

# V字形形状流れ制御デバイスによる フィルム冷却性能改善に関する研究

## Studies of Film Cooling Performance Improvement by V-shaped Flow Control Device

齋藤 涼\*<sup>1</sup>  
SAITO Suzuna

船崎 健一\*<sup>1</sup>  
FUNAZAKI Ken-ichi

### ABSTRACT

This paper describes a new V-shaped flow control device to improve film cooling performance of gas turbine cooling holes. This is invented with the aim of reducing the aerodynamic loss and the thermal load of devices, which are regarded as points for improvement of the double flow control devices (DFCD) invented by some of the authors. This device is a V-shaped protrusion that is created by merging a pair of protrusions with the shape of hemi-spheroid. In addition, this is attached to the turbine blade surface just upstream of each of cooling holes. The purpose of this study is to optimize V shaped device, by use of CFD and Taguchi Methods so as to increase film effectiveness of the cooling hole and decrease the device-based total pressure loss than DFCD.

キーワード：ガスタービン，フィルム冷却，流れ制御，効率，タグチメソッド，CFD

Key words : Gas Turbine, Film Cooling, Flow Control, Efficiency, Taguchi-Method, CFD

### 1. 研究背景

近年，ガスタービンの更なる高効率化が求められている。高効率化を達成するための手段の一つとして，タービン入口温度（TIT）の上昇が挙げられるが，TITの上昇は同時に燃焼器直下流に位置する高圧タービン部の熱負荷を増大させるため，今後のタービン翼開発には少量の冷却空気でも効果的な冷却を実現する技術の研究が求められる。中でも高温の主流ガスに対して優れた遮熱効果を持つフィルム冷却技術については，フィルム冷却効率の一層の向上が強く求められている。フィルム冷却については様々な研究がなされている。Haven<sup>(1)</sup>らは，フィルム冷却が主流と干渉する際に発生させる Counter Rotating Vortex Pair (CRVP) と呼ばれる渦構造に着目し，それが冷却空気の巻き上がりを誘起し，壁面への冷却空気付着性を著しく低下させることを示した。それ以後，CRVPを抑制するために数多くの流れ場制御手法<sup>(2)-(5)</sup>が研究されている。Funazaki<sup>(2),(3)</sup>らは三次元形状の流れ制御デバイスである Double Flow Control Devices (DFCD) を発案した。なお，DFCDは岩手大学と三菱日立パワーシステムズ(株)にて日本で特許登録されている（登録番号：6134193）。DFCDを冷却孔上流に設置することでCRVPとは逆回転のDBV (Device-Based

Vortices) が発生し，CRVPを抑制し，フィルム冷却性能の向上が確認されている (Fig. 1)。しかし，DBVによる空力損失が大きいこと，デバイス自体への熱負荷が大きいことも確認されており，これらを低減することが実機適用上の課題として認識されていた。そこで著者ら<sup>(6)</sup>は，DFCDをV字形にした新規デバイス（以下，V字デバイスと称す）を提案した。ここでは，冷却孔下流面平均フィルム冷却効率  $\eta_{ave}$  を評価指標として最適化した結果より，V字デバイスはデバイス間隔を狭めることで規模の小さなDBVでもCRVPの抑制効果が持続し，空力損失の低減が期待できること，またDFCDより冷却孔と設置位置が近いことデバイス表面が冷却され，デバイス自体の熱負荷削減も期待できることが示された。

本論文では，新たな制御デバイスであるV字デバイスの最適化について報告する。最適化評価指標に冷却孔下流面平均フィルム冷却効率  $\eta_{ave}$ ，全圧損失係数  $\zeta$ ，デバイス表面平均フィルム冷却効率  $\eta_{vd}$  を選定し，数値解析によりV字デバイスの最適形状を探索した結果，ならびに，探索された最適形状についての性能評価結果について報告する。

○主な記号

$a, b, c$ : 重み係数 [-]	$T$ : 温度 [K]
$BR$ : 吹き出し比 [-]	$U$ : 流速 [m/s]
$d$ : 冷却孔直径 (10[mm])	$Y$ : 評価指標 [-]
$DR$ : 密度比 [-]	$y^+$ : 壁面方向距離 [-]
$M$ : 流量 [kg/s]	$\alpha$ : 冷却傾斜角 [deg.]

原稿受付 2019年10月7日

査読完了 2020年5月18日

\* 1 岩手大学大学院

〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

$n$ : 誤差因子数	$\varepsilon$ : 主流流入角 [deg.]
$P$ : 圧力 [Pa]	$\zeta$ : 全圧損失係数 [-]
$\dot{q}$ : 熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]	$\eta$ : フィルム冷却効率率 [-]
$Re$ : レイノルズ数 [-]	$\rho$ : 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$x, y, z$ : 主流方向, ピッチ方向, スパン方向	
-添え字-	
$ave$ : 冷却孔下流面平均	$vd$ : デバイス表面平均
$i$ : 条件名	$wall$ : 断熱壁
$n$ : 誤差要因数	2 : 二次空気
$t$ : total	$\infty$ : 主流

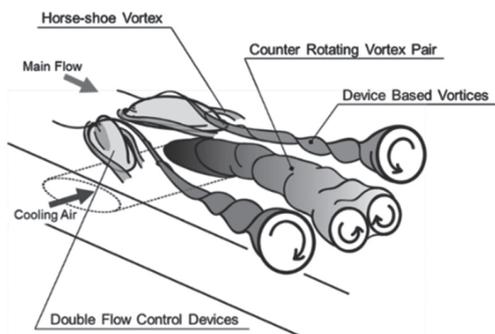


Fig.1 Flow mechanism (7)

## 2. 最適化手法

### 2.1 概要

本論文では最適化手法にタグチメソッド<sup>(8)</sup>を用いた。本手法は解析対象への環境変動に対してロバストな設計を実現する特徴がある。さらに、少ないサンプルデータから最適形状を導出できる利点が挙げられる。

