

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

Optimization of V-shaped Flow Control Device for Improvement of Film Cooling Performance

齋藤 涼^{*1}
SAITO Suzuna

船崎 健一^{*1}
FUNAZAKI Ken-ichi

河村 朋広^{*1}
KAWAMURA Tomohiro

森崎 哲郎^{*2}
MORISAKI Tetsuro

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 maximize its film effectiveness.

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おり，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。しかし，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，タービン翼には少量の冷却空気でも効果的な冷却を実現する技術が求められる。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⁽¹⁾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。したがって，CRVPを抑制することが重要である。そこでFunazaki^{(2),(3)}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MHPS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フィルム冷却性能が向上することを確認した。しかし，DFCDは二つのデバイスから生成した縦

渦による空力損失とデバイス自体への熱負荷の増大を改善することが望まれていた。

そこで本研究ではDFCDをV字形状にした新規デバイス（以下，V字デバイスと称す）を提案する（Fig. 1）。これはデバイス間隔を狭めることで縦渦の生成間隔が狭くなり，冷却空気と干渉しやすくなる。したがって，小さな縦渦でもCRVPの抑制効果があると考えられる。さらに渦規模の縮小により空力損失の低減が期待できる。また，DFCDより冷却孔と設置位置が近いことによりデバイス壁面が冷却され，デバイス自体の熱負荷削減も期待できる。

本研究は，DFCDに代わり新たに提案するV字デバイスに関する総合的調査の第一歩として，V字デバイスがDFCD並の高いフィルム効率向上効果を持ち得るかを明らかにすることを目的としている。最適化評価指標に面平均フィルム冷却効率を選定し，数値解析による調査からV字デバイスの最適形状の導出及び最適形状の性能評価を実施した。

○主な記号

d : 冷却孔直径(10[mm]) S : シグナル
 BR : 吹き出し比 [-] N : ノイズ
 DR : 密度比 [-] Y : 面平均フィルム冷却効率
 ω : 渦度 [-] n : 誤差因子数
 η : フィルム冷却効率 ε : 主流流入角 [deg.]
 U : 流速 [m/s] ρ : 密度 [kg/m³]
 y : 代表長さ [m] ν : 動粘性係数
 τ_w : 壁面せん断応力 [kg/m·s²]
 u, v, w : x, y, z軸方向流速 [m/s]

原稿受付 2018年8月31日

査読完了 2019年10月18日

*1 岩手大学大学院

〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)

-添え字-

∞ : 主流

2 : 二次空気

wall : 断熱壁

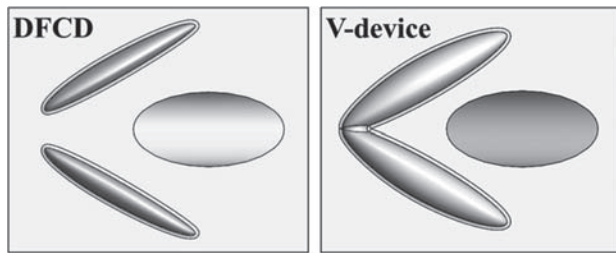


Fig. 1 DFCD and V-device.

2. 最適化手法

2.1 概要

本研究では最適化手法にタグチメソッド⁽⁴⁾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などの特徴がある。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などの利点が挙げられる。

本最適化では、最適化指標に冷却孔下流領域の面平均フィルム冷却効率を選定した。面平均フィルム冷却効率値を最大化する望大特性を適用し、V字デバイスの最適形状導出を行なった。

2.2 タグチメソッド

(1)最適化形状導出の流れ

本手法は、いくつかの規則に沿って設計を進める。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

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～GをFig. 2に示す。制御因子A～Gにおいて、A:FilletはV字デバイスのフィレット半径、B:AngleはV字デバイスの開き角度、C:DistanceはV字デバイスと冷却孔の中心距離、D:HeightはV字デバイスの高さ、E:Length2はV字デバイス中心より下流側長さ、F:Width1はV字デバイスの幅（内側）、G:Width2はV字デバイスの幅（外側）である。V字デバイス中心より上流側長さのLength1はV字形状を保つため1.0dとした。制御因子の水準値については、予備調査⁽⁵⁾をもとにTable 1の通り選定した。この予備調査では、A～Gの制御因子の大

