

# 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—

## Improvement of Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices —Investigation of Devices Optimum Shape under High Density Ratio—

河村 朋広<sup>\*1</sup>  
KAWAMURA Tomohiro

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

瀧澤 隼人<sup>\*1</sup>  
TAKISAWA Hayato

田川 久人<sup>\*2</sup>  
TAGAWA Hisato

森崎 哲郎<sup>\*2</sup>  
MORISAKI Tetsuro

### ABSTRACT

This paper describes several attempts to optimize double flow control devices (DFCD), which was invented by some of the authors for achieving better film cooling performance of gas turbine cooling holes. The device, which will be referred to as DFCD, is a pair of protrusions with the shape of hemi-spheroid attached to the turbine blade surface just upstream of each of cooling holes. It has been revealed in the previous studies that the optimized devices are able to improve film cooling effectiveness dramatically. However DFCD optimization has only been done under low density-ratio condition and low blowing ratio, i.e.,  $DR=0.85$  and  $BR=1.0$ , therefore there is room for the improvement of device shape and configuration for the use at high density ratio and high blowing ratio conditions. In order to investigate the film effectiveness at a high density ratio and high blowing ratio, we use CFD and EFD-based Taguchi Methods to optimize DFCD shape. Then, performance evaluation of the optimum DFCD shape is done from CFD and EFD.

**Key words :** Film Cooling, Flow Control, Taguchi-Method, CFD, PSP

### 1. 研究背景

ガスタービンには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に有効な手法としては、圧力比の上昇と共にタービン入口温度 (TIT) の上昇が挙げられるが、後者は同時に燃焼器下流に位置する高圧タービン部の熱負荷増加を招く。したがってタービン翼の冷却技術は系全体の高効率化に対し必須となるが、中でも熱負荷の増大に対して優れた遮熱効果を持つフィルム冷却技術の適用は不可欠である。

フィルム冷却については、過去数十年に渡り様々な研究がなされておりHaven<sup>(1)</sup>らはCRVP (Counter Rotating Vortex Pair) と呼ばれる渦構造が冷却空気の被冷却領域への付着性を著しく低下させることを示した。このことから、CRVPを抑制するために数多くの流れ場制御手法が過去の研究で提案されている。

本研究では岩手大学が特許取得に成功した三次元形状の流れ制御デバイス (Double Flow Control Devices: DFCD) を冷却孔上流に設置することでフィルム冷却における流れ場を制御し、フィルム冷却性能向上を図っている。

DFCDはこれまでFunazaki<sup>(2),(3)</sup>らにより密度比  $DR=0.85$  条件、誤差要因を吹き出し比  $BR=0.5, 0.75, 1.0$  とし、実験・数値解析の両者を使用した形状最適化や密度比  $DR=1.53$ 、吹き出し比  $BR=1.0$  条件下における数値解析を使用した形状最適化が行なわれてきた。しかしガスタービン実機は高  $DR$  条件であり、高吹き出し比を作動条件とする冷却孔も多く存在することから、本条件下における形状最適化はガスタービン実機適用を目指す上では必須項目であるといえる。

そこで本研究では、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、実験的調査の両者から高密度比  $DR=1.53$ 、高吹き出し比  $BR=1.5$  条件下でのDFCD最適形状の導出及び最適形状の性能評価を実施した。

原稿受付 2017年9月1日

査読完了 2018年6月13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

## 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等の特徴があり、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、最適化指標に面平均フィルム効率を選定し、面平均フィルム効率値を最大化する望大特性問題としてDFCD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

本手法では、いくつかの規則に沿って設計を進める必要がある。以下にDFCD最適化形状導出の流れ①～⑦を示す。

- ① DFCDの制御因子・誤差因子の選定
- ② 各因子の水準値選定
- ③ (ex. The height of DFCD=3mm, 4mm, 5mm)
- ④ 適用する直交座標の決定
- ⑤ 決定した水準値の直交表への割り付け
- ⑥ ④で作成されたDFCD形状を用いた最適形状導出用サンプルデータの取得
- ⑦ サンプルデータを用いたSN比算出及び最適水準の決定
- ⑧ 導出された最適形状の性能評価

