

2.4.6 数値解析手法

2.4.6.1 計算領域

図 2.4. 35 には解析領域を示す。テストセクションダクトの大きさに比べると、計算領域の流れ方向の長さは短くなっているが、これは Device よりも下流の領域は壁面付近の格子点数を増やしているために、計算領域を延長することができなかったためである。計算領域の流れ方向の長さに関しては、計算領域が短すぎることによって起因する出口境界での逆流現象など、冷却孔周りの流れ場を解くために支障をきたす現象が起こっていないことを予め確認している。スパン方向に関しては 1 ピッチのみを解析対象とした。プレナム部分の領域は実験装置に比べると小さい領域となっているが、プレナム部分の領域の大きさは二次空気の噴き出し挙動に影響は与えないと考え、図中の大きさとした。主流ダクトの高さに関しても、テストセクションダクトに対して小さいがこれも二次空気の噴き出し挙動に影響を与えないと考え $6d$ と定めた。

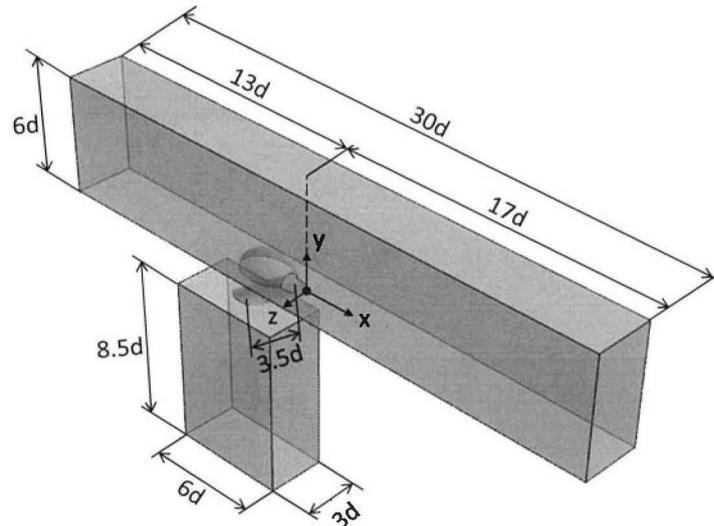


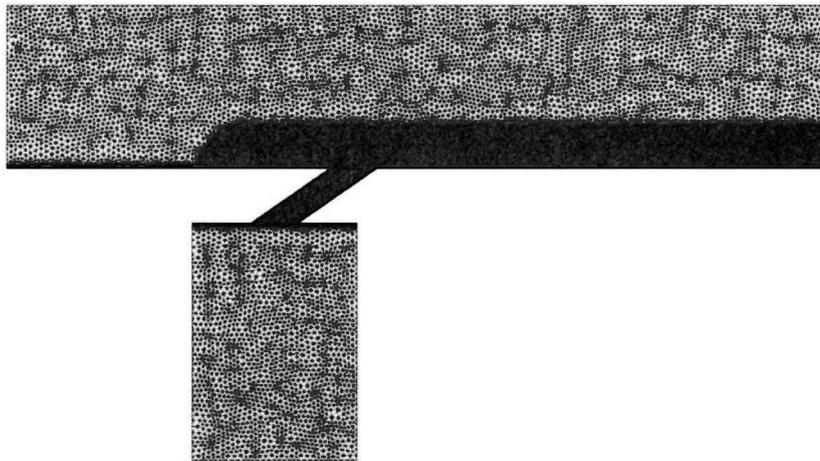
図 2.4. 35 平板モデル解析対象

2.4.6.2 計算格子

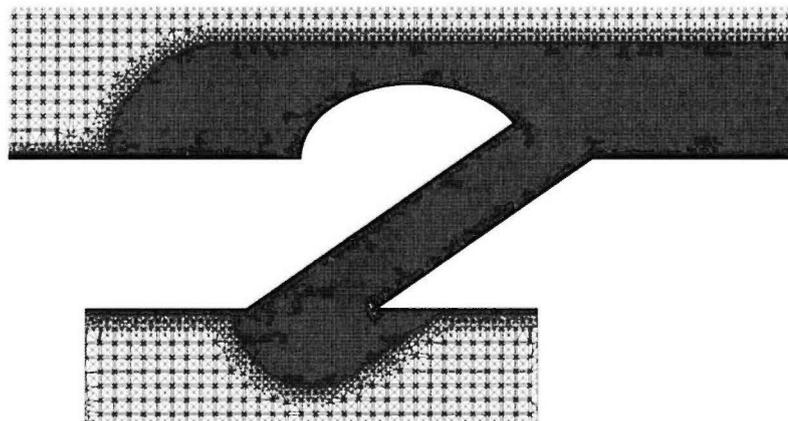
平板モデルの計算格子も前縁モデルの計算格子と同様に、壁面付近の境界層を精度よく捉えられるようにすること、二次空気と主流が混合する流れ場を捉えることに留意して計算格子の作成を行った。さらに、平板モデルの計算格子は Device を用いた形態の作成を行う必要がある。そこで Device を用いた供試体と Device を用いない供試体では計算の手法をできるだけ同じにするために、計算格子の作成方法は統一するようにした。前縁モデルの計算格子と同様に、複数の領域に分割して計算格子を作成すれば Device なしの供試体に関しては計算格子の品質が高くなると考えられるが、一方で Device を用いた供試体にはこの方法では計算格子の作成を行うことができなかった。そこで、平板モデルの計算格子は、

計算領域を全て一体として計算格子の作成を行うこととした。

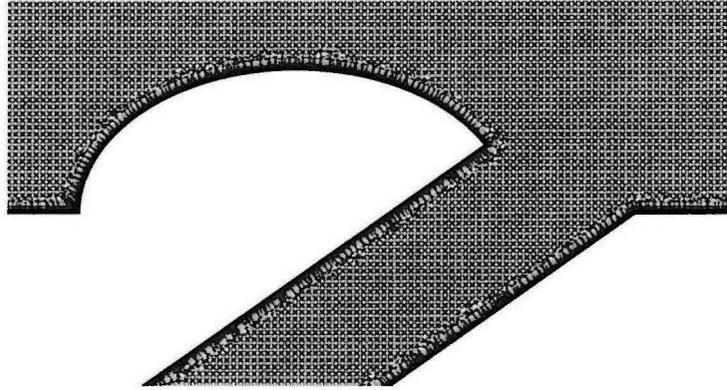
図 2.4. 36 には平板モデルの計算格子の外観図を示す。(a)は計算格子の全体図を示す。平板モデルの計算格子は冷却孔内部化から、二次空気が冷却孔から噴き出して存在する領域は計算格子のサイズを小さくしている。壁面の格子は $y+<1$ を満たすように作成し、壁面付近の格子は境界層を精度よく改造するためにプリズムメッシュを用いた。(b), (c)には Device 周りの計算格子を示している。プリズム格子の作成の際には冷却孔や Device の縁で計算格子の品質が低下しないように留意し、格子作成パラメータの設定を行った。



(a)平板モデル計算格子全体図



(b)平板モデル計算格子 (冷却孔内部, Device 周り壁面)



(c)平板モデル計算格子（壁面付近拡大図）

図 2.4.36 平板モデル計算格子

2.4.6.3 境界条件

表 2.4.2 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 2.4.2 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
ダクト側面	周期境界

2.4.6.4 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。今回は乱流モデルの影響を調査した結果 2D Device は $k-\epsilon$ モデル, それ以外の形態に関しては SST モデルを用いて解析を行った場合に, 比較的フィルム効率分布が一致していたため, 上記のモデルを用いて各形態の RANS 解析を行った。

2.4.6.5 DES・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くことができることが挙げられる。しかし, 計算格子が改造する渦の大きさよりも大きくなってしまうと, 渦構造を解像することができず非定常 CFD を行う意味がなくなってしまう。計算格子の大

きさに関しては経験的なものが影響する面がある上、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 (CFL 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。

$$CFL = \frac{\lambda \Delta t}{\Delta} \quad (2.4.1)$$

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 DES を行う場合では 20 程度、LES を行う場合では 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, DES では計算領域名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、本解析における時間刻みは、DES と LES でそれぞれ

$$t_{FP,DES}^* = 5.00 \times 10^{-3} d_{FP} / U_{\infty} \quad (2.4.2)$$

$$t_{LE,LES}^* = 2.025 \times 10^{-3} d_{LE} / U_{\infty} \quad (2.4.3)$$

とした、

2.4.7 CFD 結果

2.4.7.1 RANS 解析結果

(1) フィルム効率

図 2.4.37 には、実験と CFD で得られた $BR=0.5$ におけるフィルム効率分布を示している。比較的二次空気の付着性が高いような流れ場では、CFD 結果はフィルム効率を過大に評価しており、温度の拡散を解けていないことが分かる。一方で、3D Device2 のように、二次空気が lift-off する傾向にある流れ場に冠詞は、剥離を過大に評価しており、逆に実験値よりもフィルムの付着性が得られていないことが分かる。今回、定性的なフィルム効率分布の傾向が十分に捉えられなかったのは、3D Device1 であった。この形態に関しては、スパン方向のフィルム効率分布の傾向が予測できておらず、実験よりも冷却孔付近のフィルムの付着面積が過大に評価されていることがわかる。

図 2.4.38 には、実験と CFD で得られた $BR=1.0$ におけるフィルム効率分布を示している。 $BR=0.5$ の 3D Device2 で得られた傾向のように、吹き出し比が高い条件では CFD 結果では lift-off を課題に評価しており、冷却空気の付着面積の予測精度は全体的に低下している傾向が分かる。一方で、2D Device のような $BR=1.0$ でも冷却空気の付着が見られる形態に関しては、CFD の予測精度が比較的高く、実験で得られたフィルム効率分布の傾向をよく捉えられているように見える。

図 2.4.39 には、 $BR=0.5$ におけるスパン方向平均フィルム効率を示している。Device を取り付けた形態に関しては、予測精度が二次空気の付着性によって異なるために、CFD では実験で得られたフィルム効率の大小すらも捉えられていなかった。比較的予測精度が高かったのは、BASE や 2 Device で、この形態に関しては定量的にはフィルム効率の予測ができていないものの、定性的なフィルム効率の値に関しては予測ができていた。図 2.4.40 には、 $BR=1.0$ におけるスパン方向平均フィルム効率を示している。BR が増加すると、さらにフィルム効率の予測精度は低下しており、各形態の性能を予測することは難しい。

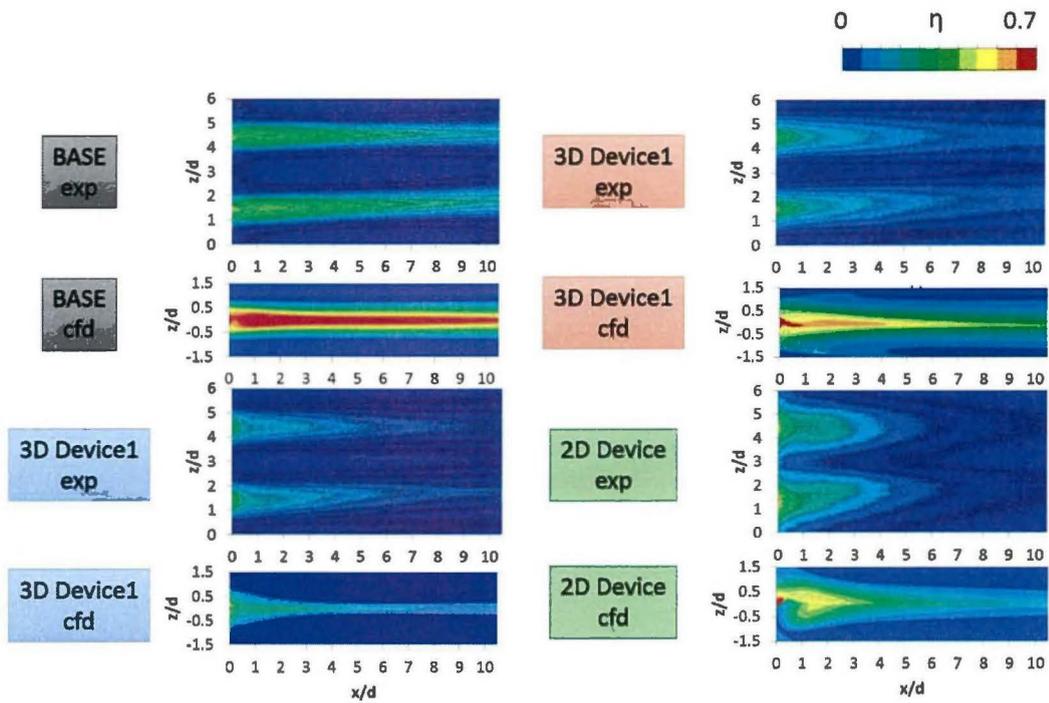


図 2.4.37 フィルム効率分布 ($BR=0.5$)

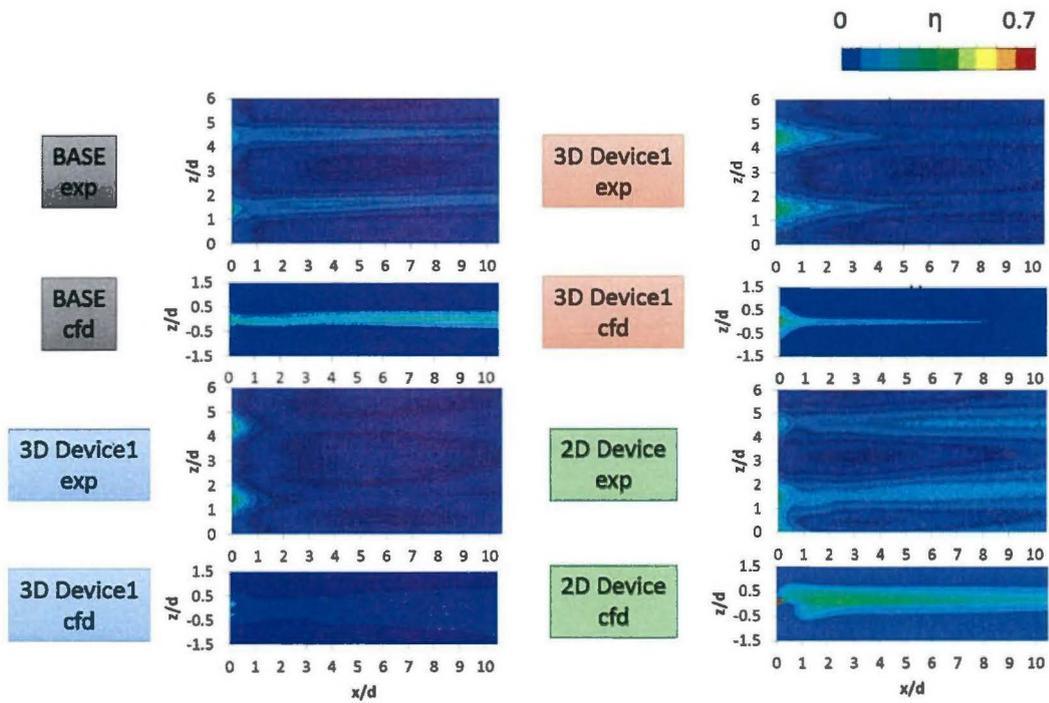


図 2.4.38 フィルム効率分布 ($BR=1.0$)

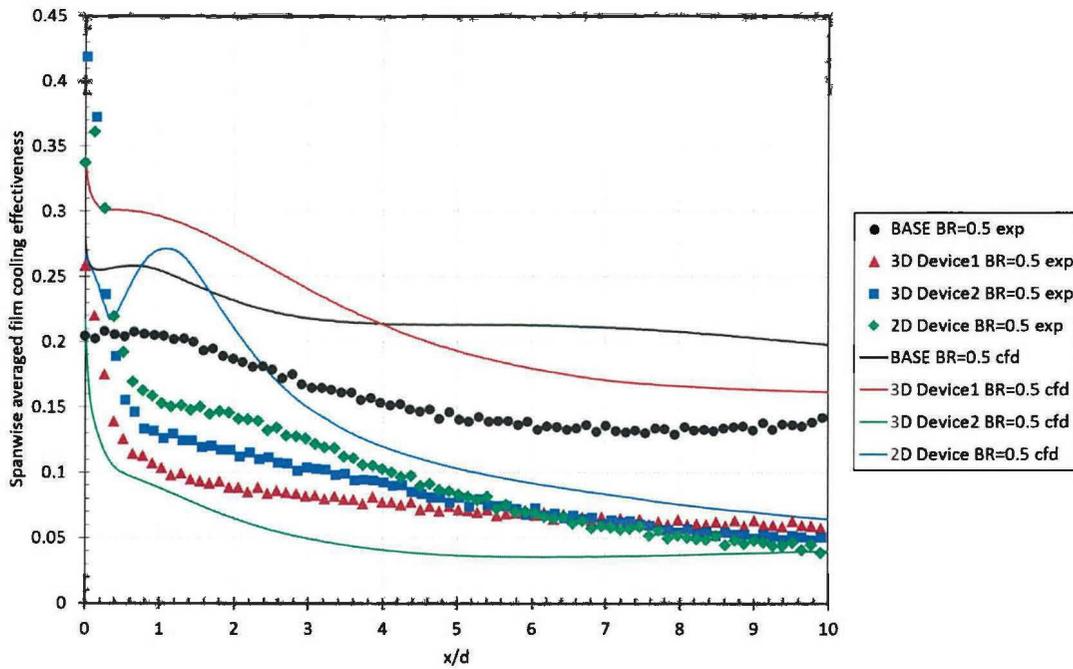


図 2.4.39 スパン方向平均フィルム効率 ($BR=0.5$)

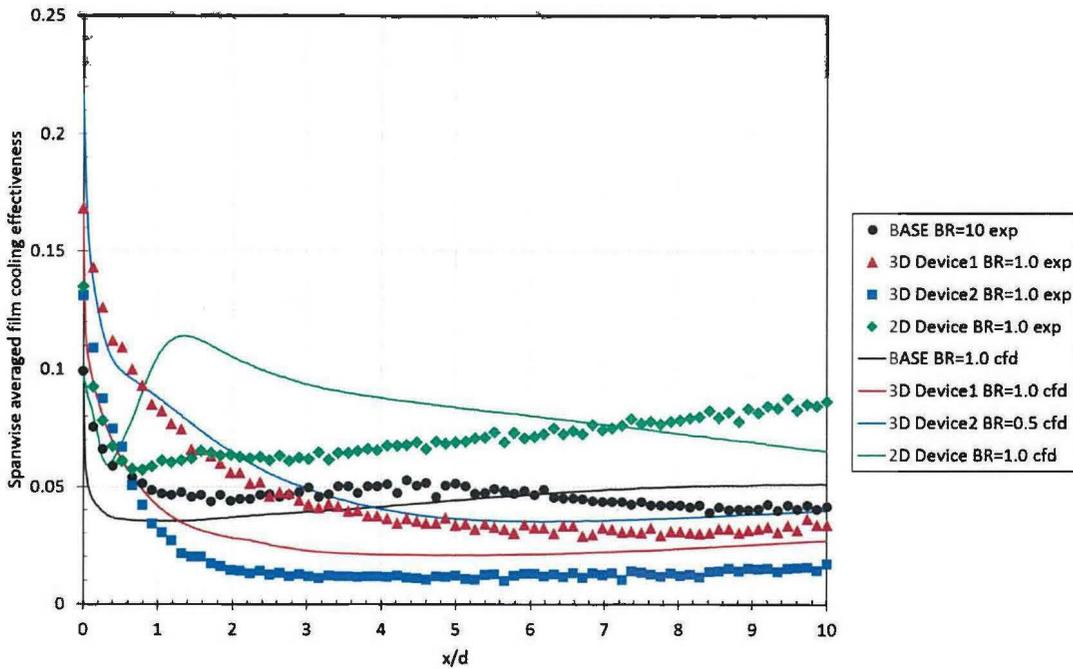


図 2.4.40 スパン方向平均フィルム効率 ($BR=1.0$)

(2) 空間温度場

図 2.4.41 には、BASE 形態における空間温度場を、実験と CFD で比較した様子を示している。BASE 条件の場合、最大の特徴は温度の減衰が見られないことで、 $x/d=5$ から 10 での無次元温度の減衰が実験ほど捉えられておらず、下流領域においても無次元温度が高くなったままである。フィルムの付着性に関しては、空間温度場を観察すると、BASE 条件に関しては、予測精度はさほど悪くなく、定性的な傾向は捉えられているように見える。図 2.4.42 には、3D Device1 を取り付けた場合の、無次元温度分布を示している。デバイスを設置した条件では、デバイス自体から渦が発生しているため、主流と二次空気のマキシングが強められる。そのため、CFD、実験共に下流側の温度の減衰は BASE よりも顕著に見られている。3D Device1 についても、BASE と同様だが、空間温度場の傾向は良く解像できており、壁面付近で温度場がスパン方向に拡散する様子が CFD でも解けている。また、吹き出し比が高くなると、実験では温度場のコアが 2 つ現れるが、CFD の予測でも温度場が 2 股に分かれる様子が観察できる。図 2.4.43 には、3D Device2 における空間温度場を示している。実験と空間温度場を比較すると、3D Device2 は他の形態とは異なり、温度コアが壁面から離れてしまっている。図 2.4.44 には、2D Device における空間温度場を示している。2D Device は壁面フィルム効率の傾向が実験と定性的に一致していたが、空間温度場を見ると予測精度に難があることがわかる。特に、スパン方向の広がりに関しては、実験値ではスパン方向にフィルムの拡散が捉えられているのに対して、実験では温度コアが丸型の形状をとった、

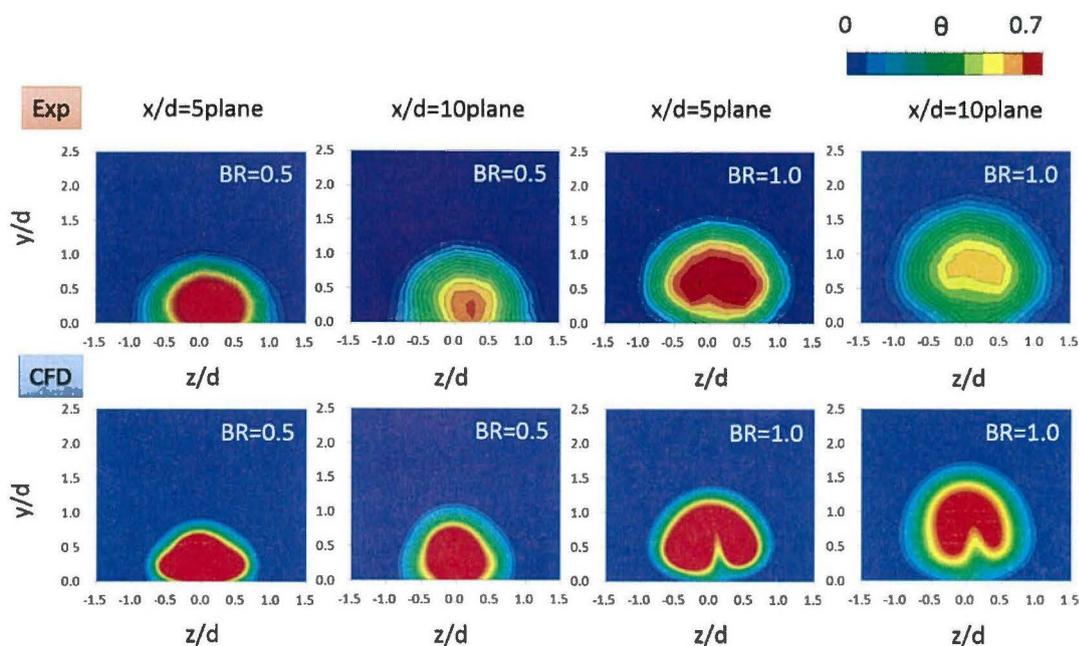


図 2.4.41 空間温度場の比較 (BASE)

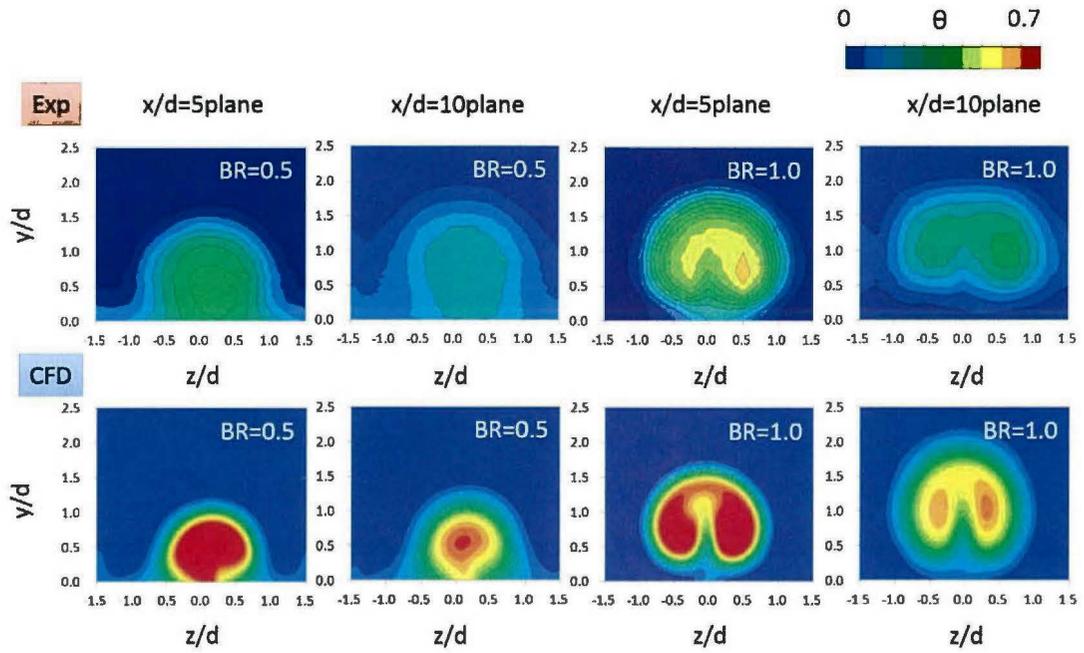


図 2.4.42 空間温度場の比較 (3D Device1)

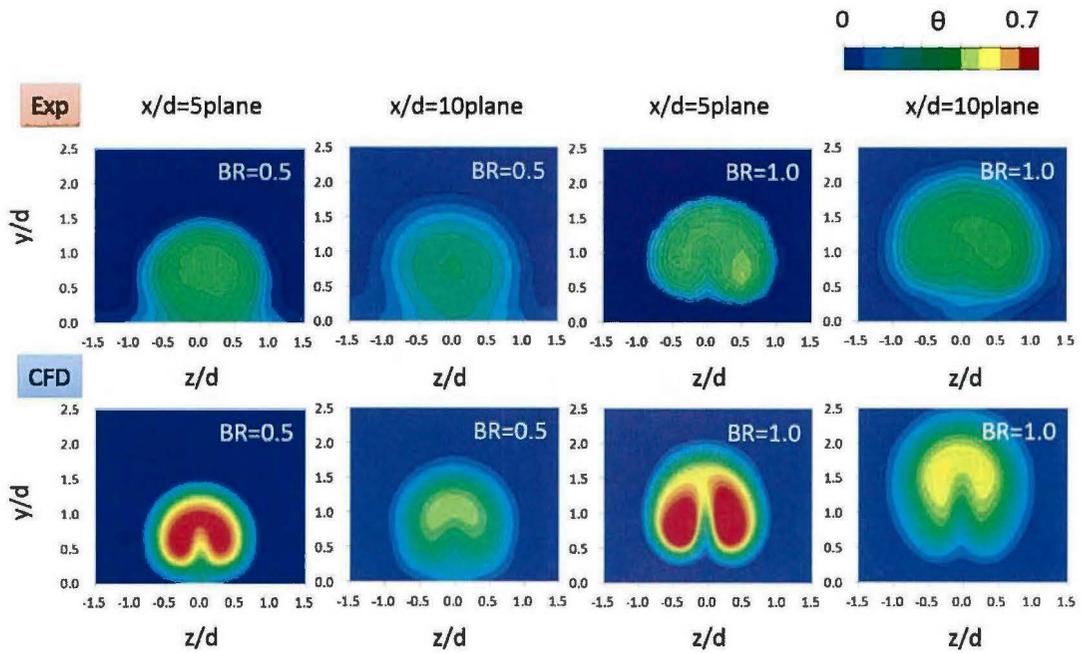


図 2.4.43 空間温度場の比較 (3D Device2)

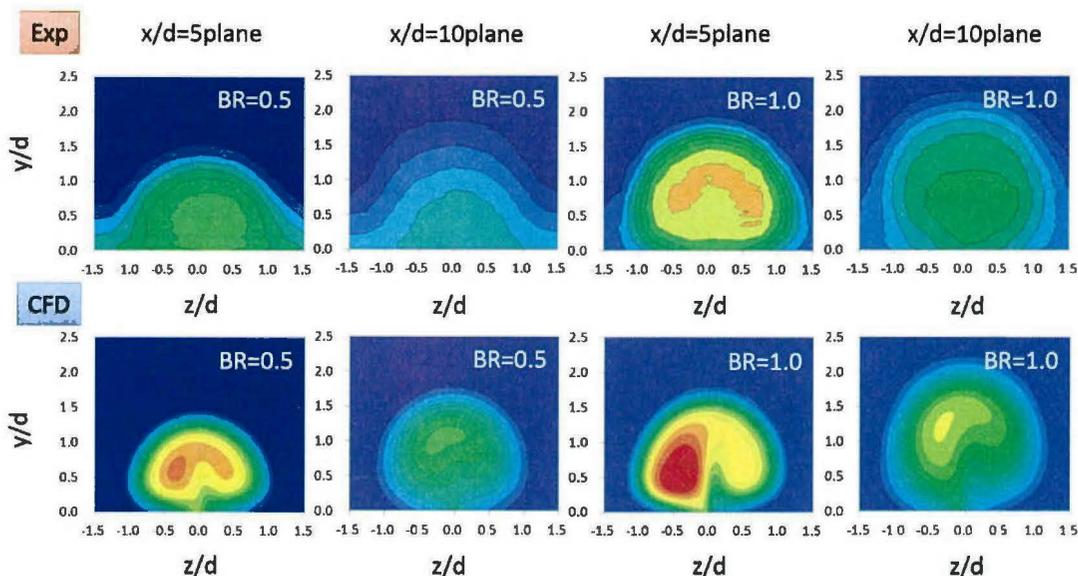


図 2.4.44 空間温度場の比較 (2D Device)

図 2.4.45 には、 $BR=0.5$ の条件で、壁面法線方向に無次元温度を平均し、 z 軸方向にプロットした値を示している。冷却孔に比較的近い $x/d=5$ の領域では、実験に比べると CFD の方が局所的にフィルム効率を課題に評価しているが、スパン方向で端の位置に関しては実験と CFD で傾向が一致している。一方で、 $x/d=10$ となると、BASE 形状に関しては、 $x/d=5$ と同様にセンターライン付近で、無次元温度を過大に評価する他、デバイスを設置すると、平均値のオーダーは実験と CFD でほぼ一致している。ただし、実験ではスパン方向に温度が拡散している様子が得られており、スパン方向の端の位置ではフィルム効率がわずかに上昇している。CFD では、このような傾向が捉えられていない。図 2.4.46 には、 $BR=1.0$ の条件で、壁面法線方向に無次元温度を平均し、 z 軸方向にプロットした値を示している。 $BR=1.0$ の条件下では、平均値の予測精度が実験値のオーダーに全体的に近づいている。

