

流れ制御片側デバイスによる フィルム冷却性能向上に関する研究

Studies on One-Sided Flow Control Device to Improve Film Cooling Effectiveness

宍戸 昌子*¹
SHISHIDO Masako

船崎 健一*²
FUNAZAKI Ken-ichi

谷口 英夫*²
TANIGUCHI Hideo

河村 朋広*³
KAWAMURA Tomohiro

齋藤 涼*¹
SAITO Suzuna

ABSTRACT

This study proposes a new flow control device (FCD), called one-sided FCD or OFCD, to improve conventional cooling hole film effectiveness of turbine airfoils for gas turbine with less aerodynamic loss than that of the previously developed devices such as double flow-control devices (DFCD) or V-shaped FCD. Detailed numerical investigations on the flat-plate model are executed through RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)-based simulation using a commercial flow solver, calculating film effectiveness, net heat flux reduction (NHFR) and stagnation pressure loss coefficient for several types of OFCD along with DFCD and V-shaped FCD. Experimental examinations are also conducted using PSP (Pressure-Sensitive Paint) method to verify the predictability of film effectiveness by the present calculation. It is found that OFCD performs fairly well with less aerodynamic penalty than those of the high-performance devices.

キーワード：

Key words : Film Cooling, Flow Control Device, PSP method, RANS simulation

1. 緒言

ガスタービンエンジンは発電用や航空機エンジン等に用いられ、更なる高効率化が求められている。また、再生可能エネルギーの系統大量投入時代を迎え、ベース電力の供給のみならず負荷変動に対する急速な応答性を有するガスタービンへの期待が高まっている。このようなガスタービンの高効率化手法としてタービン入口温度TIT (Turbine Inlet Temperature) の上昇が挙げられる。TITの上昇には冷却技術の進歩が大きく貢献しており、特にフィルム冷却の性能向上の寄与が大きい⁽¹⁾。フィルム冷却の高効率化の実現にとりCRVP (Counter-Rotating Vortex Pair) の制御が重要であり、そのための技術として、Fan-shaped形状化、複合角、Double Jet, Sister Holeなどの制御技術が開発されている⁽²⁾。著者らのグループでもフィルム冷却の高効率化を目的とした流れ制御デバイスFCD (Flow Control Device) の開発

を進めており⁽²⁾、一つの冷却孔の上流に単独⁽³⁾または1対の突起DFCD (Double Flow Control Device)⁽⁴⁾、複数ディンプル対⁽⁵⁾を設置してフィルム効率改善や熱負荷削減率NHFR (Net Heat Flux Reduction) の変化状況調査、更には形状・配置の最適化を実施している。これらの研究を通じて、デバイス設置効果によるフィルム冷却効率向上を確認する一方で、デバイスから生成された縦渦に起因するNHFRの悪化や空力損失増加の抑制など、実機適用の際の課題も見出されている。

本研究では、上記の課題解決を目的として考案された単独のFCDの性能評価について調査している。DFCDは冷却空気の翼面付着性向上には有効なデバイスではあるが、2つの突起による空力損失増分は非常に大きく⁽⁶⁾、その対策が必要である。Takisawaらの研究⁽⁷⁾で、DFCDへの流入角増加によりDFCD由来の渦の非対称性が見られても、フィルム冷却効率改善の効果が維持されるという知見が得られていることを元に、DFCDの片側だけを冷却孔上流に設置するデバイス、即ち流れ制御片側デバイス（以下、片側FCDまたはOFCDと称す）を考案するに至った。

本研究は、通常の丸形の冷却孔によるフィルム冷却を対象に、片側FCDが空力損失を抑制しつつDFCDなどの両側FCDと同等のフィルム冷却性能向上能力を有し得

原稿受付 2019年7月29日

査読完了 2020年7月9日

- * 1 岩手大学大学院
〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5
- * 2 岩手大学理工学部
〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5
- * 3 東北電力(株)
〒980-8550 仙台市青葉区

るかの調査を目的としている。初めに数値解析により5形状の片側FCDのフィルム冷却性能を調査した。次に数値解析で良い性能を示した形状については、DFCDなどとともに空力損失を数値的に調査し、更にPSP試験によるフィルム効率の計測を実施している。

主な記号

A_i	: Stern-Volmerの式の係数 ($i=0,1,2$)
BR	: 噴き出し比 ($= \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty = DR \times U_2 / U_\infty$)
d	: 冷却孔直径
DR	: 密度比 ($= \rho_2 / \rho_\infty$)
h, h_f	: 熱伝達率, フィルム冷却時の熱伝達率
I, I_{ref}	: 発光強度, 参照発光強度 (参照酸素分圧時)
L	: 冷却孔長さ
$\dot{m}_2, \dot{m}_\infty$	: 二次空気流量, 主流流量
M	: 分子量
p, p_{ref}	: 酸素分圧, 参照酸素分圧
$P_{t2}, P_{t\infty}$	: 二次空気よどみ点圧力, 主流よどみ点圧力
Re	: 主流側レイノルズ数 ($= U_\infty d / \nu$)
T_2, T_∞	: 二次空気温度, 主流温度
T_{ad}, T_m	: 断熱壁温度, 翼温度
Tu	: 主流乱れ
U_2, U_∞	: 二次空気速度 (孔内平均速度), 主流速度
x, y, z	: 座標系 (主流方向, 高さ方向, ピッチ方向)
η	: フィルム冷却効率 (式(2))
θ	: 全体冷却効率 (無次元翼温度) (式(4))
ρ_2, ρ_∞	: 二次空気密度, 主流密度
ξ	: 正味熱流束削減率 (式(3))
ζ	: よどみ点圧損失係数

添字

air	: 空気
CO ₂	: 二酸化炭素
mix	: 混合気体
ref	: 参照状態

頭文字

CRVP	: Counter-Rotating Vortex Pair
DFCD	: Double Flow Control Device
DBV	: Device-Based Vortex
FCD	: Flow Control Device
MS	: Mesh Size
NHFR	: Net Heat Flux Reduction
OFCD	: One-sided Flow Control Device
PSP	: Pressure-Sensitive Paint
RH	: Round Hole

