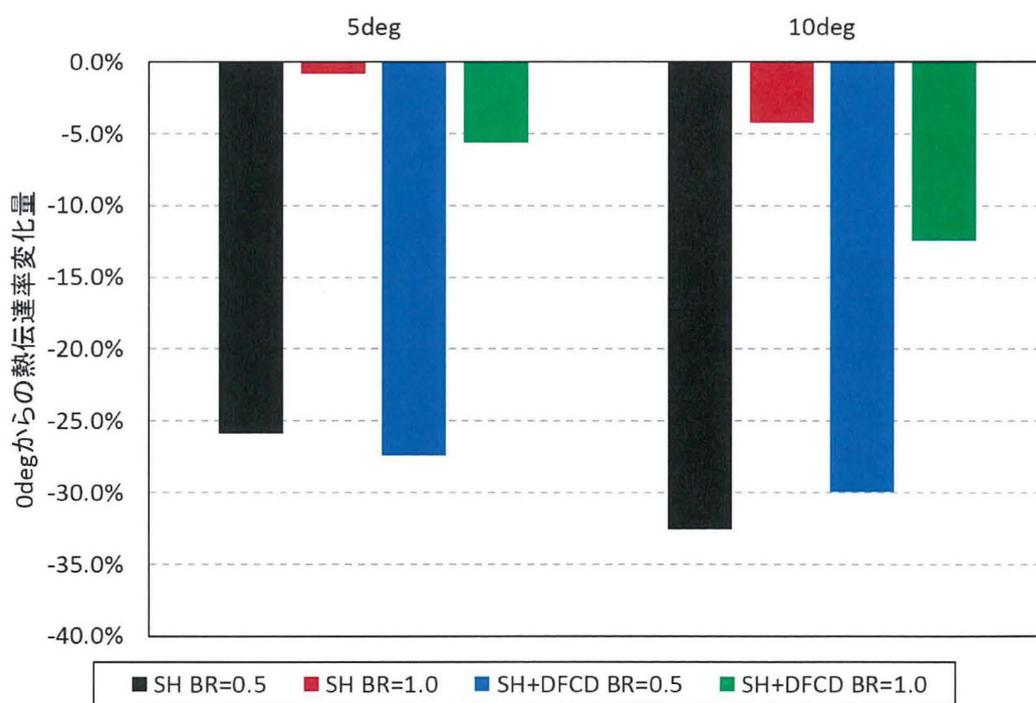


図 3.4.17 面平均熱伝達率 (0deg 条件から変化量)

(3) 熱流束低減率

最終的な熱負荷を観察するために、図 3.4. 18, 図 3.4. 19 には、RH の各吹き出し比における NHFR の算出値を示している。BR=0.5 の場合 0deg の場合と、流入角を大きくした条件で NHFR の値を比較すると、特に冷却孔センターライン上での NHFR が変化しており、流入角の増加と共に、NHFR が徐々に低下していることが分かる。一方で、冷却孔近傍に存在している NHFR が負の領域に関しては、流入角の増加と共に縮小する。BR=1.0 の場合、流入角の増加と共に NHFR が負の領域は全体的にスパン方向へ拡大する様子が観察できた。一方で、図 3.4. 20, 図 3.4. 21 には、SH の各吹き出し比における NHFR の算出値を示している。SH 系の結果では、一様に流入角の増加と共に NHFR が正の領域が拡大する傾向が見て取れた。

図 3.4. 22～図 3.4. 25 には、スパン方向平均フィルム効率と、面平均フィルム効率の値を参考に示しているが、最も分かり易いのは、図 3.4. 25 である。RH と SH では、全体的に SH の方が、流入角の変化に対して強くなっており、流入角が増えたとしても、NHFR は 0deg 条件よりも増える場合が多くなっている。以上のことから、SH の場合の方が、流入角の変動に対してロバストな性能を発揮することができると考えられる。

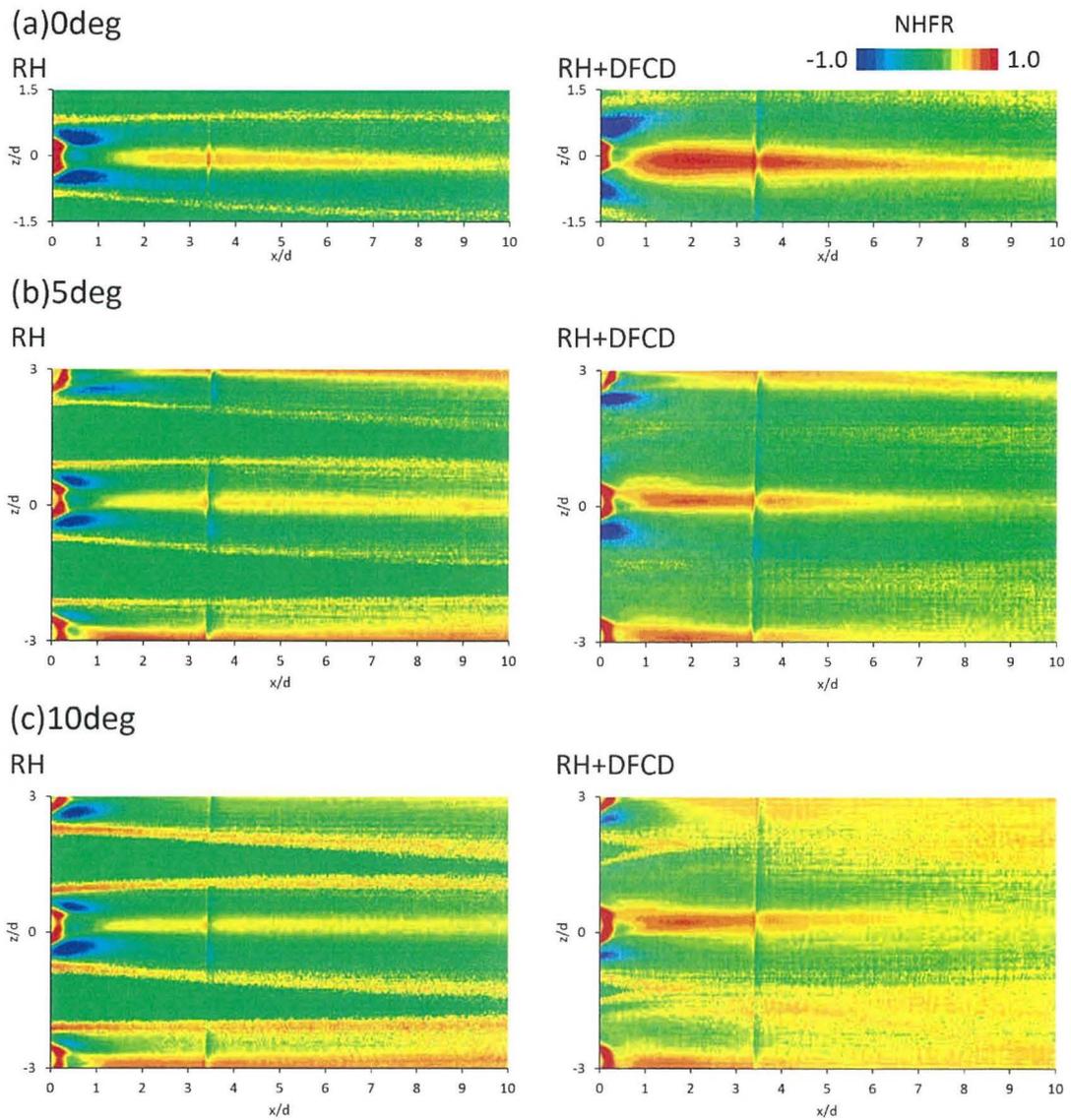


図 3.4.18 熱流束低減率分布 (RH, $BR=0.5$)

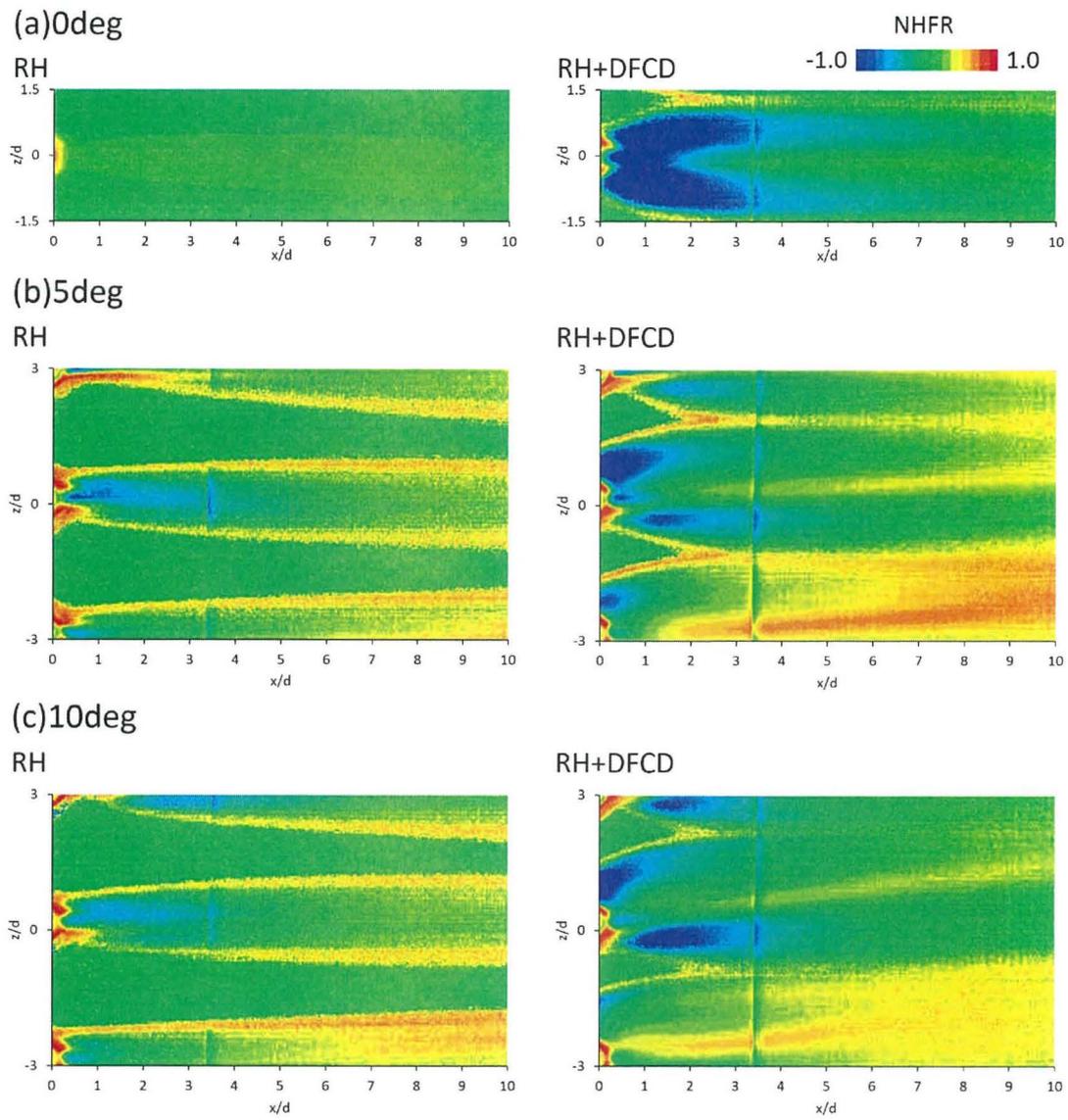


図 3.4.19 熱流束低減率分布 (RH, $BR=1.0$)

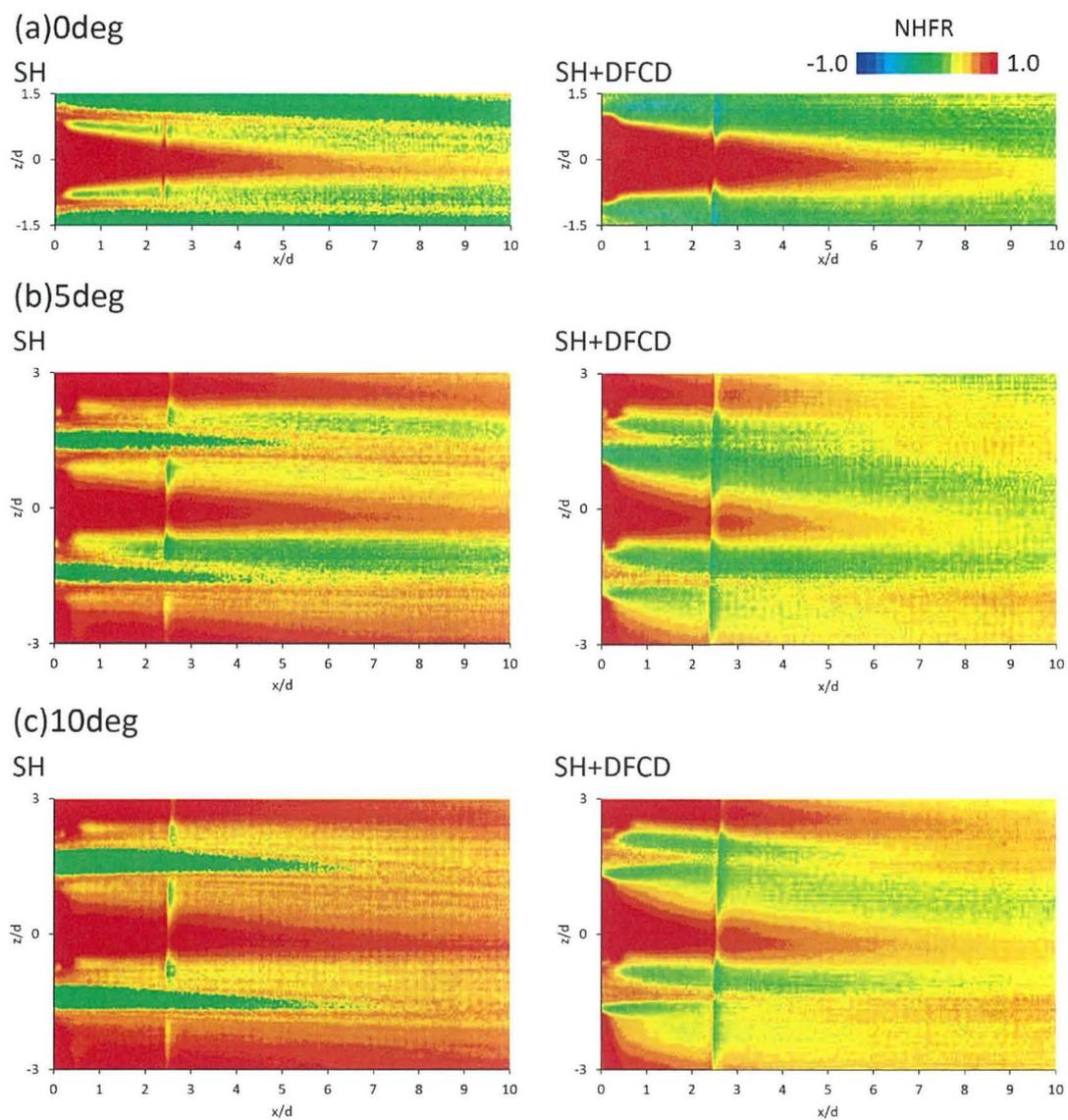


図 3.4.20 熱流束低減率分布 (SH, BR=0.5)