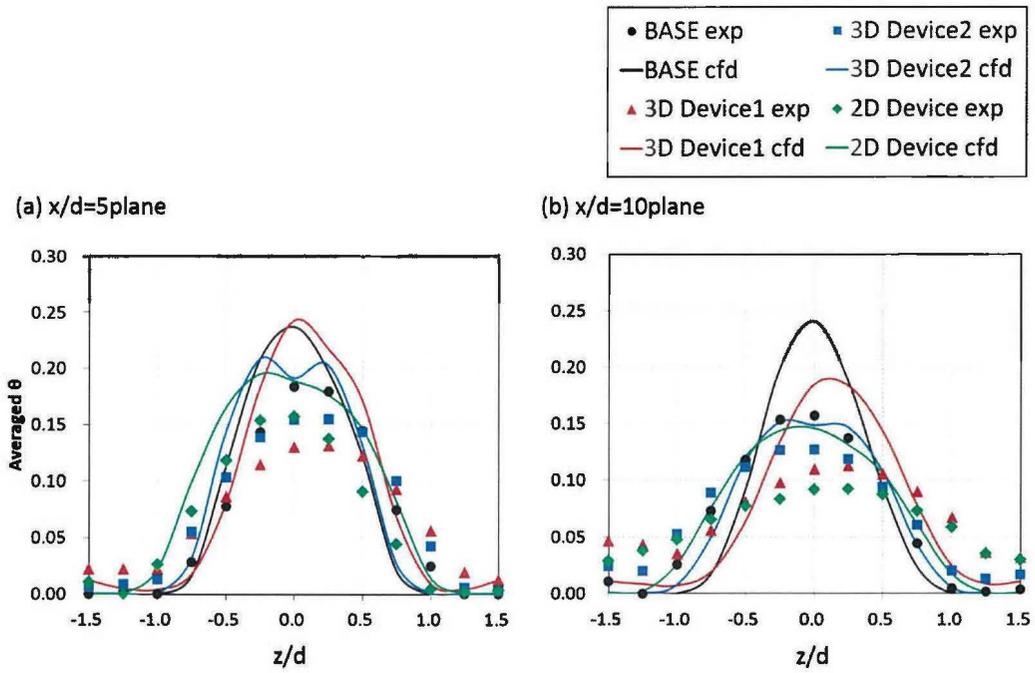


図 2.4.45 空間温度のプロファイル ($BR=0.5$)

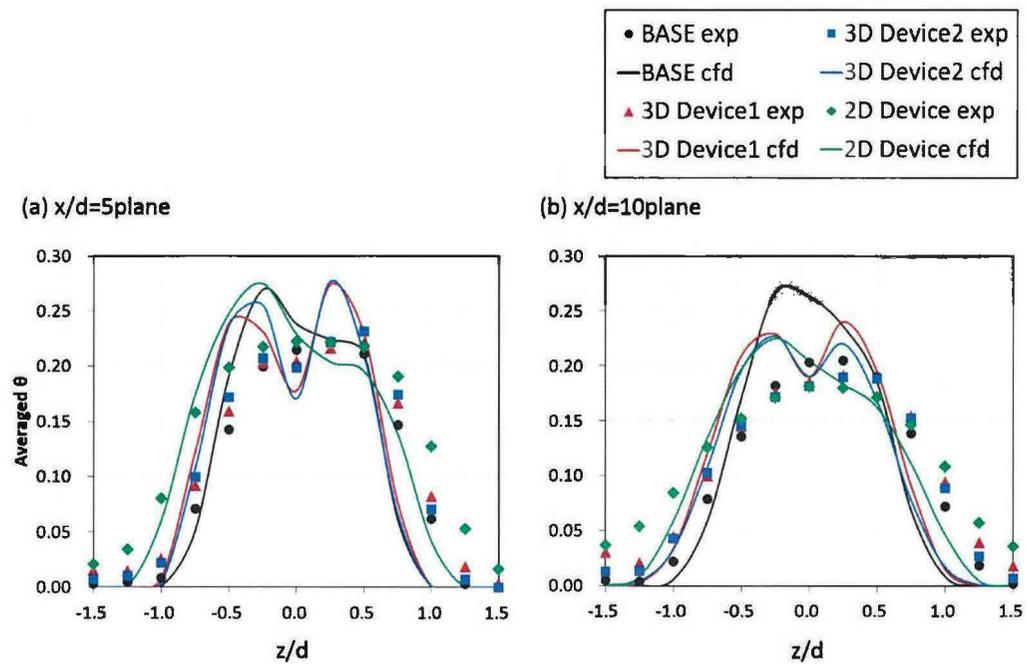


図 2.4.46 空間温度のプロファイル ($BR=1.0$)

(3) 全圧損失係数

図 2.4. 47 には、BASE における CFD と実験で得られた全圧損失係数を示している。実験と CFD では概ねロスの傾向は捉えられているが、吹き出しを行った条件では、吹き出し比が低い場合には、冷却孔センターライン上での全圧損失を CFD 側で高く予測している。一方、吹き出し比が高い場合には、ロスのオーダーは実験値に近くなっている。図 2.4. 48 には、3D Device1 の条件で、CFD と実験で得られた全圧損失係数を示している。BR=0.5 の場合、冷却空気脇のロスの分布は上流側のデバイスから発生した渦構造であると考えられるが、CFD ではデバイスから発生したロスを過大に評価している。また、冷却孔センターライン上でのロスに関しても、BASE と同様に過大評価していた。BR=1.0 の場合、実験ではデバイスから発生したロスの領域は壁面法線方向に縮小しているが、CFD では、依然としてデバイスから発生した渦の領域がくっきりと解像されていた。図 2.4. 49 には、3D Device2 の条件で、CFD と実験で得られた全圧損失係数を示している。実験の結果では、3D Device1 と比較すると、冷却孔センターライン上での全圧損失係数は、3D Device2 のほうが高くなっている結果が得られていたが、今回の CFD ではロスの傾向が逆転しており、3D Device2 の方がロスの値が低くなる結果となった。その他の傾向に関しては、3D Device1 と同様である。図 2.4. 50 には、2D Device の条件で、CFD と実験で得られた全圧損失係数を示している。BR=0.5 の条件においては、ロスの分布の傾向が、実験と CFD では全く異なっており、空間温度場の計測結果と同様に、ロスの傾向も捉えられていないことが分かった。しかし、BR=1.0 の条件に関しては、ロスの分布形状が実験値と定性的に一致しており、比較的予測精度の高かった条件であるといえる。

図 2.4. 51 には、スパン方向に平均した全圧損失を壁面法線方向にプロットした値を示している。BASE 形状を観察すると、ロスの定量的な違いはあるものの、分布の傾向としては CFD でも捉えられており、平均値の予測性能は比較的高くなっていった。デバイスを設置した条件に関しては、BR=0.5 での予測性能が比較的悪いことが分かる。実験結果では、ロスにピーク値は存在せず、なだらかなカーブを描いているが、CFD 結果ではピーク値が存在している。これは、デバイス自体から発生している渦構造で、ロスが高くなる箇所や、吹き出しのセンターライン上でロスが高くなってしまった現象を捉えたものである。一方で、BR=1.0 の条件に関してはロス平均値の予測精度が比較的高くなっており、実験値で得られたようなロスのピークを捉えられるようになる。特に、2D Device に関しては CFD でロスのピーク位置を概ね捉えられている。その他の形態に関しては、ロスのピーク位置がわずかに異なっており、二次空気の lift-off がし易い条件では、予測精度が低下する傾向が示唆された。

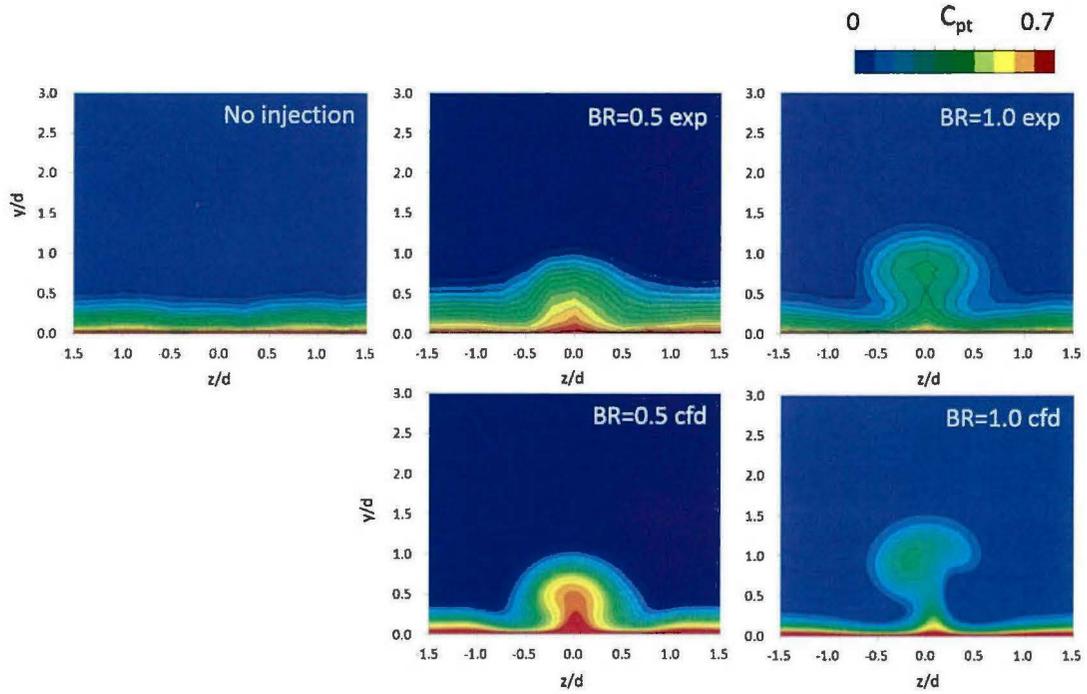


図 2.4.47 全圧損失の比較 (BASE)

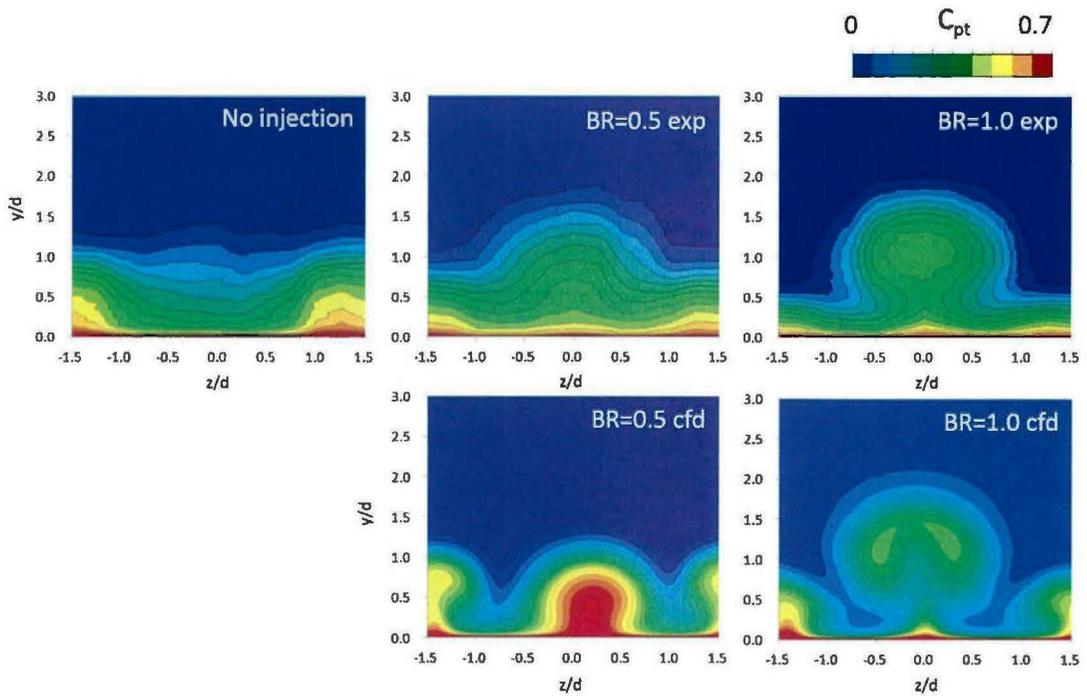


図 2.4.48 全圧損失の比較 (3D Device1)

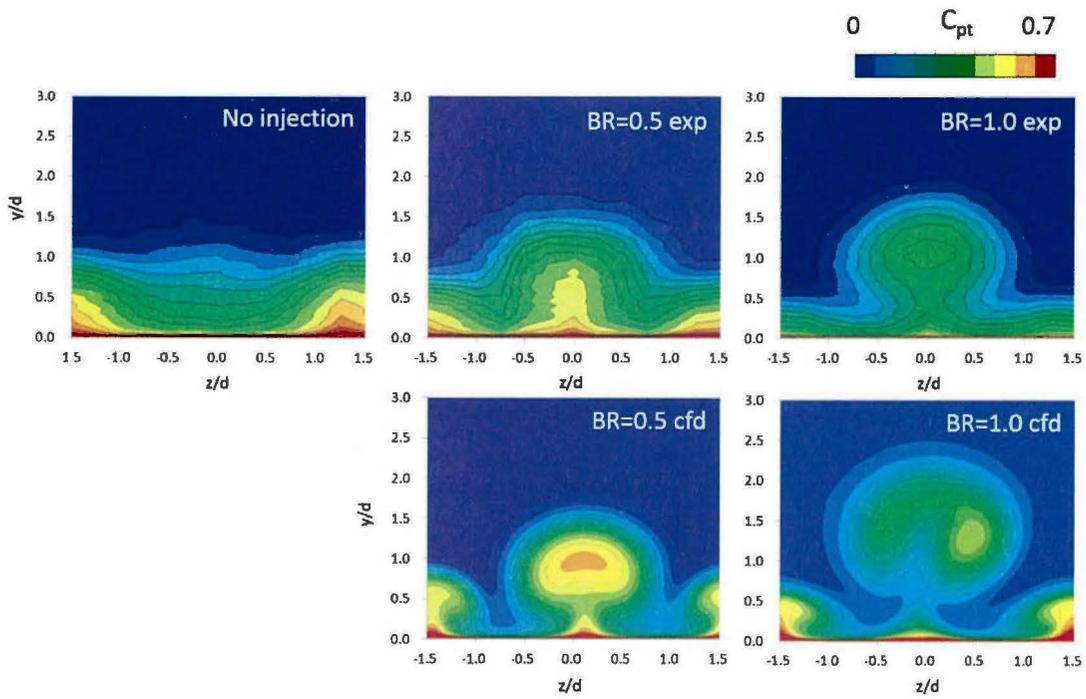


図 2.4.49 全圧損失の比較 (3D Device2)

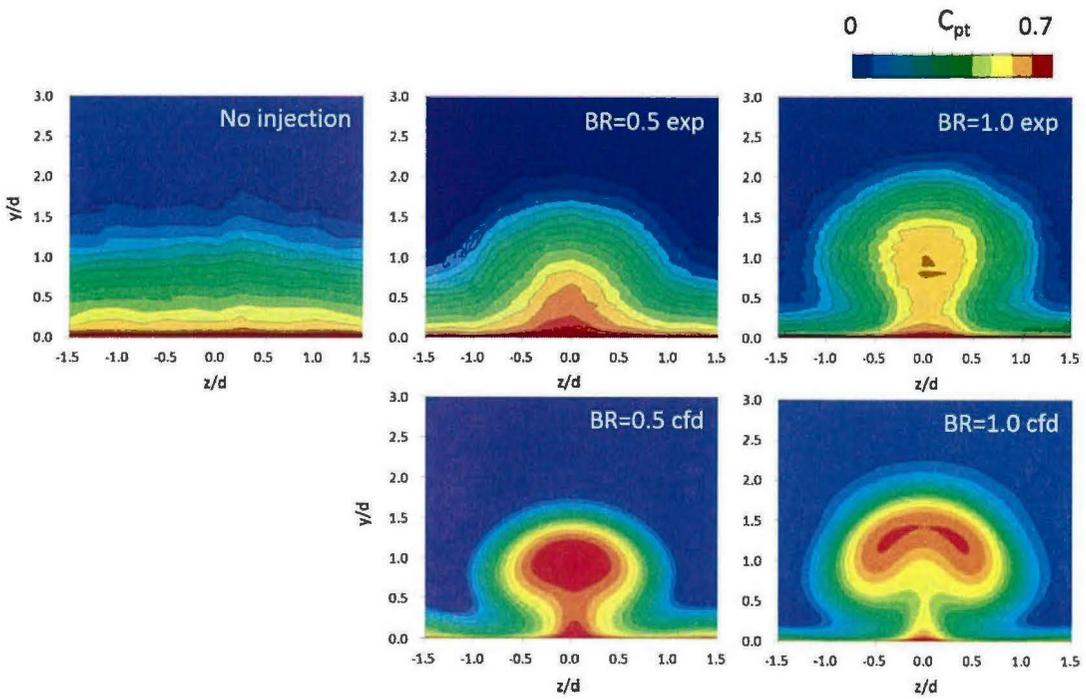


図 2.4.50 全圧損失の比較 (2D Device)

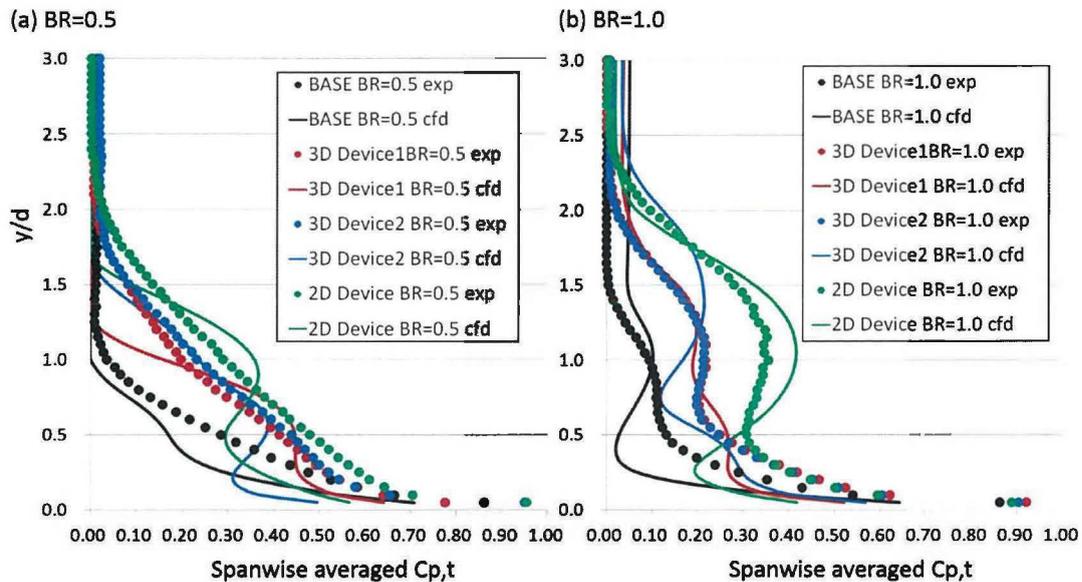


図 2.4.51 スパン方向平均全圧損失係数

2.4.7.1 RANS と DES の比較

図 2.4.52 には、DES の時間平均解と、RANS で得られたフィルム効率の違いを示している。RANS の場合は、フィルム効率を全体的に過大評価する傾向が見られたが、DES ではフィルム効率のオーダーが全体的に実験値に近づく様子が観察できる。フィルム効率分布の傾向に関しては、RANS では下流ほどフィルム効率分布がスパン方向に縮小するのに対して、DES の時間平均解では下流領域ほどフィルム効率の低い領域がスパン方向に拡散する様子が分かる。この傾向に関しては、実験値と概ね一致しているといえる。しかし、DES の計算でも、冷却孔近傍のフィルム効率がスパン方向に高い値を示す傾向に関しては取り除くことができず、依然として冷却孔近傍の予測精度は悪い。図 2.4.53 には、スパン方向平均したフィルム効率の値を示す。DES の計算を行うことで、冷却孔近傍のフィルム小売筒は実験値に近づき、フィルム効率のオーダーが低下した。

図 2.4.54 には、RANS によって得られた Q 値 ($Q=0.02$) の等値面を渦度で可視化した様子を示している。また、下流側 $x/d=5$ における、渦度のコンターも同時に示している。RANS によって渦構造を観察すると、デバイスの上流側で発生した馬蹄形渦が CRVP とは逆回転に形成されている。図 2.4.55 には、RANS によって得られた、 $x/d=5$ における壁面法線方向の流速を、 $\eta=0.4$ の等値面に重ねて示している。CRVP と逆回転の馬蹄形渦は、CRVP と干渉する領域で壁面向きの流速を生んでいる。そのため、馬蹄形渦には lift-off の抑制効果があることが分かった。

図 2.4.56 には RANS と DES の CFD で得られた Q 値 ($Q=0.01$) の等値面と、 $x/d=0.0$ での全圧損失係数分布を示す。図より、RANS と DES では解像することのできる渦構造に差があ

ることが分かる。特に RANS との違いが表れているのは

①冷却孔内の渦構造

②デバイスのセンターラインから発生する渦構造である

デバイスの両サイドから発生する馬蹄形渦には、非定常性は見られず、Q 値の等値面に差は見られなかった。

①, ②の渦構造に関してはどちらも非定常性を有しており、主流と二次空気の混合に影響を与えていると考えられる。渦の回転方向を渦度で可視化すると、冷却孔のセンターライン上で発生しているヘアピン上の渦には、冷却孔のセンターラインを境に正と負の渦度が存在している様子が分かる。図 2.4. 57 には、 $x/d=5$ における時間平均の流れ方向渦度を示しているが、RANS 結果と同様に、冷却孔のセンターライン上では CRVP の渦構造が観察できる。これは、冷却孔から発生したヘアピン渦が時間平均的に形成した渦構造である。

渦の起源を調査するために、図 2.4. 58(a)には、冷却孔内部の Q 値の等値面を示している。冷却孔の入口部では、冷却空気が剥離しており、この位置からヘアピン上の渦が形成され、既に正と負の回転成分を有していることが分かる。これが、基本的に冷却孔下流側のヘアピン渦の起源になっていると考えられる。図 2.4. 58(b)には、デバイス上の限界流線と Q 値の等値面を重ねている。デバイス上の限界流線を観察すると、デバイスの下流部で剥離が存在しており、この位置から流れが剥離していることが分かる。剥離部で発生した渦構造は、冷却孔内で発生したヘアピン渦の構造と干渉することで、可視化試験結果で示したように、剥離せん断層での不安定性を増加させていると考えられる。

図 2.4. 59 には、DES 結果における時間平均の温度場を示している。DES では主流と二次空気が非定常的に干渉する様子が捉えられていることから、時間平均の温度場が実験と非常に似た傾向を示しており、定量的も良い一致を示している。

図 2.4. 60 には時系列順に瞬時の Q 値と全圧損失係数のコンターを並べた図を示している。時系列順に Q 値の等値面を追うと、冷却孔内の渦構造とデバイスのセンターラインから発生し、下流側で二次空気とミキシングを起こしている渦構造は時系列順に流れ方向へ進んでいることが分かる。さらに、全圧損失コンターの大きくなっている $t=0, 200t^*$ を見ると、全圧損失の大きくなるのはデバイスから放出された非定常な渦構造が計測面に差し掛かった瞬間であることが分かる。従って、デバイスから発生している渦構造は時間平均された全圧損失を高める働きをしていることが分かる。

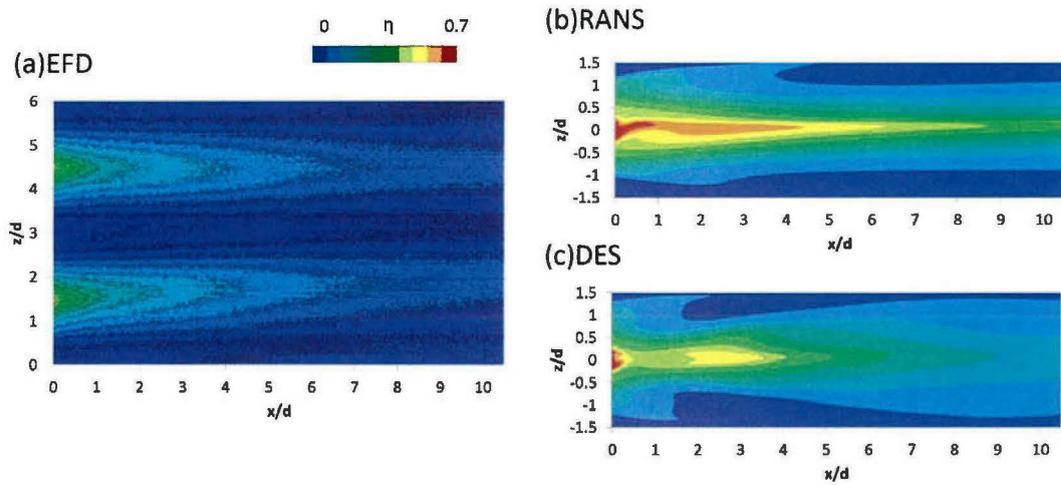


図 2.4.52 フィルム効率 (DES 時間平均解との比較)

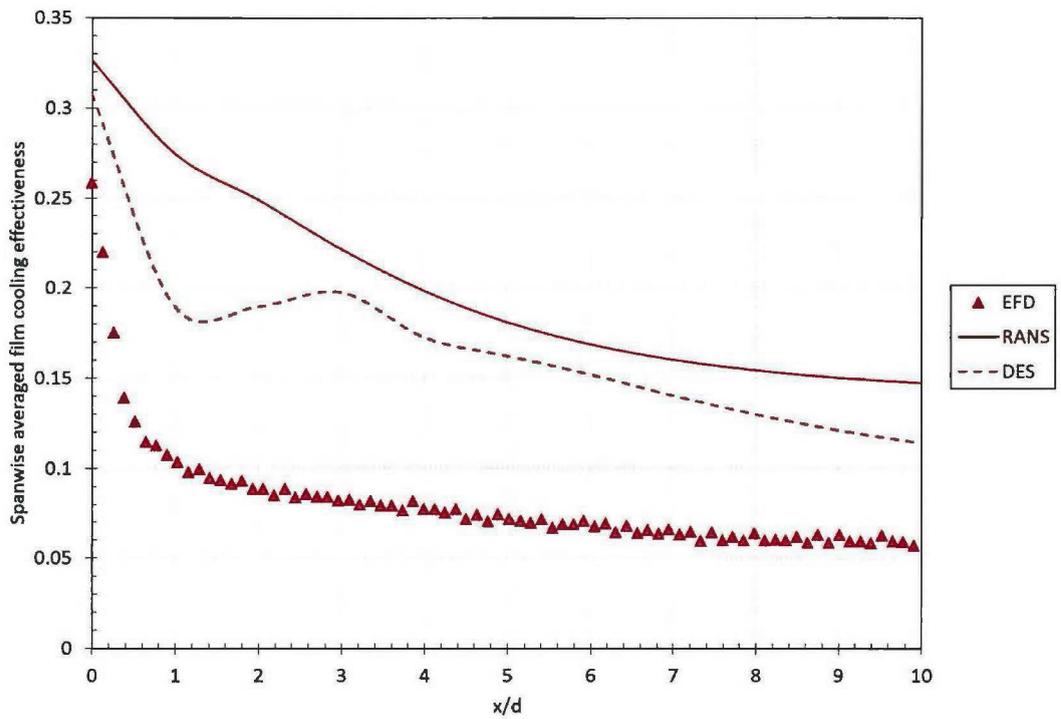


図 2.4.53 スパン方向平均フィルム効率

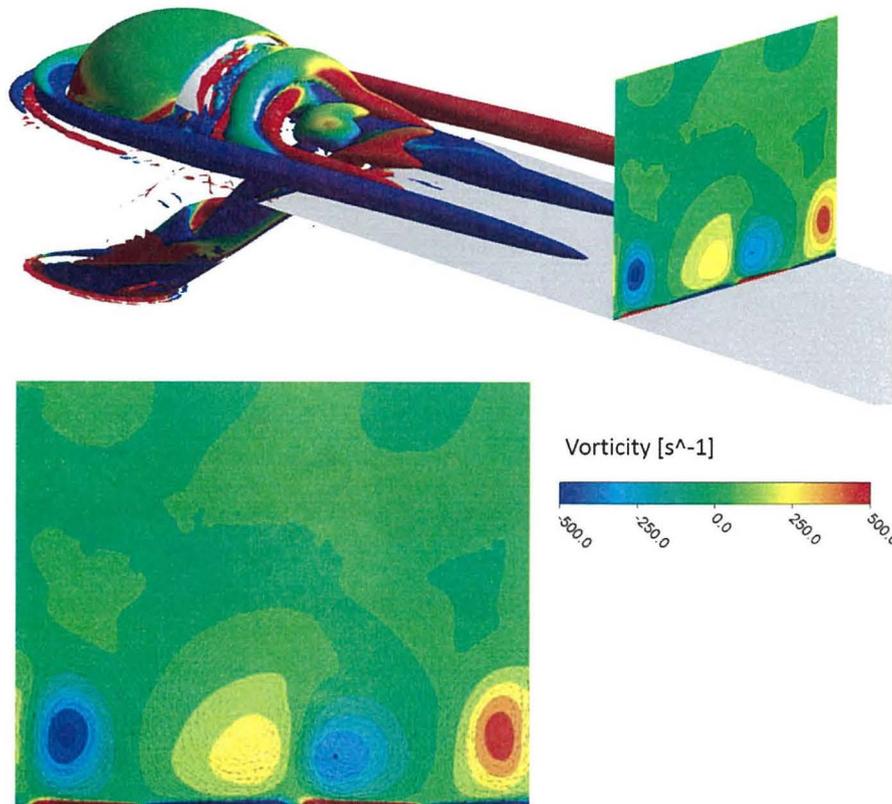


図 2.4. 54 渦構造の可視化 (RANS)

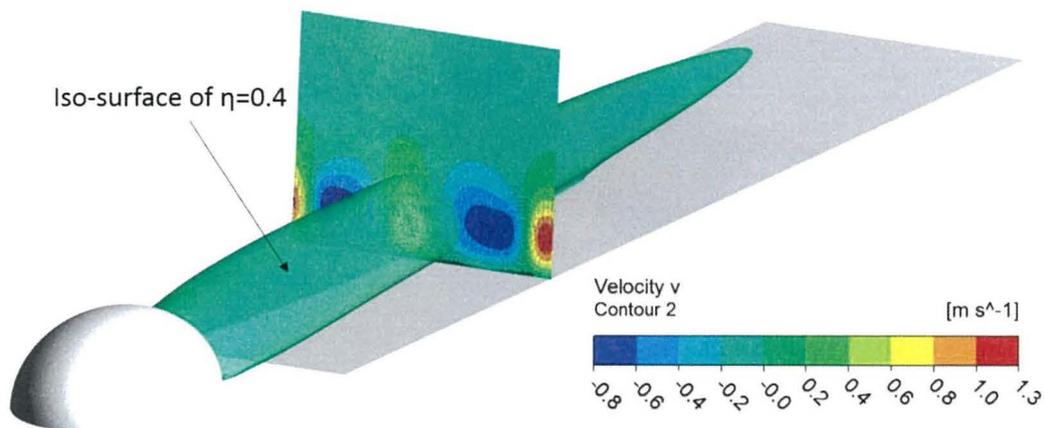


図 2.4. 55 壁面法線方向流速 ($x/d=5.0$)