### 2.2 タグチメソッド

#### (1) 最適化形状導出の流れ

以下に最適化形状導出の流れ①～⑦を示す。

- ① V字デバイスの制御因子・誤差因子の選定
- ② 各因子の水準値選定
- ③ 適用する直交表の決定
- ④ 決定した水準値の直交表への割り付け
- ⑤ ④で作成されたV字デバイス形状を用いた最適形状導出用サンプルデータの取得
- ⑥ サンプルデータを用いたSN比算出及び最適化形状の決定
- ⑦ 導出された最適形状の性能評価

#### (2) 制御因子及び誤差因子

制御因子は設計パラメータとして制御可能な因子、誤差因子は出力に影響するが設計で制御することができない因子である<sup>(8)</sup>。本論文ではV字デバイス形状の外観、および最適化に用いた制御因子A～EをFig. 2に示す。制御因子A～Eにおいて、A: AngleはV字デバイスの開き角度、B: DistanceはV字デバイス高さ最大点と冷却孔中心の距離、C: HeightはV字デバイスの高さ、D: Length1はV字デバイス高さ最大点より上流側長さ、E: Length2はV字デバイス高さ最大点より下流側長さであ

る。制御因子の水準値については、 $\eta_{ave}$ を評価指標として探索された最適解<sup>(6)</sup>を基準として、本研究の目的である「DBVの規模の縮小」と「デバイスの冷却」を目指しTable 1の通り選定した。また、本論文では制御因子を5因子に選定し、それぞれの因子に対し4水準を割りあてたことからL16直交表を採用した。本最適化に採用した直交表をTable 2に示す。Table 2のA～Eは制御因子、数値1～4はLevel1～Level4を表す。全16種類のV字デバイス形状を用いて、CFD解析によるサンプルデータの取得を行なった。また、誤差因子には主流流入角 $\varepsilon$  ( $=0, 5, 10$  deg.)を選定した。DFCDに関する研究<sup>(9)</sup>において、 $\varepsilon$ 変化はデバイスが形成する渦構造に変化を与え、 $\eta$ に大きく影響することが明らかになっている。

#### (3) 評価指標

最適化指標として、冷却孔下流面平均フィルム冷却効率率 $\eta_{ave}$  (平均領域 $0 \leq x/d \leq 20$ ,  $-3 \leq z/d \leq 3$ ),  $x/d=20$ における全圧損失係数 $\zeta$ , 及びデバイス表面平均フィルム冷却効率率 $\eta_{vd}$ を選定した。評価範囲は実験で再現できる範囲<sup>(7)</sup>に設定した。式(1)にフィルム冷却効率率 $\eta$ , 式(2)に全圧損失係数 $\zeta$  (参照全圧 $P_{t,ref}$ : 式(3)), 式(4)に評価指標の計算式Yを示す。

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{wall}}{T_{\infty} - T_2} \dots (1)$$

$$\zeta = \frac{P_{t,ref} - P_t}{1/2 \cdot \rho_{\infty} \cdot U_{\infty}^2} \dots (2)$$

$$P_{t,ref} = \frac{M_2}{M_2 + M_{\infty}} \cdot P_{t,2} + \frac{M_{\infty}}{M_2 + M_{\infty}} \cdot P_{t,\infty} \dots (3)$$

$$Y = a \cdot \eta_{ave} + b \cdot 1/2.7 \cdot 1/\zeta + c \cdot \eta_{vd} \dots (4)$$

式(4)の指標は、3つの異なる評価項目 ( $\eta_{ave}$ , 全圧損失係数の逆数 $1/\zeta$ ,  $\eta_{vd}$ )の重み付き平均で算出され、その値が最大化される望大特性である。 $1/\zeta$ は $\eta$ とは逆に低減させたいため逆数を取っている。重み係数 $a, b, c$  ( $a+b+c=1$ )をどのように定めるかについては明確な指針がないことから、V字デバイス本来の目的である $\eta_{ave}$ 重視しつつTable 3に示すように合計13通りの重み係数の組み合わせRatio1～13を用意し、それぞれの組み合わせ毎にV字デバイスの最適形状の探索を行った。なお、 $1/\zeta$ と $\eta_{vd}$ に対しては、それぞれが評価指標に与える影響度を3つの評価項目間で揃えることを目的として、前述の16種類のV字デバイスを設置した流れ場を3つの主流流入角条件で解析し、それぞれの流入角条件で得た $\eta_{ave}$ 及び $1/\zeta$ の最大値最小値の差の平均値 ( $\eta_{ave}: 0.31$ ,  $1/\zeta: 0.82$ ,  $\eta_{vd}: 0.30$ )から調整係数を求めた。その結果として、 $1/\zeta$ に調整係数 $1/2.7$ を乗じている。Table 3の重み係数は、均等に与えたRatioを除き、 $\eta_{ave}$ 重視型のRatio2～8 ( $a \geq b \geq c$ ),  $1/\zeta$ 重視型のRatio9～13 ( $b \geq a \geq c$ )となっている。このような複数の重み係数の組み合わせでより多くの形状が最適デバイスの候補として探索され、様々な用途、流動条件に適したV字デバイス群が得られるものと期待された。

また最適化形状導出のためには、SN比と呼ばれるシグナル：Sとノイズ：Nの比を算出することが必要になる。SN比算出には式(5)を使用した。本研究において、Sは最適化評価指標であり、Nは誤差因子の主流流入角である。Yは式(4)で算出され、添え字*i*は条件名 (Case1～Case16)、*n*は誤差要因数を表す。本研究では*n*=3である。

$$(S/N)_i = -10 \log \frac{1}{n} \left( \frac{1}{Y_{i,\varepsilon=0deg}^2} + \frac{1}{Y_{i,\varepsilon=5deg}^2} + \frac{1}{Y_{i,\varepsilon=10deg}^2} \right) \dots (5)$$