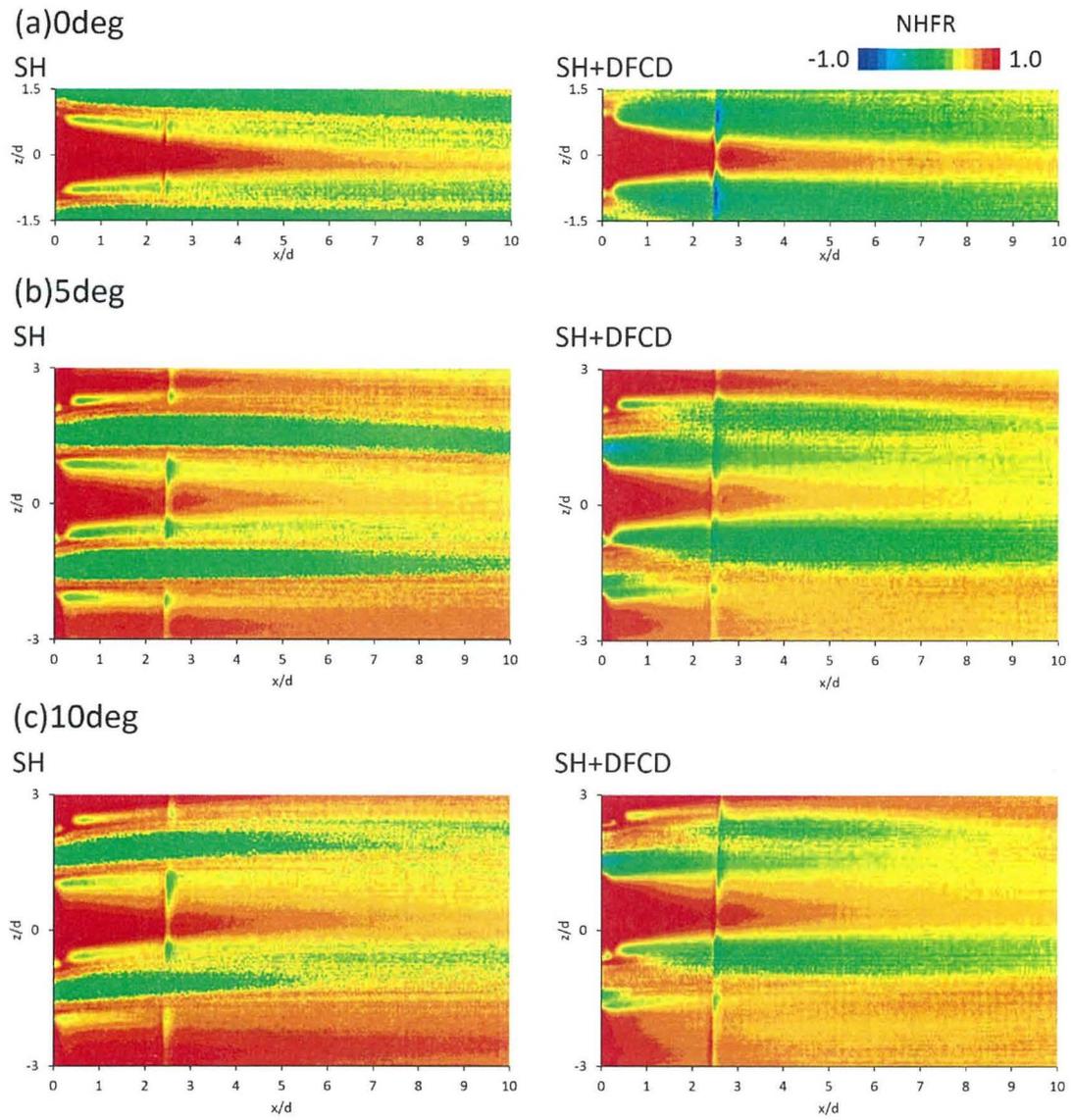
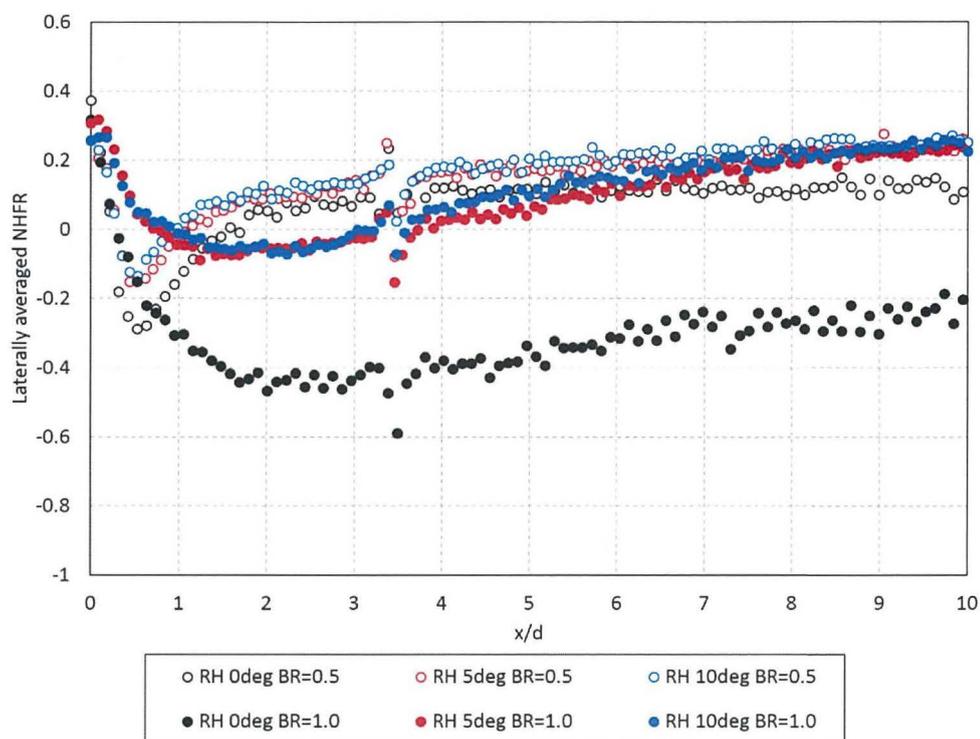


図 3.4.21 熱流束低減率分布 (SH, $BR=1.0$)

(a) Without DFCD



(b) With DFCD

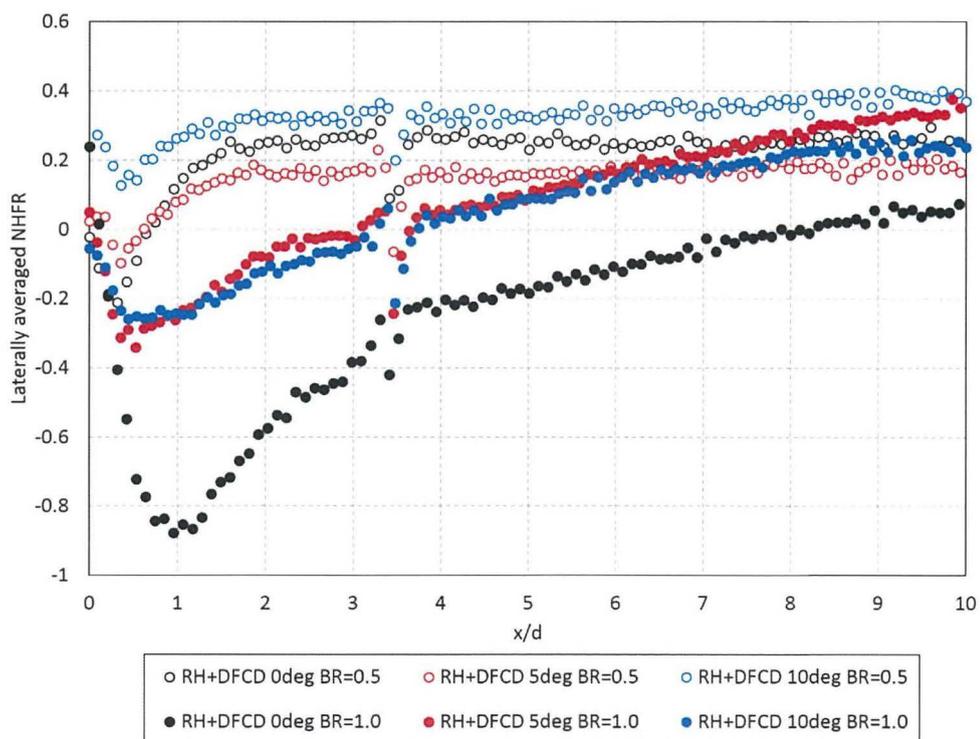
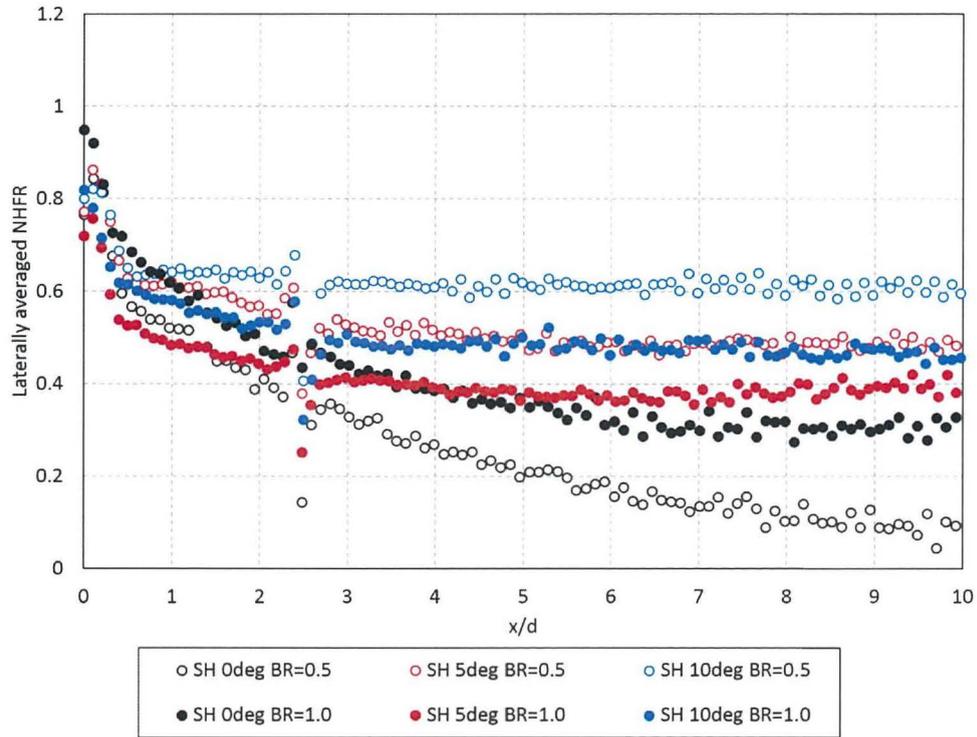


図 3.4.22 スパン方向平均熱流束低減率 (RH)

(a) Without DFCD



(b) With DFCD

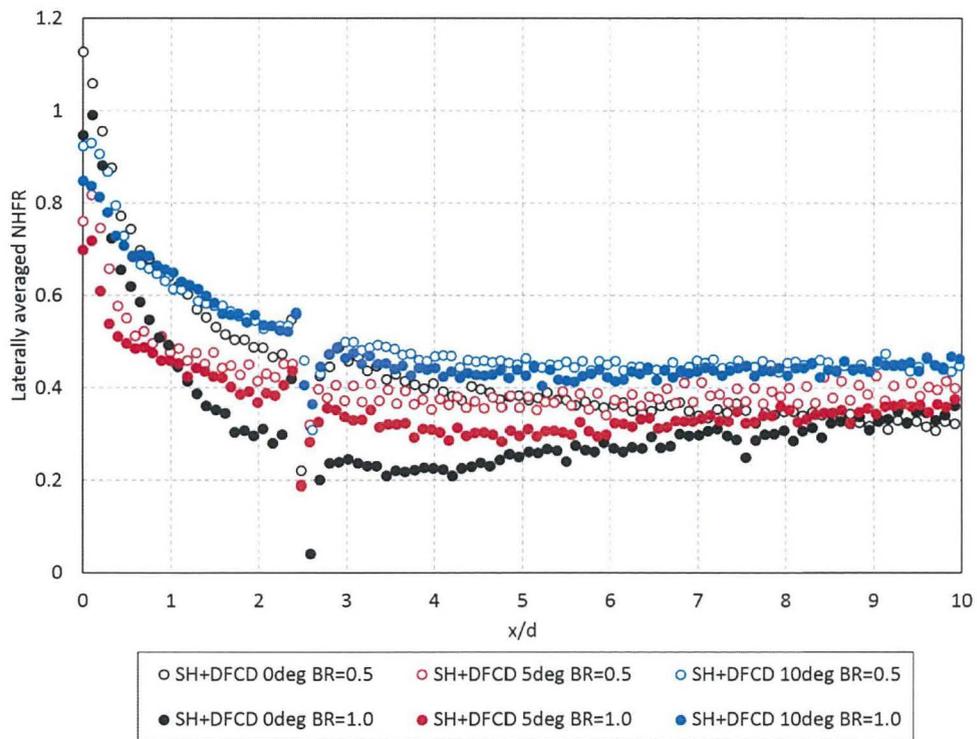
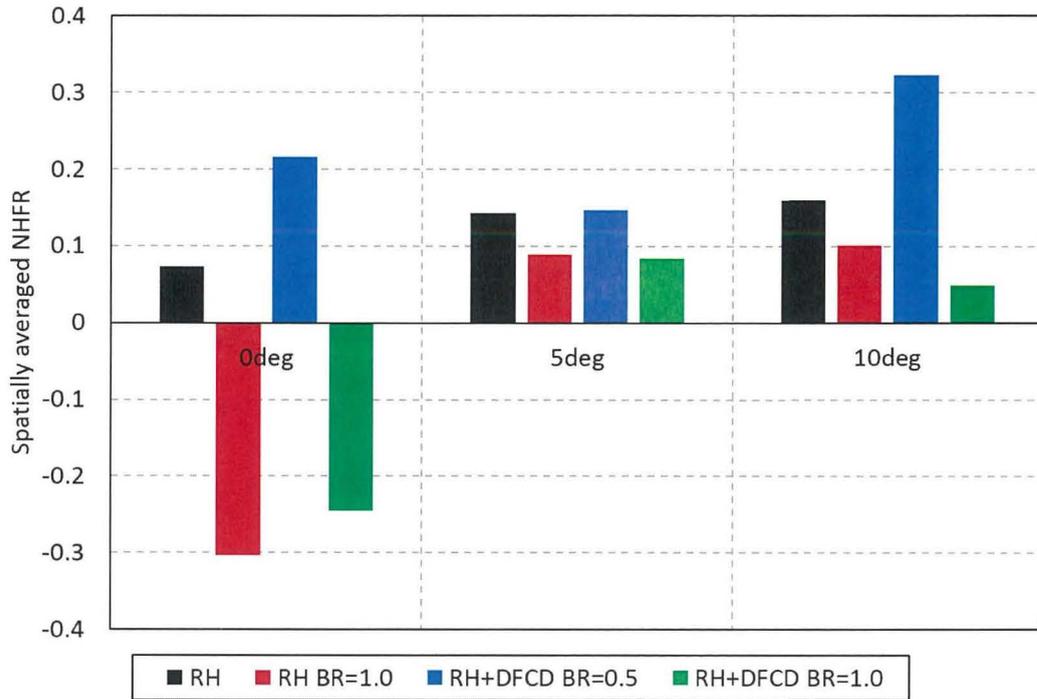


図 3.4.23 スパン方向平均熱流束低減率 (SH)

(a) Round hole



(b) Shaped hole

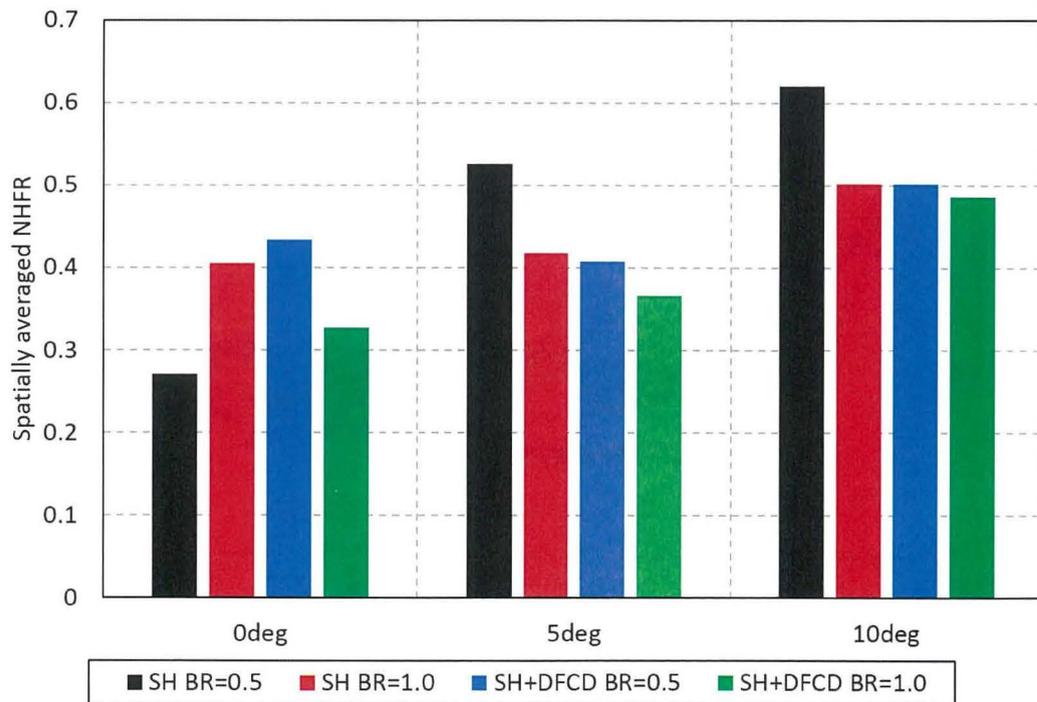
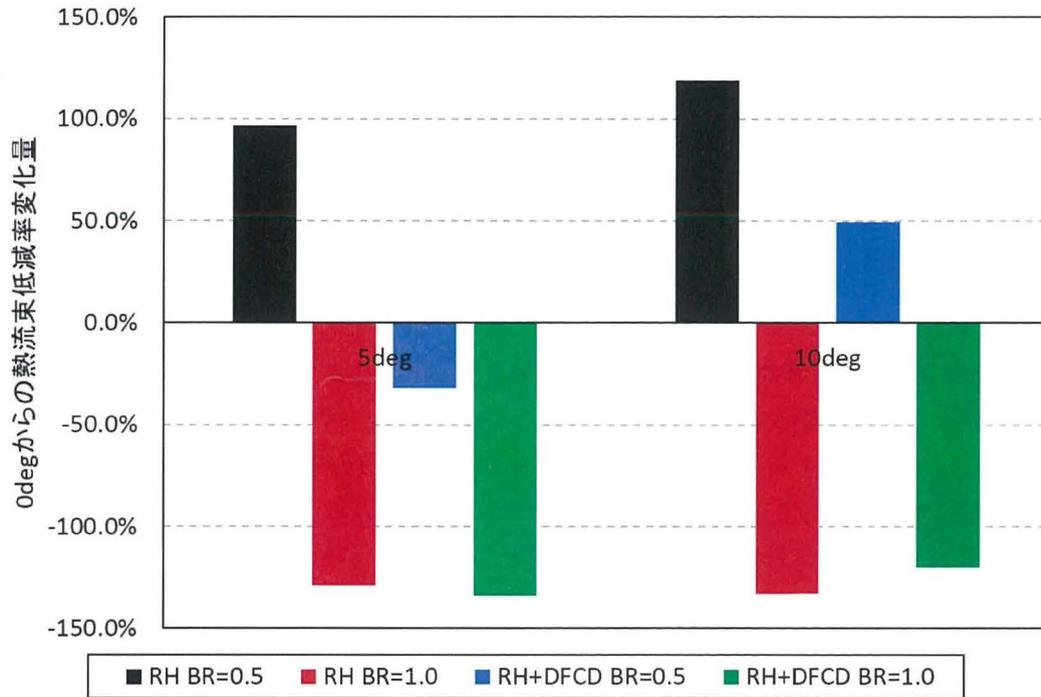