2. 片側デバイス

Fig. 1にはOFCDを示す。基本的な形状は、DFCDと同様に流れ方向に開き角を有する突起物であり、長手方向及び横方向からの投影断面がともに半楕円状の形状をしている。Fig. 1には、形状及び冷却孔との位置関係

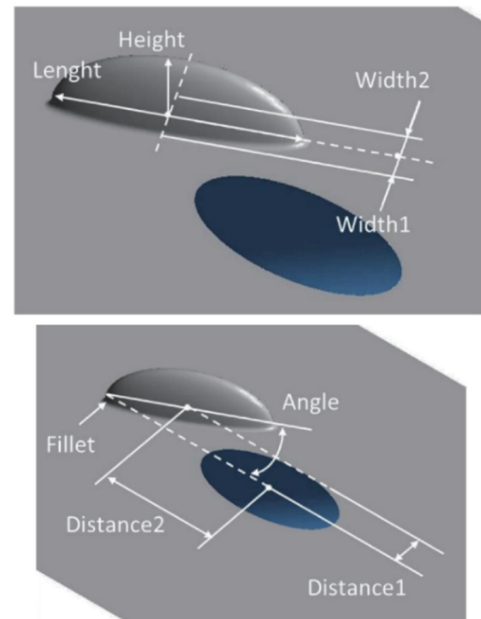


Fig. 1 One-sided FCD with its geometrical parameters

を与える8つのパラメータ (Height, Length, Width1, Width2, Distance1, Distance2, Angle, Fillet) も示されている。これらのパラメータは元々最適化を念頭に設定されているが、今回はDistance1, Distance2のみを変化させ、その他のパラメータについてはDCFDで多く採用されている数値に固定した (Table 1)。Fig. 2には、Table 1中に示された5種類のデバイスの形状及び配置状況を示す。なお、文献(4)等を参考にLengthは2.0dに固定している。

Table 1 Parameters of device geometry and configuration

	OFCD1	OFCD2	OFCD3	OFCD4	OFCD5
Distance1	0.0d	0.2d	0.2d	0.4d	0.4d
Distance2	1.7d	1.7d	1.5d	1.7d	1.2d
Height	0.6d				
Width1	0.2d				
Width2	0.2d				
Angle	30 [deg]				
Fillet	0.05d				

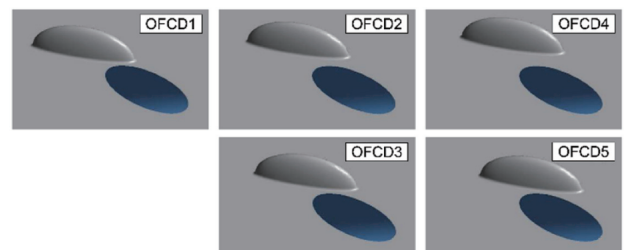


Fig. 2 Tested one-sided FCD

3. 実験手法

本研究では、PSP (Pressure-Sensitive Paint) 法によるフィルム冷却効率分布計測を実施した。実験手法の詳細については、河村らの報告⁽⁸⁾に詳しいので、以下にはその概要を述べる。

3.1 試験装置

Fig. 3に試験装置の概観を示す。供試ダクト（高さ150mm，幅250mm）は小型吸込式低速風洞内に設置され，供試平板はダクト側面に固定されている。供試平板は，長さ470mm，幅220mm，厚み20mmのABS樹脂製で，直径 $d=10\text{mm}$ ，傾斜角 30° ，ピッチ60mmの丸形冷却孔（RH）が機械加工であけられている。OFCDなどのデバイスは，熱溶解積層法による3Dプリンターによって成形され，両面テープで供試平板上の所定の位置に接着されている。冷却孔下流には，後述するPSP関係の塗料が塗布されている。供試平板の下流部には，供試体温度を測定するための熱電対が複数取り付けられている。主流は，風洞整流部，絞りノズルを経て供試部に流入する。その流速は供試部上流に装着されたピトー管で計測される。また，供試部入口での主流乱れは約1%である。

フィルム冷却効率の計測では，二次空気 の代替として二酸化炭素（ CO_2 ）を用いている。タンクに蓄えられた CO_2 は，流量調整用のニードルバルブ，流量計，供試平板下部のプレナムを経て，ほぼ室温状態で冷却孔を通じて供試平板上に噴出する。

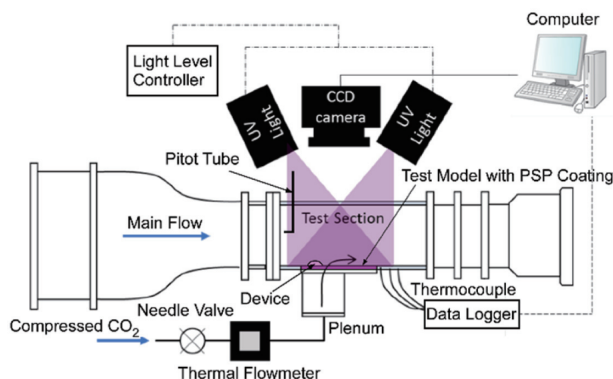


Fig. 3 Test facilities for PSP measurement

3.2 PSP

供試体表面には，下地として白色塗料を塗り，その上にPSP層を塗布している。PSP層の成分は，感圧色素としての白金ポルフィリン（PtTFPP），バインダーとしてのPtBSである。使用した色素の励起波長は392nm，発光波長は650nmであることから，励起光源には中心波長が400nmのLED光源（浜松ホトニクス製）を用い，発光を捉えるカメラには，ロングパスフィルター（LV0630）を装着した高感度16ビットモノクロCCDカメラ（BITLAN製）を用いた。

