

5.6 数値解析結果

5.6.1 ベースデバイス翼の流れ場(BR=0.0)

CFD 結果を論ずるのに際して、CFD データを観察する計測平面・線の位置を図 5.6. 1 に示す。本研究では、解析翼の壁面法線方向に面や、ラインを作成することで空間内のデータ抽出を行っている。負圧面側には 16 箇所、正圧面側には 12 箇所データ抽出点を設けた。各面、ラインの壁面法線方向の高さは 10mm であり、その位置に関しては以下の表 5.6. 1 に示す。

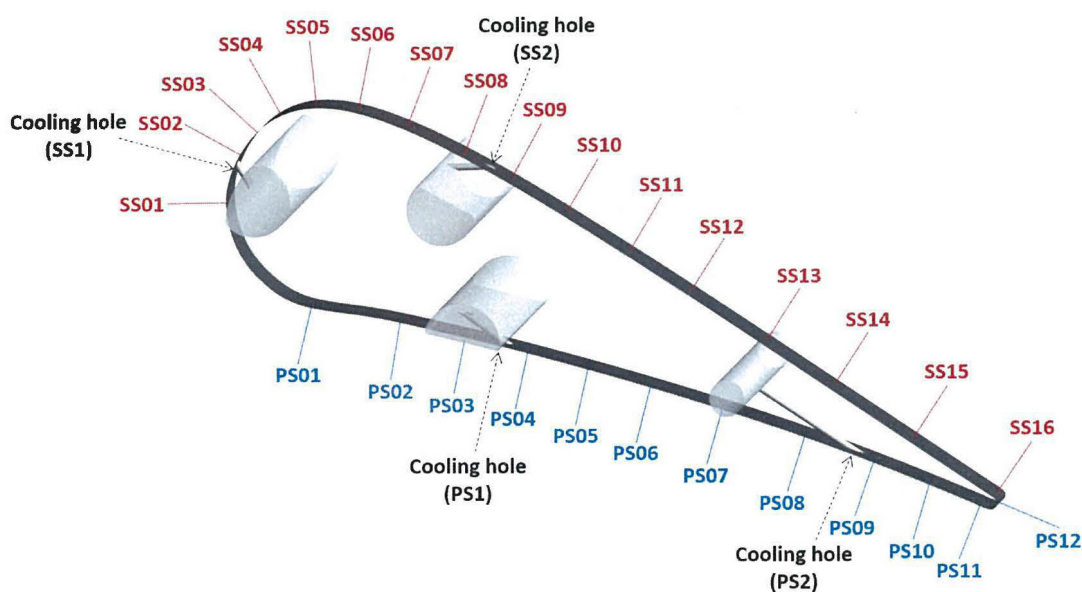


図 5.6. 1 データ取得面(線)位置

表 5.6. 1 壁面法線方向データ抽出位置

計測箇所 名称	$S_s/S_{s,max}$	計測箇所 名称	$S_p/S_{p,max}$
SS01	0.07663	PS01	0.07749
SS02	0.12533	PS02	0.19206
SS03	0.15497	PS03	0.27584
SS04	0.18417	PS04	0.35800
SS05	0.22216	PS05	0.43718
SS06	0.26515	PS06	0.52127
SS07	0.31679	PS07	0.61568
SS08	0.37754	PS08	0.72548

SS09	0.39956	PS09	0.81860
SS10	0.49432	PS10	0.89522
SS11	0.56694	PS11	0.96360
SS12	0.63950	PS12	0.98924
SS13	0.72851		
SS14	0.80807		
SS15	0.90009		
SS16	0.99782		

図 5.6. 2～図 5.6. 4 には、各系側面内での流れ方向渦度を示している。図中に示されている供試翼は、全ての冷却孔上流にペース型のデバイスを取り付け、吹き出しを行わなかった場合の計算結果（冷却孔出口は壁面境界で塞いである）である。また、流れ方向渦度は以下の式で定義を行った。

$$\text{Streamwise Vorticity} = \frac{\nabla \times \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} \quad (5.6.1)$$

各面での渦度を観察すると、各面では正と負の渦度が存在しており、Device base vortex が発生していることがわかる。各渦度の強さに関しては、冷却孔 PS1 の上流に位置しているデバイスから発生している渦に関しては、比較的弱く、流れ制御の能力が低くなっていると考えられる。ただし、上記の結果は全ての冷却孔上流にデバイスを取り付けている場合の計算結果である。この場合、下流側の冷却孔 (SS2, PS2) に関しては上流側の冷却孔 (SS1, PS1) からの渦度と干渉して、渦度が強められる可能性がある。そこで、上流側の冷却孔を取り除いた計算も同時に行った。図 5.6. 5 には、SS2 のみにデバイスを設置した場合の流れ方向渦度を示している。重ね合わせの効果を図 5.6. 3 と比較すると、上流側にデバイスを設置した場合には、SS2 のデバイスから発生した渦の脇に、もう一つの渦ペアが存在しているのが分かる。一方で、SS2 のみにデバイスを設置した場合には、SS2 のデバイスから発生した Device base vortex の脇に存在するカウンター渦がわずかに観察することができた。図 5.6. 6 には、PS2 の上流にのみデバイスを設置した計算結果を示している。PS1 から発生した渦度に関しては、図 5.6. 4 で観察したように、比較的 Device base vortex が弱いために、PS1 上流のデバイス設置の有無で渦構造はほとんど変化が見られなかった。

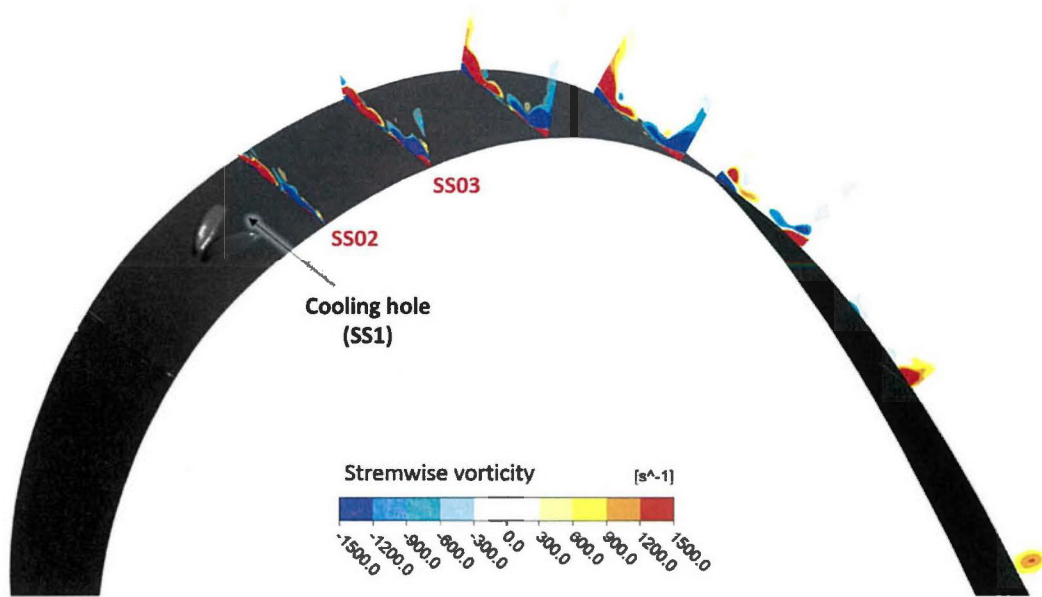


図 5.6.2 流れ方向渦度（負圧面前縁領域）

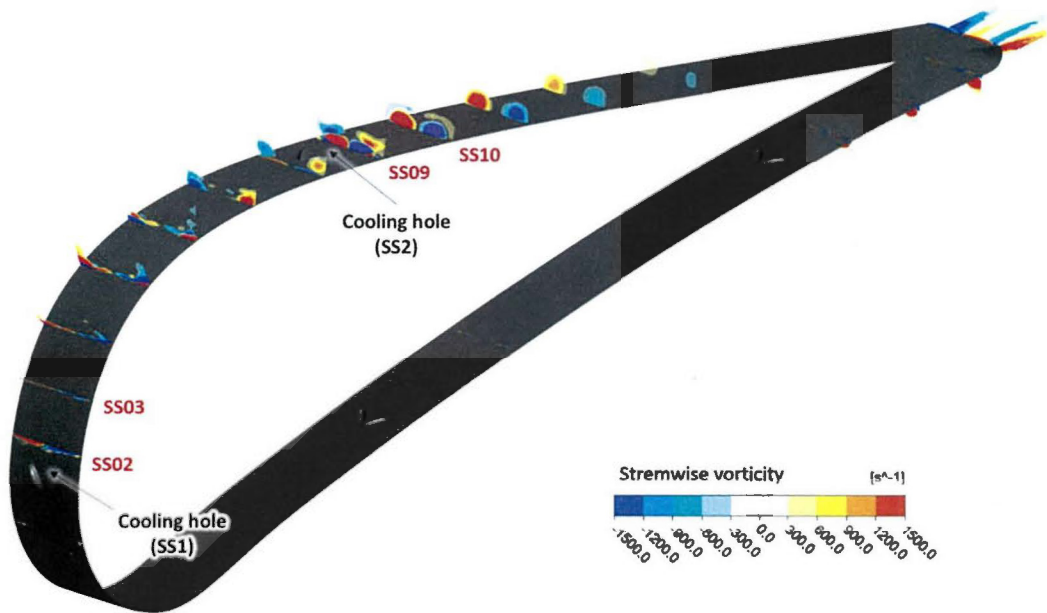


図 5.6.3 流れ方向渦度（負圧面後縁領域）

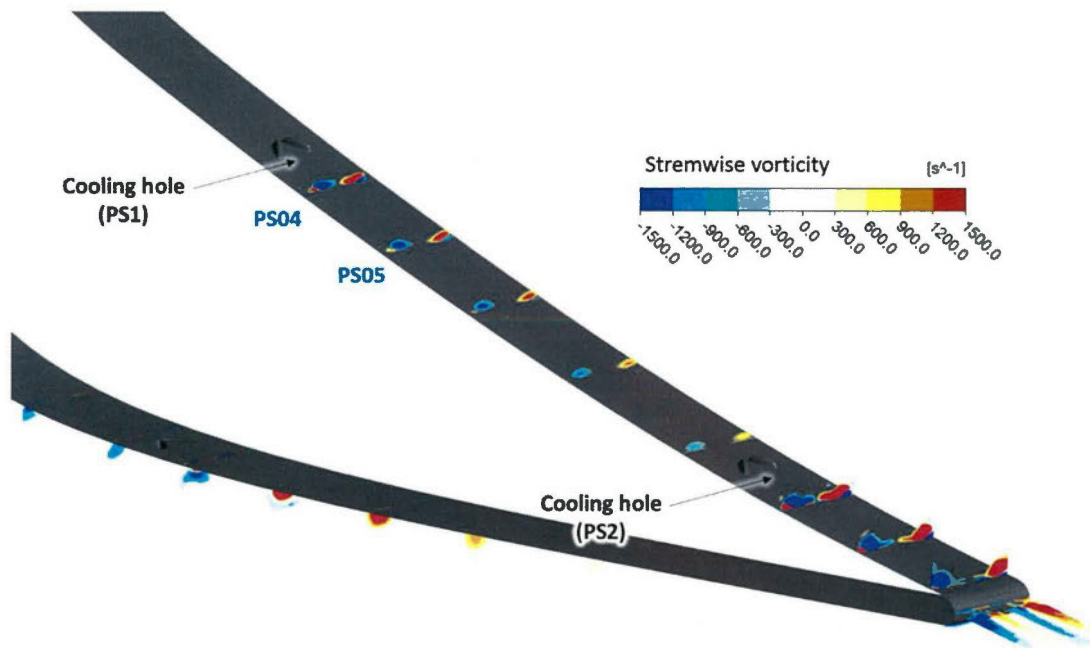


図 5.6.4 流れ方向渦度（正圧面領域）

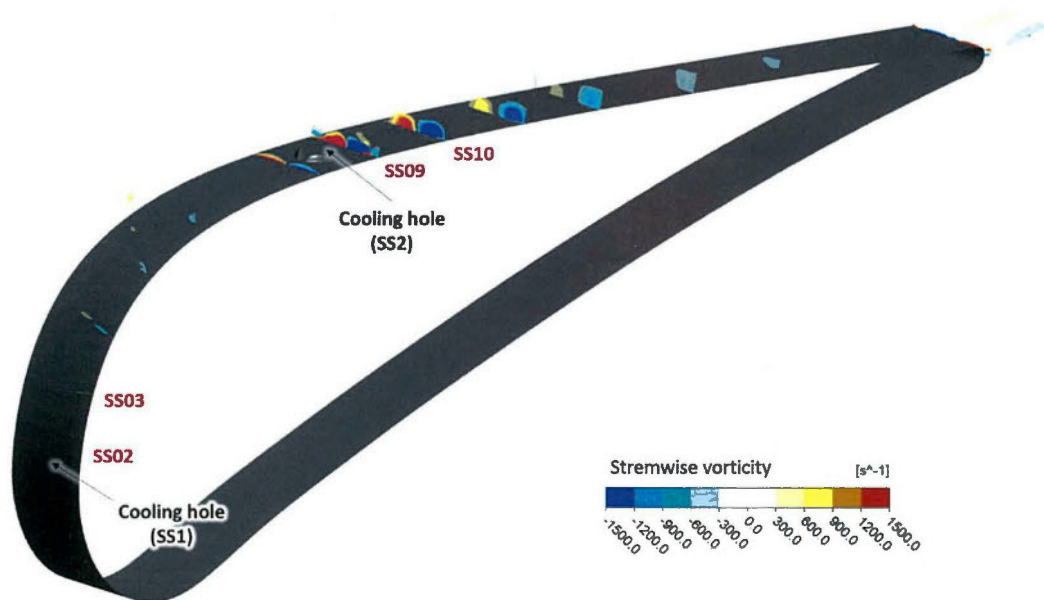


図 5.6.5 流れ方向渦度（SS2 のみにデバイスを設置した計算）

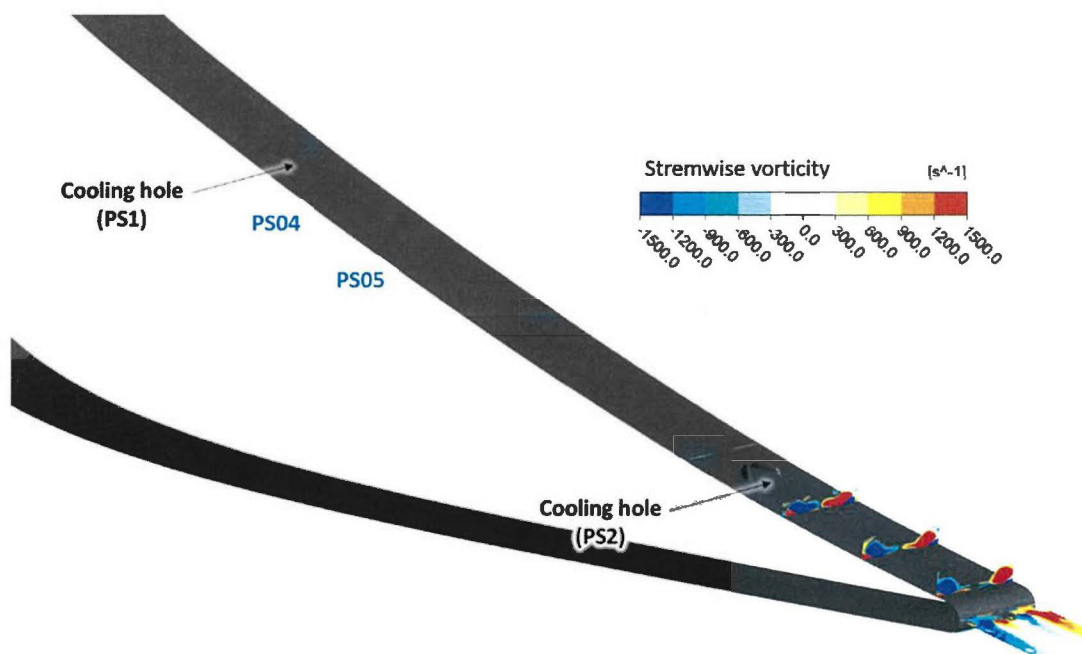


図 5.6.6 流れ方向渦度 (PS2 のみにデバイスを設置した計算)

図 5.6. 7～図 5.6. 9 には、各計測面における乱流運動エネルギー分布を示す。負圧面前縁領域では、デバイス設置の有無によって乱流運動エネルギーの分布にほとんど差異は見られなかった。一方で、負圧面の SS2 冷却孔下流に関しては分布に差異が見られており、SS09 より下流の領域では、乱流運動エネルギーの高い領域が、2 つに分離する様子が観察できる。2 つペアになっているデバイスの中心の隙間が空いている領域の下流では、逆に乱流運動エネルギーが低下している様子も同時に観察できた。デバイスを設置していない条件に関しても、SS06 より下流の領域では乱流運動エネルギーの分布が増加している様子が見られる。図 5.6. 10 には、デバイスを設置していない条件での Q 値の等値面を示している。SS06 より下流の領域では、乱流運動エネルギーの増加と共に、より複雑な渦構造になっている。この領域では、図 5.6. 11 の C_p 分布に示されるように負圧面の C_p ピーク値であり、翼面上で減速を開始する位置である。この位置では、渦崩壊が起こっており、乱流運動エネルギーが増加したと考えられる。

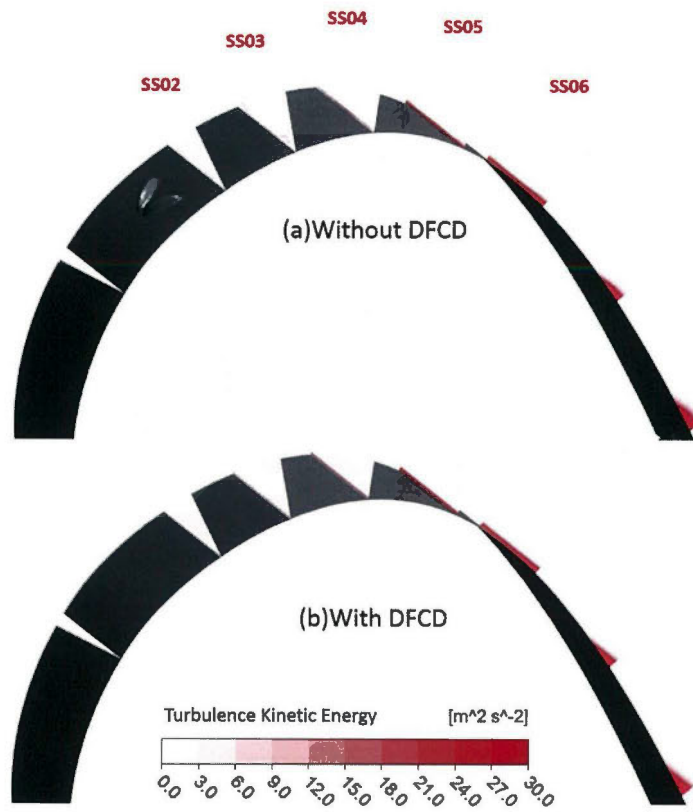


図 5.6.7 乱流運動エネルギー分布（負圧面前縁領域）

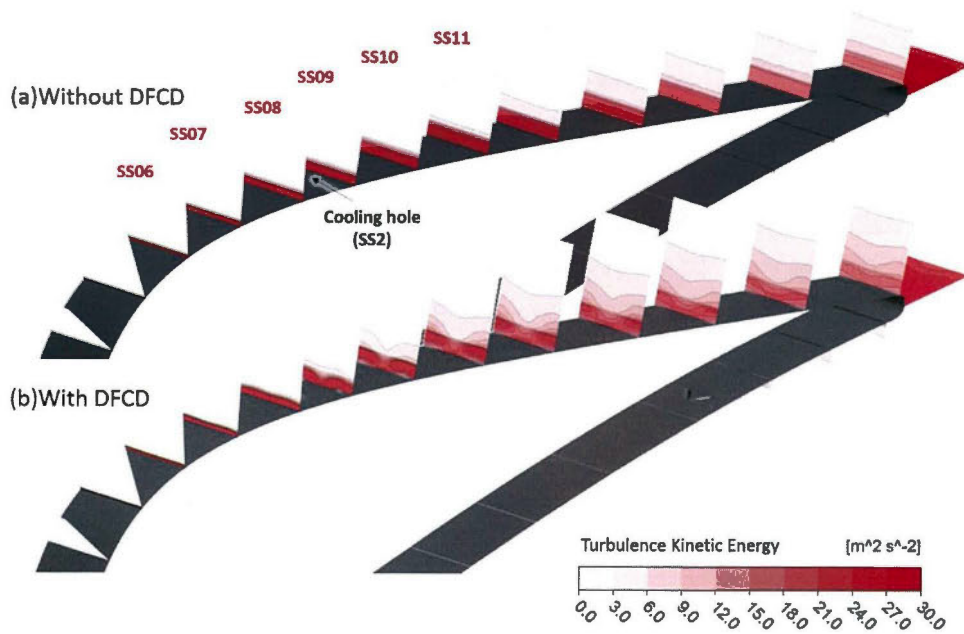


図 5.6.8 乱流運動エネルギー分布（負圧面後縁領域）

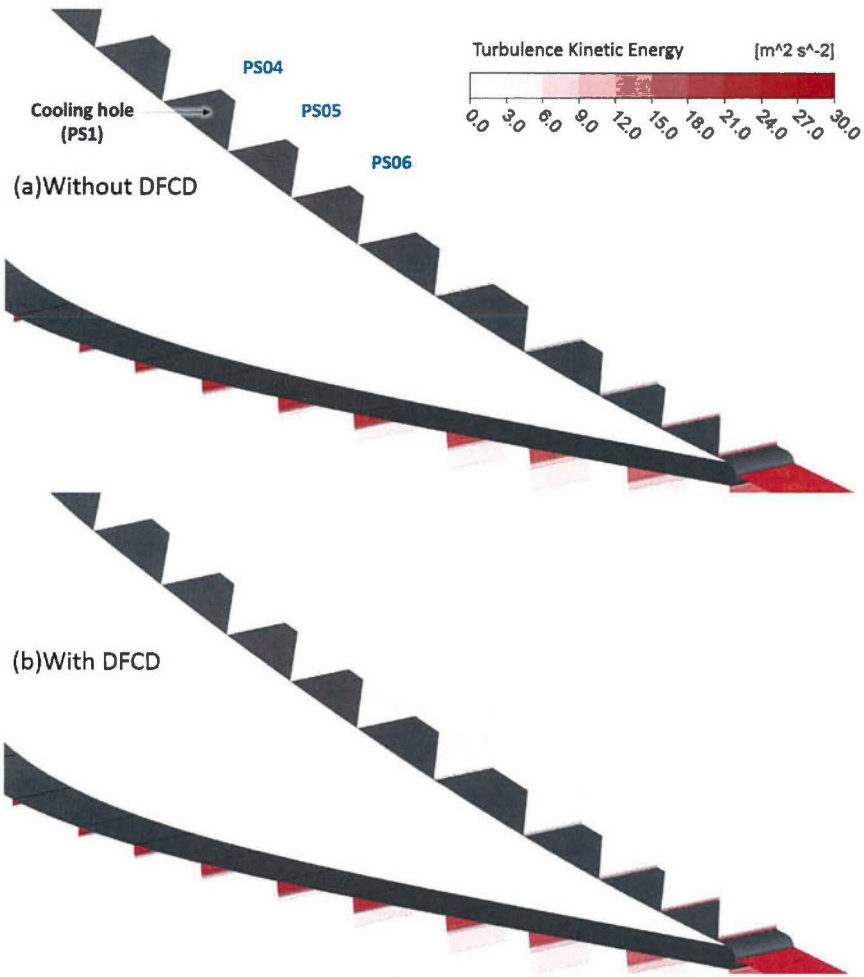


図 5.6.9 乱流運動エネルギー分布（正圧面領域）

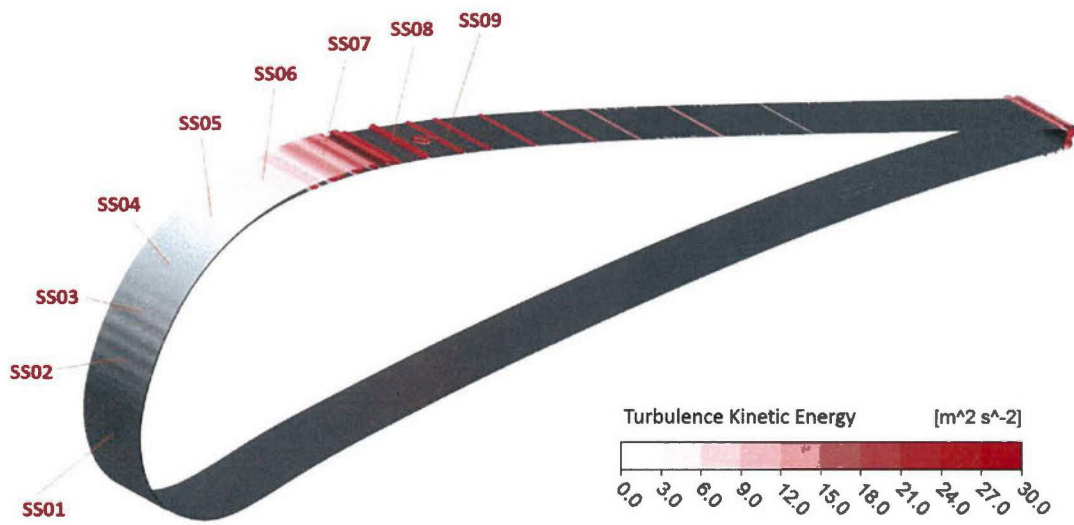


図 5.6.10 渦構造の可視化

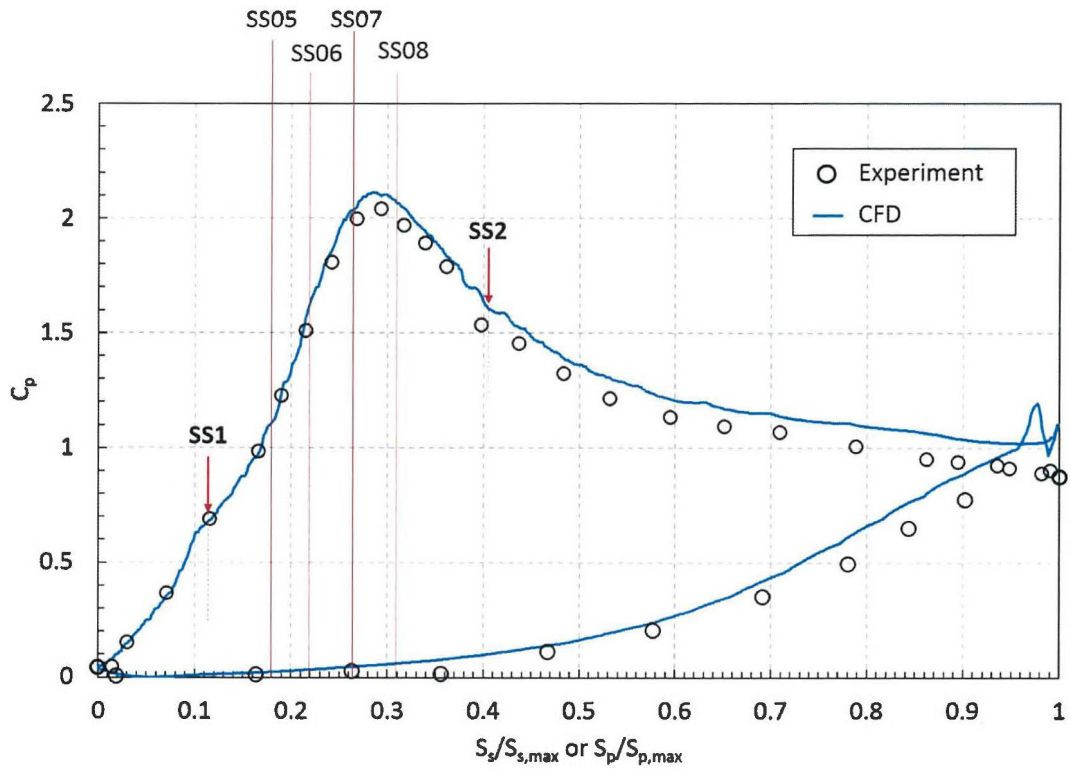


図 5.6.11 C_p 分布と計測箇所の位置関係

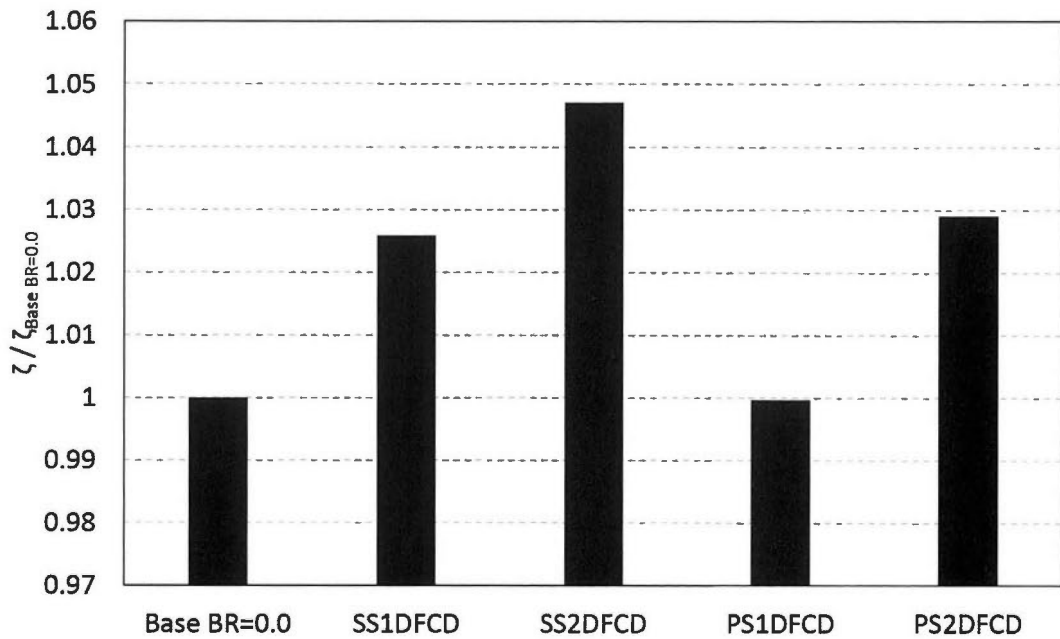


図 5.6.12 流量平均運動エネルギー損失 (デバイス位置の効果)

5.6.2 吹き出しを伴う流れ場（ベースデバイス翼とベース翼の比較）

本節では、実験では $h=0.5d$ に相当するデバイスを付けた翼（デバイス翼）と、デバイスを何も取り付けていない翼に関して、CFD を用いて性能の調査と、現象の解明を行った。

5.6.2.1 フィルム効率

図 5.6. 13, 図 5.6. 14 には、負圧面側のベース翼とデバイス翼でフィルム効率分布の違いを示している。ベース翼に関しては、 $BR=1.0$ を境にしてフィルム冷却面積が急激に低下しており、ほとんどフィルム冷却の効果が現れていない。また、それ以上の吹き出し比ではフィルム冷却の効果は全く現れておらず、二次空気の lift-off が示唆される。デバイス翼に関しては、デバイスを設置した効果によりスパン方向の冷却面積が広がっているが、負圧面においてデバイスの効果が現れるのは $BR \leq 1.0$ に限るようである。それ以上の吹き出し比に関しては、ベース翼と同様に効果が現れていない。このときの、二次空気の貫通性に関しては、空間温度場の可視化結果の欄に示す。

図 5.6. 15, 図 5.6. 16 には、正圧面側のベース翼とデバイス翼でフィルム効率分布の違いを示している。ベース翼に関しては、フィルム冷却の効果が現れる吹き出し比は、負圧面と同様に $BR \leq 1.0$ までであった。しかし、負圧面と比較すると、 $BR=1.0$ でも lift-off の傾向は見られないため、比較的付着性の高い流れ場になっている。デバイス翼に関しては、負圧面と同様にデバイスの効果が現れており、冷却面積が確保できている。負圧面と異なる点としては、より高い吹き出し比でもデバイスの効果が現れており、冷却のカバー面積が存在することである。

図 5.6. 17 には、負圧面におけるスパン方向平均フィルム効率を示している。負圧面でフィルム冷却の効果が見られているのは低い吹き出し比の条件に限られていた。一方、図 5.6. 18 には正圧面の結果を示しているが、正圧面では、ある程度のフィルム冷却を確保できる形態が多い。ただし、フィルム冷却効率のピーク値に関しては、負圧面の方が高くなっており、SS2 の周辺ではスパン方向平均フィルム効率が高くなる。これは、SS2 は比較的フラットな領域であり、付着性の高い凸面であることが起因していると考えられる。その他の領域に関してはほとんどピーク値が変わらなかった。