図 3.4.24 面平均熱流束低減率

(a) Round hole



(b) Shaped hole

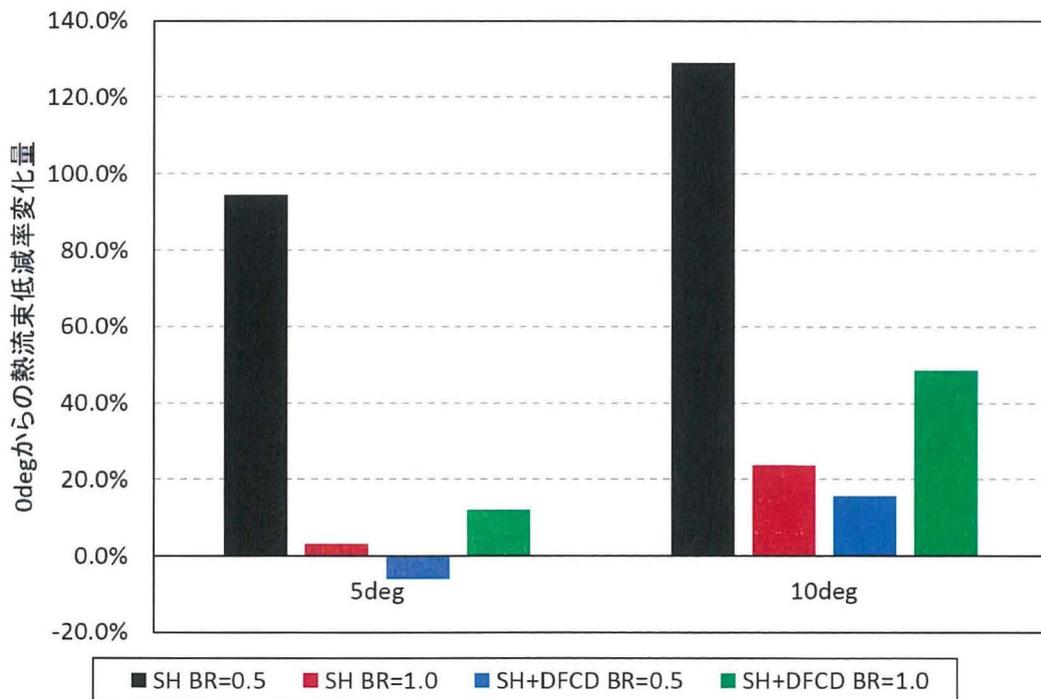


図 3.4.25 面平均熱流束低減率 (0deg 条件からの変化量)

3.4.4.2 全圧損失係数

図 3.4.26a), b)には実験で取得した $BR=0.5, 1.0$ における, 各流入角の全圧損失分布を示す. 図 3.4.26a)は $BR=0.5$ のコンターを示しており, 流入角 0deg 条件では SH は RH に比べてスパン方向に広く損失領域が分布していることがわかる. これは, 冷却孔が拡大していることで, 二次空気がスパン方向に広がって吹き出しているためであると考えられる. また, 流入角 $5\text{deg}, 10\text{deg}$ では, 流入角が増加するにつれて, 損失分布がスパン方向正の向きに傾いており, 吹き出しの際に発生する CRVP が非対称になっていることで, 損失領域自体も傾いてきていると考えられる. さらに, わずかではあるが, 壁面近くの高い損失を持った領域が拡大している様子が確認できる. 図 3.4.26 b)は, $BR=1.0$ の全圧損失分布を示しており $BR=0.5$ の条件と同様に, 流入角が増加するとともに, 損失領域が傾いていく. また, 流入角 0deg では, 冷却孔からの二次空気運動量が増加するため, 冷却孔下流位置で損失領域が壁面法線方向に拡大し, 境界層部分の損失は減少している. しかし, 流入角モデルでは, 損失領域が壁面法線方向に拡大すると同時に, 壁面付近の境界層部分の損失もわずかに暑くなっていくことがわかる. このことより, 流入角を設けたモデルでは, 流入角 0deg に比べて, 主流と二次空気のミキシングが強まっていると考えられる.

図 3.4.27 a), b), c)には, DFCD 有り条件における全圧損失分布を示す. 図 3.4.27 a)では, $BR=0.0$ の条件における全圧損失分布であるが, 流入角 $5\text{deg}, 10\text{deg}$ において損失分布が徐々に傾いていく様子を確認できる. このことより, 流入角が変化することで, DFCD から発生する縦渦も非対称な渦ペアとなって発生していると考えられる. 図 3.4.27 b), c)は, 吹き出し有りの条件における, 全圧損失分布である. DFCD を取り付けた際の損失分布の特徴として, 吹き出しを行った場合でも, DFCD から発生した縦渦に起因する損失が支配的となることが挙げられるが, 流入角を設けたモデルにおいても, 同じような特徴が確認できる. そのため, 図 3.4.27 b), c)において, RH DFCD と SH DFCD で全圧損失分布に大きな違いは観察できない. しかしながら, 流入角増加に伴い, DFCD 起因の損失コアの領域で, 損失が大きくなっていく傾向にあった.

図 3.4.28 a), b)には, 流入角の変化に伴う, 流量平均全圧損失の推移を示す. グラフ中には, 0deg からの全圧損失の変化率も同時に示す. 図 3.4.28 a)は, DFCD 無しの条件であり, SH $BR=0.5$ を除いて全体的に全圧損失が増加する傾向にあった. 最も増加幅の大きかった RH では 10% 程度損失が増加していた. 図 3.4.28 b)は, DFCD 有りの条件であり, こちらも流入角の増加に伴い, 全圧損失は増加する傾向にあるが, 損失の増加幅としてはこちらの方が大きくなっており, 最大で 13% 程度であった. これは, 主流と二次空気のミキシング起因の損失のみならず, DFCD から発生した縦渦による損失も増加しているために, DFCD 無し

の形態に比べると損失が増加したものと考えられる.

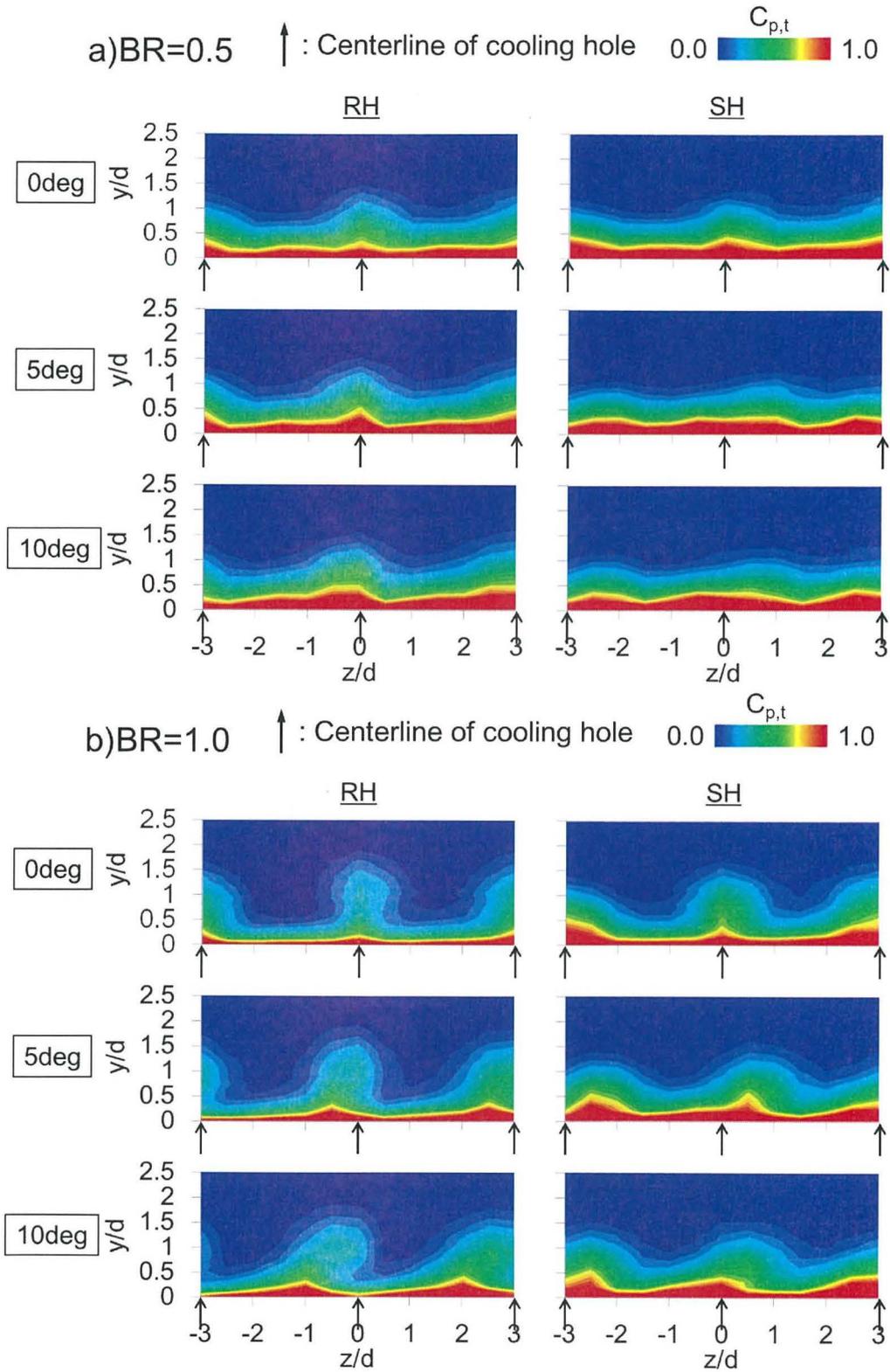


図 3.4.26 全圧損失分布(DFCD 無し): a) $BR=0.5$, b) $BR=1.0$

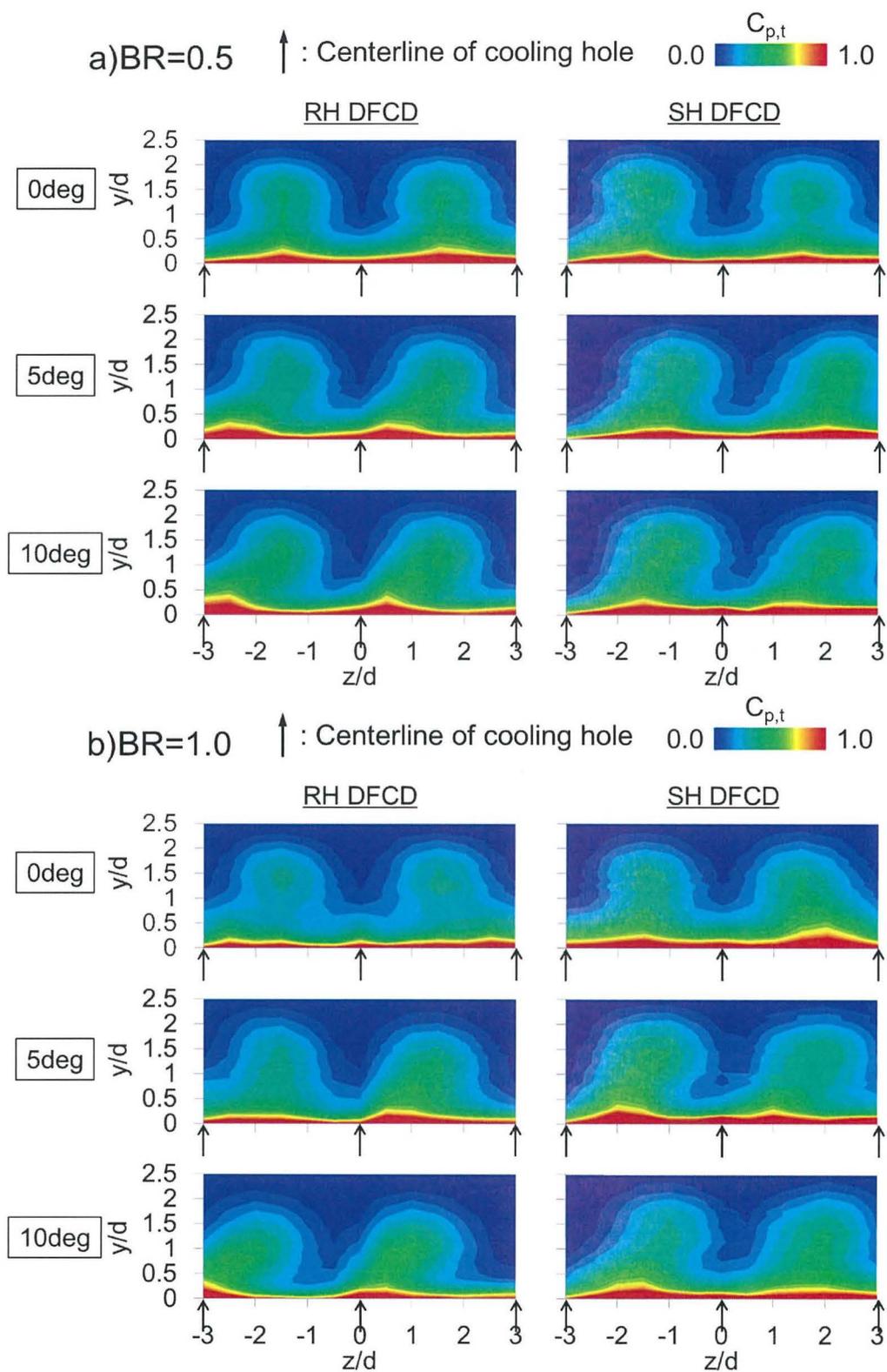


図 3.4.27 全圧損失分布(DFCD 有り): a) $BR=0.5$, b) $BR=1.0$

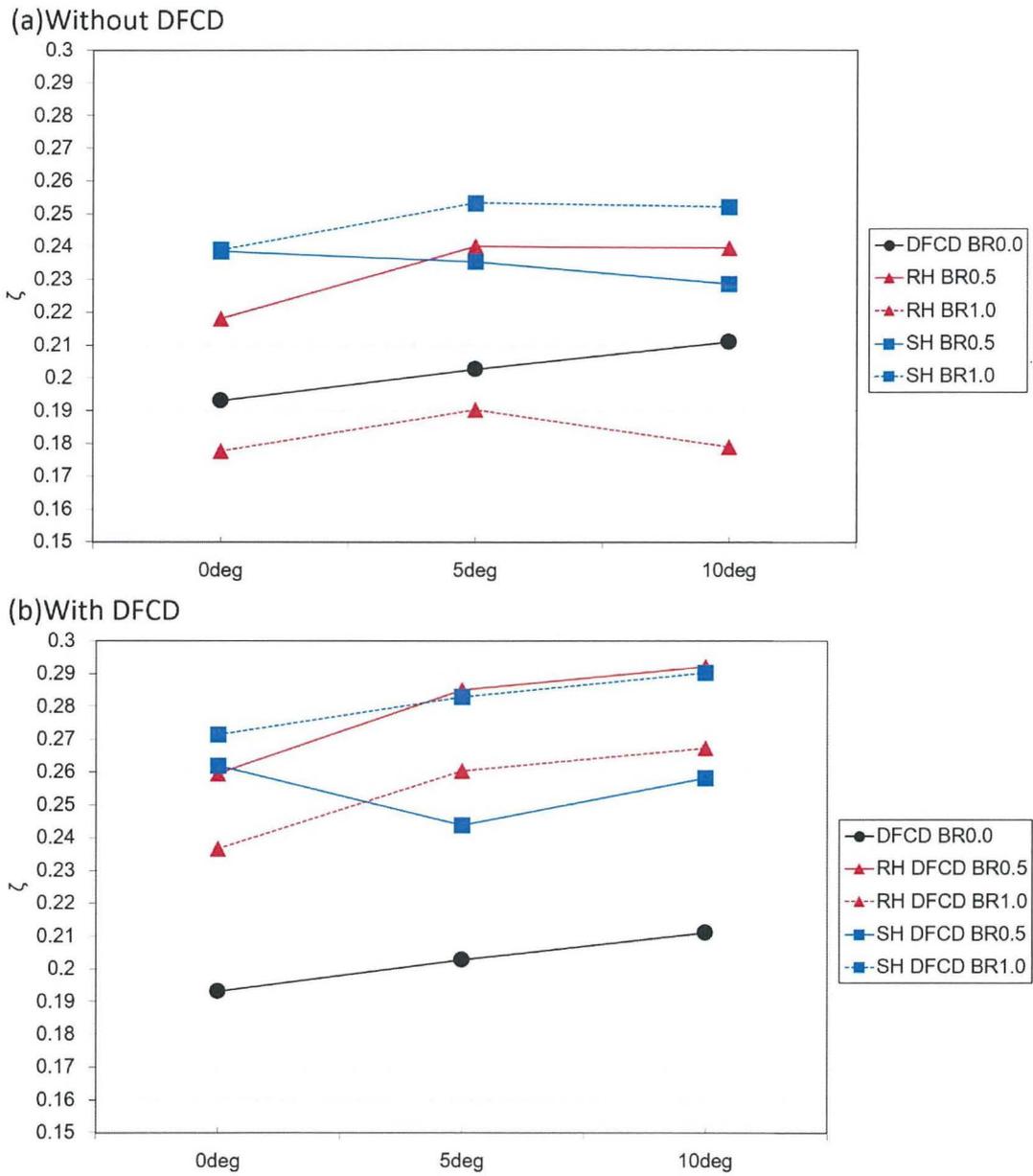


図 3.4.28 流量平均全圧損失

3.4.4.3 流れ場計測

(1) 渦度分布

図 3.4.29 には、 $BR=0.5$, FCD 無し条件の渦度コンターを示す。流入角 0deg モデルでは、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 の規模としては、SH の方が小規模であり、付着性の高い流れ場が形成されていると考えられ、実際に壁面フィルム効率も SH の方が高く出る結果となった。流入角 5deg , 10deg では、正の渦度は大規模化し、逆に負の渦度は減少している様子が観察される。特に、SH では負の渦度はほとんど観察できず、正の渦度が支配的な流れ場となっているため、CRVP のように二次空気を壁面から巻き上げる効果が発揮されにくく、流入角 0deg と比べ二次空気の壁面付着性と拡散性が向上したと考えられる。また、この正の渦度は、流入角が増加するほど大きくなる傾向にあった。 $BR=1.0$ では、 $BR=0.5$ に比べて、二次空気運動量が増加するため、全体的に渦度は大規模化している。特に RH 0deg では、左右対称に大規模な CRVP が形成されており、二次空気の付着性は非常に低くなった原因である。SH 0deg は RH に比べると、小規模な渦度であるので、 $BR=1.0$ でもある程度のフィルム効率を保っていたと考えられる。流入角を設けた条件では、 $BR=0.5$ と同様に、正の渦度が大規模化し、負の渦度は減少する傾向にあった。これにより、二次空気の lift-off が抑制され、フィルム効率が増加した原因である。また RH では、流入角が増加するにつれて、正の渦度がスパン方向正の向きにわずかではあるが移動しており、これによって非対称なフィルム効率分布が形成されたと考えられる。