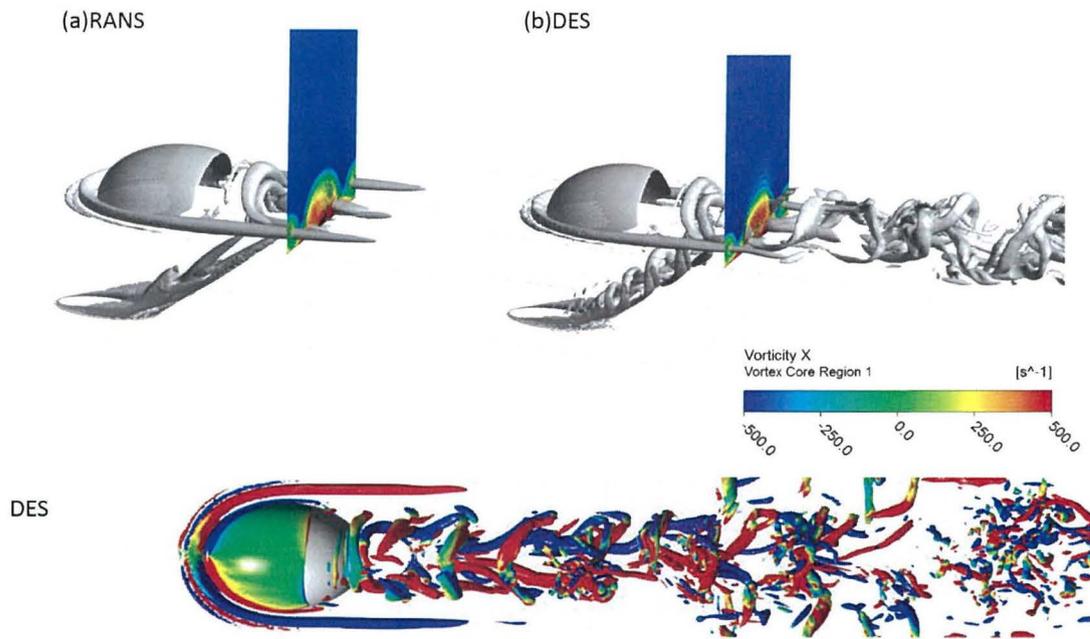


図 2.4.56 Q 値と全圧損失係数 (RANS と DES の比較)

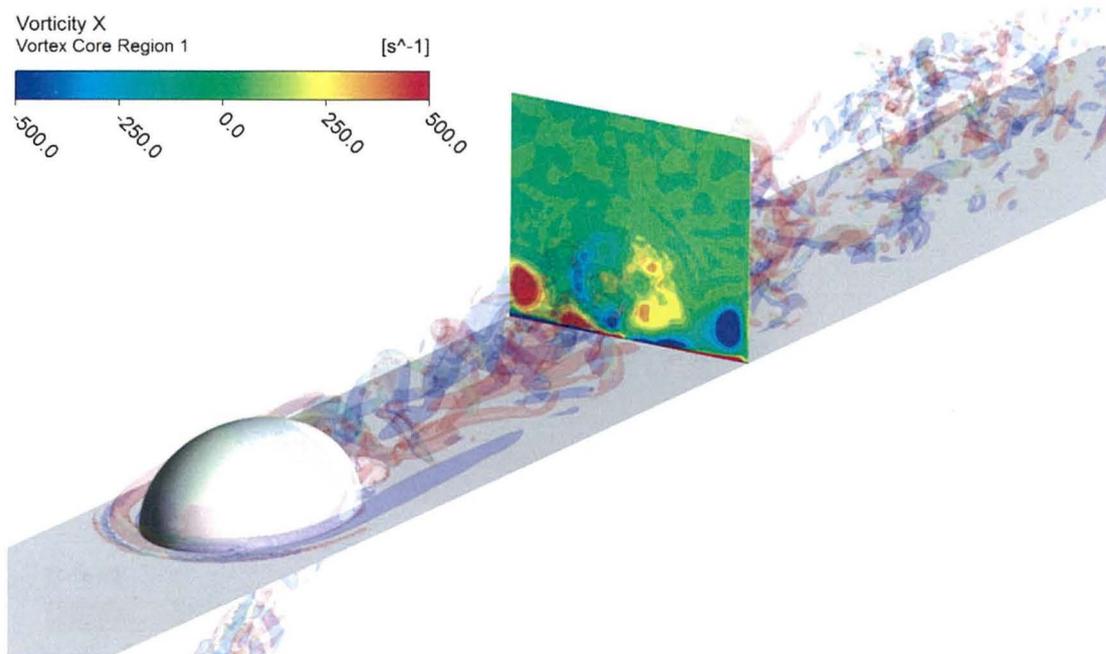


図 2.4.57 時間平均渦度

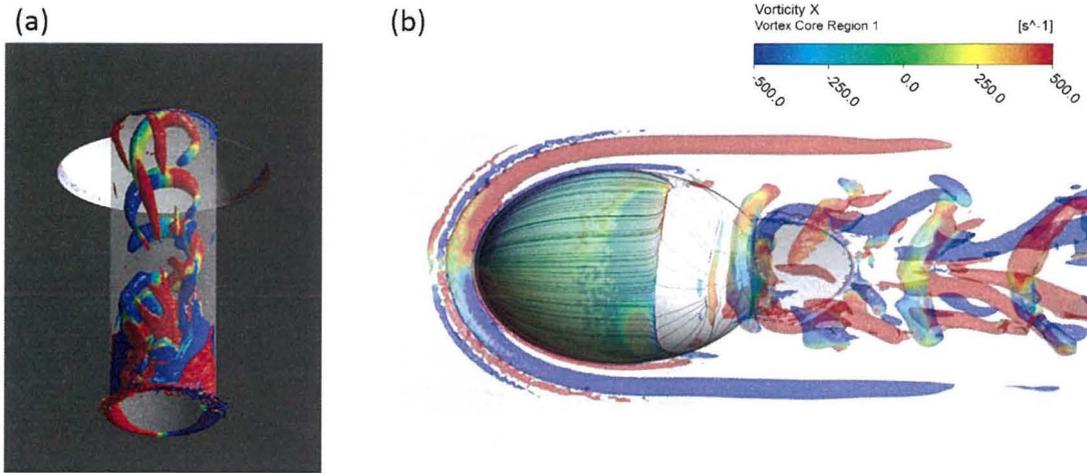


図 2.4.58 渦度の起源

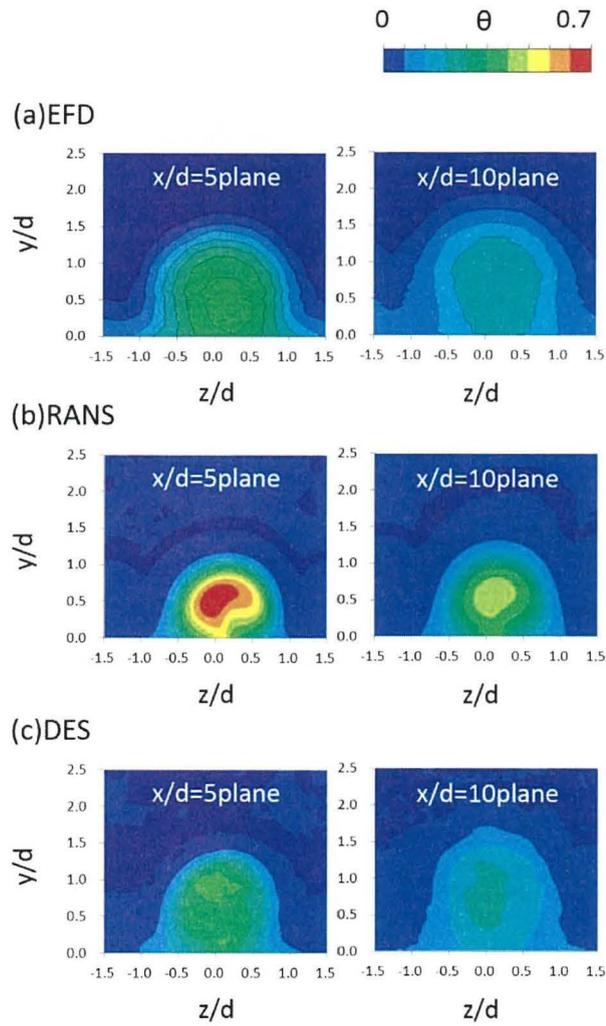


図 2.4.59 空間温度場の比較

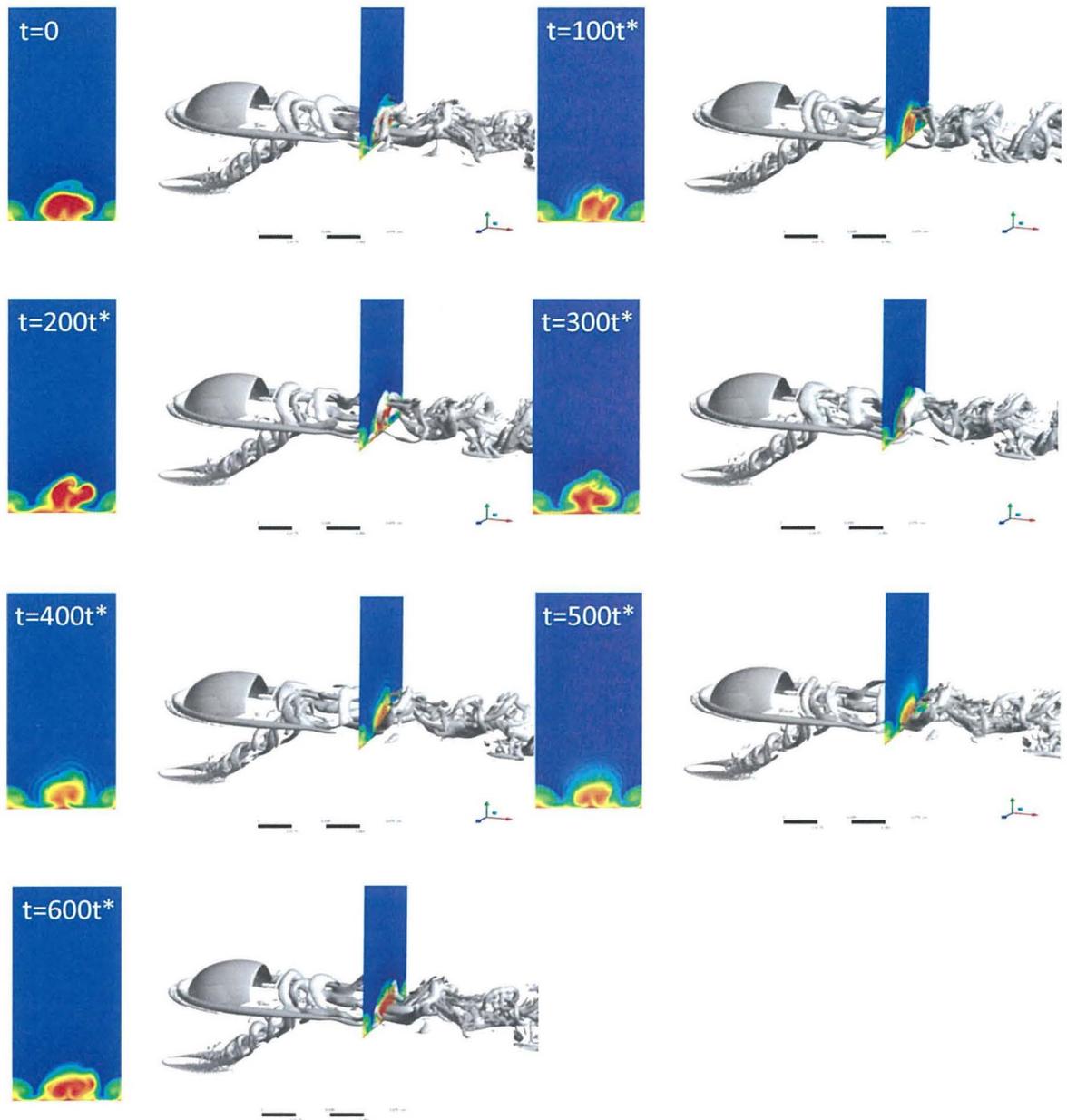


図 2.4.60 時系列データ (Q 値, 全圧損失)

2.4.7.2 LES 結果

今回は BASE ($BR=0.5$), 3D Device1 ($BR=0.5$), 2D Device ($BR=1.0$) の条件において LES 解析を実施した。以下には LES で取得した瞬時解を示す。

図 2.4. 61 には $z/d=0.0$ での流れ方向無次元流速を示す。BASE の場合 $BR=0.5$ の条件であるため二次空気が存在すると考えられる低速度領域が壁面付近に形成されている。可視化計測結果と比較すると、図 2.4. 32 と同様に主流と二次空気のせん断領域において、K-H 不安定領域が観察される。3D Device1 の場合、低速度領域は BASE と比較する大きく拡大しており、二次空気が存在すると考えられる領域のほかにも、デバイスの上表面や、冷却孔出口のエッジ部分等の剥離領域が特に低速度となっている。さらに、主流と二次空気のせん断領域において発生する K-H 不安定は BASE よりも高くなっているように見える。2D Device の場合、この条件は $BR=1.0$ であるために冷却孔内の流速が他の 2 条件よりも高く、主流中に二次空気が貫通して吹き出していることが分かる。図 2.4. 33 の可視化結果と比較すると、可視化結果で得られた対流領域は非常に低速度の領域として解析されており、可視化結果と定性的な傾向は一致しているように見える。

図 2.4. 62 には $z/d=-1.0$ での流れ方向無次元流速を示す。BASE と 3D Device1 の場合、低速度領域は二次空気によるものではなく、主に境界層によるものと考えられ、二次空気の拡散は殆ど見られなかった。これは可視化計測結果とも傾向が一致している。2D Device に関しては、デバイスを通じた主流が剥離することによりデバイスの下流側で対流領域が形成されており、剥離せん断層は不安定になっている。

図 2.4. 63 には速度ゼロの領域の等値面を示している。速度ゼロの領域は主に主流や二次空気が剥離することによって形成されると考えられる。BASE の場合、主流中に二次空気が吹き出すために冷却孔出口のエッジ部分で二次空気の剥離が発生し、ゼロ速度の領域が形成される。この領域は $x/d=0.0$ での位置での剥離として可視化計測によっても観察される。3D Device に関しては主にデバイスを通ずる際に主流が剥離することにより形成される剥離領域によって速度がゼロになっている。2D Device に関しては、デバイスを通ずる際に主流が剥離するが、3D Device よりも広い領域に主流の剥離領域が形成されている。二次空気の吹き出しが行われている場合、この剥離領域はスパン方向へは一様ではなく、冷却孔のセンターラインを中心に流れ方向と数パン方向に広がっていることが観察された。

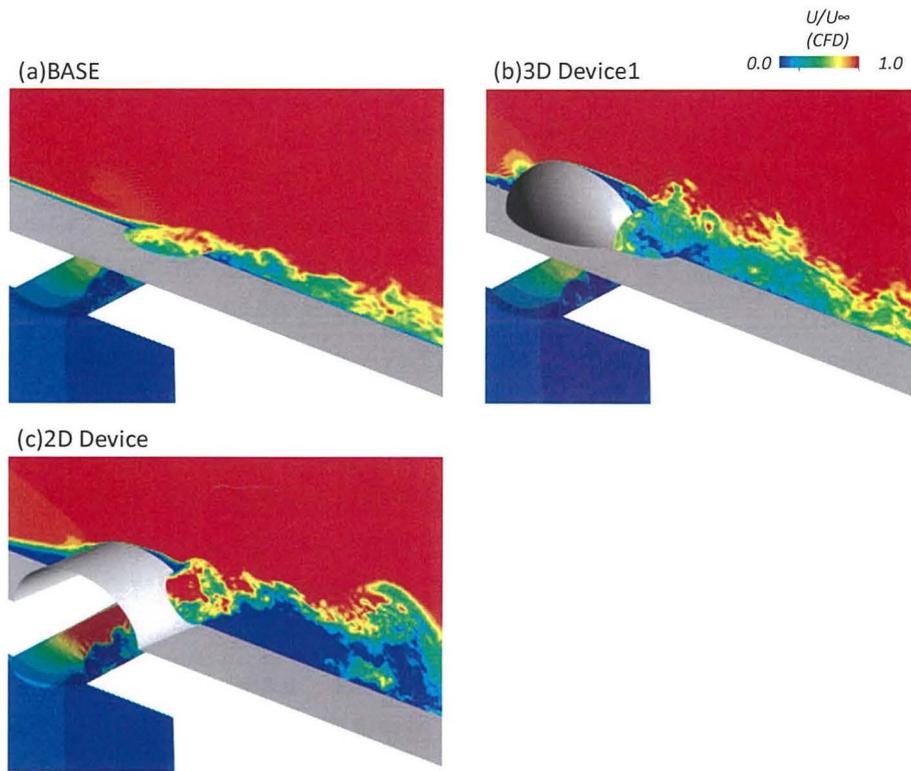


図 2.4.61 無次元流速 $U/U_{\infty}(z/d=0.0)$

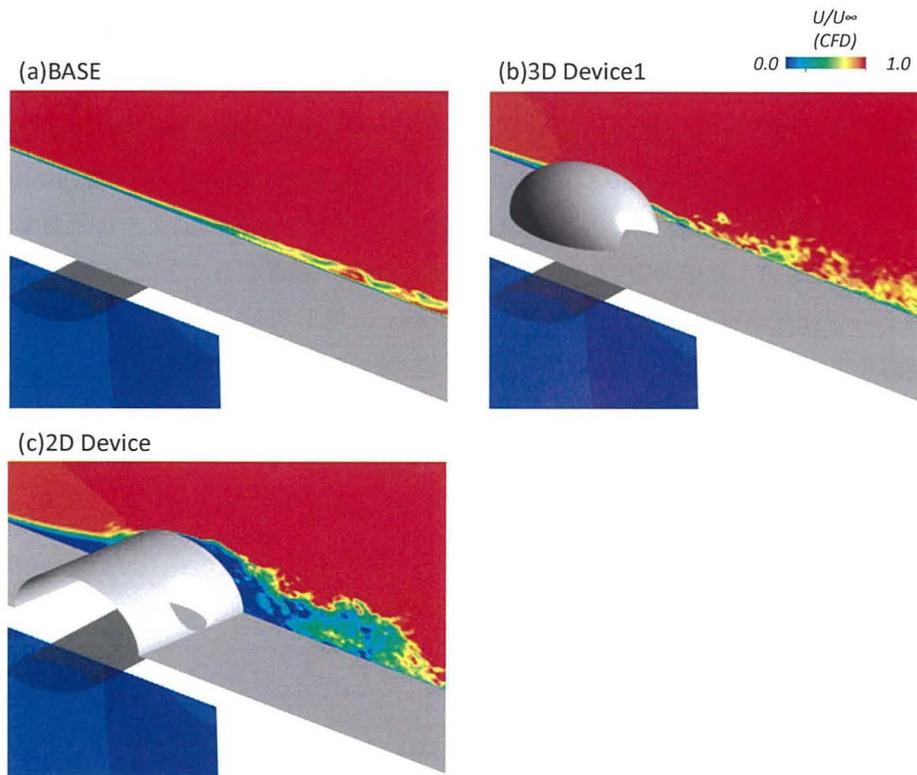


図 2.4.62 無次元流速 $U/U_{\infty}(z/d=-1.0)$

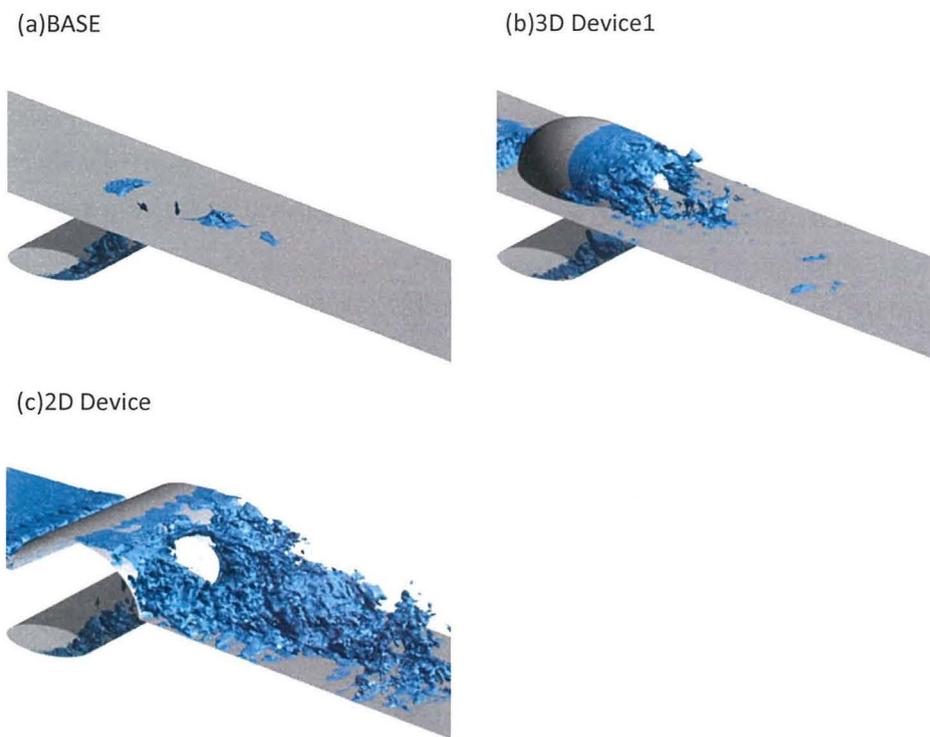


図 2.4.63 速度ゼロ領域

図 2.4. 64 には $z/d=0.0$ での空間内でのフィルム効率分布を示す。BASE の場合、二次空気は他の形態と比較すると比較的付着性の高い温度場が形成されていることが分かる。また、せん断層内で主流と混合することでフィルム効率が次第に減衰している様子が観察される。図 2.4. 65 には RANS で取得した解を示す。センターライン上での空間的なフィルム効率を観察すると、局所的なフィルム効率は RANS でも LES でも同水準であり、RANS でもある程度の温度の減衰が捉えられていると考えられる。3D Device1 に関しては RANS と LES で温度の減衰に大幅な差が表れた。特に LES では冷却孔から二次空気が吹き出した直後に温度の減衰が見られるのに対して、RANS の解析結果では時間平均的ではあるが、下流側まで温度の減衰が見られず、局所的なフィルム効率は高い値を示している。2D Device に関しては RANS, LES 共に冷却孔から吹き出した直後の温度の減衰が見られている。

図 2.4. 66 には $z/d=-1.0$ での空間内でのフィルム効率分布を示す。BASE に関しては、二次空気の存在が確認できないためにフィルム効率分布は殆ど表れていない。一方で 3D Device1 に関してはフィルム効率分布が下流側の領域において確認できる。これは二次空気の三次元的な挙動により $z/d=0.0$ から流入してきた二次空気であると考えられる。図 2.4. 34 の可視化結果と比較すると、可視化結果においても、下流側の領域において二次空気が面内に流入する傾向が見られ、実験と CFD 結果で定性的な傾向の一致が見られる。2D Device に関しては、デバイスを通じた主流が剥離した際に形成される対流領域に二次空気が入り込むことにより $z/d=-1.0$ の面内においても広くフィルム効率分布が確認できる。フィルム効率分布の様子を観察すると、フィルム効率の値自体は主流と二次空気の混合によって低い値を示しており、剥離せん断層内の K-H 不安定も大きい。図 2.4. 33 の可視化計測結果と比較すると、二次空気の存在する領域が可視化計測と似ているうえに、可視化計測で捉えられた主流と二次空気のせん断層における K-H 不安定も CFD 結果では捉えられている。

図 2.4. 67 には各計算結果での Q 値の等値面を示す。BASE に関しては、冷却孔の上流側では境界層が巻き上げられることにより馬蹄形渦が発生し、冷却孔内部から吹き出した二次空気はヘアピン渦として下流側で成長し、渦崩壊を起こす。3D Device1 においては BASE と比較すると複雑な渦構造となっており、剥離せん断層内で発生する渦と、冷却孔内部から発生する渦構造が干渉している様子が観察される。2D Device に関しては、スパン方向に広い領域で主流が剥離するために剥離せん断層内で発生する剥離渦がスパン方向へ広く下流側に放出されていることが分かる。

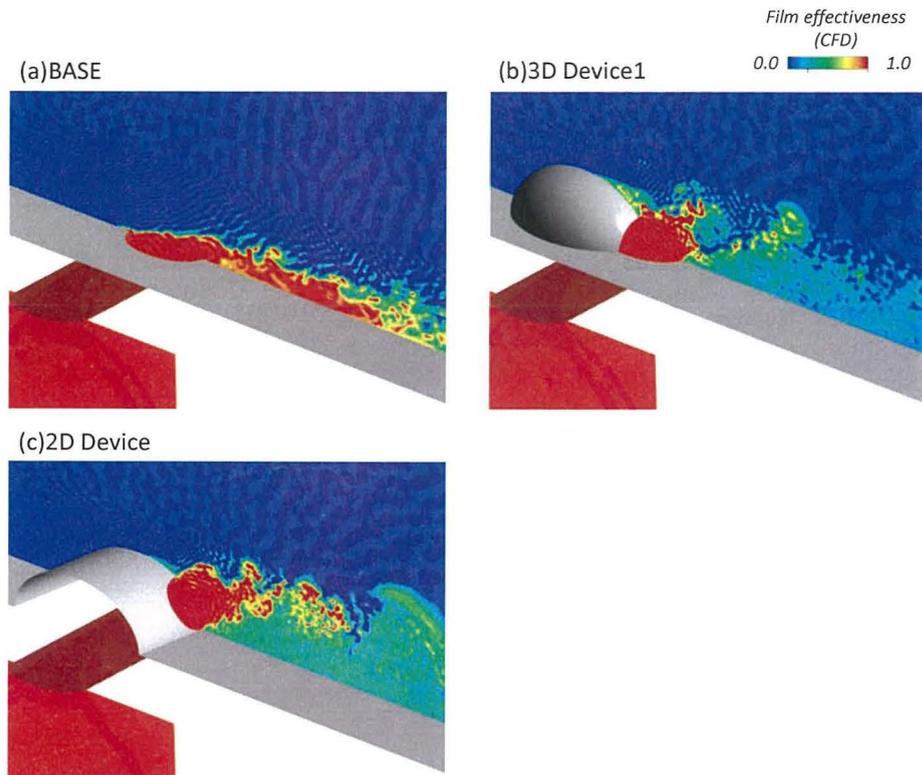


図 2.4. 64 無次元温度($z/d=0.0$, LES 瞬時解)

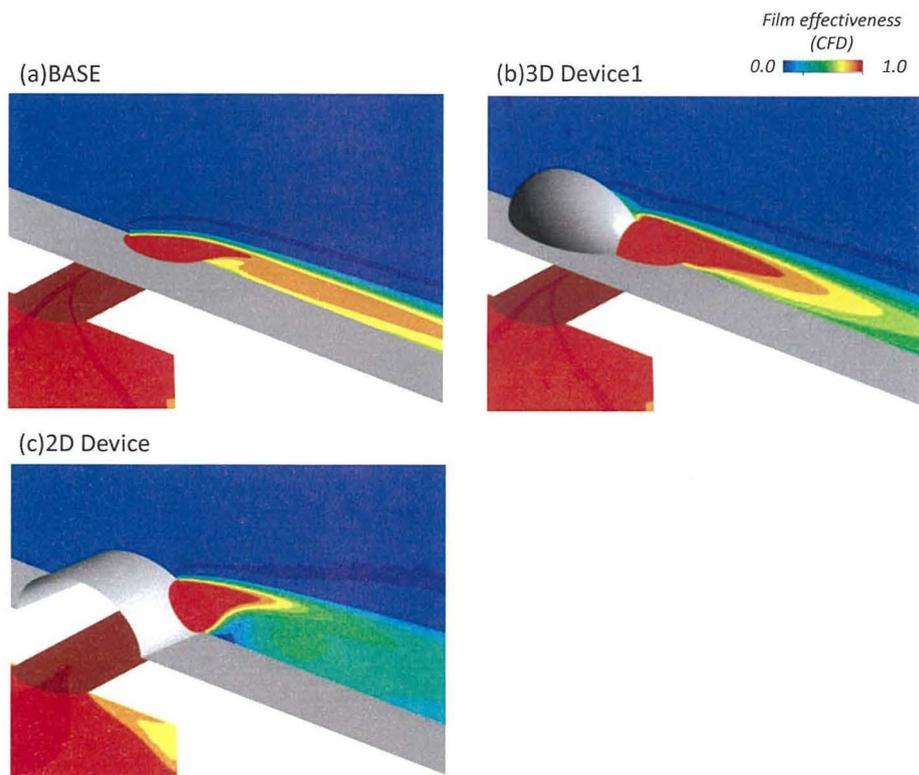


図 2.4. 65 無次元温度($z/d=0.0$, RANS 解)

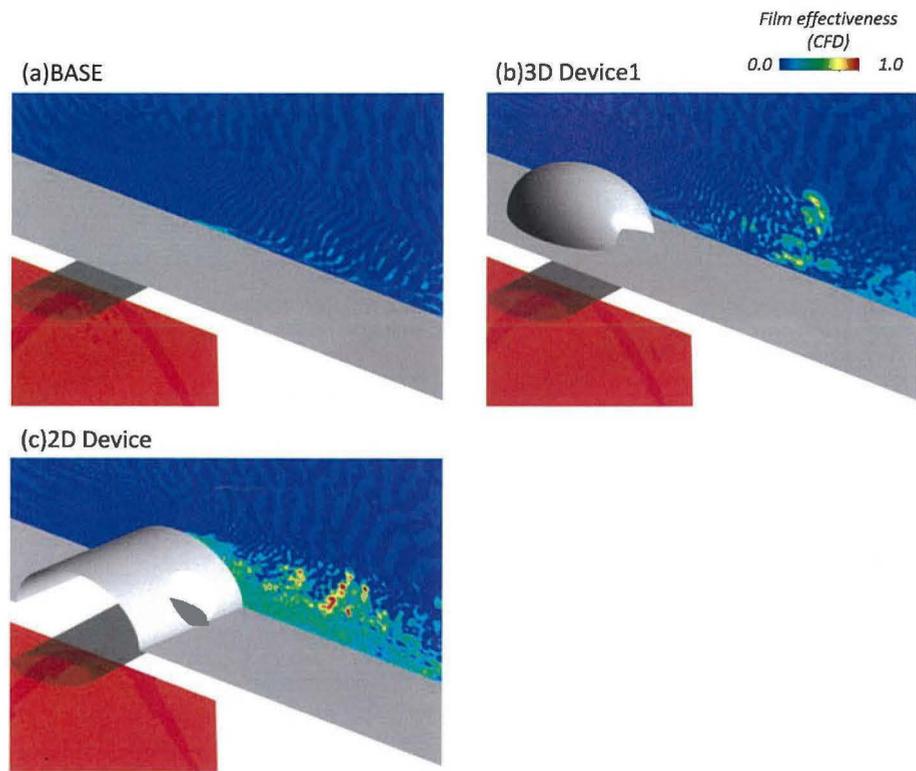


図 2.4.66 無次元温度($z/d=-1.0$)

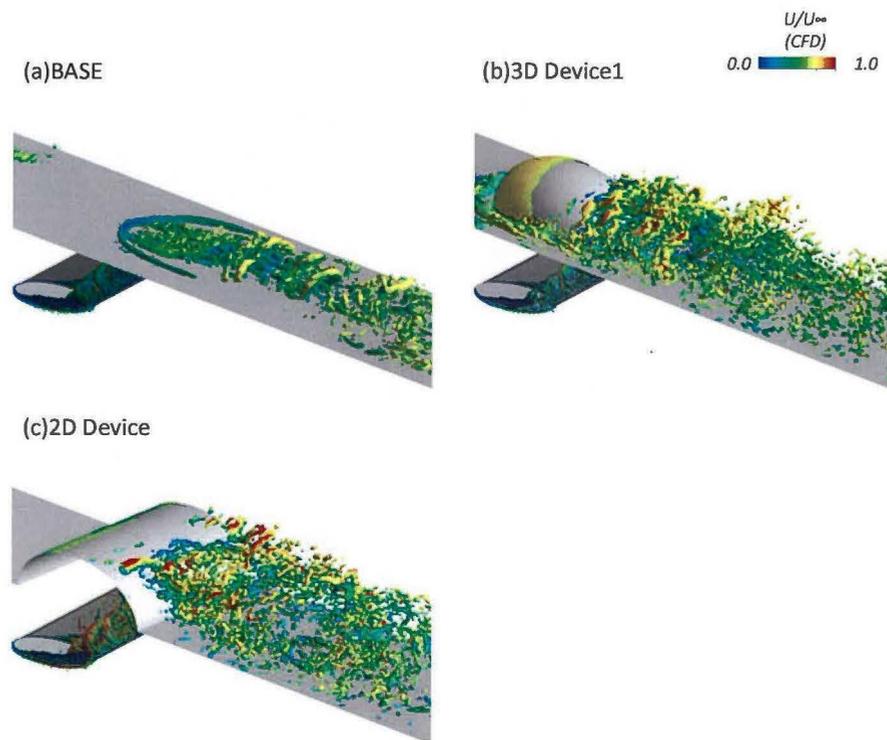


図 2.4.67 渦構造

参考文献 (2.4 節)

- (1) Lu, Y., Dhungel, A., Ekkad, S. V. and Bunker, R., 2007, “Effect of Trench Width and Depth on Film Cooling from Cylindrical Holes Embedded in Trenches”, ASME Turbo Expo2007, GT2007-27388.
- (2) Ruwan, P. S. and Bogard, D. G., 2007, “Effects of Surface Roughness and Near Hole Obstructions on Film Cooling Effectiveness”, ASME Turbo Expo 2007, GT2007-28004.

