

特集：ガスタービンにおける伝熱・冷却技術の最新動向

流れ制御デバイスによるフィルム冷却の高効率化

Film Effectiveness Improvements by Use of Flow Control Devices



船崎 健一*¹
FUNAZAKI Ken-ichi

キーワード：ガスタービン，タービン，フィルム冷却，流れ制御デバイス，実験，CFD

Key Words：Gas Turbine, Turbine, Film Cooling, Flow-Control Devices, Experiment, CFD

1. はじめに

本特集記事の総論で述べたように，GTのタービン入口温度の高温化実現に貢献する各種冷却技術の中で，フィルム冷却は最も重要な技術の一つである。40年にも及ぶフィルム冷却に関する研究の中で最大の革新的技術と言えるものはShaped holeであり，現在も数多くの研究が行われている。翼などへの冷却孔の加工には，放電加工（EDM）が用いられてきたが，非電導性のTBC（Thermal Barrier Coating）施工翼への加工や角度の浅い冷却孔の加工などのニーズの高まりとともに，レーザー加工法（LDM；Laser Drilling Method）が長足の進歩を遂げ，その利用拡大が進んでいる⁽¹⁾。LDMは通常の丸型冷却孔（Cylindrical Hole;CH）だけではなく，Shaped holeの加工にも用いられている⁽²⁾。近年，より効果的な冷却性能を求めてShaped holeは形状がさらに複雑化する傾向にあるが，その形状を翼面上で実現するためのLDMの手順も複雑化し⁽³⁾，結果としてコストを押し上げる原因の一つとなっている。また，Shaped holeにも多くの課題があることも指摘されており^{(4),(5)}，その実機への適用には十分な注意が必要とされている。

一方で，進んだLDMの技術をCHに利用して，低コストで高効率なフィルム冷却を実現する研究も進んでいる。その代表的な例として，複合角（Compound Angle Hole），複合冷却孔（Double Jet）やAnti-Vortex Holeなどがある^{(6),(7)}。これらの手法が基にしている基本的な考えは，所謂冷却空気の翼面への付着を阻害しているCRVP（Counter-Rotating Vortex Pair）の制御である。即ち，CRVPの対称性を崩すとともに，隣接する冷却孔や複数の冷却孔からの渦構造との干渉効果を利用することで，冷却空気の翼面への付着性を向上させ，また，横方向への広がりへの促進も期待される。

CHの低製造コストという利点を活かしつつフィルム効率の向上を図る取り組みの一つとして，CHの前後の翼面上にデバイスを成形しておく方法が提案されている。デバイス付の冷却孔をどう定義するかであるが，製造性やコーティング施工などの点から，デバイスとしての形状を予め精密鋳造で翼面上（または翼内面上）に成形し，そこにLDMなどで冷却孔を加工するものとする。機械加工でデバイス成形を行うことも考え得るが，コスト面でメリットは薄く，ここではそれを除外する。デバイスの種類としては，突起（Protrusion, Bump, Ramp^{(7),(8)}, Pin），くぼみ（Dimple）が多いが，溝（Trench）やクレーター（Crater）も含めることは可能であろう。三角形のタブ（Tab）を冷却孔出口に設置する方法⁽⁹⁾も提案されているが，上記の定義に基づく除外されることになる。

本解説記事では，まずCRVPの発生メカニズム，既往の類似研究例等の紹介に続いて，岩手大学で進めている流れ制御デバイス（FCD; Flow-Control Device, DFCD; Double Flow-Control Device）の概要を述べ，流れ制御デバイスの可能性と課題について述べる。

2. 流れ制御デバイスの原理

2.1 CRVP

フィルム冷却の高効率化の実現にとりCRVPの制御が重要であることは既に述べたが，まずCRVPの発生メカニズムについて振り返ってみる。

CRVPは準定常的な渦構造で，孔のかなり下流までその構造が維持されることが知られている⁽¹⁰⁾。CRVPに関しては，主流に対して丸孔から垂直に吹き出される噴流を対象とした研究で詳細な調査が行われている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁷⁾が，その生成には様々な現象が関与している。そのため，噴流内部及びその周囲で発生する渦構造についても，流れ場の条件（レイノルズ数，噴き出し比）や観察方法（実験，CFD）などによる差異はあるが，様々な模式図が提案されている。CRVPのような縦渦構造の生成

原稿受付 2018年9月25日

* 1 岩手大学理工学部 システム創成工学科機械科学コース
〒020-8551 盛岡市上田4-3-5
E-mail: funazaki@iwate-u.ac.jp