図 3.4.30 には、DFCD 有り条件における渦度分布を示す。図 3.4.30 では、流入角の変化による、DFCD から発生した縦渦への影響を見やすくするために、レンジを $-500\sim 500$ としている。まず、 $BR=0.0$ では、流入角 0deg の条件においては DFCD から発生した縦渦のペアは左右対称に形成されている。流入角増加に伴い、この対称性は崩れており、正の渦度の規模化に比べ、負の渦度が縮小し、負の渦度が正の渦度の下から持ち上げられているように見える。これにより、正の渦度領域では主流と、縦渦のミキシングが強まっていると考えられる。 $BR=0.5$, 流入角 0deg では、左右対称な縦渦のペアが発生している。この縦渦は、前述の通り二次空気の壁面付着性とスパン方向拡散性を向上させる働きをするために、冷却孔下流側で大幅なフィルム効率の上昇が確認できた。しかし、流入角 5deg , 10deg では、CRVP, 縦渦ともに非対称となっており、正の渦度の規模化が進んでいる。これにより、二次空気と主流のミキシングが促進され、二次空気運動量の小さい $BR=0.5$ では、ミキシングによる二次空気の温度低下が大きくなり、冷却孔下流側でのフィルム効率低下が起こったと考えられる。 $BR=1.0$ では、二次空気運動量が増加し、CRVP が大規模化する。しかし、流入角を設けた条件では、正の渦度が支配的になり、壁面拡散性が促進されていることと、縦渦による主流と二次空気のミキシングが促進されたとしても、二次空気運動量が大きいため、 $BR=0.5$ のような大きな温度低下にはつながらず、高いフィルム効率を維持したまま、下流側でのスパン方向拡散性を向上させ、フィルム効率向上につながったと考えられる。

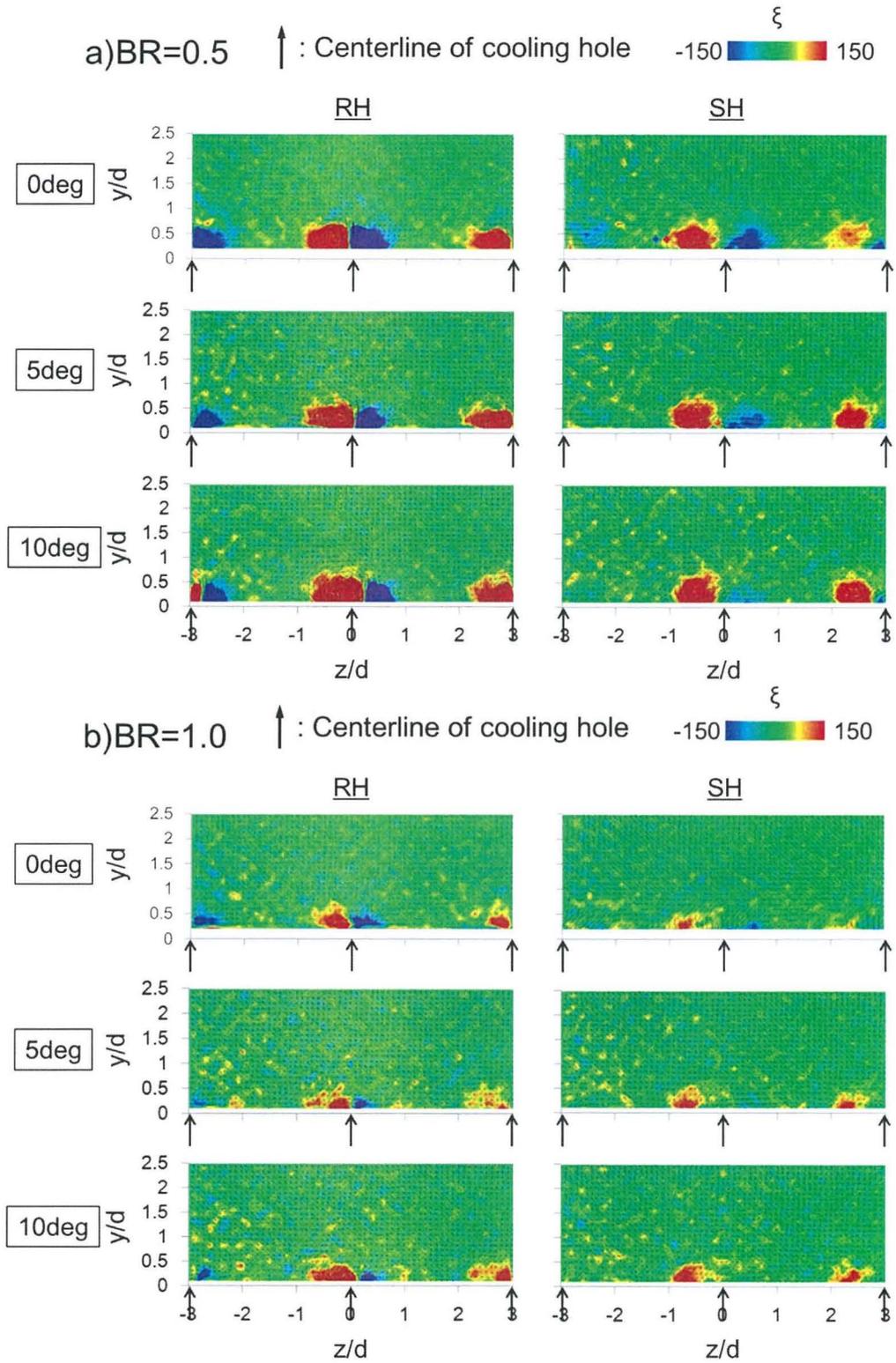


図 3.4.29 渦度分布(DFCD 無し) : a) $BR=0.5$, b) $BR=1.0$

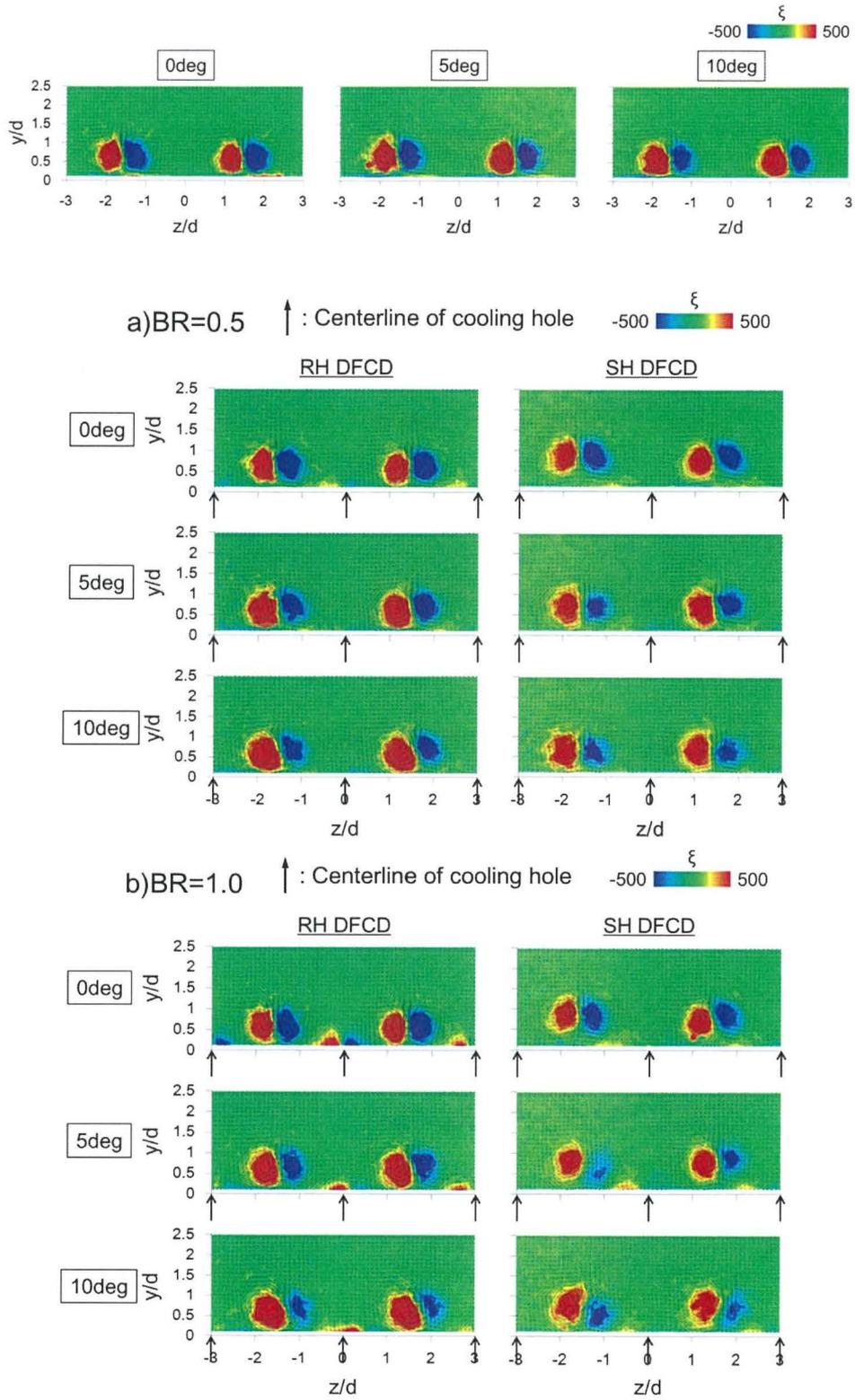


図 3.4.30 渦度分布(DFCD 有り) : a) $BR=0.0$, b) $BR=0.5$, c) $BR=1.0$

(2) 速度変動 RMS

図 3.4. 31 には $BR=0.0, 0.5$ における速度変動 RMS 分布を流入角ごとに示す。まず，流入角 0deg , $BR=0.0$ においては， $z/d=\pm 1.5$ 周辺の領域で，高い速度変動 RMS 領域を確認できる。これは，FCD から発生した縦渦どうしが干渉存在している領域であり，正負の渦度が存在している領域で特に高い速度変動 RMS を示している。また， $BR=0.5$ では，二次空気吹き出しによる速度変動 RMS が，冷却孔下流位置で観察できる。流入角 5deg , 10deg モデルの $BR=0.0$ では，縦渦による速度変動 RMS 領域の存在位置自体は変わっていないものの，その中にある速度変動 RMS が，流入角 0deg に比べて高くなっていることがわかる。さらに，前述の渦度分布で確認できたように，流入角モデルでは，正の渦度が大規模化していた通り，速度変動 RMS も正の渦度が存在している領域に偏って，特に高い値を示している。これより，流入角 5deg , 10deg では，デバイスから発生した縦渦と，主流とのミキシングが全体的に強まっているとわかる。また，流入角モデル $BR=0.5$ では，冷却孔下流における速度変動 RMS がスパン方向正の方向にわずかに寄る傾向にあり，縦渦と CRVP との干渉具合が異なってきたと考えられる。図 3.4. 32 に，先ほどの形態についてスパン方向平均速度変動 RMS を示す。これを見ると，図 3.4. 31 の速度変動 RMS 分布からも確認できたように， $BR=0.0, 0.5$ 正の渦度存在領域($-2.5 \leq z/d \leq -1.5, 0.5 \leq z/d \leq 1.5$)で特に速度変動 RMS が増加している。また，負の渦度領域においても速度変動 RMS 値がわずかに増加している。このことから，流入角の変化によって冷却孔下流において， 0deg 条件よりもミキシングが促進され， $BR=0.5$ においてはミキシングによる二次空気の温度低下が大きく，フィルム効率の減衰が早まったと考えられる。

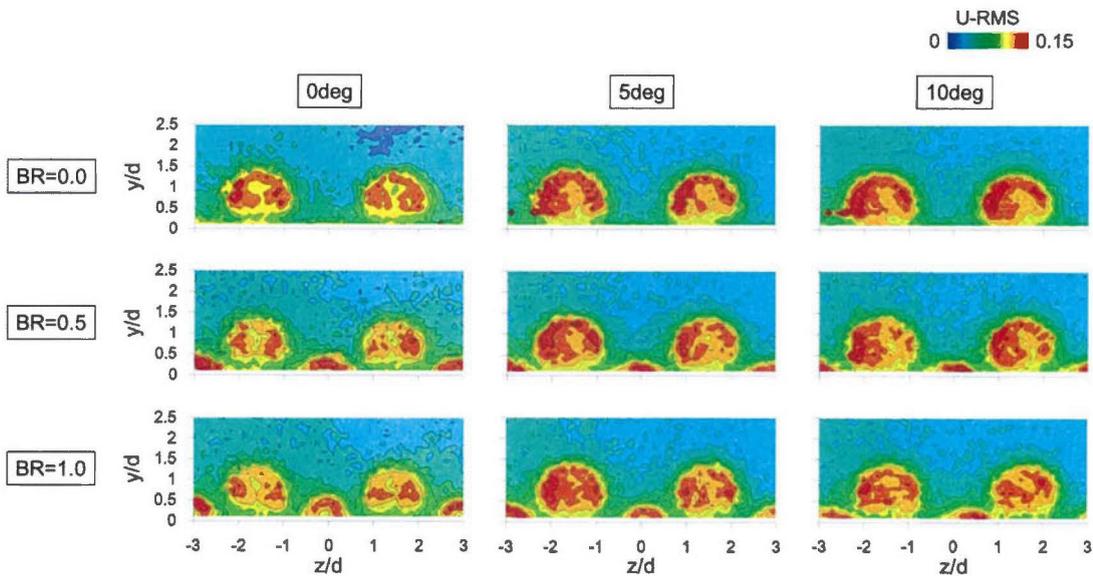


図 3.4.31 速度変動 RMS 分布(RH DFCD: $BR=0.5$)

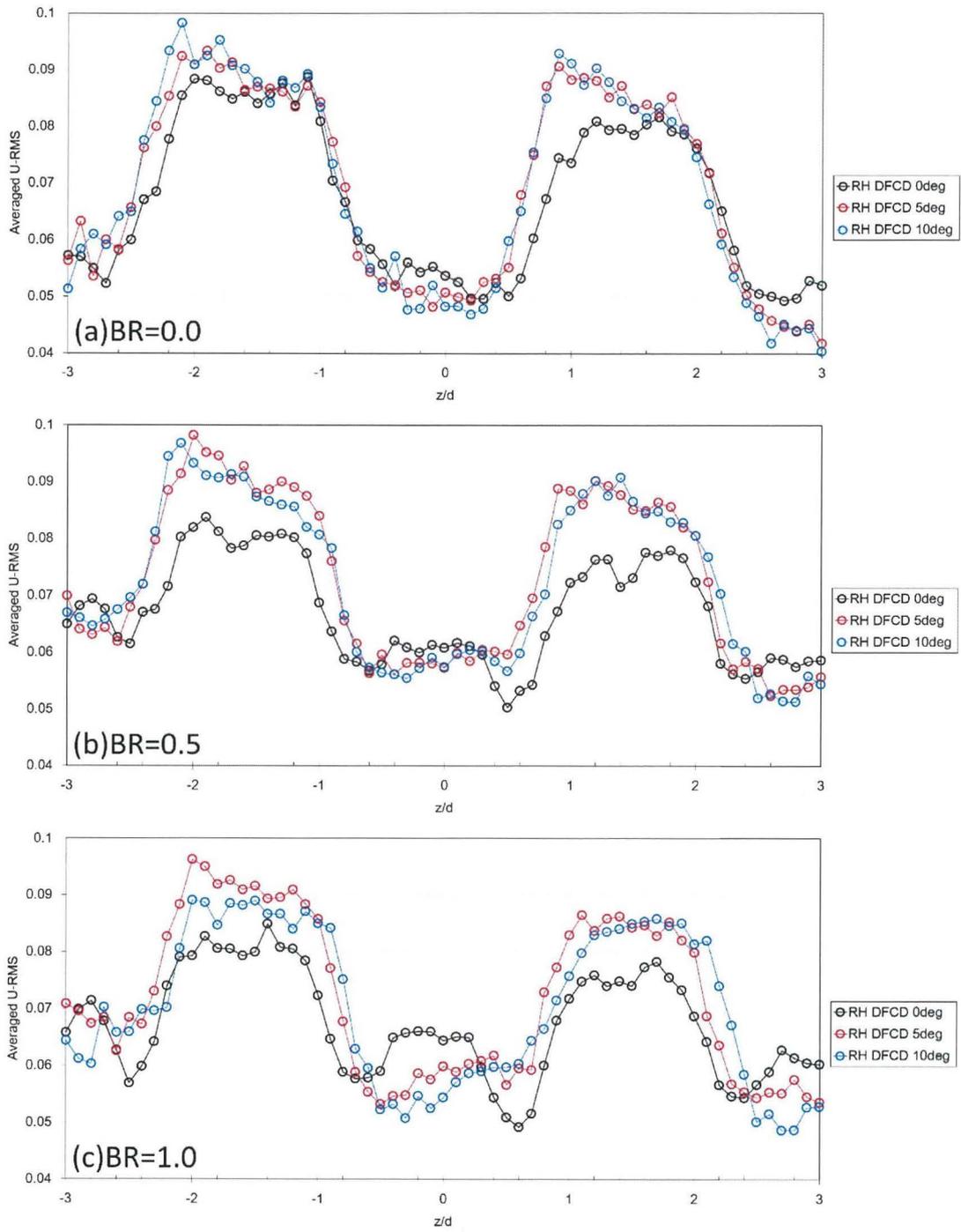


図 3.4.32 各スパン位置における平均速度変動 RMS(RH DFCD)