2.5 Single Flow Control Device を用いたフィルム冷却の流れ制御

2.5.1 はじめに

2.4 節では冷却孔直径 d に対して流れ制御デバイスの壁面法線方向の高さは $1d$ と設定しており、そのために空力損失が大きくなることが確認された。また、デバイス下流の流れ場においては強い不安定性が確認され、主流と二次空気の混合が促進されていることが判明した。そこで 2.5 節ではデバイスの壁面法線方向の最大高さを $0.5d$ に制限し、デバイスを設計することでフィルム冷却の高効率化を試みた。本章では冷却高 1 ピッチに対して、1 個の楕円体形状流れ制御デバイスを設置した結果に関して報告する。

2.5.2 流れ制御デバイス

2.5.2.1 デバイス形状

図 2.5.1 には供試体と流れ制御デバイス形状を示す。ベースとなる供試体形状は 2.4 節で用いた平板フィルム冷却モデルと同じである。一方で流れ制御デバイスは楕円体形状としているが、壁面法線方向の高さを $1d$ とした。スパン方向、流れ方向の寸法はそれぞれ $1.0d$ 、 $0.5d$ としている。本研究ではスパン方向のデバイス位置 A をパラメトリックに変化させることで、フィルム冷却に与える影響を調査している。 A の寸法は表 2.5.1 に示すように 4 ケースに変化させ、デバイスの高さも 2 ケースに変化させることで、それぞれ Case01~08 と呼称することとする。また、何もデバイスを取り付けしていない形態に関しては前節と同様に BASE と呼称する。上記のようにデバイスを取り付けた場合、供試体の外観図は図 2.5.2 のようになる。

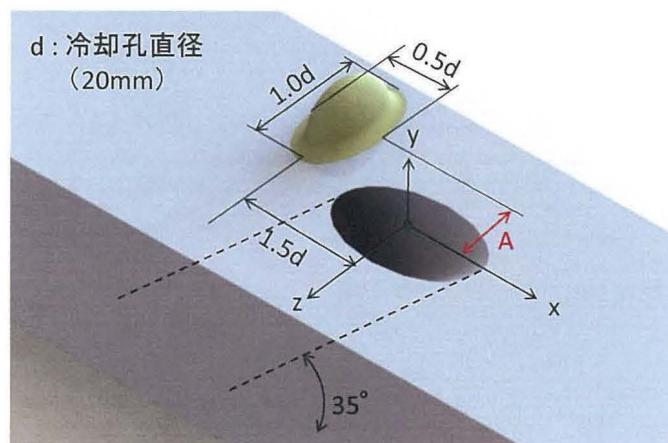


図 2.5.1 デバイス形状

表 2.5.1 デバイス設計パラメータ

Case	A	Height
Case01	0.0d	0.5d
Case02	0.25d	
Case03	0.5d	
Case04	0.75d	
Case05	0.0d	0.1d
Case06	0.25d	
Case07	0.5d	
Case08	0.75d	

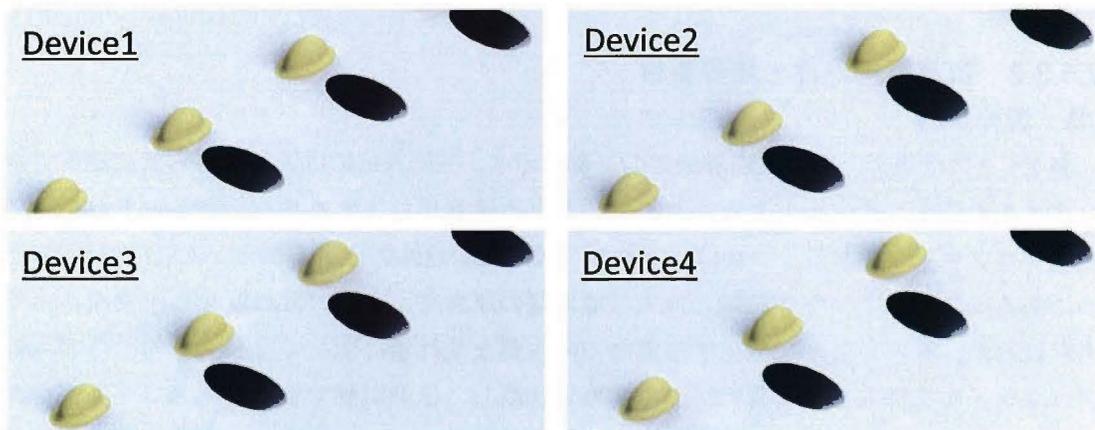


図 2.5.2 デバイス形状 (設置イメージ)

2.5.2.3 流れ制御のコンセプト

単純円筒型冷却孔においては CRVP が発生することが明らかになっているが、本節ではデバイスから発生する渦構造と、CRVP を干渉させることで、CRVP を制御することを考えた。前節までは、冷却孔のスパン方向に対称なデバイスを設置したが、今回はデバイスを冷却孔のスパン方向に非対称に設置することで、CRVP のうち片方の渦構造をコントロールすることが可能であると考えた。

2.5.3 数値解析手法

数値解析の予測精度を確認することや、実験では観察することのできない流れ場を観察するために本章では数値解析を実施している。

2.5.3.1 解析領域

図 2.5.3 には数値解析領域を示す。数値解析は平板モデルフィルム冷却の 1 ピッチ分を模

擬した計算領域を適用した。下流側には $20d$ の十分な長さを取っているが、上流側には実験で取得した速度プロファイルを入口境界条件へ適用するために $10d$ 上流までの領域を取っている。ダクトの高さは、(ダクト上面に対称境界を適用することを念頭に) 計算格子を減らすために $6d$ としている。その他の領域については実験装置を模擬している。

図 2.5.4 には本研究で使用した計算格子を示す。デバイスを用いたフィルム冷却では構造格子を用いて計算格子を作成するのが困難である。そのため、計算格子には基本的にテトラ型の非構造格子を用いることとした。しかし、壁面付近の境界層を解像するために壁面付近にはプリズム格子を適用している。壁面での $y+$ は $y+ < 1$ であることを確認している。本研究では RANS と LES による解析を行っているが、LES では RANS で得られた解を初期解として用いるために、計算格子は計算手法によって変化させていない。全領域でのセル数は 1000 万セル程度である。その内、冷却孔部分は 800 万セル程度、その他の領域で 200 万セル程度の内訳である。

2.5.3.2 数値解析条件・境界条件

(1) 境界条件

表 2.5.2 には解析で用いた境界条件の一覧を示す。主流入口には実験で得られた速度プロファイルを挿入することとした。ここで挿入する速度プロファイルは伝熱試験で取得した速度プロファイルである。これは、実験と一致した伝熱性能を得ることが CFD の目的の一つにあるからである。空力試験とは入口境界層の厚さや、主流の乱れ度などが異なると考えられるが、デバイスから発生する渦などの主要な流れ場に関してはどちらの条件で入口プロファイルを挿入しても観察可能であると判断し、伝熱試験で取得した入口速度プロファイルを挿入している。ダクト上面には対称境界を用いているために、実質のダクト高さは $12d$ として計算されることとなる。実際のダクト高さは $20d$ 程度であるが、対称境界でも十分壁面付近の流れ場には影響がないと判断し、対称境界を用いることとした。冷却孔の出口付近では冷却孔の先端があるために計算格子が作成し難い。そのため、主流ダクト、冷却孔部分、プレナム部分で計算領域を分割して計算格子を作成している。そのため、冷却孔入口、出口で計算格子を接続するために、冷却孔の入口と出口ではインターフェース面を設けている。この際、インターフェース面では計算格子の位置が互いに異なるために平均化処理を行ってデータが受け渡しされるが、計算格子を十分に細かくし、接続面での計算格子密度を一致させることでデータの受け渡しが円滑に行われるようにしている。本研究では、実験に用いるフィルム冷却孔付き平板は複数ピッチの冷却孔が設けられているが、すべての領域を計算で再現するのは現実的ではない。そこで、スパン方向へは 1 ピッチの計算領域を用いて、左右のダクト側面には周期境界を用いることで、二次空気の干渉を再現できるようにした。

(2) RANS 解析

RANS の解析においては乱流モデルに SST モデルを用いることとした。これはあらかじめ行った調査において比較的实验で得られたフィルム効率の再現性が良いことから採用を行った。しかし、大規模な剥離を伴うような流れ場では予測精度が低下するためにデバイスを通過する流れの解析には注意する必要がある。

(3) LES 解析

LES 解析においては RANS で得られた解を初期解として SGS モデルに、Dynamic Smagorinsky model を用いた解析を行っている。無次元タイムステップ t はフィルム冷却の研究においては代表長さ d (冷却孔直径) と、主流の入口流速を用いて、 $t=3.0 \times 10^{-3} d/U_{\infty}$ としている。

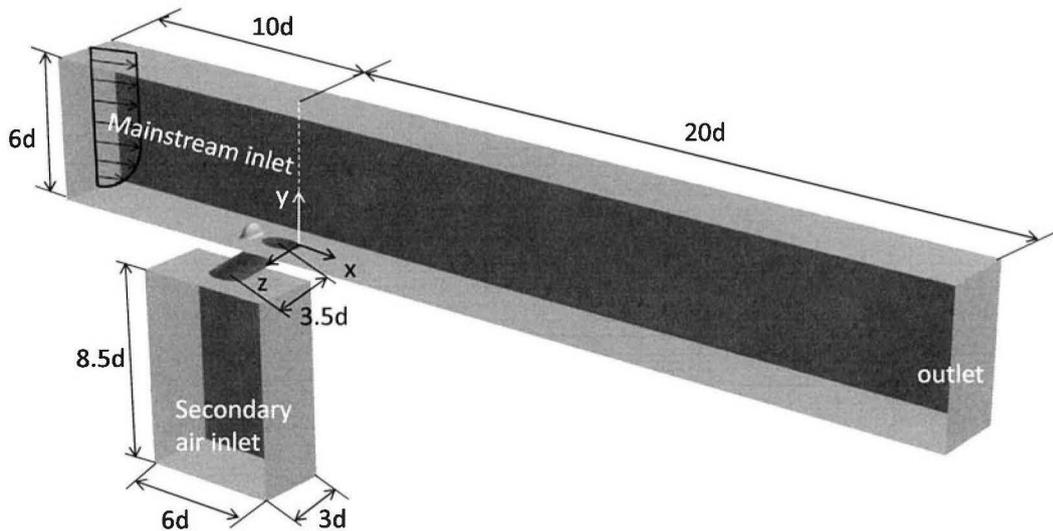


図 2.5.3 数値解析領域

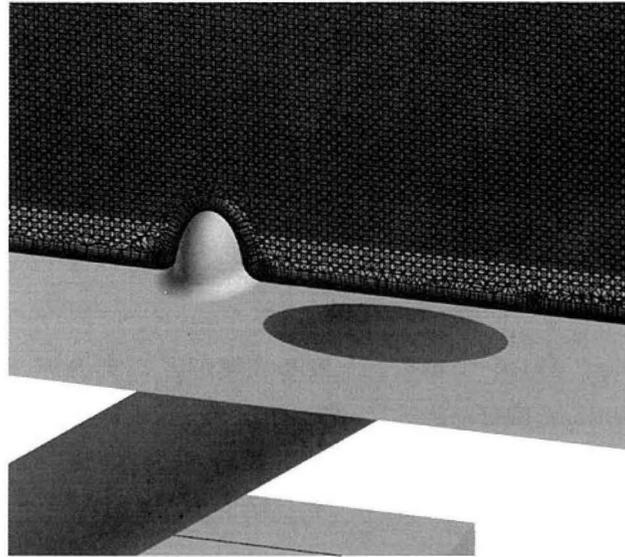


図 2.5.4 計算格子

表 2.5.2 境界条件一覧

領域	境界条件
主流入口	速度プロファイル, 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
冷却孔入口・出口	インターフェース
ダクト側面	周期境界

2.5.4 フィルム効率・熱伝達率

図 2.5.5 には実験で得られた $BR=0.5$ でのフィルム効率分布を示す。BASE は 5 章で得られたフィルム効率分布そのまま、局所的なフィルム効率が比較的高い値を示している。Case01 については、BASE と同様のフィルムの付着面積となっているが局所的なフィルム効率は低くなっている。Case02 では BASE や Case01 よりもフィルムの付着面積が広がっていることが特徴であるが、局所的なフィルム効率は Case01 と同様に低くなっている。さらに、Case0 をスパン方向にずらして配置している効果が表れ、フィルム効率分布は z の負の方向に曲げられており、冷却孔のセンターラインに対して非対称な分布となっている。Case03, 04 に関しては他の形態と比較するとともに広いフィルムの付着面積となった。局所的なフィルム効率は他のデバイスを取り付けた形態と同様に低い値となっている。Case03, 04 でもフィルム効率分布が冷却孔のセンターラインに対して曲げられている様子が確認できるが曲げられている方向に関しては Case02 とは逆の x の正方向となっている。

Case05 以降の形態に関してデバイスの高さが低いために流れ場の変化がほとんど生み出されていないと考えられ、フィルム効率分布の変化はほとんど観察されなかった。

図 2.5.6 には実験で得られた $BR=1.0$ でのフィルム効率分布を示す。 $BR=1.0$ では二次空気の法線方向の運動量が高くなるために二次空気の付着性が低く、lift-off しているためフィルムの付着面積は低く、局所的なフィルム効率も低い。Case01 では BASE と同様にフィルムの付着面積が少なくなり、局所的なフィルム効率の低下が確認された。Case02 では二次空気の運動量が高くなっているが、デバイス起因の流れ場により二次空気が曲げられる傾向が $BR=0.5$ と同様に確認された。Case03, 04 については $BR=0.5$ と同様のフィルムの付着面積となっておりデバイスを設置することにより二次空気の拡散を促進する効果が表れていることが分かる。しかし、付着面積は広がっているが局所的なフィルム効率の低下は防げていないことが分かる。Case05 以降のデバイスに関しては、Case05 ではフィルム効率の局所的な値が特に低くなっており、若干ではあるが二次空気の lift-off が促進された様子が観察される。Case06 以降に関してはほとんど変化が見られない。

図 2.5.7 には実験で得られた $BR=0.5$ での熱伝達率分布を示す。ここで熱伝達率は無次元化を行っているが、その際には乱流境界層での熱伝達率の算出式を用いて $x/d=0$ での熱伝達率を算出し、この値を用いて熱伝達率を無次元化することとした。熱伝達率に関しては壁面温度の変化が起こった領域についてのみ算出が可能となっているが、冷却孔出口付近で熱伝達率が高くなっている様子が観察できる。BASE に関しては、熱伝達率が高い領域が冷却孔のセンターラインに対して対象であるが、Case01~Case04 についてはセンターラインに対して非対称な熱伝達率となっている。今回はデバイスを設置しているが、BASE と比較して際立って熱伝達率が高い領域は観察されなかった。Case05~Case09 については BASE と熱伝達率分布はほとんど変化がない。一部の場合で熱伝達率が BASE よりも低く見えるが、これは不確かさの範囲内であるため、熱伝達率が低減できたとは言い切ることができない。

図 2.5.8 には実験で得られた $BR=1.0$ での熱伝達率分布を示す。 $BR=1.0$ での熱伝達率分布は $BR=0.5$ と比較しても大きな傾向の変化は観察されなかった。

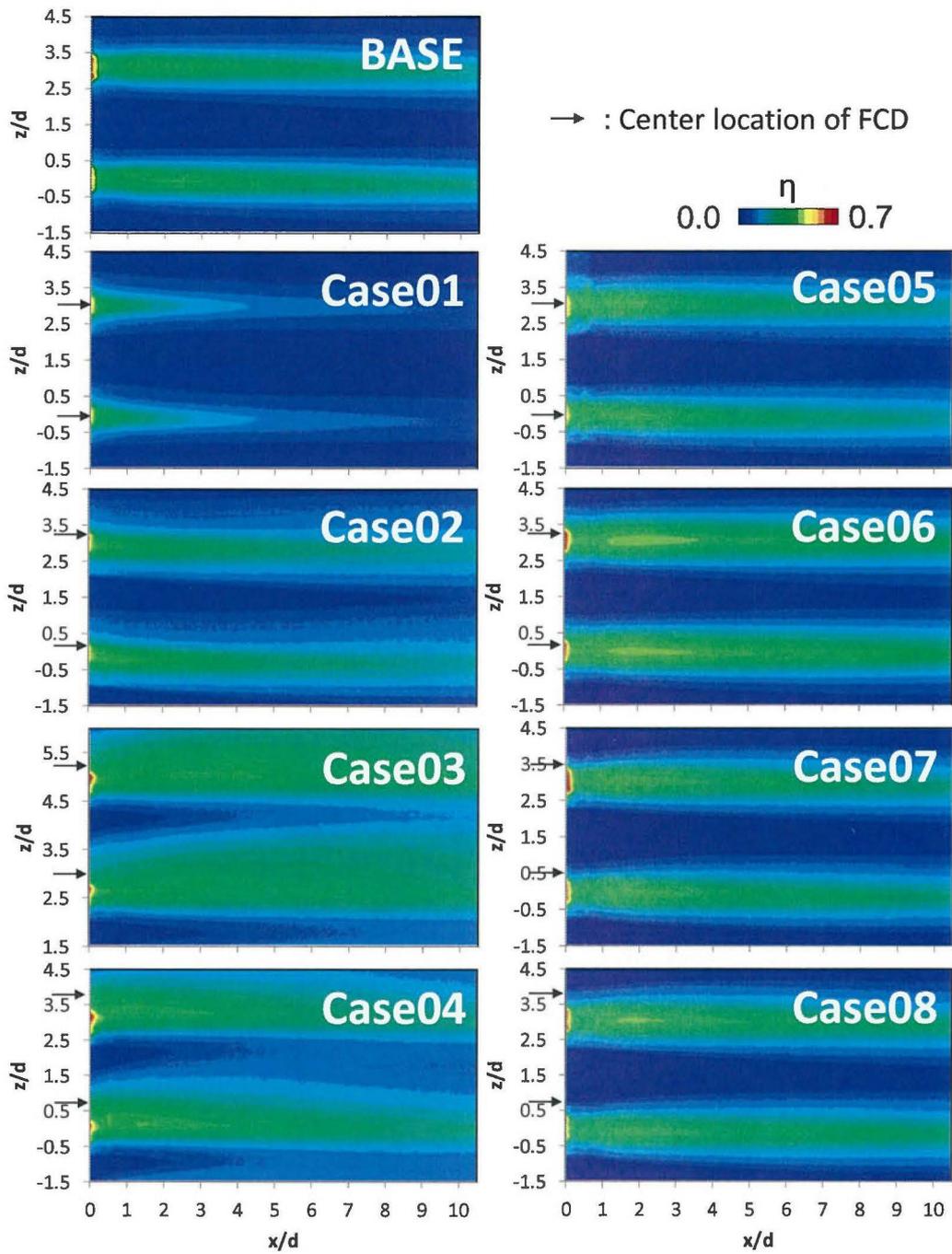


図 2.5.5 フィルム効率分布 ($BR=0.5$)

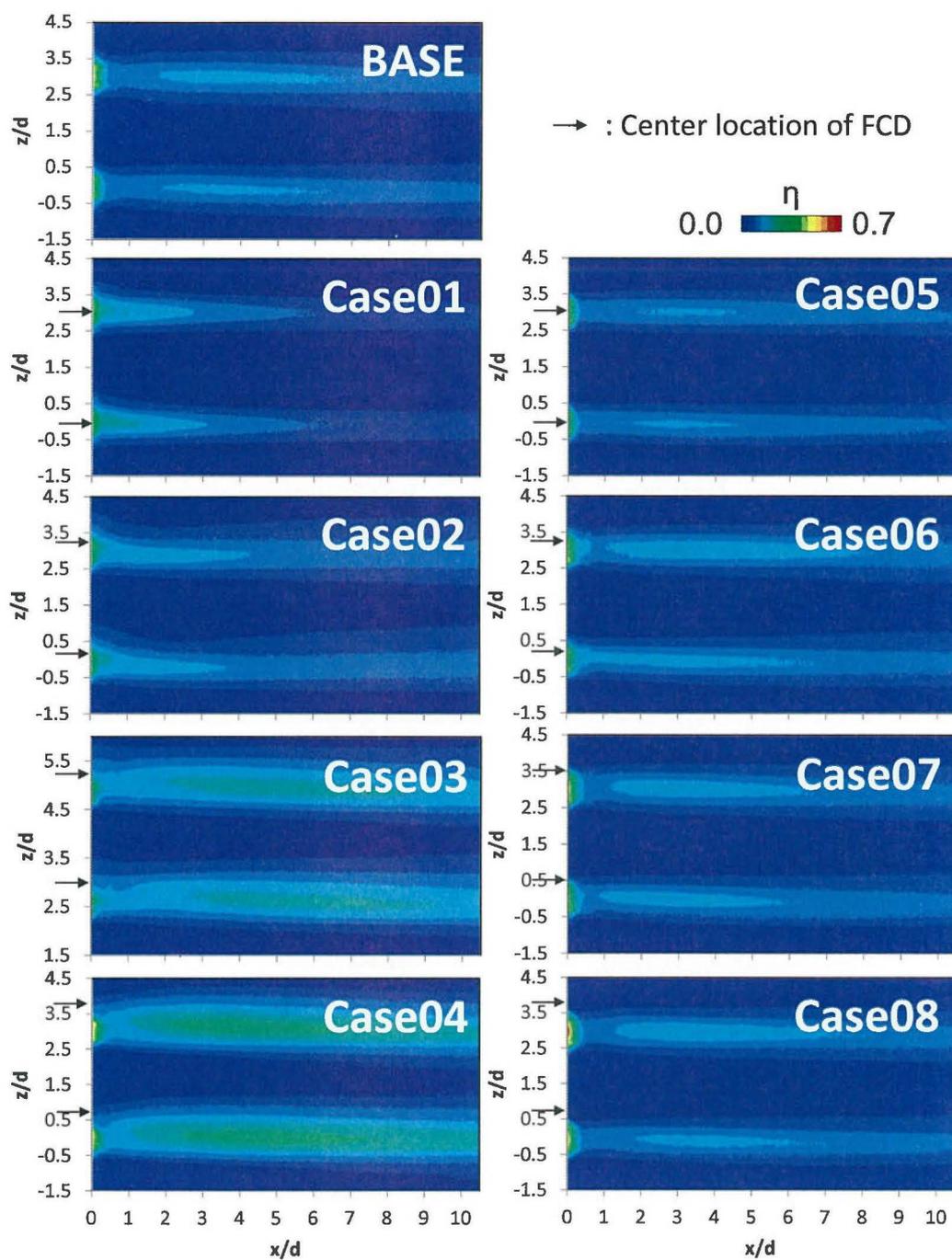


図 2.5.6 フィルム効率分布 ($BR=1.0$)

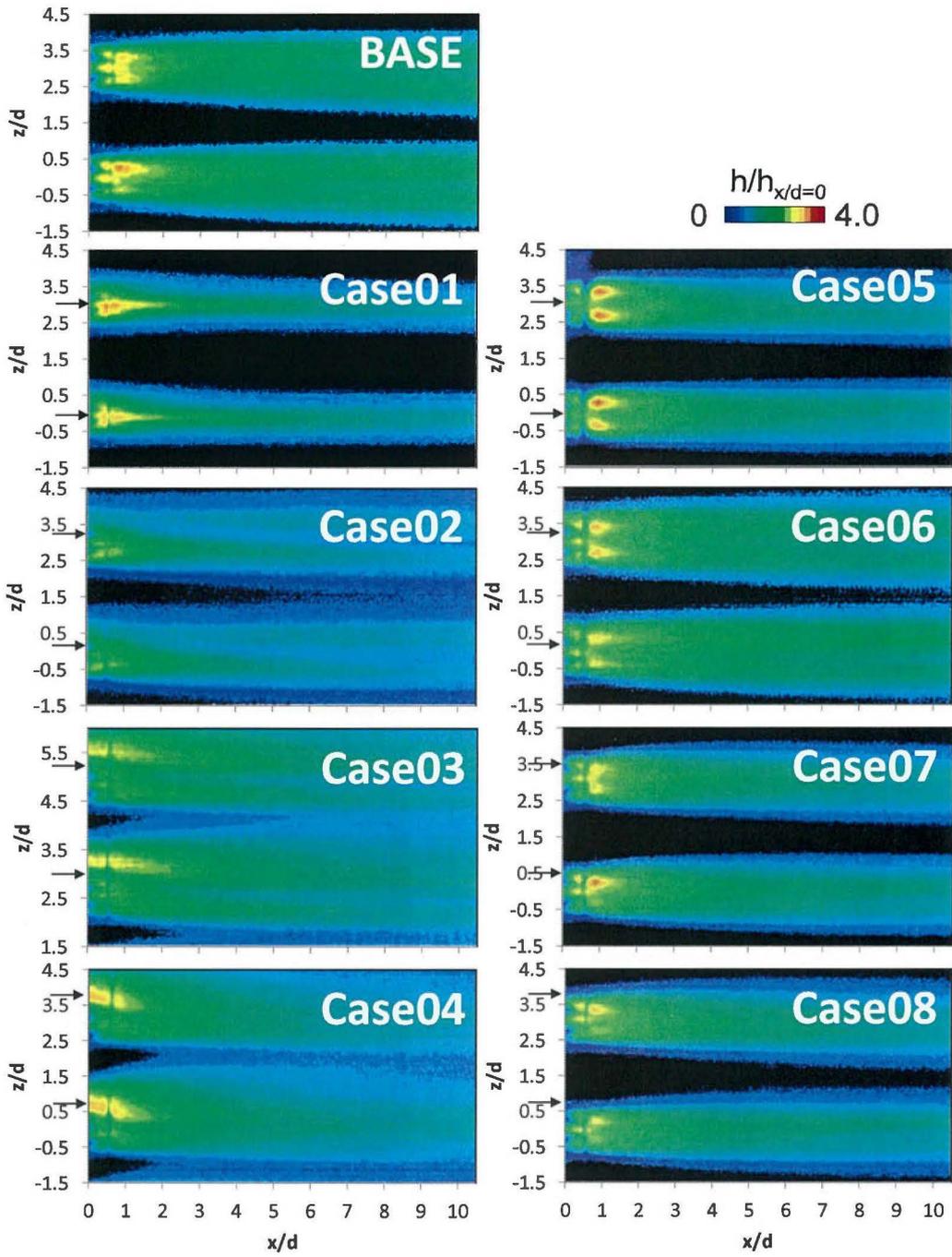


図 2.5.7 熱伝達率分布 ($BR=0.5$)

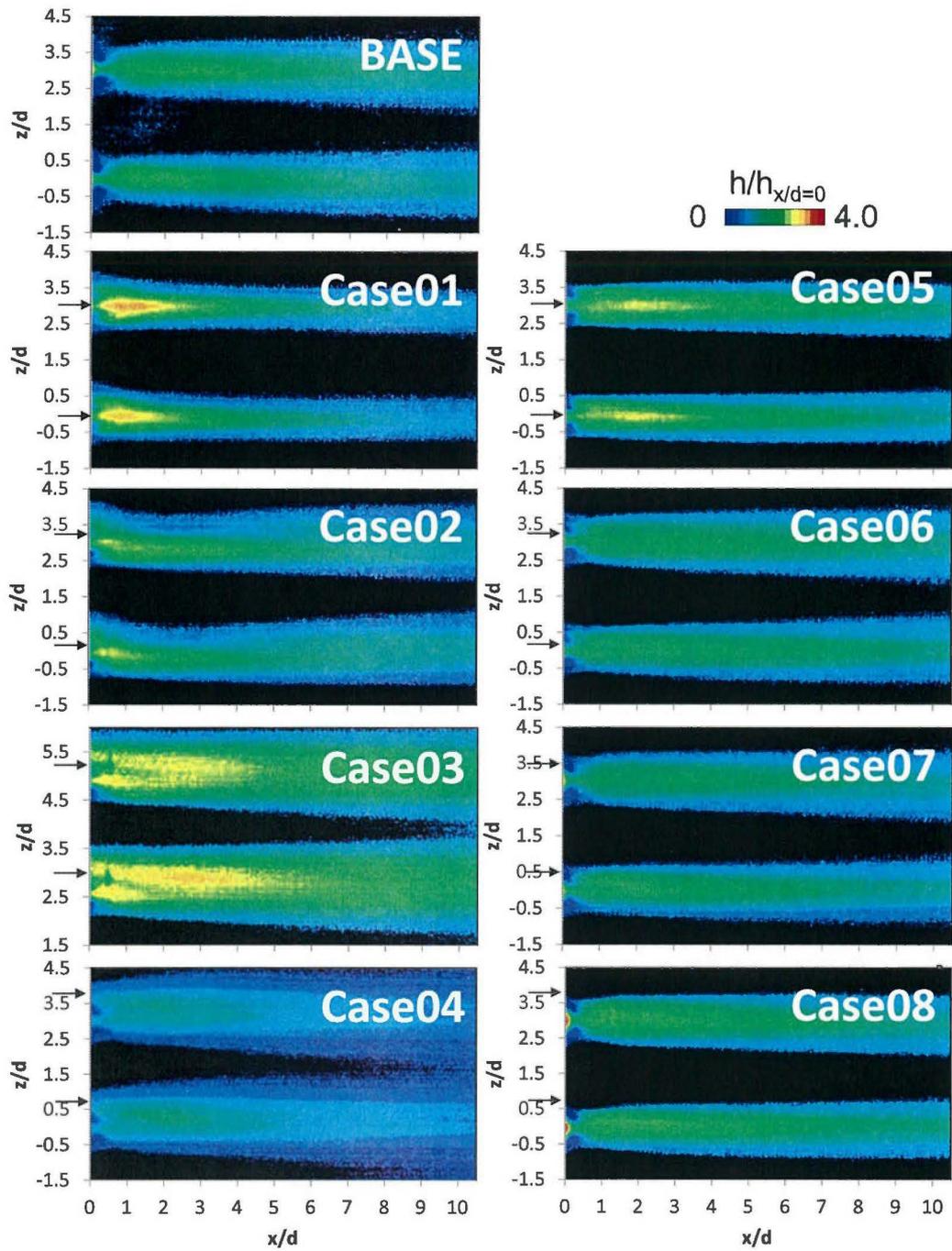


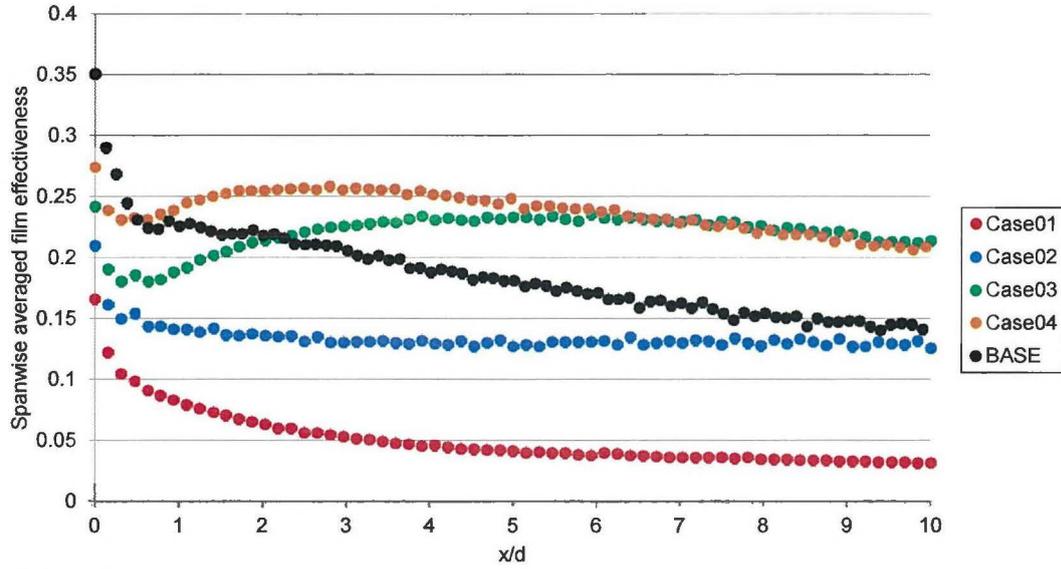
図 2.5.8 熱伝達率分布 ($BR=1.0$)