には、噴流という「障害物」の存在と、噴流自身、噴流wake、壁面境界層、孔内境界層というせん断層の存在が主な要因と考えられるが、その主たるものとして噴流を取り囲むせん断層から生ずるリング渦の影響が大きいという報告がある^{(10), (11)}。リング渦の発生メカニズムとしては、Kelvin-Helmholtz不安定波ではなく、Landman, Staffmanの理論⁽¹⁸⁾で説明できるという報告もある⁽¹⁰⁾。噴流に対する渦度の供給源は主流とのせん断層だけではなく、孔内境界層も貢献度を有し、これに起因するCRVPの存在も指摘されている^{(14), (15)}。Yuanら⁽¹⁶⁾は、孔出口直後における噴流の側面を通過する流れと噴流との間の歪んだせん断層で生ずるぶらさがり渦 (Hanging Vortices) を核として、孔内境界層の渦度を取り込むことでCRVPへ成長する、としている。Frohlichら⁽¹⁷⁾は、ぶらさがり渦がCRVP発生の主たる要因としながらも、リング渦の貢献も認めている。

一方、タービン翼冷却孔のような翼表面と直交せず、また孔入口で流れの剥離などが発生し、不均一な速度分布で噴出するような場合、CRVPの形成過程も直交噴流の場合と異なってくることが考えられる。酒井ら⁽¹⁹⁾は、丸型冷却孔からの噴出空気に関する大規模なLES解析を行っている (Fig. 1, 2)。そこでは、ぶらさがり渦がCRVPの主因であると断ずるとともに、噴き出し比の違いにより噴出空気まわりで発生する渦構造や壁面で発達する渦構造を解像するとともに、それらの干渉現象とCRVP生成過程への影響などを議論している。

2.2 制御原理

既往の研究 (Fan-Shaped, Compound, Double Jet, Trenchなど) 及び前述のCRVP発生原理を踏まえ、CRVPを抑制しフィルム効率の改善を図る手法について、整理してみよう。

例えば、Fan-Shaped特に下流側に傾きを有するlaid-backタイプでは、同じスロットリング部面積 (丸孔部面積) に対して孔出口での噴出速度が低く抑えられ、壁面法線方向の運動量も低くなり、噴流側面でのせん断層の歪みやぶらさがり渦の強さも弱まり、CRVPの渦対間隔も広がる。結果として、噴流のlift-offが制御される、というシナリオが描けるであろう。また、複合角の場合には、CRVPの渦対の対称性が崩れることによる効果が大きい。この場合、壁面による鏡像効果によるlift-offの増強効果が薄れ、巨大化する側の渦の孔ピッチ方向側への移動促進効果が顕在化するため、スパン方向への広がりも改善すると考えられる。Trenchの場合は、溝部における主流減速効果及び下流側端面がブロックageとなり噴流まわりの渦構造が形成されにくく、かつ、溝方向に二次空気が拡散し、広範囲の冷却が可能となる。また、Double JetやSister Hole (冷却孔のまわりに設けられた複数の小孔) になど、CRVPの効果を弱めるAnti-CRVPという渦構造を生成するというアプローチもある。

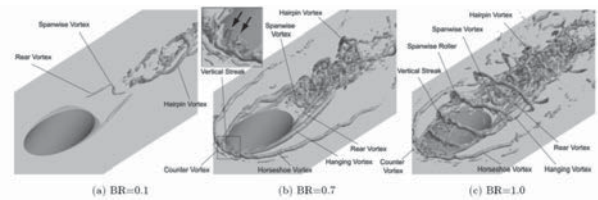


Fig. 1 Comparison of vortical structures around hole exit⁽¹⁹⁾

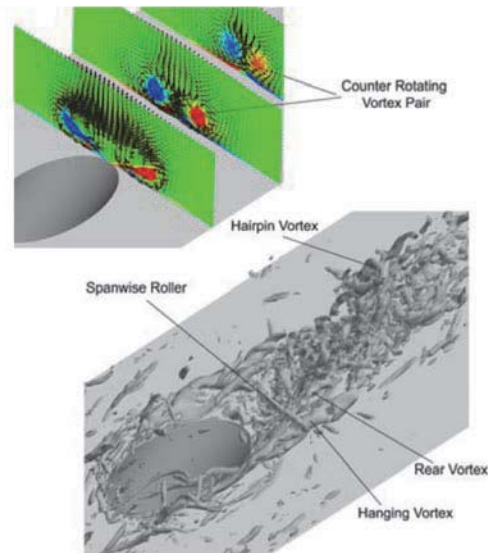


Fig. 2 Vortical structures around hole exit with velocity vectors indicating the occurrence of CRVP⁽¹⁹⁾