3.5 デバイスに対する境界層厚さの効果

前節まででは、主流がデバイス上を剥離することによって発生した剥離渦や、デバイス上流側で発生する馬蹄形渦が、時間平均的に CRVP を制御していることを示した。しかし、デバイス上で発生する渦構造は、デバイスに流入する境界層厚さの効果を受けていると考えられる。そこで本節では、数値解析によって、デバイスに対する境界層厚さの効果进行调查した。

3.5.1 解析要領

(1) 解析方法の概要

図 3.5.1 には、解析方法の概要を示す。本研究では前節までと同様に、(ii) のようなドメインを用いて計算を行う。(ii) の入口境界には、速度プロファイルを与えるが、境界層の厚さを任意に変化させるために、予め(i) のドメインを用いて計算を行うことで、速度プロファイルの抽出を実施する。(i) で抽出された速度プロファイルは、(ii) の入口境界に用いることとした。

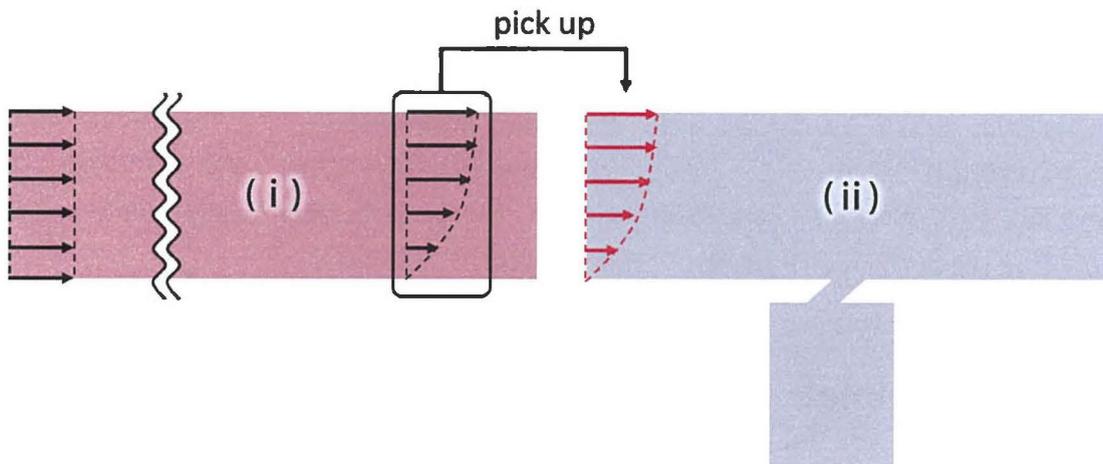


図 3.5.1 解析方法（概要）

(2) 解析領域

(ii) の解析領域に関しては、前節までと同様である。以下には(i) の解析領域のみを示す。図 3.5.2 には、(i) における解析領域を示した。(i) の解析領域に関しては、速度プロファイルの抽出のみを目的としているため、スパン方向には 10mm の薄いダクトを模擬した計算領域となっている。また、これは計算時間の短縮を意図している側面もある。流れ方向には、任意の境界層厚さを抽出するために、2000mm の長さを確保し、高さ方向は(ii) の領域と一致させるために、120mm(=6d に相当する)の領域とした。

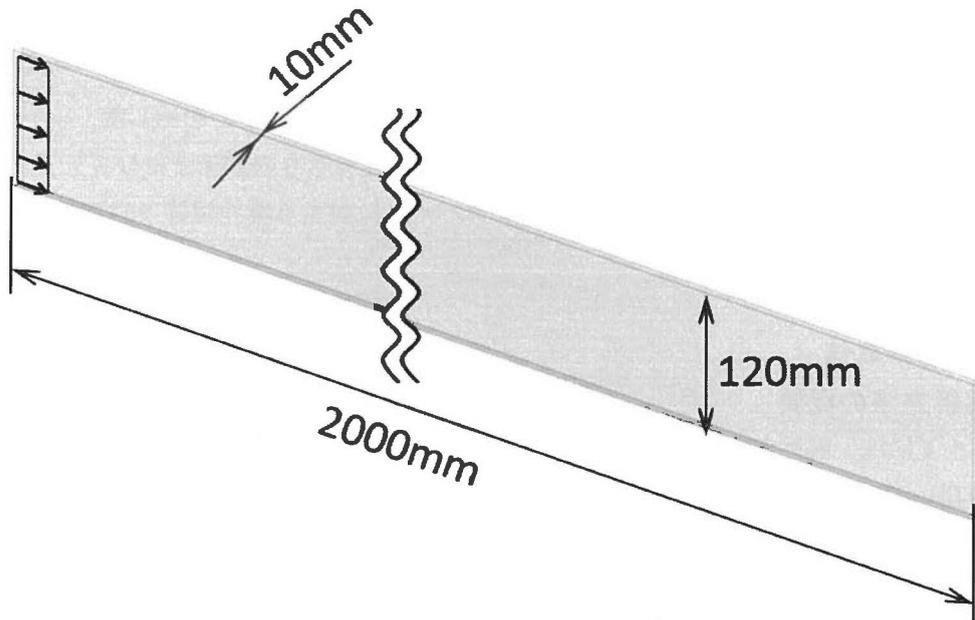


図 3.5.2 解析領域 (i)

(3) 計算格子

(ii)の計算格子に関しても、前章までと同様であるため、(i)の計算格子のみを示す。図 3.5.3 には、計算格子の拡大図を示す。計算領域(i)は単純形状のダクトであるため、計算格子には構造格子を用いることとした。今回の計算では、スパン方向の速度分布は考慮しないため、スパン方向には5点の計算格子を配置している。また、流れ方向には500点、高さ方向には300点の計算格子を配置し、総格子点数は75万点である。

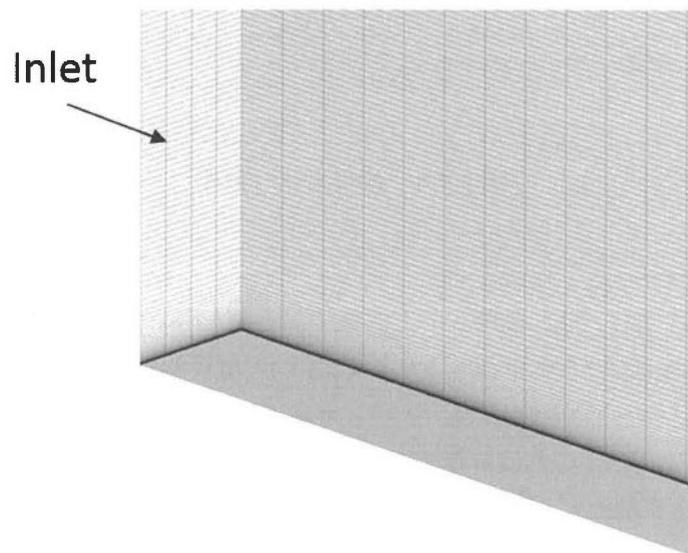


図 3.5.3 計算格子 (i)

(4) 境界条件

(i)の計算を実施する場合には、入口境界に一様流速を与え、 $Re=16400$ となるように設定を行った。ダクト上面は、対称境界、スパン方向には周期境界とし、ダクト底面は断熱壁条件を適用している。

(ii)の計算を行う際には、主流入口境界に(i)の任意の場所で取得した速度プロファイルを挿入することになる。この際は、(i)の計算領域から、任意の1ライン分のデータを抽出し、(ii)の入口境界において、スパン方向にデータを羅列することで入口速度プロファイルを定義する。スパン方向に速度プロファイルのデータを並べる際には、入口境界のスパン方向に対して、500ライン分の速度プロファイルをコピーして挿入した。これは、スパン方向に与えるデータ数が少ない場合は、速度の情報がスパン方向に自動的に補完されてしまうためである。

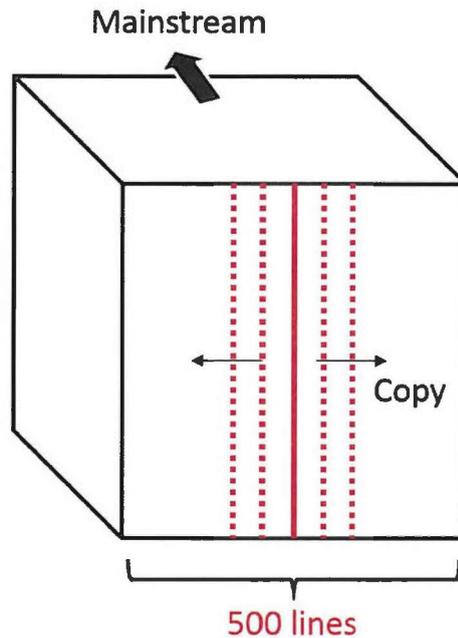


図 3.5.4 入口境界の定義方法 (ii)

図 3.5.5 には、(i)の計算結果における、境界層厚さと入口境界からの位置関係を示している。(i)で計算を行い、入口境界からの各位置で速度プロファイルの抽出を行ったところ、境界層厚さは、最大 28mm 程度となった。各抽出点における 99%境界層厚さ δ_{99} は以下の表 3.5.1 の通りである。表中の境界層厚さは、デバイスの高さ $H(=10\text{mm})$ で規格化した寸法値を示している。今回は、各速度プロファイルの条件に、表中のようなケースナンバーをつけ、それぞれのケースの速度プロファイルを(ii)の入口境界に与えることで、計算を行った。

(ii)の計算に関しては、二次空気の吹き出しを伴わない条件と、吹き出しを伴う($BR=0.5$)条件の両ケースに関して計算を実施した。

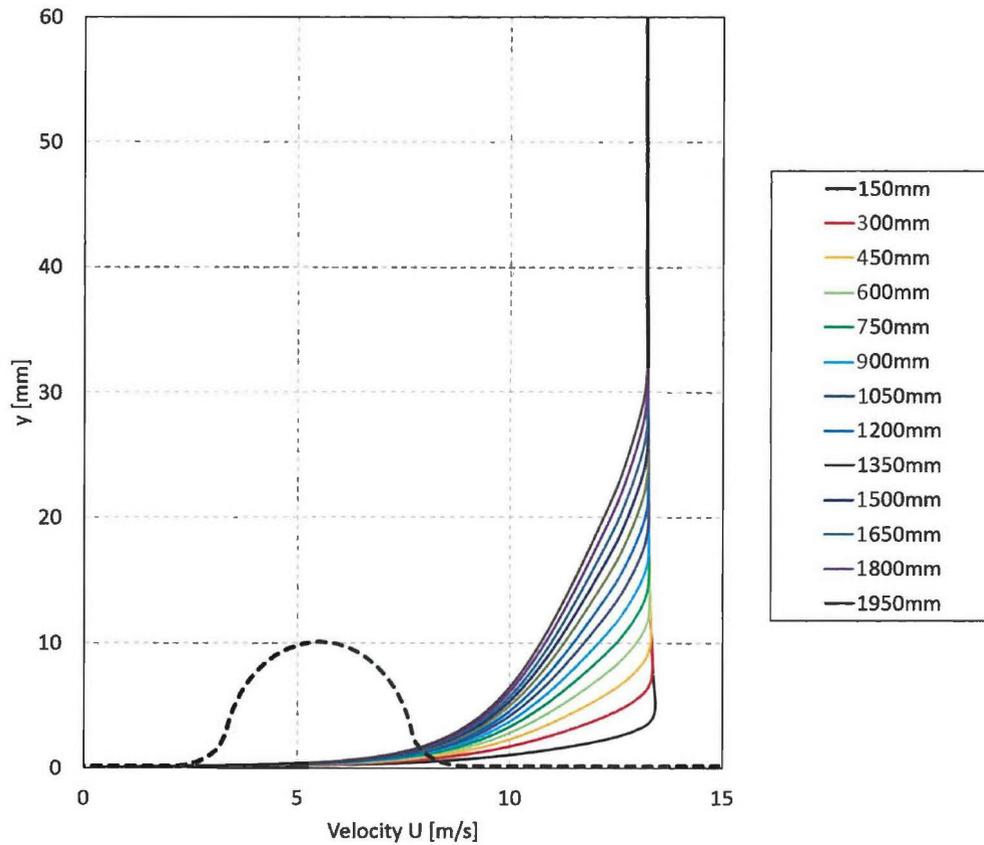


図 3.5.5 境界層厚さの推移

表 3.5.1 99%境界層厚さ (入口境界速度プロファイル)

	入口境界からの距離	δ_{99}/H
case1	150mm	0.31263
case2	300mm	0.55311
case3	450mm	0.79359
case4	600mm	1.03407
case5	750mm	1.25050
case6	900mm	1.46693
case7	1050mm	1.68337
case8	1200mm	1.87575
case9	1350mm	2.06813
case10	1500mm	2.26052

case11	1650mm	2.45290
case12	1800mm	2.64529
case13	1950mm	2.81362

(5) データ処理方法

本研究では全圧損失係数や、圧力係数を定義する場合に計算ドメイン入口の全圧値 $P_{t,inlet}$ を用いる必要がある。前章までの数値解析では、入口全圧は“計算ドメイン入口境界の面平均全圧”を用いていたが、本節では入口境界の厚さが変化しているため、入口境界の全圧には大きな分布がついてしまうケースも存在する。そこで本節で入口全圧を定義する場合は、壁面から十分に離れた位置（壁面から 100mm）における全圧値を入口全圧として定義した。同様に、データ処理中の入口密度 ρ_{inlet} 、流速 U_{inlet} も同様に定義した。

3.5.2 解析結果（吹き出しを伴わない計算）

表 3.5.2 には、(ii)を用いた計算における $x/d=-3.5$ での境界層厚さを示している。 $x/d=-3.5$ とデバイスの位置関係は、図 3.5.6 に示している。今回は、入口境界で速度プロファイルを与えているが、入口境界からデバイス間で境界層が発達するために、最小でも境界層の厚さはデバイス高さの 90%程度となった。最大厚さは今回デバイス高さの 2.8 倍程度であるため、case1~case13 までの結果において流れの傾向を観察することで、境界層厚さの効果を考察することが可能であると考えられる。

表 3.5.2 99%境界層厚さ ($x/d=-3.5$)

	δ_{99}/H
case1	0.90452
case2	0.96482
case3	1.08543
case4	1.32663
case5	1.50754
case6	1.68844
case7	1.86935
case8	2.05025
case9	2.23115
case10	2.41206
case11	2.59296
case12	2.71357
case13	2.89447

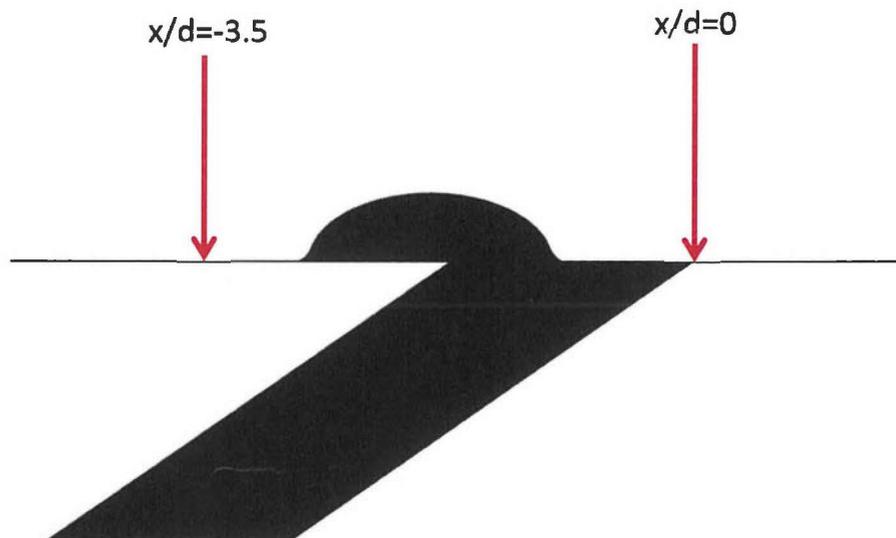


図 3.5.6 速度プロファイル取得位置

図 3.5.7 には、デバイス付近の渦度分布を示している。デバイス上の剥離渦を構成している渦度や、馬蹄形渦を構成している渦度は、境界層厚さの変化に伴ってわずかに変化している。特に、最下流の渦度分布を観察すると、渦度が境界層厚さによって変化することが比較的鮮明に可視化できている。今回の計算では、境界層厚さが厚くなるに従って、Device base vortex を構成している渦度が弱くなることが分かった。従って、境界層厚さが厚くなるような流れ場では、デバイスによる流れ制御の効果が比較的得られにくくなると考えられる。しかし、デバイス上での剥離渦や、馬蹄形渦ほどの計算条件でも観察することができたため、流れ制御の効果が全く得られなくなることは無いことが明らかになった。