図 5.6. 19, 図 5.6. 20 には、負圧面、正圧面でのフィルム効率の面平均値を示している。負圧面では吹き出し比に対してロバスト性が低くなっており、特に高い吹き出し比で急激なフィルム効率の低下を招いている。正圧面に関しては、負圧面よりもロバスト性が高くなっており、デバイス翼では、 $BR=1.0$ において、性能が最大になっている。

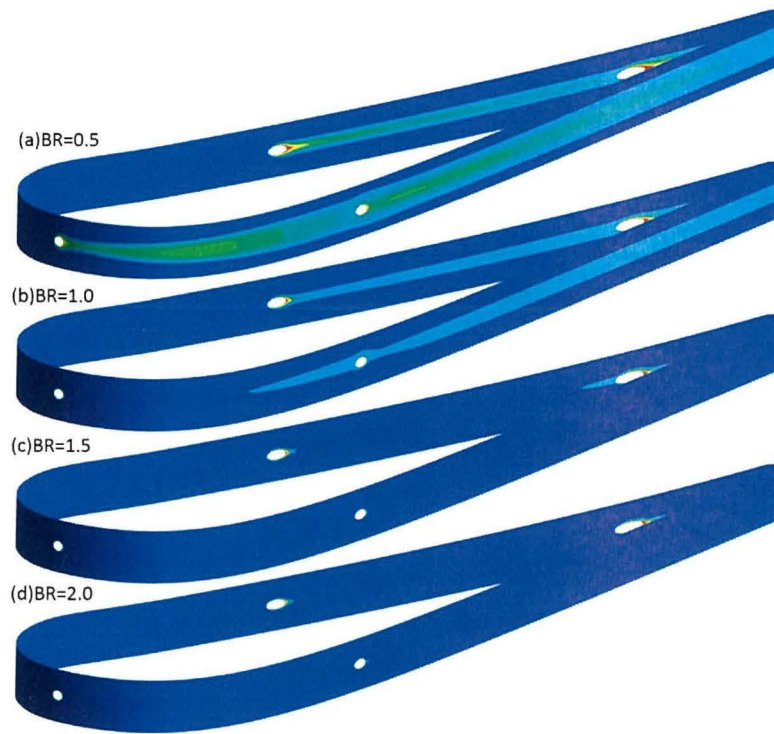


図 5.6.13 フィルム効率分布（負圧面，ベース翼）

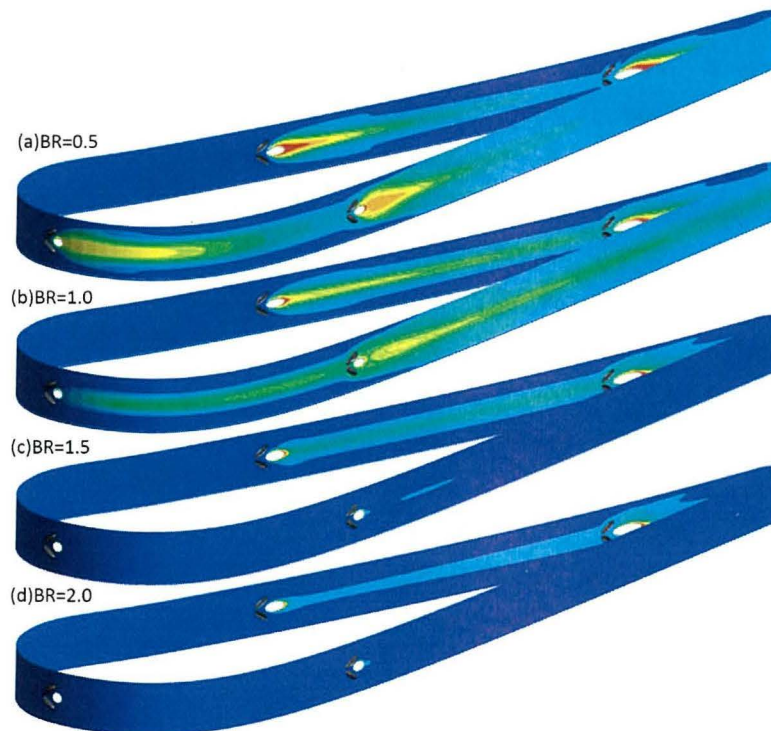


図 5.6.14 フィルム効率分布（負圧面，デバイス翼）

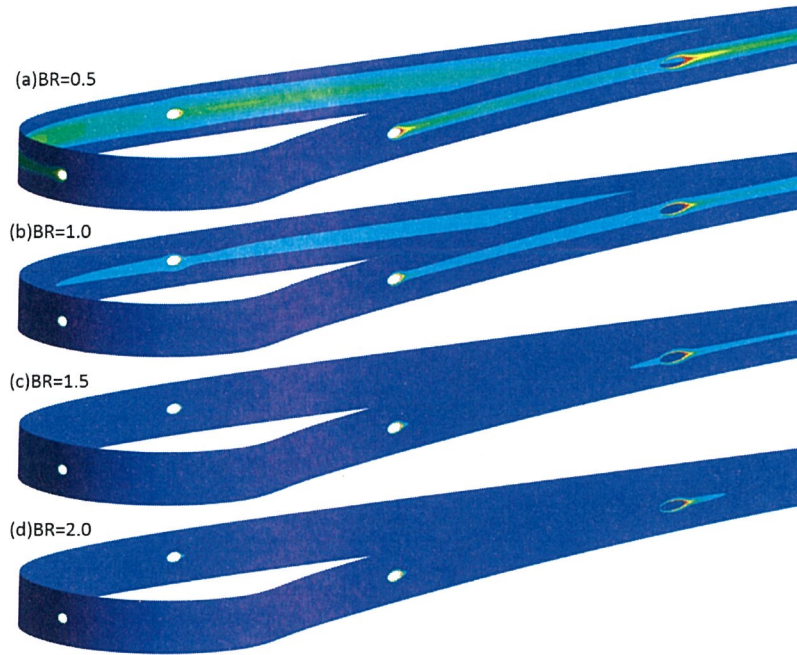


図 5.6.15 フィルム効率分布 (正圧面, ベース翼)

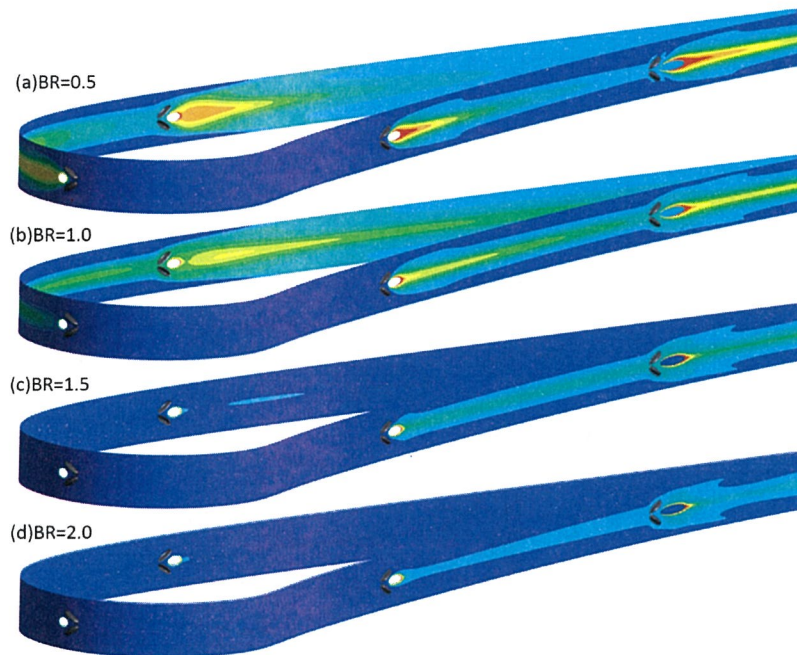


図 5.6.16 フィルム効率分布 (正圧面, デバイス翼)

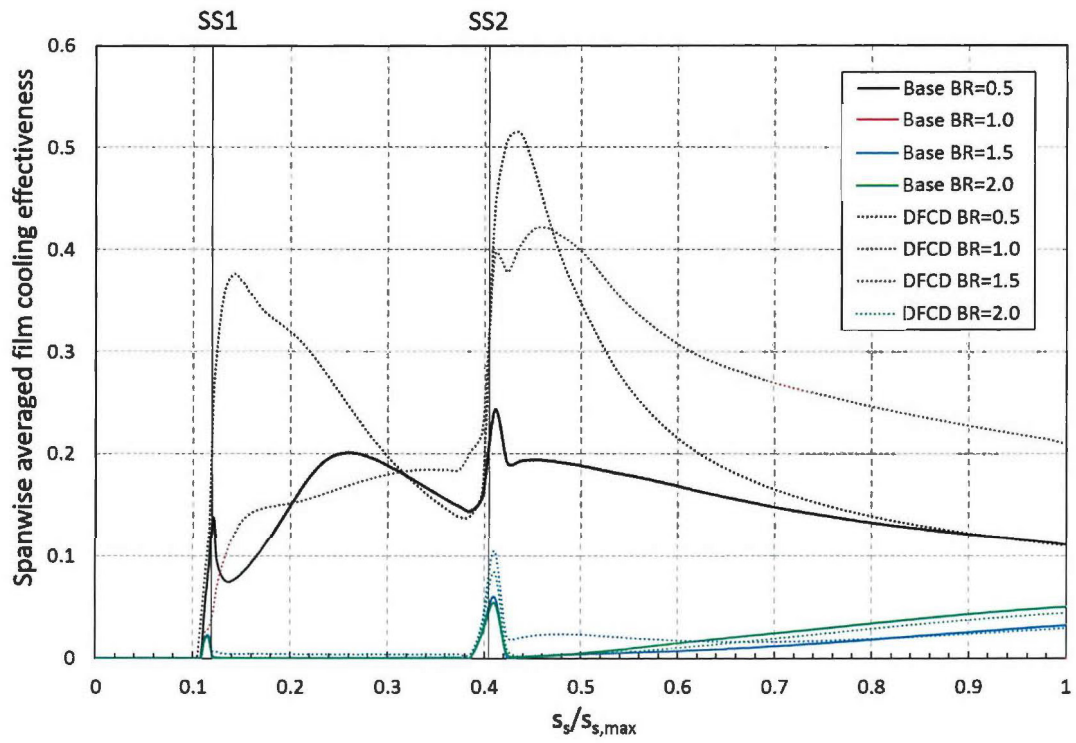


図 5.6.17 スパン方向平均フィルム効率（負圧面）

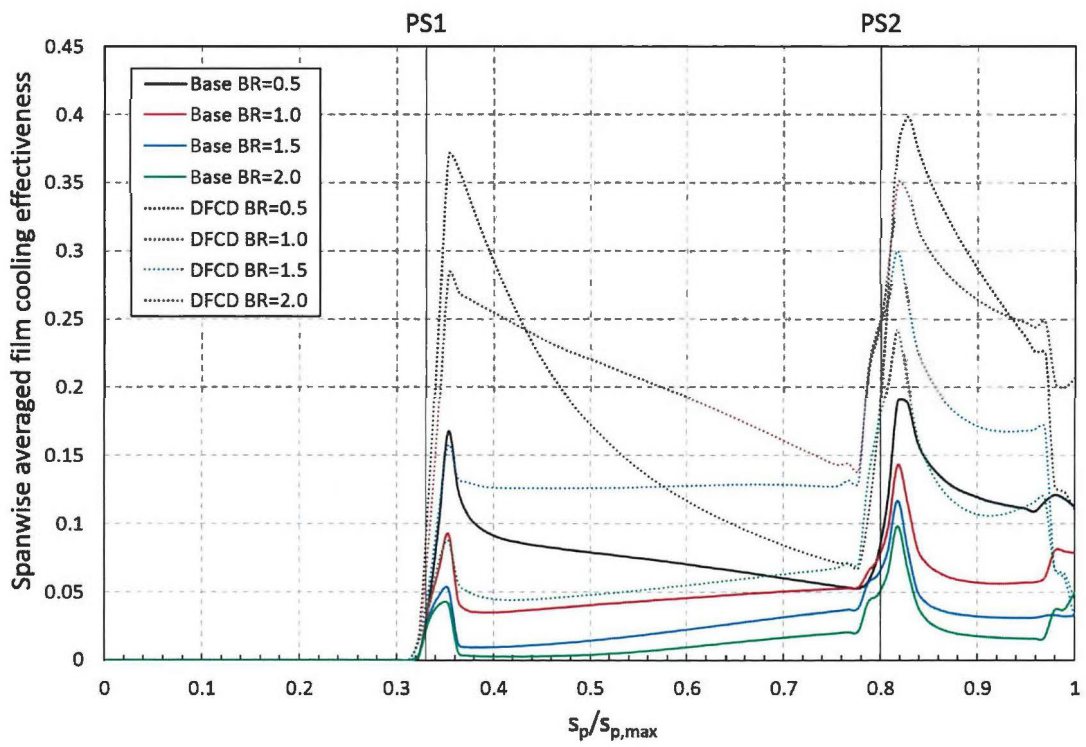


図 5.6.18 スパン方向平均フィルム効率（正圧面）

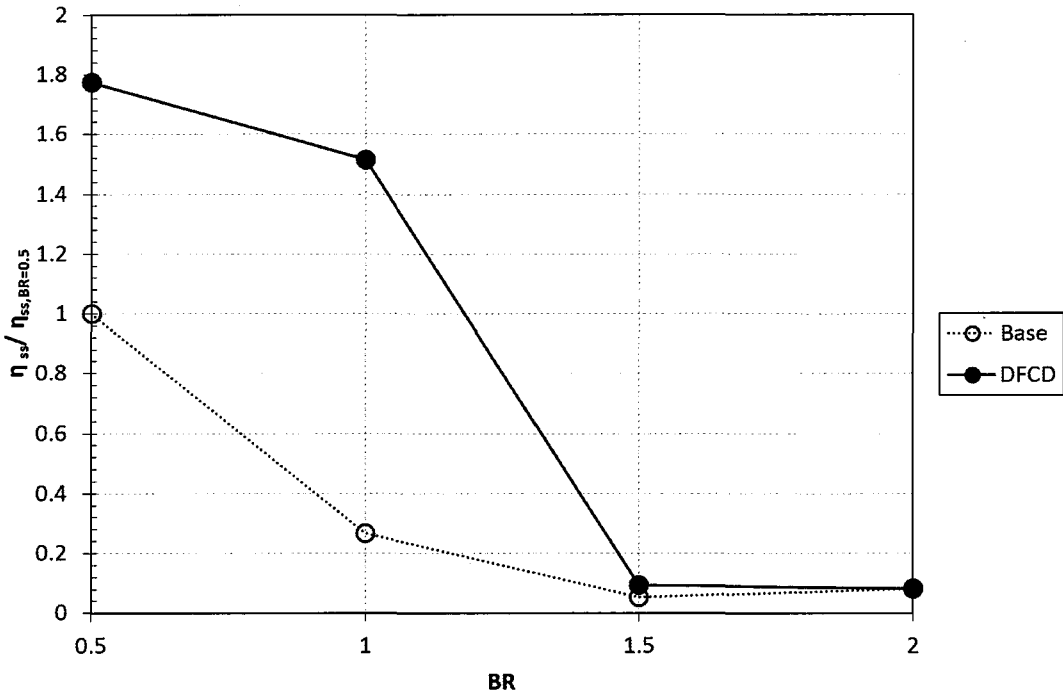


図 5.6.19 面平均フィルム効率 (負圧面)

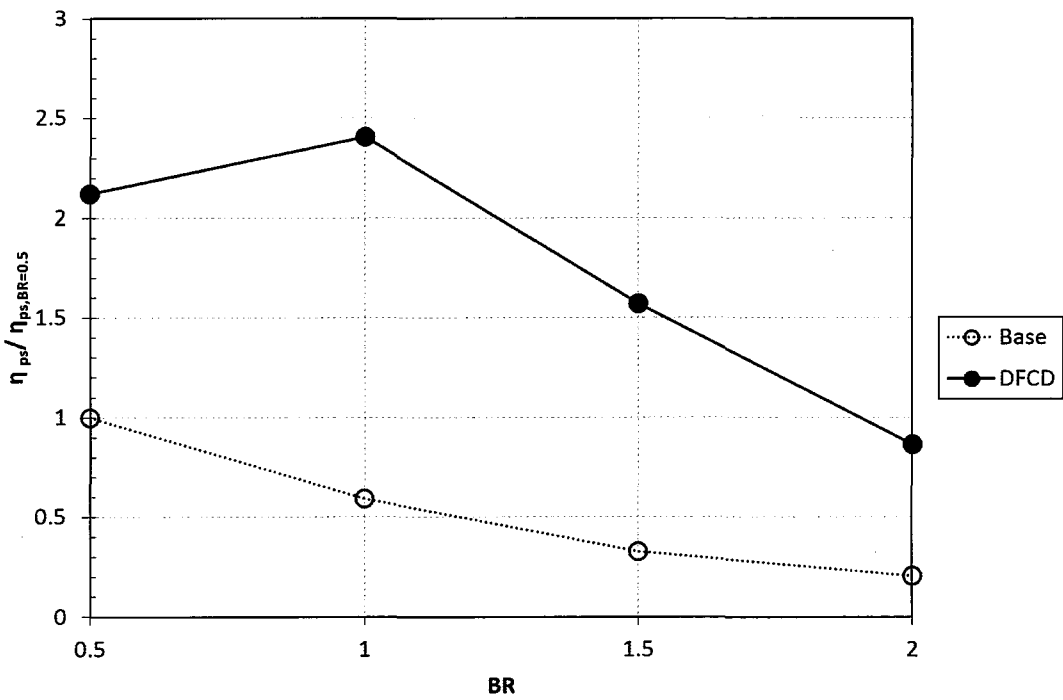


図 5.6.20 面平均フィルム効率 (正圧面)

5.6.2.2 空間温度場

図 5.6. 21～図 5.6. 24 には、負圧面前縁領域での空間温度場をベース翼と、デバイス翼で比較している。BR=0.5 の場合には、両形態とも二次空気は壁面に付着しているような温度場になっている。しかし、BR \geq 1.0 になると、ベース翼では温度のコアが壁面から完全に離れている。デバイス翼に関しては、BR=1.0 では温度場が付着しているが、BR=1.5 になるとベース翼と同様に温度のコアが完全に壁面から離れている。図 5.6. 25～図 5.6. 28 には負圧面のより下流の面内における空間温度場を示している。BR=0.5 の条件ではベース翼、デバイス翼共に温度場が壁面に付着している。前縁領域と違うのは、SS2 から吹き出した温度は比較的スパン方向に広がっていることである。特にこの傾向は、デバイス翼で顕著であり、SS1 からの温度場とは異なり、スパン方向いっばいに温度の拡散が見られた。BR=1.0 になると、ベース翼では温度場が lift-off し、デバイス翼では依然として温度場の付着が見られる。また、スパン方向の拡散も見られている。BR \geq 1.5 となると、両翼ともに温度場は壁面から lift-off している。この条件では、下流側の領域では温度のコアが 2 つ存在しており、互いに離れている。したがって、BR \leq 1.0 の条件では、二次空気の重ね合わせが起こっていたが、BR=1.5 を境に、重ね合わせの効果がなくなっていることが分かる。

図 5.6. 29～図 5.6. 32 には、正圧面側の空間温度場を示している。ベース翼において正圧面側の温度場は、負圧面とは異なり BR=1.0 でも付着している様子が見られる。BR=1.5 では、PS1 からの温度場は、壁面から lift-off している。一方で、PS2 からの温度場に関しては、付着している様子が見られる。したがって、正圧面側は全体的に高い温度場の付着性を有していることが分かる。デバイス翼の場合、正圧面側は元々付着性が高いために、いずれの吹き出し比においても温度場は壁面に付着している。ただし、PS1 からの温度場は BR \geq 1.5 を境に付着が見られるものの、スパン方向の拡散が見られない。これは、吹き出しを行わなかった計算結果で見られたように、PS1 上流のデバイスから発生する渦の強さが弱いことに起因していると考えられる。一方で、PS2 より下流の領域は、比較的渦が強いために、スパン方向の温度の拡散が高い吹き出し比でも得られている。

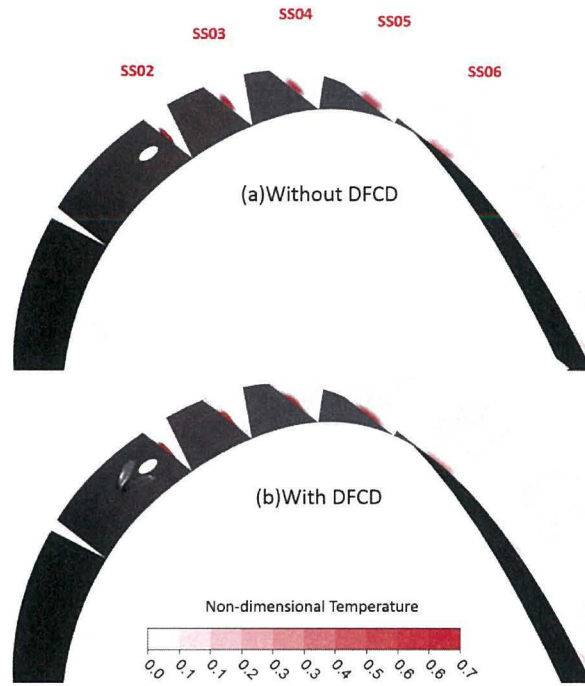


図 5.6.21 空間温度場 ($BR=0.5$, 負圧面前縁領域)

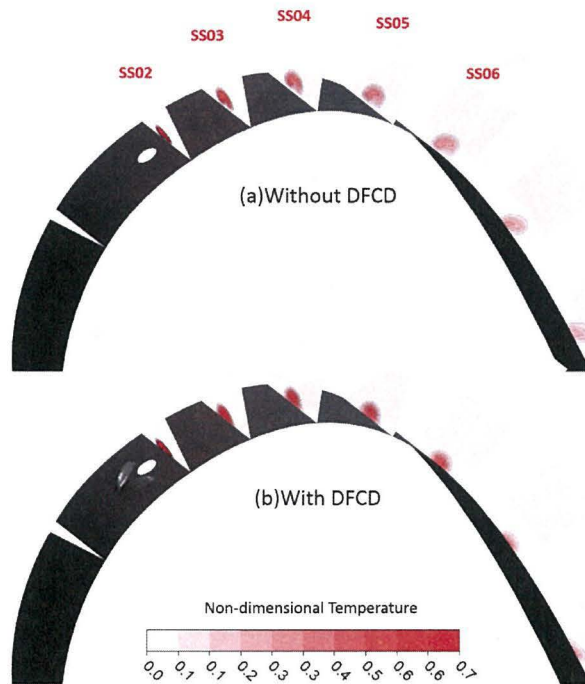


図 5.6.22 空間温度場 ($BR=1.0$, 負圧面前縁領域)



図 5.6.23 空間温度場 ($BR=1.5$, 負圧面前縁領域)



図 5.6.24 空間温度場 ($BR=2.0$, 負圧面前縁領域)

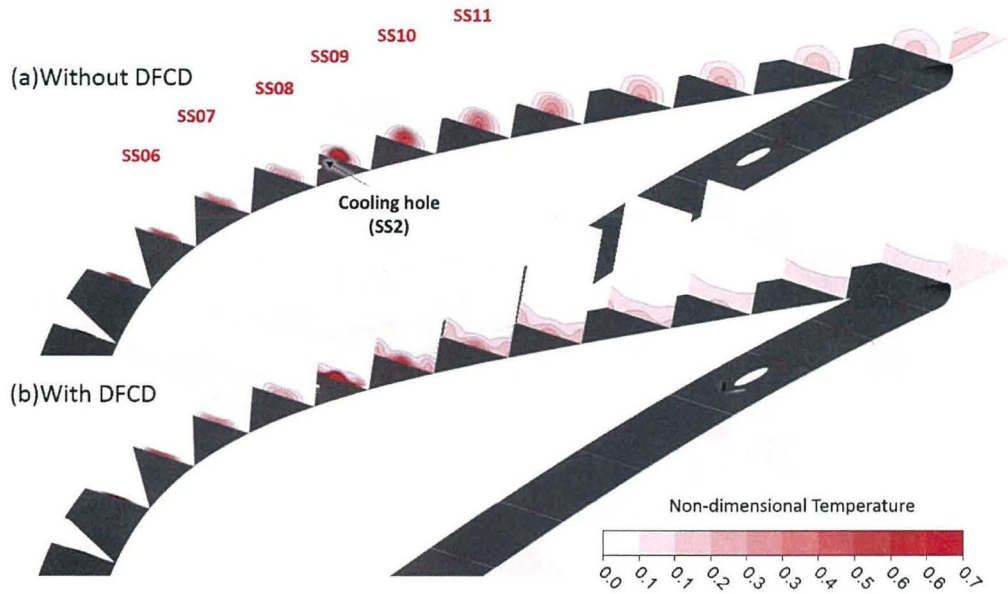


図 5.6.25 空間温度場 ($BR=0.5$, 負圧面後縁領域)

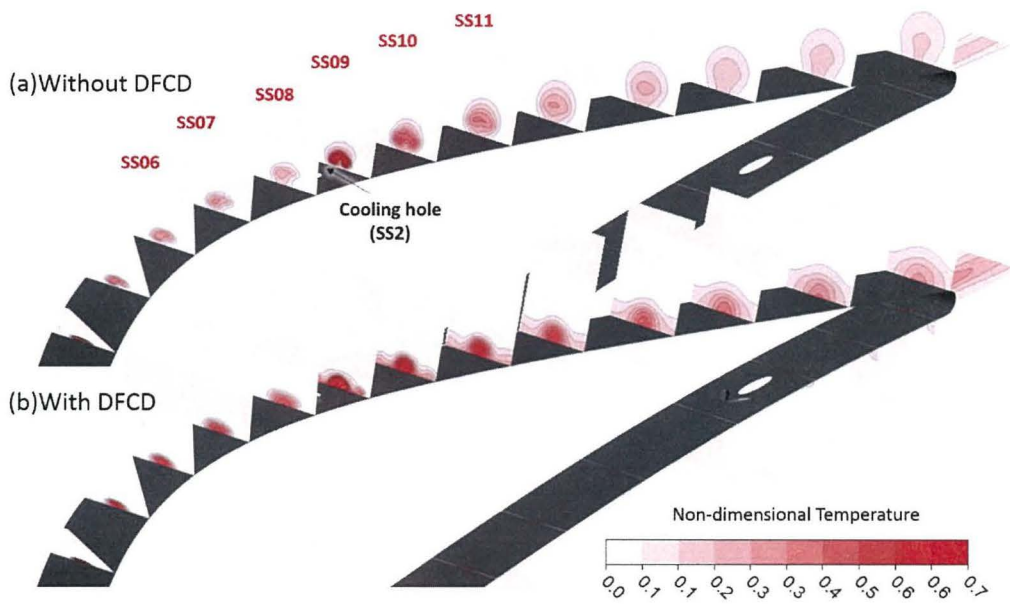


図 5.6.26 空間温度場 ($BR=1.0$, 負圧面後縁領域)

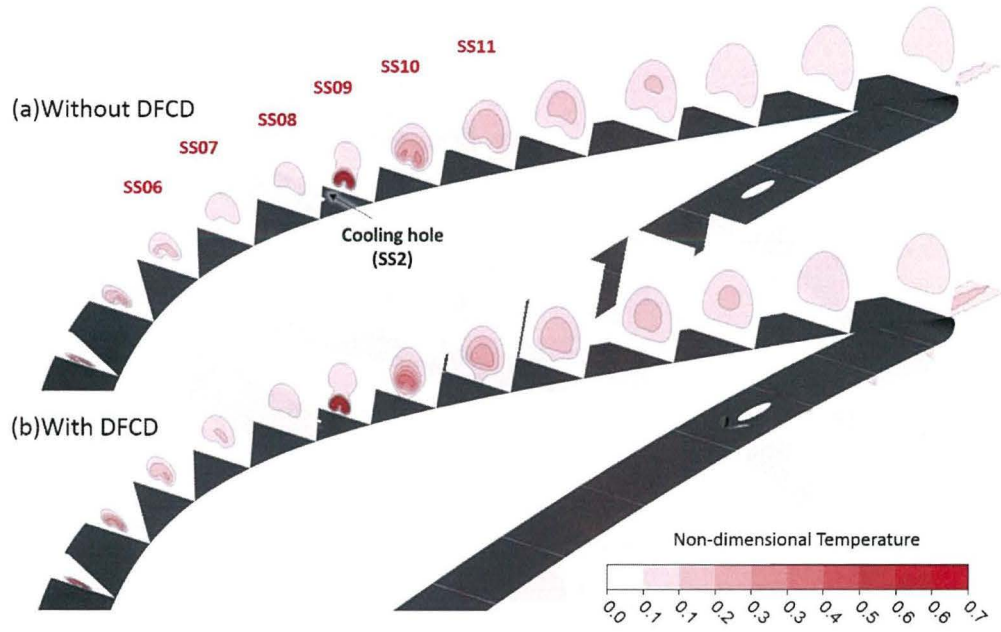


図 5.6.27 空間温度場 ($BR=1.5$, 負圧面後縁領域)

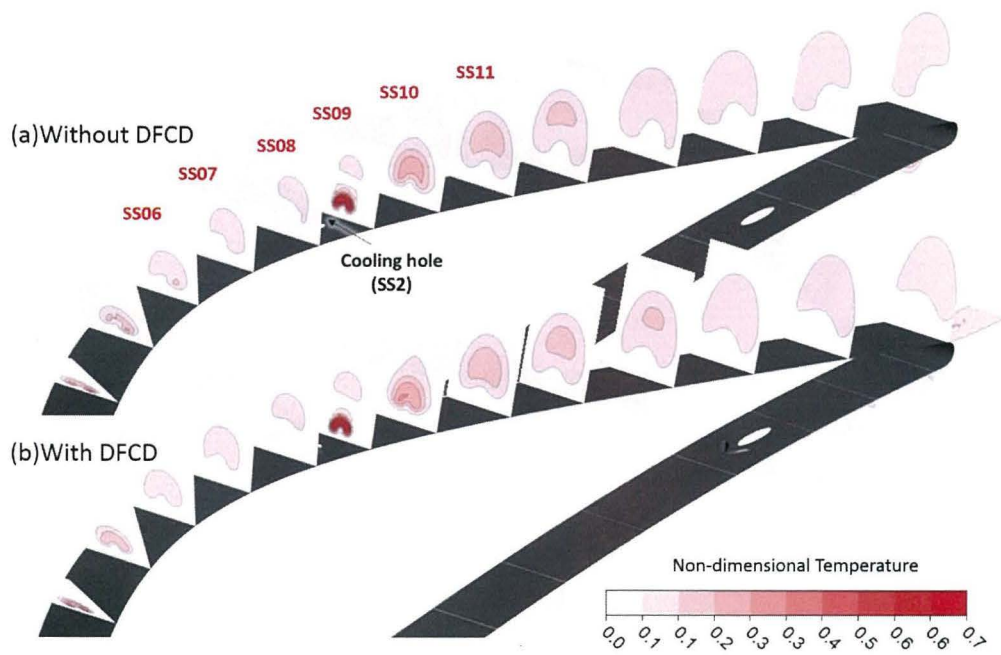


図 5.6.28 空間温度場 ($BR=2.0$, 負圧面後縁領域)

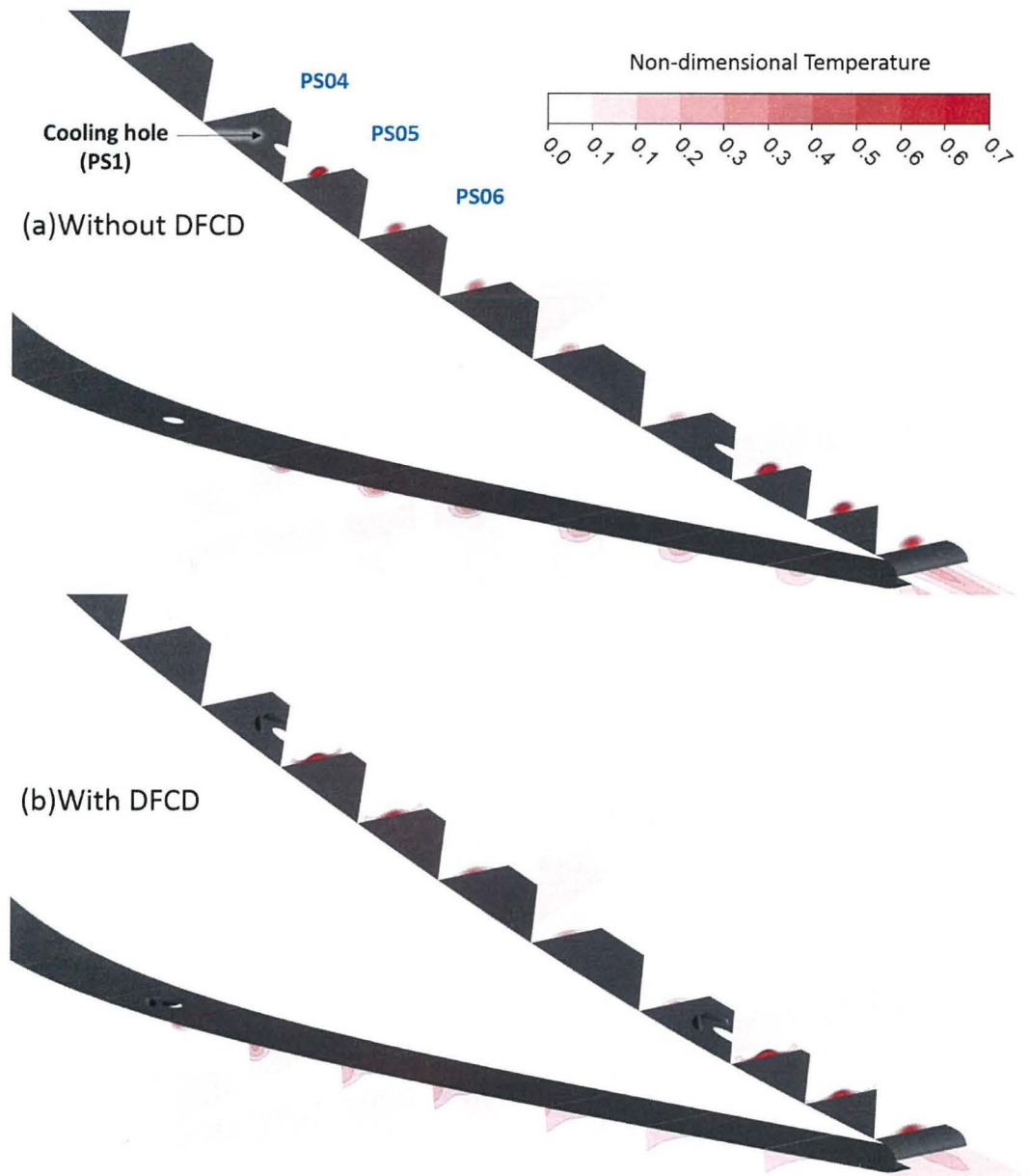


図 5.6.29 空間温度場 ($BR=0.5$, 正圧面領域)