2.3 流れ制御デバイスの例

(1) 冷却孔下流側に設置する場合 後でも述べるが、多くの流れ制御デバイスには幾つかの克服すべき課題がある。その一つは空力損失増加を招くこと、また、デバイスの耐久性 (耐熱性) である。後者に関しては、デバイスを自身の何かしらの方法で冷却することで克服できると考えている。その意味で、デバイスを冷却孔下流に設置する方法は理に適っている。

Sakaiら⁽²⁰⁾、酒井ら⁽²¹⁾は、Fig. 3のような丸及びshaped冷却孔下流にBumpや突起を置いた場合のフィルム効率を数値的に調査している (図中のBRは噴き出し比を表す)。Fig. 4には、丸孔の場合について、bump等の設置によりどの程度平均フィルム効率が変化するかを、噴き出し比を変えて示したものである。丸孔の場合、孔直下流に円柱状の短突起を設置した場合が平均フィルム効率が大きく向上している。Fig. 5は、shaped孔の場合を示す。shaped孔は、元々中程度までの噴き出し比条件で良好なフィルム効率を示すことが知られており、結果として低噴き出し比条件では、bump等の設置によりフィルム効率は低下しているが、それ以外ではフィルム効率の大幅な改善が得られている。特に円柱状突起によってフィルム効率が大きく改善した理由として、①突起下流部の低圧部に二次流れが流入する効果②突起による拡散効果③突起先端からの渦による吹き下ろし効果、が挙げ

られている（この研究では突起付内部流路からの冷却空気噴出を扱っており、フィルム効率にも内部流路内での渦構造などの影響が現れている点に留意する必要がある）⁽²¹⁾。