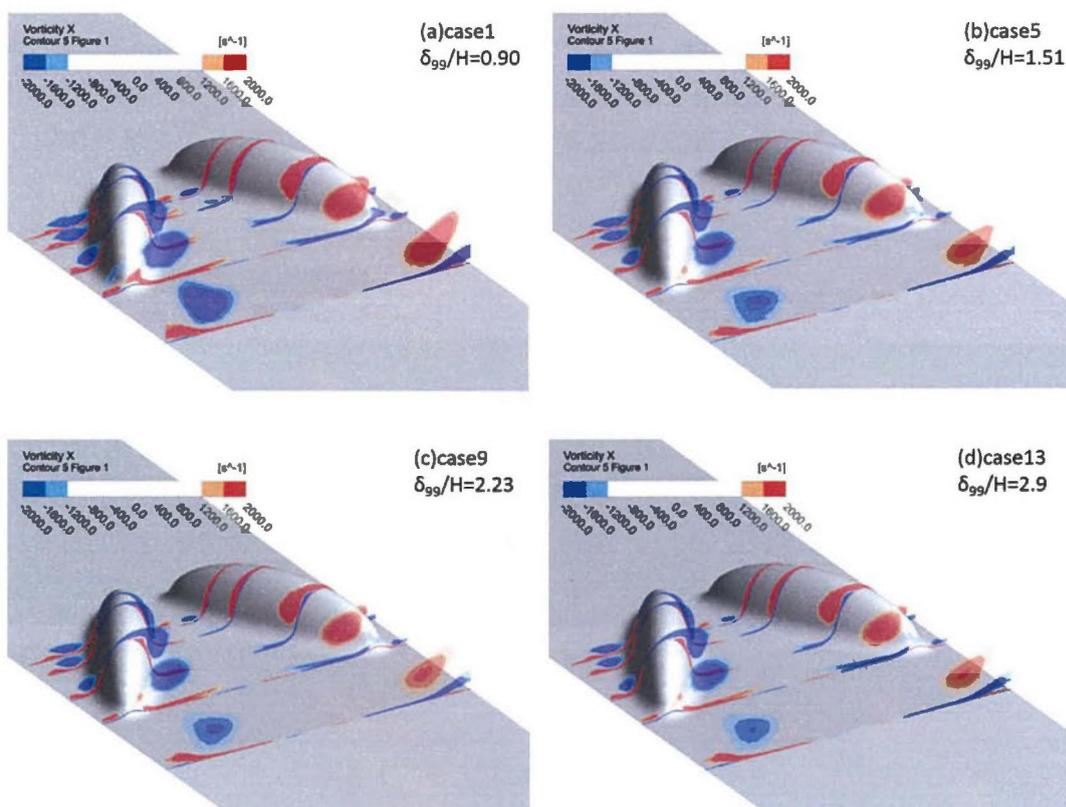


図 3.5.7 境界層厚さと渦度の関係

図 3.5.9 には、デバイス上の圧力分布を観察するために、流れ方向の圧力係数分布を示す。圧力係数は以下の式(3.5.1)で定義を行った。図中には、 $z/d=0.15$ の箇所に黒色のラインが入っているが、これは合わせて示した 図 3.5.9 での流れ方向データ抽出ラインである。

$$C_p = \frac{P_{t,inlet} - P}{\frac{1}{2} \rho_{inlet} U_{inlet}^2} \quad (3.5.1)$$

圧力係数の分布では、入口境界層の影響を受けて明確な違いが観察された。図 3.5.10 と合わせて観察すると、境界層の厚さが薄くなるに従って、 C_p の最大値は増加しており、デバイス上流領域における流れの加速が急になっていることがわかる。デバイスの頂点を通過した流れは、次第に減速することになるが、デバイスの内側領域は減速と加速の両方が混在している。

図 3.5.10 には、流れ方向の圧力勾配分布を示している。デバイスの内側面の領域においては、境界層の厚さによって、圧力勾配の大きさに変化が現れている。特に、境界層厚さが薄いケースにおいては、逆圧力勾配が強くなっており、より剥離が大規模化する流れになっていることが分かる。従って、境界層厚さが薄い場合において、下流側の渦度が大規模化する現象が観察されたと考えられる。

境界層厚さの変化による乱れ特性の変化を観察するために、図 3.5. 11 には乱流運動エネルギーの分布を示す。境界層厚さが薄い場合には、剥離が大規模化するのに伴って、下流側の乱れも増加している。特に顕著な乱れの変化が観察されたのは、 $z/d=\pm 1.5$ の領域となっており、デバイスから発生した渦同士の影響領域で乱れが増加している様子が見られた。

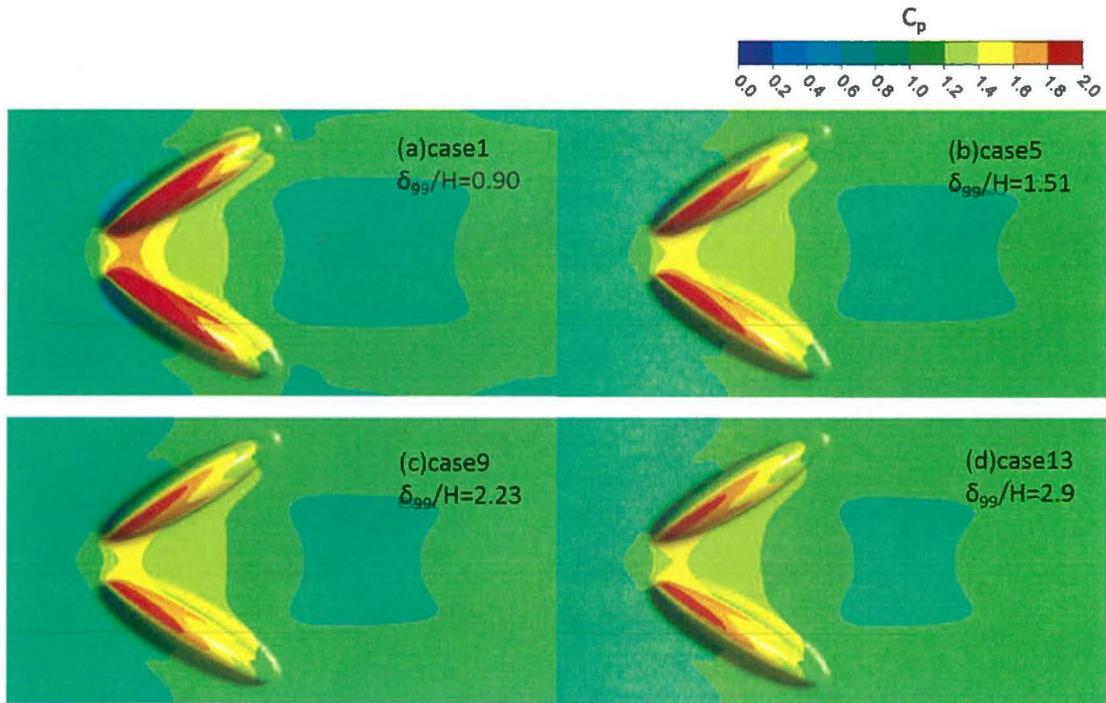


図 3.5. 8 圧力係数分布

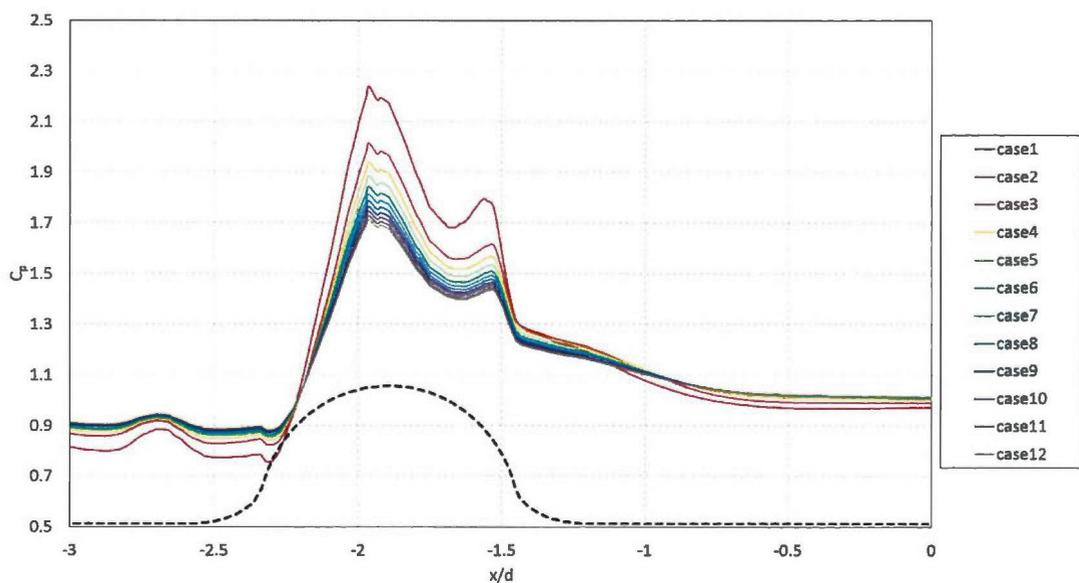


図 3.5.9 流れ方向 C_p 分布 ($z/d=0.15$)

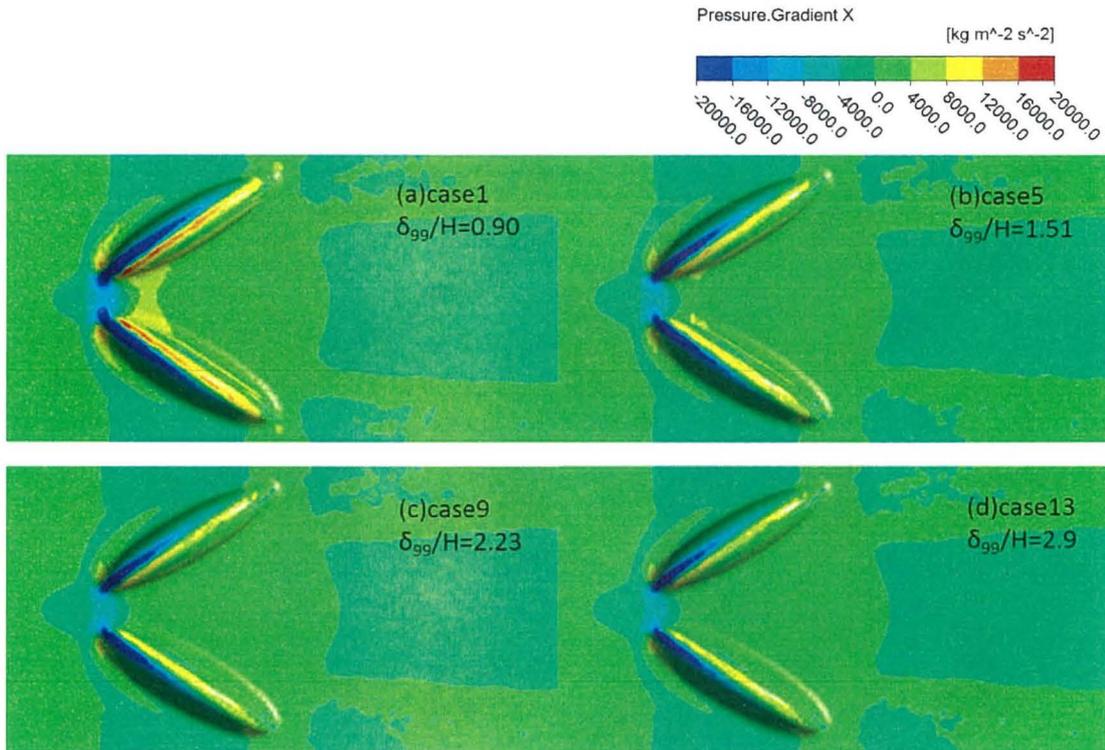


図 3.5.10 流れ方向圧力勾配分布

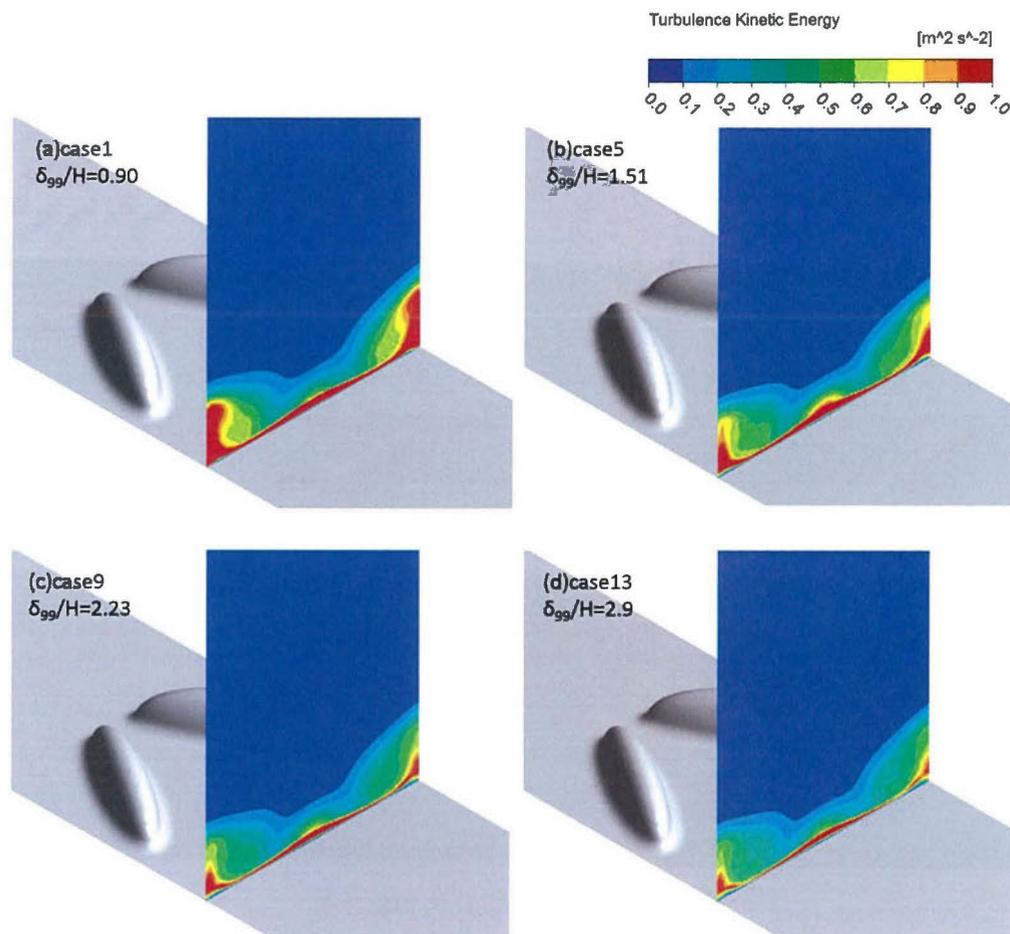


図 3.5.11 乱流運動エネルギー分布 ($x/d=0$)

3.5.2 解析結果（吹き出しを伴う計算）

図 3.5.12 には、吹き出しを伴う数値解析における、各所の渦度分布を示している。前節において得られた傾向としては、境界層厚さが厚くなるに従って、渦度が小規模化する傾向であったが、吹き出しを伴う条件においてもこの傾向が観察できる。また、吹き出しを伴う条件においても、Device base vortex は発生しており、基本的な渦構造は境界層厚さが薄い場合と変わらないことから、流れの制御は十分可能であることが分かった。

図 3.5.13, 図 3.5.14 には、圧力係数分布と、流れ方向圧力勾配分布を示す。圧力係数、流れ方向圧力勾配の傾向は、吹き出しを伴わない条件と比較しても基本的な傾向は変化しなかった。しかし、圧力係数分布を吹き出し有り、無しで比較すると、 C_p が高くなっている領域が、吹き出し有りの条件では縮小していることが分かる。定量的な比較に関しては、図 3.5.15 には、 $z/d=1.5$ のライン上における圧力係数分布を示している。代表的なケースのみ、吹き出し有り無しで比較を行っているが、吹き出し有りの条件では、 C_p がどの条件においても減少していることが観察できる。圧力勾配に関しては、図 3.5.16 に同ライン

でのデータ比較を示している。圧力勾配に関しても、吹き出しを伴う条件では、吹き出しを伴わない条件と比較すると全体的に減少している様子が分かる。従って、吹き出しを行うことによって、デバイスの内側面における逆圧力勾配も減少しているため、剥離の規模はわずかに縮小していると考えられる。ただし、デバイスから発生している基本的な渦構造に関しては、吹き出しを伴う条件でも維持されているため、このようなわずかな圧力分布の変化は渦の制御にほとんど影響しないと考えられる。