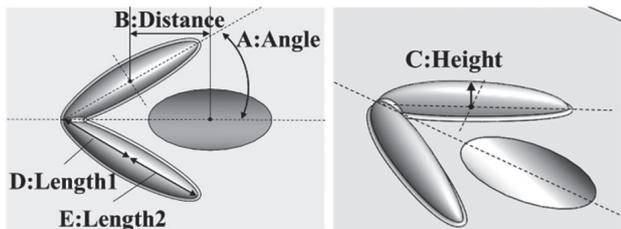


Fig. 2 Control factor

Table 1 Control factor's level

	Level1	Level2	Level3	Level4
A : Angle	25deg	30deg	35deg	40deg
B : Distance	1.0d	1.2d	1.4d	1.6d
C : Height	0.3d	0.4d	0.5d	0.6d
D : Length1	0.5d	0.8d	1.2d	1.5d
E : Length2	1.5d	2.0d	2.5d	3.0d

Table 2 L16 orthogonal table

	A	B	C	D	E
Case1	1	1	1	1	1
Case2	1	2	2	2	2
Case3	1	3	3	3	3
Case4	1	4	4	4	4
Case5	2	1	2	3	4
Case6	2	2	1	4	3
Case7	2	3	4	1	2
Case8	2	4	3	2	1
Case9	3	1	3	4	2
Case10	3	2	4	3	1
Case11	3	3	1	2	4
Case12	3	4	2	1	3
Case13	4	1	4	2	3
Case14	4	2	3	1	4
Case15	4	3	2	4	1
Case16	4	4	1	3	2

Table 3 Weighting factor

Combination	a	b	c
Ratio1	0.33	0.33	0.33
Ratio2	0.8	0.1	0.1
Ratio3	0.7	0.2	0.1
Ratio4	0.6	0.3	0.1
Ratio5	0.6	0.2	0.2
Ratio6	0.5	0.3	0.2
Ratio7	0.5	0.4	0.1
Ratio8	0.4	0.3	0.3
Ratio9	0.4	0.4	0.2
Ratio10	0.4	0.5	0.1
Ratio11	0.3	0.6	0.1
Ratio12	0.3	0.5	0.2
Ratio13	0.3	0.4	0.3

### 3. 数値解析

#### 3.1 解析ソルバー

解析ソルバーには、汎用流体解析ソフトANSYS® CFX® ver17.1<sup>10)</sup>を使用した。また、全条件の支配方程式はRANS、乱流モデルはSSTモデルを使用し解析を行った。本研究で採用したRANS解析及びSSTモデルの使用の妥当性については、DFCD最適化に関するKawabataらの研究<sup>(7),(11),(12)</sup>で検討されている。そこでは、数値的最適化及び実験的最適化の過程で探索された形状がほぼ一致したことが示されている。本研究で調査しているV字デバイスもフィルム冷却効率向上に関するメカニズムはDFCDと同様であると考えられ、RANS解析で最適形状の探索が可能であると判断した。

#### 3.2 解析ドメイン・計算格子

##### (1)解析ドメイン

Fig. 3に使用した解析ドメインを示す。原点は冷却孔後縁にとり、主流流れ方向にx軸、高さ方向にy軸、スパン方向にz軸を取っている。計算領域はx方向の冷却孔下流に36*d*、z方向に1ピッチ分の6*d*とした。冷却孔形状はRound hole、冷却孔傾斜角*a*=30[deg.]である。また、流入角条件の変化 ( $\varepsilon=5, 10$ [deg.])は、冷却孔とV字デバイスの設置位置をスパン方向に角度を設けて、二次空気吹き出しの方向を傾けることで再現している。

##### (2)計算格子

本最適化で使用した計算格子は全て非構造格子で生成し、格子サイズは格子依存性調査を行って以下の通りに決定した。壁面近傍以外で格子のテトラの高さは  $0 \leq y/d \leq 2.5$  の範囲で 1 [mm]、  $2.5 \leq y/d \leq 3.5$  の範囲で 3 [mm]、  $3.5 \leq y/d \leq 7.5$  の範囲で 5 [mm] とした。また、壁面近傍にはプリズムメッシュを適用し、最小格子幅：0.004 [mm]、拡大率：1.2、生成層数：22 (プリズム幅：～1 [mm]) とした。デバイス表面の格子のテトラの高さは0.2 [mm] とした。

冷却孔の格子のテトラの高さは0.5 [mm] とし、二次

空気部ダクトは $-3.0 \leq y/d \leq -3.2$ の範囲で1 [mm],  $-3.2 \leq y/d \leq -13$ の範囲で3 [mm]とした。また、壁面近傍にはプリズムメッシュを最小格子幅:0.004 [mm], 拡大率:1.2, 生成層数:22と主流部ダクトと同様の条件を適用した。

本最適化の格子は全条件において同じ方法で作成しており、計算格子の総格子要素数は約2,500万セルである。また、 $y^+$ は1未満である。Fig. 4に全体とV字デバイスの格子を示す。

### 3.3 解析条件

本研究で適用した解析条件をTable 4に示す。

代表長さに冷却孔直径 $d$ , 代表速度に入口速度をそれぞれ用いたレイノルズ数 $Re$ を6,000とした。式(6)で定義される吹き出し比 $BR$ は1.0, 式(7)で定義される主流と二次空気の密度比 $DR$ は1.53とした。主流乱れ $Tu$ は1%とした。また、主流入口部には流速(速度プロファイル)を与えた。これは実験<sup>(3)</sup>における境界層厚み( $x/d=10$ で $0.24d$ )を再現するためである。実際の解析では、 $x$ 方向 $200d$ ,  $y$ 方向 $7.5d$ ,  $z$ 方向 $6d$ の直方体ドメインを別に用意して、入口に流速(9.37m/s)を与えることで、実験とほぼ一致した速度分布が得られたものを入口条件に与えた。