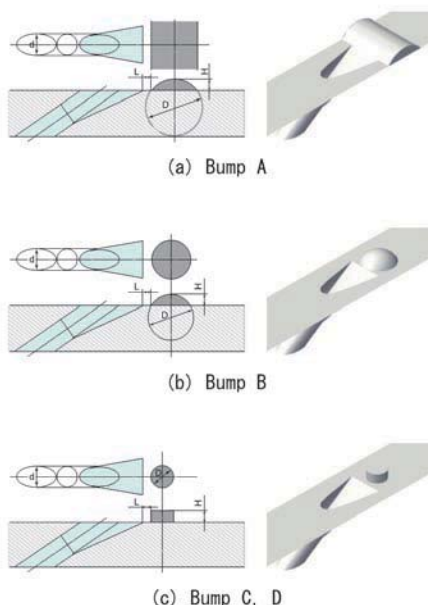


Fig. 3 Several types of bumps placed downstream of a cooling hole⁽²¹⁾

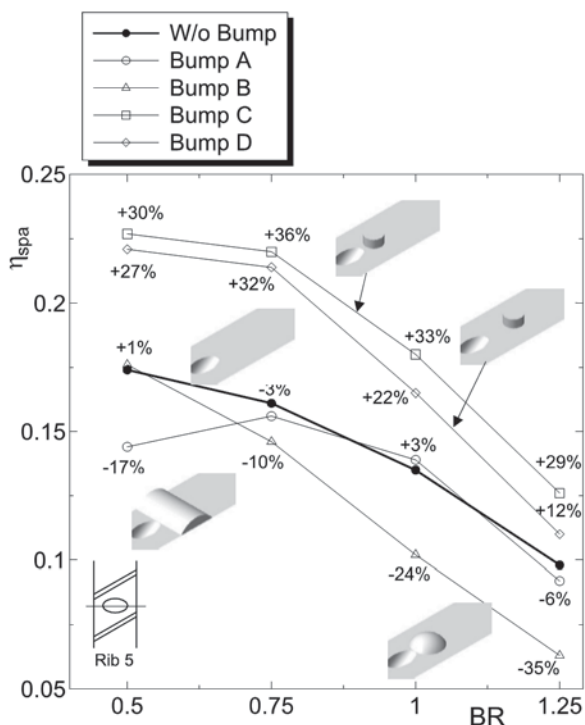


Fig. 4 Film effectiveness enhancement caused by bumps (round hole case)⁽²¹⁾

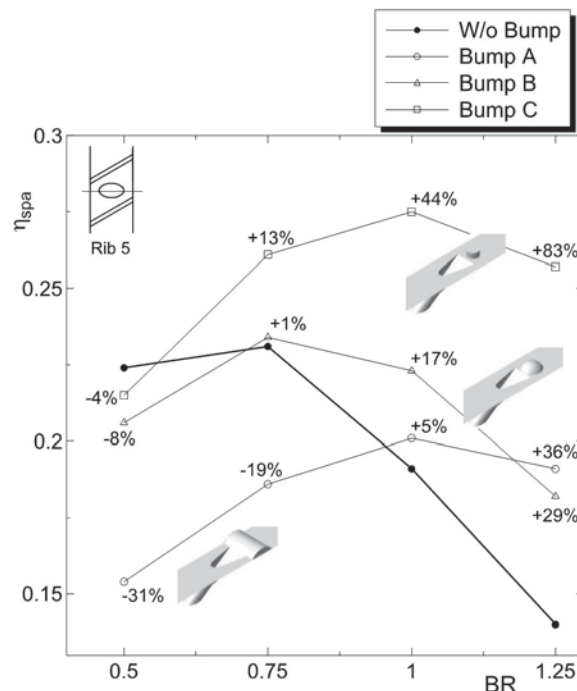


Fig. 5 Film effectiveness enhancement caused by bumps (shaped hole case)⁽²¹⁾

(2) 冷却孔上流側に設置する場合 冷却孔上流に置く場合、空力損失や耐久性の問題を考える必要がより大きくなるが、それを踏まえて提案された制御デバイスの例を紹介する。

Fig. 6には、Zhou, Hu⁽²²⁾によって提案されている砂丘 (Sand dune) を模した形状の突起物を示す。図からもわかるように、このデバイスは冷却孔出口の大半（種類によっては全部）を覆い隠すようになっている。そのため、この形状を通常の加工方法で成型することはほぼ不可能に近いが、将来的にAM (Additive Manufacturing) などによる冷却翼製造が一般的になった場合には実現出来る可能性はあるだろう。Fig. 7には、このデバイスを設置した場合の流れ場を、デバイス無しの場合との比較で示している。デバイスの無い場合には、前述したようにCRVPの効果により噴出空気がリフトオフし、いわゆる腎臓の形 (kidney-shape) をした構造が発生している。一方、砂丘型デバイスを適用した場合は、デバイスが冷却孔直後の噴出空気の垂直方向の運動を抑制することで噴流が壁面と平行に噴出している。また、デバイスが噴流の側面までも覆っていることで主流との干渉がなく、CRVPの発生も抑制されている。加えて、デバイスの側面でanti-CRVPが発生しており、この渦構造の効果によって噴流に対する吹き下ろし流も生じている。これらの効果により、デバイスを適用した場合は噴流の壁面への付着性や横方向への拡散も改善している。当然のことながら、冷却孔を覆う範囲が大きくなるほど改善効果もより大きくなっている。

この砂丘型のデバイスは、内側から直接的に冷却され

る構造になっており、難製造性という課題はあるものの、発展性を秘めたデバイスであると言えるだろう。

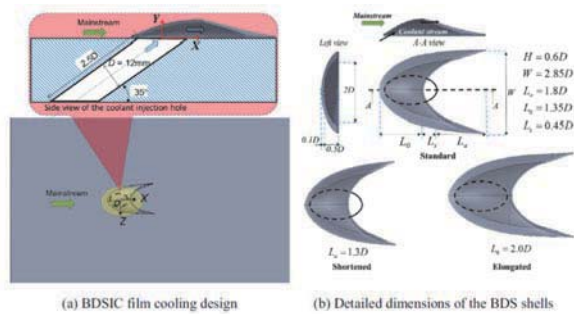


Fig. 6 Sand-dune-like device²³ (by courtesy of Prof. Hu of Iowa State Univ.)

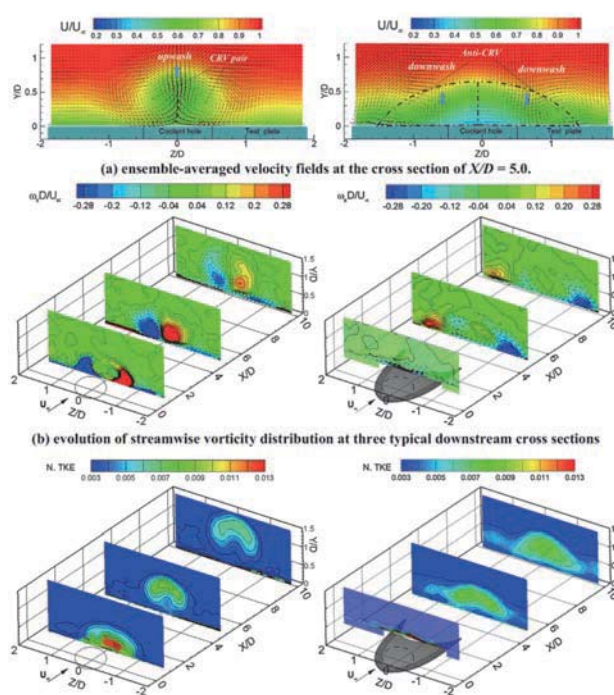


Fig. 7 Effects of sand-dune-like device on ejected air²³ (by courtesy of Prof. Hu of Iowa State Univ.)