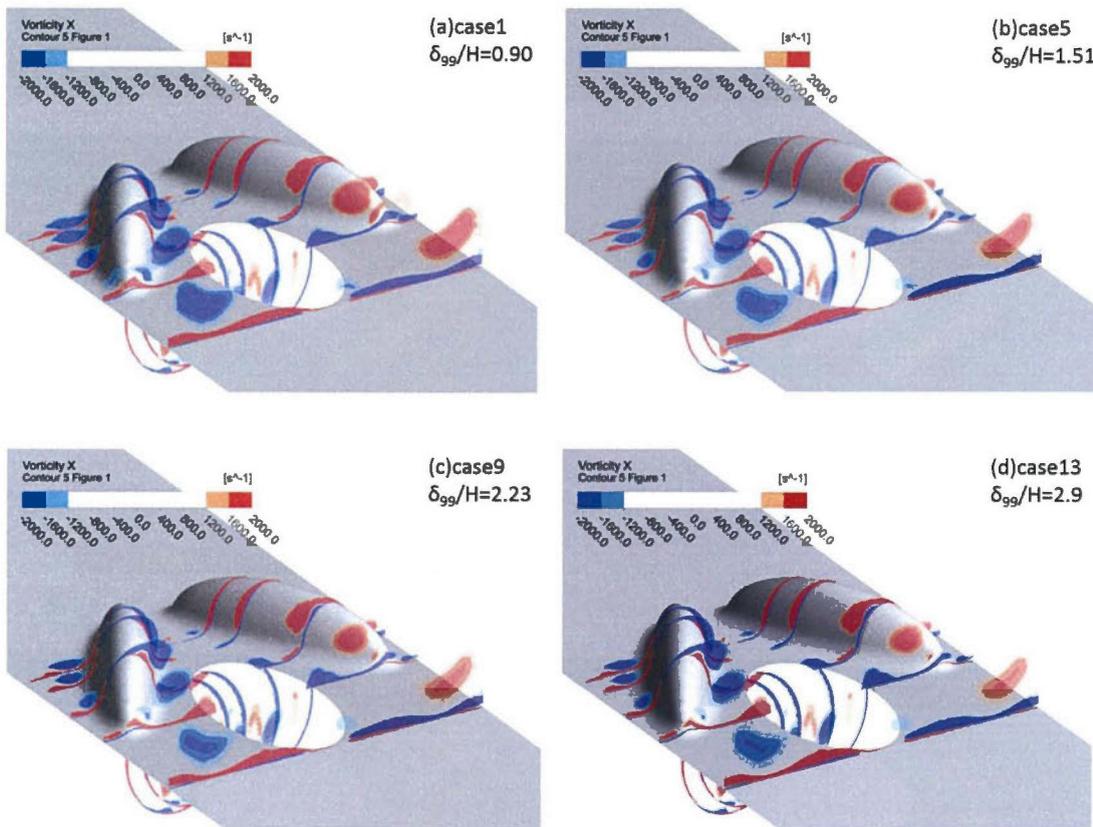


図 3.5.12 流れ方向渦度分布

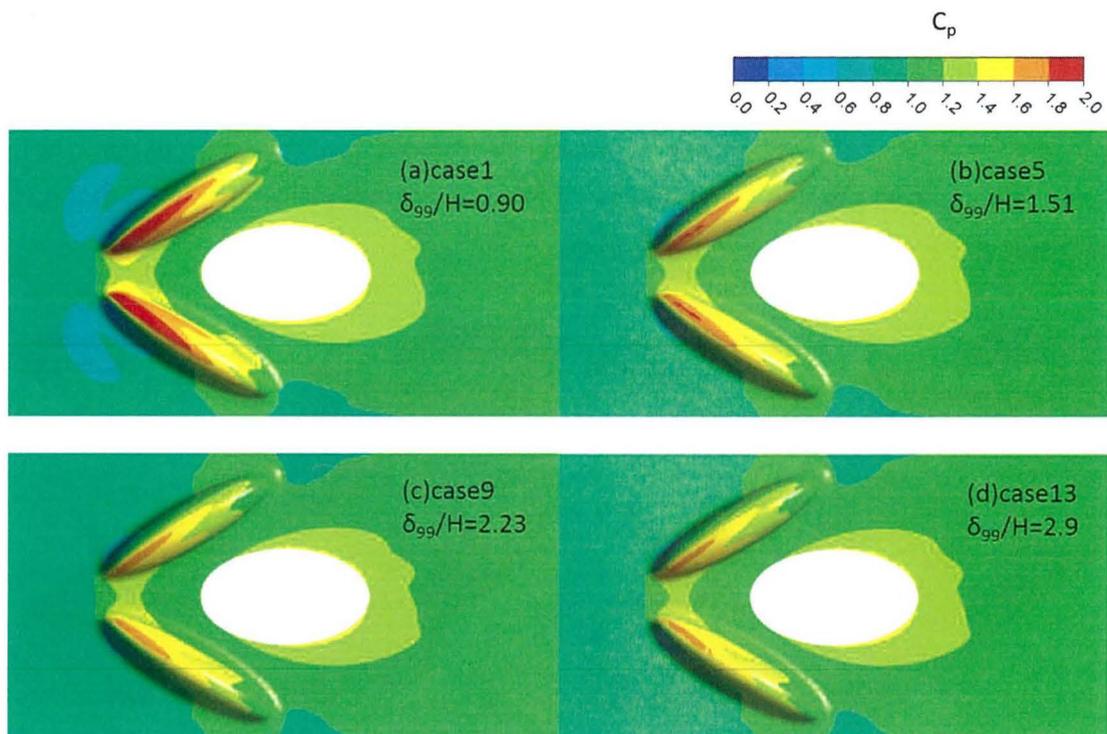


図 3.5.13 圧力係数分布

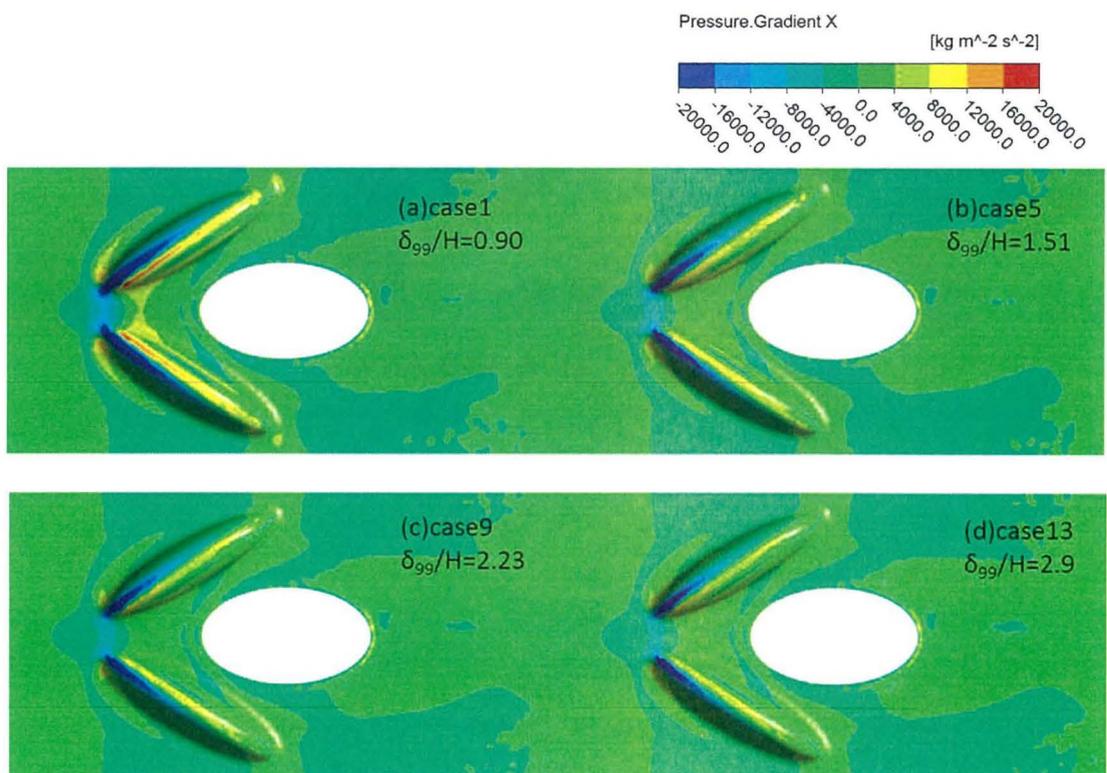


図 3.5.14 流れ方向圧力勾配分布

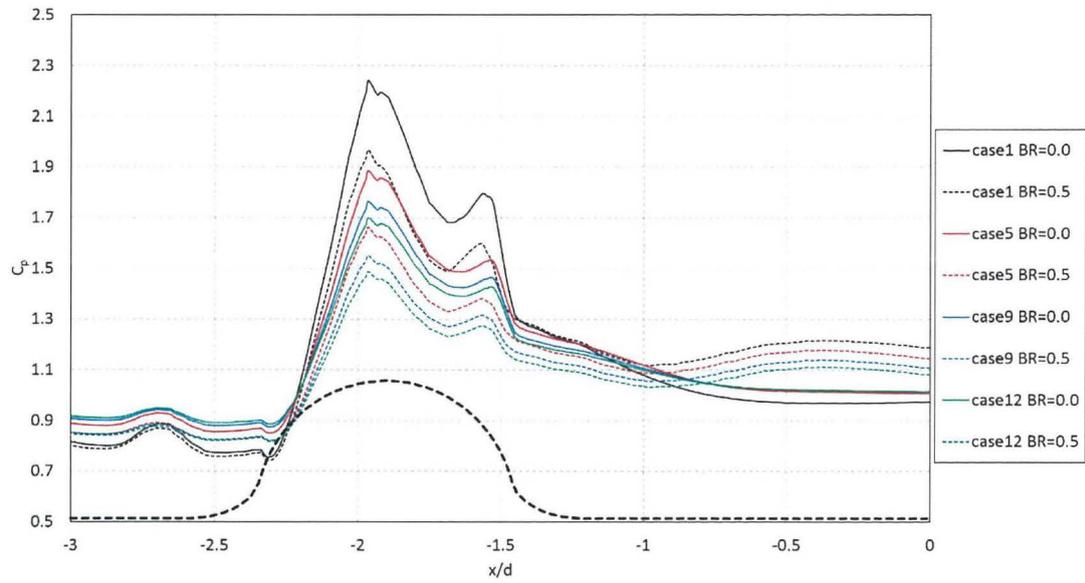


図 3.5.15 流れ方向 C_p 分布 ($z/d=0.15$)

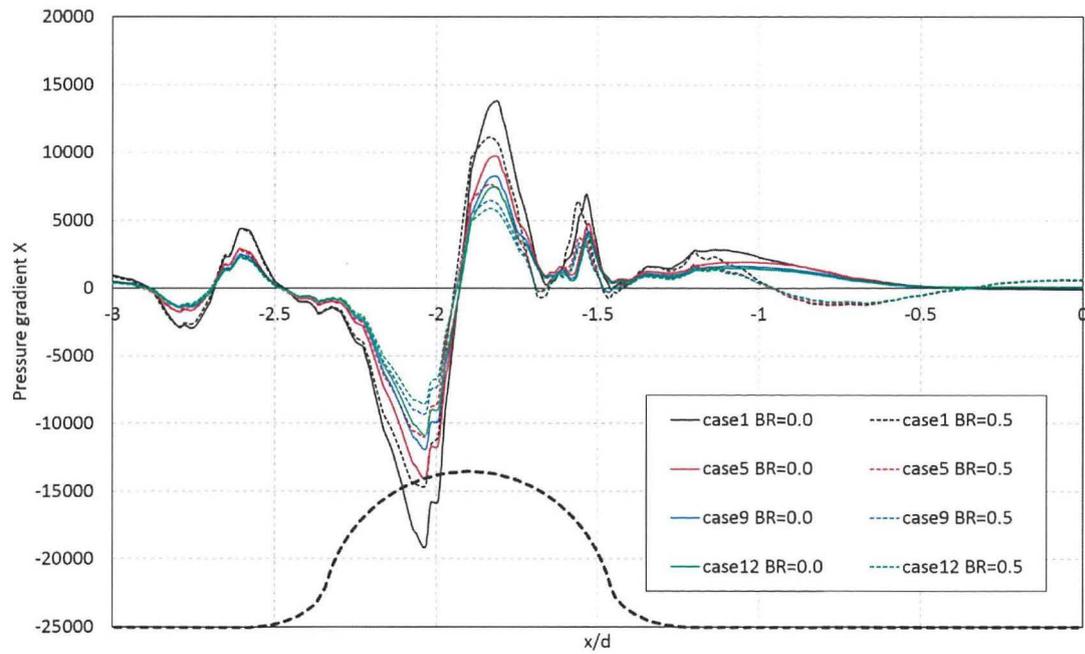


図 3.5.16 流れ方向圧力勾配分布 ($z/d=0.15$)

図 3.5. 17 には、各境界層厚さによるフィルム効率分布を示している。前述したように、境界層厚さが変化しても、デバイスから発生する基本的な渦構造は存在しているため、横方向にフィルム効率分布が拡大している様子が観察され、各条件での差異は明確には現れていない。フィルム効率のわずかな違いを観察するために、図 3.5. 18 には、各形態におけるスパン方向平均フィルム効率を示している。また、冷却孔出口付近のグラフ拡大図は図 3.5. 19 へ示した。コンター上では、フィルム効率の差異が明確ではなかったが、スパン方向平均値では、各境界層厚さで平均フィルム効率が異なっていることが分かる。拡大図を観察すると、冷却孔付近の領域においては、境界層厚さが薄くなるに従って、平均フィルム効率が高くなっている様子が観察できる。これは、図 3.5. 12 にも示したように、境界層厚さが渦移場合には比較的強い逆圧力勾配が生じることで、比較的大きな剥離渦が発生し、Device base vortex の渦構造が強いためである。これに対して、 $z/d=2$ より下流の領域に関しては、境界層厚さが薄い条件ほどフィルム冷却効率の低下が見られている。これは、デバイスから発生した渦構造が強いために、主流と二次空気のみキシングが促進され、下流領域のフィルム効率を比較的早く減衰させてしまう効果と考えられる。

各形態のフィルム冷却効率を整理するために、図 3.5. 20 には、面平均フィルム効率を示した。面平均フィルム効率は最終的に、境界層厚さが厚いほど高くなっている。下流領域までを評価対象にした場合、境界層厚さが薄い場合にはデバイスから発生する渦は強いが、最終的な性能は低下させてしまうことが明らかになった。

空力性能の評価に関しては、図 3.5. 21 に計算ドメイン最下流領域における全圧損失係数分布を示している。境界層厚さが厚くなった場合、前述のようにフィルム効率は比較的高い値を示したが、全圧損失係数は、境界層厚さが薄い場合よりも、係数が高い箇所が拡大している。特に、これはデバイスから発生した渦構造の領域で顕著に観察された。図 3.5. 22 には、計算領域出口における case1 の結果で規格化した流量平均全圧損失係数を示している。流量平均全圧損失係数は、最終的には境界層厚さの変化によって、case13 は case1 の 1.6 倍の平均損失を示していた。フィルム効率と境界層厚さの関係と比較すると、損失係数の増加率はフィルム効率の平均値よりも大きくなっていることが分かった。