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条件、主流側側面部には周期境界条件を適用した。解析ドメイン二次空気側上面部には断熱壁条件、二次空気側側面部には周期境界条件または断熱壁条件を適用した。

$$BR = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty \dots (6)$$

$$DR = \rho_2 / \rho_\infty \dots (7)$$

Table 4 Calculation conditions

Reynolds number	Re=6,000
Blowing ratio	BR=1.0
Density ratio	DR=1.53
Mainstream inlet	Velocity profile [m/s] 298.15 [K]
Secondary flow inlet	$8.72 \times 10^{-4}$ [kg/s] 194.85 [K]
Mainstream outlet	Static pressure 0 [PaG]

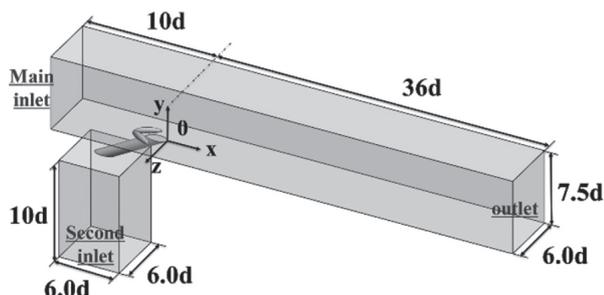
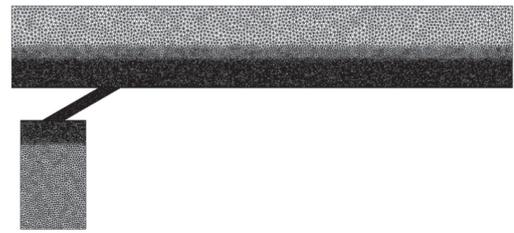
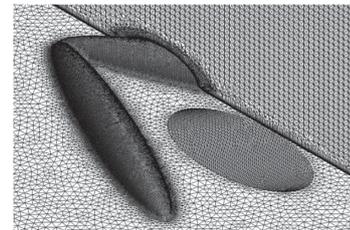


Fig. 3 Computational domain



(a) All domain



(b) Device

Fig. 4 Computational grid

## 4. 結果と考察

SN比算出から各因子及び各水準値のフィルム冷却性能への影響度をグラフ化した要因効果図の例をFig. 5に、この結果から得られた最適形状の結果をTable 5に示す。なお、Fig. 5はRatio1の結果である。望大特性を取るため各Ratioの最適形状は式(4)が最大になる組み合わせとした。Table 5のA~Eは制御因子、数値1~4はLevel 1~Level 4を表す。重み係数の組み合わせ毎に最適化を行った結果として、Ratio2及びRatio3, Ratio4, Ratio6及びRatio7, さらにRatio11及びRatio12がそれぞれ同様な最適形状を示した。その結果、9つの最適形状群を得ることとなった。以下にこれらの形状群から、各制御因子がどのように選択されているかを考察する。

A: AngleはLevel 1~3 (25, 30, 35deg.)が最適パラメータとして選ばれた。Angleが拡大するとDBVの規模も拡大し、 $\eta$ が向上するが、 $\zeta$ も増大する特徴がある。また、B: DistanceはLevel 1 (1.0d)及びLevel 2 (1.2d)が最適パラメータとして選ばれた。Distanceが小さいほどV字デバイスが冷却され、デバイス自体の熱負荷が削減するため選ばれたと考える。しかし、デバイスと冷却孔が重なると冷却空気の吹き出しを邪魔して冷却性能が低下する特徴がある。さらに全ての最適化形状において、D: Length1はLevel 2 (0.8d)が最適パラメータとして選ばれた。これは本研究で用いた重み係数に関わらず、V字デバイスの高性能化には0.8dが最適パラメータであることを示唆している。また、E: Length2では値の大きいLevel 3 (2.5d)及びLevel 4 (3.0d)が最適パラメータとして選ばれた。過去に導出した最適形状<sup>(7)</sup>においてもLength2は制御因子内の最大値2.0dが選ばれていた。これらは、Length2が長いとDBVの規模が拡大し、スパン方向へ冷却空気がより拡散され、 $\eta$ が高くなるため選ばれたと考える。

Table 6に示すように得られた9つの最適形状に名称

を付け、それらの特性について比較検討した。比較対象にKawamura<sup>14)</sup>が最適化を行ったDFCDを選定した。このDFCDについてFig. 6に形状的特徴及びTable 7に寸法を示す。

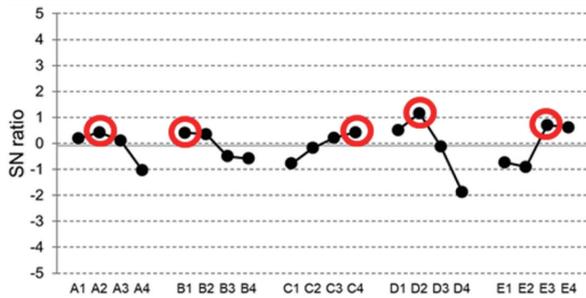


Fig. 5 Response graphs for major effect (Ratio1)

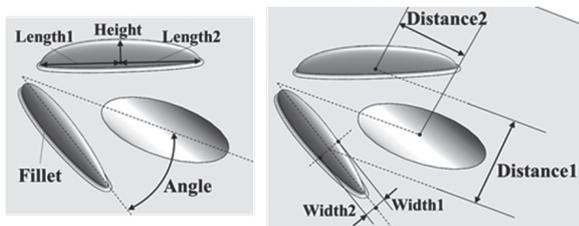


Fig. 6 Optimized DFCD

Table 5 Optimal parameters

	A	B	C	D	E
Ratio1	2	1	4	2	3
Ratio2	3	1	3	2	4
Ratio3	3	1	3	2	4
Ratio4	1	1	3	2	4
Ratio5	3	1	4	2	4
Ratio6	1	1	3	2	4
Ratio7	1	1	3	2	4
Ratio8	2	1	4	2	4
Ratio9	1	1	3	2	3
Ratio10	1	1	1	2	4
Ratio11	1	2	1	2	3
Ratio12	1	2	1	2	3
Ratio13	2	2	4	2	3