3. 岩手大学における流れ制御デバイスの研究例

3.1 単独流れ制御デバイス

岩手大学では、「流れ制御デバイス (Flow Control Device; FCD)」に関する研究を進めている²³⁻²⁵。以下には、Kawabataら²⁵が行った、冷却孔上流に単独のFCDを設置した研究を紹介する。

この研究では、Fig. 8のように、丸孔冷却孔の中心から $1.5d$ (d は孔直径) 上流に設置された円弧状の突起型デバイスを、孔ピッチ方向に $0.25d$ ずつシフトさせ、丸孔からのフィルム効率改善の可能性を探ったものである。同研究では、①IRカメラによる表面温度の時間的変化を元に過渡応答法を用いてフィルム効率及び熱伝達率の同時計測、②3次元LDV (Laser-Doppler Velocimetry) による流れ場計測、③櫛形温度プローブ、全圧プロー

ブによる温度分布及び全圧損失計測、及び④汎用コードを用いたLES解析、という包括的な調査方法が採用されている。Fig. 9には、2種類の高さ (H) のデバイスを4つのピッチ方向位置 (L) に設置した場合のフィルム効率を、デバイス無しの場合のフォルム効率との比で表したものである。この結果から、Case03 ($H=0.5d$, $L=0.5d$), Case04 ($H=0.5d$, $L=0.75d$) でのフィルム効率増加率が圧倒的に大きいことが判明した。Fig. 10には、冷却孔下流における2次流れの速度ベクトルと流れ方向温度コンターをそれぞれ示す。これらの図から、デバイス単独ではCRVPと反対の渦構造を生成しデバイス直後に吹き下ろしを生成している (Case01, $BR=0.0$) にも関わらず、インラインに配置されたCase01 ($BR=0.5$, 1.0) ではかえってCRVPが強化されることになる一方、ピッチ方向にデバイスがオフセット配置されたCase03, 04では、デバイス下流での吹き下ろし効果とCRVPの対称性の崩れが奏功する形でフィルム効率改善が得られたものと考えられる。

この研究で、上流設置のデバイスの効果が明らかになったが、耐久性、空力性能への影響、流動条件へのロバスト性などの課題もあり、その課題解消への取り組みとしてDFCDが提案された。

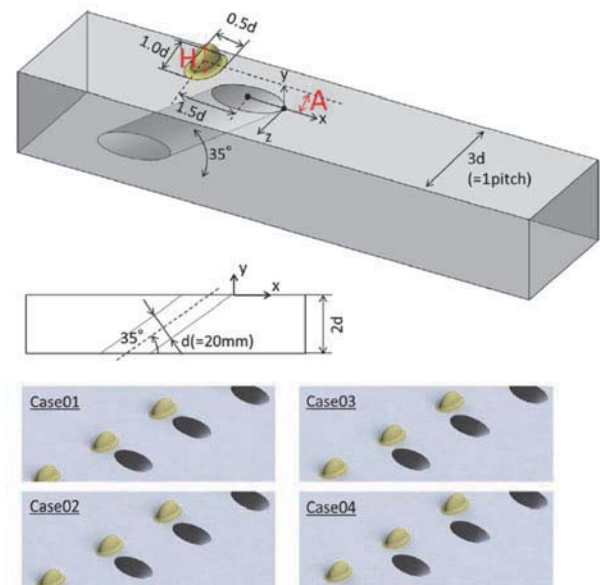


Fig. 8 Configurations of FCD placed upstream of cooling holes²⁵

3.2 複合流れ制御デバイス

Fig. 11には岩手大学で考案された制御デバイスDFCDとそれによって引き起こされた渦構造がCRVPとどのように干渉するかの模式図を示す²³。DFCDは、冷却孔上流に2つの半回転楕円体状の突起物をハの字を描くように設置したもので、所謂Vortex generatorに形状や機能の面で類似点が多い。DFCDの形状、配置については、先行研究^{24, 25}を元に実験計画的に調査を行い良好