PSP層は，温度が制御された状態においてその発光強度 I はその周囲の酸素（ O_2 ）分圧 p によって変化する

（Oxygen Quenching）。冷却孔から CO_2 を噴出することにより冷却孔下流での O_2 分圧は低下し，結果としてPSP層からの発光強度も上昇する。この発光強度の変化と酸素分圧との関係の定式化には線形のStern-Volmerの式が一般的に用いられるが⁽⁹⁾，本研究では非線形性を考慮した次式を用いている。

$$\frac{I_{\text{ref}} - I_{\text{dark}}}{I - I_{\text{dark}}} = A_0 + A_1 \frac{p}{p_{\text{ref}}} + A_2 \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで， I_{dark} は，CCDカメラのレンズを完全に塞いだ状態で計測した値である。式(1)中の係数は較正試験で決定する。本研究で使用したPSPについて，Fig. 4に無次元周囲圧力と無次元発光強度との関係を示す。一般的にPSPは感圧性のほかに，温度依存性を持つことが知られているが⁽⁹⁾，本研究のPSPにおいても同様の傾向を示すことを確認している。

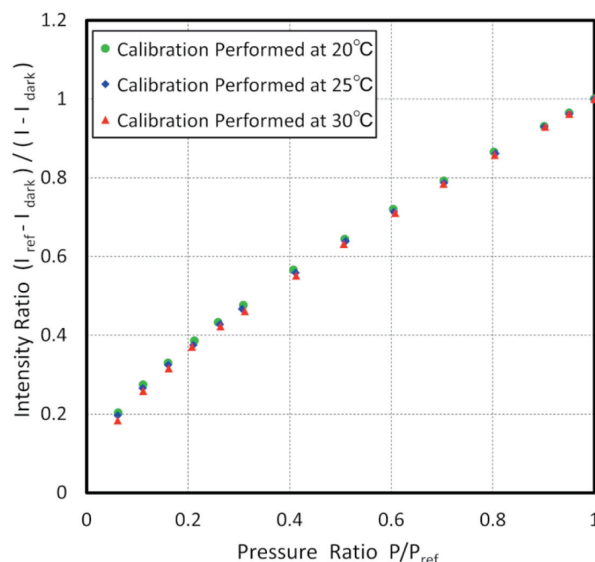


Fig. 4 Relation between luminous intensity and pressure under three temperature conditions

3.3 フィルム冷却効率の算出

式(1)に基づき，PSP層の発光強度情報からPSP層上の O_2 分圧 p が算定され，物質移動と熱移動のアナロジー及び使用する気体の分子量の効果からフィルム冷却効率が次のように求められる⁽¹⁰⁾。

$$h = \frac{T_{\infty} - T_{ad}}{T_{\infty} - T_2} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{air}}} \left(\frac{p_{\text{air}}}{p_{\text{mix}}} \frac{p_{\text{ref}}}{p_{\text{ref}}} - 1 \right)} \quad (2)$$

3.4 試験条件

本研究では，先行研究⁽⁸⁾に倣い主流側レイノルズ数 Re を6000に固定し，主流側は空気（ $M_{\text{air}}=28.966$ ），冷却側は CO_2 （ $M_{\text{CO}_2}=44.010$ ）を用いた。密度比 DR は1.53であり，それを踏まえて，噴き出し比 BR が1.0，1.5になるように CO_2 の体積流量を調整した。

3.5 不確かさ解析

PSP法によるフィルム効率値の不確かさについては佐々木の研究^[11]に詳述されている。この研究では、Stern-Volmerの式のフィッティング誤差、画像取得誤差などを考慮し、冷却孔中心線上で最大5%程度の不確かさであることが示されている。本研究でも基本的には佐々木が開発した手法に基づいており、ほぼ同程度の不確かさであると考えている。

4. 数値解析手法

4.1 計算対象及び計算格子

流れ解析の詳細については、河村らの報告⁽⁸⁾に詳しいので、以下にはその概要を述べる。

Fig. 5には、OFCD及び比較対照のためのDFCD及びその派生形のV字形状デバイス^{(12),(13)}を適用した場合の計算領域を示す。計算領域は、主流側、冷却孔及び二次空気側の3つの領域から構成されている。主流側領域の広がり、冷却孔後縁を座標の原点として、幅方向（冷却孔ピッチ方向）に冷却孔1ピッチ分（ $6d$ ； d は冷却孔直径）、冷却孔上流側に $10d$ 、下流方向に $36d$ とした。冷却孔領域は、冷却孔長さは $L/d=6.0$ で、冷却孔傾斜角は 30 [deg.]である。二次空気側領域は、底辺が一辺 $6d$ の正方形で、高さは $10d$ である。

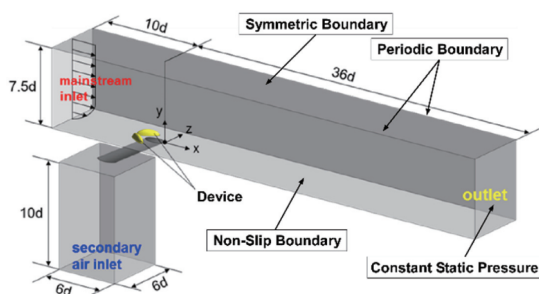


Fig. 5 Computational domain

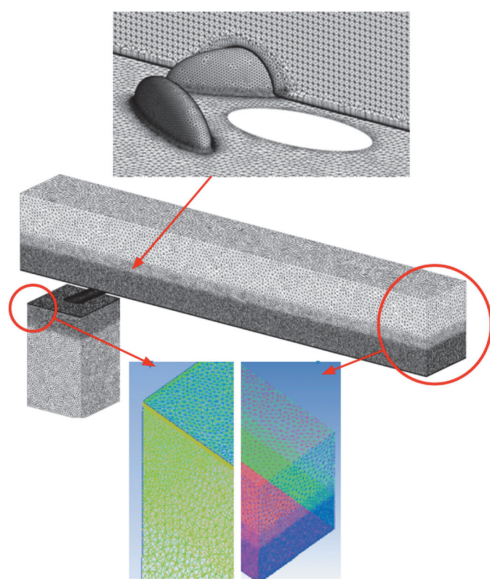


Fig. 6 Computational grid system (domain and FCD)