きさを単独で変化させることによって、フィルム冷却率がどのように増減するかを調べている。また、本最適化の直交表はL18直交表を採用した。全18種類のV字デバイス形状を用いてサンプルデータの取得を行なった。Table 2に使用したL18直交表を示す。また、Fig. 3に全18種類のV字デバイス形状を示す。

また、誤差因子には主流流入角 ε ($=0, 5, 10$ deg.)を選定した。DFCDに関する研究⁽⁶⁾において、流入角変化はデバイスが形成する渦構造に変化を与え、フィルム冷却効率に大きく影響することが明らかになっている。したがって、主流流入角を誤差因子に選んだ。

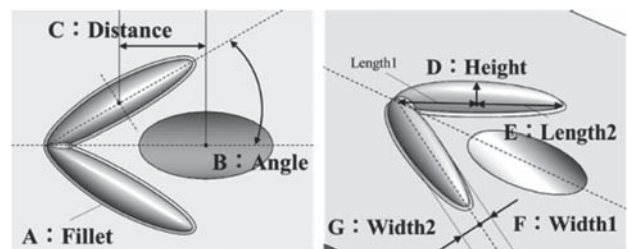


Fig. 2 Control factor

Table 1 Control factor's level

	Factor	Level1	Level2	Level3
A	Fillet	0.05d	0.1d	
B	Angle	25deg	30deg	35deg
C	Distance	1.2d	1.5d	1.8d
D	Height	0.3d	0.4d	0.5d
E	Length2	1.0d	1.5d	2.0d
F	Width1	0.15d	0.2d	0.25d
G	Width2	0.25d	0.3d	0.35d

Table 2 L18 orthogonal table

	A Fillet	B Angle	C Distance	D Height	E Length2	F Width1	G Width2
Case1	1	1	1	1	1	1	1
Case2	1	1	2	2	2	2	2
Case3	1	1	3	3	3	3	3
Case4	1	2	1	1	2	2	3
Case5	1	2	2	2	3	3	1
Case6	1	2	3	3	1	1	2
Case7	1	3	1	2	1	3	2
Case8	1	3	2	3	2	1	3
Case9	1	3	3	1	3	2	1
Case10	2	1	1	3	3	2	2
Case11	2	1	2	1	1	3	3
Case12	2	1	3	2	2	1	1
Case13	2	2	1	2	3	1	3
Case14	2	2	2	3	1	2	1
Case15	2	2	3	1	2	3	2
Case16	2	3	1	3	2	3	1
Case17	2	3	2	1	3	1	2
Case18	2	3	3	2	1	2	3