Table 6 Rename parameters

after	before
Opt1	Ratio1
Opt2	Ratio2, Ratio3
Opt3	Ratio4, Ratio6, Ratio7
Opt4	Ratio5
Opt5	Ratio8
Opt6	Ratio9
Opt7	Ratio10
Opt8	Ratio11, Ratio12
Opt9	Ratio13

Table 7 parameters of optimized DFCD

Angle	30 [deg.]
Curvature of fillet	0.1d
Distance1	1.3d
Distance2	1.4d
Height	0.6d
Length1	0.1d
Length2	0.1d
Width1	0.2d
Width2	0.2d

4.1 冷却孔下流フィルム冷却効率分布

Fig. 7, 8, 9に  $\epsilon = 0, 5, 10$  [deg.] における冷却孔下流フィルム冷却効率  $\eta$  分布を示す。Fig. 7の  $\epsilon = 0$  [deg.] において、DFCDと比較するとOpt1, 2, 4, 5, 8, 9は下流域でスパン方向へ  $\eta$  分布が拡大している。反対にOpt3, 6, 7は下流域で  $\eta$  分布が縮小した。これら3つの共通点はA : AngleがLevel 1 (25deg.) とB : DistanceがLevel 1 (1.0d) である。しかし、Opt1, 2, 4, 5ではB : Distance

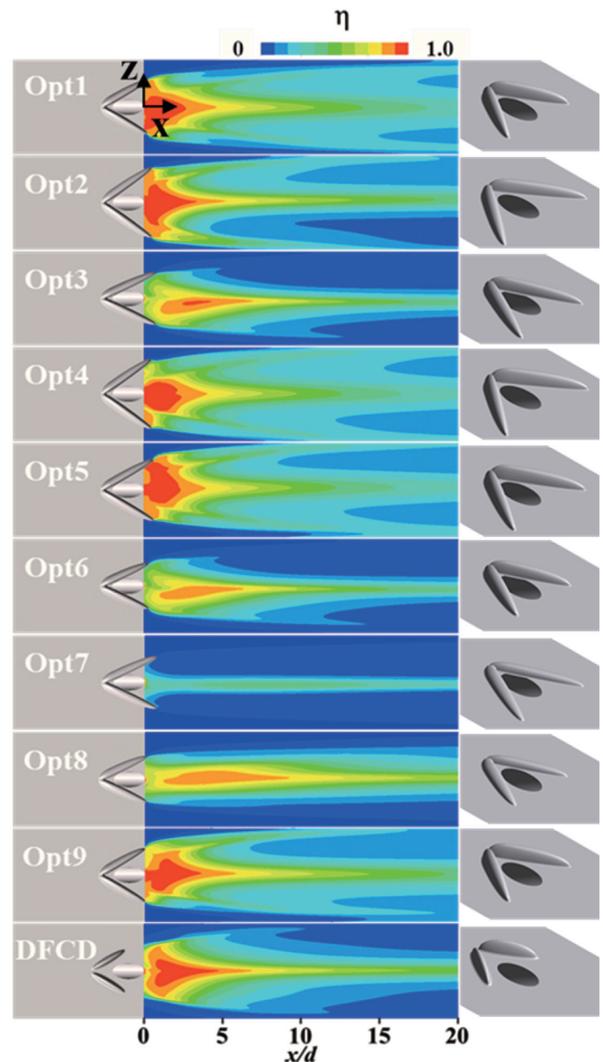


Fig. 7 Contours of film cooling effectiveness (Inflow angle = 0 deg.)

がLevel 1 (1.0d) でも二次空気付着性が良好であることから、A : Angleの影響が $\eta$ 低下をもたらした要因の一つであると考えられる。A : AngleがLevel 1 (25deg.)のOpt8は冷却孔下流から付着性の改善が見られるが、他のOptと比べてスパン方向への付着領域が縮小している。A : Angleは小さいほど下流域でスパン方向への付着領域が縮小する特徴があるため、このようにLevel 1では $\eta$ が低い結果となった。

Fig. 8の $\epsilon=5$  [deg.]において、DFCDと比較すると、流入角0degと同様にOpt3, 6, 7はスパン方向への付着領域が縮小した。しかし、Opt3, 6は $\epsilon=0$  [deg.]よりも下流域でスパン方向への付着領域が拡大した。Opt7はC : HeightがLevel 1 (0.3d)と低いこともあり、DBVの規模が小さく、生成位置のズレからCRVPを抑制できていないため $\eta$ が低くなったと考える。その他のOptは二次空気の付着の付着領域が縮小したが、DFCDよりも下流域でスパン方向への二次空気の付着領域が拡大したものが多し。しかし、Opt8はOpt7と同様にC : HeightがLevel 1 (0.3d)と低いため、DBVの規模が小さく、 $\epsilon$