Fig. 6に使用した計算格子を示す。格子生成ソフトには、ANSYS® ICEM CFD™ ver15.0を用い、壁近傍及びそれ以外の場所での格子解像度を考慮しながら、非構造格子で格子生成を行った。主流側領域の格子生成では、使用ソフトの機能であるメッシュサイズ（MS；格子の一边の最大値）⁽¹⁴⁾を図のように層状に使い分け、格子解像度と計算負荷の間のバランスを図っている。具体的には、 $y/d=0 \sim 2.5d$ で $MS=1mm$ 、 $y/d=2.5 \sim 3.5d$ で $MS=3mm$ 、 $y/d=3.5 \sim 7.5d$ で $MS=5mm$ としている。冷却孔領域でのMSはすべて $0.5mm$ とし、二次空気側領域では $y/d=-3.0 \sim -3.2d$ で $MS=1mm$ 、 $y/d=-3.2 \sim -13d$ で $MS=3mm$ である。また主流部ダクトと同様に壁面近傍にはプリズムメッシュを適用しており、最小格子幅、拡大率、生成層数も主流部ダクトと同様である。また壁面近傍には21層プリズムメッシュを適用し、壁面上での $y^+ < 1$ を実現している。総要素数は約2500万セルである。格子依存性については、別形態のデバイス対象ではあるが本研究での手法と同種の手法で同様の格子を複数作成し、それらに対して数値解析を行い詳細に比較検討を実施している⁽¹⁵⁾。その結果、本研究で使用した非構造格子は、 z 方向（孔ピッチ方向）平均及び面平均フィルム冷却効率や流れ場解析（渦度分布）に関して2500万セル以上ではほぼ変化しなくなることを確認できていることから、十分な要素数及び格子解像度であると判断している。

4.2 計算ソルバー及び計算条件

計算ソルバーとしてANSYS® CFX™ ver15.0を用い、RANSによる解析を実施した。乱流モデルには、過去の調査結果⁽¹⁶⁾を元に、予測性能が比較的良好なSSTモデルを採用した。

計算領域に適用された主な境界条件は図の中に示されている。壁面境界条件について説明する。解析ドメイン主流側上面部には、対称境界条件、主流側下面部には、断熱壁、すべりなし境界条件、主流側側面部には周期境界条件を適用した。計算の際に使用した条件は、後述する実験で用いた条件に基づいて設定している。主流入口条件には、主流温度 $T_\infty=298.15$ [K]でのレイノルズ数 $Re=6,000$ となる主流速度を元に、実験で得た速度分布を与えている（ $x/d=-10.0$ 位置での境界層厚みは $0.24d$ ）。二次空気側入口では、所定の噴き出し比BRを達成するために必要な質量流量を与える。この時、フィルム冷却効率を求める場合には、実験のように CO_2 を噴き出す代わりに、密度比 $DR=1.53$ を実現する温度（ $T_2=194.85$ [K]）の空気を噴出している。また、実験では計測していないが、冷却孔なし及び冷却孔からの二次空気噴出ありの熱伝達率 h 、 h_f も算出しており、その場合は $T_2=298.15$ [K]としている。

4.3 冷却特性及び空力損失

本研究では、冷却特性の評価指標として、正味熱流束削減率（Net Heat Flux Reduction） ξ を導入し、空力損失の評価指標として、よどみ点圧損失係数を導入した。

$$\xi = 1 - \frac{h_f}{h} (1 - \eta\theta) \quad (3) \quad q = \frac{T_\infty - T_2}{T_\infty - T_m} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{P_{t,\infty} - P_{t,mix}}{1/2\rho U_\infty^2} \quad (5)$$

ここで、 θ は全体冷却効率（無次元翼温度）の逆数で、本研究では1.6を用いた。この値は、無次元翼温度では0.625となり、最新の高スラストエンジンでの典型的な値である¹⁷⁾。また、 $P_{t,mix}$ は一つの冷却孔あたりでの主流と二次空気が混合した状態でのよどみ点圧であり、次式で算出した。

$$P_{t,mix} = \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}_\infty + \dot{m}_2} P_{t,\infty} + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_\infty + \dot{m}_2} P_{t,2} \quad (6)$$

5. 結果および考察

5.1 片側デバイス間の性能比較 (CFD)

Fig. 7に5種類のOFCDのフィルム冷却効率に関するBR=1.0及び1.5での計算結果を示す。また、Fig. 8にはFig. 7の結果から算出した面平均フィルム冷却効率を示す。面平均値の評価領域は、 $0 \leq x/d \leq 20$, $-3 \leq z/d \leq 3$ である。この結果から、全体的に冷却空気の付着が高く、 z 方向への拡散も向上しているが、特にデバイスの頂点のピッチ方向位置 ($z=0.4d$) が冷却孔の端部 ($z=0.5d$) に近接するOFCD4及び5がピッチ方向及び流れ方向への冷却空気の付着性向上をもたらしている。両者は、ともにデバイス中心が冷却孔中心よりピッチ方向に0.4d離れており、また、OFCD5の方がより冷却孔に接近している。Fig. 8に示すように、OFCD4はBR=1.0では面平均フィルム冷却効率は0.27だが、BR=1.5では0.11まで急落している。一方OFCD5では、BR=1.0で面平均フィルム効率が0.21、BR=1.5でも0.16となっており、高BRにおいても比較的良好な性能を示している。Fig. 9, 10に、BR=1.0及びBR=1.5でのフィルム冷却効率分布と流れ方向渦分布 ($x/d=5, 10, 15$) の複合図を示す。OFCDの場合は、その配置、開き角の関係で正の渦DBV(+)が発生するが、DBV(+)とCRVPとの干渉は、OFCDの配置パターン及び噴き出し比によって大きく異なり、結果としてフィルム冷却分布の差異に大きく影響していることがわかる。例えば、Fig. 9 (BR=1.0) から分かるように、OFCD1 (Distance1=0.0d, Distance2=1.7d) で発生したDBV(+)はCRVPの負の渦CRVP(-)と干渉し合いながら、両者はそれぞれの誘導速度の効果で壁から離れる方向に移動しているが、OFCD2 (Distance1=0.2d, Distance2=1.7d) では、DBV(+)が z 正方向に移動しCRVP(-)の上部に位置することで、両者は z 正方向へ移動する傾向を示し、結果としてフィルム冷却効率の改善をもたらしている。OFCD3 (Distance1=0.2d, Distance2=1.5d) では、デバイスが孔に近接することでフィルム冷却効率改善効果が低下している。OFCD4 (Distance1=0.4d, Distance2=1.7d) では、DBV(+)は $x/$