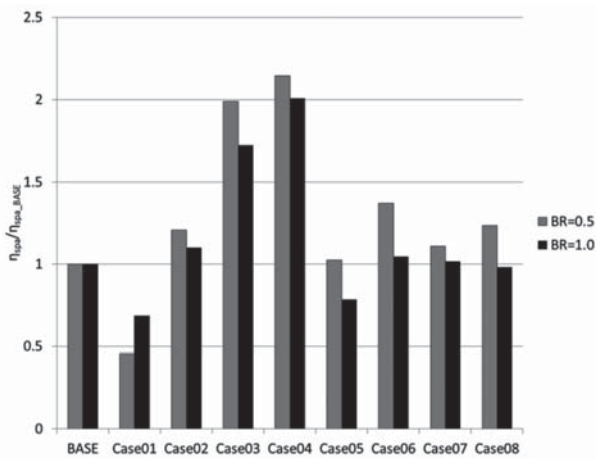
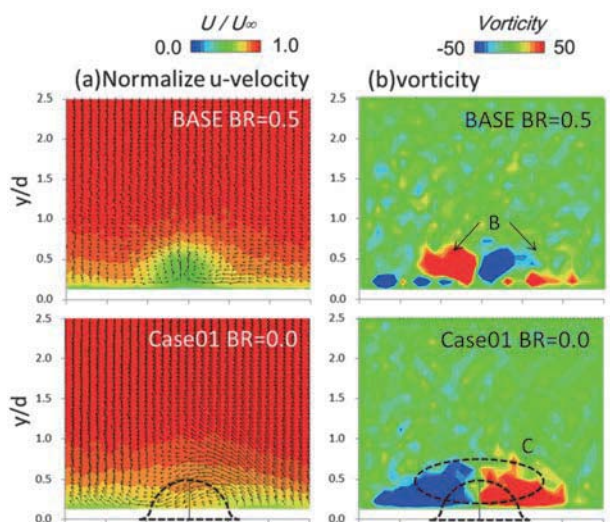
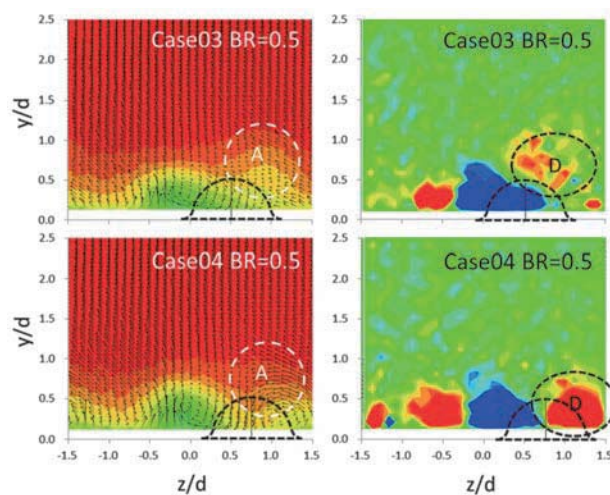


Fig. 9 Enhancement ratios of film effectiveness by use of several types of FCD²⁵



(a) No device and with device-no cooling air



(b) Effects of device (Case03 and Case04)

Fig. 10 Induced velocity vectors and the streamwise vorticity contours behind the cooling hole with and without FCD measured at $x/d = 3.0$ ²⁵

なフィルム冷却性能を示すものを探索している。それを丸孔冷却孔上流に設置し、孔ピッチ、噴き出し比などを変化させフィルム効率をIRカメラ+過渡応答法により計測し、同一条件で計測したshaped冷却孔のフィルム効率と比較している。

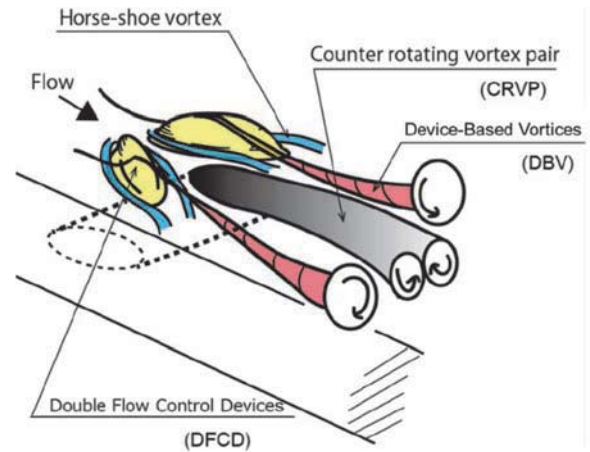


Fig. 11 Vortical structures created by DFCD installed upstream of a conventional cooling hole accompanied with CRVP²⁴

Fig. 12には、丸孔冷却孔 (C.H.), shaped冷却孔 (S.H.) 及びDFCDを設置した丸孔冷却孔 (C.H.FCD) それぞれの冷却孔下流のフィルム効率コンター図を示す。孔ピッチは3.0d, 4.5d及び6.0dの3種類である。この図から、DFCDを設置した場合、冷却孔から噴出した空気