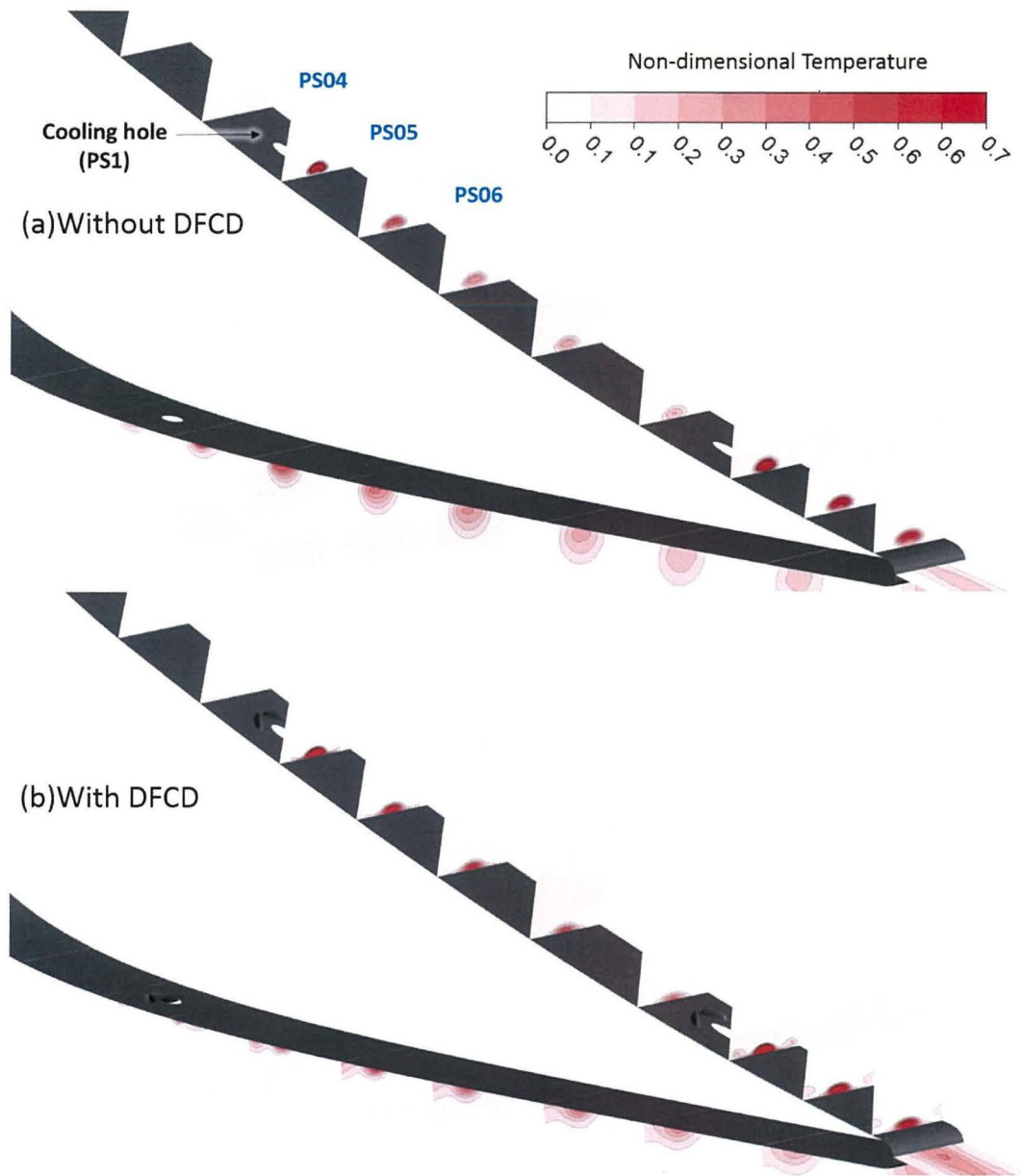


図 5.6.30 空間温度場 ($BR=1.0$, 正圧面領域)

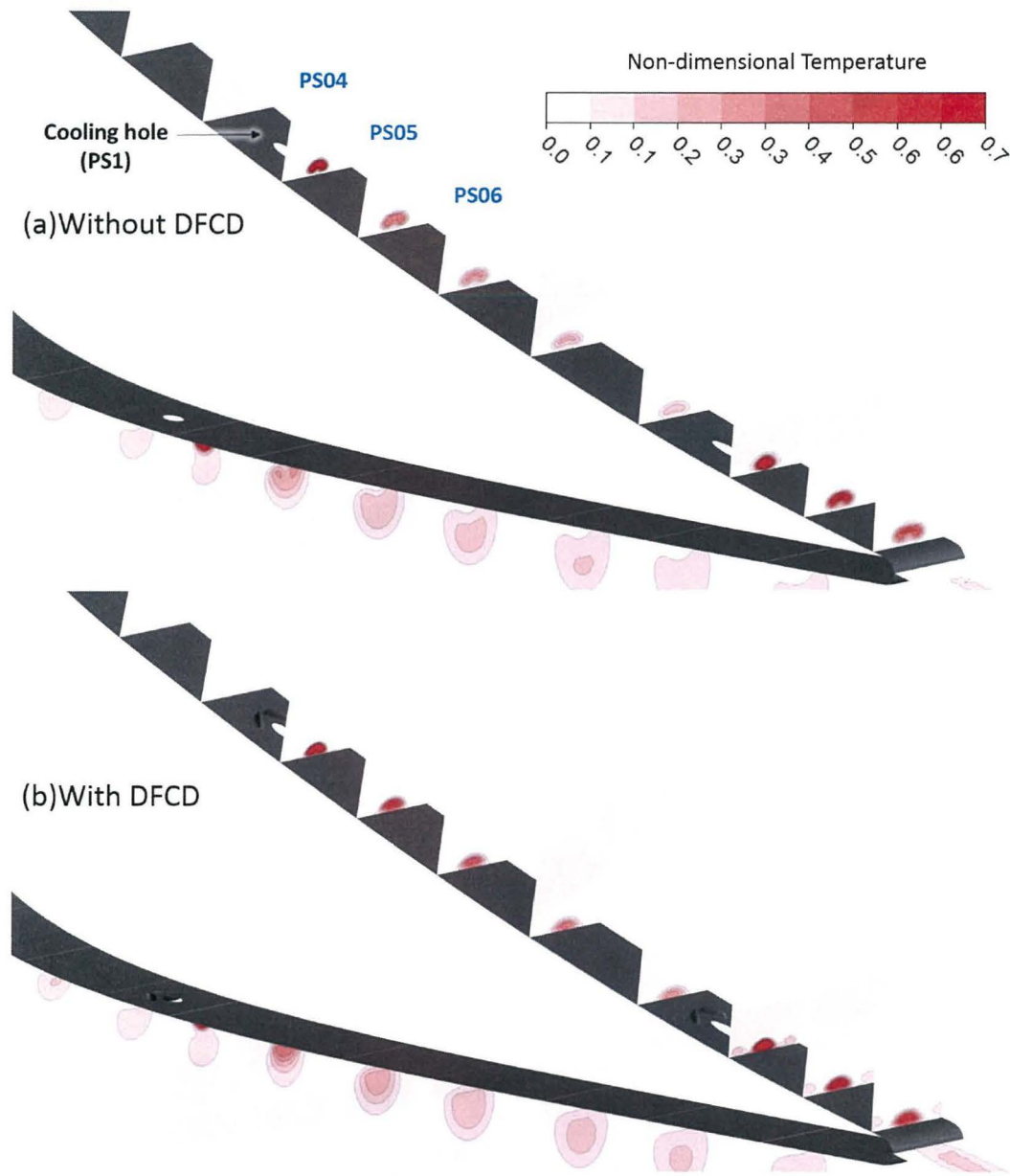


図 5.6.31 空間温度場 ($BR=1.5$, 正圧面領域)

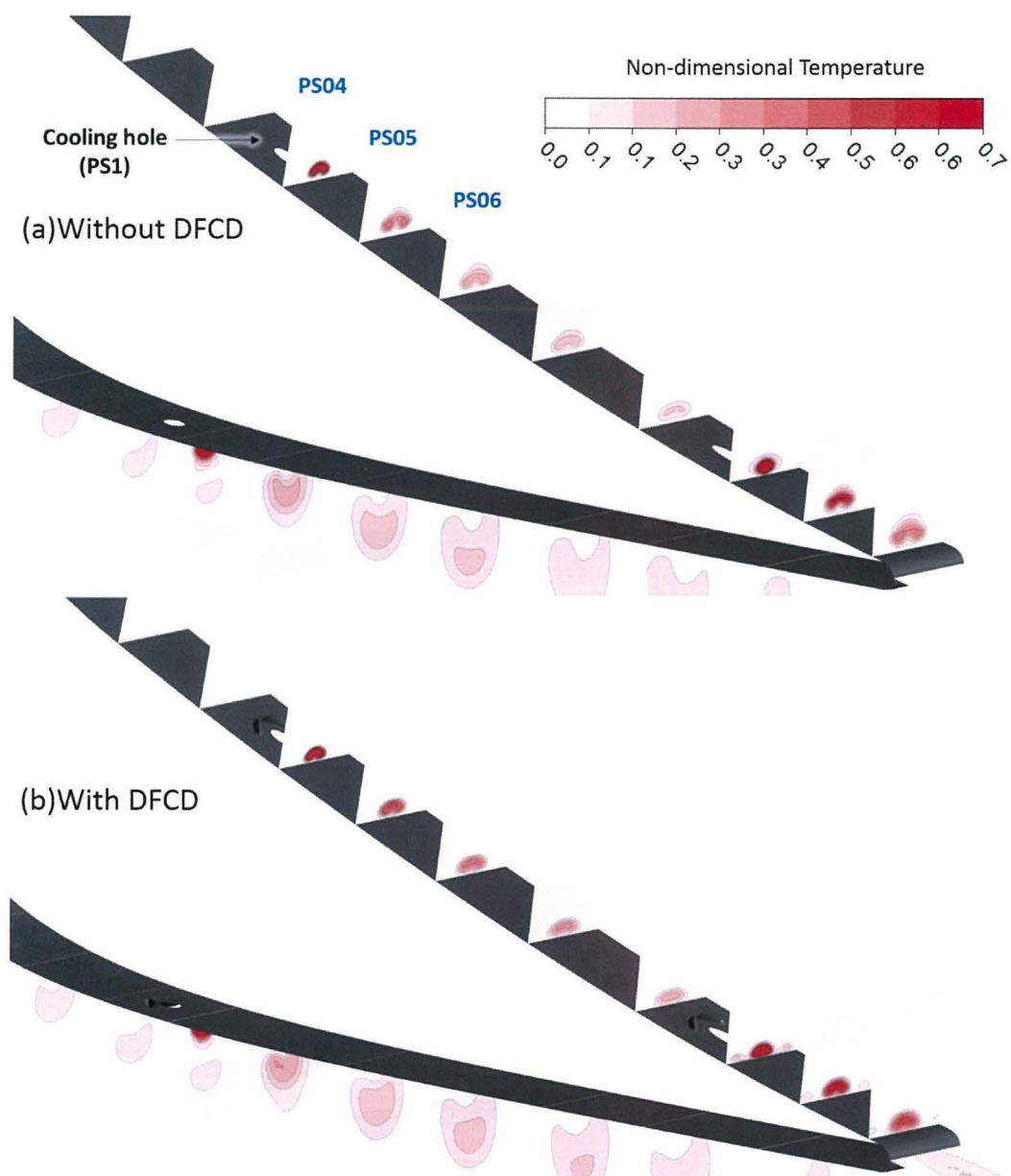


図 5.6.32 空間温度場 ($BR=2.0$, 正圧面領域)

5.6.2.3 渦度

図 5.6. 33～図 5.6. 36 には、負圧面前縁領域の流れ方向渦度を示している。BR=0.5 のベース翼条件では、冷却孔から CRVP と見られる渦構造が発生している。ただし、DFCD の条件を見ると、CRVP と DFCD から発生した渦構造は互いに同じ回転方向である。前節までで得られた渦構造モデルは BR=1.0 と同様のため、今回の BR=0.5 の計算結果は若干傾向が異なっているといえる。ただし、同じ回転方向でも温度場は付着していたことから、吹き出し比が低い条件でも、DFCD は効果があることが分かった。BR が増加すると、次第に冷却孔センターライン上の CRVP は次第に強くなっているが、デバイスから発生した渦によって、デバイス翼の CRVP は若干弱くなっている。図 5.6. 37～図 5.6. 40 には、負圧面下流領域の流れ方向渦度を示している。負圧面下流領域では、デバイス翼については、デバイスから発生した渦構造を確認することができ、流れの制御能力が高いことが分かる。しかし、BR \geq 1.5 では、冷却孔から発生した CRVP の方が卓越した流れ場となっており、デバイスから発生した渦構造はほとんど効果がなくなっていることが分かる。図 5.6. 41～図 5.6. 44 には、正圧面側の渦度分布を示している。正圧面側は先に述べたように、デバイスから発生する渦構造が比較的弱い、CRVP 自体が正圧面では弱く、負圧面より小規模になっていることが分かる。これにより、吹き出し比が高くなっても、CRVP の制御能力が正圧面では比較的得られたものと考えられる。

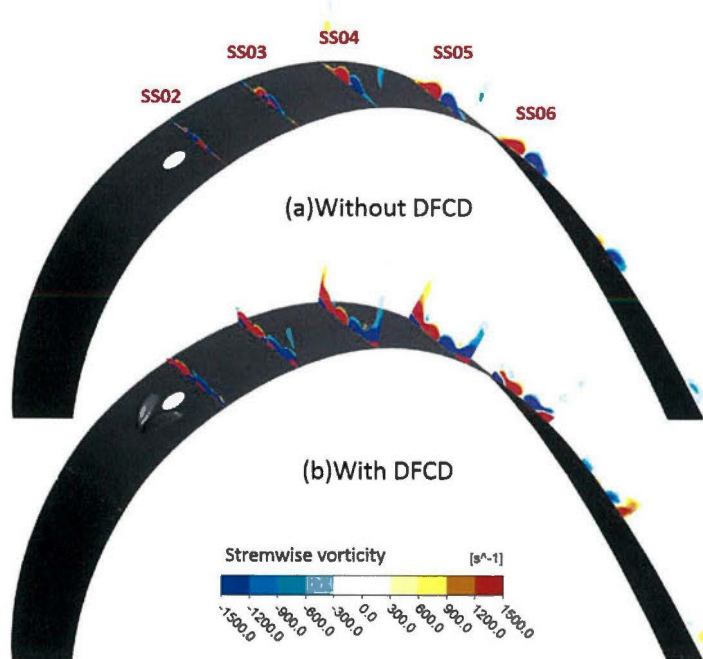


図 5.6.33 渦度分布 ($BR=0.5$, 負圧面前縁領域)

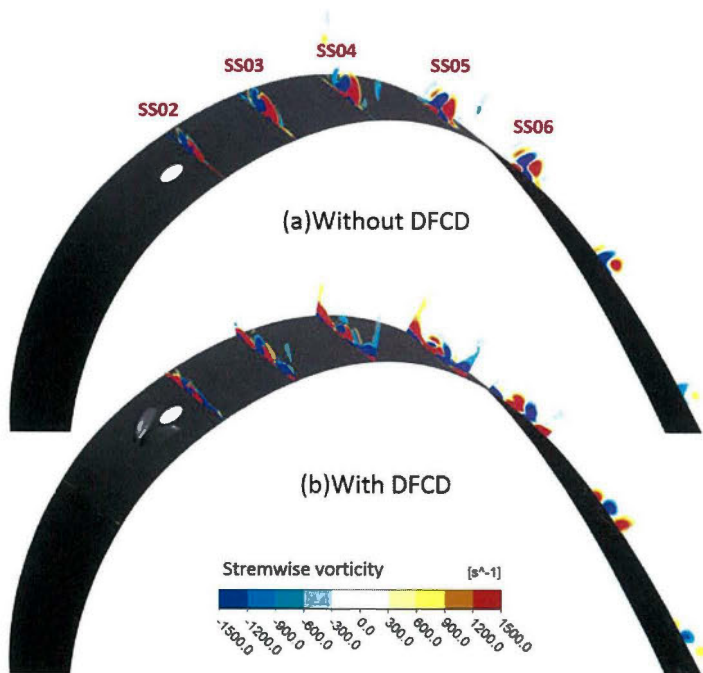


図 5.6.34 渦度分布 ($BR=1.0$, 負圧面前縁領域)

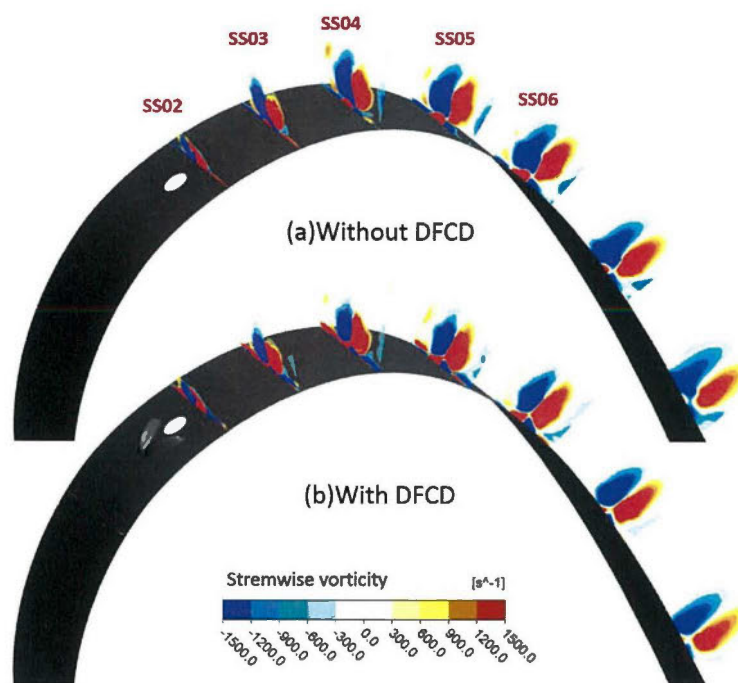


図 5.6.35 渦度分布 ($BR=1.5$, 負圧面前縁領域)

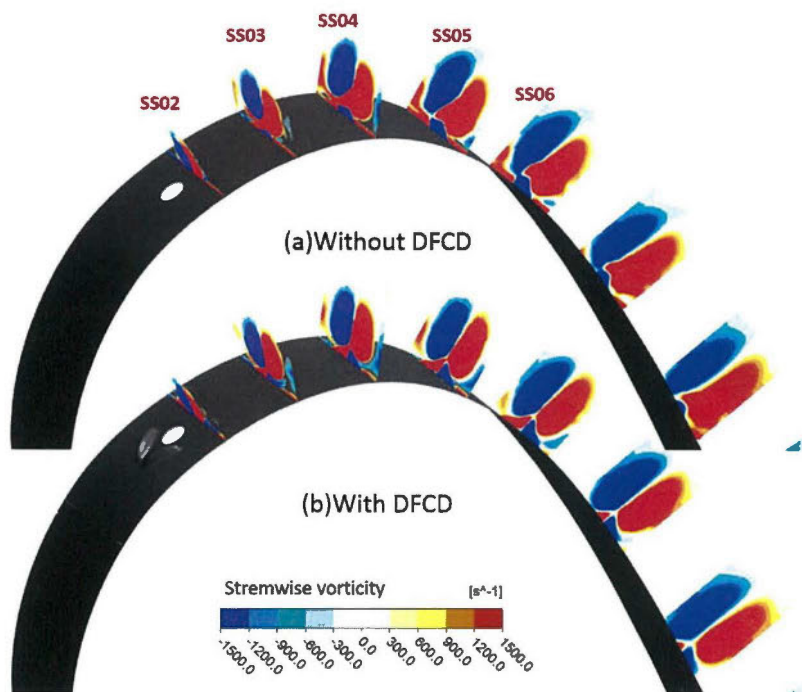


図 5.6.36 渦度分布 ($BR=2.0$, 負圧面前縁領域)

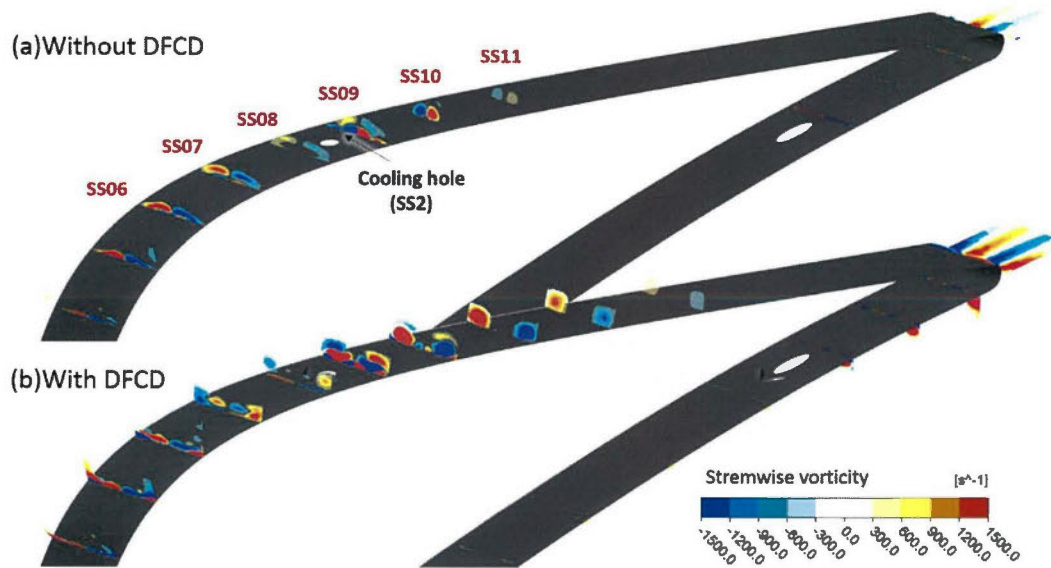


図 5.6.37 渦度分布 ($BR=0.5$, 負圧面後縁領域)

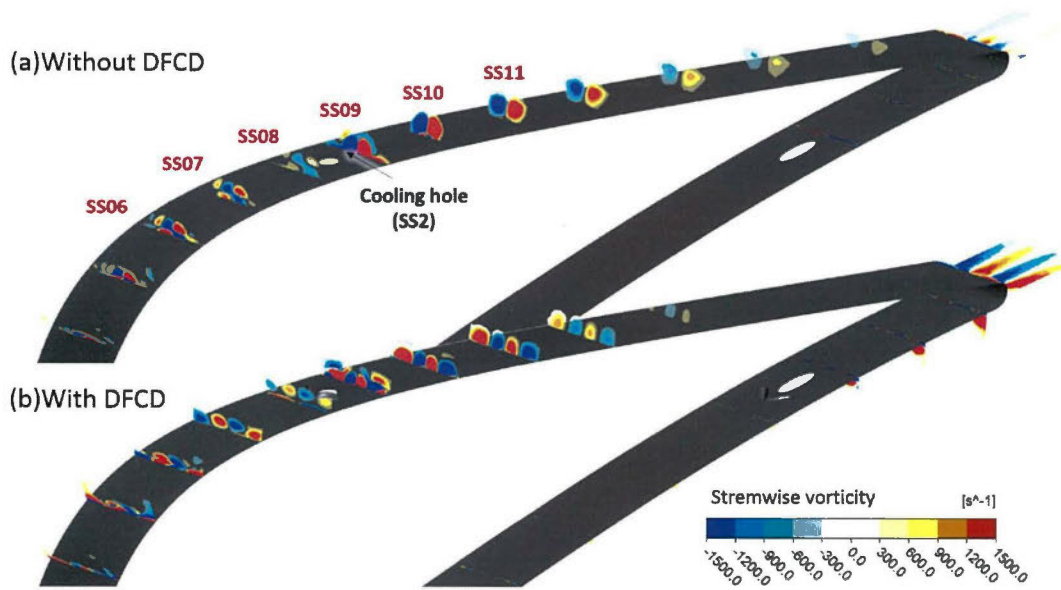


図 5.6.38 渦度分布 ($BR=1.0$, 負圧面後縁領域)

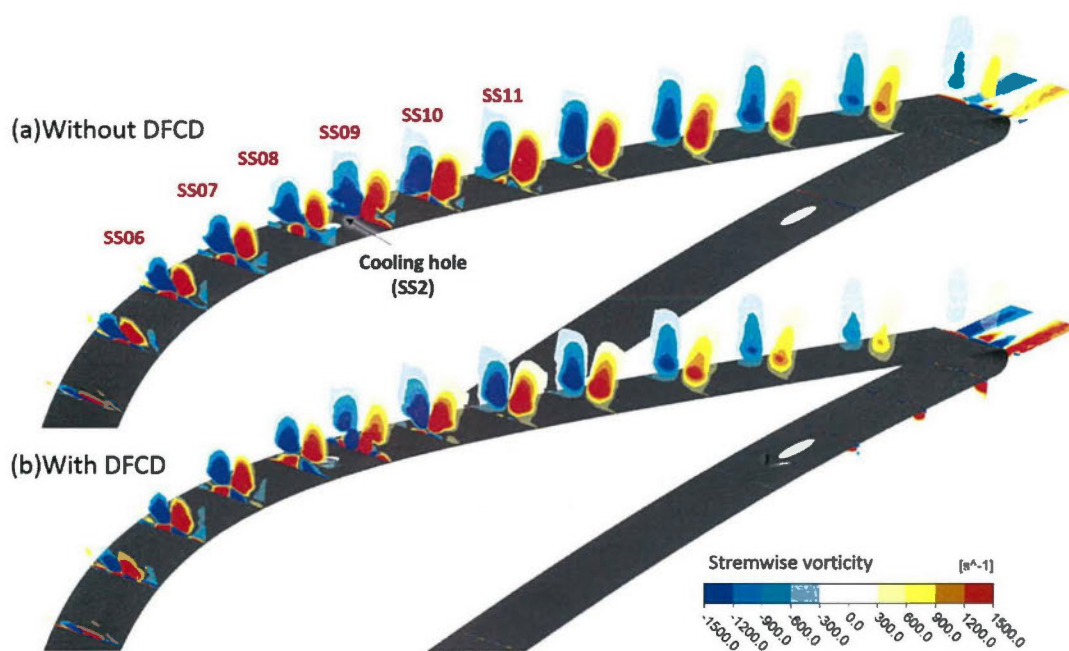


図 5.6.39 渦度分布 ($BR=1.5$, 負圧面後縁領域)

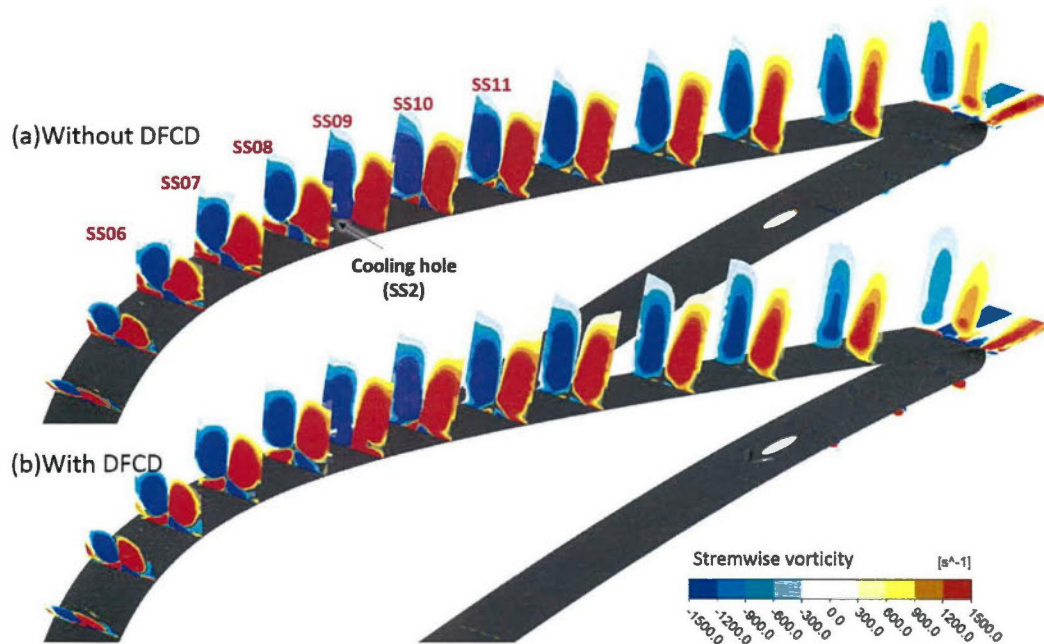


図 5.6.40 渦度分布 ($BR=2.0$, 負圧面後縁領域)

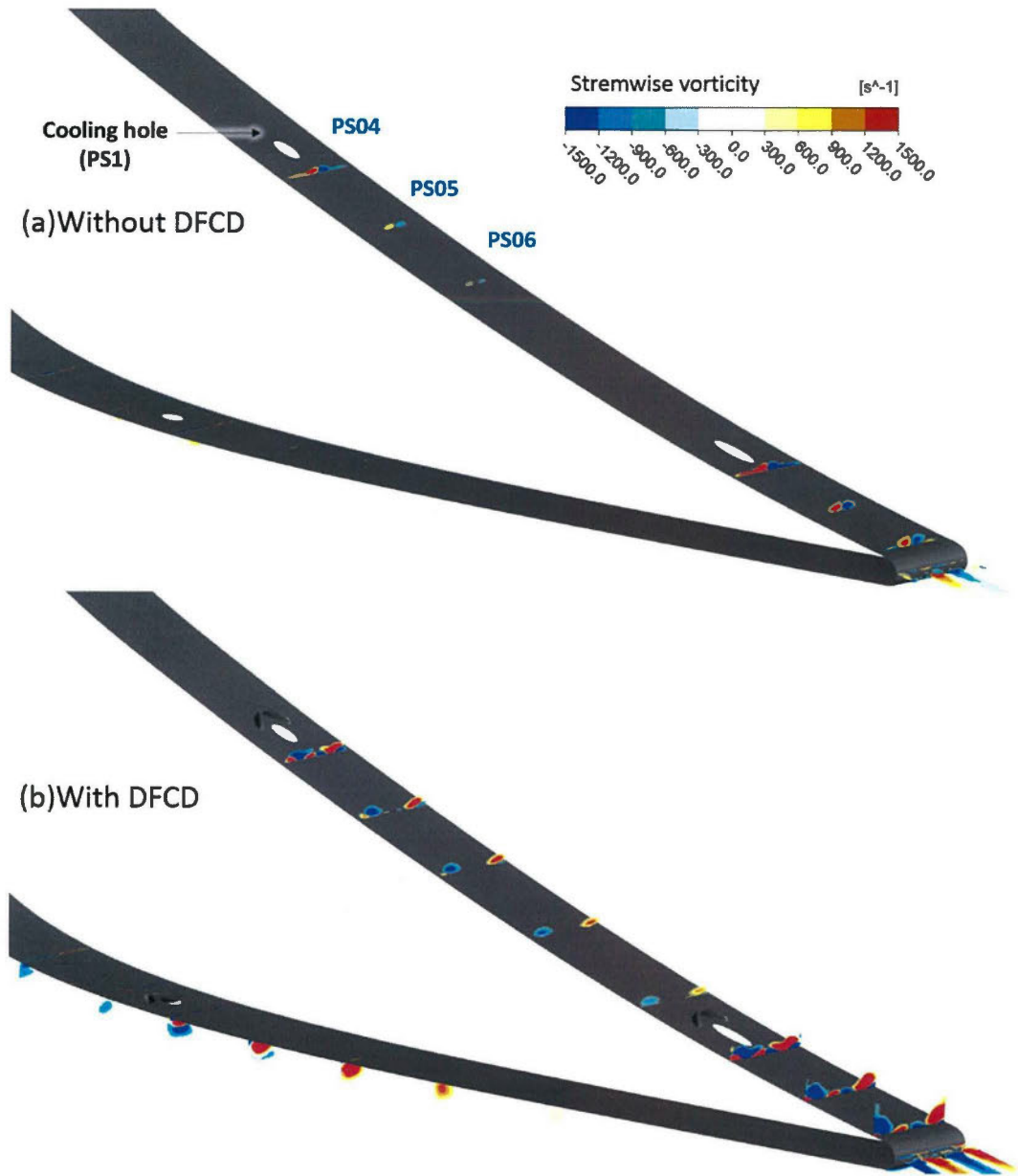


図 5.6.41 渦度分布 ($BR=0.5$, 正圧面領域)