$d=5$ でCRVP(-)の上流視右側に位置することで、CRVP(-)と強く干渉しその構造を大きく変え (Fig. 14参照)、結果としてCRVPによるlift-off効果はかなり抑制することで冷却空気の z 正方向への拡散を促進しているが、その後壁面との鏡像効果で z 正方向に移動し、フィルム冷却効率改善効果が低下している。OFCD5 (Distance1=0.4d, Distance2=1.2d) では、デバイスが冷却孔に接近することで、OFCD4の場合よりもDBV(+)とCRVP(-)との干渉位置が z 負方向へ変化し (Fig. 15参照)、フィルム冷却効率改善の程度はOFCD4よりも小さい。

BR=1.5 (Fig. 10) の場合、CRVPが強化されOFCDの効果は弱まるが、OFCD2, 3では、DBV(+)はCRVPの対称性に影響を与えながらCRVP(-)の z 正方向に移動し、結果としてDBV(+)とCRVP(-)の間で吹き下ろ

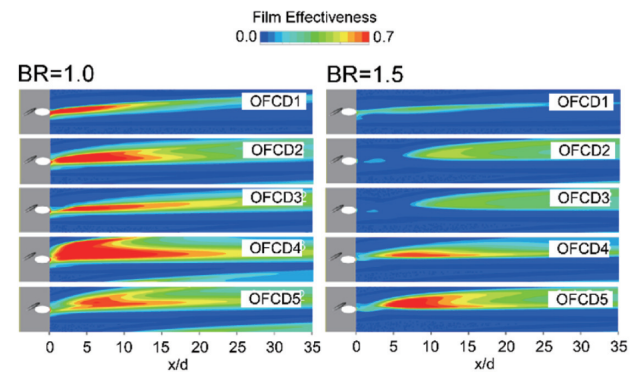


Fig. 7 Comparisons of calculated film effectiveness among 5 test cases (left; BR=1.0, right; BR=1.5)

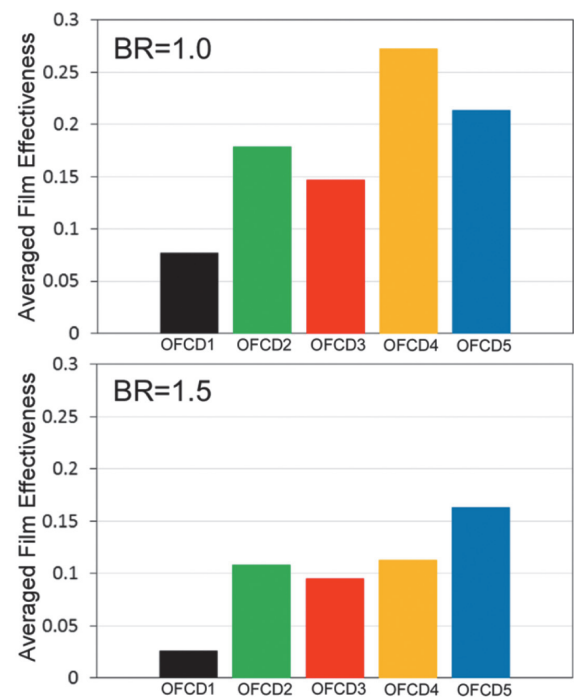


Fig. 8 Area-averaged Film Effectiveness (top; BR=1.0, bottom; BR=1.5)

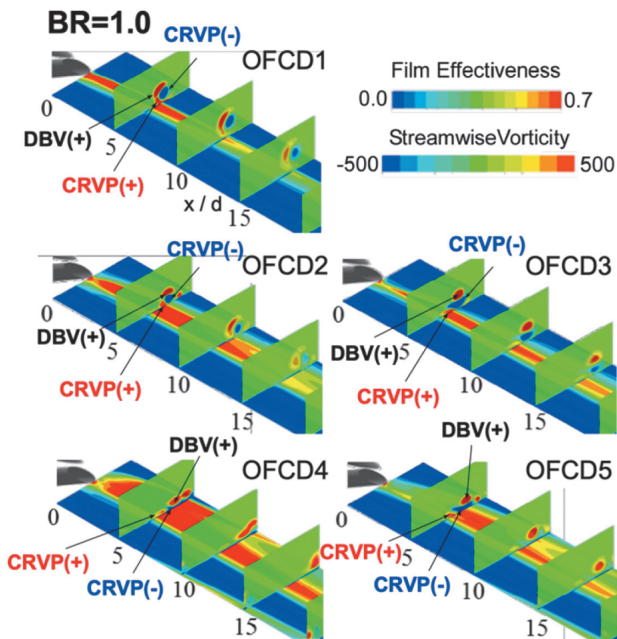


Fig. 9 Film effectiveness and vorticity distributions (BR=1.0)

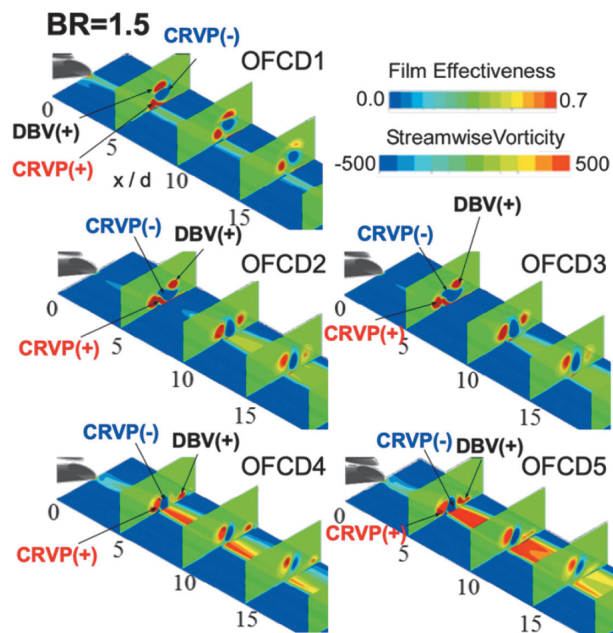


Fig. 10 Film effectiveness and vorticity distributions (BR=1.5)