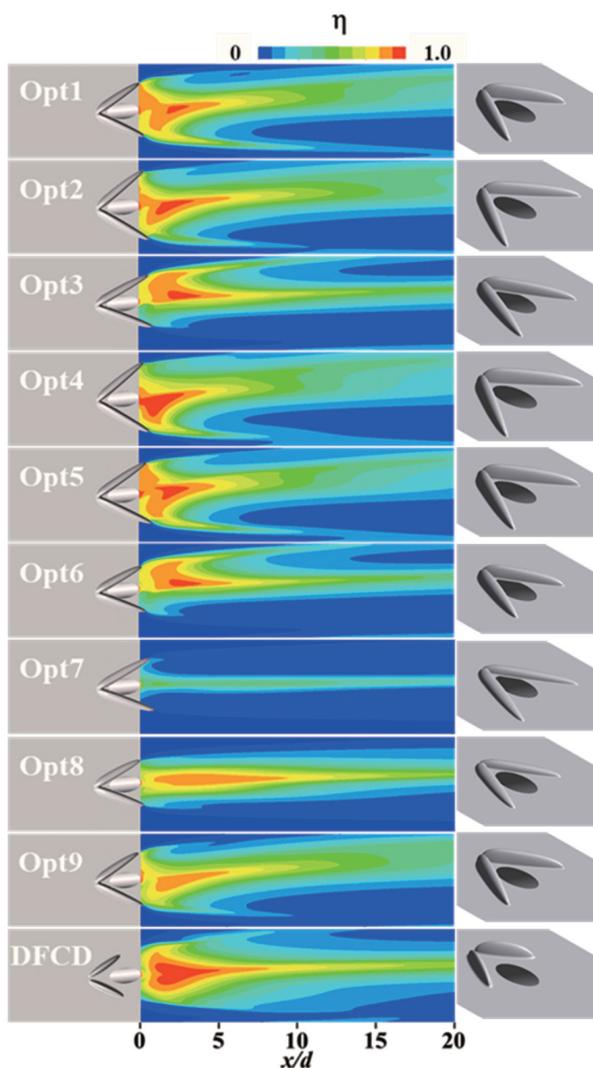


Fig. 8 Contours of film cooling effectiveness (Inflow angle = 5 deg.)

によるCRVPとの干渉位置のズレによりCRVPの抑制力が小さくなり、DFCDよりも下流域での $\eta$ が低くなる結果となった。

Fig. 9の $\epsilon=10$  [deg.]において、 $\epsilon=5$  [deg.]と同様にOpt3, 6はスパン方向への二次空気の付着領域が拡大した。他の形状も $\epsilon=5$  [deg.]と同様に二次空気の付着領域が縮小した。全てのOptはDFCDと比べ、 $\eta$ が低くなった。

したがって、Opt3, 6では $\epsilon$ 拡大と共にスパン方向への二次空気の付着領域が拡大し、他の形状は $\epsilon$ 拡大と共に二次空気の付着領域が縮小した。これは、A : Angleが大きく影響していると考えられる。また、Opt8はA : AngleとC : Heightが最も小さいLevel 1であっても、同じ最適パラメータのOpt7よりも付着領域が拡大した。これは、B : DistanceとE : Length2により、DBVが効果的にCRVPを抑制できたからだと考える。

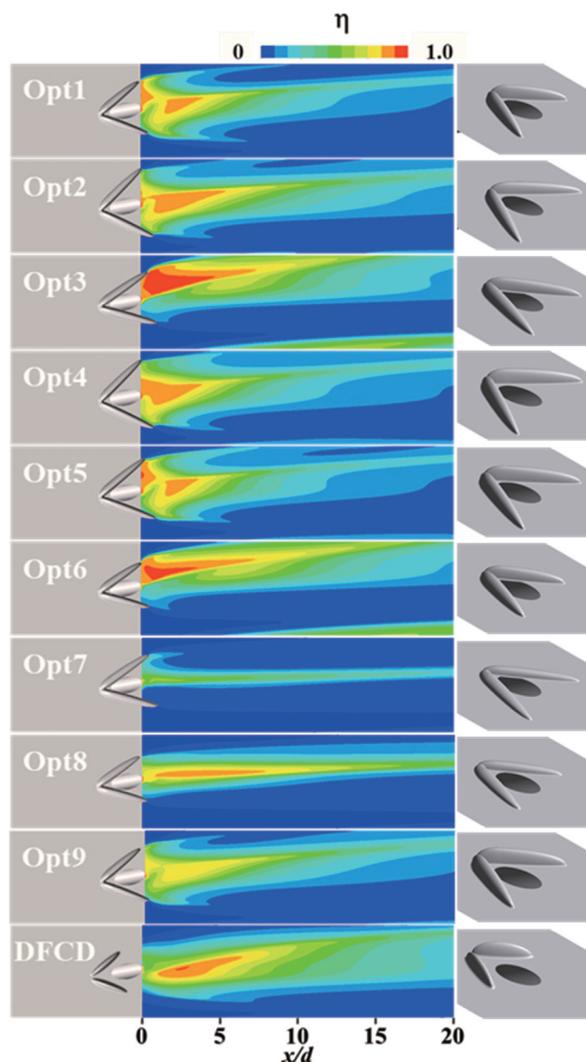


Fig. 9 Contours of film cooling effectiveness (Inflow angle = 10 deg.)

#### 4.2 冷却孔下流面平均フィルム冷却効率分布値

Fig. 10に $\eta_{ave}$ を示す。前項の $\eta$ 分布と各 $\epsilon$ の $\eta_{ave}$ の傾

向は同様な結果を示した。Opt3, 6は $\epsilon$ 拡大と共に $\eta_{ave}$ が増加したが、DFCDより $\eta_{ave}$ が低い。Opt7は著しく低い $\eta_{ave}$ を示した。また、Opt8はDFCDより $\eta_{ave}$ が低い最適パラメータに近いOpt7より約3倍高い $\eta_{ave}$ を示した。

また、Opt8はDFCDより $\eta_{ave}$ が低い最適パラメータに近いOpt7より約3倍高い。その他のOptは $\epsilon=0, 5$  [deg.] のとき、DFCDより $\eta_{ave}$ が高いものが多いが、 $\epsilon=10$  [deg.] のとき、DFCDより $\eta_{ave}$ が低い結果を示した。また、 $\eta_{ave}$ において $\epsilon$ 変化に対するロバスト性はDFCDが最も高い。