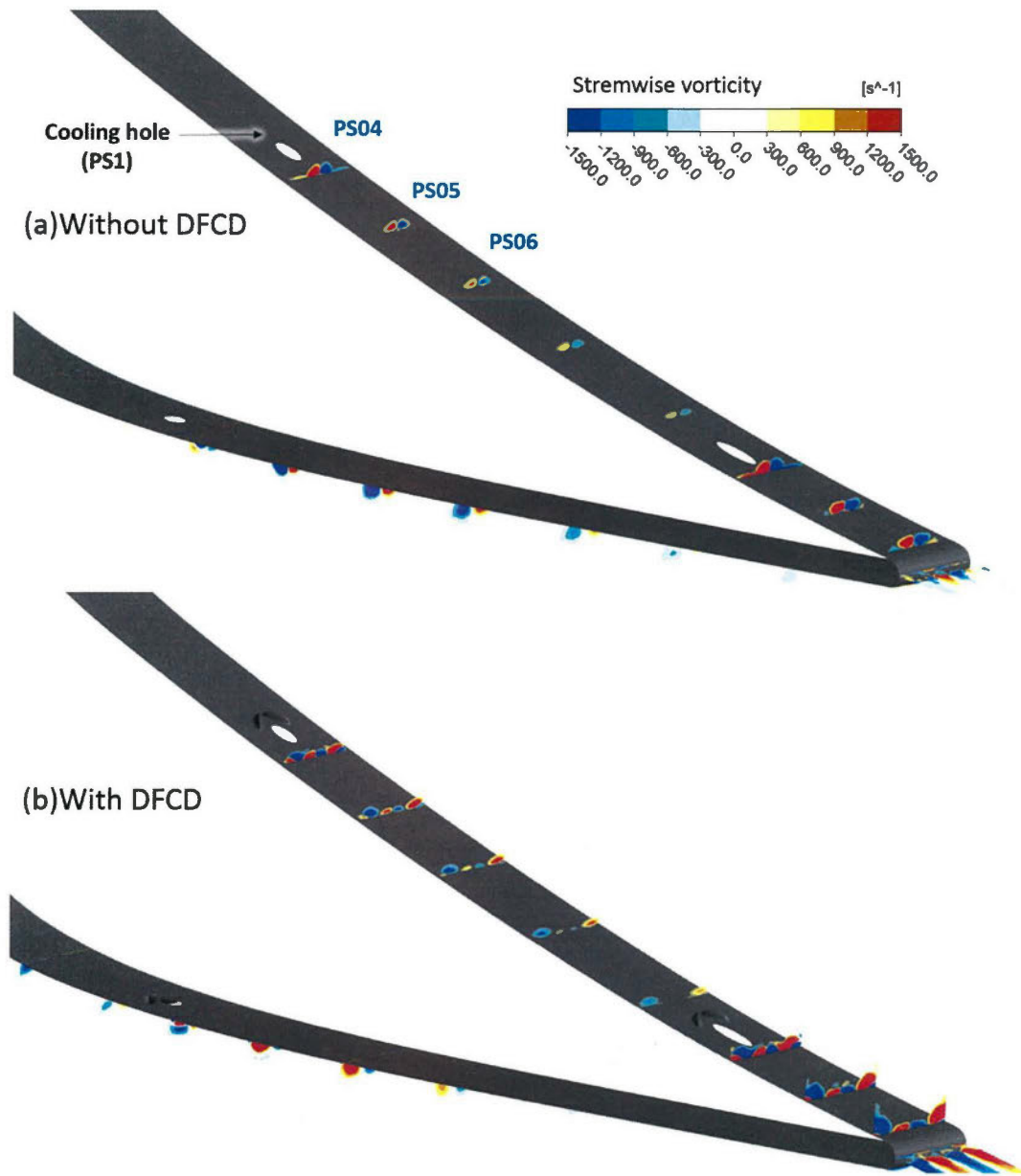


図 5.6.42 渦度分布 ($BR=1.0$, 正圧面領域)

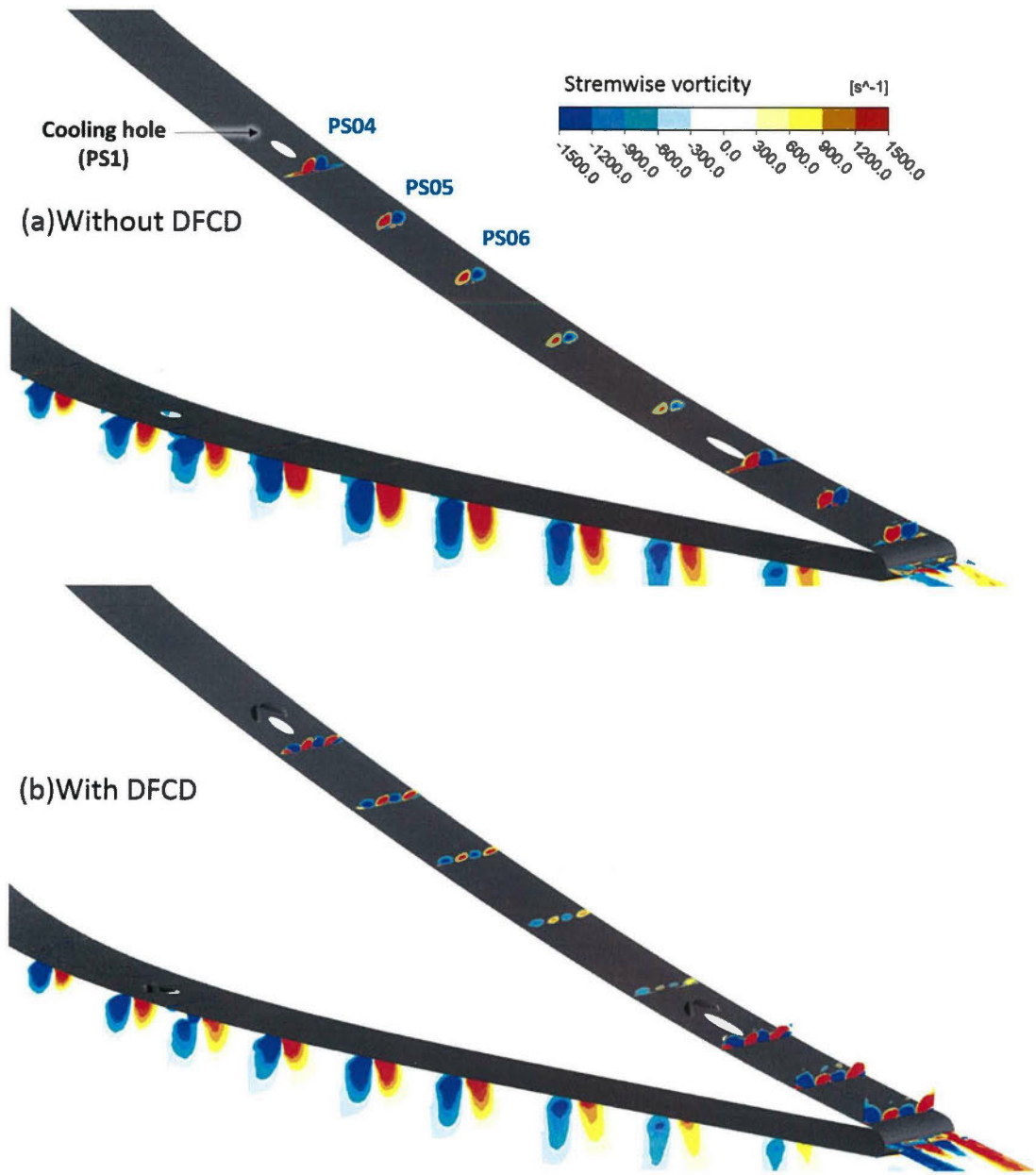


図 5.6.43 渦度分布 ($BR=1.5$, 正圧面領域)

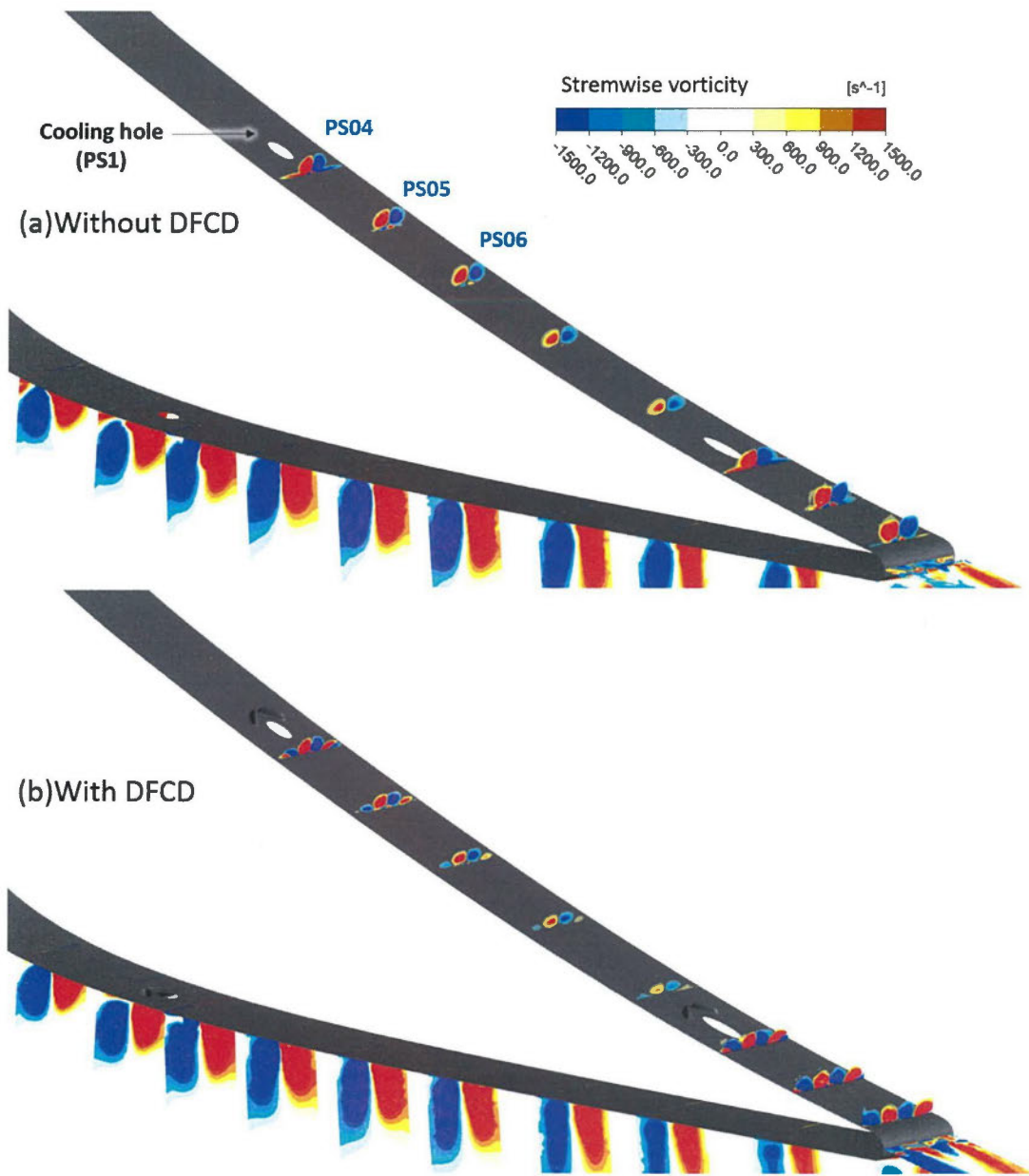


図 5.6.44 渦度分布 ($BR=2.0$, 正圧面領域)

5.6.2.4 エネルギー損失

図 5.6. 45 には、計算領域出口領域における流量平均全圧損失を示している。データはベース翼の $BR=0.5$ の条件で規格化した。ロス値に関しては、ベース翼とデバイス翼の違いは出ているものの、吹き出し比による依存性が非常に高いことが分かる。ロス値は、吹き出し比の増加と共に、増加しており、最大でベース翼の 2.5 倍程度になっている。

図 5.6. 46 には、ベース翼の各吹き出し比を基準としたロス値を示している。ベース翼を基準としてロス値を算出すると、デバイスを設置した条件ではすべての条件で全圧損失が増加していた。吹き出し比による依存性に関しては、吹き出し比の増加にしたがってデバイスによる損失増加量は低く抑えられており、損失面では高い吹き出し比の場合の方がデバイス設置のメリットがあると言える。

図 5.6. 47 には、吹き出し位置の効果を観察するために、単列の吹き出しを行った場合の流量平均全圧損失を示している。単列の吹き出しを行った場合、吹き出しの流量が少ないために、ロス値は小さいものになっているが、概ねロス値が高かったのは、SS1 からの吹き出しの影響を考慮した計算であった。

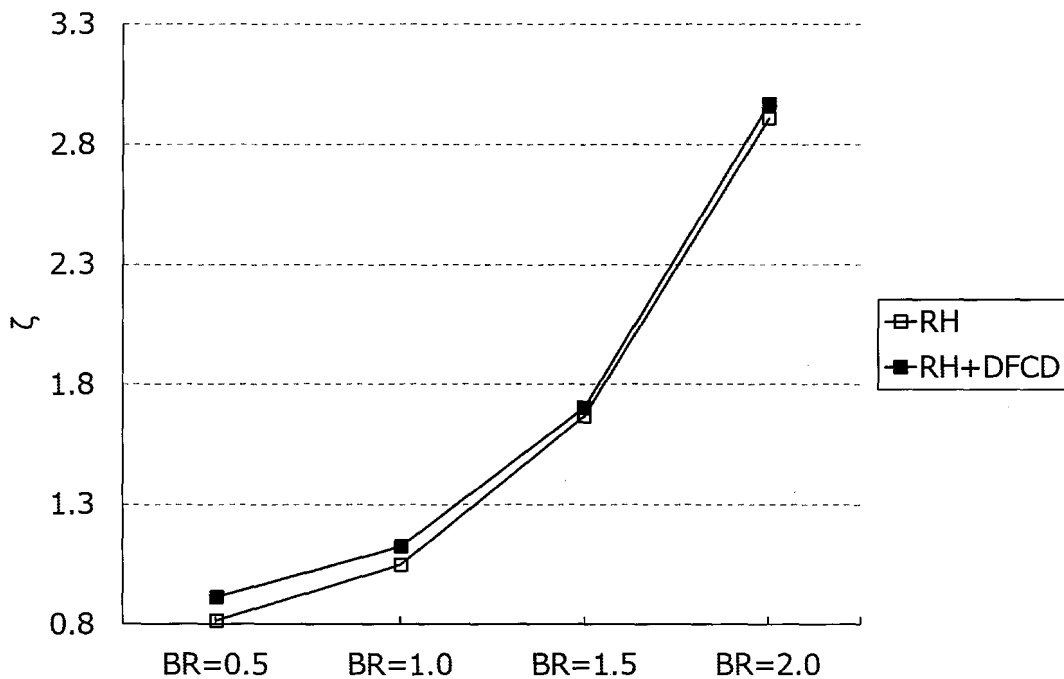


図 5.6. 45 流量平均運動エネルギー損失係数 (Base $BR=0.5$ 基準)

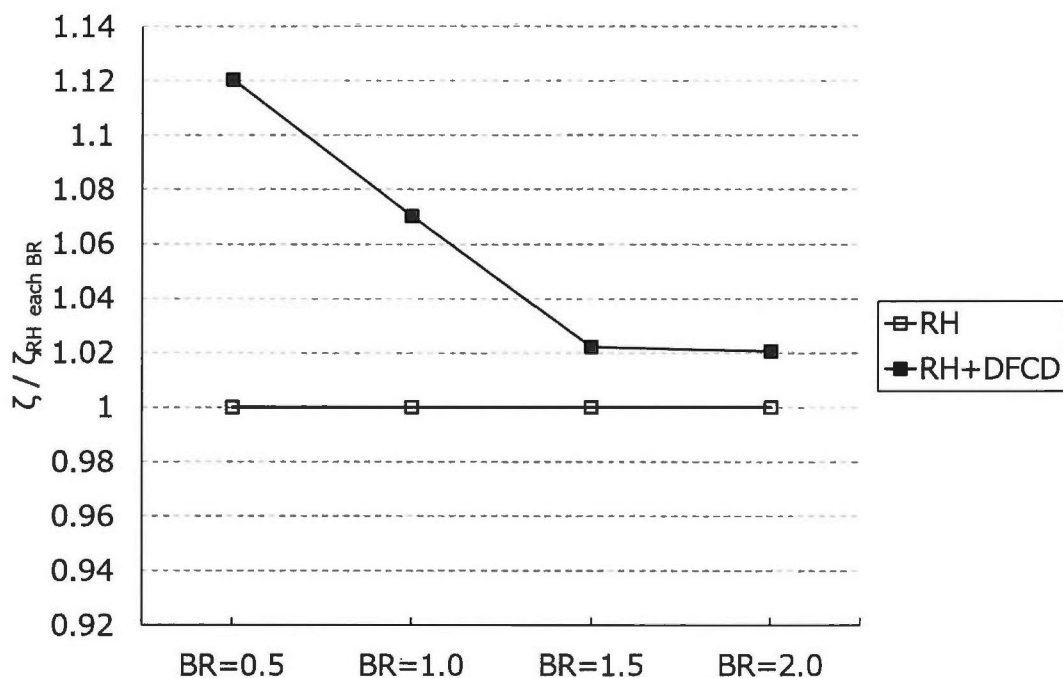


図 5.6.46 流量平均運動エネルギー損失係数 (Base 各吹き出し比基準)

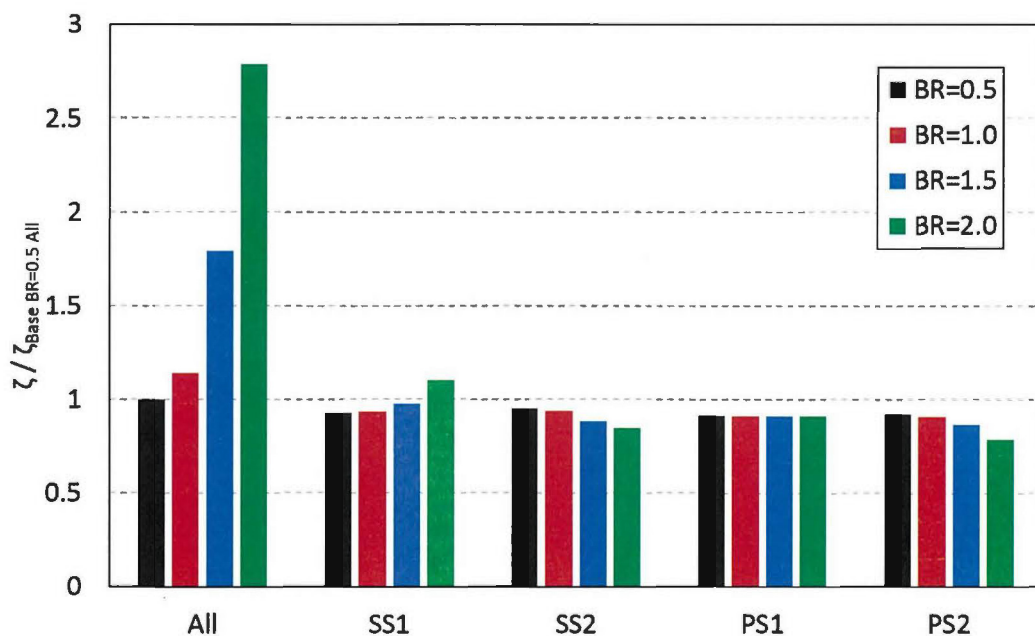


図 5.6.47 流量平均全圧損失 (吹き出し位置の効果)

5.6.3 Shaped hole の効果

本節では、Shaped hole の効果を調査するために、Shaped hole 単独翼と、Shaped hole にデ

デバイスを取り付けた条件の計算結果を示している。

5.6.3.1 フィルム効率

図 5.6. 48, 図 5.6. 49 には, Shaped hole 単独翼のフィルム効率分布を示している. Shaped hole を取り付けた場合には, 全体的に二次空気の付着性が高くなっているが, 唯一二次空気の付着性が得られなかったのは, 負圧面前縁領域であった. この領域は曲率が強く, 二次空気が lift-off し易いために, Shaped hole を用いてもフィルム効率分布が得られない. 図 5.6. 50, 図 5.6. 51 には, Shaped hole にデバイスを取り付けた場合のフィルム効率分布を示している. 負圧面と正圧面の傾向を比較すると, 正圧面ではいずれの吹き出し比においてもスパン方向にフィルム効率分布が広がっているのを確認できたが, 正圧面ではスパン方向の拡散が高 BR 条件で得ることができない. 特に, 前縁の領域では $BR=1.0$ の条件でも, 冷却孔近傍の領域はスパン方向の拡散が得られておらず, デバイスの効果が弱かったことが分かる.

図 5.6. 52, 図 5.6. 53 には, スパン方向平均のフィルム効率を示している. 平均フィルム効率のオーダーに関しては, 全体的にベース翼よりも高くなっており, Shaped hole の効果が一通り得られている. 図 5.6. 54, 図 5.6. 55 で面平均フィルム効率を観察すると, 負圧面側の領域では, ベース翼では $BR=1.0$ 急激に性能悪化する流量であったが, Shaped hole にすることで性能が悪化する流量を 1.5 程度にすることができている. また, 負圧面側では, 吹き出し比の増加に伴って徐々に面平均フィルム効率が低下する傾向が見られている. 一般的に Shaped hole を用いた研究では, 吹き出し比が 1.0 程度で Shaped hole の性能ピーク値を迎えるが, 負圧面ではこれが観察できなかった. 一方, 正圧面領域に関しては, Shaped hole の一般的な傾向が捉えられており, 吹き出し比が高くなっても面平均フィルム効率が上昇する現象が見られた.

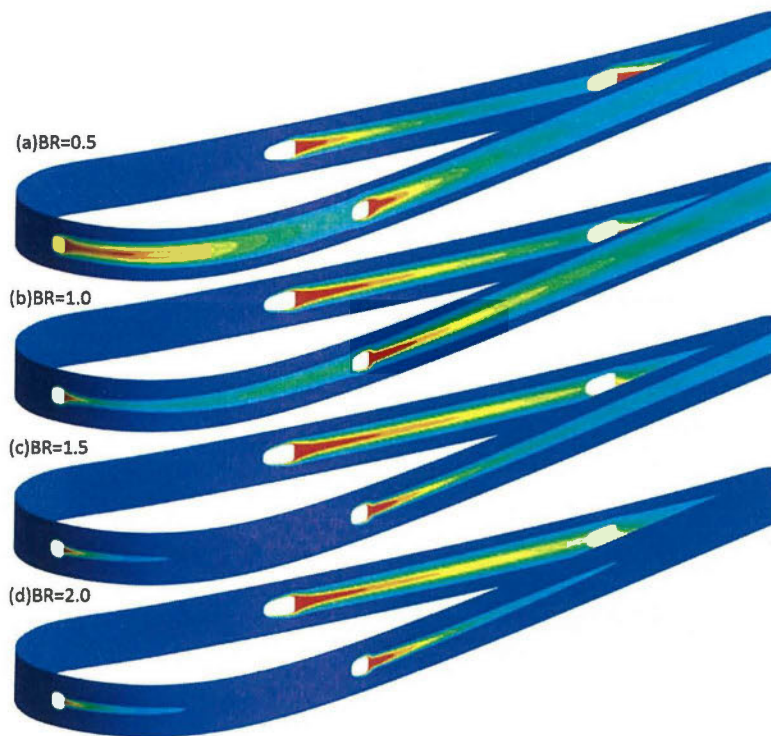


図 5.6.48 フィルム効率分布 (Shaped, 負圧面)

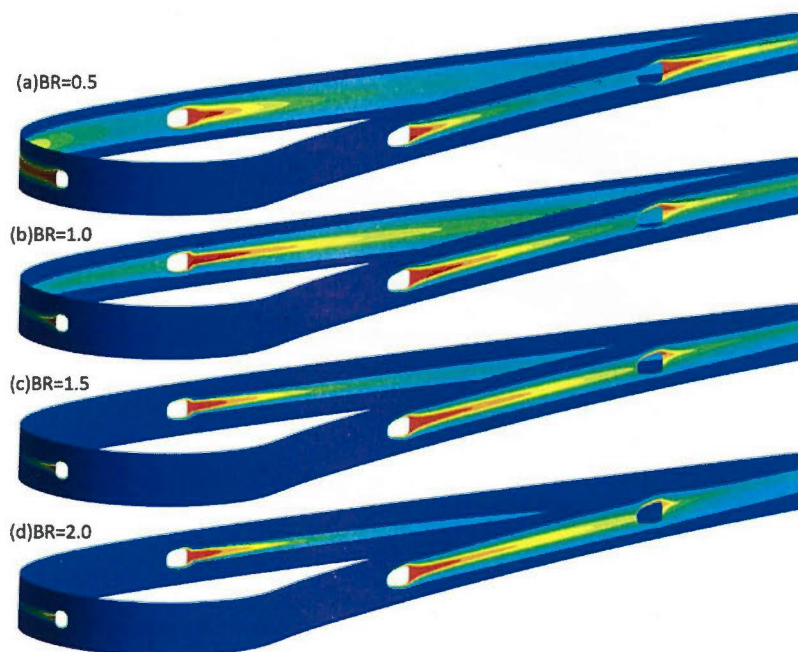


図 5.6.49 フィルム効率分布 (Shaped, 正圧面)

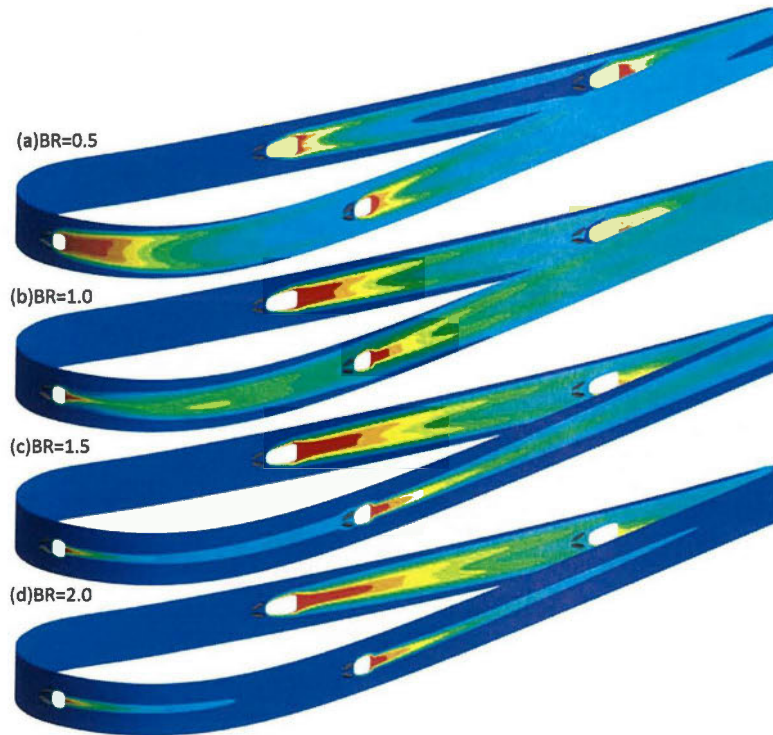


図 5.6.50 フィルム効率分布 (Shaped+DFCD, 負圧面)

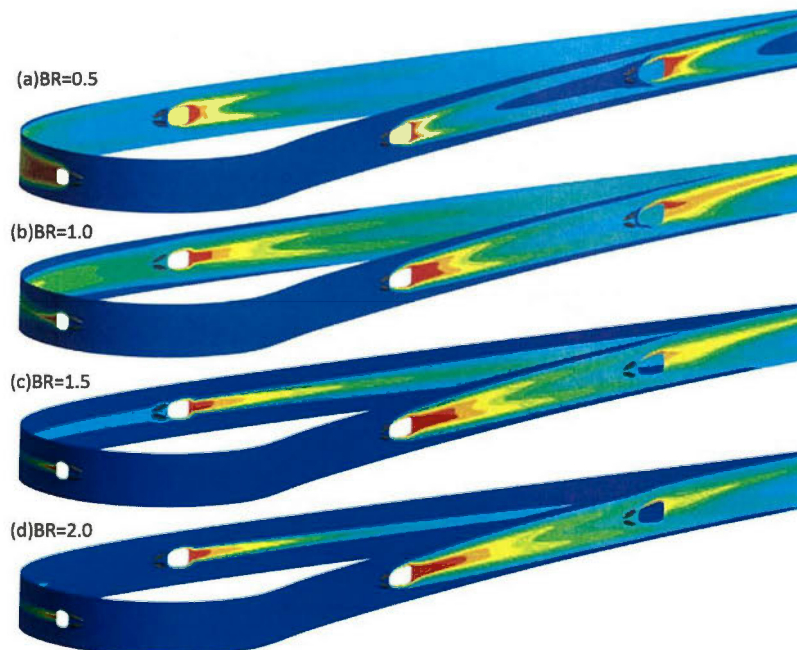


図 5.6.51 フィルム効率分布 (Shaped+DFCD, 正圧面)

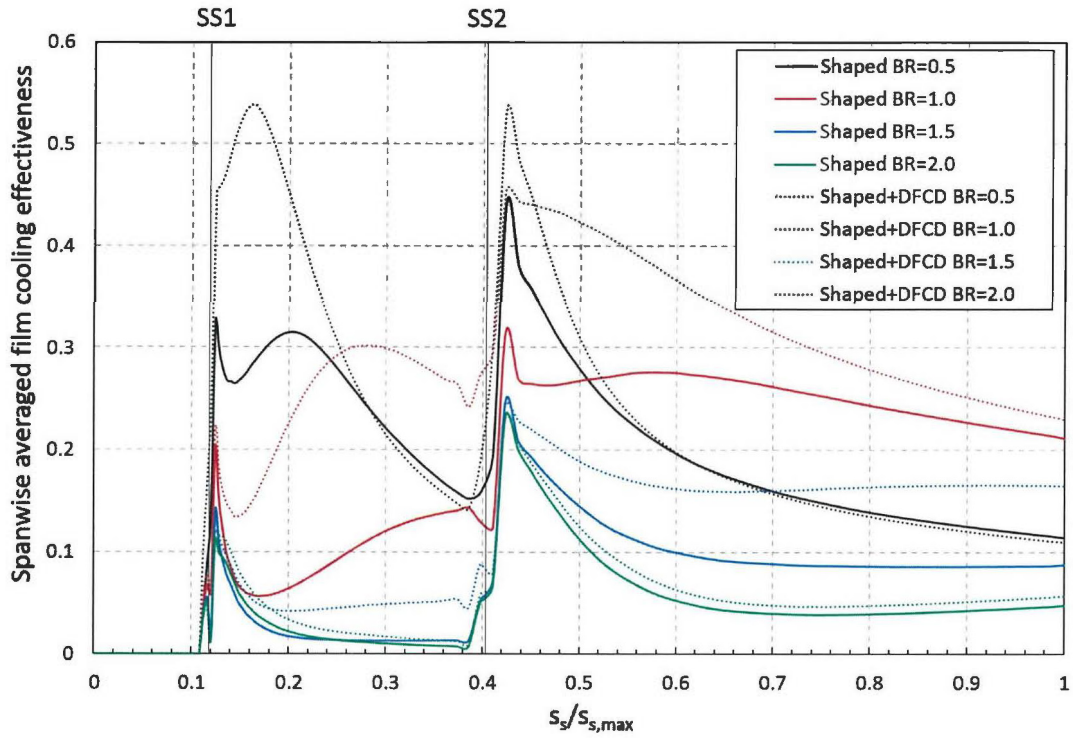


図 5.6.52 スパン方向平均フィルム効率 (負圧面)