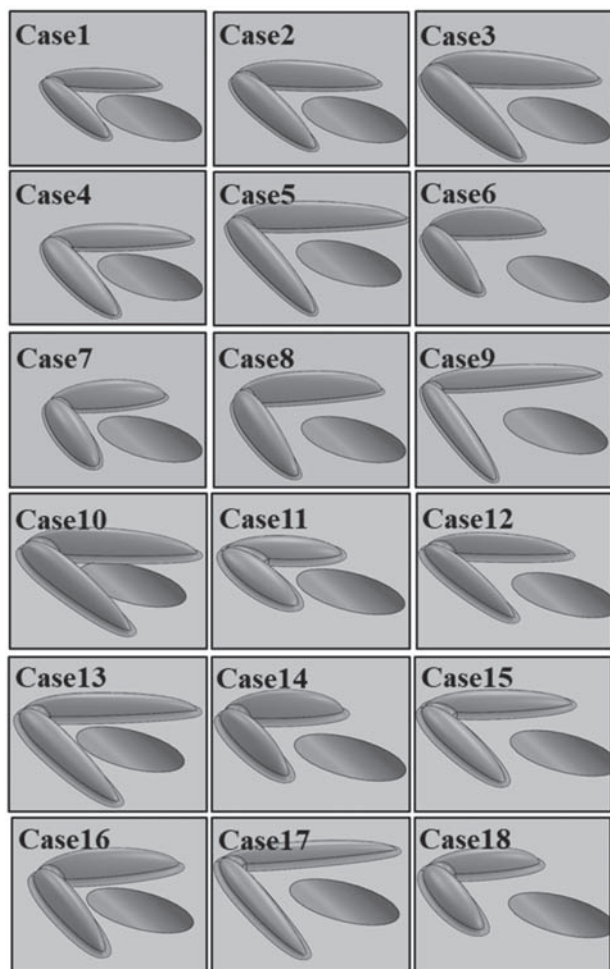


Fig. 3 18 cases of V-shaped device

(3) 評価指標

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比は式(1)で定義される。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はある領域のフィルム冷却効率を平均した面平均フィルム冷却効率である。式(2)にフィルム冷却効率の定義式を示す。平均化した領域はFig. 4に示す通り、 $0 \leq x/d \leq 35$ 、 $-3 \leq z/d \leq 3$ の範囲とした。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。また、添え字iは条件名 (Case1 ~ Case18)、nは誤差要因数であり、本研究ではn=3である。

式(1)を使用した。高いSN比の値を選定することで誤差因子に対しロバストな性能及び面平均フィルム冷却効率が最大となるV字デバイスの最適形状を探索した。

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

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_{wall}}{T_{\infty} - T_2} \quad (2)$$

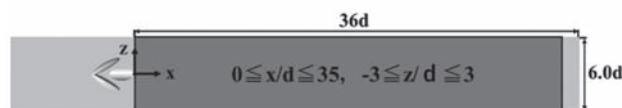


Fig. 4 Averaging area

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® ver16.0⁽⁷⁾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最適化に関する研究^{(8),(9),(10)}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。ただし、V字デバイスの数値計算結果が実験結果と必ず傾向が一致するとは言えない。したがって、実験的検証については次報以降で報告予定である。

3.2 解析ドメイン・計算格子

(1) 解析ドメイン

Fig. 5に使用した解析ドメインを示す。計算領域はx方向の冷却孔下流に36d、z方向に1ピッチ分の6dとした。冷却孔形状はRound hole、冷却孔傾斜角 $\alpha=30deg$ である。また、流入角条件の変化 (5, 10deg) 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。

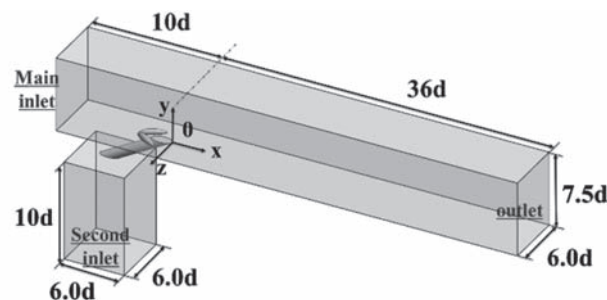


Fig. 5 Computational domain

(2) 格子依存性調査

本研究の解析を行う前に格子点数によって計算結果に差が出ないか確認するため格子依存性の調査を行った。格子生成ソフトにはANSYS®ICEM CFD™ ver16.0⁽⁷⁾を使用し、非構造格子を生成した。非構造格子を使用した理由としては、デバイス周りの格子作成が容易であることが挙げられる。調査した格子サイズをTable 3、計算時間及び総格子要素数をTable 4に示す。また、Fig. 6に全条件の格子を示す。主流部ダクトにおいて、 $0 \leq y/d \leq 2.5$ 、 $2.5 \leq y/d \leq 3.5$ 、 $3.5 \leq y/d \leq 7.5$ の範囲でサイズを

変更した。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：0.0045[mm]，拡大率：1.2として生成層数を変更した。全てのドメインで y^+ は3未満を満たしている。また、 y^+ の定義式は式(3)に示す。

本調査では、フィルム冷却効率及びx方向渦度、速度プロファイル、全圧損失等で格子依存性を評価した。フィルム冷却効率分布と面平均フィルム冷却効率、x方向渦度分布 ($x/d=10$) をFig. 7に記載する。またx方向渦度分布には式(4)を使用した。

まず、計算時間においてtest2は総格子要素数が大きいため62時間要した。最適化では条件数が多いことからtest2は時間コストが大きい。次にフィルム冷却効率分布において、test3は他の3条件に比べ、格子が粗いため壁面近傍の効率分布を捉えられていない。他4条件は類似している。また、面平均フィルム冷却効率においてtest3は他4条件より著しく大きい値となった。test2は僅かに小さい値を示した。test1, test4, test5は同様な値を示し、x方向渦度分布ではコア部に僅かな差があるが、同様の結果になった。したがってtest1, test4, test5の内、計算時間コストの小さいtest1の計算格子を採用した。

$$y^+ = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \cdot \frac{y}{\nu} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (4)$$