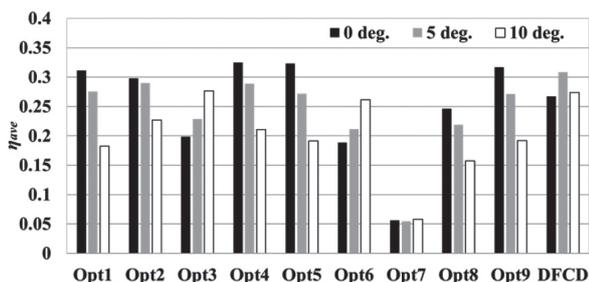


Fig. 10 Area-averaged film cooling effectiveness

#### 4.3 全圧損失係数

Fig. 11に全圧損失係数 $\zeta$ を示す。 $\eta_{ave}$ が低いOpt3, 6, 7, C : Heightの低いOpt8はDFCDと比べ $\zeta$ が低い。また、 $\eta_{ave}$ が高いOpt1, 9もDFCDよりも $\epsilon=10$  [deg.] 以外は僅かに $\zeta$ が小さい値を示した。これらは重み係数 $a \approx b$ か、 $b \geq a$ 条件のどちらかであり、 $\eta_{ave}$ より $\zeta$ に重みを置いて最適化されたからと考える。

その他のOptは $\zeta$ がDFCDと同等か高い結果を示した。これは重み係数 $a$ が大きく、 $\eta_{ave}$ に重みを置いたためと考える。

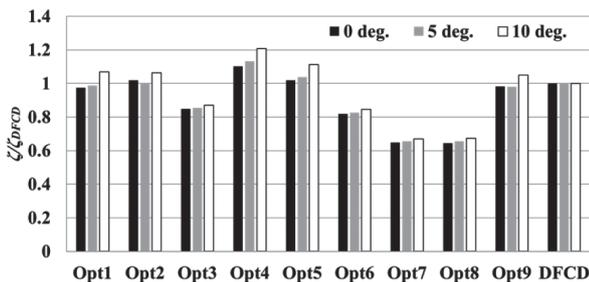


Fig. 11 Total pressure loss factor

#### 4.4 デバイス表面フィルム冷却効率分布

Fig. 12に $\epsilon=0$  [deg.] のデバイス表面の $\eta$ 分布を示す。 $\eta_{ave}$ が低いOpt3, 6, 7は、デバイス表面においても他のOptと比べ二次空気の付着した領域が縮小した。これらの共通点であるA : AngleがLevel 1 (25deg.) とB : DistanceがLevel 1 (1.0d) より、デバイスが冷却孔を塞ぐ面積が大きく、冷却空気の流れが変わり、デバイス表

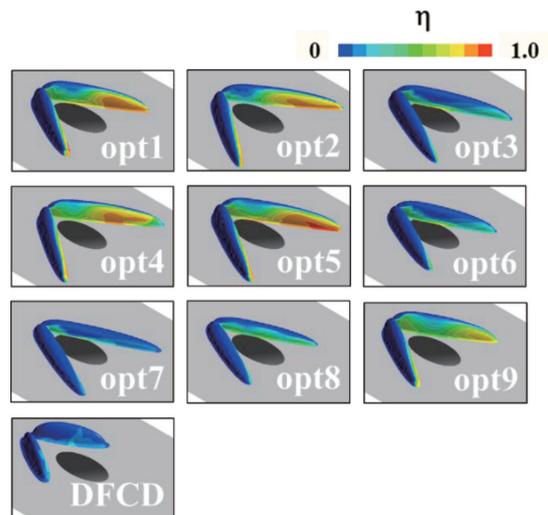


Fig. 12 Contours of Device film cooling effectiveness

面での $\eta$ が低くなったと考える。

DFCDと比較すると、全てのOptが二次空気の付着分布が拡大した結果を示した。これはDFCDよりもOptのB : Distanceが小さいためだと考える。

#### 4.5 デバイス表面平均フィルム冷却効率

Fig. 13にデバイス表面平均フィルム冷却効率 $\eta_{vd}$ を示す。デバイス表面の $\eta$ 分布の結果と同様に、全てのOptがDFCDより $\eta_{vd}$ の高い結果を示した。また、 $\eta_{vd}$ は $\eta_{ave}$ と定量的に傾向が同様であり、 $\eta_{ave}$ が低かったOpt3, 6, 7は $\eta_{vd}$ も他のOptより低い傾向を示した。

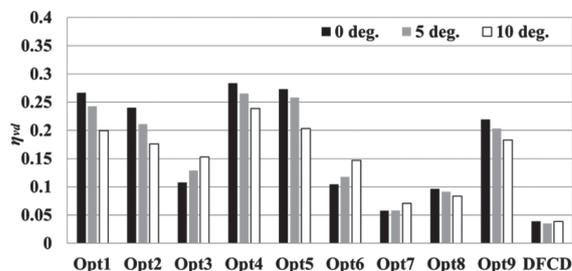


Fig. 13 Device area-averaged film cooling effectiveness

#### 4.6 デバイス表面熱伝達率分布

Fig. 14に $\epsilon=0$  [deg.] のデバイス表面熱伝達率分布を示す。式(8)に熱伝達率を示す。DFCDと比較すると、Opt7を除くOptはデバイス下流側表面の熱伝達率が高い。また、4.4節からOptはDFCDよりデバイス表面の冷却空気の付着性が高い結果となった。したがって、Optはデバイス下流側表面がDFCDより冷却され、下流側のデバイス自体の熱負荷削減ができたと考えられる。

$$htc = \frac{\dot{q}}{T_{vd} - T_{\infty}} \dots(8)$$

しかし、デバイス上流側表面は熱伝達率が高く、主流空気が直接当たるので温度も高い。そのため、デバイス下流側の熱負荷が削減されても、デバイス上流側はDFCDと変わらず熱負荷が高いままである。