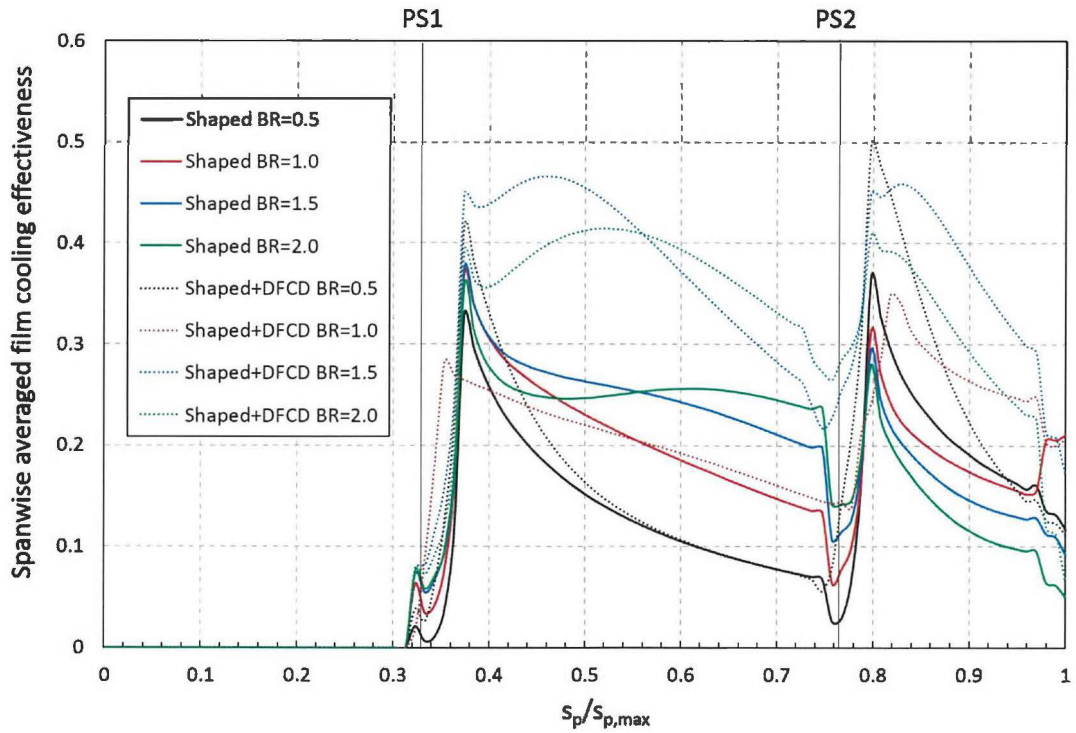


図 5.6.53 スパン方向平均フィルム効率 (正圧面)

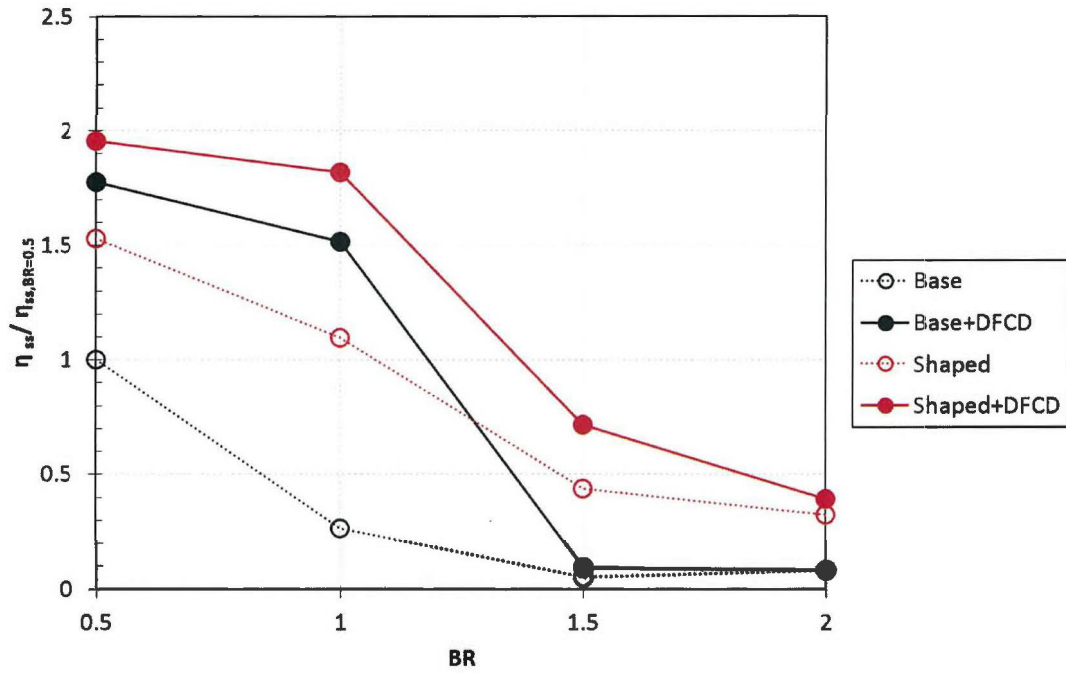


図 5.6.54 面平均フィルム効率 (負圧面)

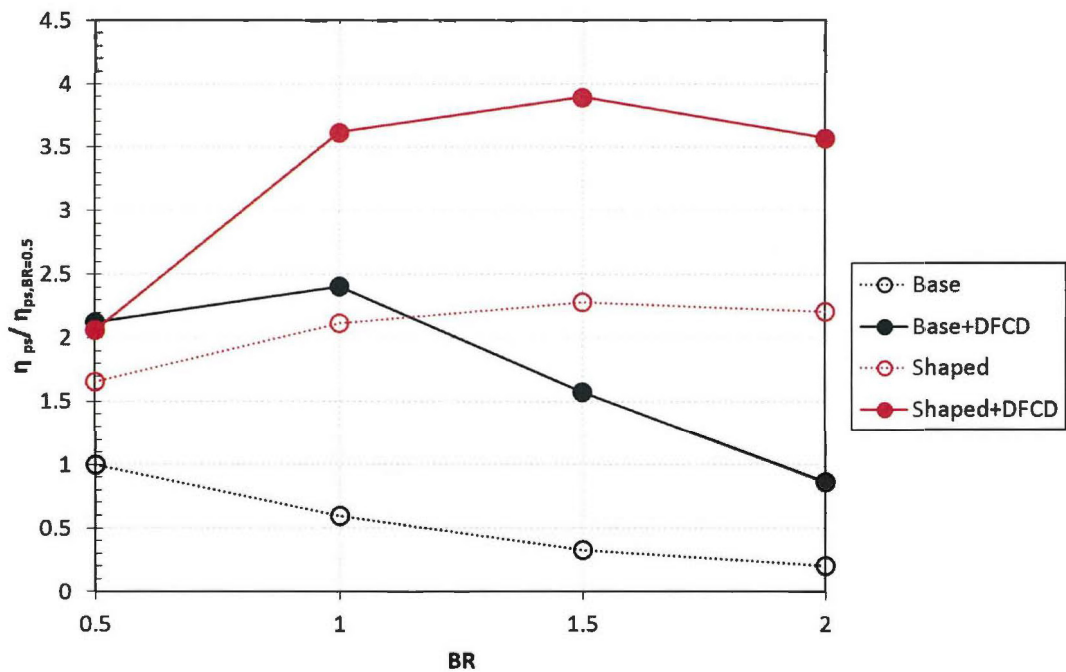


図 5.6.55 面平均フィルム効率 (正圧面)

5.6.3.2 空間温度場

図 5.6. 56～図 5.6. 59 には，負圧面前縁領域における空間温度場を示している．負圧面前縁領域では， $BR \leq 1.0$ の条件までは両翼共に，よく壁面に付着した温度場となっていた．しかし， $BR=1.5$ の条件では，Shaped 単独翼では，前縁領域で温度場が壁面から lift-off している様子が確認され， $BR=2.0$ では完全に二次空気が lift-off している．デバイス翼に関しては， $BR=1.5$ までの条件では，温度場の付着が確認できる．図 5.6. 60～図 5.6. 63 には，負圧面後縁領域での空間温度場を示している．ベース翼でも見られたように，負圧面下流のフラットの領域では，重ねあわせによって，スパン方向へ二次空気が拡散しており，吹き出し比が低い場合では横方向の温度場がより均一になっている．吹き出し比が高くなると，前縁側の二次空気が lift-off するために，二次空気の温度コアは SS1 からの吹き出しと，SS2 からの吹き出し比からのコアで互いに離れている．図 5.6. 64～図 5.6. 67 には，正圧面側での空間温度場を示している．PS2 からの吹き出しはスパン方向に不均一になっているが，これは主にプレナム内で発生しているクロスフローの影響である．正圧面側では，負圧面と比較すると全ての条件で温度場が付着しており，デバイスの効果が得られている．背いつ面では，デバイスを取り付けていない Shaped 単独翼でも十分二次空気の付着性が得られており，デバイスを取り付けることで更なる性能の向上が見込める．

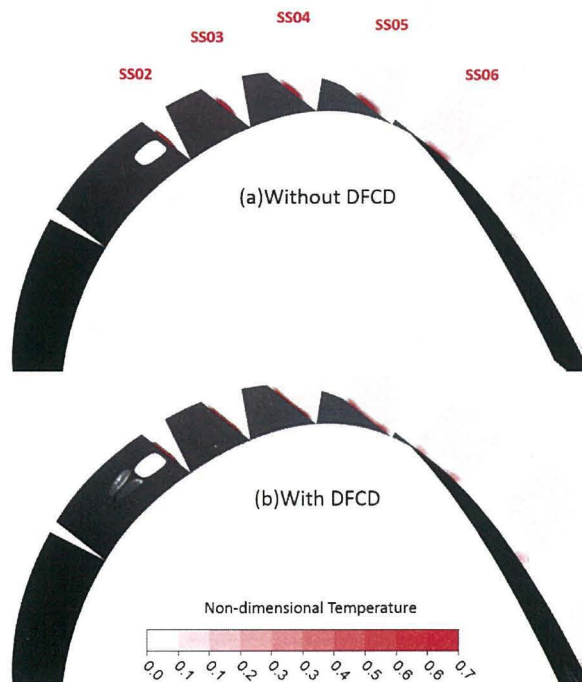


図 5.6. 56 空間温度場 ($BR=0.5$ ，負圧面前縁領域)

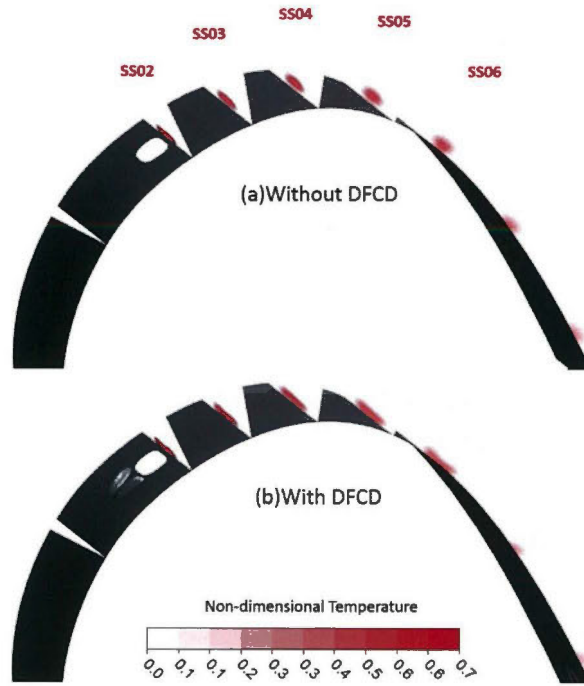


図 5.6.57 空間温度場 ($BR=1.0$, 負圧面前縁領域)

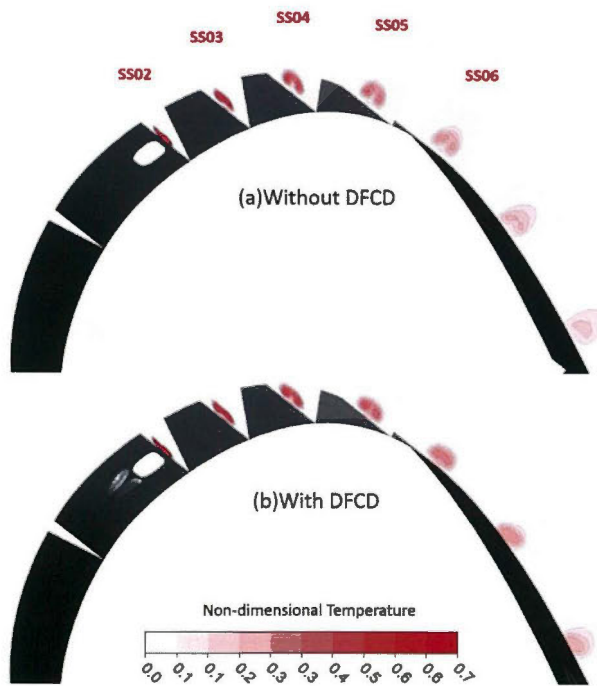


図 5.6.58 空間温度場 ($BR=1.5$, 負圧面前縁領域)

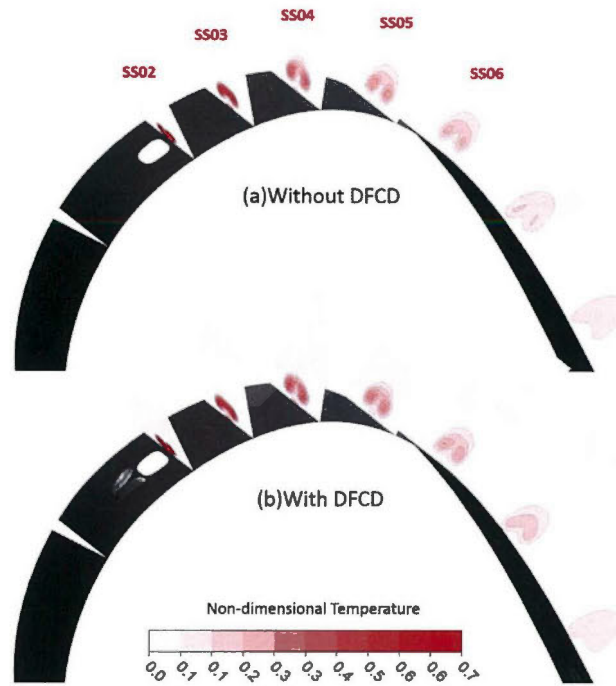


図 5.6.59 空間温度場 ($BR=2.0$, 負圧面前縁領域)

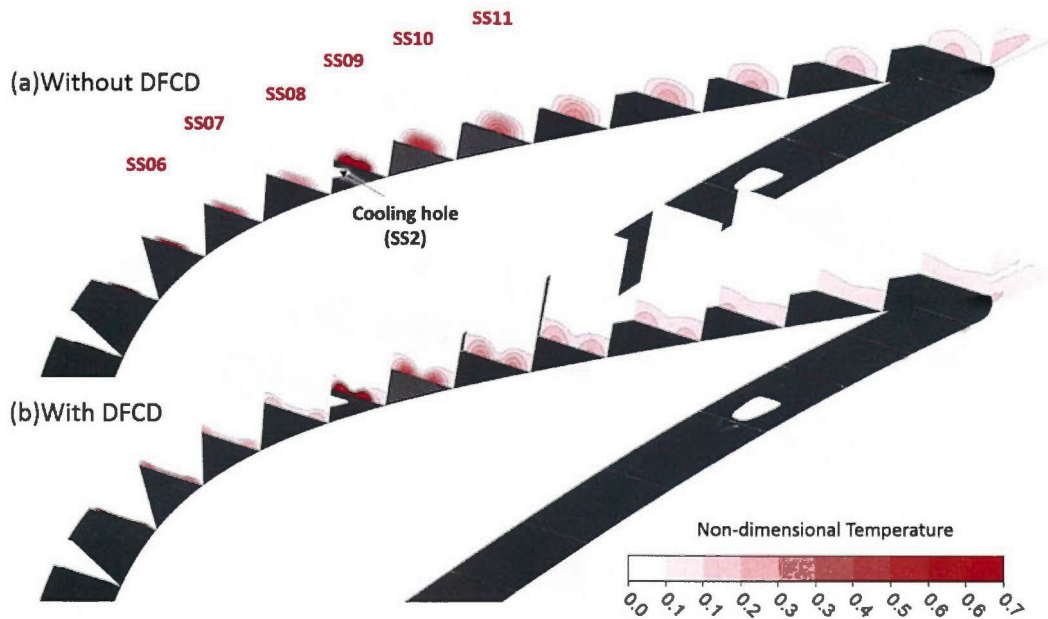


図 5.6.60 空間温度場 ($BR=0.5$, 負圧面後縁領域)

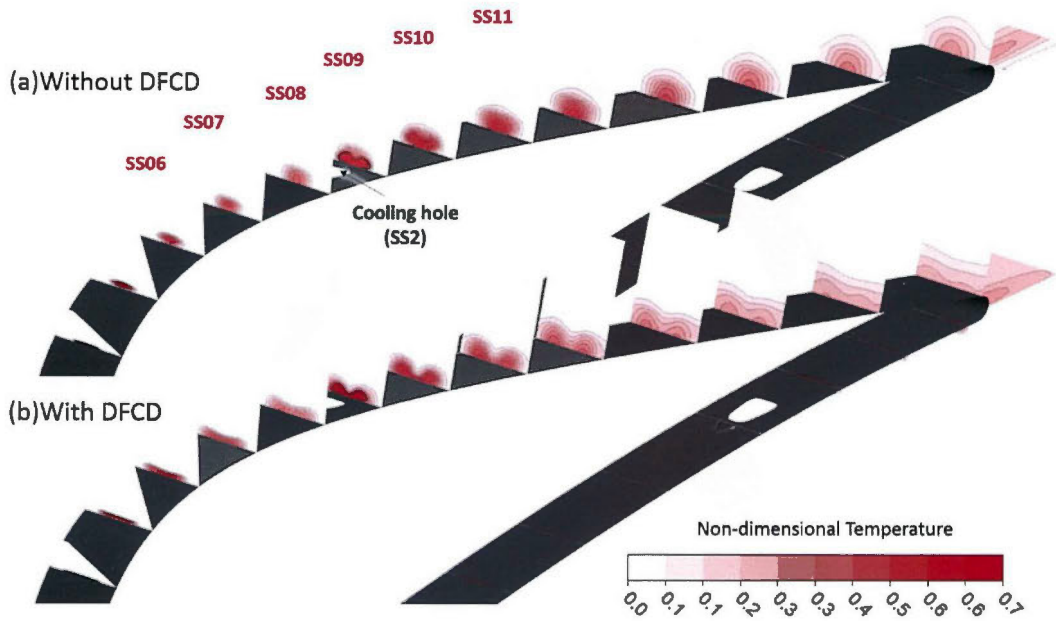


図 5.6.61 空間温度場 ($BR=1.0$, 負圧面後縁領域)

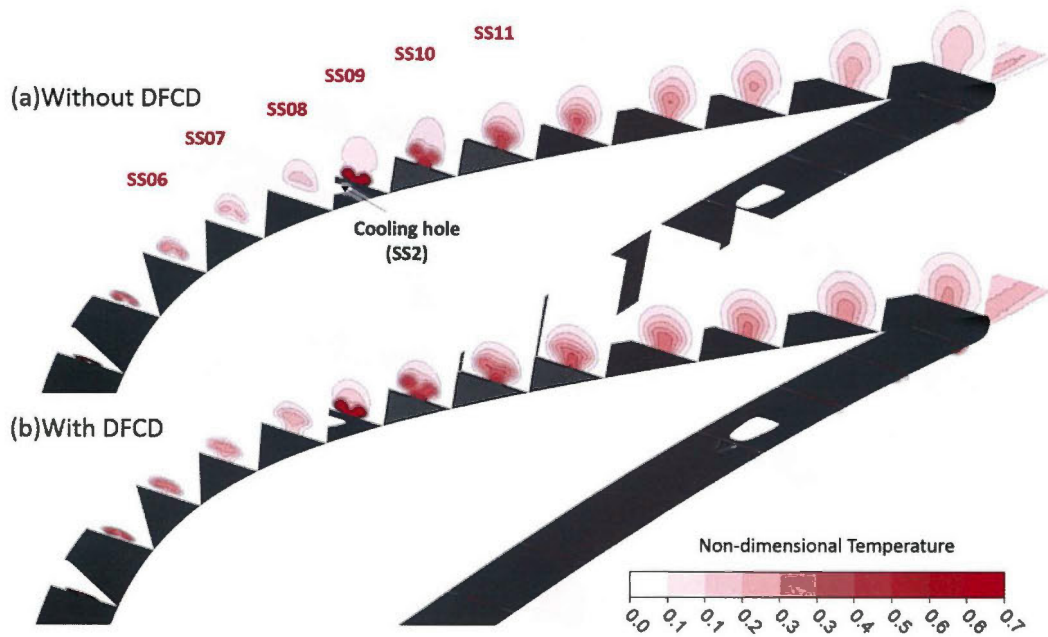


図 5.6.62 空間温度場 ($BR=1.5$, 負圧面後縁領域)

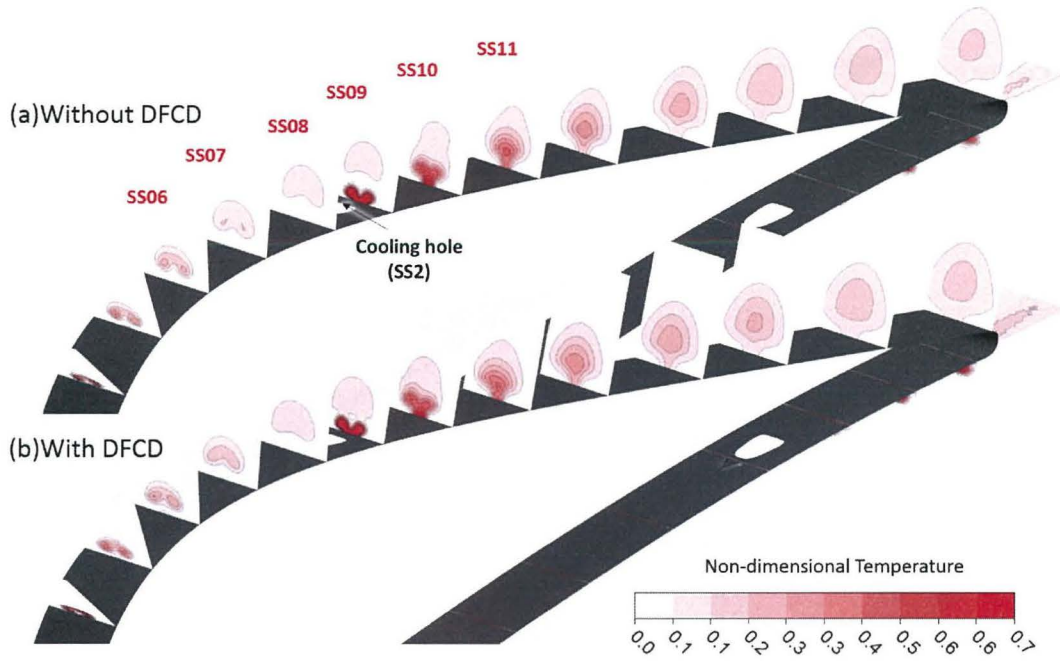


図 5.6.63 空間温度場 ($BR=2.0$, 負圧面後縁領域)

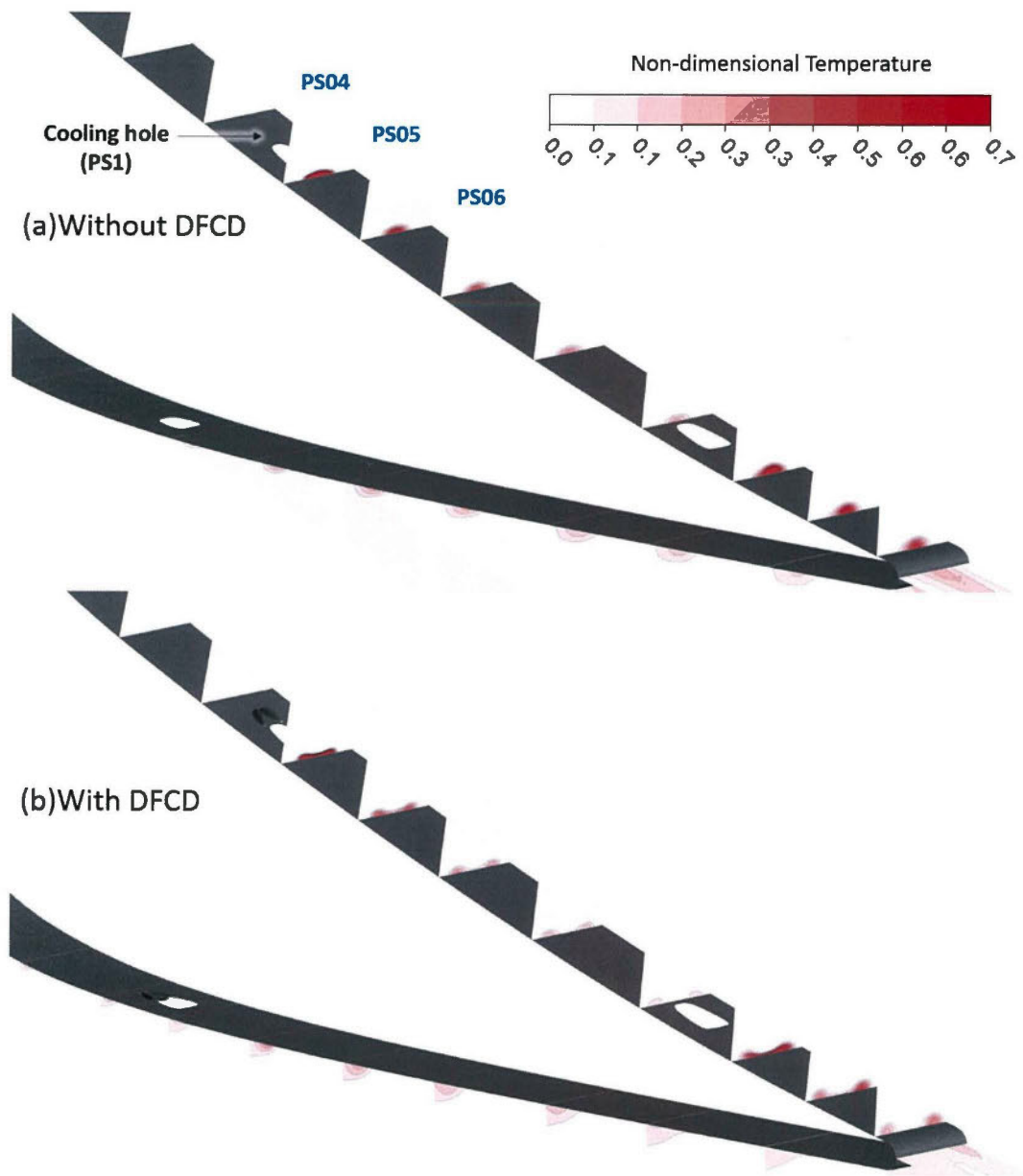


図 5.6.64 空間温度場 ($BR=0.5$, 正圧面領域)

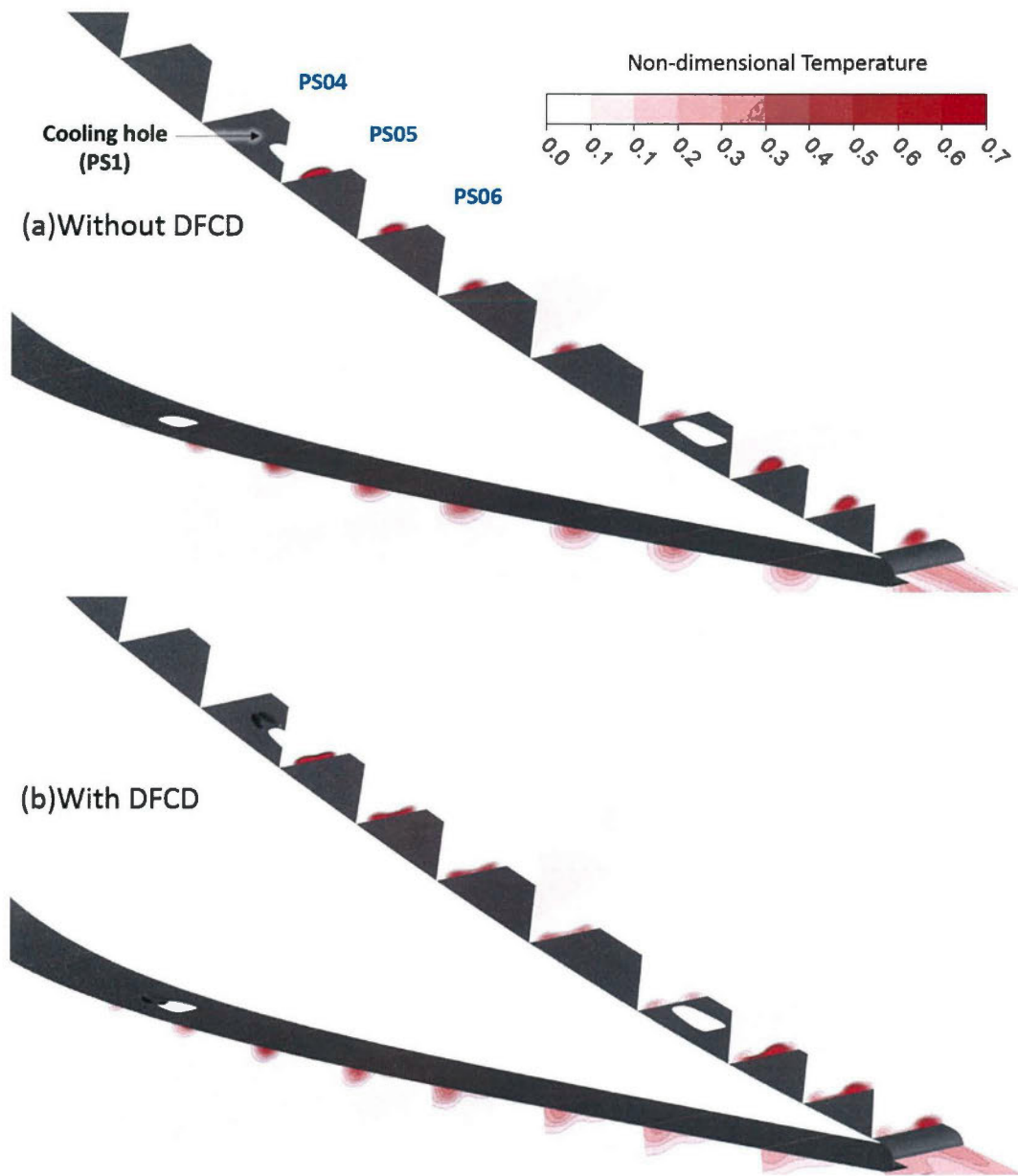


図 5.6.65 空間温度場 ($BR=1.0$, 正圧面領域)

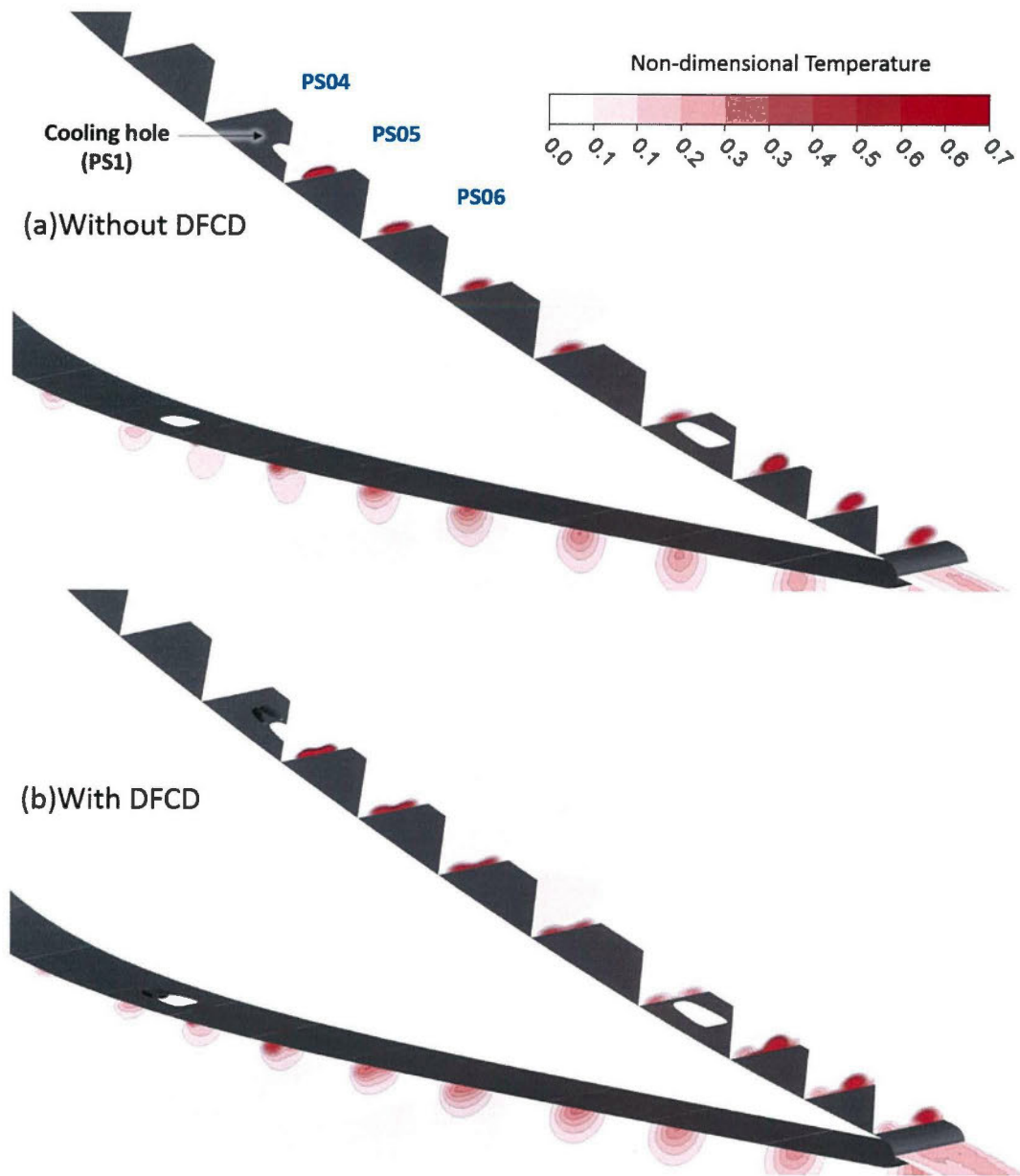


図 5.6.66 空間温度場 ($BR=1.5$, 正圧面領域)