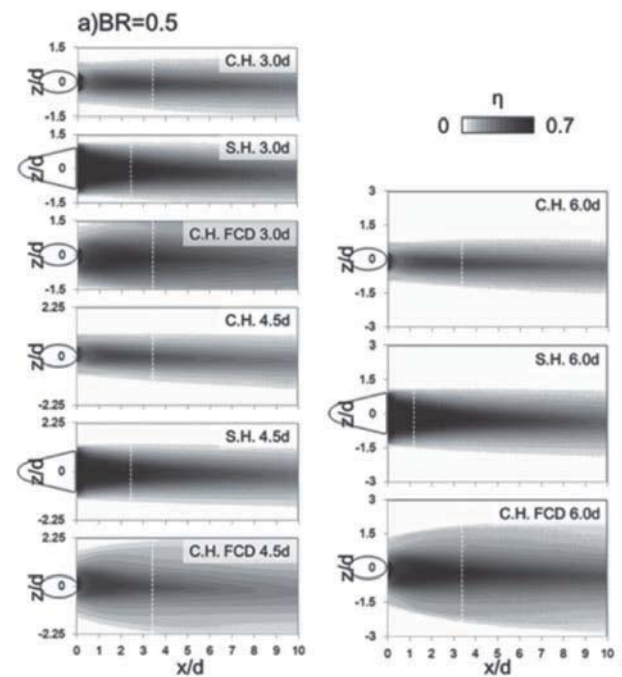


Fig. 12 Film effectiveness contours for three cooling hole configurations (BR=0.5)²⁶

は孔ピッチ方向に広く拡大し、その拡大範囲は孔ピッチ4.5dでもほぼ1ピッチ分にまで達しており、孔ピッチ6.0dでも噴出空気が表面を覆う範囲はshaped孔の場合の範囲よりも大きい。実際にピッチ方向平均されたフィルム効率、BR=0.5ではDFCDを適用した場合の面平均フィルム効率の方が全ての孔ピッチ条件でshaped孔の平均値を上回り、BR=1.0では若干shaped孔の方がDFCD適用のものを若干上回るという結果になっている。Kawabataら²⁷⁾は経験的に形態(形状、配置)を決定した上述のDFCDに対してタグチメソッドによる最適形態の探索を行っている。この研究では、最適形態探索の手法としてCFDと実験の2つを用いており、制御因子の最適水準については両者の結果が一致することを見出している。

DFCDに関する研究は、Kawatabaら²⁸⁾による直線翼列翼への応用、高密度比条件での性能評価と最適化^{29), 30)}、shaped孔への適用と最適化³¹⁾へと展開されている。

DFCDの課題は空力損失増大とデバイス自身の耐熱性である。損失については、孔ピッチの拡大による冷却空気全体の削減可能性の調査と多目的最適化手法による低損失形態の探索が重要となる。また、耐熱性については、デバイスを直接的に冷却することやデバイスを冷却孔に接近させ間接的に冷却することなどが対策として考えられ、現在その方向で調査を進めている。

4. むすび

フィルム冷却に関する基礎的な点であるCRVPについて解説するとともに、フィルム冷却性能の改善手法の一つとして、翼表面にデバイスを設置する制御手法を紹介した。難点はあるものの、shaped孔に匹敵しうるポテンシャルを有する手法であるということが読者諸氏にお伝えできたら幸いである。