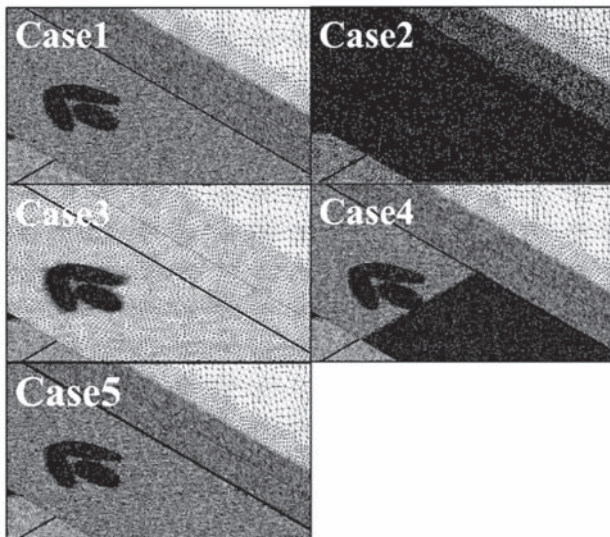


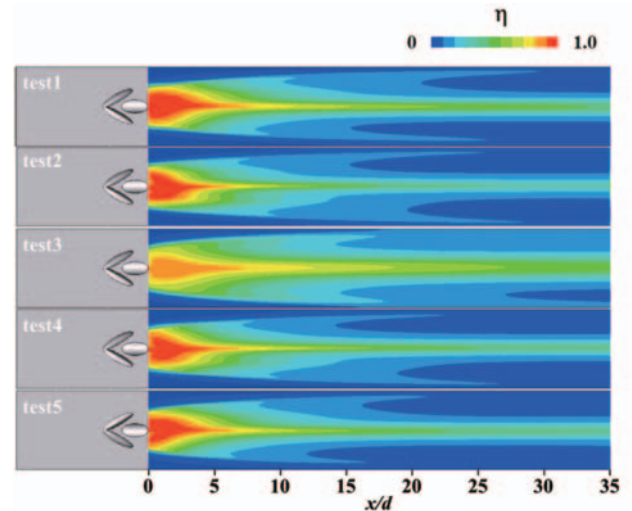
Fig. 6 Unstructured surface grids

Table 3 Size of computational grid

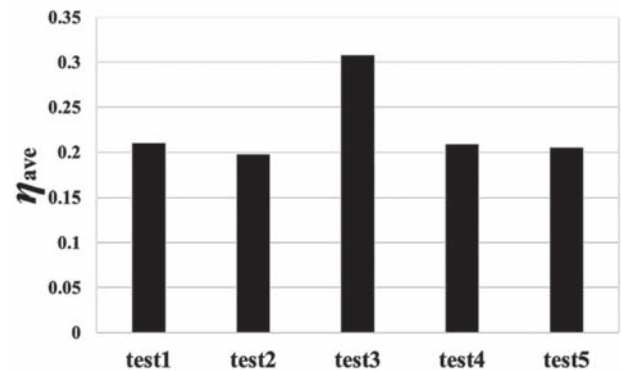
	$0 \leq y/d \leq 2.5$	$2.5 \leq y/d \leq 3.5$	$3.5 \leq y/d \leq 7.5$	プリズム高さ	冷却孔下流壁面
test1	0.1d	0.3d	0.5d	0.1d	0.1d
test2	0.05d	0.3d	0.5d	0.1d	0.1d
test3	0.2d	0.3d	0.5d	0.1d	0.1d
test4	0.1d	0.3d	0.5d	0.1d	0.05d
test5	0.1d	0.3d	0.5d	0.2d	0.1d