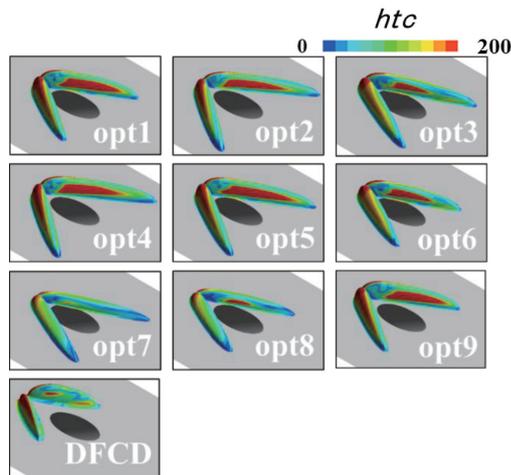


Fig. 14 Contours of Device film cooling effectiveness

今後はデバイス全体の熱負荷削減のため、デバイス上流に冷却孔を設け、デバイス上流側表面の冷却の可能性を検討している。

## 5. 結言

本研究では最適手法のタグチメソッドを用い、フィルム冷却性能改善としてV字デバイスの最適形状導出を行い、以下の知見を得た。

導出した全ての最適形状で、Length1は $0.8d$ となった。Length1はDBVの生成位置に関するパラメータであることから、本検討の範囲ではV字デバイスの $\eta$ を高めるためのLength1の最適パラメータは $0.8d$ である。

定量的にDFCDより $\eta_{ave}$ 、 $\eta_{vd}$ が高く、 $\zeta$ が低いものがV字デバイスで有望な形状である。 $\varepsilon=0, 5$  [deg.]ではOpt1, 2, 9、 $\varepsilon=10$  [deg.]ではOpt3がDFCDより壁面及びデバイスの $\eta$ が高く、 $\zeta$ が低いV字デバイスとなった。

多くの最適形状は $\eta$ が高く、 $\zeta$ がDFCDと同等か高い結果となった。また、 $\eta_{ave}$ において流入角 $\varepsilon$ に対するロバスト性が低い結果となった。

デバイス下流側表面はDFCDより冷却されている結果を示した。しかし、上流側の熱負荷はDFCDと同様に高いままであるため、今後はデバイス上流に冷却孔を設けデバイス上流側の熱負荷削減を図ることを検討している。

本最適形状群の多くは全圧損失係数が高くV字デバイスの特徴を十分に発揮できない結果となった。したがって、今後は重み係数変更等の評価式の見直しを行う。更に、フィルム冷却効率 $\eta$ と熱伝達率を合わせて伝熱性能を評価できるNet Heat Flux Reduction (NHFR)で最適化を行う。

## 参考文献

(1) B. A. Haven, D. K. Yamagata, M. kurosaka, S. Yamawaki, and T. Maya, 1997, "Anti-kidney pair of vortices in shaped holes and their influence on film cooling effectiveness",

ASME IGTI Turbo EXPO, No. 97-GT-45.

(2) Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata, Hirokazu Kawabata, 2014, "Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Device : Part1- Investigations on Capability of A Base-Type Device", proceedings of ASME Turbo EXPO, GT2014-25751.

(3) 佐々木宏和, 船崎健一, 瀧澤隼人, 田川久人, 中野晋, 2016, "流れ制御デバイスを用いた平板フィルム冷却の効率化に関する研究 -PSP&PIV計測による密度比影響調査-", 第44回日本ガスタービン学会定期講演会, P. 1-2.

(4) Sakai, E., Takahashi, T., and Agata, Y., 2012, "Experimental Study on Effects of Internal Rib and Rear Bump on Film Effectiveness", ASME Paper No. GT2012-68268

(5) Zhou, W. and Hu, H., 2017, "A Novel San-Dune-Inspired Design for Improved Film Cooling Performance", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.110, pp. 908-920.

(6) 齋藤涼, 船崎健一, 河村朋広, 森崎哲郎, 2018, "フィルム冷却の効率化に関する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

(7) 瀧澤隼人, 船崎健一, 2017, "流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高性能化に関する研究 - デバイス形状最適化及び新規デバイス形状の探索 -", 岩手大学修士学位論文, P. 94-95.

(8) 立林和夫, "入門タグチメソッド", 日科技連出版, 2004.

(9) 川端浩和, 船崎健一, 2014, "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, P. 321-360.

(10) ANSYS, ANSYS Workbench, AUTODYN, CFX, FLUENT and any and all ANSYS, Inc. brand, product, service and feature names, logos and slogans are registered trademarks or trademarks of ANSYS, Inc. or its subsidiaries in the United States or other countries. ICEM CFD is a trademark used by ANSYS, Inc. under license. All other brand, product, service and feature names or trademarks are the property of their respective owners.

(11) Hirokazu Kawabata, Ken-ichi Funazaki, Ryota Nakata, Hisato Tagawa, Yasuhiro Horiuchi, 2014, "Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Device : Part2 -Optimization of Device Shape and Arrangement by Experiment- and CFD-Based Taguchi Method", proceedings of ASME Turbo EXPO, GT2014-26070.

(12) 佐々木宏和, 船崎健一, 2017, "感圧塗料計測系の開発および先進的フィルム冷却技術の伝熱性能評価", 岩手大学修士學位論文, P. 107-108.

(13) 河村朋広, 船崎健一, 瀧澤隼人, 田川久人, 中野晋, 2017, "流れ制御デバイスを用いた平板フィルム冷却に関する研究 (境界層厚みの効果)", 東北学生会第47回学生員卒業研究発表講演会

(14) 河村朋広, 船崎健一, 2019, "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-", 岩手大学修士學位論文, P. 108.