ここで、①で選定した因子によっては導出される最適形状が大きく異なる可能性があるため、設計者は選択する因子に細心の注意を払う必要がある。本最適化で選定した因子、適用した直交表等についての詳細は次節以降にて説明する。

#### (2) 制御因子及び誤差因子

DFCD形状最適化に用いた制御因子A～Gを図1に、制御因子の水準値を表1に示す。今回は過去の最適化から得た知見<sup>(4)</sup>を参考に各水準値を選定した。なお今回使用した直交表はL18直交表を採用しており、全18種類のDFCDに対してサンプルデータの取得を行なった。使用したL18直交表を表2に示す

また誤差因子には主流流入角  $\varepsilon$  ( $=0, 5, 10$  deg) を選定した。選定理由としては流入角の変化がDFCDの形成する渦構造に変化を与え、結果的にフィルム冷却効率に大きく影響すると予想されるためである。今回はこの誤差要因に対しロバストな性能を発揮するDFCD形状を探索する。

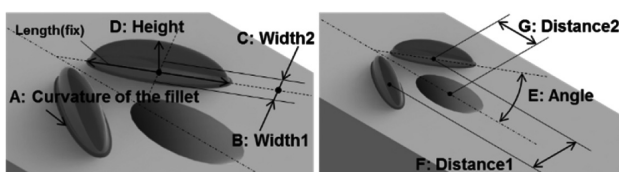


Fig. 1 Control factor (DFCD geometry)

Table 1 Control factor's level

|   | Control factor      | Level 1  | Level 2  | Level 3  |
|---|---------------------|----------|----------|----------|
| A | Curvature of fillet | 0.05d    | 0.1d     |          |
| B | Width1              | 0.2d     | 0.25d    | 0.3d     |
| C | Width2              | 0.2d     | 0.25d    | 0.3d     |
| D | Height              | 0.4d     | 0.5d     | 0.6d     |
| E | Angle               | 20[deg.] | 25[deg.] | 30[deg.] |
| F | Distance1           | 1.3d     | 1.4d     | 1.5d     |
| G | Distance2           | 1.3d     | 1.4d     | 1.5d     |

Table 2 L18 orthogonal table

|        | A     | B     | C     | D    | E        | F    | G    |
|--------|-------|-------|-------|------|----------|------|------|
| case1  | 0.05d | 0.2d  | 0.2d  | 0.4d | 20[deg.] | 1.3d | 1.3d |
| case2  | 0.05d | 0.2d  | 0.25d | 0.5d | 25[deg.] | 1.4d | 1.4d |
| case3  | 0.05d | 0.2d  | 0.3d  | 0.6d | 30[deg.] | 1.5d | 1.5d |
| case4  | 0.05d | 0.25d | 0.2d  | 0.4d | 25[deg.] | 1.4d | 1.5d |
| case5  | 0.05d | 0.25d | 0.25d | 0.5d | 30[deg.] | 1.5d | 1.3d |
| case6  | 0.05d | 0.25d | 0.3d  | 0.6d | 20[deg.] | 1.3d | 1.4d |
| case7  | 0.05d | 0.3d  | 0.2d  | 0.5d | 20[deg.] | 1.5d | 1.4d |
| case8  | 0.05d | 0.3d  | 0.25d | 0.6d | 25[deg.] | 1.3d | 1.3d |
| case9  | 0.1d  | 0.3d  | 0.3d  | 0.4d | 30[deg.] | 1.4d | 1.5d |
| case10 | 0.1d  | 0.2d  | 0.2d  | 0.6d | 30[deg.] | 1.4d | 1.4d |
| case11 | 0.1d  | 0.2d  | 0.25d | 0.4d | 20[deg.] | 1.5d | 1.5d |
| case12 | 0.1d  | 0.2d  | 0.3d  | 0.5d | 25[deg.] | 1.3d | 1.3d |
| case13 | 0.1d  | 0.25d | 0.2d  | 0.5d | 30[deg.] | 1.3d | 1.5d |
| case14 | 0.1d  | 0.25d | 0.25d | 0.6d | 20[deg.] | 1.4d | 1.3d |
| case15 | 0.1d  | 0.25d | 0.3d  | 0.4d | 25[deg.] | 1.5d | 1.4d |
| case16 | 0.1d  | 0.3d  | 0.2d  | 0.6d | 25[deg.] | 1.5d | 1.3d |
| case17 | 0.1d  | 0.3d  | 0.25d | 0.4d | 30[deg.] | 1.3d | 1.4d |
| case18 | 0.1d  | 0.3d  | 0.3d  | 0.5d | 20[deg.] | 1.4d | 1.5d |