Table 4 Computational time and total elements of analysis

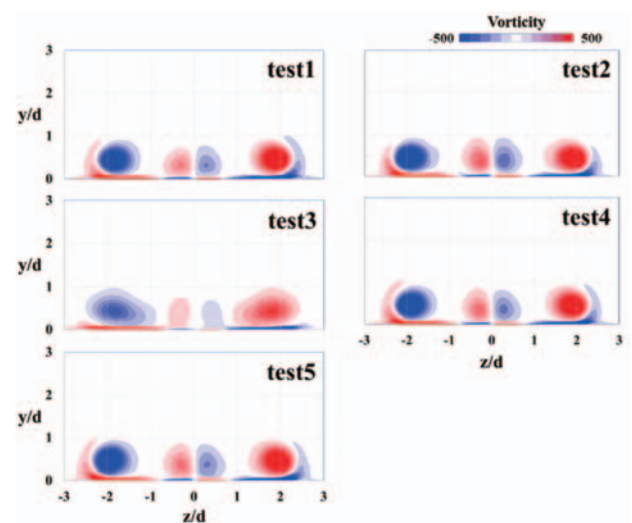
	test1	test2	test3	test4	test5
time [h]	17	62	9	47	18
Total elements [$\times 10^6$ cell]	25.4	64.8	7.5	30.2	25.0



(a) Contours of film cooling effectiveness



(b) Area-averaged film cooling effectiveness



(c) Contours of vorticity ($x/d = 10$)

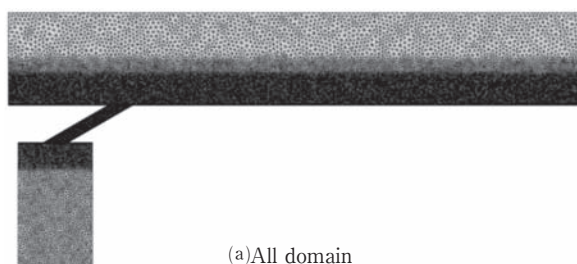
Fig. 7 Comparisons of calculated results

(3)計算格子

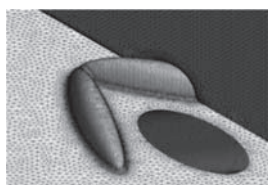
本最適化で使用した全54条件（形状数18×誤差因子数3）の計算格子の主流部ダクトの格子サイズは格子依存性調査を行って以下の通りに決定した。格子依存性調査については前項で述べている。壁面近傍以外での基本的な格子サイズは $0 \leq y/d \leq 2.5$ の範囲で1[mm]、 $2.5 \leq y/d \leq 3.5$ の範囲で3[mm]、 $3.5 \leq y/d \leq 7.5$ の範囲で5[mm]とした。また、壁面近傍にはプリズムメッシュを適用し、最小格子幅：0.0045[mm]、拡大率：1.2、生成層数：21（プリズム幅：～1[mm]）とした。

冷却孔の基本的格子サイズは0.5[mm]とし、二次空気部ダクトの基本的格子サイズは $-3.0 \leq y/d \leq -3.2$ の範囲で1[mm]、 $-3.2 \leq y/d \leq -13d$ 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適用しており、最小格子幅：0.0045[mm]、拡大率：1.2、生成層数：21と主流部ダクトと同様である。

本最適化の格子は全54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。Fig. 8に全体とV字デバイスの格子を示す。



(a)All domain



(b)Device

Fig. 8 Computational grid

3.3 解析条件

本研究で適用した解析条件をTable 5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(5)で定義される吹き出し比 BR は1.0、式(6)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、また、主流入口部には数値解析により得た速度プロファイルを与え、実験と同様の境界層厚さを再現⁽¹⁾した。境界層厚さは入口流入位置で $0.24d$ である。

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。

$$BR = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty \quad (5)$$

$$DR = \rho_2 / \rho_\infty \quad (6)$$

Table 5 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	0.00871515 [kg/s] 194.85 [K]
Mainstream outlet	Static pressure 0 [PaG]

4. 結果と考察

4.1 要素効果図 (SN比)

調査した全54条件から算出した要因効果図をFig. 9に示す。この目的は、探索範囲の中からフィルム冷却効率及びロバスト性に大きく影響する制御因子を発見することである。

要因効果図から、制御因子C：Distance、D：Height、E：Length2は他の制御因子よりSN比に対する影響が高いことが分かる。したがって、この3因子がロバスト性の向上に大きく寄与していることがわかる。

タグチメソッドの望大特性は、制御因子において最もSN比が高い水準値を選択することで最適形状を導出することができる。

よって、最適化形状 (Fig. 10) として、A1-B3-C1-D3-E3-F3-G2を選択した。即ち、A:Filletが $0.05d$ 、B:Angleが 35deg 、C:Distanceが $1.2d$ 、D:Heightが $0.5d$ 、E:Length2