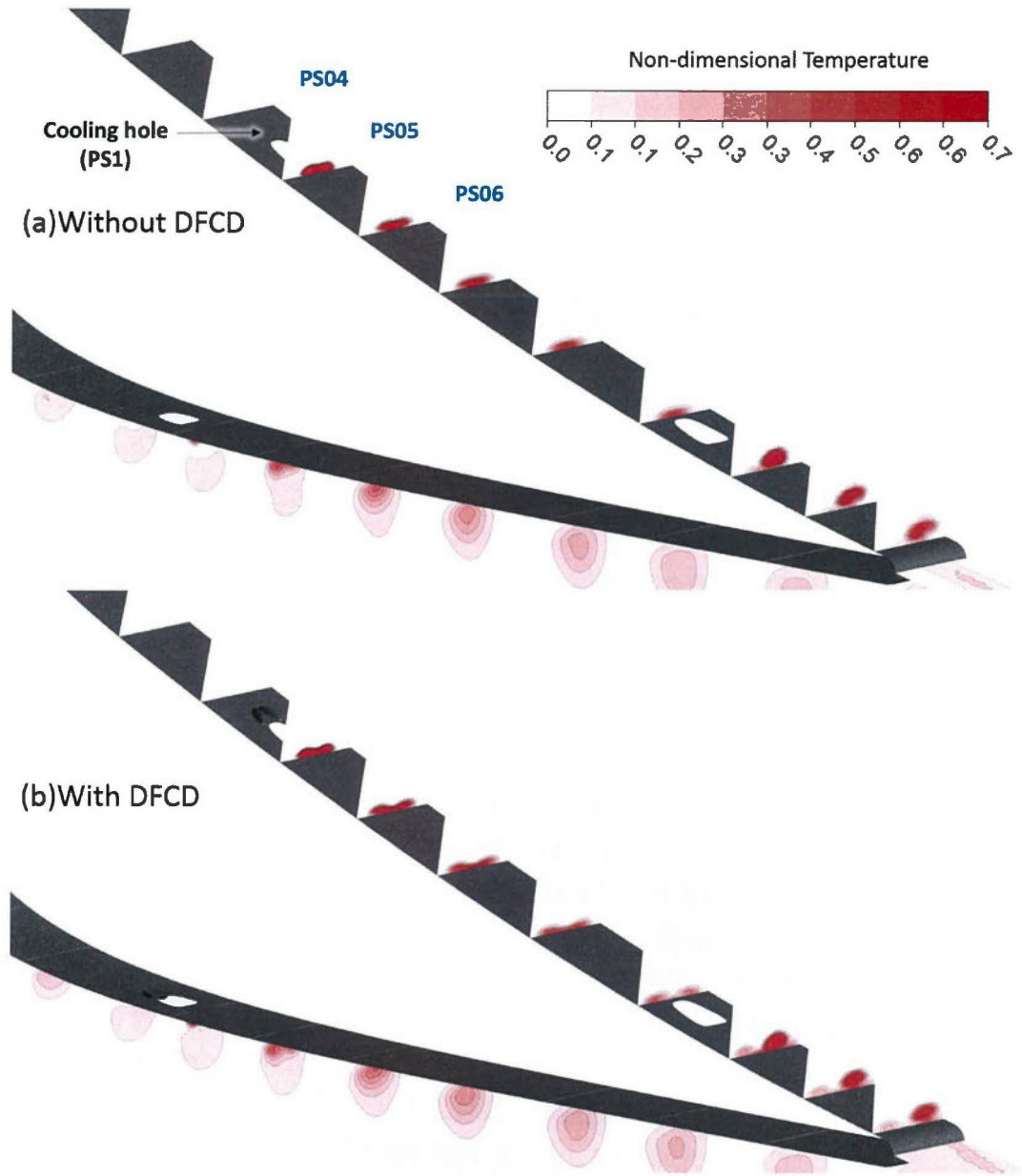


図 5.6.67 空間温度場 ($BR=2.0$, 正圧面領域)

5.6.3.3 渦度

図 5.6. 68 には、 $BR=0.5$ における、負圧面前縁領域での流れ方向渦度を示す。デバイスの有無で渦の回転方向を比較すると、両形態の渦の回転方向が一致している様子が観察される。そのため、 $BR=0.5$ の条件に関しては、吹き出しによる渦のペアがほとんど確認することができなかった。一方で、図 5.6. 69 には、 $BR=1.0$ における渦度分布を示しているが、この条件下では、デバイスを設置していない条件で、 $BR=0.5$ の条件とは、反対方向の渦ペアができており、吹き出しの量も多いことから、 $BR=1.0$ では、冷却孔からの CRVP が形成されているように見える。デバイスを設置した条件に関しては、デバイスを設置しない条件では CRVP が存在しているため、冷却孔内部から CRVP がこの条件でも形成されたと考えられるが、デバイスから発生する渦の規模が大きいため、最終的にはほとんど冷却孔からの CRVP を確認することはできない。 $BR \geq 1.5$ の条件下では、図 5.6. 70、図 5.6. 71 に示しているように、今度は CRVP が大規模化することで、デバイスから発生した渦構造はほとんど前縁領域から消えてしまっている。前縁の領域に関しては、フィルム効率のコンターでも見られたように、冷却空気の付着性が低い。これは、前縁領域では、Shaped hole を用いても、CRVP の制御には限界があることを示している。

図 5.6. 72～図 5.6. 75 には、負圧面下流領域における流れ方向渦度の分布を示している。負圧面下流に関しては、前縁領域とは異なり、デバイスを設置した条件では、低い吹き出し比から $BR=1.5$ 程度までは、デバイスから発生した渦による渦度分布を観察することができ、CRVP の制御能力を有していることが分かる。 $BR=2.0$ に関しては、図中に示したように、CRVP が非常に大規模化するために、DFCD の能力を発揮できていない。実際にこの傾向は、図 5.6. 52 の平均フィルム効率にも示されており、 $BR=2.0$ の条件下では、DFCD を設置した前後でも平均フィルム効率の変化がほとんど起こっていない。

図 5.6. 76～図 5.6. 79 には、正圧面における各吹き出し比の流れ方向渦度を示している。図 5.6. 79 のデバイスを設置していない条件を見ると、冷却孔の下流側で CRVP が形成されている様子が分かる。 $BR=2.0$ の条件下で、デバイスを設置した場合での渦度を見ると、デバイスを設置しない条件の渦度とは逆回転の渦度が生じていることが分かる。これは、 $BR=2.0$ の状態でも、正圧面の領域では、CRVP の制御能力が高くなっていることを示しており、負圧面とは全く異なる傾向を示している。その証拠に、図 5.6. 55 でスパン方向平均フィルム効率を見ると、たとえ、 $BR=2.0$ であってもデバイスを設置することで、フィルム効率が大幅に上昇していることが示されている。図 5.6. 44 のような、単純円筒型冷却孔のケースと比較しても今回は、翼の正圧面ではほとんど冷却孔からの CRVP が形成されおらず、Shaped hole を取り付けることによって、DFCD の効果がより発揮され易い流れ場になっていることがわかった。

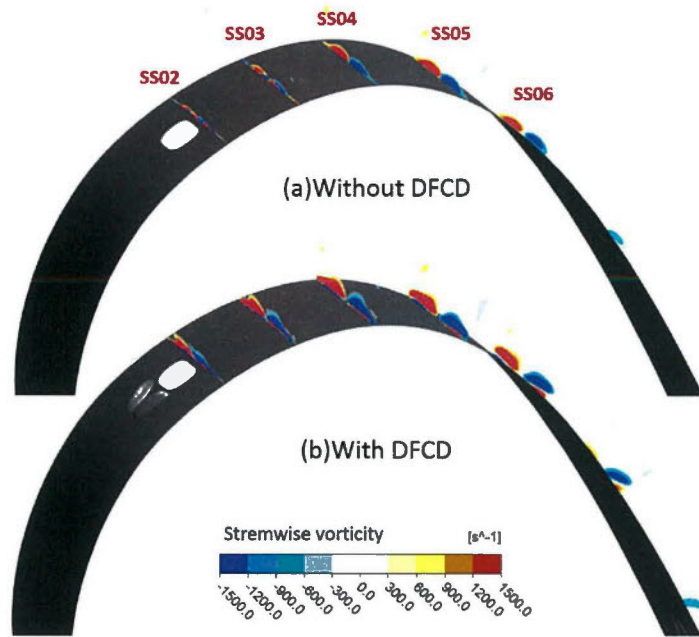


図 5.6. 68 渦度分布 ($BR=0.5$, 負圧面前縁領域)

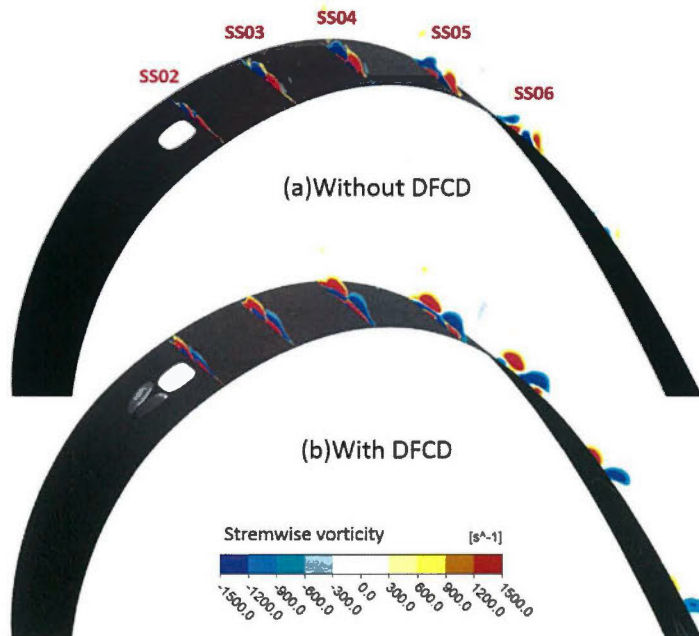


図 5.6. 69 渦度分布 ($BR=1.0$, 負圧面前縁領域)

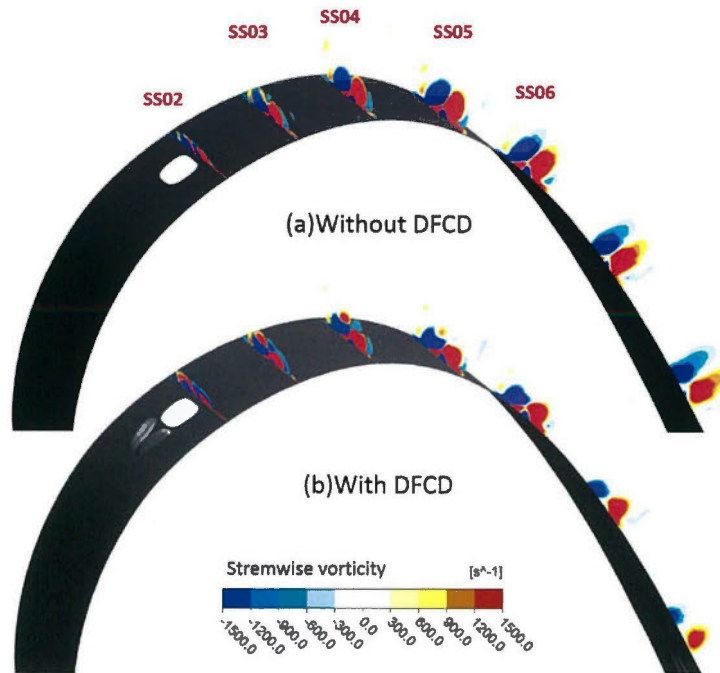


図 5.6.70 渦度分布 ($BR=1.5$, 負圧面前縁領域)

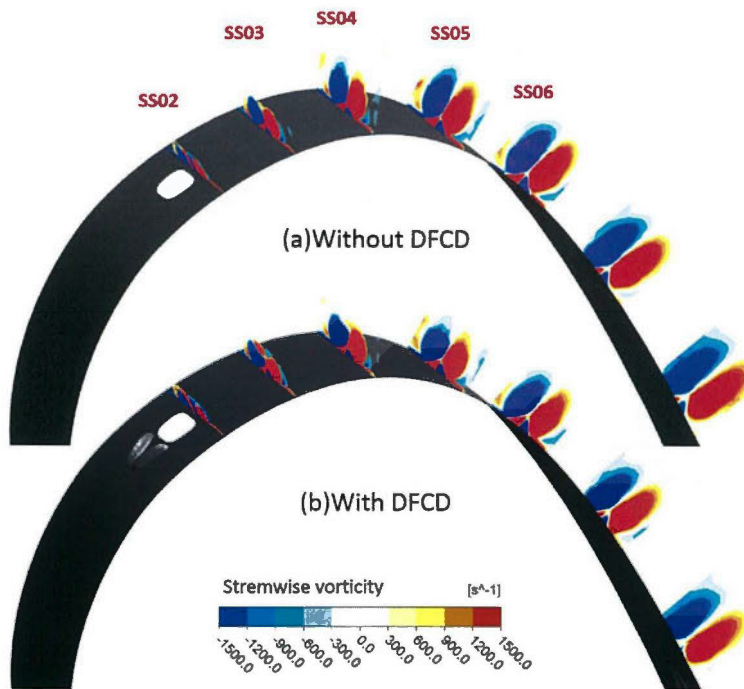


図 5.6.71 渦度分布 ($BR=2.0$, 負圧面前縁領域)

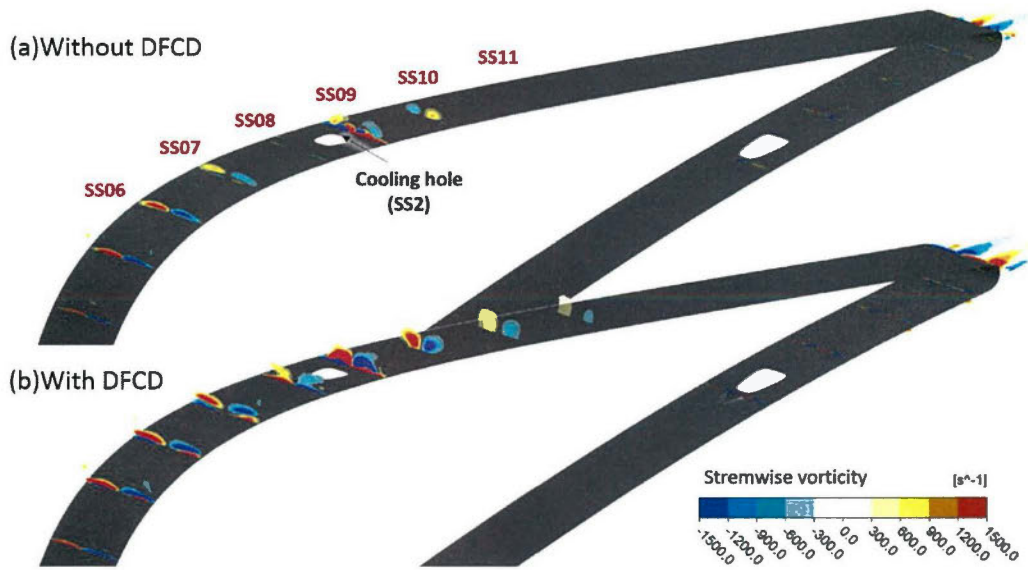


図 5.6.72 渦度分布 ($BR=0.5$, 負圧面後縁領域)

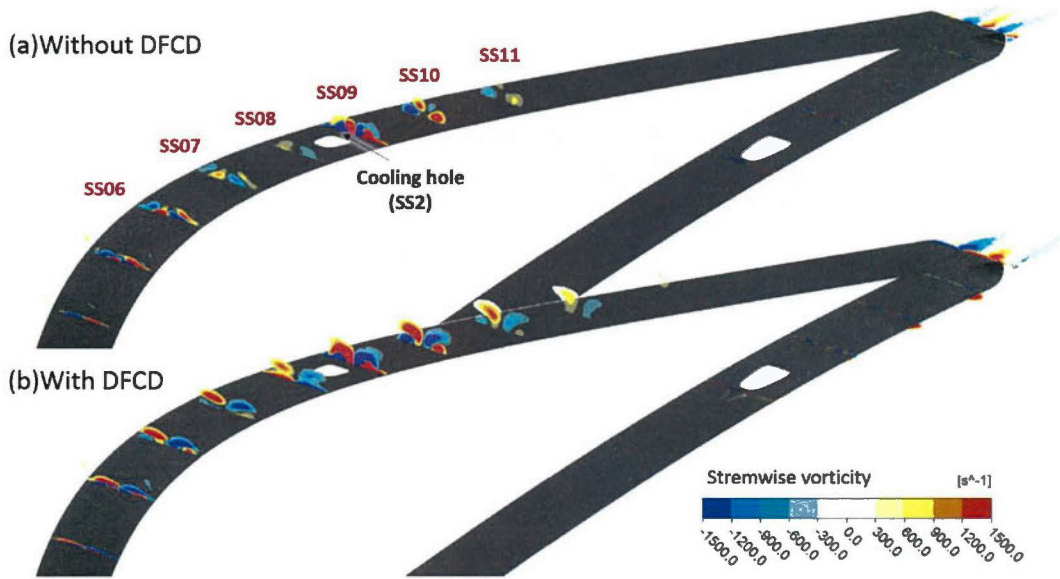


図 5.6.73 渦度分布 ($BR=1.0$, 負圧面後縁領域)

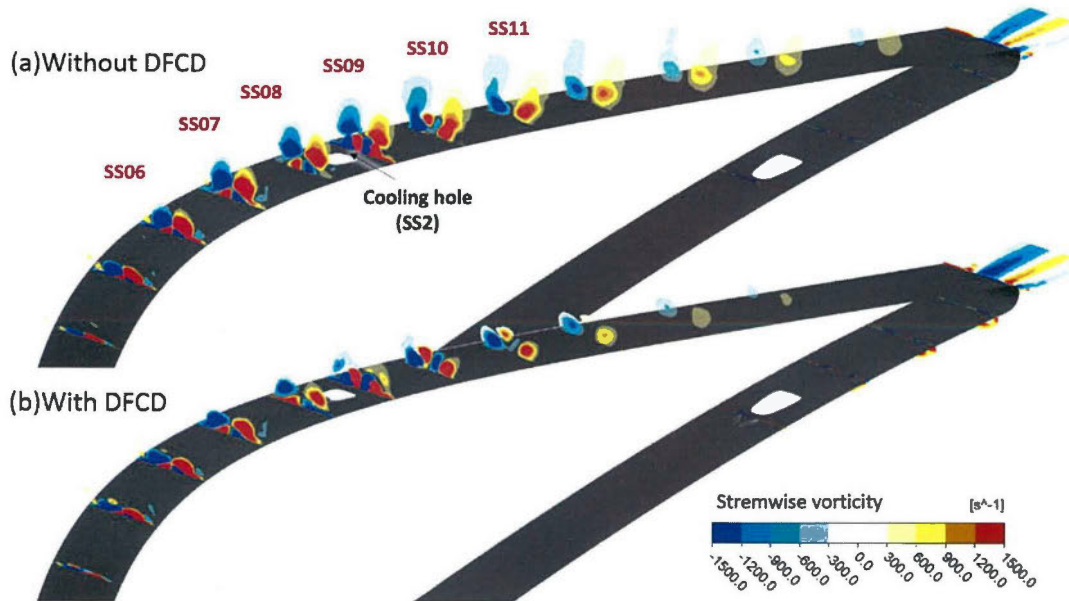


図 5.6.74 渦度分布 ($BR=1.5$, 負圧面後縁領域)

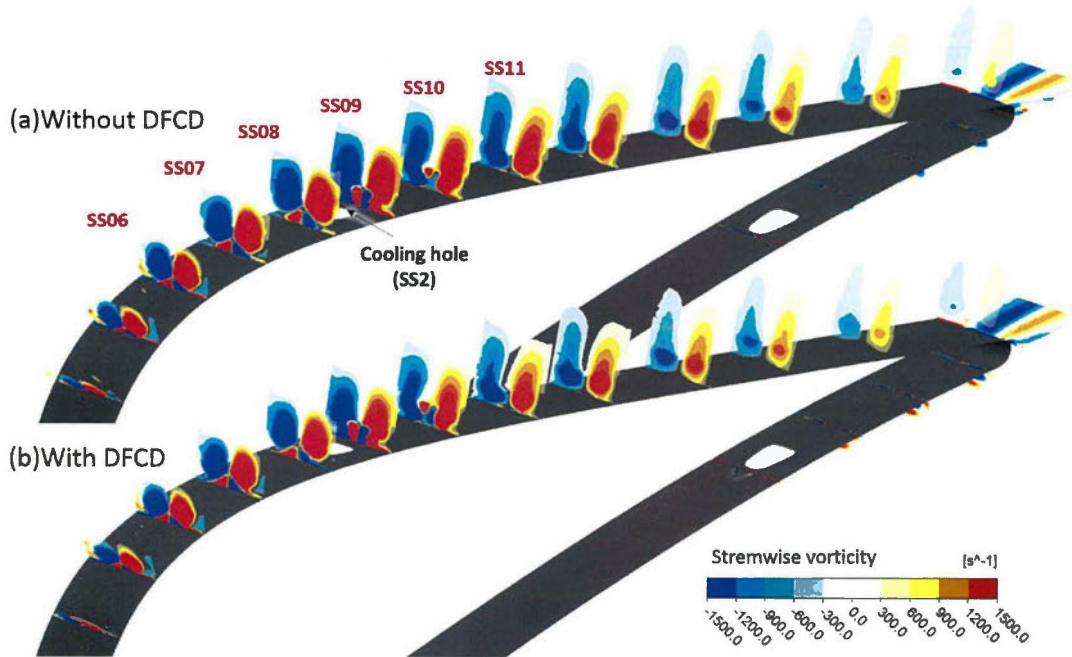


図 5.6.75 渦度分布 ($BR=2.0$, 負圧面後縁領域)

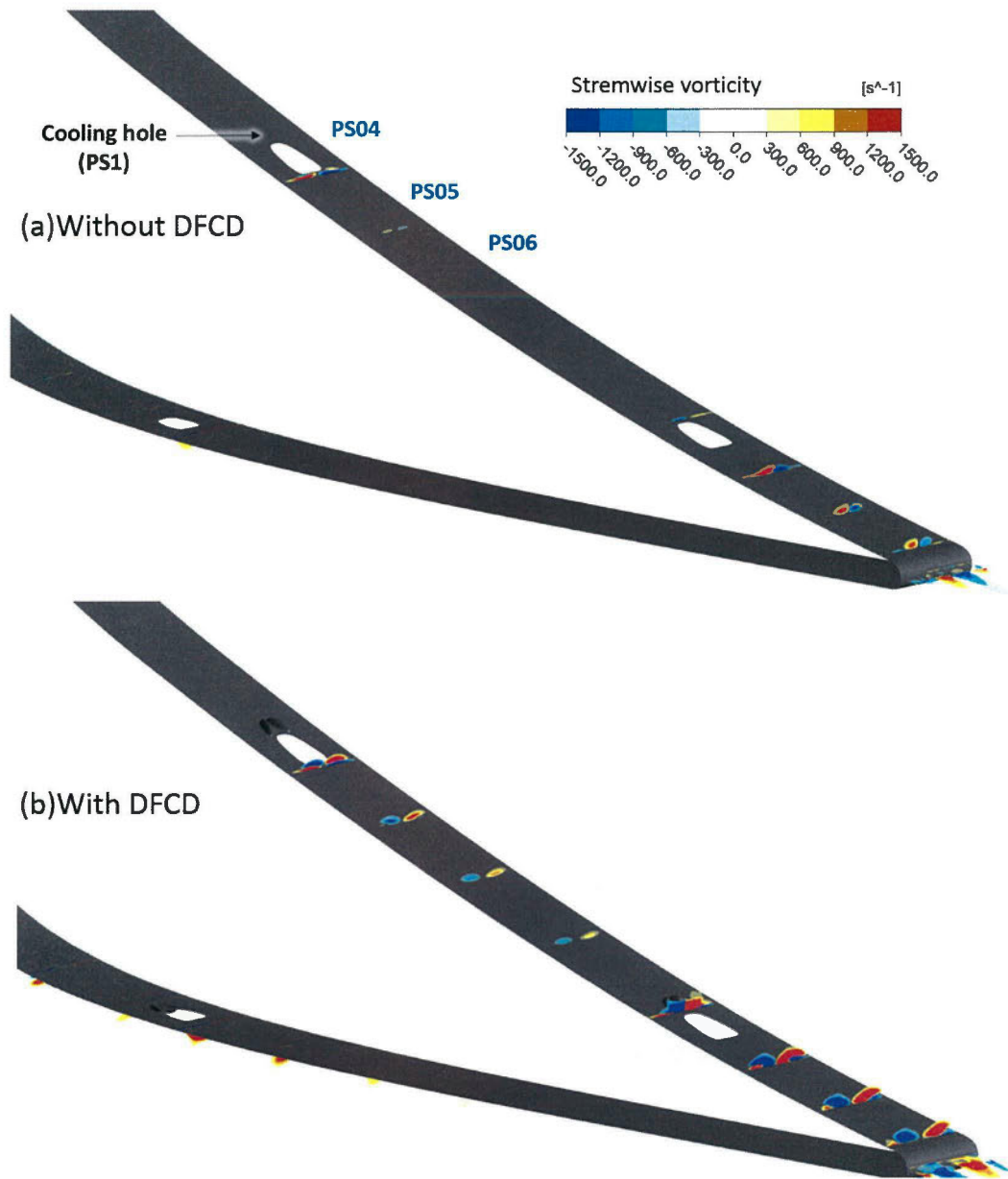


図 5.6.76 渦度分布 (BR=0.5, 正圧面領域)

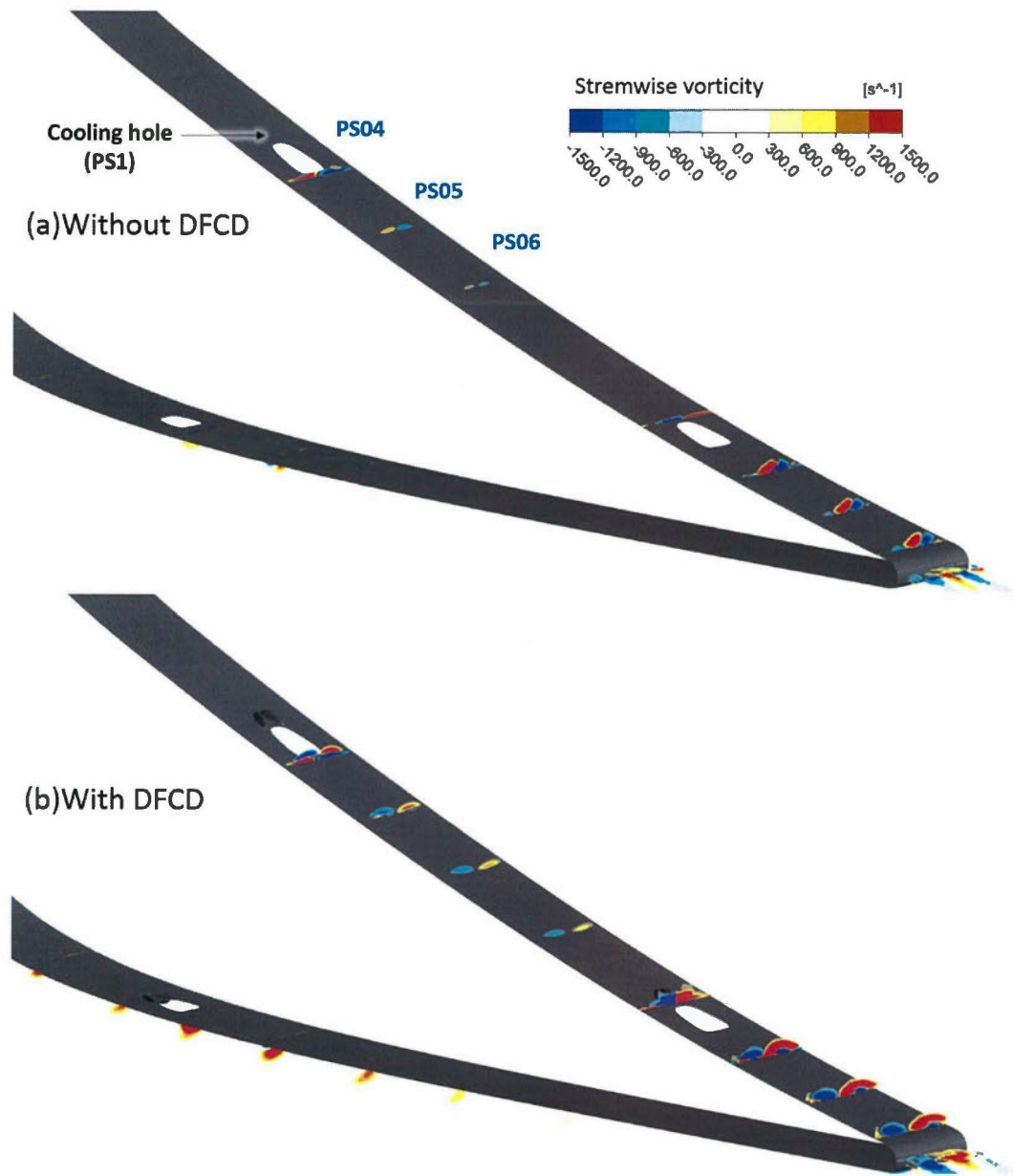


図 5.6.77 渦度分布 ($BR=1.0$, 正圧面領域)

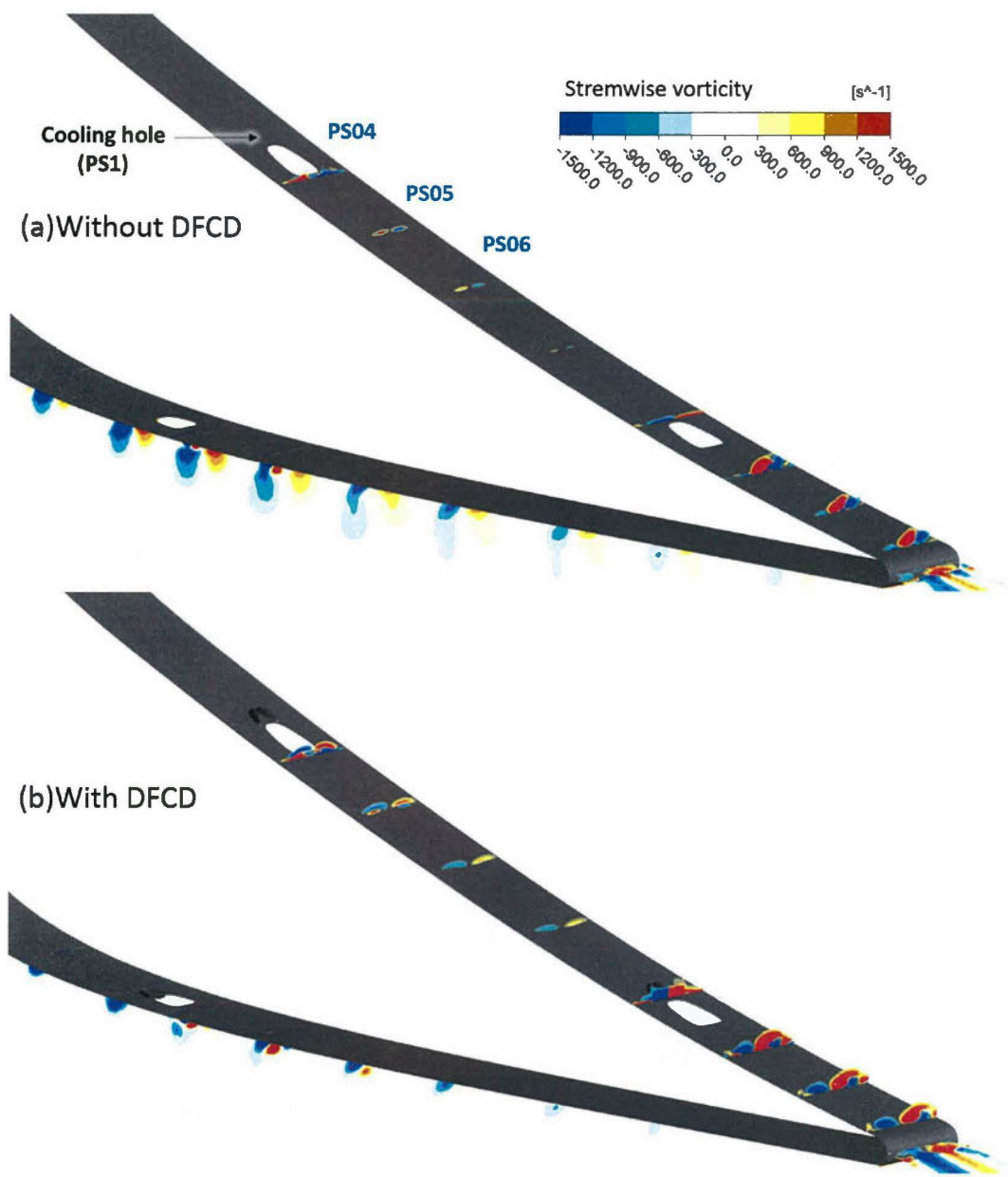


図 5.6.78 渦度分布 ($BR=1.5$, 正圧面領域)