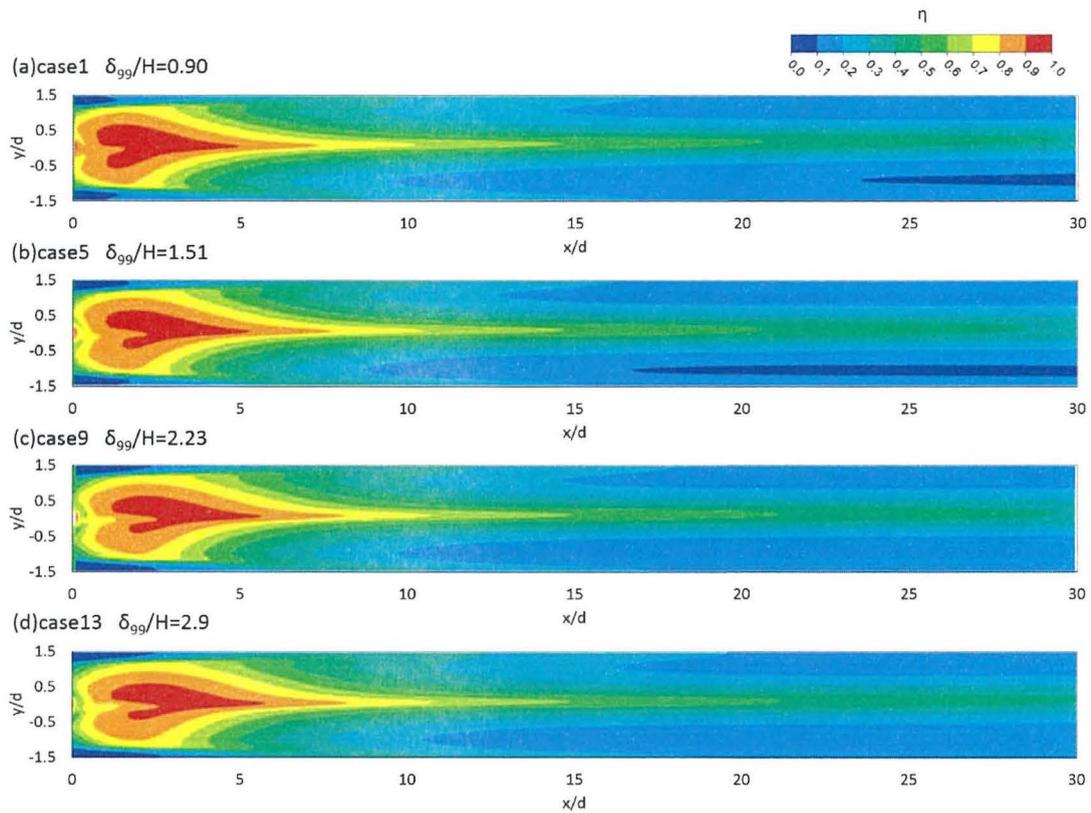


図 3.5.17 フィルム効率分布

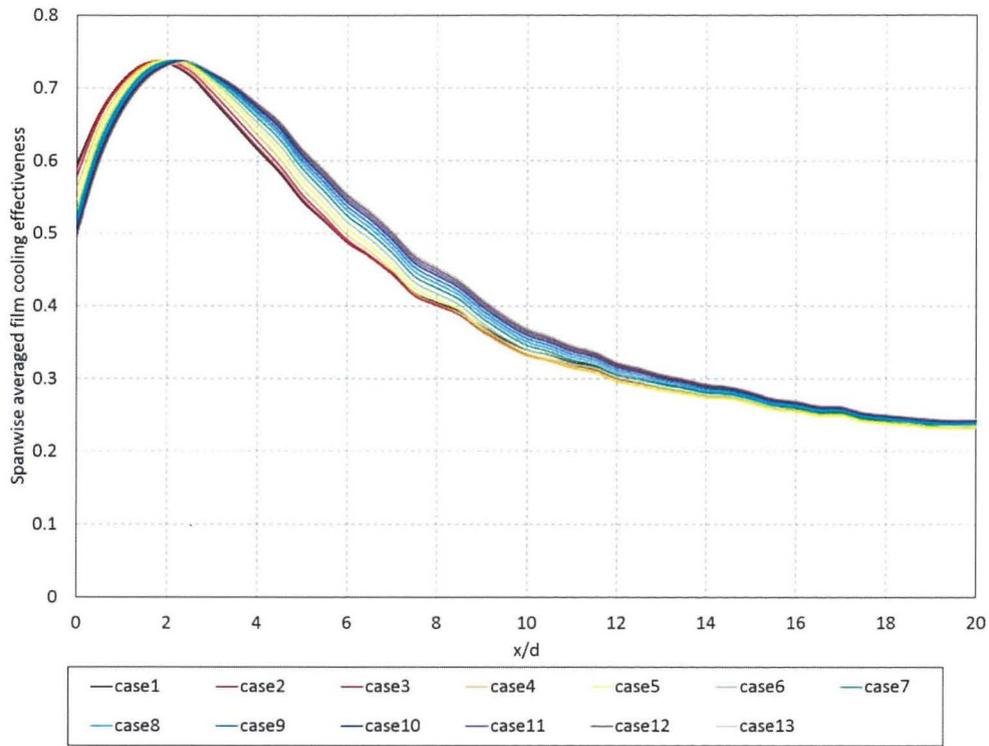


図 3.5.18 スパン方向平均フィルム効率

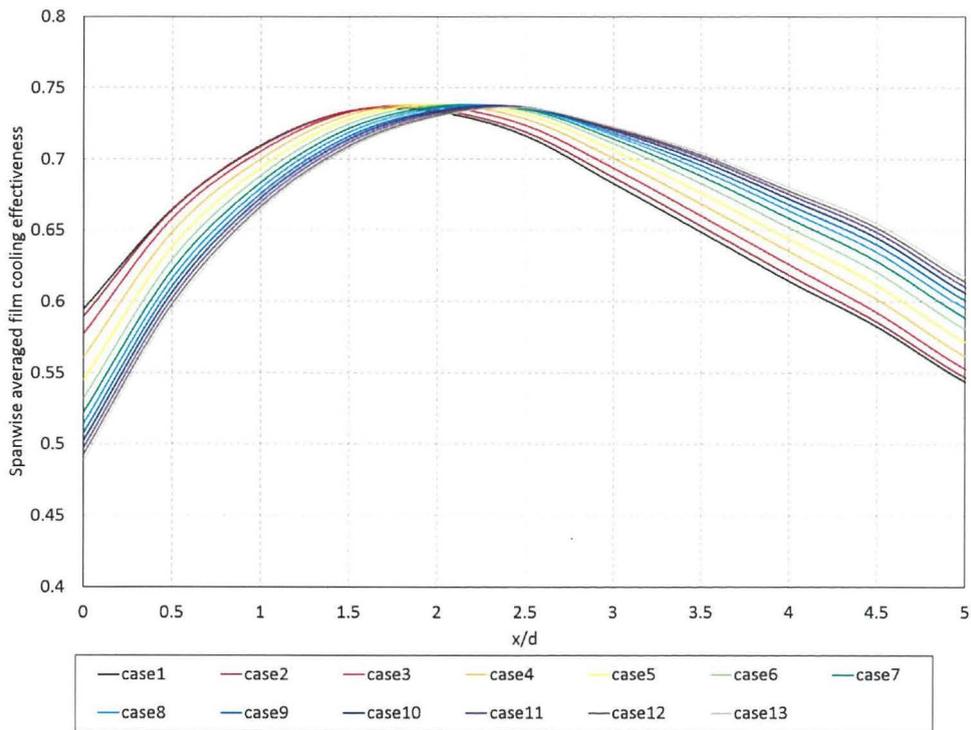


図 3.5.19 スパン方向平均フィルム効率 (冷却孔付近)

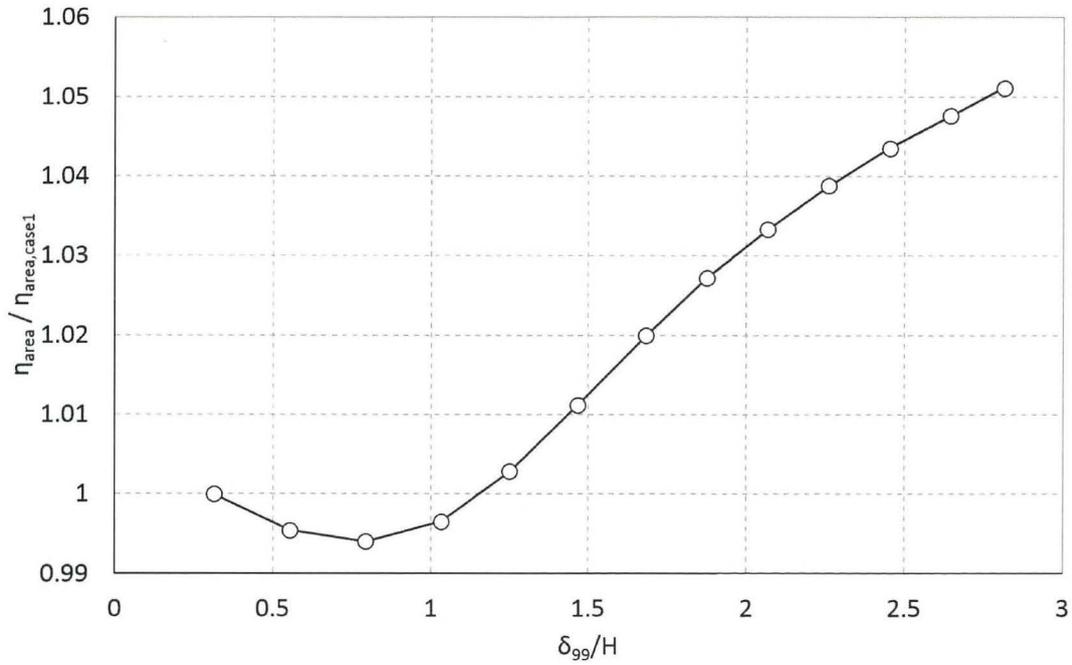


図 3.5.20 面平均フィルム効率と境界層厚さの関係

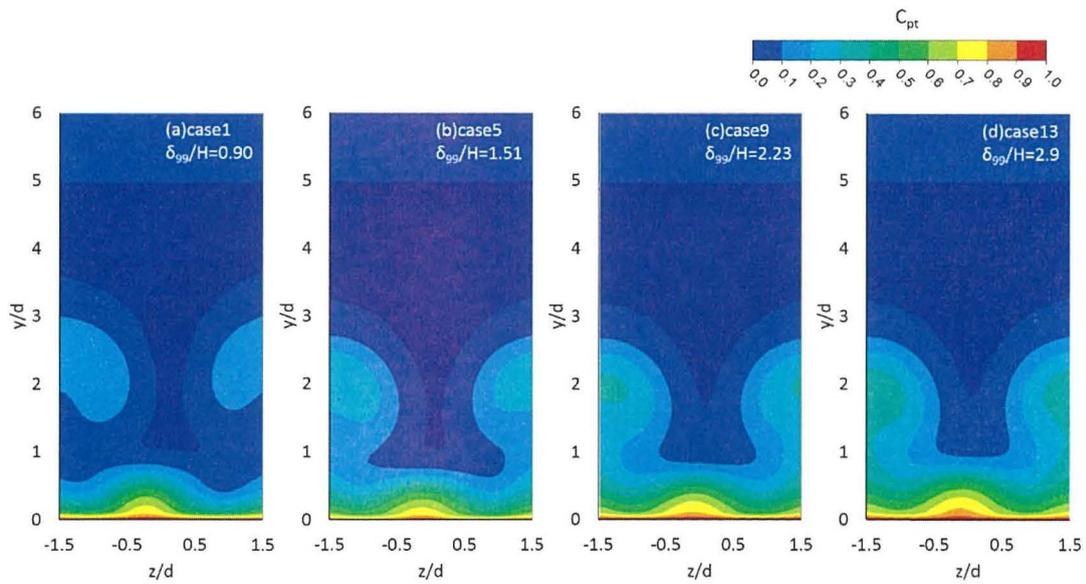


図 3.5.21 全圧損失係数分布

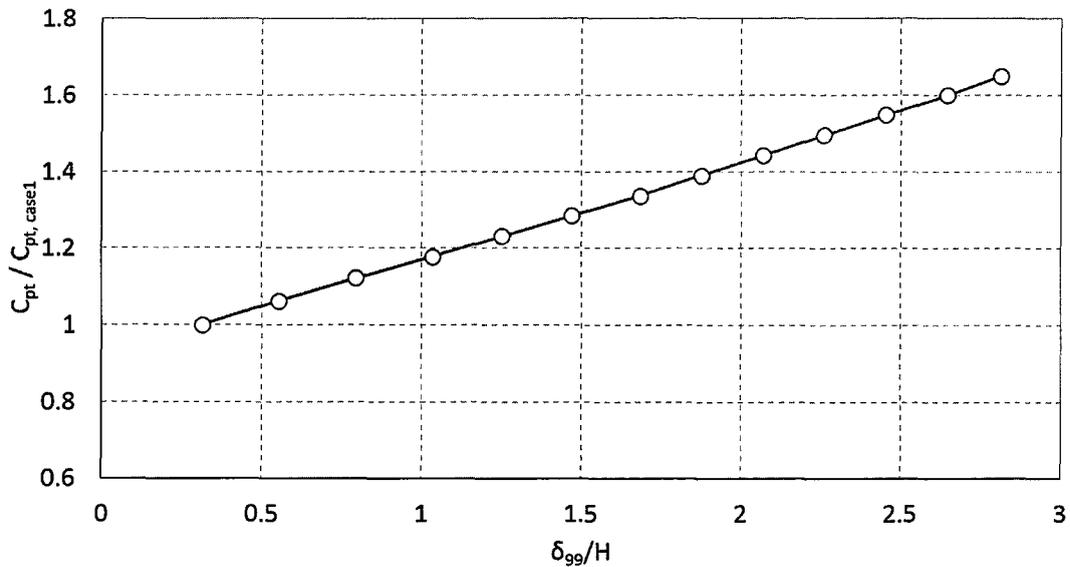


図 3.5.22 流量平均全圧損失係数（計算ドメイン出口）

3.6 本章のまとめ

本節では、フィルム冷却性能の改善，向上を目的として，FCD を冷却孔上流に取り付け実験を行った。また，冷却孔ピッチや，主流流入角変化させた試験を行うことで，冷却空気削減の可能性を探索した。以下に，本研究により得られた知見を示す。

(1) DFCD の効果

- 図 3.6.1 には DFCD のフローモデルを示す。DFCD を設けた形態では，DFCD から発生した縦渦が CRVP と逆回転であることが流れ場計測の結果から明らかになった。この縦渦は CRVP による二次空気 lift-off を抑制し，二次空気の壁面附着性，拡散性向上に寄与している
- DFCD の下流側で発生している縦渦の起源は，主にデバイスの外側の領域を通過し，デバイスの下流側エッジで巻き上がる馬蹄形渦と，デバイスの上部を通過し主流が剥離することで生じる剥離渦である。最終的には，この2つの渦構造が下流側で絡み合うことで，縦渦を大規模化させ，CRVP の制御能力を高めている
- $BR=0.5$ において，CH DFCD は，DFCD を設けない CH, SH よりも高い面平均フィルム効率を示した。また， $BR=1.0$ においても，CH DFCD は SH と同等の面平均フィルム効率を示した。しかし，スパン方向平均フィルム効率で見ると，冷却孔出口付近のフィルム効率が非常に高い値を示す SH に比べ，CH DFCD は $x/d=2.0(BR=0.5)$ や $x/d=3.5(BR=1.0)$ といった下流側でフィルム効率が上回るような結果となった。また，スパン方向にフィルム効率のライングラフを取ってみても，CH DFCD の方が，フィルム

の付着面積が広いことが示された。このことより、CH DFCD と SH は面平均フィルム効率としては同等でも、フィルムの付着面積で比較すると CH DFCD のほうが優位であると考えられる。

- CH DFCD は冷却孔ピッチを広げた場合、CH $p/d=3.0$ に比べ、単位面積当たりの二次空気流量が減少しているにもかかわらず、フィルム効率は高くなっていた。このことより、FCD を冷却孔上流に設置することで冷却空気量を削減できる可能性が示された。
- SH DFCD は SH と比較して、全ピッチ、全吹き出し比で高いフィルム効率を示していた。このことから、SH に FCD を取り付けることで、更なるフィルム効率の向上が見込まれる。また、SH DFCD $p/d=4.5$ は、SH $p/d=3.0$ よりも高いフィルム効率を示しており、SH に対しても冷却空気削減の可能性があると考えられる。
- FCD を設けた形態では、FCD 無しの条件と比較して、空力損失は増加する傾向にあった。
- CH に DFCD を取り付ける場合には、熱伝達率の増加に注意を払う必要がある。今回の研究では、吹き出し比が高い場合は、CH DFCD で、熱伝達率が非常に高くなることが示されているため、熱流束低減率が低下してしまう可能性があることが明らかになった。

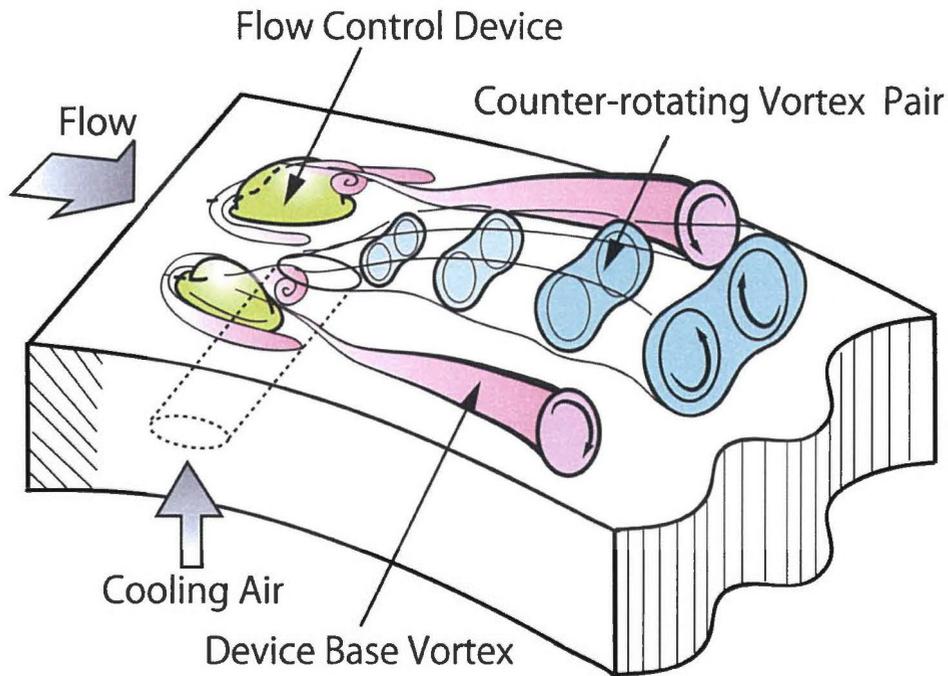


図 3.6.1 流れ制御デバイスのフローモデル

(2) 流入角の効果

- 特に下流側での二次空気付着性と拡散性が強まるために、デバイスを設置しない条件で、流入角を設けた条件では、フィルム効率の上昇が観察された。DFCD 有りの条件での、フィルム効率の変化率は-20%~+30%程度であった
- 流入角増加に伴い、損失分布領域が拡大し、全体的に損失は増加する傾向にあった。また、DFCD 有りの条件での、全圧損失の変化率は-6.9%~+13%程度であった
- 流入角増加に伴い、正の渦度が大規模化、それによって CRVP が左右非対称となり、二次空気のスパン方向拡散性、壁面付着性を向上する結果となった。しかし、速度変動 RMS 分布を見ると、全体的に速度変動 RMS は増加傾向にあり、流入角増加により、主流と二次空気のミキシングが強まっていると考えられる
- 以上より、流入角を設けることで二次空気拡散性は強まるが、特に正の渦度領域において主流とのミキシングが大きくなるために、 $BR=0.5$ のように二次空気運動量が小さい条件においてはミキシングによる二次空気の温度低下が大きく、フィルム効率の減衰が早まったと考えられる
- RH と SH では、SH の方が流入角の増加と共に NHFR を増加させる結果となっており、流入角の変化に対しては SH の方が耐久性が高いと見られる

(3) 境界層厚さの効果

- 境界層厚さは、デバイス上での圧力勾配に影響を与えており、境界層厚さが薄くなるのに従って、デバイス上の圧力勾配は強くなる。特に、デバイスの下流領域では、逆圧力勾配が生じており、境界層が薄くなると、逆圧力勾配が強くなることで剥離が大規模化する。
- 境界層厚さの変化は CRVP の制御能力にわずかに影響を与えているが、デバイスから発生する基本的な渦構造が変化することは無く、CRVP の制御能力は、いずれの境界層厚さでも発揮される