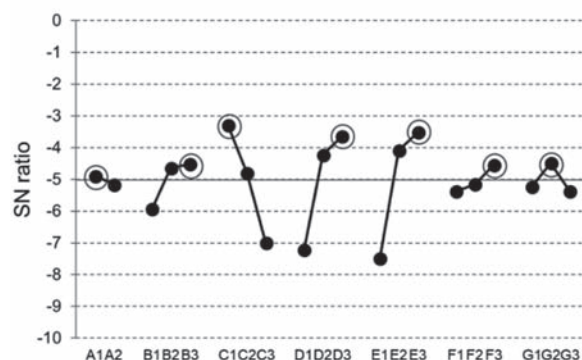


Fig. 9 Response graphs for major effect (film effectiveness)

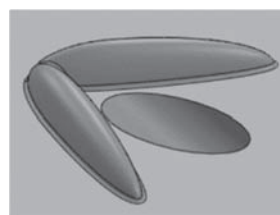


Fig. 10 V-Optimal

が $2.0d$, F:Width1が $0.25d$, G:Width2が $0.3d$ の形状である。以下, この制御因子選択によって得られた形状をV-Optimalと呼ぶ。

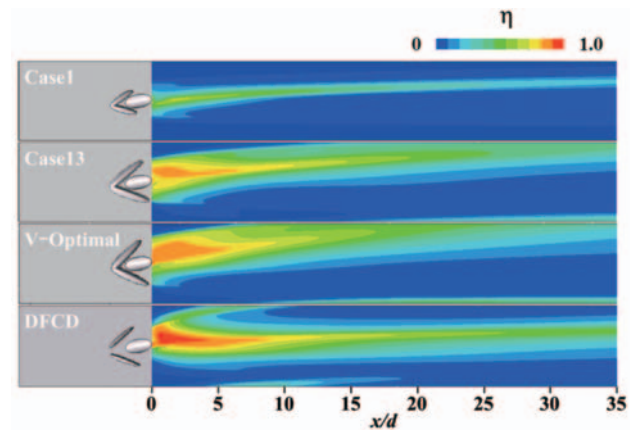
4.2 最適形状の性能調査

Case 1, Case 13及びDFCDを比較対象として選定し, フィルム冷却効率分布, フィルム冷却面平均効率値及び渦度分布により, V-Optimalのフィルム冷却性能を評価した。まずCase 1は, 54条件の多くの結果と同様な傾向を示したため, 代表例として選定した。誤差因子である流入角が拡大するとフィルム冷却効率が低下するという傾向である。また, Case 13は誤差因子に対して一定の高いフィルム冷却効率の結果を示したため選定した。DFCDは過去の研究で最適化された形状¹²⁾を採用した (Fig. 1)。

Case 1, Case 13, V-Optimalの形状の大きな違いはAngle, Height, Length2が挙げられる。それぞれの特徴として, Angleは拡大するほど縦渦が中心から離れて生成される。Heightは高いほど縦渦が大きくなりCRVPを抑制する。Length2は長さで縦渦の生成位置が変わる。

(1) フィルム冷却効率分布

フィルム冷却効率分布をFig. 11に示す。フィルム冷却効率分布において, Case 1は流入角が拡大すると共に付着性が低下しているのに対して, V-Optimalは流入角



(c) Inflow angle = 10 deg.

Fig. 11 Contours of film cooling effectiveness

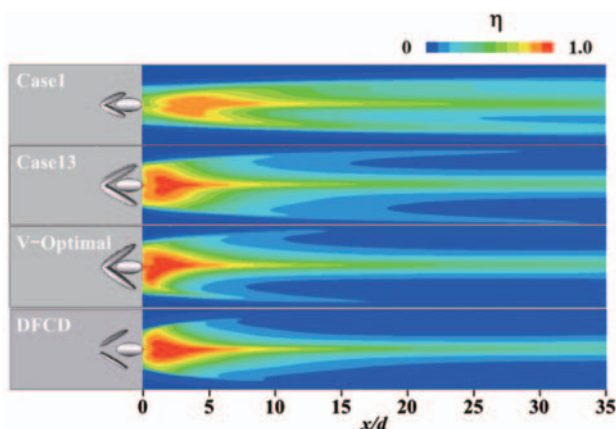
が拡大しても付着性が高く, フィルム冷却効率が高い。Case13と比較すると流入角 0 degではCase 13の付着性が高いが, 流入角 5 deg, 10degではV-Optimalの付着性が高い。