図 2.5. 9 には実験で得られたスパン方向平均フィルム効率を示す。BR=0.5 においては BASE と比較すると、Case01, 02 では全領域でスパン方向平均フィルム効率が BASE よりも下回った。Case03 では冷却孔出口付近で BASE よりも低いフィルム効率となったが、スパン方向への拡散の効果により下流側の領域においては BASE よりも高いスパン方向平均フィルム効率となった。Case05~Case08 に関してはスパン方向平均フィルム効率に殆ど差は表れておらず、さらに BASE よりも低いスパン方向平均フィルム効率となった。BR=1.0 (図 2.5. 10) においては、BASE では二次空気が lift-off するためにスパン方向平均フィルム効率の著しい低下が見られる。Case01, 02 ではフィルムの付着面積が少ないためにスパン方向平均フィルム効率は BASE と同様になったが、Case03, 04 においてはフィルムの付着面積が広いために BASE よりも大幅に高いフィルム効率となっている。BR=1.0 においても、Case05~Case08 ではスパン方向平均フィルム効率は殆ど変化が表れず、BASE よりも低いスパン方向平均値となった。

図 2.5. 11 には BR=0.5 における、 $z/d=0.0$ での局所フィルム効率を示す。今回はスパン方向へ非対称にデバイスを設置しているが、センターラインでのフィルム効率は Case03, Case04 の場合に BASE よりも高い値を示しており、二次空気の付着性が下流側まで継続していると考えられる。一方で Case01, Case02 に関しては局所のフィルム効率に関しても BASE よりも低い値となった。Case05~Case08 に関しては BASE と殆ど変らない結果となった。今回は冷却孔近傍の領域で特にスパン方向平均値が Case05~Case08 に関して BASE よりも低くなったため、Case05~Case08 はスパン方向の広がり方が BASE よりも縮小していると考えられる。図 2.5. 12 には BR=1.0 における、 $z/d=0.0$ での局所フィルム効率を示す。吹き出し比の増加に伴い、BR=1.0 では局所のフィルム効率は冷却孔近傍以外の領域では低い値を示した。Case01~Case04 を比較してみると、Case03, Case04 では BASE よりも局所フィルム効率が低い値を示していたが、BR=0.5 ほどの優位性は確認できなかった。Case05~Case08 には殆ど変化は見られない。

図 2.5. 13, 図 2.5. 14 には各吹き出し比における $z/d=0$ での局所熱伝達率を示している。高さの高いデバイスを用いた場合には局所的に熱伝達率が高くなる箇所が存在しているが、ほとんどの領域の熱伝達率は BASE よりも低い値を示していた。

(a) Case01~Case04



(b) Case05~Case08

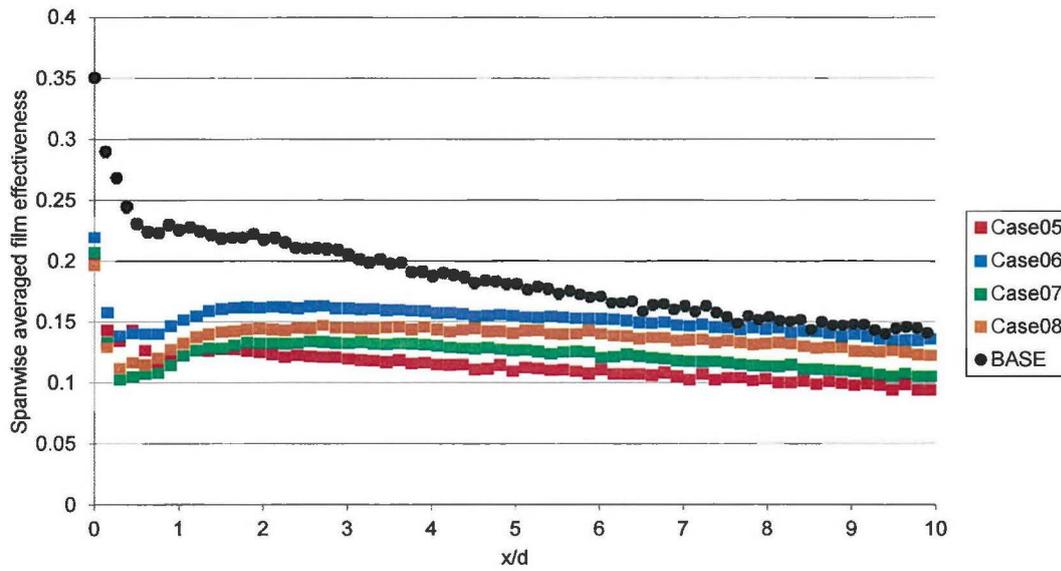
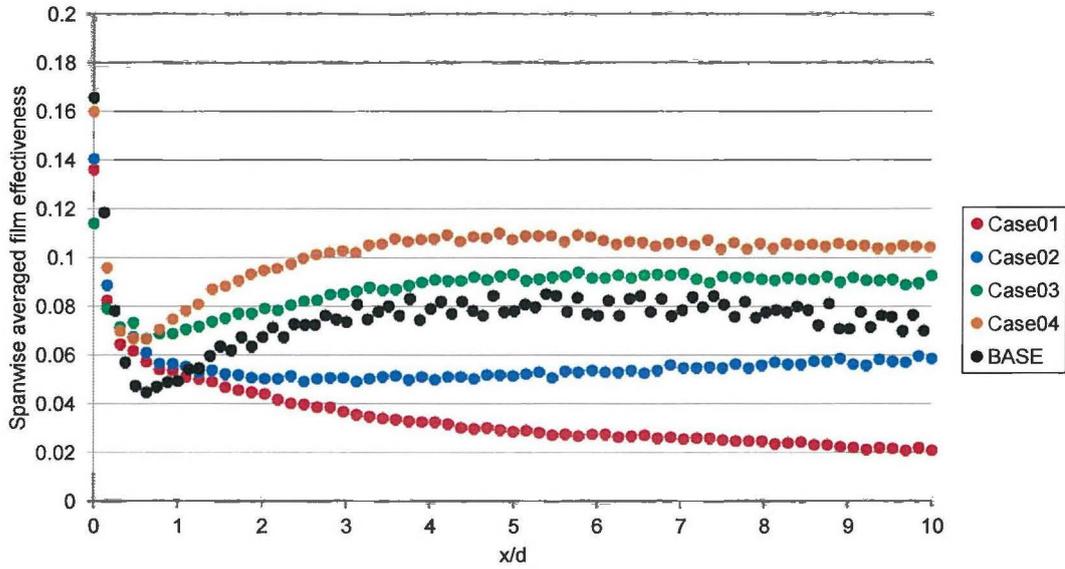


図 2.5.9 スパン方向平均フィルム効率($BR=0.5$)

(a) Case01 ~ Case04



(b) Case05 ~ Case08

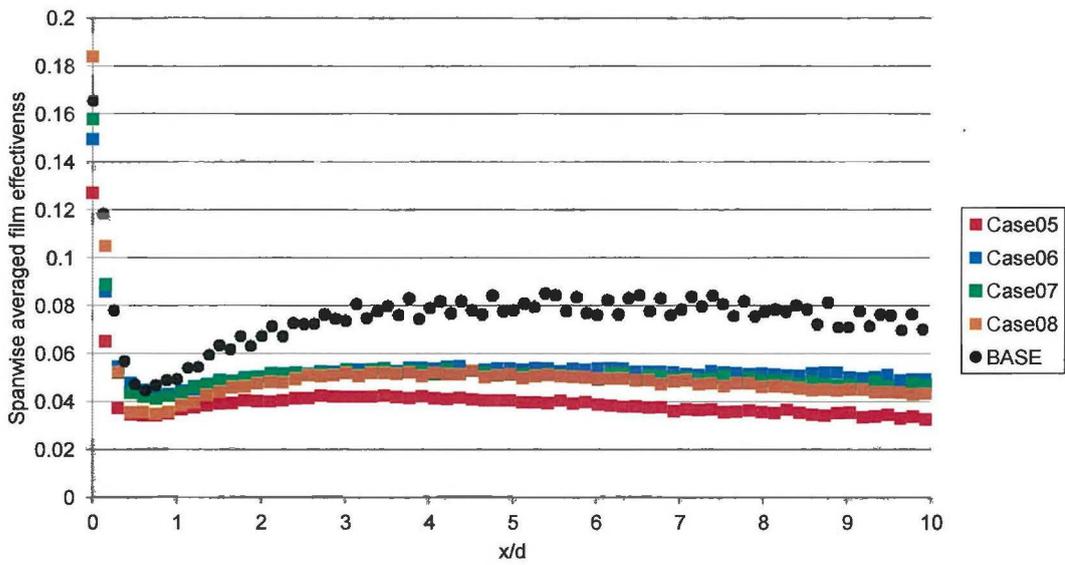
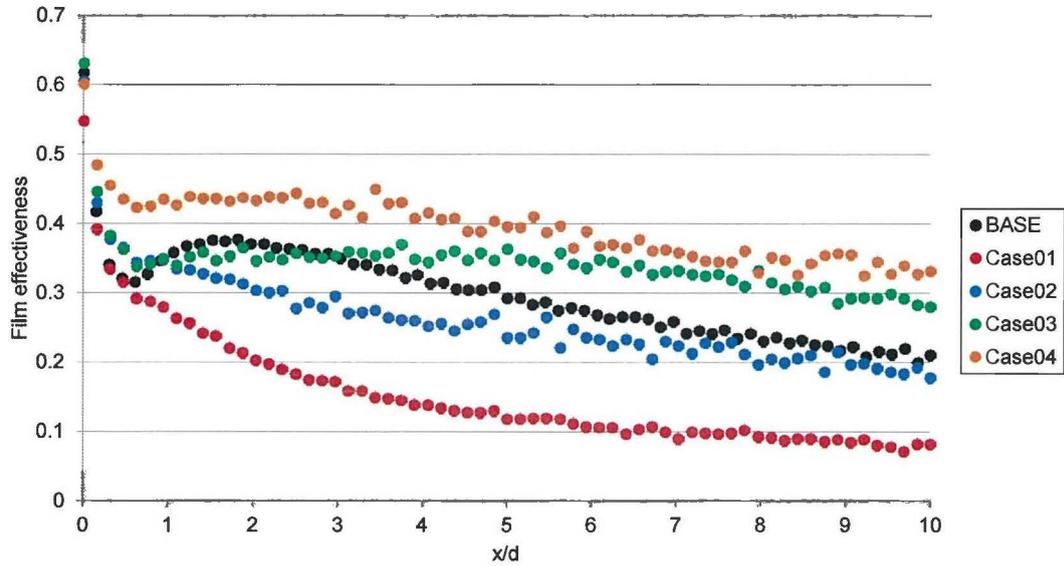


図 2.5.10 スパン方向平均フィルム効率($BR=1.0$)

(a) Case01 ~ Case04



(b) Case05 ~ Case08

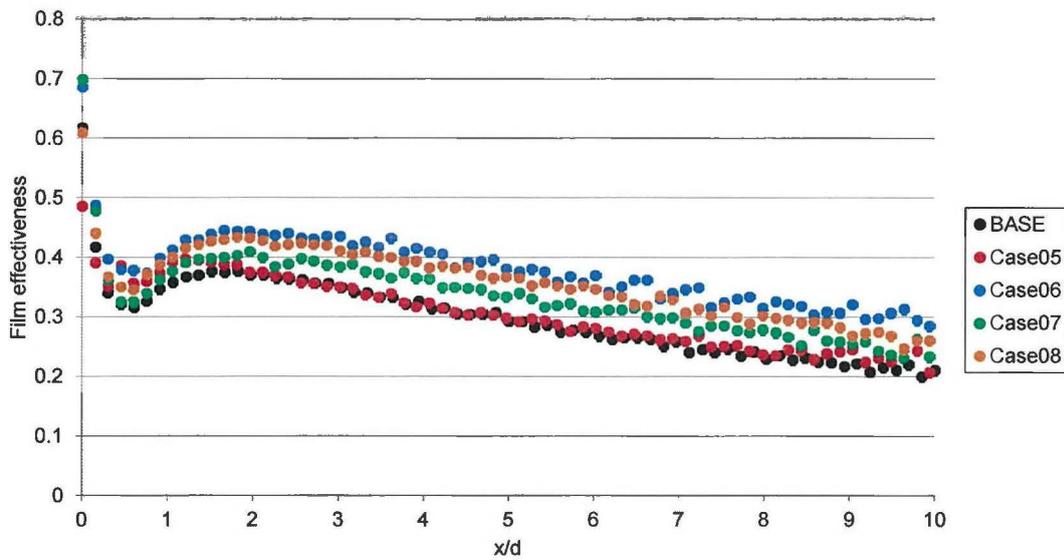
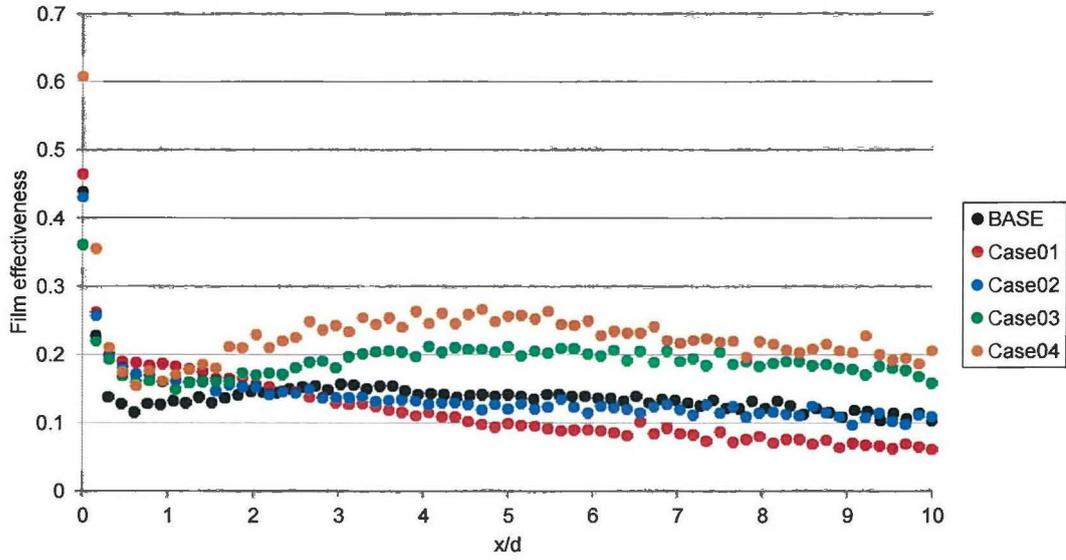


図 2.5.11 局所フィルム効率($BR=0.5, z/d=0$)

(a) Case01~Case04



(b) Case05~Case08

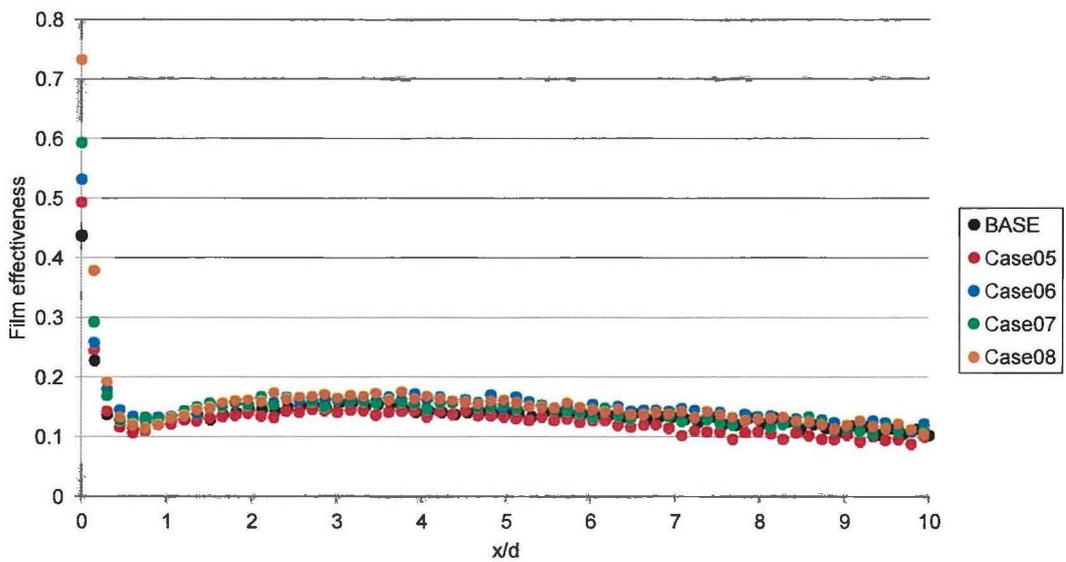
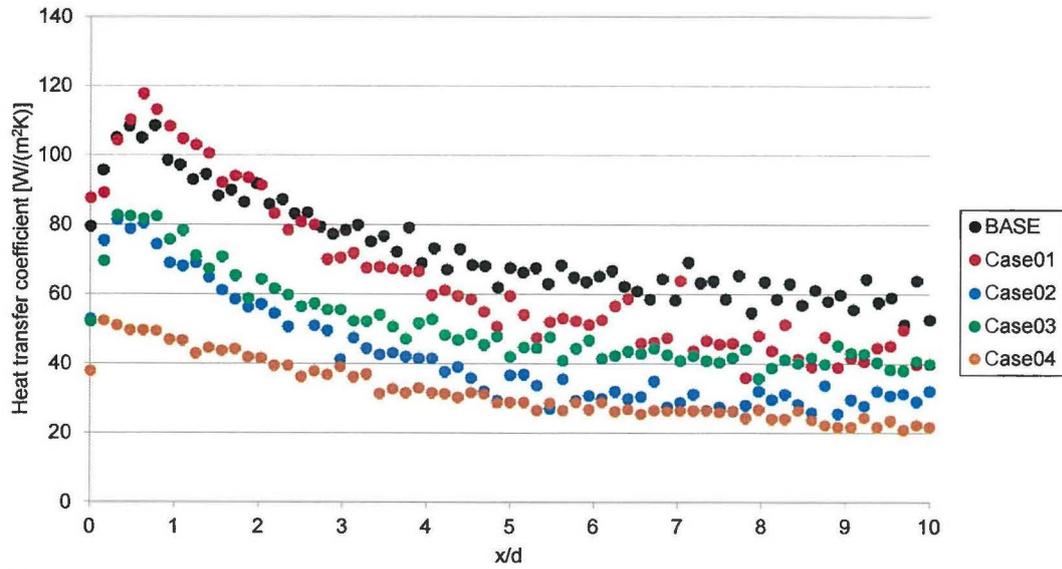


図 2.5.12 局所フィルム効率($BR=1.0, z/d=0$)

(a) Case01 ~ Case04



(b) Case05 ~ Case08

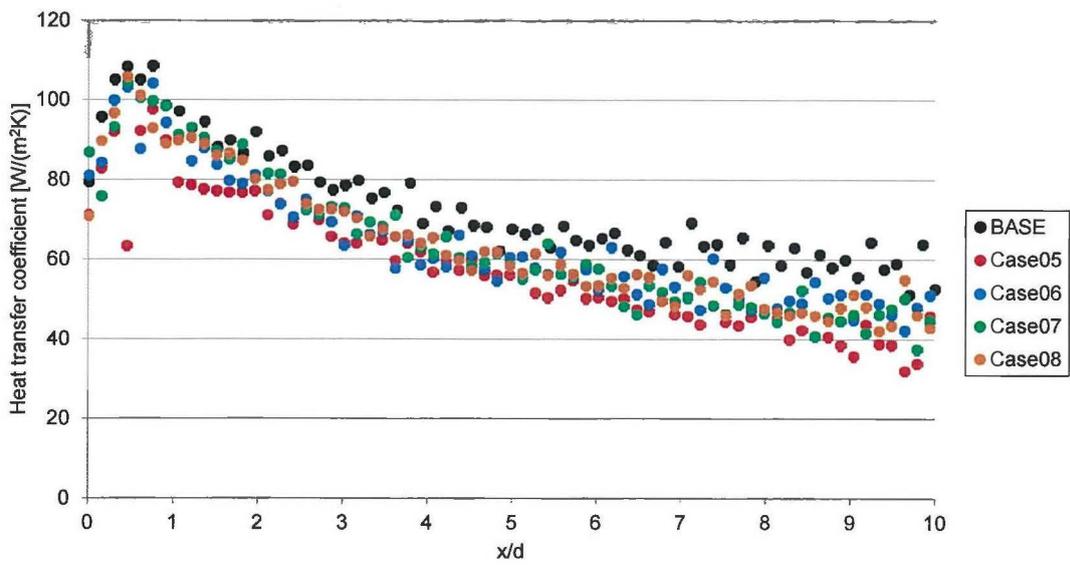
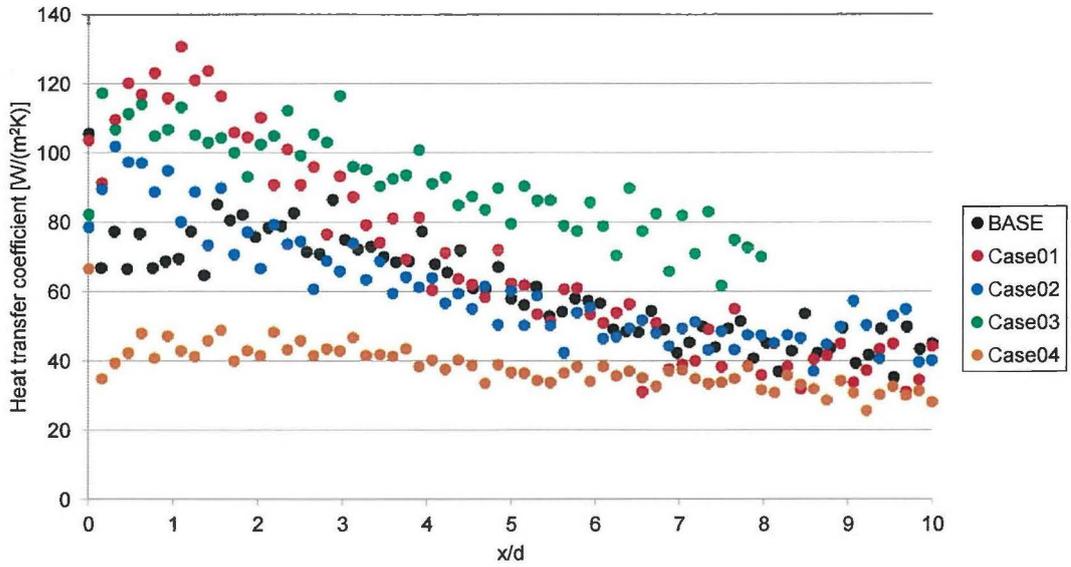


図 2.5.13 局所熱伝達率($BR=0.5, z/d=0$)

(a) Case01~ Case04



(b) Case05~ Case08

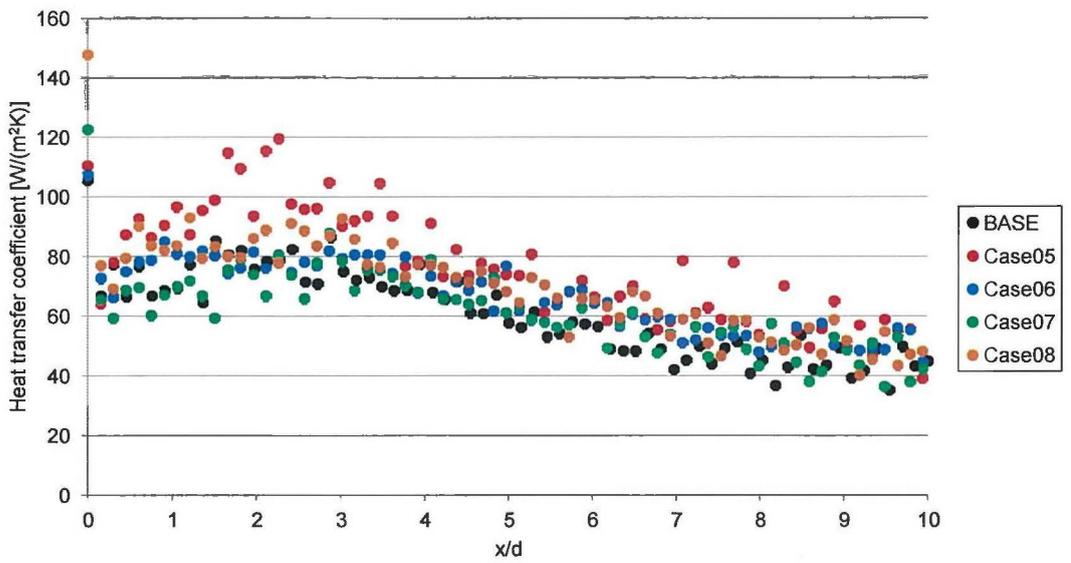


図 2.5.14 局所熱伝達率($BR=1.0, z/d=0$)

図 2.5. 15 には実験で得られた面平均フィルム効率を示す。フィルム効率を面平均する際には、 $0.87 \leq x/d \leq 10.87$, $-1.5 \leq z/d \leq 4.5$ の範囲でフィルム効率を面平均した。また $BR=0.5$, 1.0 の面平均フィルム効率はそれぞれ BASE の面平均フィルム効率値で無次元化している。 $BR=0.5$ では BASE を基準にすると Case01, 02 では面平均フィルム効率が BASE と同等か、低くなっていたが Case03, 04 ではフィルム効率が BASE よりも高い値となり、フィルムの付着面積が高くなった効果が顕著に表れているといえる。Case05~Case08 ではフィルム効率は BASE よりも若干高い値を示している。デバイスを取り付けたことによりフィルム効率は増加する結果となったが、デバイスの高さが低いために流れ場の変化が少なく、フィルム効率の増加割合は Case03 等よりも低くなっている。

$BR=1.0$ では特に Case03, 04 に関しては BASE と比較すると 2 倍程度の面平均フィルム効率となっており比較的高い吹き出し比においてもデバイスを取り付けたことによる流れ制御の効果が顕著に発揮されている。Case05~Case08 に関しては $BR=0.5$ と同様にほとんどデバイスを取り付けた場合の効果が表れていない。以上のことから、法線方向の高さが高いデバイスを取り付けた場合は、高さの低いデバイスと比較すると、フィルム効率が低下するリスクも大きくなっているが、フィルム効率の増加する割合も大きく、デバイスの設置位置によってはフィルム効率を増加させるメリットを發揮させることができるといえる。しかし、デバイスの高さが低い場合にはフィルム効率へ与える影響がほとんど観察できない。

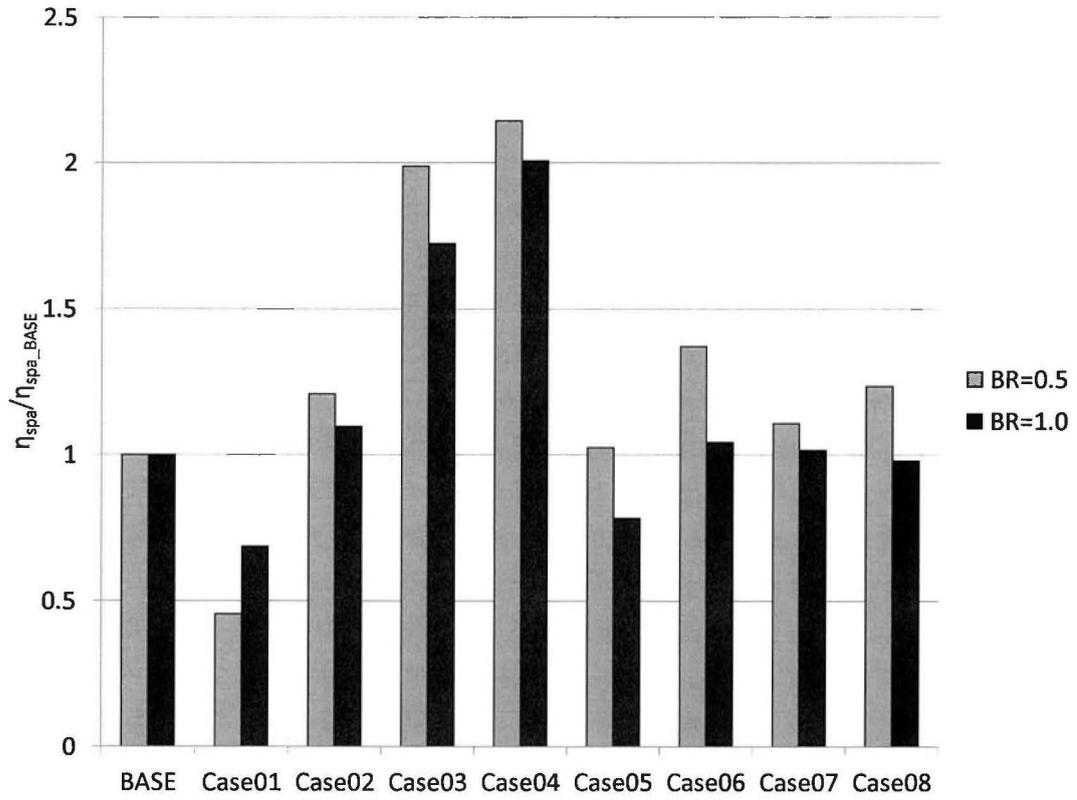


図 2.5.15 面平均フィルム効率

2.5.5 空間温度場

図 2.5.16 (a)には実験で得られた $BR=0.5$ における $x/d=3.0$ での無次元温度場を示す。BASE の場合、冷却孔のセンターラインに対してほぼ左右対称の温度場となっており、局所的な無次元温度も高い。この傾向は壁面フィルム効率分布とも一致している。また、二次空気の付着性も高い。Case01 はデバイスを冷却孔のセンターライン上に配置した場合であるが、空間温度は BASE と比較すると壁面法線方向へ移動しており lift-off が促進されていることが分かる。さらにデバイスから発生する流れにより乱れが増加する効果なのか、局所的なフィルム効率も BASE に比べると低い値を取っている。Case02 については冷却孔のセンターラインに対して非対称な空間温度場が観察される。Case01 と比較すると、lift-off している傾向は Case01 と同様に見られているが、二次空気が曲げられている効果により付着面積は Case01 よりも広がっていることが分かる。また、二次空気が付着している部分はデバイスとは反対側の下流領域となっているが、二次空気のコア自体は冷却孔のセンターライン上で lift-off している様子が分かる。Case03 と Case04 では二次空気の曲げられる傾向が強くと表れていた。さらに二次空気のコアの無次元温度のコアが壁面に近い位置へ下がっており lift-off している傾向が見られない。このため、図 2.5.5 のようなフィルム効率分布となっていると考えられる。局所的なフィルム効率を観察すると、Case01 や Case02 とは違い、局所的なフィルム効率は比較的高い値を示しており、Case04 では高さの高いデバイスを取り付けた形態の中では最も局所的なフィルム効率が高くなっているように見える。Case05～Case08 の無次元温度は壁面フィルム効率分布がほとんど変化しなかったことから、空間的な温度場もほとんど変化が見られない。