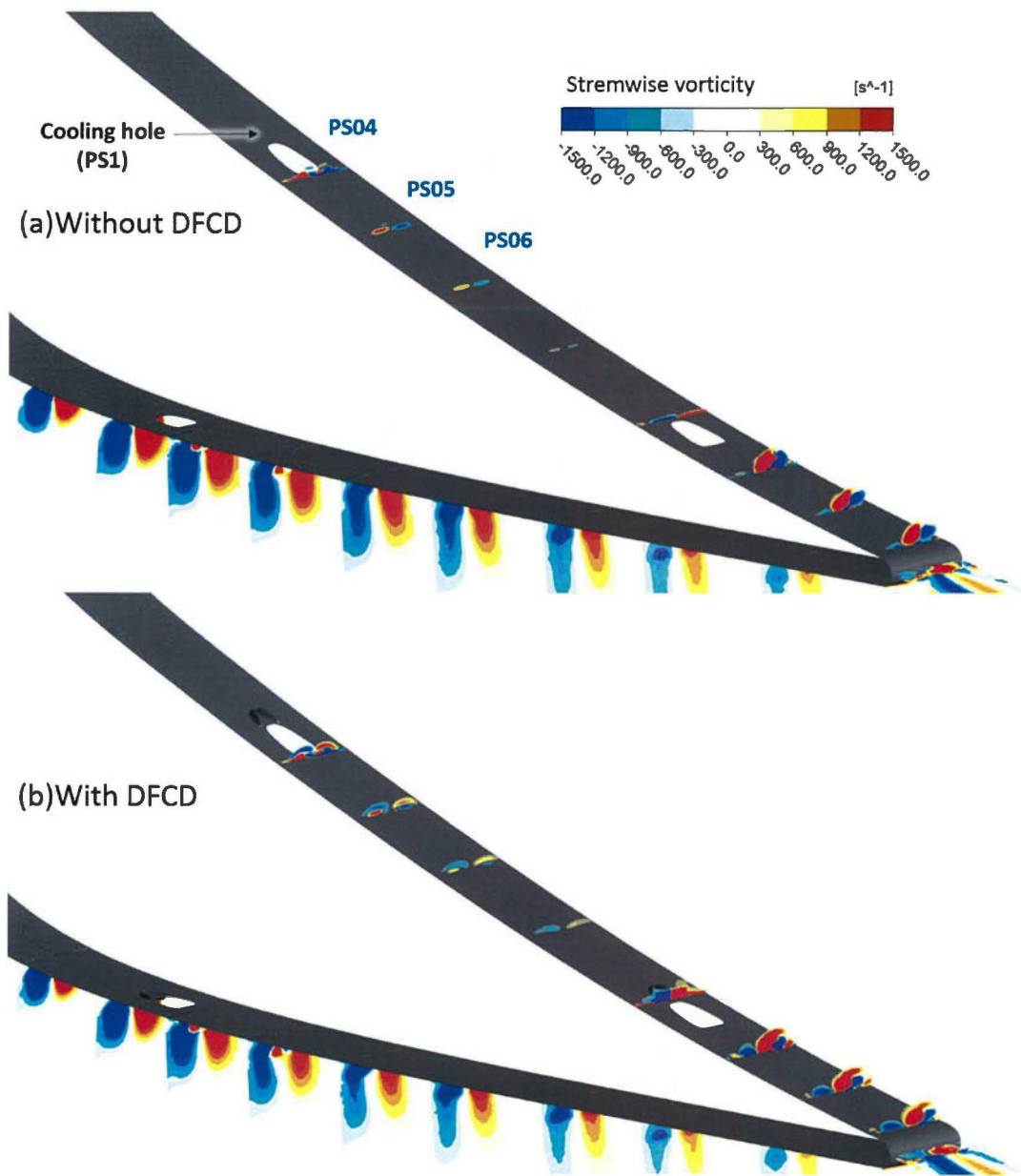


図 5.6.79 渦度分布 ($BR=2.0$, 正圧面領域)

5.6.3.4 全圧損失

図 5.6. 80 には、計算領域出口における流量平均全圧損失係数を示している。Shaped hole 系の結果と、ベース翼系の結果を比較すると、損失の絶対値に関しては概ね吹き出し比に依存しているため、吹き出し比増加に伴って損失は大幅に増加するが、冷却孔形状やデバイスによる損失の増加量は小さいことが分かる。図 5.6. 81 のようにベースの各吹き出し比を基準にすると、Shaped hole を取り付けることによって、低い吹き出し比条件では損失が低下する傾向が見られるが、高い吹き出し比ほど、Shaped hole 系列の場合では全圧損失が増加することが分かる。DFCD を取り付けた形態に関しては、RH 系列の場合が SH 系列よりも概ね全圧損失が低くなっており、Shaped hole を取り付けたほうが、損失面ではデメリットが存在するといえる。

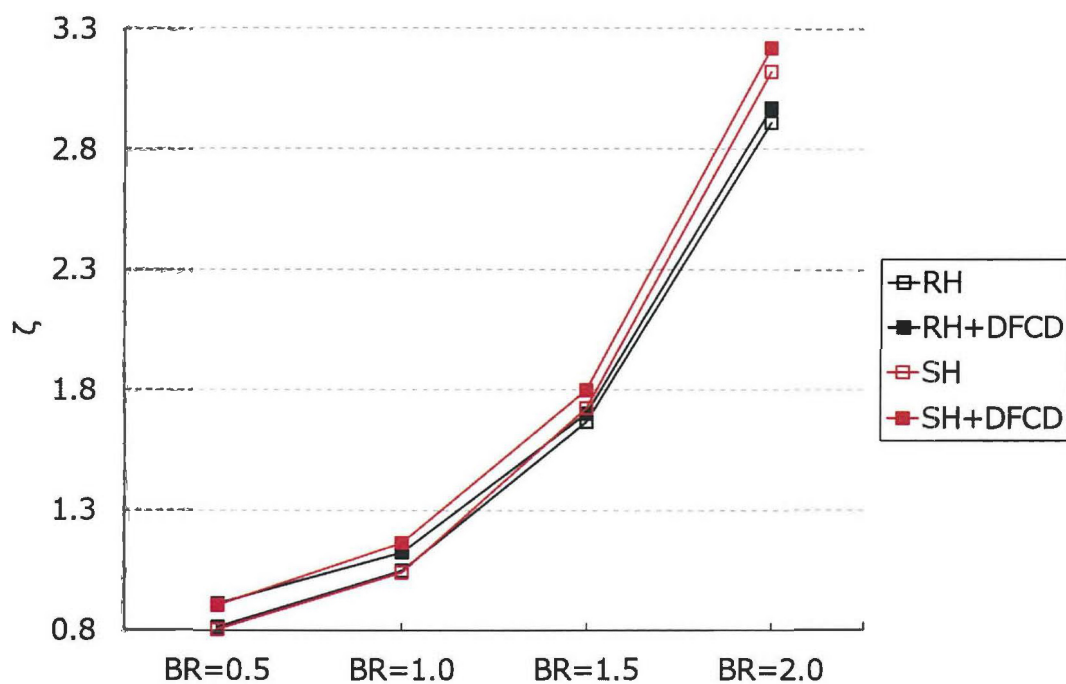


図 5.6. 80 流量平均運動エネルギー損失係数 (Base BR=0.5 基準)

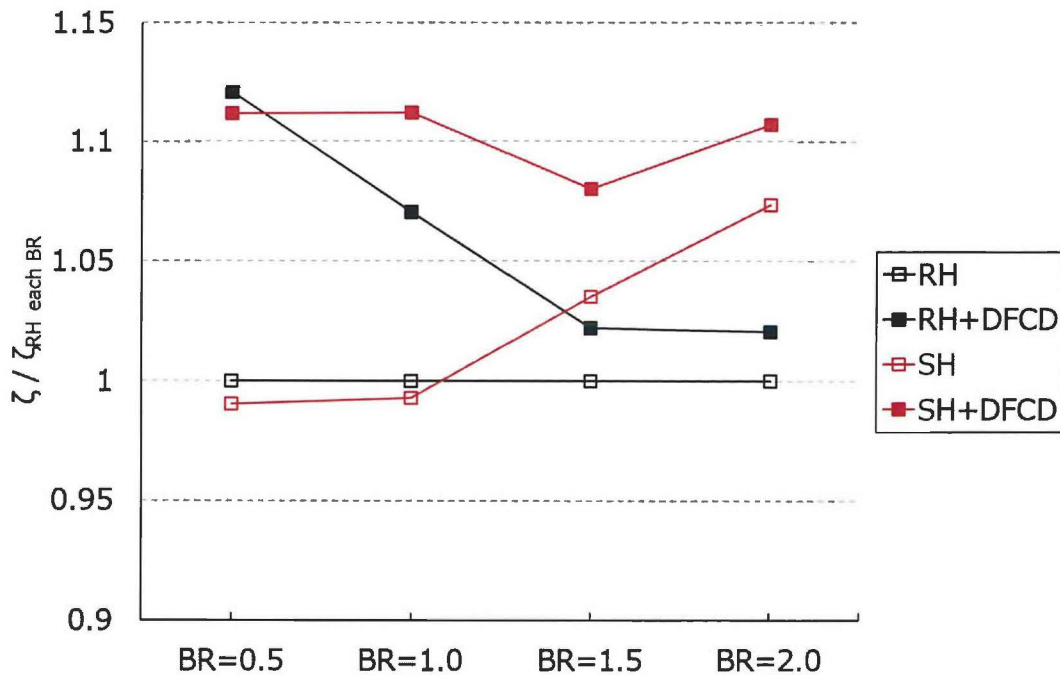


図 5.6.81 流量平均運動エネルギー損失係数 (Base 画吹き出し比基準)

5.6.4 従来技術との比較

本節では、翼面フィルム冷却における流れ制御デバイスの効果を検証するが、従来存在するフィルム冷却の高性能化技術と性能の比較を行う。比較対象にする高性能化技術は、本論分の第一章で述べたように冷却孔の形状を変形する技術や、冷却孔周辺の形状を変形する技術とし、Shaped hole と Trench hole を取り上げることにした。

5.6.4.1 比較形状

(1) 供試翼形状

図 5.6.82 には、今回の検証で用いた供試翼形状を示している。RH 翼と 777SH 翼は前節までで用いた供試翼であり、RH 翼は冷却孔形状が単純円筒型となっている。冷却孔の設置位置も前節までと同じである。777SH 翼は RH 翼の冷却孔形状が 777Shaped hole となった供試翼である。777SH 翼改は、正圧面の後縁側に設置されている冷却孔の傾斜角を 777SH 翼から改良した供試翼である。これは、777SH 翼後縁の冷却孔形状が極端に Shaped hole を細長い形にしてしまったため、傾斜角を変更することで、777Shaped hole の出典論文に近い形状を再現するためである。この後縁の冷却孔の傾斜角は、PS1 の冷却孔と同じであり、冷却孔の設置位置自体は 777SH 翼から変更を行っていない。

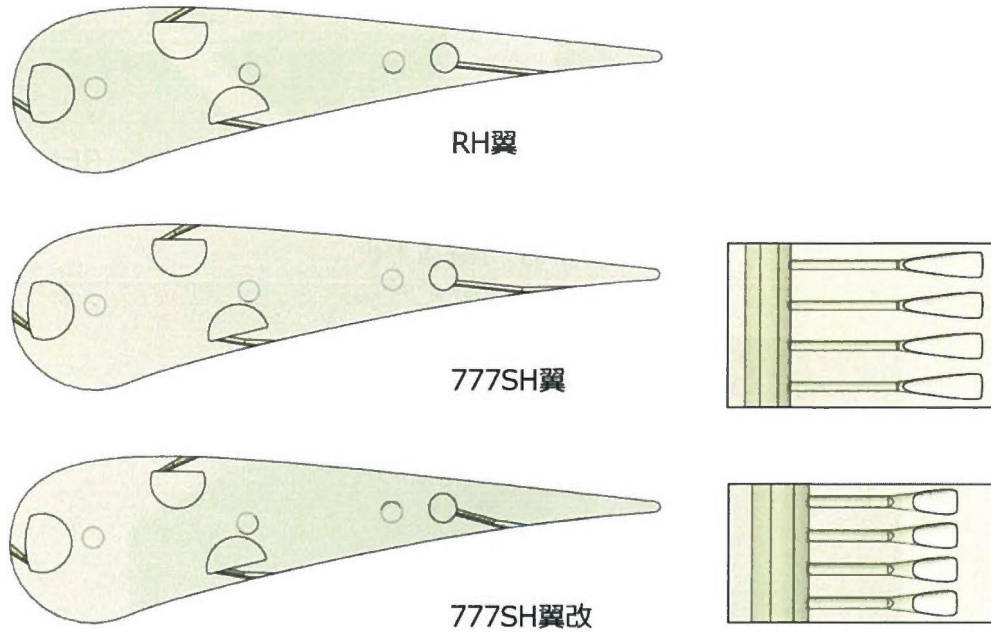


図 5.6.82 供試翼形状

(2) 流れ制御技術条件

表 5.6.2 には、今回の数値解析における供試翼と流れ制御技術の組み合わせを示している。今回の数値解析で試した流れ制御技術は 4 種類存在しており、それぞれ“DFCD”，“TRENCH1”，“TRENCH2”，“OPT”と呼称している。TRENCH の形状は、図 5.6.83 の通りである。OPT は、Shaped hole 用にデバイスを最適化した形態であり、設計パラメータの詳細は、図 5.6.84 および、表 5.6.3 へ示した。

表 5.6.2 供試翼と流れ制御技術の組み合わせ

	供試翼	流れ制御技術
1	RH 翼	
2		DFCD
3		TRENCH1
4		TRENCH2
5	SH 翼	
6		DFCD
7	SH 翼改	
8		OPT

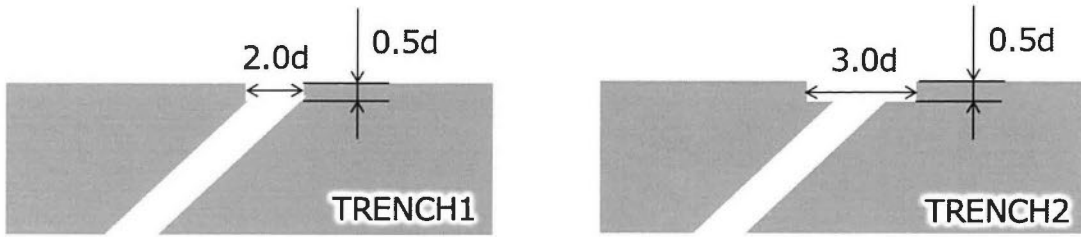


図 5.6. 83 Trench 形状

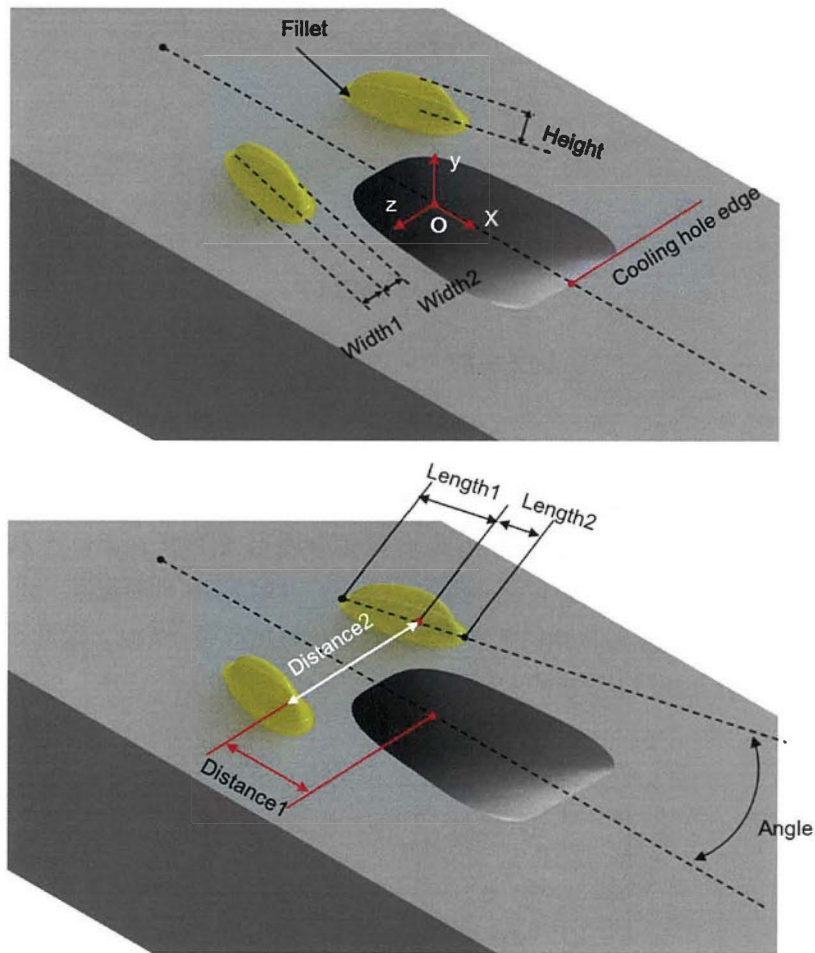


図 5.6. 84 設計パラメータ

表 5.6.3 最適形態の設計パラメータ

制御因子	寸法値
Fillet	$0.05d$
Length1:Length2	$1.25d:0.75d$
Height	$0.5d$

Width1	0.2 <i>d</i>
Width2	0.2 <i>d</i>
Angle	15[deg.]
Distance2	1.0 <i>d</i>

(3) 解析条件

数値解析条件は、前章と同様である。SH 改翼は正圧面後縁部分の冷却孔位置が変更になっているが、SH の PS2 と同じ流量をプレナム内に与えている。

5.6.4.2 結果と考察

図 5.6. 85 には、各冷却構造で得られたフィルム冷却効率分布を示す。TRENCH を設置した場合には、スパン方向への拡散が大きい。しかし、前縁領域に関してはフィルム冷却効率分布が分岐している様子も観察されており、無冷却の領域も形成されている。一方で、負圧面下流の冷却孔では、均一な冷却が実現できている。局所的なフィルム冷却効率に関しては、DFCD よりも低い値を示している。OPT を設置した場合には、負圧面下流領域のフィルム冷却効率に分布の改善が見られ、SH+DFCD では冷却範囲が分岐してしまっていたが、より均一な冷却分布が OPT では観察できる。前縁領域に関しては、OPT のデバイス開き角度が狭いために、OPT を設置した条件では、SH+DFCD よりも冷却面積が小さくなった。図 5.6. 86 には、BR=1.0 におけるフィルム冷却効率分布を示している。負圧面では、吹き出し比の増加に伴い、RH 系列の結果では、二次空気の lift-off が促進されており、冷却面積や局所のフィルム効率が小さくなった。しかし、RH+DFCD に関しては、十分な冷却面積が得られている。SH 系列の結果では、吹き出し比の増加に強く、フィルム冷却効率分布の拡散が維持されている。図 5.6. 87, 図 5.6. 88 には、BR=1.5, 2.0 の結果を示している。吹き出し比がさらに増加すると、RH 系列ではほとんどフィルム冷却効率分布が見られず、TRENCH を設置した場合に、冷却孔付近で分布がわずかに見られるだけである。

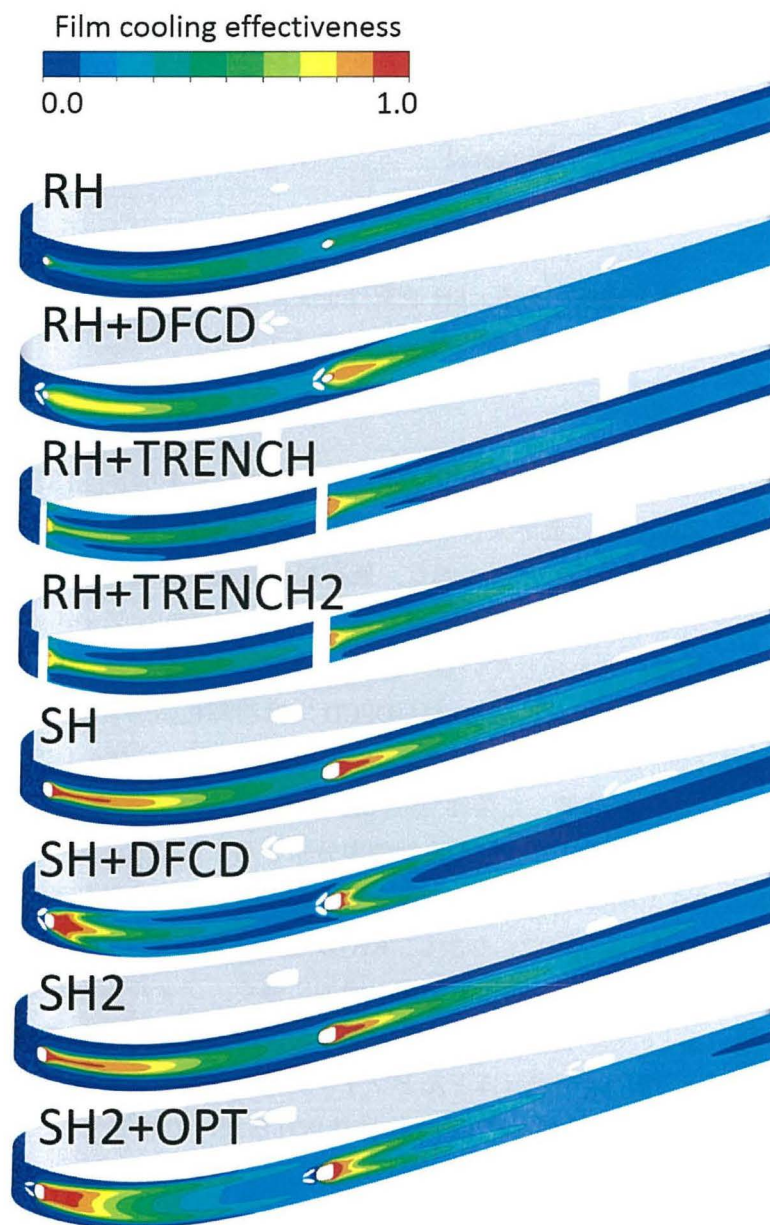


図 5.6.85 フィルム冷却効率分布（負圧面, $BR=0.5$ ）

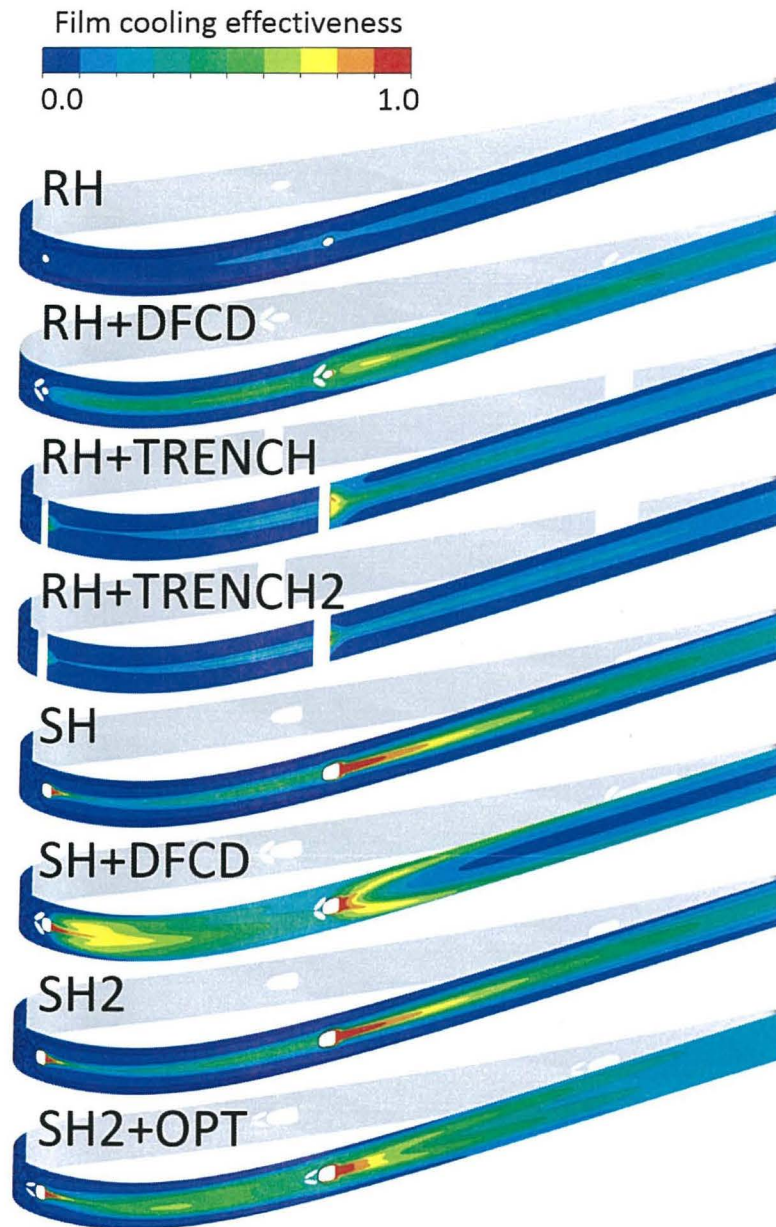


図 5.6.86 フィルム冷却効率分布（負圧面, $BR=1.0$ ）

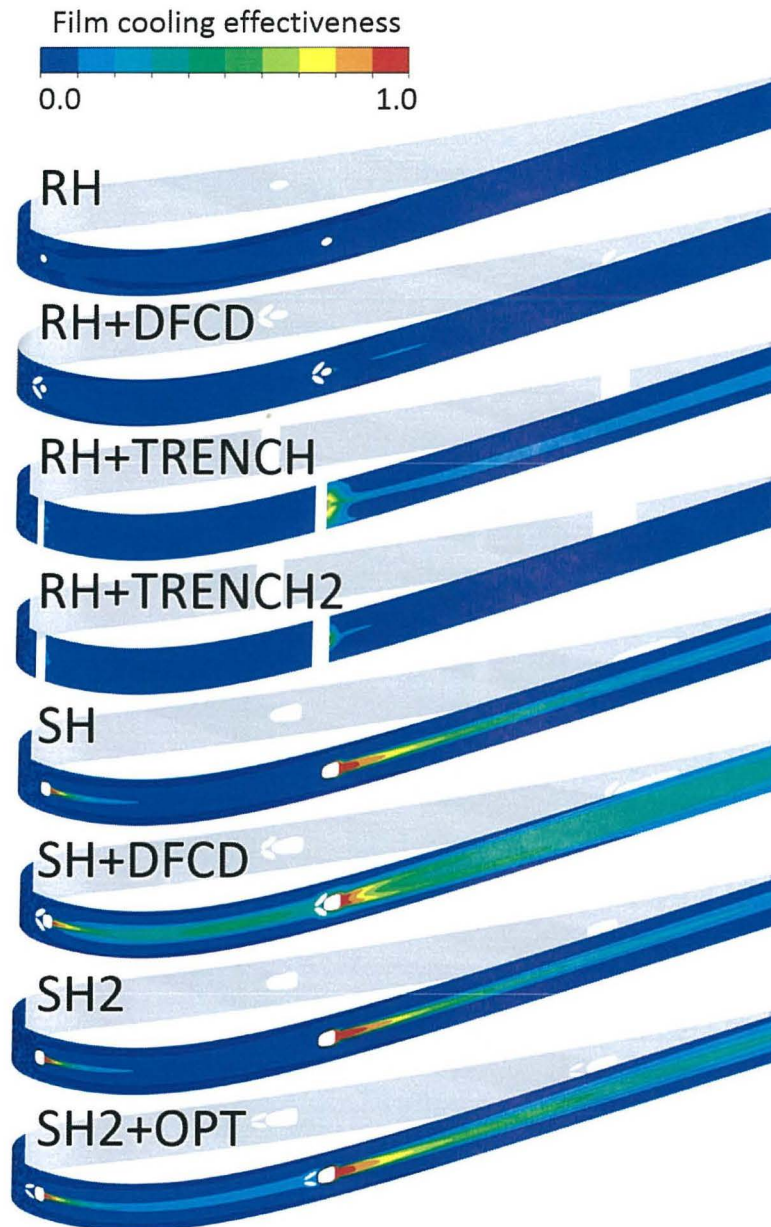


図 5.6.87 フィルム冷却効率分布 (負圧面, $BR=1.5$)

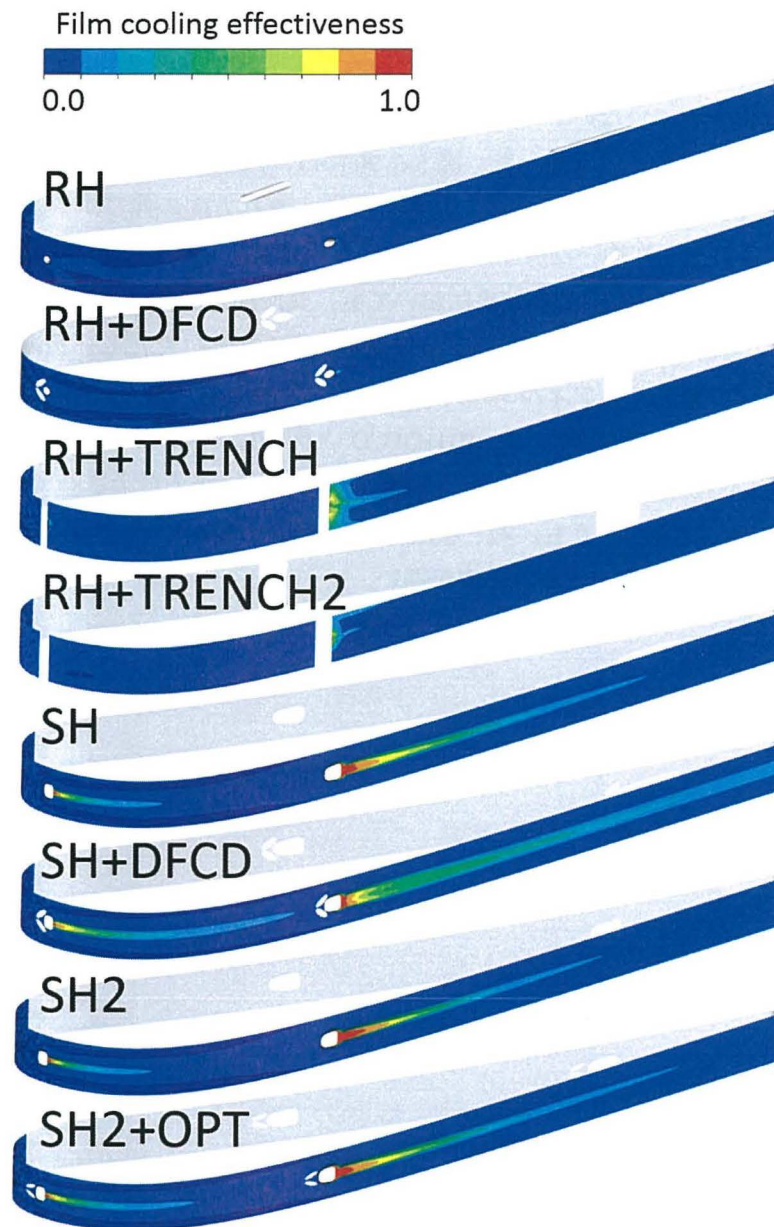


図 5.6.88 フィルム冷却効率分布（負圧面, $BR=2.0$ ）

図 5.6. 89 には、 $BR=0.5$ での負圧面フィルム冷却効率分布を示す。TRENCH 設置条件では、フィルム効率分布はスパン方向に拡散しているが、DFCD 設置条件よりは広がりが見られない。SH 系列の場合は、OPT を設置した場合にはフィルム冷却効率が分岐しており、十分に均一な冷却が実現できていない。一方、SH+DFCD では、分布が均一であるが、流れ方向へのフィルムの伸びが十分ではなかった。図 5.6. 90 には、 $BR=1.0$ におけるフィルム冷却効率分布を示している。吹き出し比が増加した場合には、流れ方向の伸びが改善されるため、特に SH 系列の結果でより均一な分布が観察される。図 5.6. 91, 図 5.6. 92 には、 $BR=1.5, 2.0$ の結果を示している。正圧面の結果においても、負圧面と同様に RH 系列の結果は二次空気が lift-off しており、全体的にフィルム冷却効率が低下する。ただし、後縁領域に関しては比較的 RH 系列の結果でもフィルム冷却効率分布が観察されており、RH+DFCD でも効果が得られている。TRENCH 形態でも、RH+DFCD と同様にフィルム冷却効率分布がスパン方向に拡散しているが、DFCD よりは流れ制御の効果が低い様子が示されている。SH 系列では、低い吹き出し比条件よりも、均一な冷却分布が得られなかったが、RH 系列の結果よりは lift-off に強く、比較的フィルム効率が高い。