し現象が発生し、フィルム冷却効率改善が生じている。OFCD4では、 $x/d=5$ でのDBV(+)とCRVP(-)との距離が大きくなっており、その分フィルム冷却効率改善効果が弱まっている一方、OFCD5では両者が近接しておりフィルム冷却効率改善効果はある程度維持されている。

5.2 両側デバイスとの性能比較

(1) フィルム効率 (実験及びCFD)

Fig. 11に、フィルム冷却効率向上性能が認められたOFCD4, OFCD5, 2種類の両側FCD (瀧澤による最適化DFCD (Height 0.5d)⁽⁷⁾, V字デバイス (瀧澤が調査した高性能型; Height 0.4d)⁽¹²⁾) 及び丸孔単独の場合 (RH only) について、BR=1.0, BR=1.5の条件下実験及び計

算で得られたフィルム冷却効率分布を示す。なお、両側FCDはともに片側のデバイスの開き角は 30° でOFCD4, 5と共通している。また、Fig. 12, 13には、 $x/d=0 \sim 20$, $z/d=-3 \sim 3$ の領域での面平均フィルム効率値を実験及び計算について示す。

計算の予測精度に関しては、Fig. 11 ~ Fig. 13より、実験で得られた分布が概ね再現できており、面平均値についても傾向としてはOFCD4を除けばある程度一致していることが確認できる。ただし、BR=1.5においては、特にOFCD4の実験とCFDの結果において異なる値を示しており、両側FCDの場合も定量的予測精度は低下する傾向にある。OFCD4の結果が異なる傾向を示している理由については現時点では明らかではない。可能性としては、剥離などを伴う非定常な流れ場での拡散現象をRANS解析では再現するのが容易ではないことが挙げられる。また、数値解析では冷却孔空気に空気を使用し、温度差をつけることで密度比BR=1.53を達成しているのに対し、実験では冷却空気にCO₂を使用してBR=1.53を達成していることも要因と考えられるが、今後引き続き調査していく。

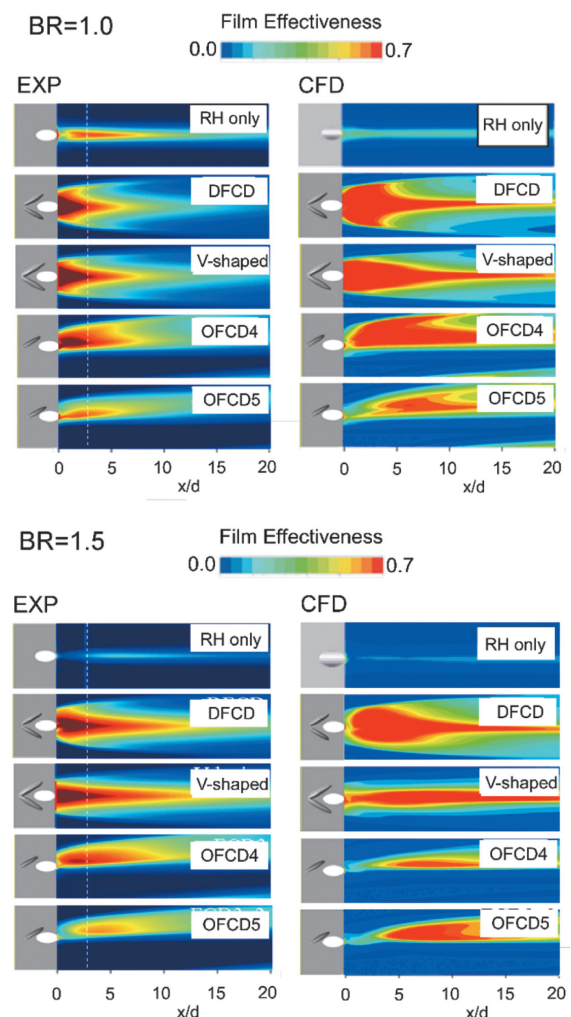


Fig. 11 Comparisons of measured and calculated film effectiveness for devices (top; BR=1.0, bottom; BR=1.5)

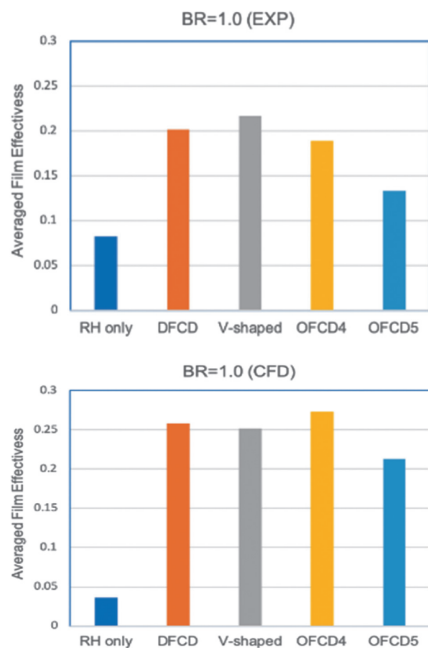


Fig. 12 Comparison of measured (top) and calculated (bottom) area-averaged film effectiveness for 4 devices and RH only (BR=1.0)

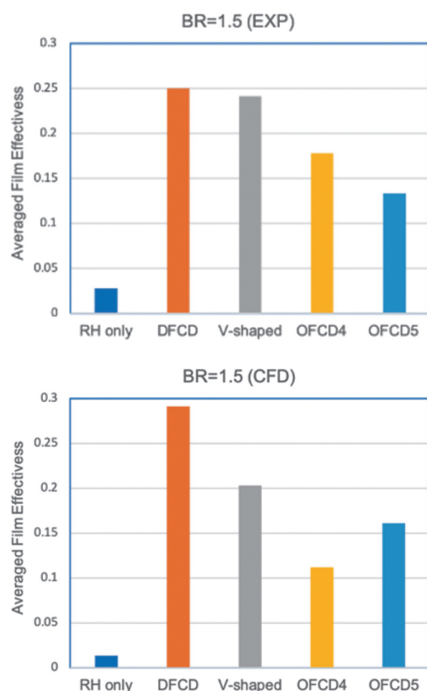


Fig. 13 Comparison of measured (top) and calculated (bottom) area-averaged film effectiveness for 4 devices and RH only (BR=1.5)