図 2.5.16 (b)には実験で得られた $BR=1.0$ における $x/d=3.0$ での無次元温度場を示す。BASE においては、二次空気の運動量が高くなるために lift-off が促進されているうえに、局所的なフィルム効率の値が低くなっている。Case01 においては $BR=0.5$ と同様に二次空気の lift-off が促進されており、二次空気温度のコアが壁面より離れた位置に存在している。そのため、壁面へ付着している温度場の領域はほとんど見ることはできない。Case02 ではデバイス起因の流れ場によって一部の領域で二次空気の付着性が向上しているが、Case01 と同様に二次空気の lift-off が促進されている効果が表れており二次空気のコアの位置は壁面から離れた位置の冷却孔センターライン上に位置している。Case03 と Case04 については、二次空気の曲げられる傾向が $BR=0.5$ と同様に強い。しかし、吹き出し比の増加に伴い壁面法線方向の運動量が高くなるために二次空気の付着性は $BR=0.5$ よりも低くなっている。また、二次空気温度のコアの位置も冷却孔センターライン上に位置している。Case05～Case08 では $BR=0.5$ と同様に BASE の無次元温度場とほとんど変わらない様子が分かる。

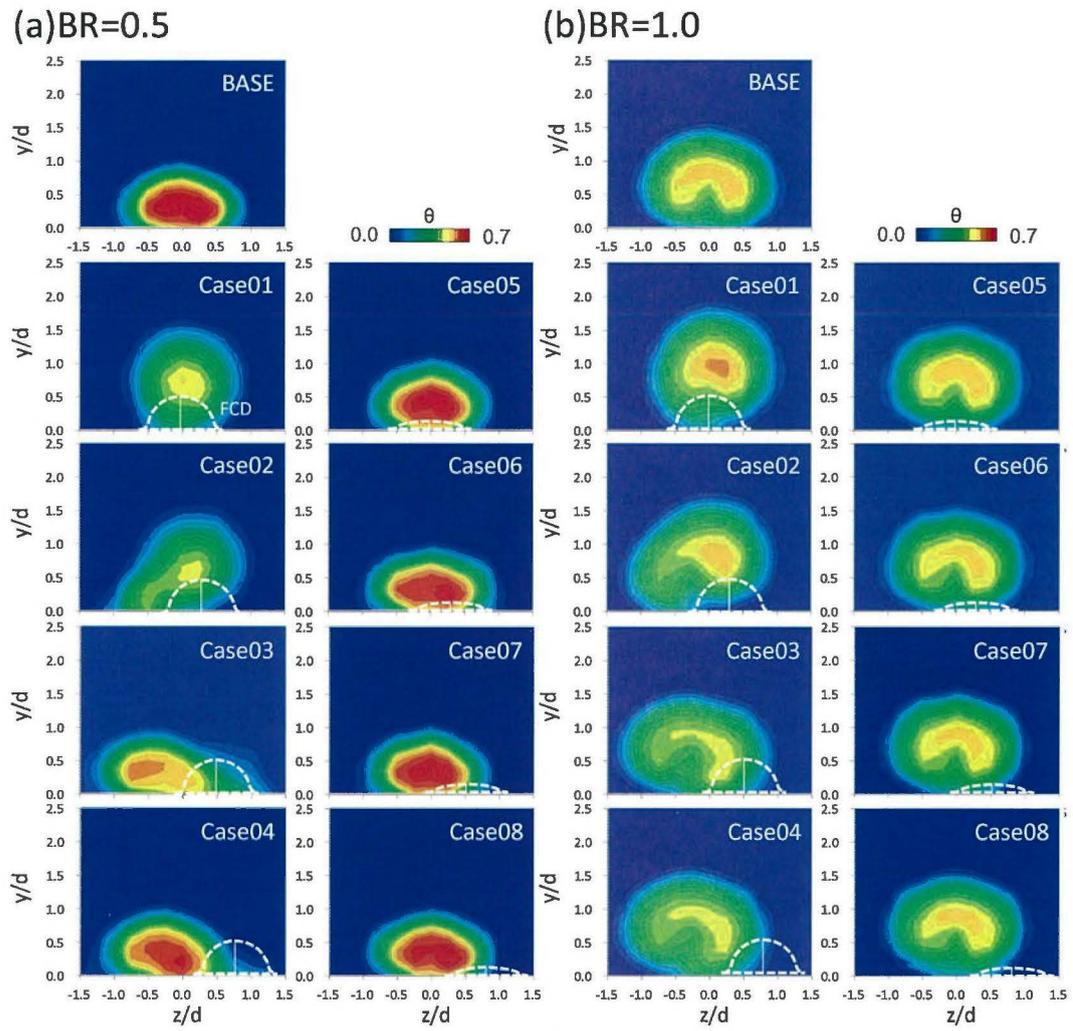


図 2.5.16 空間温度場 ($x/d=3.0$) : (a) $BR=0.5$, (b) $BR=1.0$

2.5.6 全圧損失

図 2.5. 17 には実験によって得られた全圧損失係数分布を示す。二次空気の吹き出しを行わない場合 (図 2.5. 17 (a)), BASE では何もデバイスが取り付けられていないために全圧損失係数の高い領域は境界層によるものと分かる。高さの高いデバイスを取り付けた場合、全圧損失の高い領域はデバイス下流側でデバイスを避ける領域で高くなっているが、デバイスの下流領域では損失領域が低減している。損失の高い領域では BASE よりも壁面法線方向に高い領域まで損失の高い領域が広がっている。Case05~Case08 までは、フィルム効率分布にほとんど違いが見られなかったため、代表して Case05 の結果のみを記載している。Case05 の全圧損失係数分布は、BASE と比較するとわずかに境界層の損失領域が低減している、これはデバイスから発生する乱れにより境界層の付着性が向上したためであると考えられる。

$BR=0.5$ では、二次空気の吹き出しが行われるために主流と二次空気の混合損失領域がセンター図 (図 2.5. 17 (b)) に表れている。BASE においては、冷却孔のセンターライン上に損失領域が壁面法線方向に広がっている領域が確認され、これが主流と二次空気の混合損失による領域である。Case01 においては、二次空気が lift-off するために損失領域は BASE よりもさらに壁面法線方向に押し上げられる形となる。しかし、局所的な全圧損失係数に関しては高い値は示さなかった。Case02 では、デバイス起因の流れ場により二次空気が曲げられるために混合損失領域が冷却孔センターラインを中心に非対称になっている。Case03, Case04 については $BR=0.0$ の場合と比較すると損失が卓越している領域は変化していないが、二次空気の吹き出しにより損失領域がわずかに拡大している。さらに、境界層内の損失と主流と二次空気の混合損失が組み合わさることにより、壁面付近の局所的な全圧損失係数は高くなっていることが分かる。Case05 については BASE と同様に混合損失領域が確認できるが、付着性がわずかに向上している影響で損失領域が壁面へ押し下げられている。

$BR=1.0$ においては、二次空気の吹き出しがさらに強くなるために吹き出しによる混合損失領域は拡大している。BASE については、主流と二次空気の混合損失領域は冷却孔センターライン上に位置しているが局所的な全圧損失係数は BASE と比較すると低下していることが分かる。これは、吹き出し比が高くなるにしたがって二次空気の全圧が高くなるために、一部の領域で二次空気の高い全圧により圧力が回復しているためである。Case01 については $BR=0.5$ と比較するとさらに二次空気が lift-off するために、損失領域は壁面法線方向へ押し上げられる。この場合でも、境界層付近や、二次空気の存在する壁面から高い位置での局所的な全圧損失係数は低くなっている。Case02 では、二次空気の高い全圧が流入する効果で、全圧損失係数の高い領域が $BR=0.5$ よりも縮小していることが観察される。Case03, Case04 については全圧損失係数の高い領域は壁面法線方向へ押し上げられているが、 $BR=0.5$ と比較すると特に壁面に近い位置での高い全圧損失領域が $BR=1.0$ の場合では見られなくなっていた。

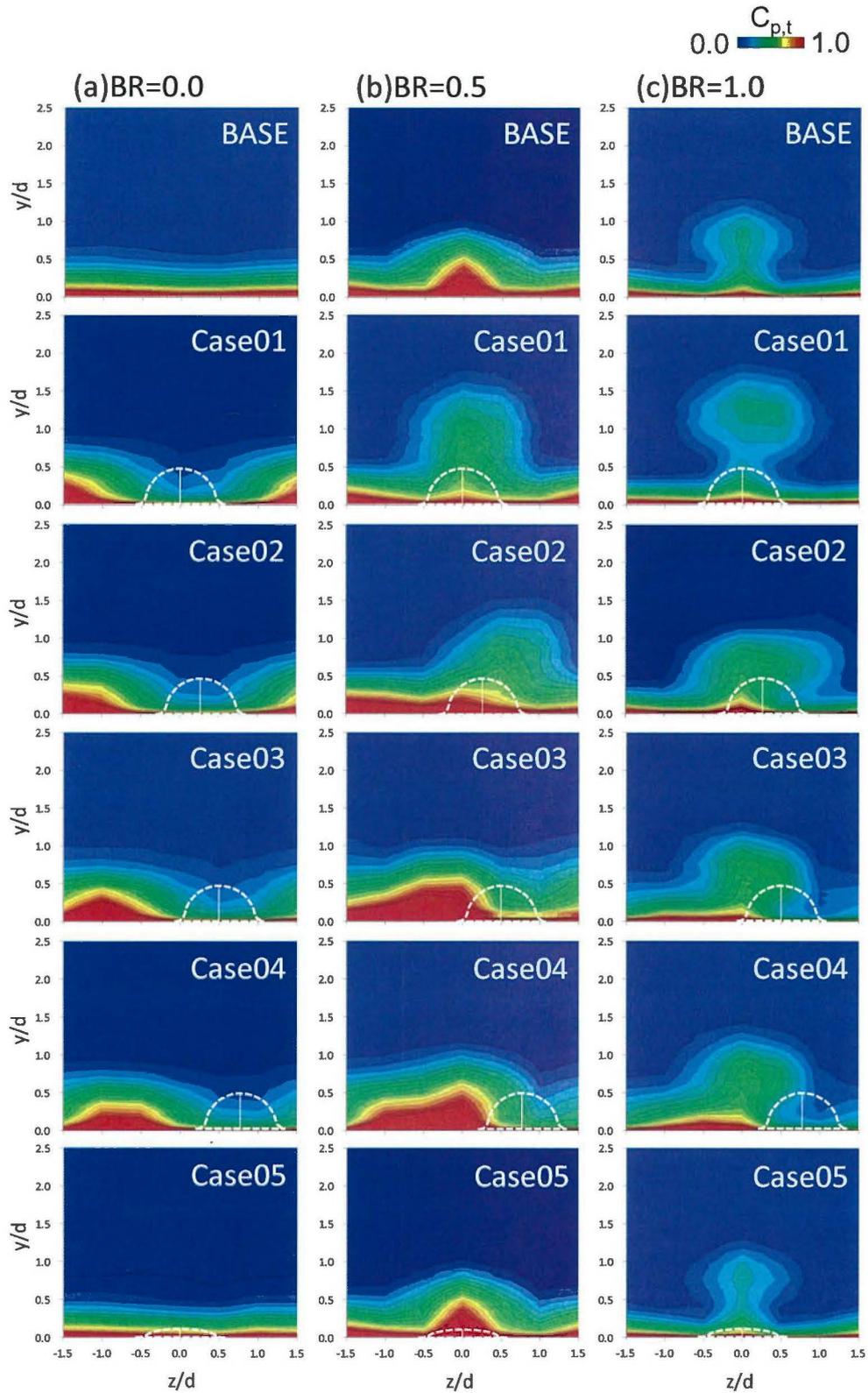


図 2.5.17 全圧損失係数分布 : (a) $BR=0.0$, (b) $BR=0.5$, (c) $BR=1.0$

図 2.5.18 には流量平均した全圧損失係数を示す。全圧損失係数は BASE の $BR=0.0$ の条件で全て無次元化している。 $BR=0.0$ の条件については、デバイスを取り付けたことによる損失領域が拡大するために流量平均全圧損失係数は BASE, $BR=0.0$ と比較すると高くなっていることが分かる。 Case01~Case04 までは、デバイスの取り付けられる位置が異なるだけなので、流量平均全圧損失係数は同じ値を取ることが考えられるが、今回は計測の不確かさによりデータにばらつきが見られる。 Case05~Case08 までは、デバイスから発生する乱れにより境界層の付着性が良くなり、流量平均全圧損失係数は全体的に BASE, $BR=0.0$ よりも低減した。 Case05~Case08 までも等しい全圧損失係数になると考えられるが計測の不確かさにより流量平均全圧損失係数にはデータのばらつきが見られる。

$BR=0.5$ の場合、二次空気の吹き出しを行うため主流と二次空気の混合損失により流量平均全圧損失は増加する。 BASE に関しては $BR=0.0$ の場合と比較すると 1.4 倍の全圧損失係数となっているが、デバイスを取り付けた Case01~Case04 については全圧損失係数がさらに増加する傾向が観察される。 Case01~Case04 ではデバイスの設置位置により全圧損失係数の高い領域が変化する傾向が見られたが、流量平均した全圧損失係数を見ると、4つのケースではほとんど変化が表れなかった。 Case05~Case08 については $BR=0.0$ と同様にデバイスから発生する乱れにより損失領域がわずかに低減するために BASE と比較すると流量平均全圧損失係数は低減する傾向が観察される。

$BR=1.0$ においては、二次空気の高い全圧が主流中に流入するために流量平均全圧損失係数は全体的に低減している。 BASE については $BR=1.0$ の吹き出しを行っていても、流量平均値は $BR=0.0$ と差がほとんど見られない。 Case01~Case04 については、デバイスを設置した効果により全圧損失係数はわずかに増加している傾向が見られるが、それでも $BR=0.5$ の流量平均全圧損失係数には及ばない結果となった。 Case05~Case08 においては、 $BR=0.5$ と同様に流量平均全圧損失係数が BASE の条件よりも低減する傾向が見られる。流量平均全圧損失の計測においてはフィルム効率の増加・減少の効果が強く表れていた Case01~Case05 での全圧損失係数は増加する傾向が見られたが、フィルム効率の増加・減少がほとんど観察されなかった Case05~Case08 については流量平均全圧損失係数が低減する傾向が観察され、空力損失の面ではメリットがあることが分かった。

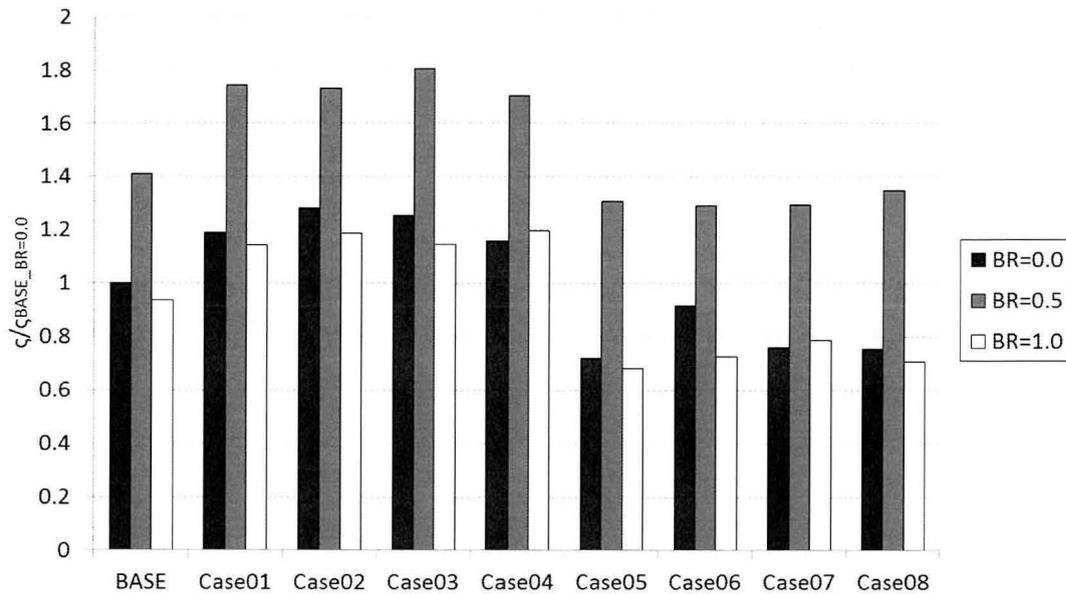


図 2.5.18 流量平均全圧損失係数

図 2.5.19 には BASE に加えて、Case01～Case04 の各計測ラインにおける流量平均全圧損失係数を示す。BASE に置けるは、BR=0.0 の際の全圧損失は境界層によるものでありスパン方向に一様な全圧損失係数を示している。二次空気の吹き出しが行われた場合、冷却孔センターライン上の全圧損失係数が高くなる一方で、境界層付近の全圧損失係数は、二次空気の高い全圧が流入することで BR=1.0 では BR=0.0 時よりも低下する傾向が観察された。また、吹き出し比毎で全圧損失係数を比較すると BR=0.5 よりも BR=1.0 の方が低い全圧損失となっている。Case01 に関してはデバイスをセンターライン上に設置しているが、デバイスのセンターライン上では BR=0.0 の際に低い全圧損失となっている。二次空気の吹き出しを行った場合には、BASE と同様にセンターラインでの全圧損失係数が高くなっていることが分かる。Case02～Case04 ではデバイスをスパン方向にずらした位置に設置しているが、デバイスを設置した位置の下流側の領域で Case01 と同様に BR=0.0 では全圧損失係数が低い値となる。二次空気の吹き出しを行った場合、デバイスがスパン方向に非対称に設置されている効果で二次空気が曲げられるために全圧損失係数のプロットは冷却孔のセンターラインに対して非対称になっている。BR=0.5 と BR=1.0 を比較すると、BR=0.5 では二次空気の運動量が少ないために、二次空気が比較主流によって曲げられ全圧損失係数が非対称になる傾向が強いが、BR=1.0 では二次空気の運動量が高く、スパン方向に曲げられる割合が少ないために全圧損失係数のピーク値は冷却孔のセンターライン位置に一致する。

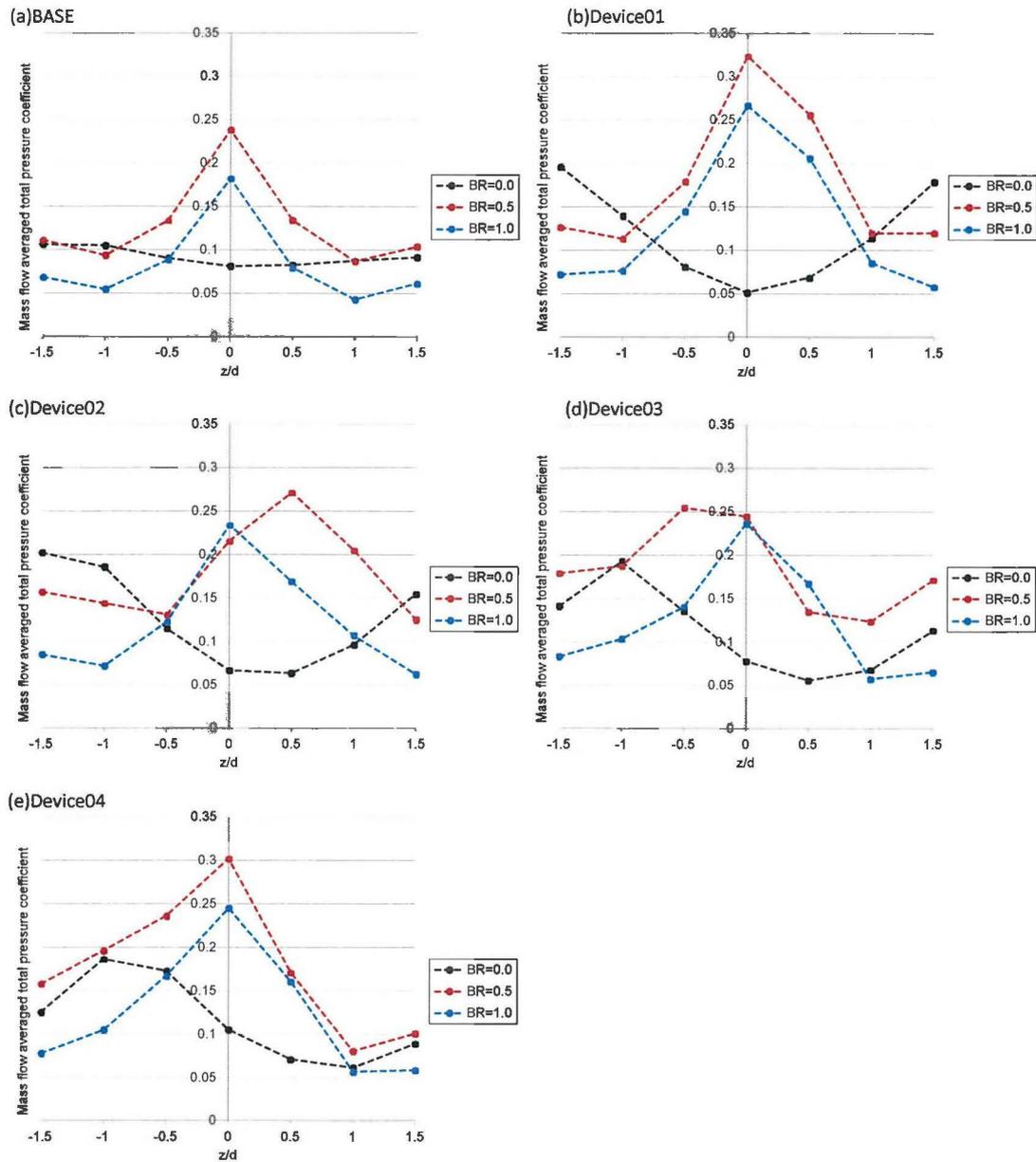


図 2.5.19 流量平均全圧損失係数 (ライン毎)

図 2.5. 20 には各吹き出し比毎に、計測ライン毎の流量平均全圧損失係数をまとめた結果をしめす。BR=0.0 の場合、デバイスを設置した位置の下流側では全圧損失係数が低下する様子が観察され、この領域においては BASE の全圧損失係数を下回る結果となった。一方でデバイスを設置しない領域に関しては全圧損失係数が BASE の 2 倍程度まで上昇する傾向が見える。BR=0.5 の場合、二次空気の吹き出しに伴って全圧損失係数は全体的に上昇し、二次空気がスパン方向に非対称に付着するために全圧損失係数も非対称なプロットとなった。ピーク値を観察するとほぼ BASE よりも上回っており、デバイスを取り付けたことにより主流と二次空気の混合が強められたと考えられる。BR=1.0 の場合、二次空気の運動量が高いために全圧損失係数のプロットはほぼ左右対称に変化している。BASE の場合と、デバイスを取り付けた場合を比較すると、デバイスを取り付けた場合においては冷却孔センターライン上での全圧損失係数が BASE よりも上昇する結果となった。BR=0.5 ではピーク値から離れた領域においても全圧損失係数は BASE を上回る場合が多かったが、BR=1.0 ではピーク値から離れた領域においては BASE と同等の全圧損失係数を維持している。

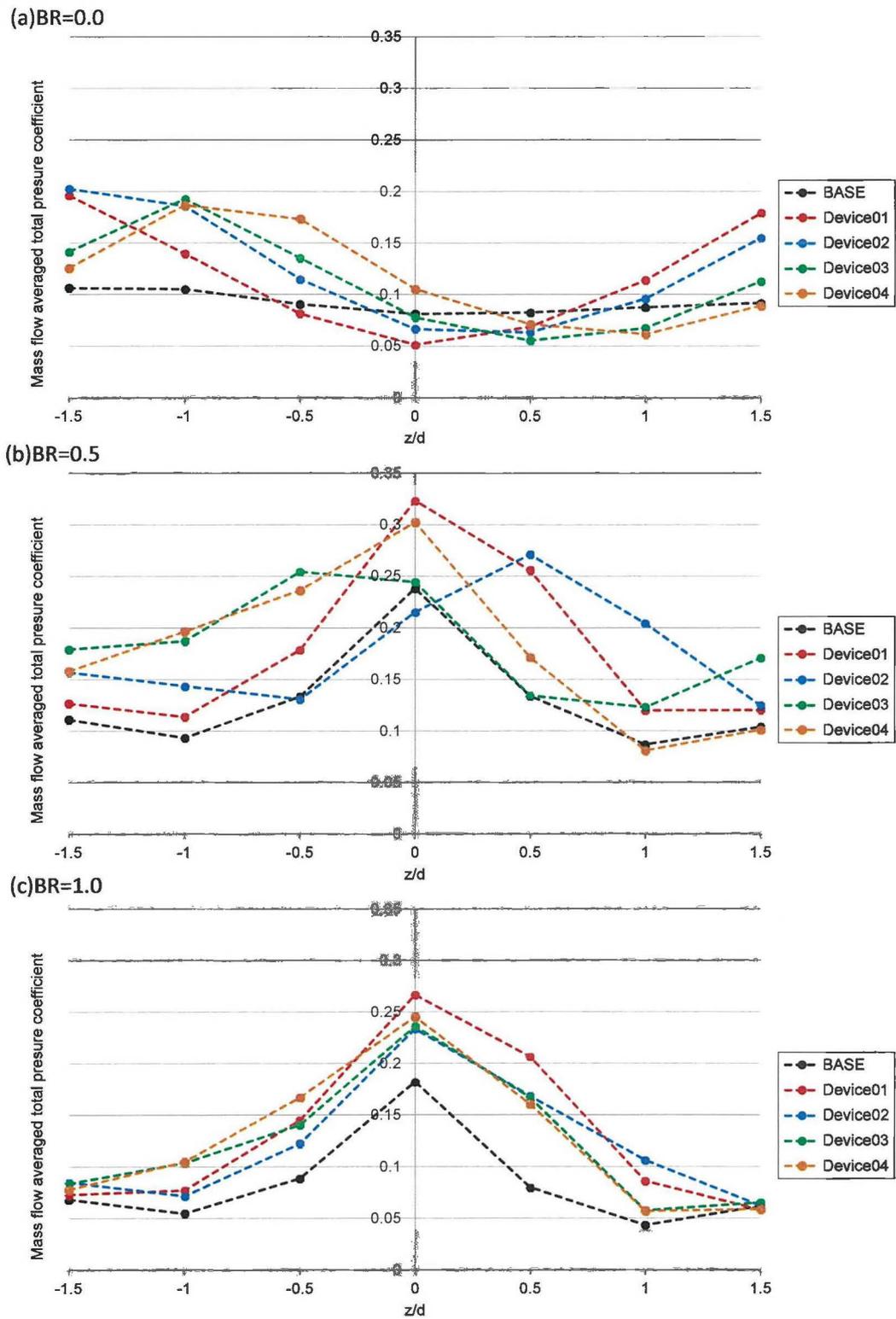


図 2.5.20 流量平均全圧損失係数 (吹き出し比毎)

2.5.7 LDVによる流れ場計測結果

図 2.5. 21 には実験によって得られた流れ場計測の結果を示す。(a)は流れ方向無次元流速を示しており、ダクト入口ピトー管によって計測した入口流速により無次元化を行っている。LDV 計測ではデバイス周囲の大まかな流れ場を捉えるために、デバイスの高さが高いケース (Case01~Case04) においてのみ計測を行った。BASE の場合、境界層部分と二次空気の存在している領域において低流速の領域が確認できる。Case01, $BR=0.0$ ではデバイスを設置した場合の流れ場を観察したものであるが、デバイスの下流側では低流速の領域が縮小しており、主に境界層の損失が卓越している。Case01 では二次空気が壁面法線方向へ lift-off しているために、二次空気も壁面から離れた領域に存在することとなる。そのため、低流速の領域は壁面から離れた位置に存在している。Case01 では二次空気が lift-off しているために二次空気の存在領域は壁面から離れているが、デバイス起因の流れ場により二次空気が曲げられ低流速の領域は冷却孔のセンターラインに対して非対称になっている。Case03, Case04 では二次空気の存在する領域に低速度のコアが確認できる。また、デバイスから発生する渦により低流速の領域が形成されていることも観察された (図 2.5. 21A)。

図 2.5. 21(b)には実験によって得られた流れ方向に軸を持つ渦度を示す。BASE の場合、冷却孔のセンターライン上に赤 (反時計回りの回転) と青 (時計回りの回転) の渦度のペア (図 2.5. 21B) を確認することができる。これは冷却孔から発生する CRVP を示しており、壁面から二次空気を lift-off させるのを促進する渦である。Case01, $BR=0.0$ のセンターライン上で観察される渦ペア (図 2.5. 21C) は、デバイスから発生する渦であるが、BASE の場合とは逆の渦度のペアとなっており二次空気を壁面へ押し下げる向きの渦度となっている。この渦の発生起源については完全には明らかになっていないが、デバイスの側面を通過してくる馬蹄形渦もしくは、デバイスの上側を通過してくる時に発生する剥離渦であると考えられる。Case01, $BR=0.5$ では中心付近の渦度のペアが壁面法線方向に拡大している様子が確認される。これはデバイスから発生した渦度、冷却孔から発生した CRVP が干渉することにより渦度の拡大が発生したためである。これにより、二次空気は壁面法線方向に lift-off しやすい状態となっていると考えられる。Case02 では赤と青の渦度領域が非対称となっている。赤と青の渦度のバランスが崩れているために二次空気は冷却孔のセンターラインを中心に非対称になっていると考えられる。Case03, Case04 では図中のデバイスの左側に渦ペアが観察される。これは冷却孔から発生した CRVP である。また、その右側には反時計回りの渦度を持った領域 (図 2.5. 21D) が存在している。これはデバイスから発生した渦に起因するものであり、CRVP の側面に位置することで、CRVP の一部の領域において二次空気を壁面へ押し下げる向きへベクトルが強められていることを示している。以上のことから、Case03, Case04 ではこの領域において二次空気が壁面へ付着し、フィルム効率分布がスパン方向へ広く付着している様子が観察されたと考えられる。