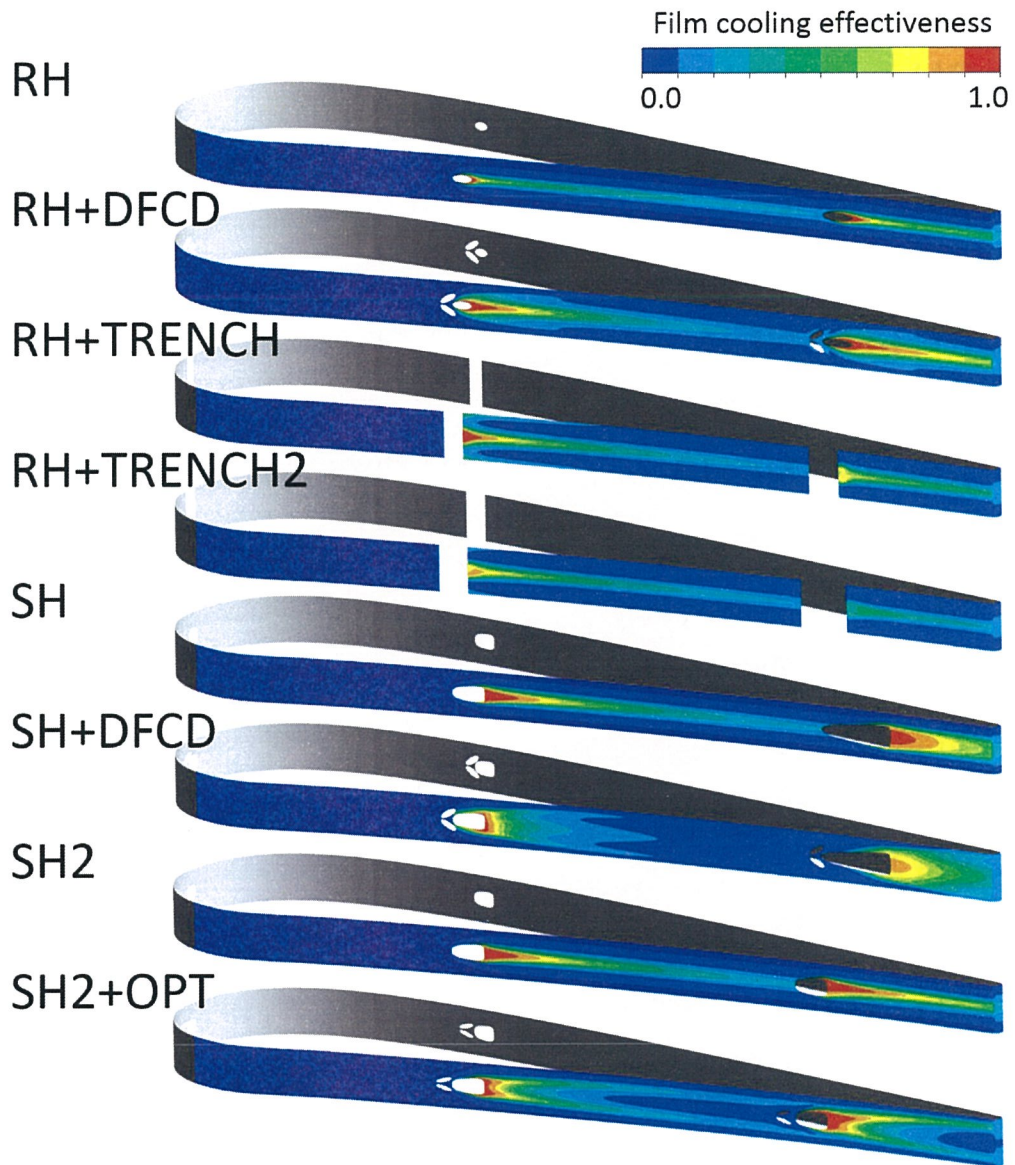


図 5.6.89 フィルム冷却効率分布（正圧面, $BR=0.5$ ）

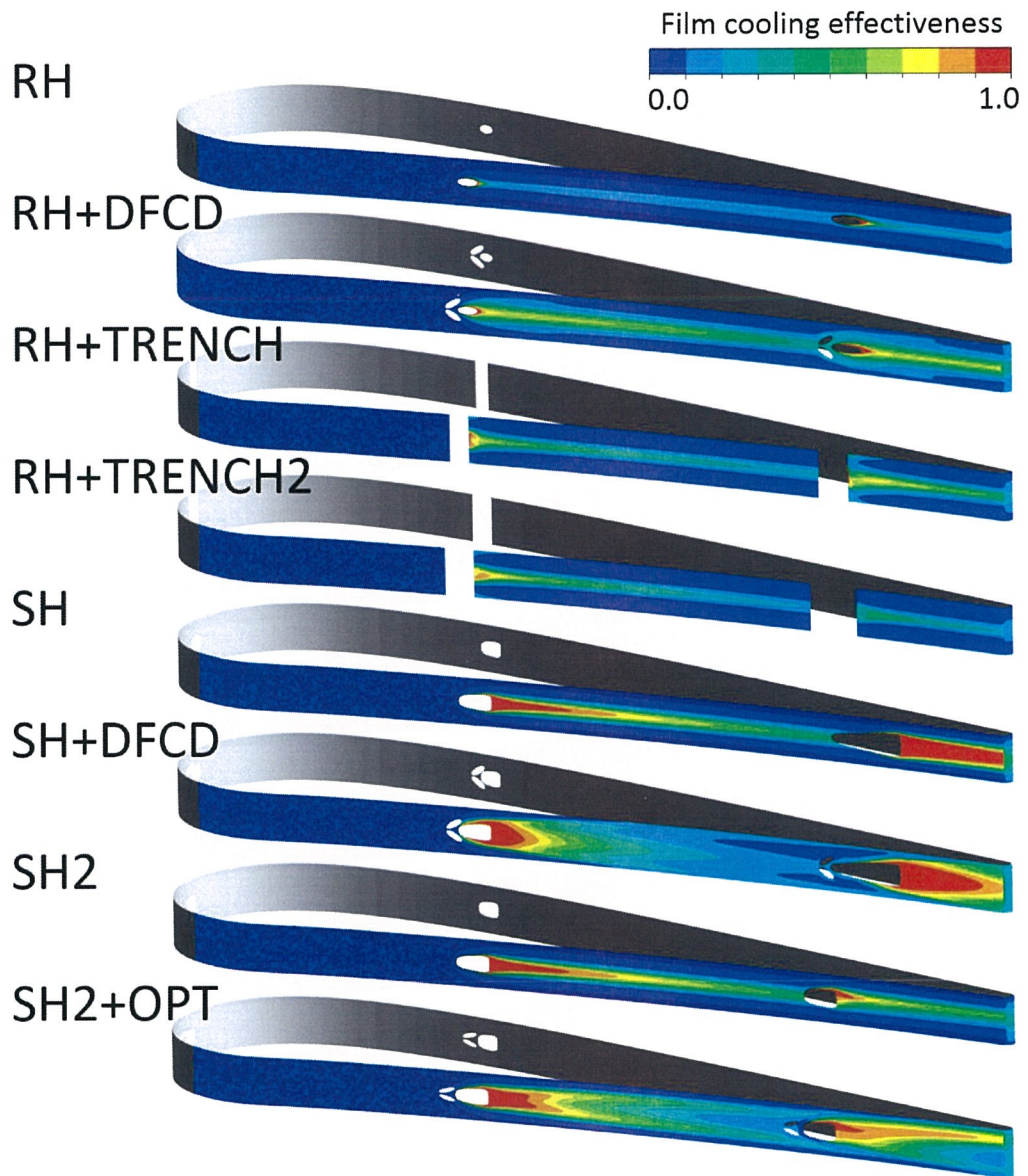


図 5.6.90 フィルム冷却効率分布 (正圧面, $BR=1.0$)

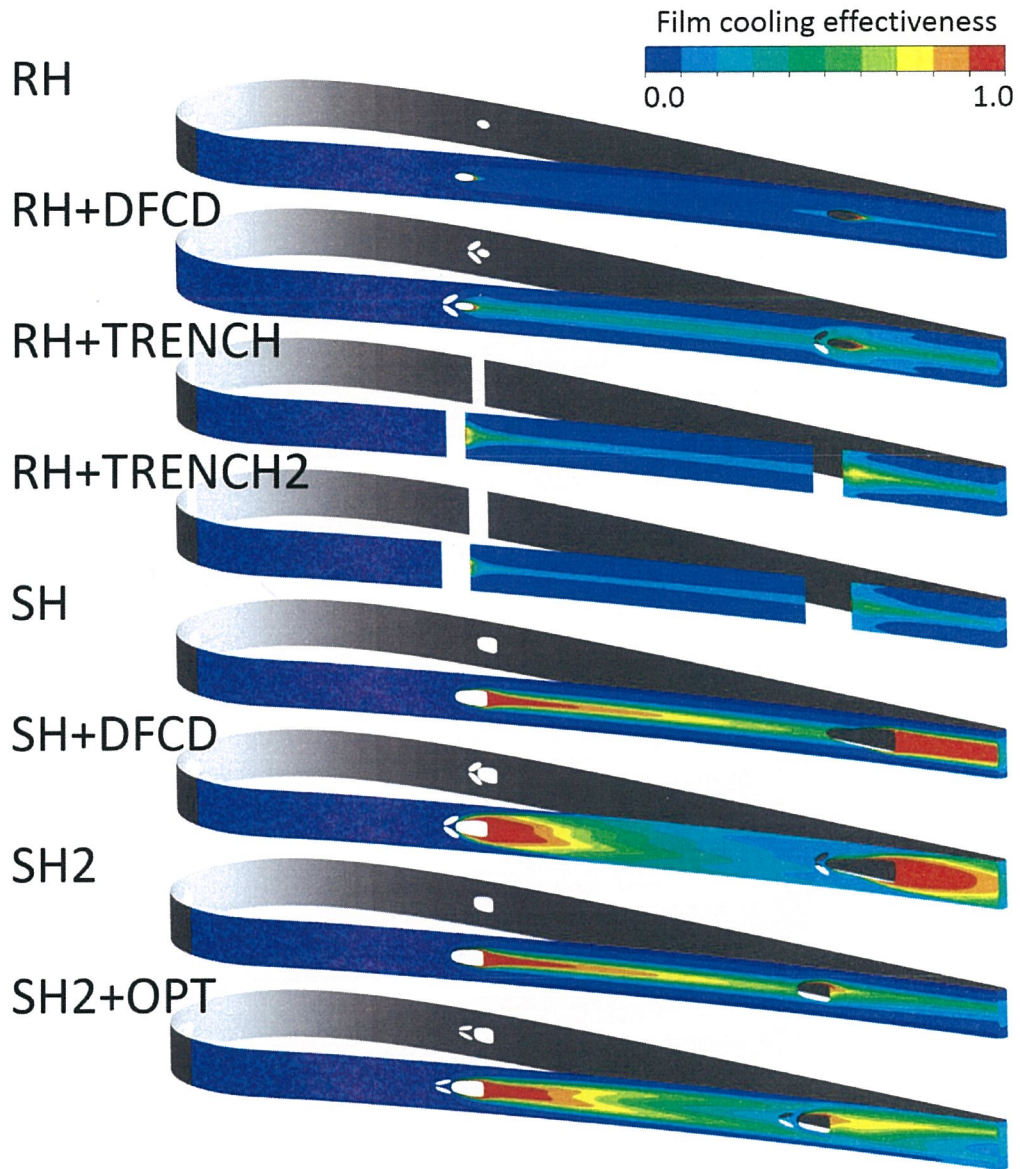


図 5.6.91 フィルム冷却効率分布（正圧面, $BR=1.5$ ）

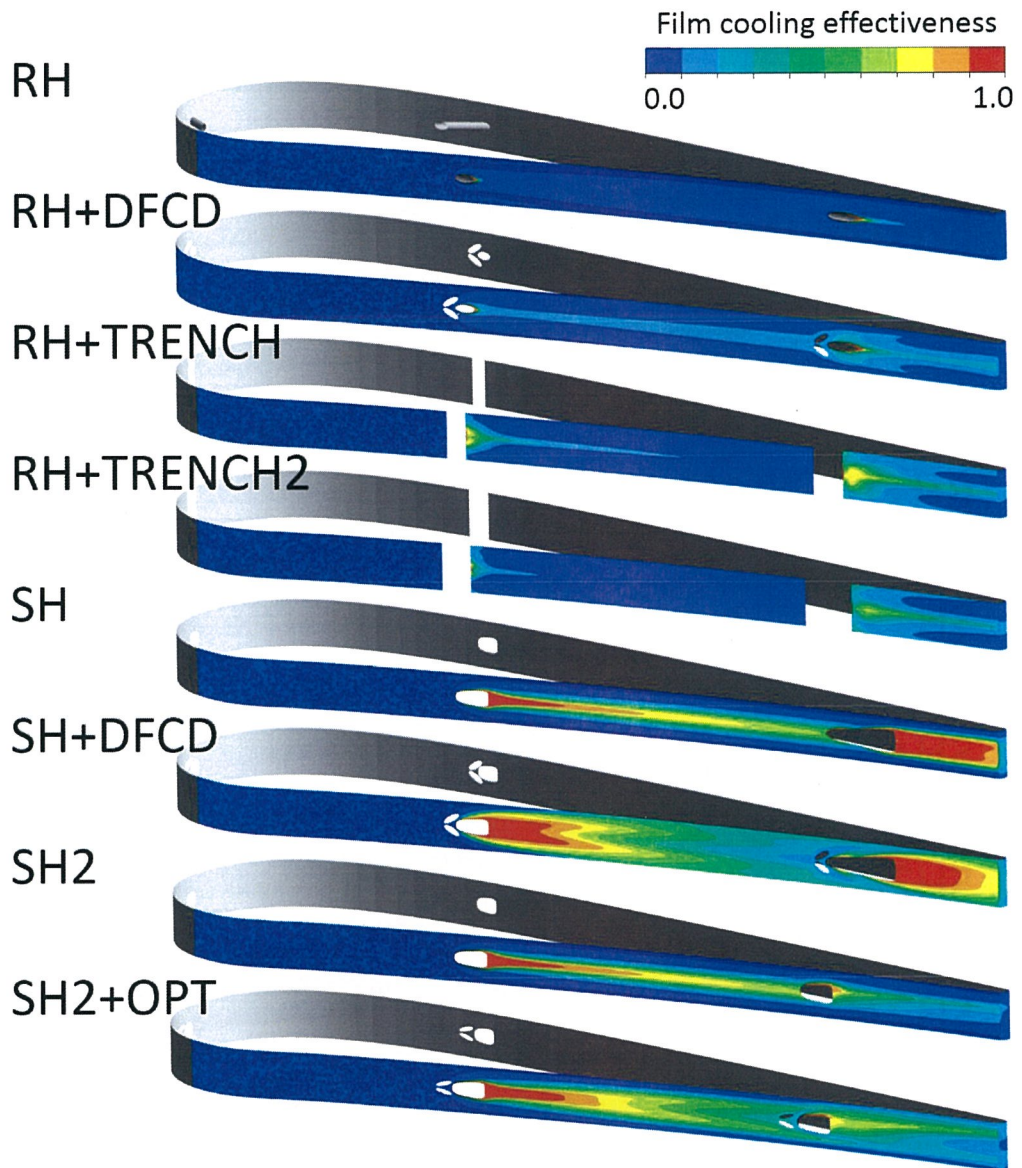


図 5.6.92 フィルム冷却効率分布 (正圧面, $BR=2.0$)

図 5.6. 93 には、負圧面下流における流れ方向渦度を示している。冷却孔から発生する CRVP 両脇の渦構造を観察すると、DFCD、TRENCH の設置条件では、CRVP を制御する渦構造が形成されている。渦度の強さを比較すると、特に下流領域で顕著だが、DFCD を設置した条件の方が、TRENCH 設置条件よりも強い渦構造となっており、流れ制御能力が高かったことが分かる。図 5.6. 94 には、正圧面における流れ方向渦度を示している。今回も、CRVP 両脇の渦構造を観察すると、DFCD を設置した条件のほうが、TRENCH よりも強くなっており、正圧面でも DFCD は高い流れ制御能力を有していることが分かる。

図 5.6. 95 には、負圧面における面平均フィルム冷却効率の推移を示している。RH 系列の結果は、特に $BR \geq 1.5$ の条件ではフィルム冷却効率が低く、殆ど効率が得られていない。DFCD 設置条件と TRENCH 設置条件を比較すると、TRENCH の方が高い吹き出し比には強く、わずかにフィルム冷却効率が DFCD 設置条件を上回っている。SH 系列では、RH 系列よりも高い吹き出し比に対して強い性能を示している。OPT を設置した効果は、 $BR=0.5$ で得られており、最もフィルム冷却効率が高い。しかし、高い吹き出し比では、OPT 設置条件よりも DFCD を設置した方が、Shaped hole に対して効果があるようである。図 5.6. 96 には、正圧面における面平均フィルム冷却効率を示している。正圧面では、吹き出し比の増加に伴うフィルム効率低下の割合が小さい。RH 系列では、DFCD の方が TRENCH よりもどの吹き出し比においても効率が高く、DFCD の有効性が示されている。SH 系列は吹き出し比の増加とともにフィルム冷却効率は増加するが、OPT の効果は小さい。

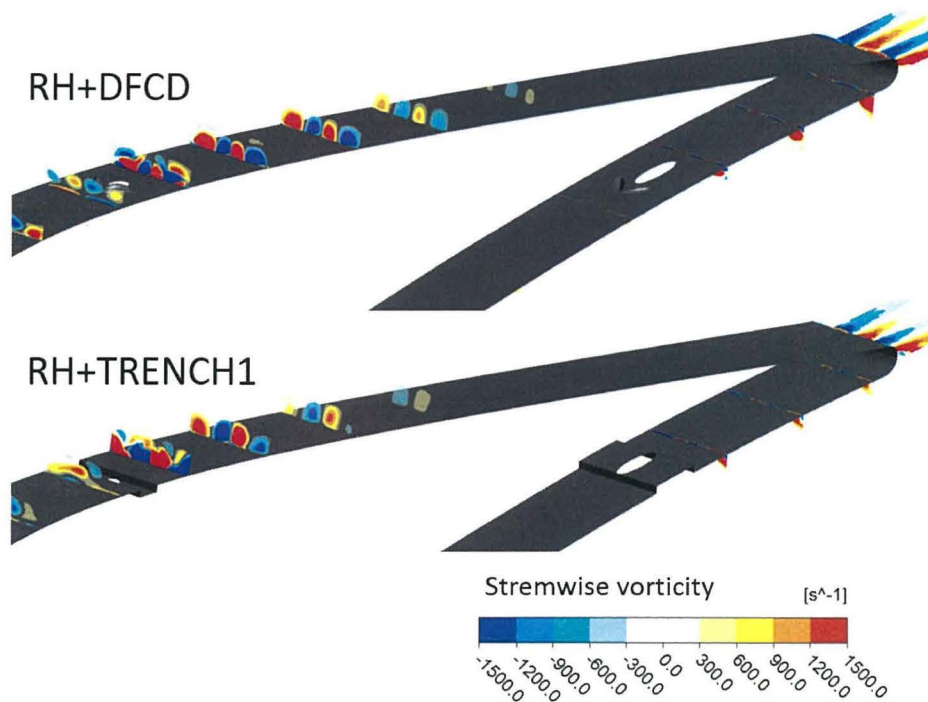


図 5.6. 93 負圧面下流渦度 ($BR=1.0$)

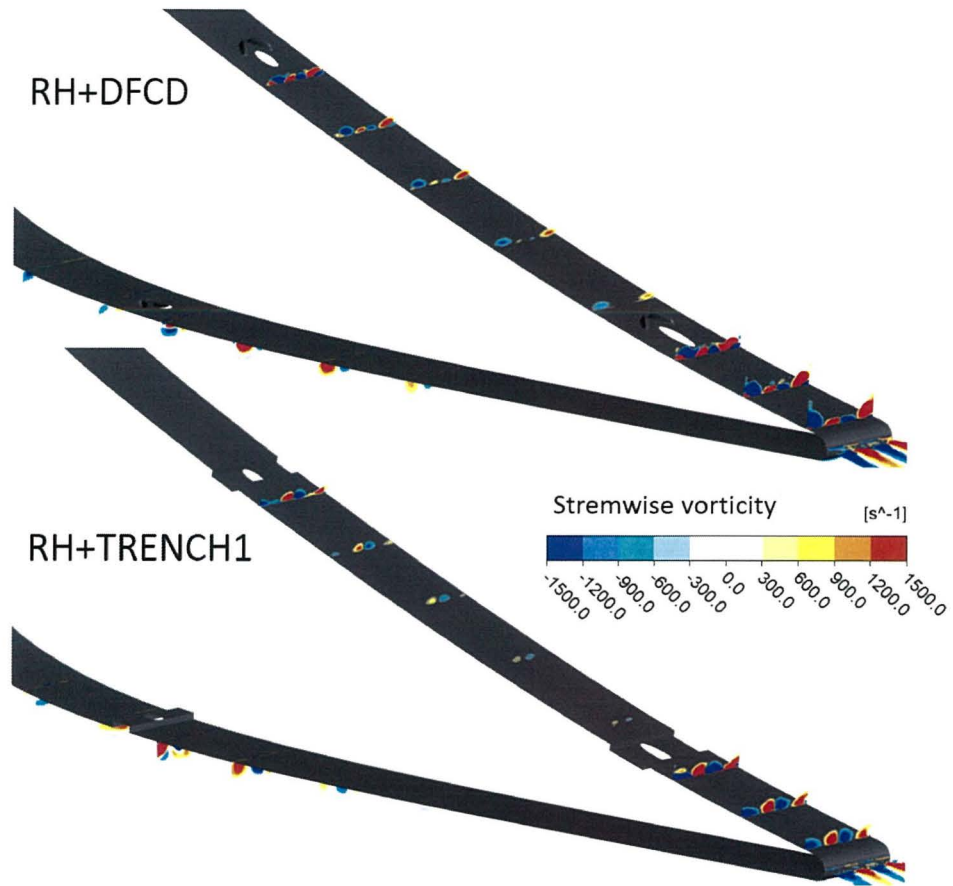


図 5.6.94 正圧面下流渦度 ($BR=1.0$)

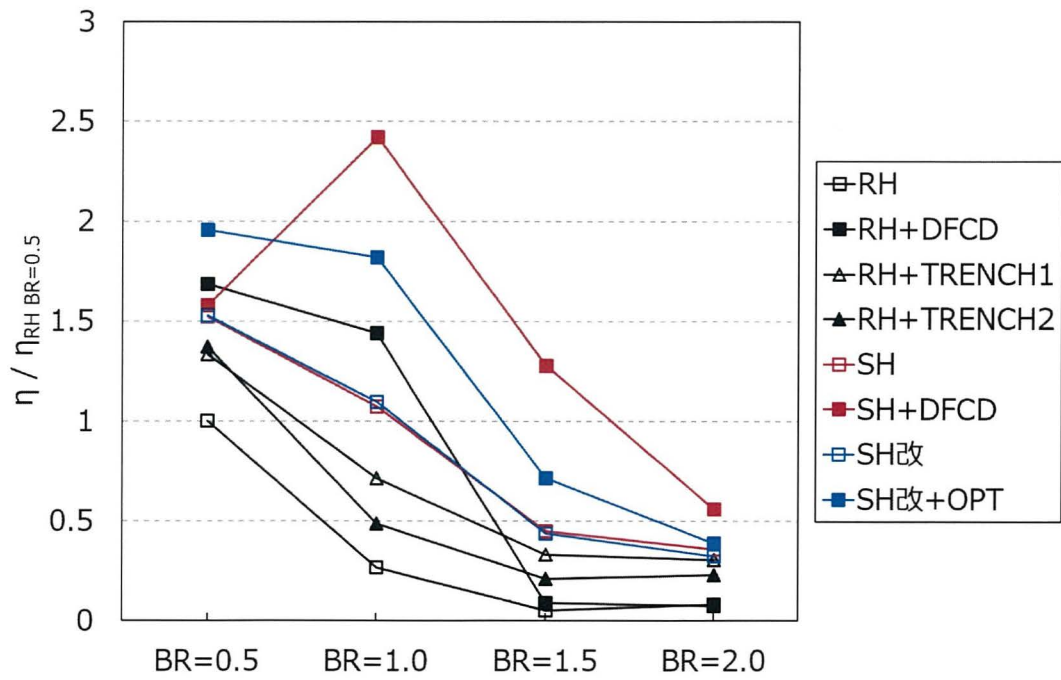


図 5.6.95 負圧面平均フィルム効率

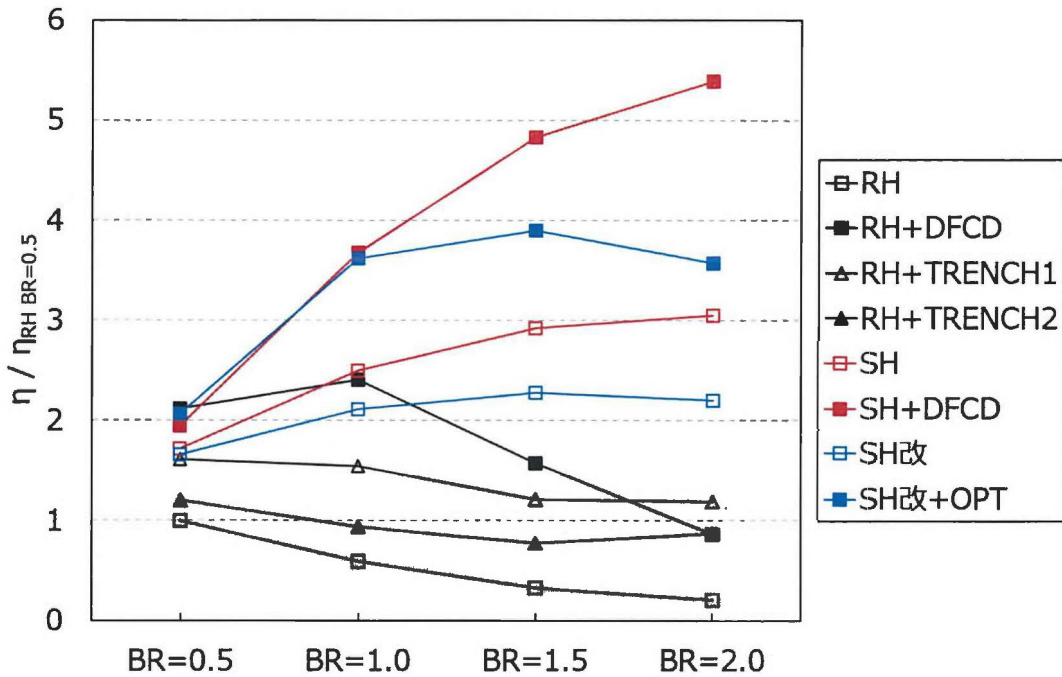


図 5.6.96 正圧面平均フィルム効率

図 5.6.97 には、計算領域出口における流量平均全圧損失を示している。結果は、書く吹き出し比において、RH の結果で企画化を行っている。特に今回、損失が高い値を示していたのは、TRENCH 設置条件であり、TRENCH よりも DFCD を設置した方が空力的にもメリットがあることが分かる。SH 系列の結果では、SH 改翼で空力損失が大幅に提言できている様子が分かる。これは、特に正圧面後縁の冷却孔設置位置を変更した効果が表れていると考えられる。OPT を設置した条件では、フィルム効率は最大にはならなかったが、比較的高い値を示している上、損失面でもメリットが得られたため、比較的效果の高いデバイス設置条件であったと考えられる。

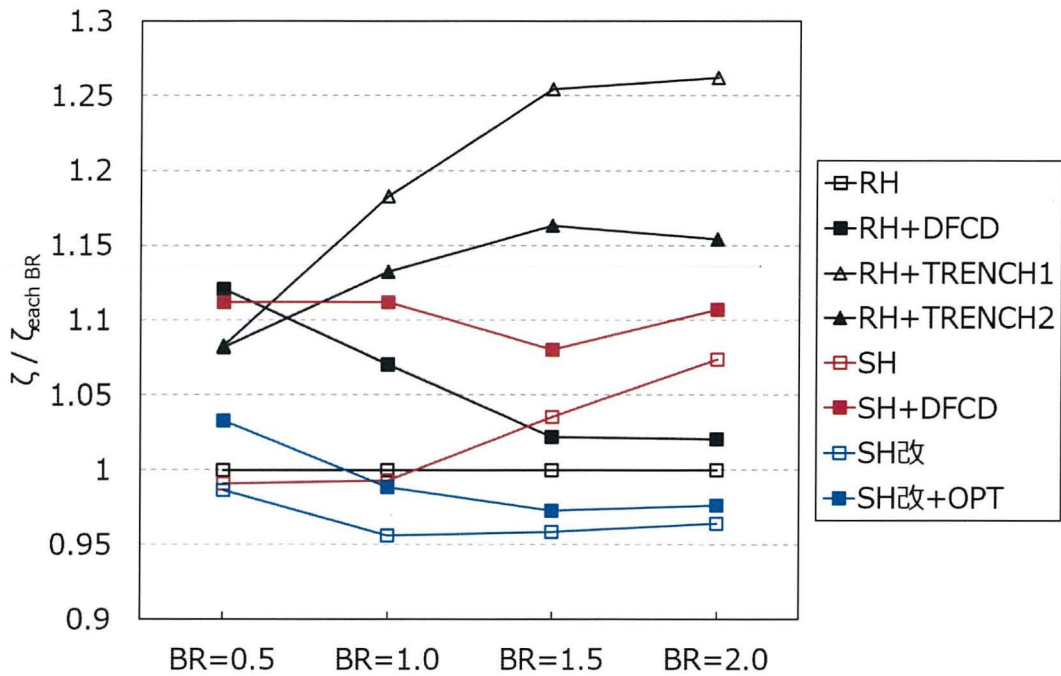


図 5.6.97 出口位置流量平均全圧損失係数

5.6 本章のまとめ

本章では、翼面上に流れ制御デバイスを取り付け、実験と数値解析を用いて空力伝熱特性を調査した結果、以下の知見を得た。

- 翼の正圧面、負圧面ともに平板モデルと同様なデバイス起因の渦を発生させることが可能である
- 翼の正圧面、負圧面ともに流れ制御デバイスは効果を発揮し、二次空気が横方向へ拡散させる効果と、壁面への付着性を増加させる
- 吹き出し比が低い条件では、主流と二次空気のみキシングが強くなる影響を受けるため、デバイスを設置した場合には、下流側のフィルム効率の減衰の影響でフィルム効率はデバイス設置前よりも低下する
- 負圧面前縁領域では、二次空気が最も lift-off し易い傾向がある。前縁領域にデバイスを設置すると、デバイスから渦が発生するものの、lift-off の影響を受け易くなるため、その効果は低い吹き出し比に限定されるようである。この傾向は今回の実験でも捉えられており、前縁領域ではフィルム効率の改善が観察された
- 負圧面後縁領域では比較的フラットな領域であるため、二次空気の付着性が高い。この領域でも、デバイスからの渦は強く発生しており CRVP の制御能力が高い。
- 正圧面側では、デバイスから発生する渦構造が比較的弱いことが数値解析より明らか

になった。実験の結果においては正圧面にデバイスを設置した場合には、流れ方向のフィルム効率の伸びが小さい。これは、CRVPの制御能力が正圧面では低く、二次空気の付着性が十分に確保できなかったためであると考えられる。

- 後縁領域はデバイスから発生する渦構造がつよく、二次空気も比較的付着し易い。したがって、デバイスの効果が得られ易く、いずれの吹き出し比でも高いフィルム効率分布となっていた
- Shaped hole を取り付けることで、正圧面側では冷却孔から発生する CRVP が非常に小規模になる。これにより、DFCD の流れ制御能力がより発揮され易い流れ場になっていることが分かった
- DFCD を従来技術の代表格である Trench と比較した結果、伝熱・空力性能でメリットが得られており、DFCD の流れ制御能力が高かったことが分かった