実験及び解析の結果として、フィルム効率向上に関する4種類のデバイスの効果の違いについては、下記の様にまとめることができる。即ち、BR=1.0, 1.5ともにDFCD, V字デバイスが中心線上の値、z方向への広がりという点で優れており、OFCDがそれに続く性能向上をもたらしている。Fig. 12, 13の面平均値から分かるように、デバイス設置は丸孔単独の場合の2倍以上の値を

もたらすなど、フィルム冷却効率の大幅な改善効果を有している。なお、実験、CFDともに、高BRではOFCDのフィルム冷却効率効果は低下しており、特にOFCD4で顕著である。

過去の研究^{(4),(7)}では、デバイスの効果はデバイスで発生する渦 (DBV) の規模とCRVPとの位置関係が深く関係していることが示されている。既にFig. 9, 10に示しているが、より詳細にOFCDによる渦構造を分析するため、フィルム冷却効率改善で良好な性能を示したBR=1.0におけるOFCD4とOFCD5について、それらの流れ方向渦度分布 ($x/d=5$ における計算結果)を議論する (Fig. 14)。なお、比較のためDFCD及びV字デバイスによる渦構造も同じFig. 14中に示す。この図から分かるように、両側デバイスがデバイス由来の渦対による吹き下ろしによるフィルム効率向上であるのに対し、OFCDは非対称的な渦構造を生成することで、CRVPの対称性を崩し、両側デバイスと比べ計測領域内での投影面積の小さな片側デバイスからのDBVのみでフィルム冷却効率を改善させるものである。この特徴は、後述するように空力損失にも関係し、結果として空力損失の抑制に繋がっている。

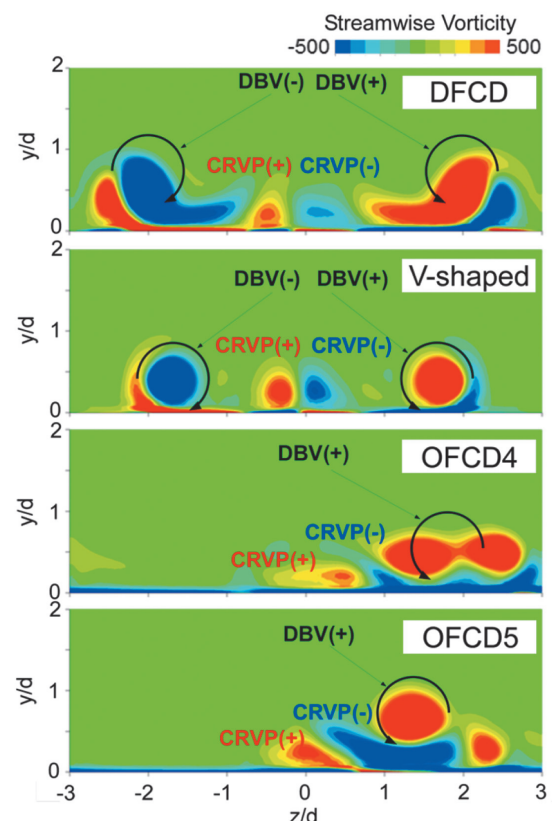


Fig. 14 Comparisons of calculated streamwise vorticity contours at $x/d=5$ (BR=1.0)

(2)NHFR (CFD)

Fig. 15には、BR=1.0におけるNHFRの計算結果の比較を示す。なお、これ以降では実験と比較的よい一致を示したBR=1.0での計算結果についてのみ議論する。デバイスは冷却空気の壁面への付着性を高める一方で、渦運動による熱伝達率増加を引き起こす可能性があり、結果として熱流束低減効果の指標であるNHFRが負の値を示すこともあり得る。実際、Fig. 15上の分布図では、丸孔単独及びOFCD4、5で吹き出し付近 ($0 \leq x/d \leq 5$) に、また両側FCDでは $x/d=7$ より下流域で負の領域が確認できる。この場合は、伝熱促進効果がフィルム効率向上の効果を打ち消していることになり、フィルム冷却導入の実質的な価値が失われることを意味するが、DFCDではそのような領域が広く存在している。Fig. 15下のNHFR面平均値からは、OFCD4が4つのデバイス形態の中で良好な冷却性能を有していることが分かる。

(3)空力損失 (CFD)

Fig. 16に、BR=1.0における4種類のデバイス使用時のよどみ点圧損失係数面平均値を示す。それぞれの値はDFCDの損失係数面平均値で無次元化されている。なお、面平均は計算領域の最下流部で算出している。この結果より、OFCD4はDFCDと比較して20%損失低減を実現している。

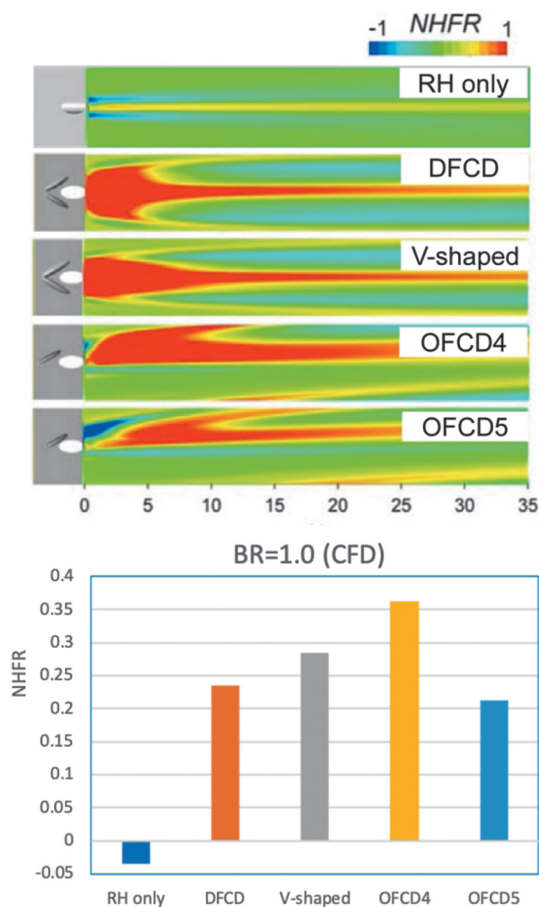


Fig. 15 Comparisons of calculated NHFR contours (top) and area-averaged values (bottom) for 4 devices (BR=1.0)