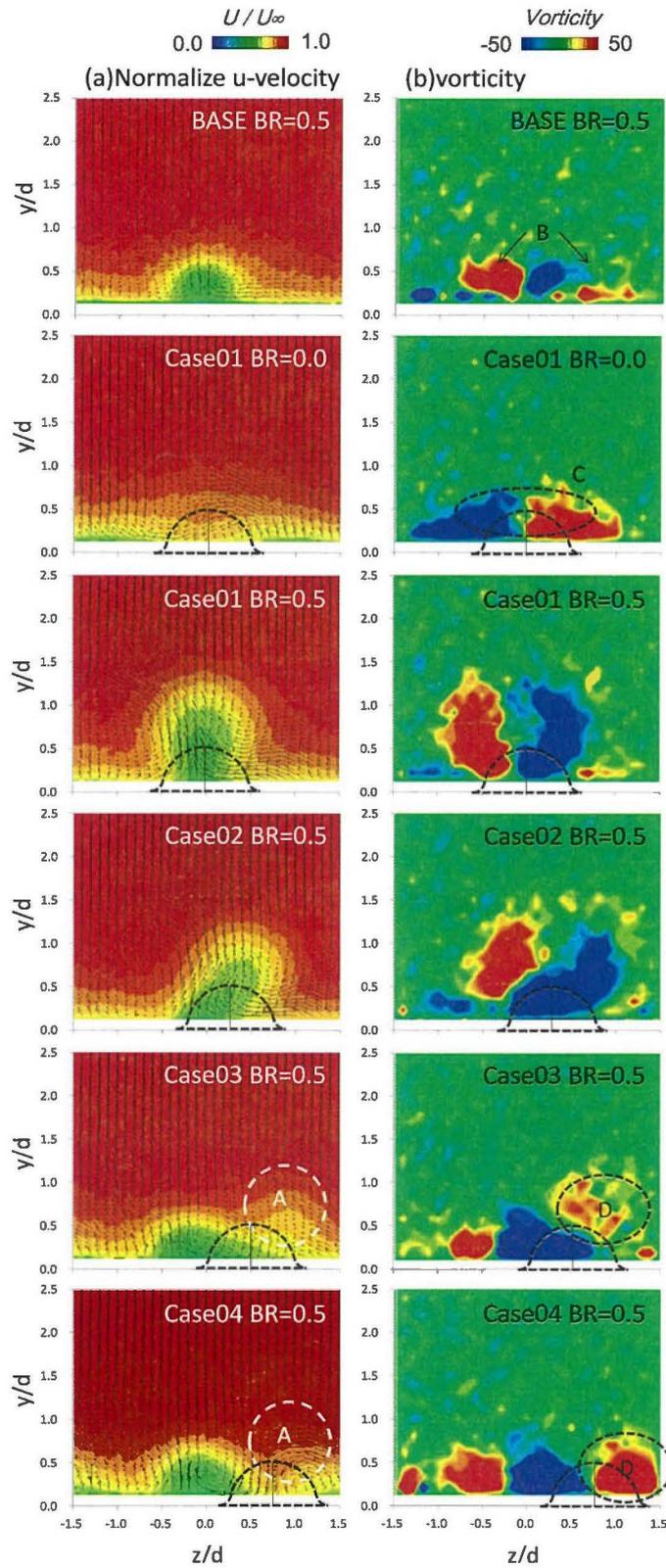


図 2.5.21 LDV 結果 : (a)流れ方向流速, (b)渦度

2.5.8 CFD 結果

2.5.8.1 RANS 解析結果（フィルム効率分布）

図 2.5.22 には実験と RANS の解析で得られた $BR=0.5$ におけるフィルム効率分布を示す。CFD の結果では実験に比べて、局所的なフィルム効率を高く予測している。定性的な傾向に関してはほぼ捉えられており、二次空気の曲げられる方向や、Case01 でフィルム効率が低下する傾向が捉えられている。各形態毎に観察すると、BASE では局所的なフィルム効率は CFD で高く予測されるものの、実験値と定性的に一致したフィルム効率分布となった。Case01 では実験では二次空気が lift-off する傾向が CFD では実験に比べて強く表れており、実験結果よりもフィルム効率分布の広がりが見られなかった。Case02 では、デバイスを取り付けた効果によりフィルム効率分布が非対称になる傾向が捉えられている。ただし、局所的なフィルム効率は高くなっており定量的にはフィルム効率の不一致が見られる。Case03, Case04 でも実験と同様にフィルム効率分布が曲げられる傾向が捉えられており、Case02 とは逆の方向にフィルム効率が曲げられる傾向が見られている。局所的なフィルム効率に関しては Case02 と同様に高い値を示した。

図 2.5.23 には実験と RANS の解析で得られた $BR=1.0$ におけるフィルム効率分布を示す。BASE と Case01 に関しては二次空気の lift-off が CFD の結果では比較的課題に評価されており、二次空気の付着面積に関しては CFD 結果の方が少なくなっているように観察される。Case02~Case03 に関しては $BR=0.5$ の場合と同様に二次空気がスパン方向に非対称な分布となっていることが分かり、実験と同様の傾向を CFD では捉えられている。この場合は、付着面積には大きな差が見られなかったが、一方で局所的なフィルム効率には実験と CFD では違いが表れており、CFD の方が局所的なフィルム効率を過大に評価している。

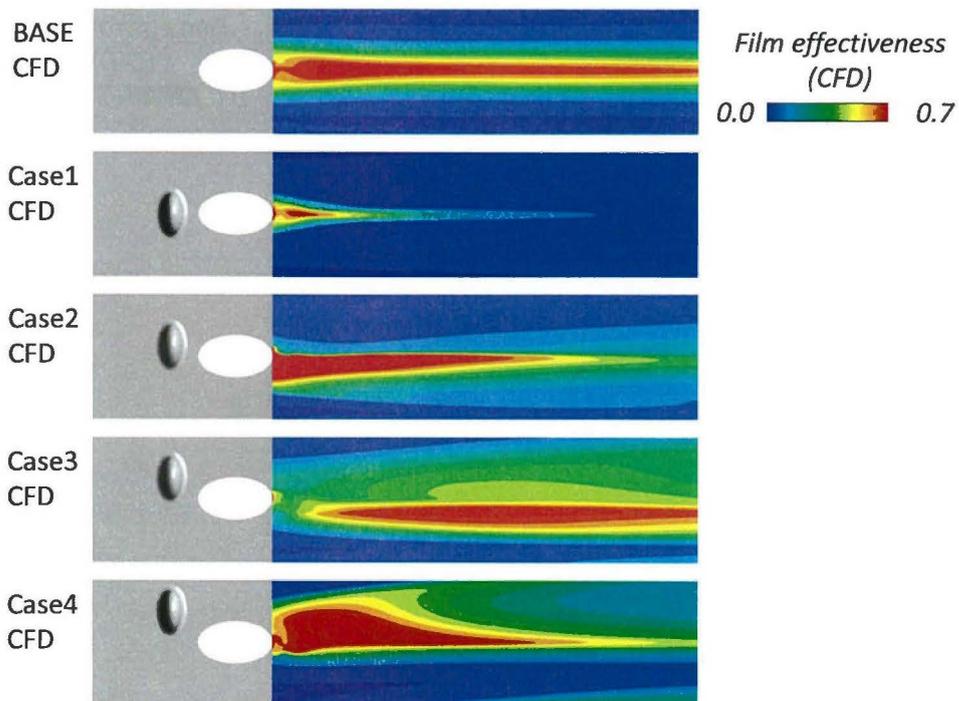
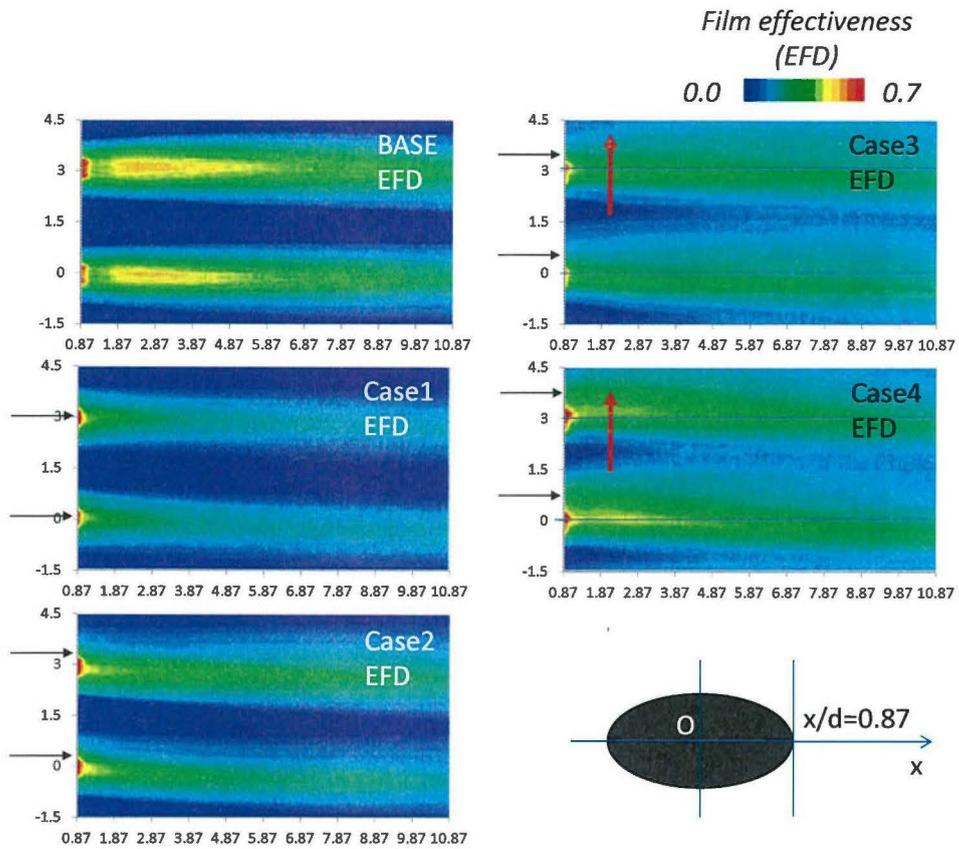


図 2.5.22 フィルム効率分布($BR=0.5$, EFD vs CFD)

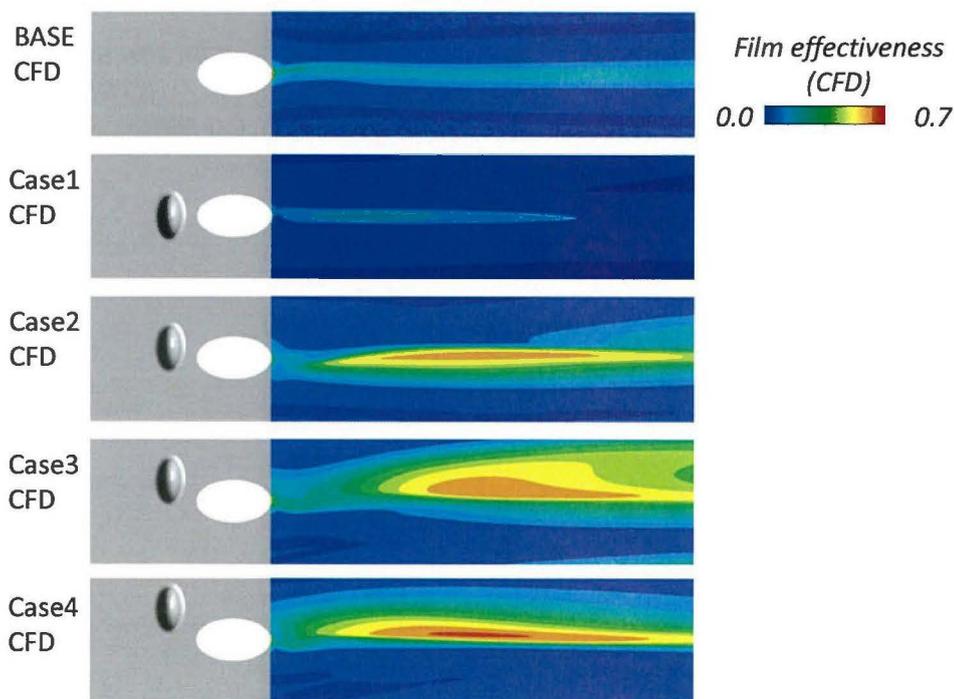
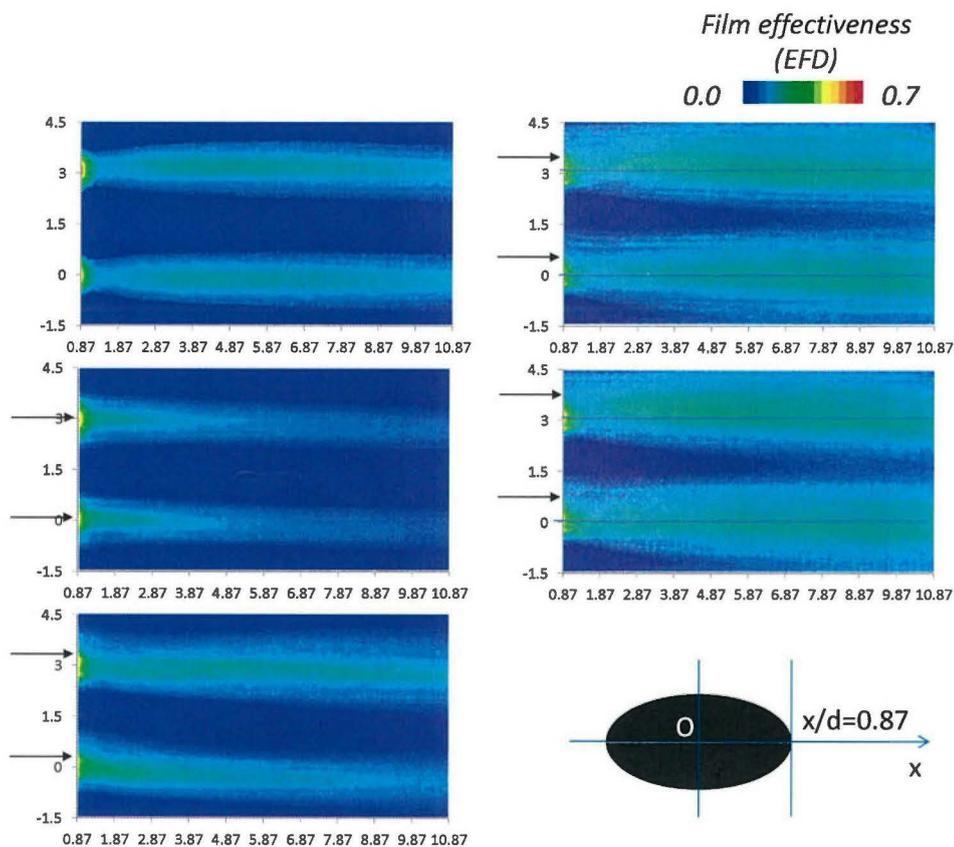


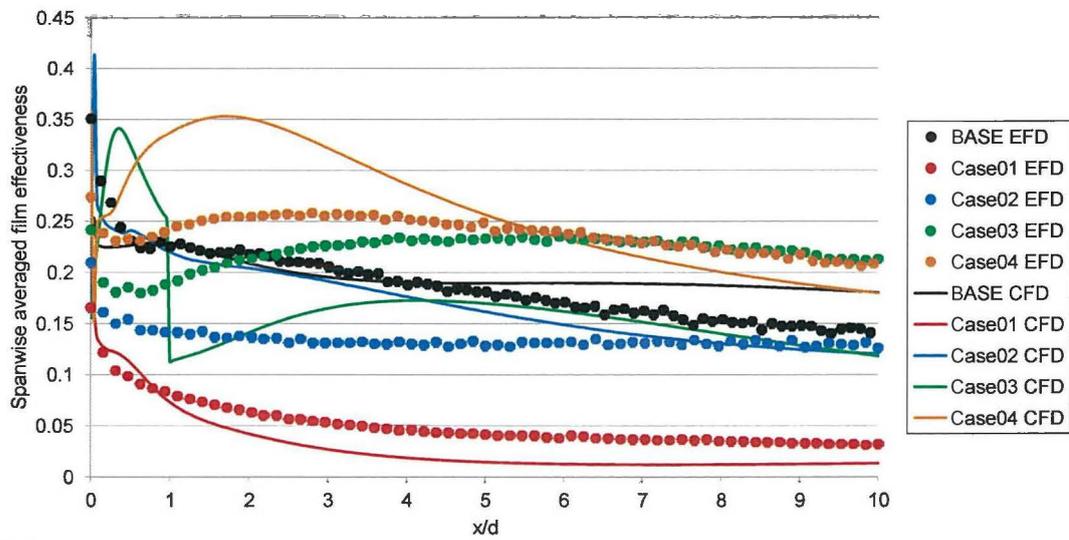
図 2.5.23 フィルム効率分布($BR=1.0$, EFD vs CFD)

2.5.8.2 RANS 解析結果（スパン方向平均・局所フィルム効率）

図 2.5. 24(a)には実験と CFD によって得られた $BR=0.5$ でのスパン方向平均フィルム効率の比較結果を示す。BASE に関しては、比較的予測精度が良く、実験結果と CFD 結果の一致が見られたが、局所的なフィルム効率が過大に評価されている影響により下流側でのスパン方向平均フィルム効率は CFD の方が高く予測されていた。Case01 に関しては、CFD によって得られたフィルム効率分布において lift-off が僅かに過大評価されている影響でフィルム効率分布は実験よりも少ない付着面積となっていたが、平均フィルム効率は実験と CFD 結果が一致していた。Case03, Case04 に関してはフィルム効率分布が実験値と定性的に一致を見せていたが、スパン方向平均フィルム効率は実験と CFD で異なる傾向を示していた。図 2.5. 24(b) には実験と CFD によって得られた $BR=1.0$ でのスパン方向平均フィルム効率の比較結果を示す。 $BR=1.0$ の場合、 $BR=0.5$ ではいくつかの条件においてスパン方向平均フィルム効率が実験値と似た傾向を示す場合が存在したが、吹き出し比が高い条件では実験値と CFD 結果の差が大きい。特に Case03 においては、下流側で二次空気の付着性が高いためにスパン方向平均フィルム効率が急上昇する傾向が見えていた。

図 2.5. 25(a)には実験と CFD によって得られた $BR=0.5$ での $z/d=0.0$ における局所フィルム効率の値を示す。局所フィルム効率に関しては、CFD 結果ではフィルム効率を全体的に過大評価している影響が表れており、全体的にセンターライン上でのフィルム効率は実験値を上回る結果となった。ただし、Case02 に関しては二次空気の lift-off が CFD 内で評価されている影響を受けて CFD と実験でのフィルム効率の結果は下流側で比較的一致した傾向を示していた。図 2.5. 25(b) には実験と CFD によって得られた $BR=1.0$ での $z/d=0.0$ における局所フィルム効率の値を示す。 $BR=1.0$ の条件においても下流側の領域において局所フィルム効率は実験値と比較的一致していたが、その他の形態に関しては CFD 結果と実験結果の差が大きく、フィルム効率の減衰が CFD では捉えられていないことが分かる。

(a) BR=0.5



(b) BR=1.0

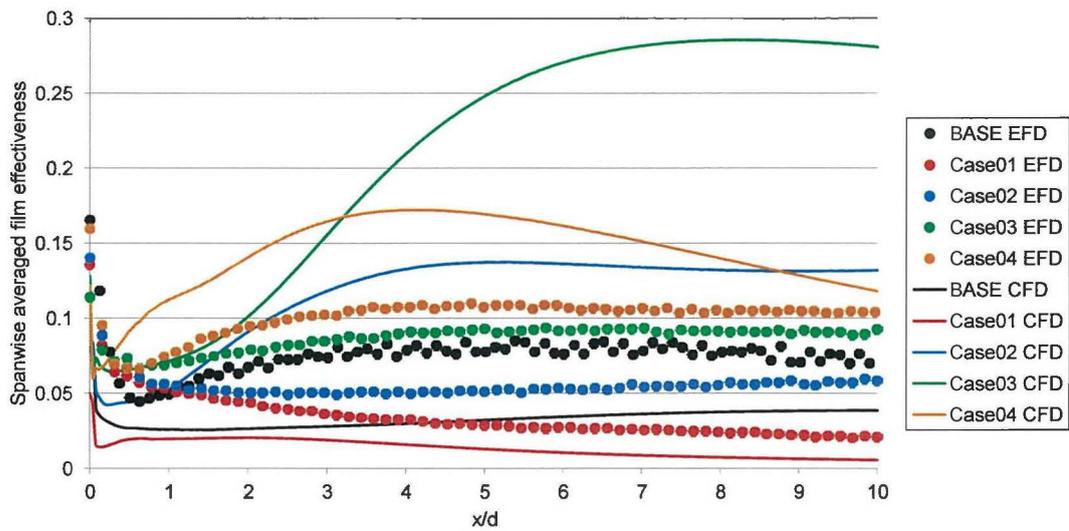
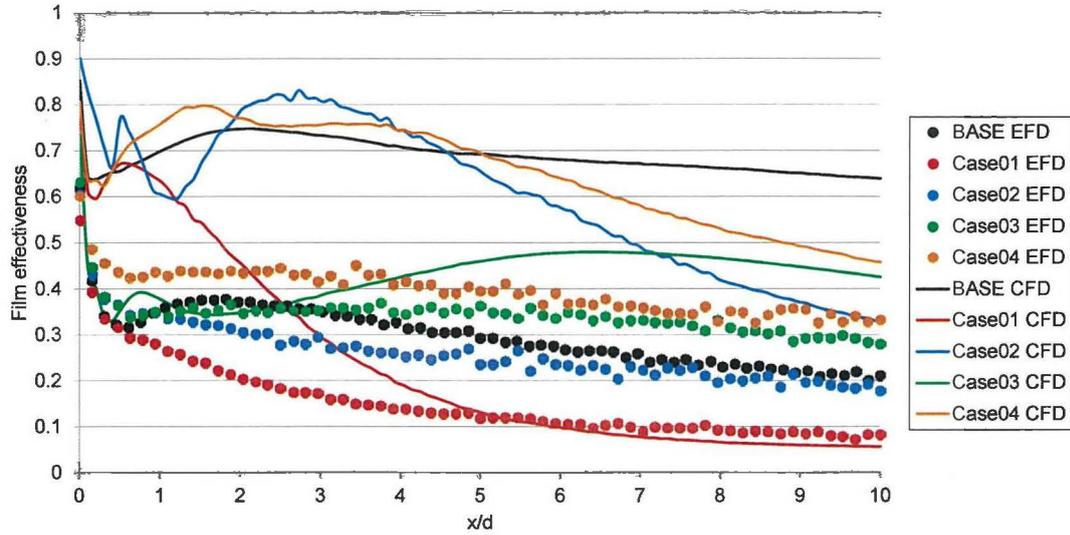


図 2.5.24 スパン方向平均フィルム効率(EFD vs CFD)

(a) $BR=0.5$



(b) $BR=1.0$

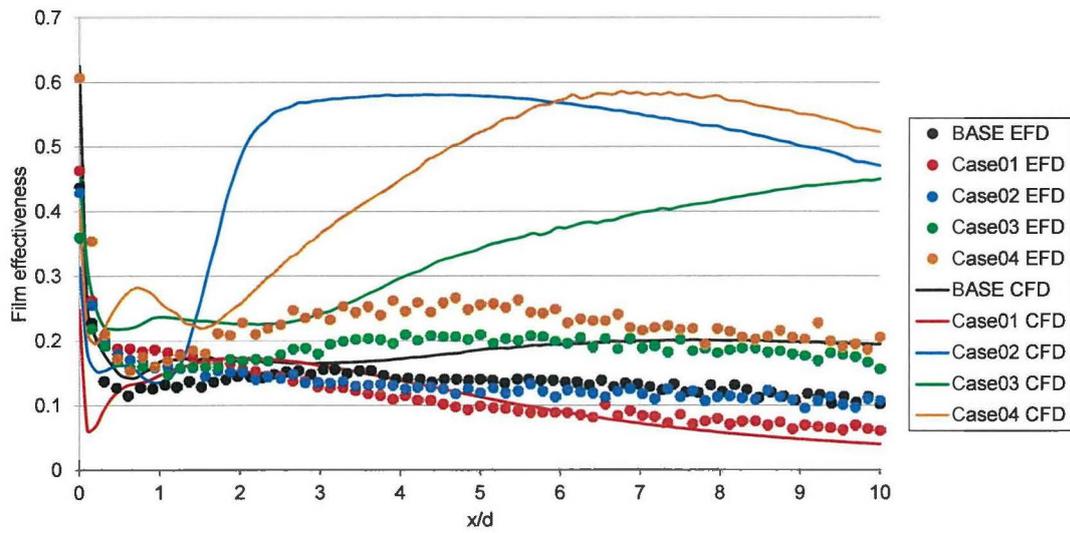


図 2.5.25 局所フィルム効率(CFD vs EFD, $z/d=0$) : (a) $BR=0.5$, (b) $BR=1.0$

2.5.8.3 RANS 解析結果（空間温度場）

図 2.5. 26 には実験と CFD によって得られた $BR=0.5$, $x/d=3.0$ での空間温度場を示す。実験と CFD 結果を比較すると、CFD よりも実験結果の方が、空間的な温度の拡散が広い面積で起こっており、下流側の領域においてフィルム効率が減衰している傾向が見られる。それに対して、CFD では、実験値と温度のコアの位置等定性的な傾向は一致しているが、温度場の減衰が予測されていないことが分かる。Case01 の温度場を観察すると、実験と CFD では両結果ともに二次空気は壁面より離れているが、CFD 結果の方が、より空間的な温度の広がりが小さくなっており、壁面付近の付着面積が実験と CFD で異なっている。Case02 ~ Case04 の結果においては、デバイスから発生した渦により一部の領域において二次空気の付着性が高くなっている様子が実験結果では観察されるが、CFD でも付着性が良い場所は予測できていることが分かる。しかし、この場合も温度の空間的な広がりは CFD で過小に評価されており二次空気の温度拡散が十分に予測されていない。

図 2.5. 27 には実験と CFD によって得られた $BR=1.0$, $x/d=3.0$ での空間温度場を示す。 $BR=1.0$ の場合においても、空間温度場内では下流側での温度の減衰は十分に予測されておらず局所的な無次元温度が高い領域が多く存在する様子が CFD 結果からは確認できる。BASE に関しては、冷却孔から吹き出した二次空気の CRVP によって、温度場のコアが 2 つに分離する様子が実験と CFD の両方で捉えられている。Case01 に関しては、 $BR=0.5$ の場合と同様に、二次空気のコアの位置は実験と CFD で同じ様子を示しているが、実験結果の方が温度の空間的な拡散が広いためにフィルム効率分布が壁面でも観察されると考えられる。デバイスを冷却孔のセンターラインに対して非対称に設置した形態に関しては、CFD の方が二次空気の付着を過大に評価している様子が確認でき、実験ではデバイスから発生する渦による二次空気の付着が $BR=0.5$ と比べると観察される領域が少ないのに対して、CFD 結果では吹き出し比が高いにもかかわらず二次空気が壁面へ付着している面積が観察される。

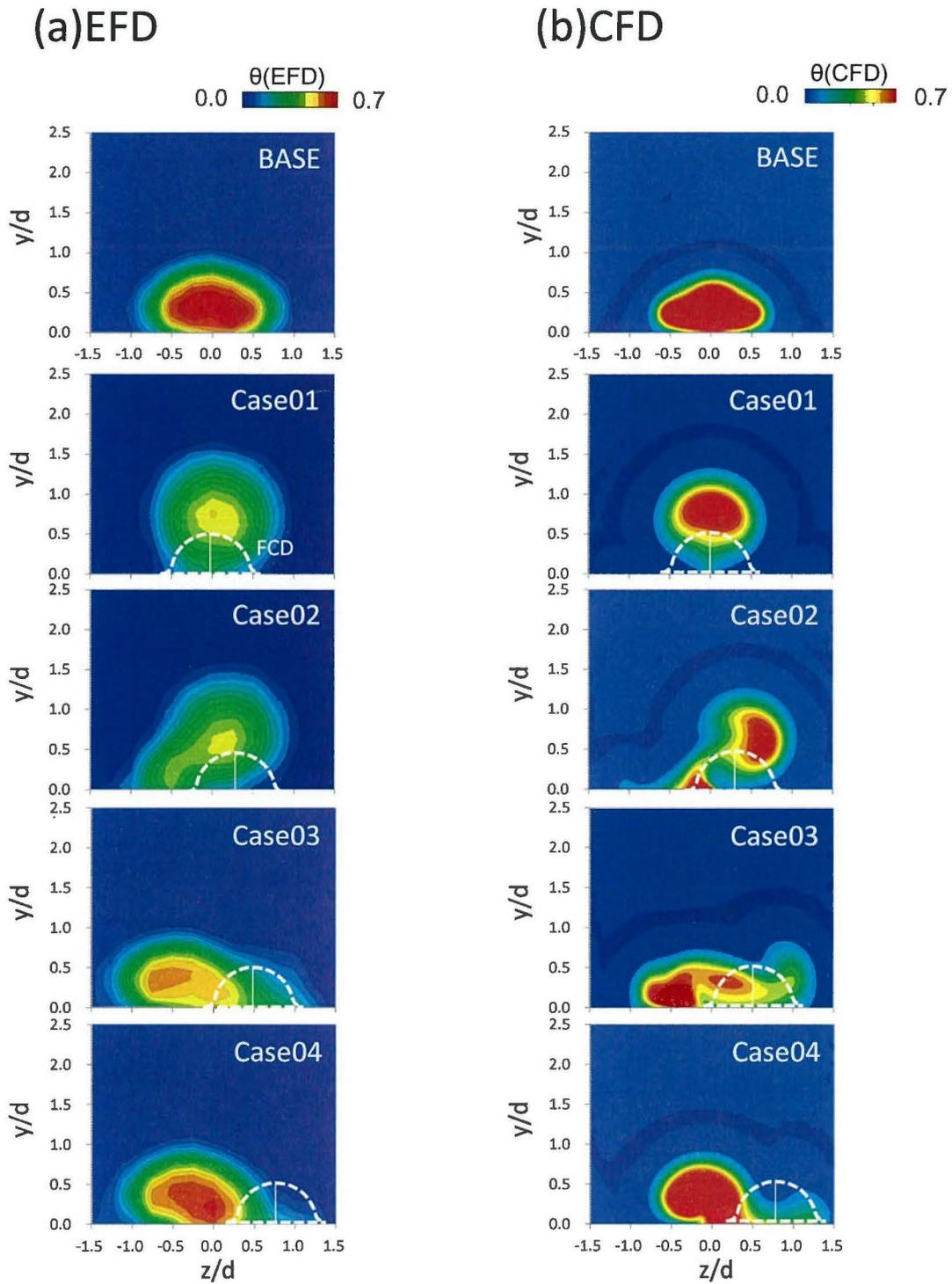


図 2.5.26 空間温度場($x/d=3.0$, $BR=0.5$)