またDFCDと比較すると, 流入角 0 deg, 5 degではV-Optimalの方が下流部でスパン方向への付着性が高いが, 流入角10degではDFCDの方が下流部での付着性が高い。

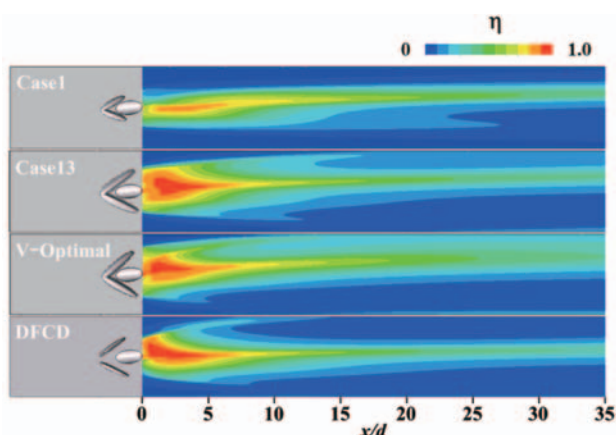
(2) 面平均フィルム冷却効率値

面平均フィルム冷却効率値をFig. 12に示す。V字デバイスにおいて, 流入角 0 degのときCase 1が最も面平均高いが, 流入角 5 deg, 10 degのときではV-Optimalが最も面平均が高い。また, Case 13と比較すると, V-Optimalは流入角 0 degのとき11%低く, 5 degのとき11%, 10degのとき8%程度高い面平均結果となった。

DFCDと比較するとV-Optimalは流入角 0 degのとき10%, 5 degのとき38%高く, 10degのとき2%程度低い面平均結果となった。流入角10degのとき僅かにV-Optimalが低い値を示した理由は, 冷却孔直下において高いフィルム冷却効率の分布領域がDFCDの方が僅かに大きいためだと考える。



(a) Inflow angle = 0 deg.



(b) Inflow angle = 5 deg.

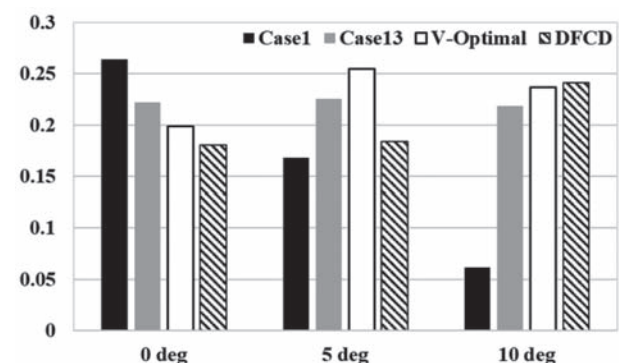


Fig. 12 Area-averaged film cooling effectiveness

(3) 渦度分布

Fig. 13に $x/d = 10$ の渦度分布を示す。Case 1はAngleとLength2が最も小さいため、縦渦がCRVPに近い位置で生成された。そのため、流入角 0 deg.のときCRVPをよく抑制している。しかし、流入角が大きくなるほど、生成位置のずれや縦渦が上手く生成できず、フィルム冷却効率が低い結果となった。次にCase 13について考える。流入角に対してロバストであるが、これはAngle, Height, Length2の大きさのバランスが関係している。縦渦の大きさや生成位置が中心対称でバランスも良く、流入角が大きくなってもCRVPを抑制したと考える。V-OptimalはAngleとLength2が大きく下流域に進むほど縦渦が外側へ離れていくため、流入角 0 deg.のとき冷却孔直下はフィルム冷却効率が高く、下流域は低

い。しかし、流入角が大きくなると冷却孔直下から下流域まで平均的に z 方向へ分布が拡大している。これは流入角により縦渦の位置がよりCRVPに近づいたためだと考える。