#### (3) SN比

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(1)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は主流流入角である。Yは面平均フィルム効率であり、数値解析においては、 $0 \leq x/d \leq 35$ ,  $-3 \leq z/d \leq 3$ の領域、実験においては試験装置の制約上、 $0 \leq x/d \leq 20$ ,  $-3 \leq z/d \leq 3$ の領域で平均している。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。

今回は式(1)を利用し、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効率が最大となるDFCD最適形状を探索した。

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

## 3. 数値解析手法

### 3.1 解析ソルバー

解析ソルバーに関しては、汎用流体解析ソフト ANSYS® CFX® ver15.0 [CFX is a trademark of Sony Corporation in Japan]<sup>(5)</sup>を用いた。またタグチメソッドに使用する結果は、全条件RANSによる解析を実施した。また乱流モデルにはSSTモデルを使用した。RANS解析及び本乱流モデルの選定理由は、過去の最適化<sup>(6)</sup>におい

てRANS解析, SSTモデルを採用した場合の予測形状が実験結果による最適形状と一致したという前例があるためである。

### 3.2 解析領域・解析格子

図2に今回使用した解析ドメインを示す。原点は冷却孔後縁にとり, 計算領域はスパン方向に冷却孔1ピッチ分 ( $6d$ ), 冷却孔下流を  $36d$  とした。ここで冷却孔直径  $d$  は10mmであり, 冷却孔形状はRound hole, 冷却孔傾斜角  $\alpha = 30\text{deg}$  である。また流入角条件 ( $5, 10\text{deg}$ ) における解析では, 冷却孔とDFCDの設置位置をスパン方向に傾けて二次空気吹き出しの方向をずらすことで流入角の変化を再現している。

図3に今回使用した解析格子を示す。本研究では, タグメソッドで使用する格子 (フィルム冷却効率算出用に18条件 $\times$ 3) を用意し, 計算を行なった。格子生成ソフトにはANSYS® ICEM CFD™ ver15.0 [ICEM CFD is a trademark used by ANSYS, Inc. under license]<sup>[5]</sup> 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, DFCD部分の格子作成が容易であることが挙げられる。また空間及び壁面解像度向上のために壁面近傍及びDFCD周辺は格子を密に生成した。

格子サイズは主流部ダクトにおいて  $y/d=0 \sim 2.5d$  の範囲で1,  $y/d=2.5 \sim 3.5d$  の範囲で3,  $y/d=3.5 \sim 7.5d$  の範囲で5としている。また壁面近傍にプリズムメッシュを適用しており, 最小格子幅は0.0045, 拡大率1.2で21層生成している。冷却孔の格子サイズはすべて0.5とし, 二次空気部ダクトの格子サイズは  $y/d=-3.0 \sim -3.2d$  の範囲で1,  $y/d=-3.2 \sim -13d$  の範囲で3としている。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。

そして格子は全ての解析 (18条件 $\times$ 3) において同じ方法で作成しており, DFCD形状によって若干の差異はあるが, 計算格子の総格子要素数は約2,500万セルである。