参考文献

- (1) 小熊秀隆他5名, 高効率ガスタービン実現のための先進材料・製造技術開発, 三菱重工技, Vol. 52, No. 4 (2015), pp.5-14.
- (2) Shankar, N., Laser Drilling Improves Turbine Engine Performance, Industrial Laser Solution for Manufacturing (07/19/2017) (<https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-32/issue-4/features/laser-drilling-improves-turbine-engine-performance.html>), (参照日2018年9月22日)
- (3) Schaeffer, R., Fundamentals of Laser Micromachining, CRC Press (2016), p. 145.
- (4) Issakhanian, E., Elkins, C.J. and Eaton, J.K., Film Cooling Effectiveness Improvements using a Non-Diffusing Oval Hole, ASME TURBO EXPO 2015, GT2015-42243 (2015).
- (5) Issakhanian, E., Elkins, C.J. and Eaton, J.K., Pitfalls of Fa-Shaped Hole Design: Insights from Experimental Measurement of In-Hole Flow through MRV, ASME TURBO EXPO 2015, GT2017-63679 (2017).
- (6) Ekkad, S. and Han, J.C., A Review of Hole Geometry and Coolant Density Effect on Film Cooling, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, 8 (2015).
- (7) Shinn, A.F. and Vanka, S.P., Large Eddy Simulations of Film-Cooling Flows with a Micro-Ramp Vortex Generator, *ASME Transaction Journal of Turbomachinery*, Vol. 135, Oct. (2012).
- (8) Na, S. Shih, T.I.P., Increasing Adiabatic Film-Cooling Effectiveness by Using an Upstream Ramp, *ASME Transaction Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, Dec. (2006), pp. 464-471.
- (9) Nasir, H., Acharya, S. and Ekkad, S., Improved Film Cooling from Cylindrical Angled Holes with Triangular Tabs: Effect of Tab Orientation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24 (2003), pp. 657-668.
- (10) Blanchard J., Brunet Y., Merlen A., Influence of a Counter-Rotating Vortex Pair on the Stability of a Jet in a Cross Flow: An Experimental Study by Flow Visualizations. *Exp Fluids* 26 (1-2) (1999), pp. 63-74.
- (11) Chassaing P., George J., Claria A., Sananes F., (1974) Physical Characteristics of Subsonic Jets in a Cross-stream, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 62 (1974), pp. 41-64.
- (12) Schlegel, F., Wee D., Marzouk, Y.M. and Ghoniem, A.F., Contributions of the Wall Boundary Layer to the Formation of the Counter-Rotating Vortex Pair in Transverse Jets, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 676 (2011), pp. 461-490.
- (13) Cambonie, T., Gautier, N. and Aider, J.-L., Experimental Study of Counter-Rotating Vortex Pair Trajectories Induced by a Round Jet in Cross-Flow at Low Velocity Ratios, *Experiments in Fluids*, Vol. 54 (2013)
- (14) Kelso, R., Lim, T., Perry, A., 1996. An experimental study of round jets in cross-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 306 (1996), pp. 111-144.
- (15) Majander, P. and Siikonen, T., Large-eddy simulation of a round jet in a cross-flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 27 (2006), pp. 402-415
- (16) Yuan, L.L., Street, R.L. and Ferziger, J.H., Large-Eddy Simulation of a Round Jet in Crossflow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 379 (1999), pp. 71-104.
- (17) Frohlich, J., Denev, J.A. and Bockhorn, H., Large Eddy Simulation of a Jet in Crossflow, *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering 2004* (2004).
- (18) Landman, M.J., Saffman, P.G., (1987) The three-dimensional instability of strained vortices in a viscous fluid. *Physics of Fluids*, Vol. 30 (1987), pp. 2339-2342.
- (19) 酒井英司, 高橋俊彦, 渡辺裕章, 主流中に傾斜して吹出される円形ジェットの大規模シミュレーション, *日本機械学会論文集 (B編)*, Vol. 78, 789 (2012), pp. 1107-1117.
- (20) Sakai, E., Takahashi, T., and Agata, Y., Experimental

- Study on Effects of Internal Rib and Rear Bump on Film Effectiveness, ASME Paper No. GT2012-68268 (2012).
- (21) 酒井英司, 高橋俊彦, 安形友希子, ガスタービン動翼の膜冷却効率に及ぼす内部冷却リブと孔後方突起の影響, 電力中央研究所報告M11002 (2012).
- (22) Zhou, W. and Hu, H., A Novel San-Dune-Inspired Design for Improved Film Cooling Performance, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 110 (2017), pp. 908-920.
- (23) 川端浩和, 高温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, 岩手大学博士論文, 2015
- (24) 川端浩和, 船崎健一, 加藤大雅, 高橋大地, 高圧タービン用フィルム冷却の制御技術に関する研究, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 40, No. 6 (2012), pp. 323-330.
- (25) Kawabata, H., Funazaki, K., Nakata, R. and Takahashi, D., Experimental and Numerical Investigations of Effects of Flow Control Devices upon Flat-Plate Film Cooling Performance, ASME Transaction Journal of Turbomachinery, Vol. 136, June (2014)
- (26) 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 (2014), pp.456-464
- (27) 川端浩和, 船崎健一, 中田諒大, 田川久人, 堀内康広, タグチメソッドを用いたフィルム冷却用流れ制御デバイスの最適化手法に関する研究, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 5 (2014), pp. 449-455.
- (28) Kawabata, H., Funazaki, K., Suzuki, Y., Tagawa, H. and Horiuchi Y., Improvement of Turbine Vane Film Cooling Performance By Double Flow Control Devices, ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 138 Nov. (2016).
- (29) Takizawa, H., Funazaki K., Sasaki, H., Kawamura T., Tagawa, H. and Nakano, S., Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices under High Density Ratio, ACGT2016 (India), ACGT2016-123 (2016)
- (30) 河村朋広, 船崎健一, 瀧澤隼人, 田川久人, 森本哲郎, 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 (2018), pp. 306-313.
- (31) Funazaki, K., Enhancement Of Film Effectiveness Of Cooling Holes With Fan-shaped Exit Geometry by the Application of Double Flow-Control Devices: Optimization in Consideration of Device Offset", ASME TURBO EXPO 2017, GT2017-65032 (2017).