5. 結言

本研究では最適化手法のタグチメソッドを用い、新規デバイスのV字デバイスの最適形状導出を行い、以下の知見を得た。

- (1) 要因効果図より、制御因子C : Distance, D : Height, E : Length2が主流流入角変化に対するロバスト性に大きく寄与している。
- (2) 導出した最適形状はAngleとLength2の効果により主流流入角が大きくなっても縦渦がCRVPを抑制するため、高いフィルム冷却効率を維持することができる。
- (3) 導出した最適化形状はDFCDと比べても下流域まで付着性が高く、高いフィルム冷却効率を示した。

なお、V字デバイスはDFCD並みの高いフィルム冷却効率を示すことが分かった。今後は空力損失とデバイス自体への熱負荷を考慮した形状最適化を行い、実験的検証も行う予定である。

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高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) 立林和夫, "入門タグチメソッド", 日科技連出版, 2004.
- (5) 齋藤涼, 船崎健一, 河村朋広, 田川久人, 森崎哲郎, 2018, "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", 東北学生会第48回学生員卒業研究発表講演会
- (6) 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", 岩手大学博士学位論文, P. 321-360.
- (7) 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. ICFD is a trademark used by ANSYS,

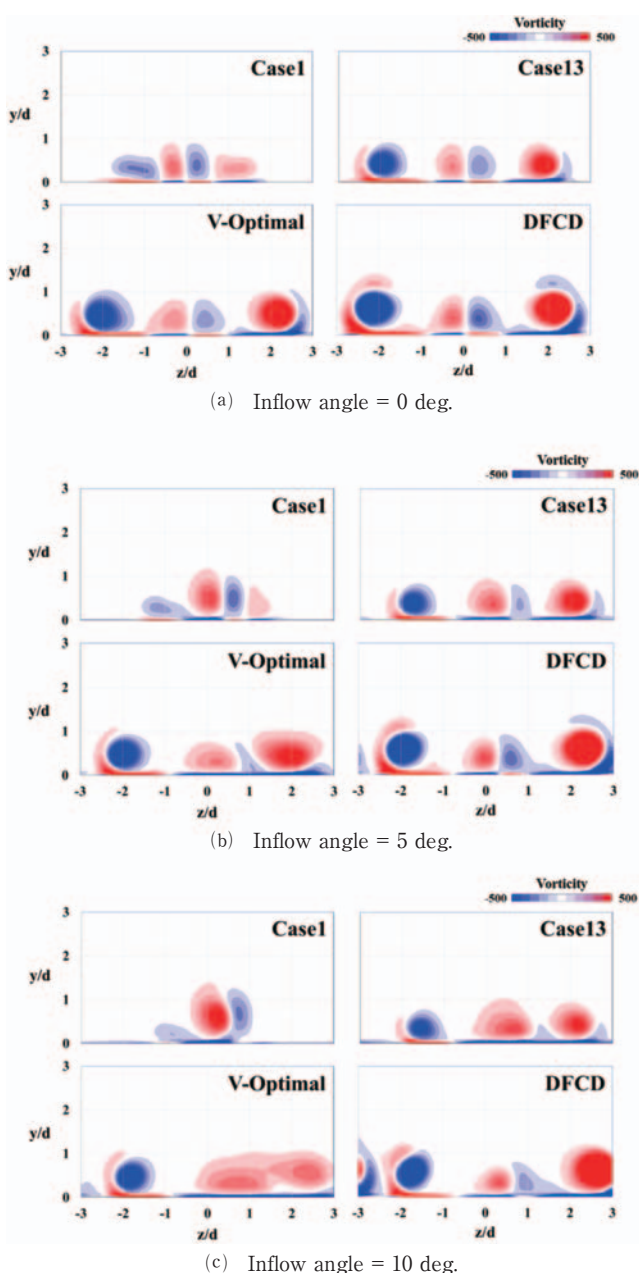


Fig. 13 Contours of vorticity ($x/d = 10$)

- Inc. under license. All other brand, product, service and feature names or trademarks are the property of their respective owners.
- (8) 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.
- (9) 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", 岩手大学修士学位論文, P. 107-108.
- (10) 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.
- (11) 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", 岩手大学博士学位論文, P. 63-64.
- (12) 河村朋広, 船崎健一, 瀧澤隼人, 田川久人, 森崎哲郎, 2018, "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2018.7, P. 306.