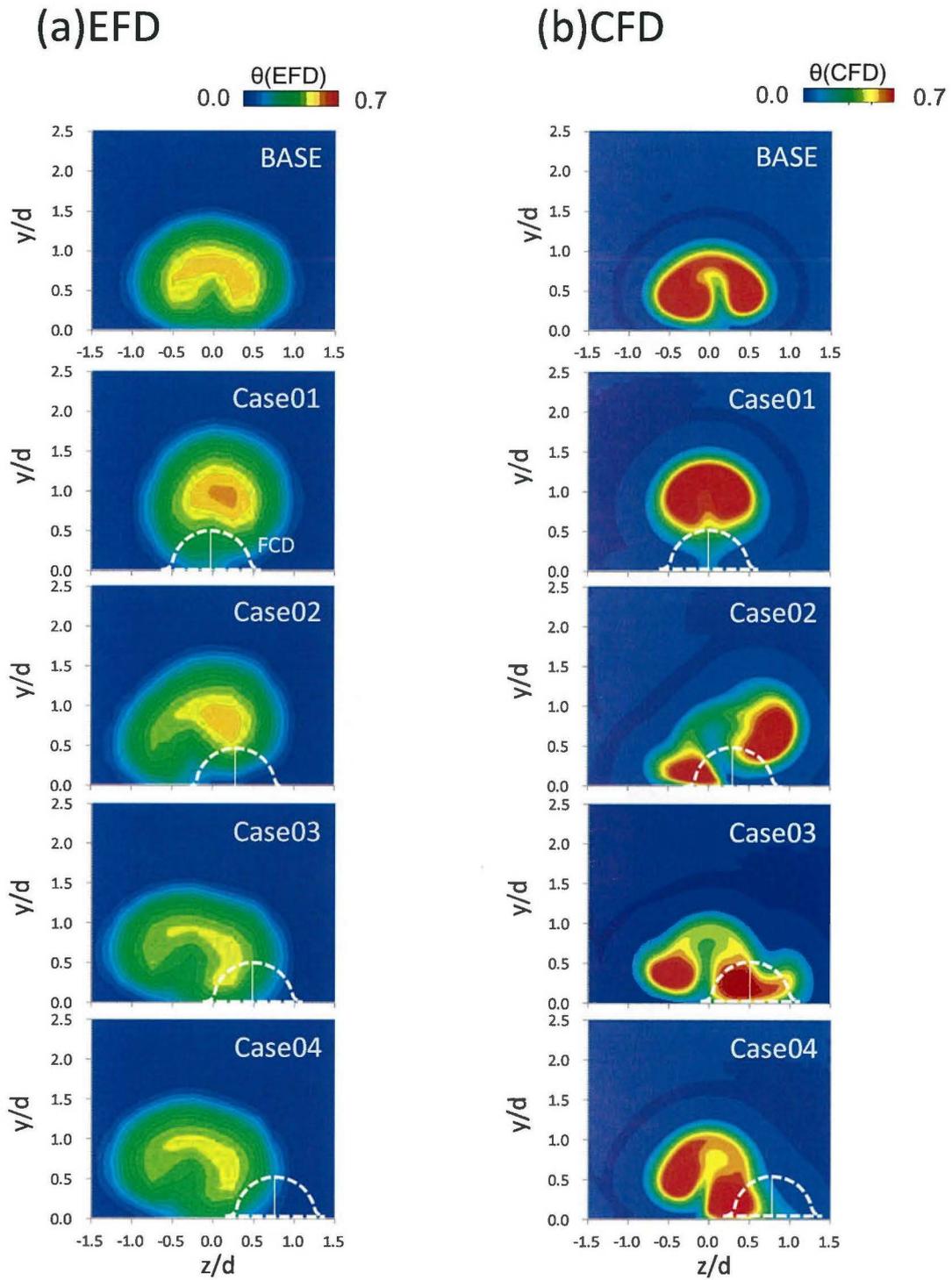


図 2.5.27 空間温度場($x/d=3.0$, $BR=1.0$)

2.5.8.4 渦構造

図 2.5.28 には CFD によって観察された、渦構造を示す。図中には Q 値の等値面が表されており、渦度で色づけされている。下流側の平面は $x/d=3.0$ を表しており、空間温度場のコンター図を描かせた。ダクト底面には壁面フィルム効率のコンターを描かせている。BASE の場合渦構造は冷却孔の内部から発生しており、kidney vortessg が次第に形成されている様子が観察される。吹き出し比が高くなる場合は、冷却孔から発生する渦構造も大きくなっており下流側の領域内において CRVP は大規模化する。

図 2.5.29 には CFD によって得られた、デバイス周りの流れ（二次空気吹き出し無）において Q 値の等値面を描かせた図を示す。デバイス周りの流れに関しては、冷却孔を主流が通過する際に境界層が巻き上げられて形成される馬蹄形渦、デバイスのセンターライン内で発生する渦のペアが CFD 結果においては観察された。今回は CFD にこのような渦が観察されたが、実際の時間平均流れ場においては図 2.5.21 の結果より馬蹄形渦と考えられる渦のみが計測では捉えられている。

図 2.5.30 には CFD によって観察された Case01 における渦構造を示す。Case01 においては、デバイスの直後に冷却孔が位置しているが、冷却孔から吹き出した二次空気の CRVP と見られる渦構造が BASE に比べると大規模化しており、これによって Case01 ではどの吹き出し比条件においても壁面フィルム効率が低い値を示したと考えられる。

図 2.5.31 には CFD によって観察された Case02 における渦構造を示す。Case02 の場合、デバイスから発生した渦構造と冷却孔から発生した CRVP が干渉することにより二次空気が冷却孔のセンターラインに対して非対称になっていることが分かる。さらに、デバイスから発生した馬蹄形渦によって二次空気が壁面へ押し下げられている領域が存在することが分かる。

図 2.5.32、図 2.5.33 には CFD によって観察された Case03、Case04 での渦構造を示す。Case03、Case04 の場合、冷却孔から吹き出した CRVP はデバイスから発生した渦構造と Case02 よりも干渉してはいないが、デバイスから発生した馬蹄形渦が CRVP の側面に形成されることにより二次空気の付着性が高くなっている領域が存在する。

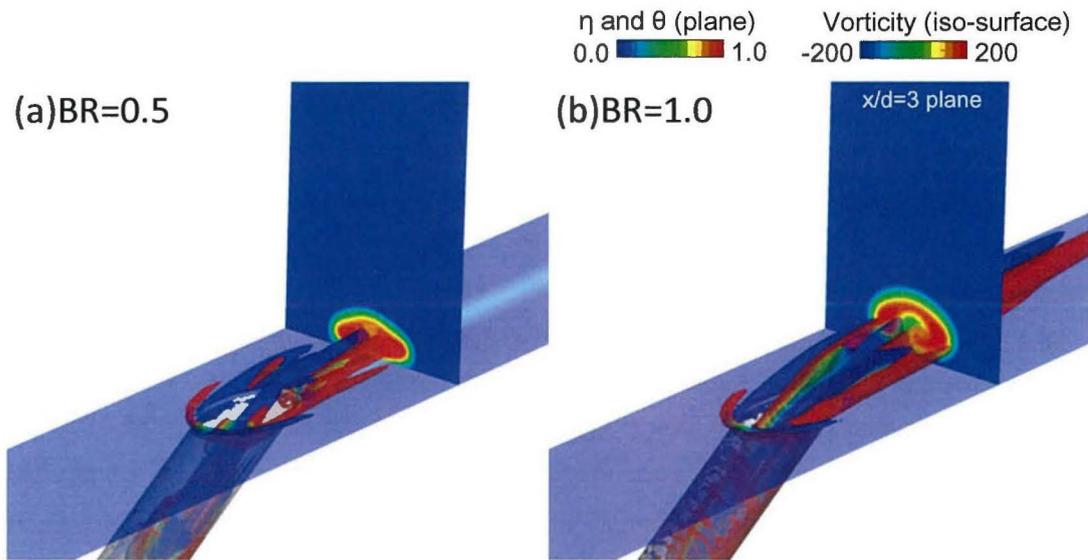


図 2.5.28 CFD 結果 (BASE, RANS, 渦構造とフィルム効率) : (a)BR=0.5, (b)BR=1.0

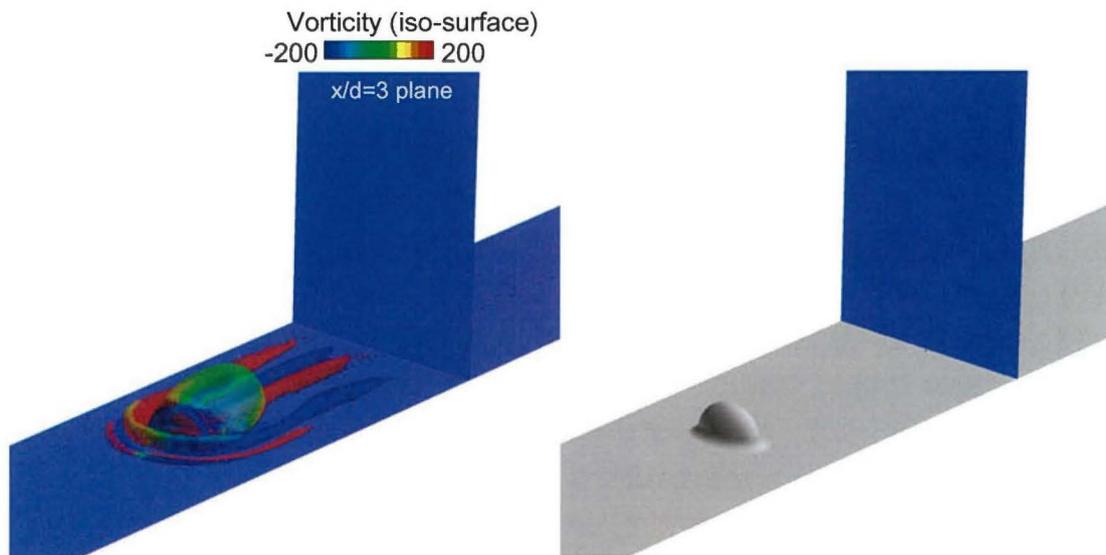


図 2.5.29 CFD 結果 (Case01, RANS, 渦構造とフィルム効率, BR=0.0)

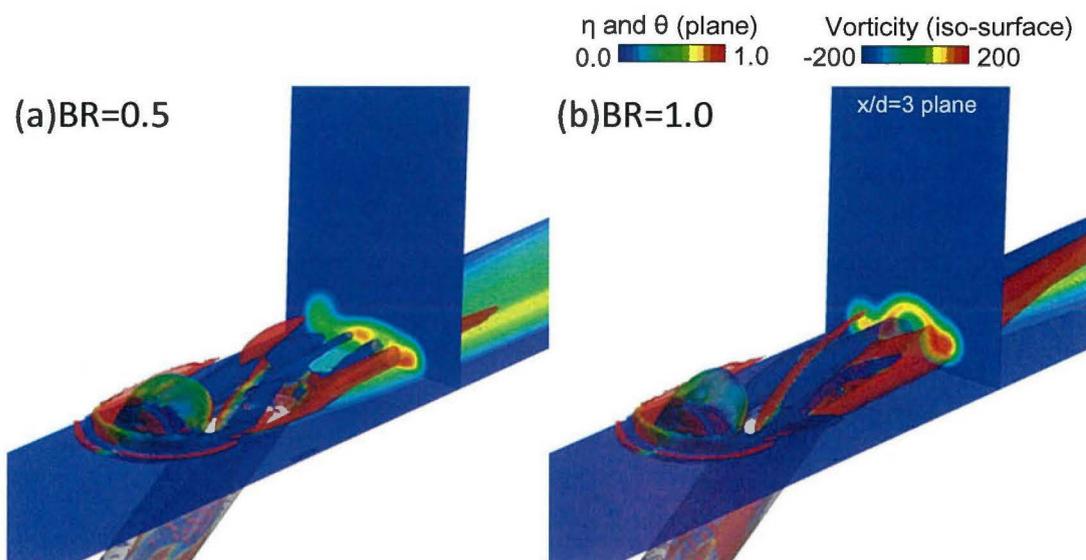


図 2.5.32 CFD 結果 (Case03, RANS, 渦構造とフィルム効率) : (a) $BR=0.5$, (b) $BR=1.0$

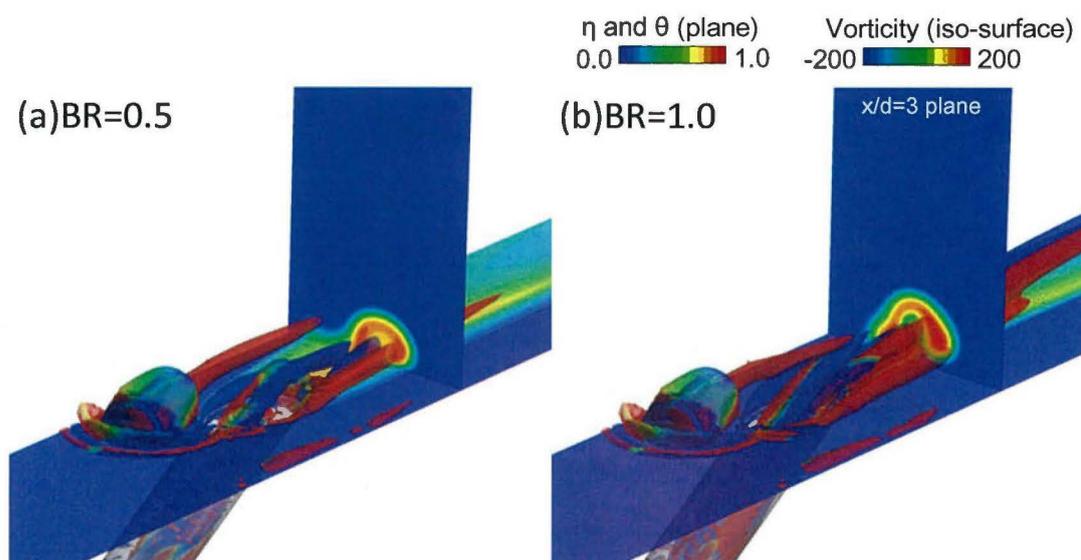


図 2.5.33 CFD 結果 (Case04, RANS, 渦構造とフィルム効率) : (a) $BR=0.5$, (b) $BR=1.0$

2.5.8.5 LES 解析結果（瞬時解）

図 2.5. 34 には LES 解析の瞬時解を示しており、図 2.5. 33 等と同様に渦構造を可視化したものである。RANS の解析結果や、実験結果においては冷却孔の下流側の領域において CRVP が確認されるが、これは時間平均場において抽出される渦構造であり、その形成機構は非定常の渦の干渉に由来するとされている⁽¹⁾⁽²⁾。今回の LES 解析においては非定常な渦構造の観察を行うために瞬時解を用いることとした。図 2.5. 34(a)には、BASE, BR=0.5 での瞬時の渦構造を示している。BASE における瞬時の渦構造においては、冷却孔の上流側で RANS と同様に馬蹄形渦の発生を確認することができる。一方で冷却孔出口領域にはヘアピン渦が周期的に放出する様子が観察され、このヘアピン渦が時間平均流れ場においては CRVP として抽出されることが分かった。図 2.5. 34(b)にはデバイスを設置し、二次空気の吹き出しを行わない場合での瞬時の流れ場を示す。デバイスを設置した場合には、デバイスの上流側で境界層が巻き上げられるために馬蹄形渦が発生している。さらにデバイスの下流側では主流がデバイスを通過する際に剥離するのに伴って剥離せん断層内で発生するヘアピン渦が確認できた。図 2.5. 34(c)には Case01 での渦構造を示す。Case01 では冷却孔から発生するヘアピン渦が大規模化しており、時間平均的には下流側で CRVP が大規模化している流れ場として捉えられていると考えられる。図 2.5. 34(d)には Case04 における渦構造をしめす。この場合は冷却孔からはヘアピン渦が発生しているが、下流側の領域においてはデバイスから発生するヘアピン渦も隣に存在している。今回はこのヘアピン渦の存在により下流側での二次空気の付着性が向上している領域が存在すると考えられる。

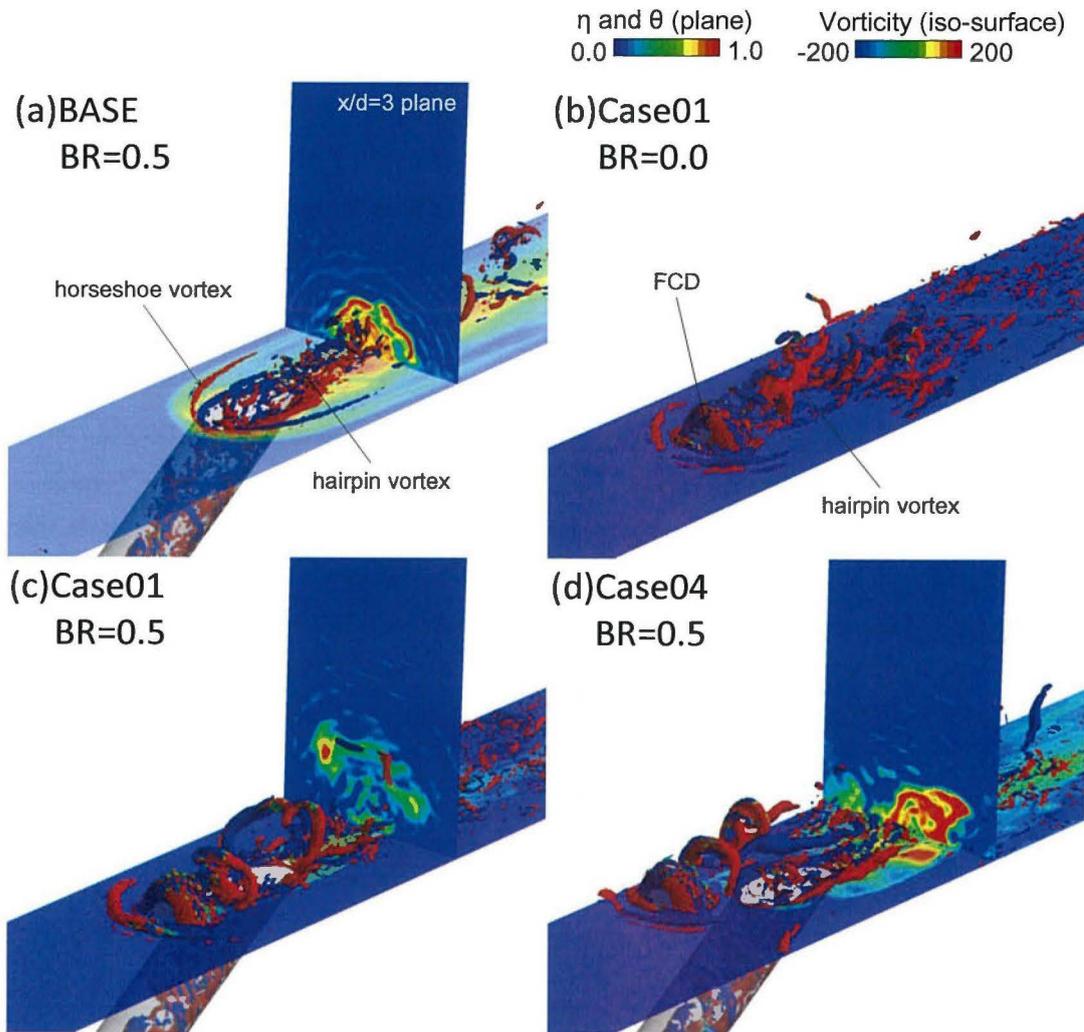


図 2.5.34 CFD 結果 (LES 瞬時解, 渦構造とフィルム効率)

2.5.9 可視化計測結果

本研究ではLDVでは捉えきれないような流れ場や、LESとの比較を行う目的で可視化計測を実施した。今回は、デバイス周囲の流れ場を観察するために主流と二次空気の両方にトレーサー粒子を混入する形で実験を行っており、 $BR=0.0$ と $BR=0.5$ の条件においてのみ計測を行った。これは、 $BR=1.0$ の条件においては二次空気の全圧が高いために、二次空気中にトレーサー粒子が入り込まなかったためである。

図 2.5. 35 には Case01, $BR=0.0$ における $z/d=0.0$ での流れの可視化計測結果を示す、この実験条件においては主流にトレーサー粒子を混入している。可視化計測の結果、主流とデバイスが通過する際には主流は剥離を起こし、デバイスの下流側の領域において対流領域(A)が形成されていることが分かった。さらに、デバイス上側で剥離した主流は剥離せん断層内で周期的に渦を下流側に放出しており、LESで観察したヘアピン渦を下流側に周期的に放出する挙動が観察された。

図 2.5. 36 には BASE における可視化計測結果を示す。本計測では二次空気のスパン方向への拡散を観察するために $z/d=0.0$ と $z/d=-0.75$ の2平面について可視化を行った。ここで、二次空気に吹き出しを伴う場合は、主流と二次空気にトレーサー粒子を混入させるために、二次空気の存在しているよう域は、色が濃い領域として可視化される。 $z/d=0.0$ の計測平面の場合、冷却孔から吹き出した二次空気の挙動は色の濃い領域として観察できる。この面内では冷却孔から二次空気が吹き出す際に冷却孔出口のエッジ部分において二次空気が僅かに剥離する様子が確認できる(B)。また、冷却孔から吹き出した二次空気は主流との速度勾配の影響で、主流と二次空気のせん断層においてはK-H不安定が発達した流れ場となっている。 $z/d=-0.75$ の計測平面の場合、BASEではスパン方向へ二次空気が拡散し難いために二次空気と思われる色の濃い領域が確認できなかった。

図 2.5. 37 には $z/d=0.0$ の計測面内において、BASEとCase01の流れ場を比較した結果を示す。Case01の場合、図 2.5. 35にも示したように、デバイスの下流側では低速度の対流領域が形成されるために、この位置に吹き出しを行うCase01の場合では局所的な吹き出し比が高くなり、冷却孔出口の領域で二次空気が主流に対して貫通する挙動が見える。さらに、デバイスを通る際に剥離した主流においては、剥離せん断層内に周期的な渦放出を伴うため下流側でこの渦が二次空気と干渉し、主流と二次空気のせん断領域内での不安定性が増大した。

図 2.5. 38 には $z/d=0.0$ の計測面内において、BASEとCase04の流れ場を比較した結果を示す。冷却孔のセンターライン上の流れ場に関してはデバイスの有無に関わらず流れ場はほぼ一致しており、デバイスの効果はこの領域内には表れていないことが分かる。

図 2.5. 36 には $z/d=-0.75$ の計測面内において、BASEとCase04の流れ場を比較した結果を示す。この面内では、BASEにおいては二次空気の存在が確認できなかったが、一方でCase04に関しては二次空気の存在と、壁面へ付着しているのを確認できる。この面内では二次空気が存在しているために、二次空気はスパン方向へ拡散しているが、デバイスを通る

主流の剥離せん断層内に発生する渦と、二次空気が干渉することで不安定性の高い流れ場となっており、主流と二次空気の混合は激しくなっていると考えられる。

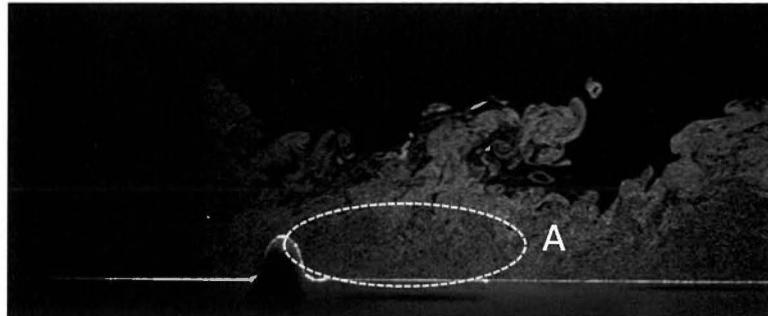
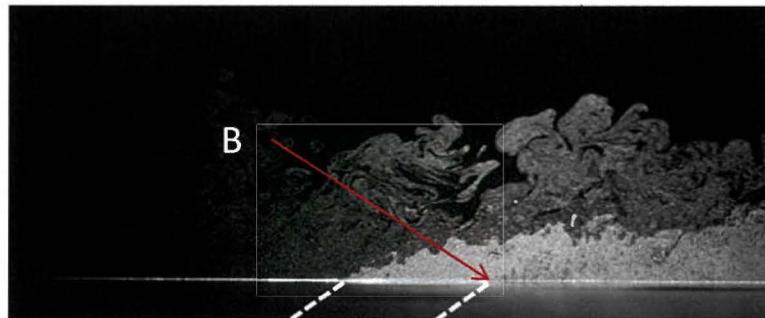


図 2.5.35 可視化計測結果 (Case01, $BR=0.0$, $z/d=0.0$)

(a) $z/d=0.0$ plane



(b) $z/d=-0.75$ plane

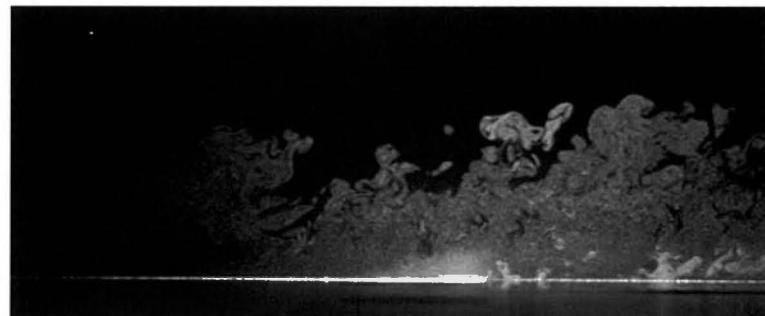
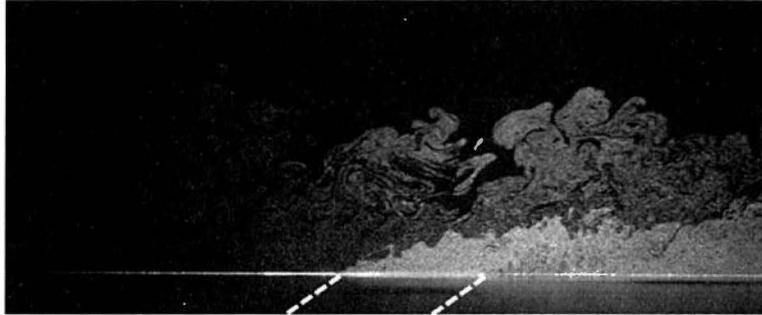


図 2.5.36 BASE における可視化計測 : (a) $z/d=0.0$, (b) $z/d=-0.75$

(a)BASE



(b)Case01

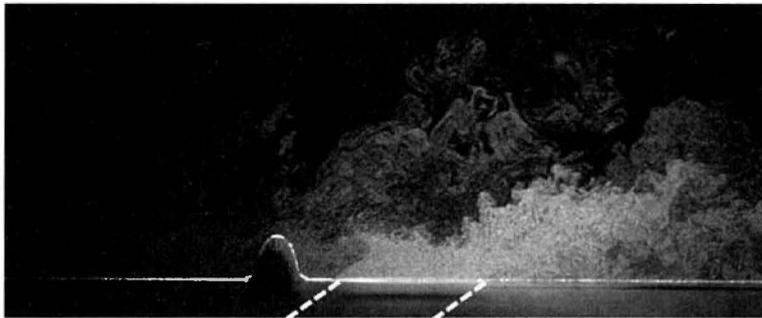
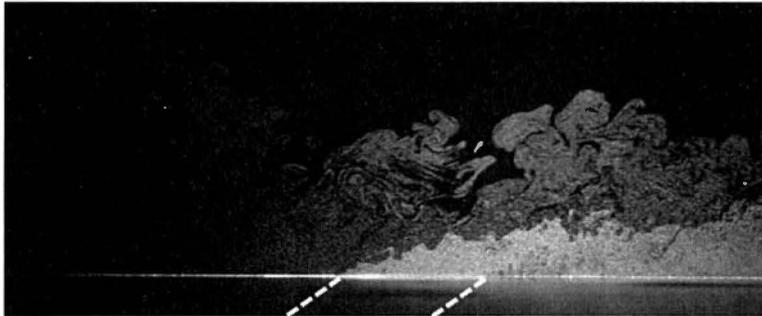


図 2.5.37 BASE vs Case01 ($z/d=0.0$)

(a)BASE



(b)Case04

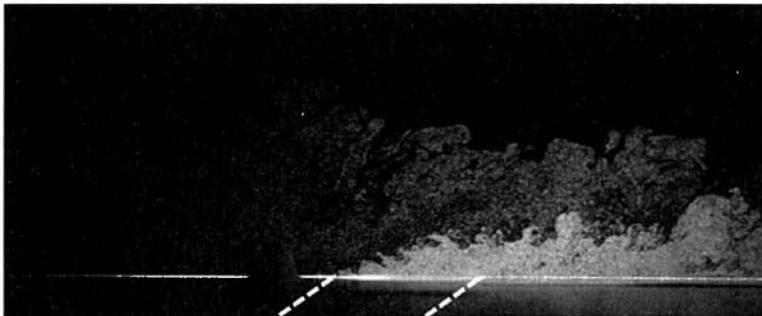


図 2.5.38 BASE vs Case04 ($z/d=0.0$)

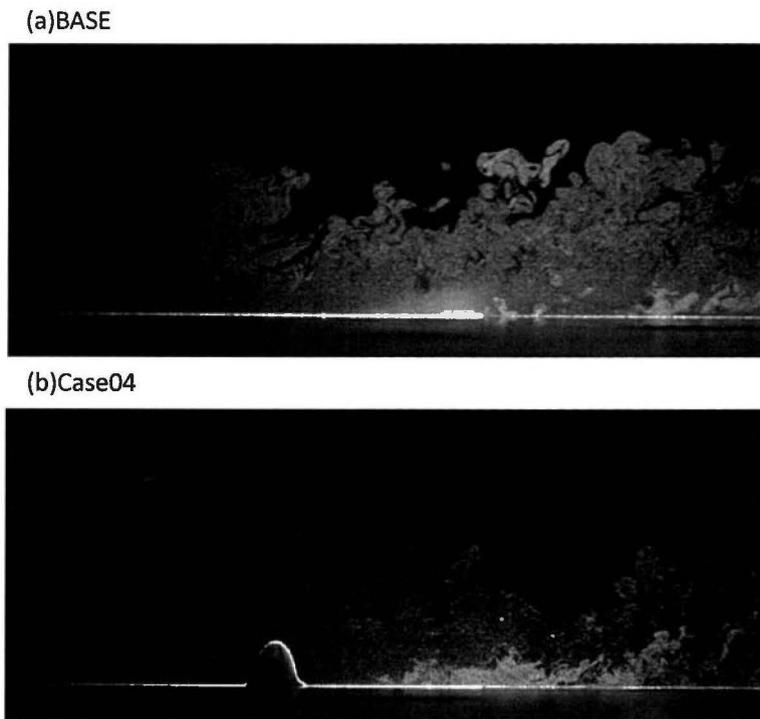


図 2.5. 39 BASE vs Case04 ($z/d=-0.75$)

参考文献 (2.5 節)

- (1) Lim, T. T., New, T. H. and Luo, S. C., 2001, "On the Development of Large-Scale Structure of a Jet Normal to A Cross Flow", *Physics of Fluids*, 13-3, pp. 770-775.
- (2) Tyagi, M. and Acharya, S., 2003, "Large Eddy Simulation of Film Cooling Flow from An Inclined Cylindrical Hole" *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 125, pp734-742.

2.6 本章のまとめ

本節では比較的単純形状の流れ制御デバイスを冷却孔の上流に設置することで流れ制御を試みた結果、以下の知見を得た。

(1) 流れ制御デバイスの三次元化

- 二次元型と三次元型の流れ制御デバイスを比較すると、二次元型の流れ制御デバイスの方が冷却面積が広がった
- 二次元型、三次元型共に、冷却孔下流領域では剥離領域が形成されるが、二次元型の流れ制御デバイスの方が、剥離領域が大規模であるため、スパン方向のフィルム効率分布は広がる
- 二次元型の流れ制御デバイスでは、冷却面積が広がる一方で、空力損失が増大する問題も抱えている
- 三次元の流れ制御デバイスには、上流側で発生する馬蹄形渦に CRVP の制御能力が存在しており、CRVP と逆回転の渦構造が lift-off の抑制効果を有している。
- デバイスの下流側エッジでは流れの剥離により、剥離せん断層内で非定常な渦構造を形成する。これは、二次空気と干渉することで、不安定性の増大を招き、下流領域でのフィルム冷却効率の早期減衰を招いてしまう

(2) Single Flow Control Device の効果

- Single Flow Control Device の下流領域では、非定常な剥離渦が生成されており、CRVP との干渉位置が変化することでフィルム効率が変わる
- Single Flow Control Device が冷却孔のセンターライン上に存在する場合、時間平均的に、CRVP の規模が大きくなり、lift-off が促進されてしまうため、フィルム効率はデバイスを設置しない場合よりも低下する
- Single Flow Control Device を冷却孔のセンターラインに対して非対称に設置すると、CRVP の片方の渦構造を制御することが可能であり、二次空気の壁面付着性が増加した。これは、時間平均的に、CRVP の脇に CRVP とは逆回転の渦を発生させることが可能であるため、渦の起源はデバイス下流で発生する非定常なヘアピン渦である
- デバイスの高さは、デバイスから発生する渦の規模に影響を及ぼす重要なパラメータであり、デバイスの高さが高い方が、CRVP の制御能力が高い。高さのオーダーについては、過去の研究と同様に $1d$ を上回らない値を使用するのが好ましいと考えられる。