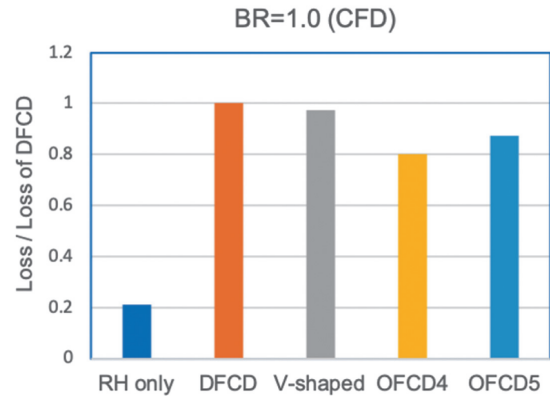


Fig. 16 Comparisons of calculated stagnation pressure loss for 4 devices (BR=1.0)

6. 結論

本研究では、丸形冷却孔によるフィルム冷却を対象に、今回新たに提案した片側デバイスOFCDが、空力損失を抑制しつつDFCDなどの両側FCDと同等のフィルム冷却性能向上能力を有し得るかの調査を、RANS解析及びPSP法を用いたフィルム効率計測を通じて行った。本研究で得られた成果は下記のようにまとめられる。

- 5種類のOFCDに対するCFD解析の結果から、CFD冷却孔の中心線から0.4dオフセットすることにより、 z 方向（孔ピッチ方向）及び流れ方向への冷却空気付着性の改善が確認された（OFCD4, OFCD5）。
- DFCD及びV字デバイスの両側デバイスを比較対象に選び、フィルム冷却効率、NHFR及び空力損失についての比較を行った。その結果、フィルム効率については両側デバイスには及ばないものの、OFCDはNHFR及び空力損失の点では両側デバイスよりも良好な性能を示し得ることを確認した。

以上のように、今回提案した片側デバイスの有用性及び有望性は確認されたと考えられるが、一方で空力損失増加が当初の狙い通りには低減できないなど改良の余地は十分にあるため、今後多目的最適化などを通じて、より実用性の高いデバイス開発を進める予定である。

参考文献

- 船崎健一, ガスタービンにおける伝熱・冷却技術の最新動向: 総論, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46 No. 6 (2018), pp. 421-426.
- 船崎健一, 流れ制御デバイスによるフィルム冷却の高効率化, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 46 No. 6 (2018), pp. 455-461.
- Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata, Daichi Takahashi, "Experimental and Numerical Investigations of Effects of Flow Control Devices upon Flat-Plate Cooling Performance", ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95197, 2013.

- (4) 船崎健一, 中田諒大, 川端浩和, 田川久人, 堀内康広, 流れ制御デバイスによるフィルム冷却性能の向上, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 456-464, 2014
- (5) 河村朋広, 船崎健一, 齋藤涼, 流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高効率化に関する研究—Dimple形状最適化—, 日本機械学会流体工学部門講演会(室蘭), PM57OS8-10, 2018
- (6) Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Yuya Suzuki, Hisato Tagawa and Yasuhiro Horiuchi, Improvement of Turbine Vane Film Cooling Performance by Double Flow-Control Devices, Journal of Turbomachinery, Vol. 138, 111005 (9 pages), 2016
- (7) Hayato Takisawa, Ken-ichi Funazaki, Hirokazu Sasaki, Tomohiro Kawamura, Hisato Tagawa, Susumu Nakano, Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices under High Density Ratio, Proceedings of ACGT 2016 (Mumbai, India), 2016
- (8) 河村朋広, 船崎健一, 瀧澤隼人, 田川久人, 森崎哲郎, 流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高効率化に関する研究—高密度比条件におけるデバイス最適形状検討—日本ガスタービン学会誌, Vol. 46 No. 4, pp. 306-313, 2018
- (9) 満尾和徳, 中北和之, 柴田充, 渡辺重哉, JAXA感圧塗料(PSP)計測システムの研究開発(3)—感圧塗料編一, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 2014
- (10) Charbonnier, D., Ott, P., Jonsson, M., Cottier, F. and Kobke, Th., Experimental and Numerical Study of the Thermal Performance of a Film Cooled Turbine Platform, ASME Turbo Expo 2009, GT2009-60306, 2009
- (11) 佐々木宏和, 感圧塗料計測系の開発及び先進的フィルム冷却技術の伝熱性能評価, 岩手大学修士論文(2016年度)
- (12) 瀧澤隼人, 流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高効率化に関する研究—デバイス形状最適化及び新規デバイス形状の探索—, 岩手大学修士論文(2016年度)
- (13) 齋藤涼, 船崎健一, 河村朋広, 森崎哲郎, フィルム冷却の高効率化に関するV字流れ制御デバイス形状の最適化, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会(鹿児島), 2018
- (14) ANSYS ICEM CFD Ver. 15 Tutorial Manual, 2013
- (15) 河村朋広, 流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却性能向上に関する研究—新規デバイス形状の探索—, 岩手大学修士論文(2018年度)
- (16) 川端浩和, 高圧タービン翼フィルム冷却の熱流体特性及び流れ制御技術に関する研究, 岩手大学博士學位論文(2014年度), p.148 (https://iwate-u.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=10423&item_no=1&page_id=13&block_id=21)
- (17) ガスタービン工学, 日本ガスタービン学会, p. 96, 2013