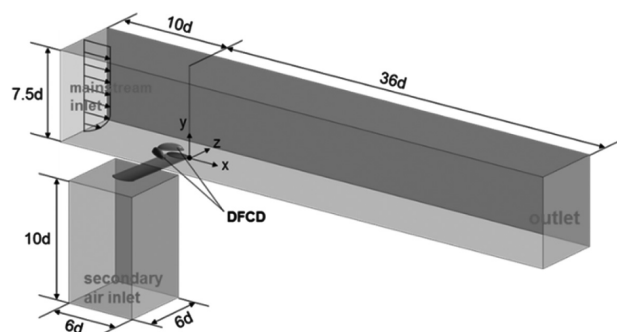


Fig. 2 Computational domain

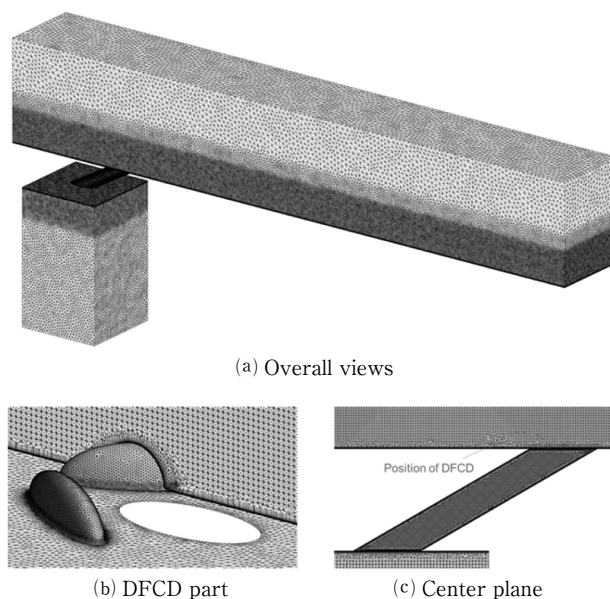


Fig. 3 Computational grid

### 3.3 解析条件・境界条件

本解析では, 冷却孔直径  $d$  を代表長さとし, レイノルズ数  $Re=6,000$  とした。吹き出し比  $BR$  は式(2)で定義し, 今回は  $BR=1.5$  である。また主流と二次空気の密度比  $DR$  は式(3)で定義し,  $DR=1.53$ , 主流乱れ  $Tu$  は1%とした。

$$BR = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty \quad (2)$$

$$DR = \rho_2 / \rho_\infty \quad (3)$$

続いて, 本研究で適用した境界条件について説明する。解析ドメイン主流入口部には流速 (速度プロファイル), 温度, 乱れ度を与えている。速度プロファイルを適用した理由としては, 実験における境界層厚み ( $0.24d$ ) を再現するためである。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ている。また解析ドメイン二次空気入口部には質量流量, 温度, 乱れ度を与え, 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ている。冷却孔部には断熱壁条件を適用している。

### 3.4 定義式 (フィルム冷却効率)

数値解析による最適化形状の導出では, 評価指標に面平均フィルム冷却効率を使用し, 最適化形状を導出している。式(4)にフィルム冷却効率の定義式を示す。

$$\eta = \frac{T_\infty - T_{wall}}{T_\infty - T_2} \quad (4)$$

## 4. 実験手法

### 4.1 実験装置

図4に実験装置の概要を示す。本実験には岩手大学の所有する小型吸込式風洞を使用した。主流は風洞下流に位置する送風機により吸引される形で供給され、風洞内で整流及び縮流された後、高さ150mm、幅250mmの亚克力製矩形テストセクションへと流入する。主流流速はテストセクションダクト上流部に設置したピトー管により測定した。

二次空気として本研究では二酸化炭素を使用しており、二酸化炭素バッファータンク内部の供給圧により供給されサーマルフローメーターを経て、プレナム内へ流入する。

テストセクション側面にはABS樹脂製の平板供試体を設置しており、その表面には感圧塗料（PSP）を塗布した。供試体表面には、PSP励起用のUVLED光源、ロングパスフィルタを取り付けた冷却CCDカメラを設置している。使用したPSPの詳細等については4.4節にて後述する。またPSP計測は光量計測であることから、外部の光を極力遮断する必要があるため、テストセクション全体を黒色フィルムによって暗室化した。

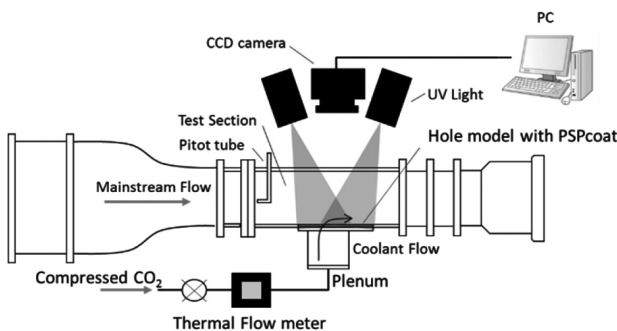


Fig. 4 Wind tunnel for film cooling investigations

### 4.2 供試体

図5に本研究で使用した供試体の概観図を示す。供試体は土台となるBase Blockと冷却孔部分のHole Blockから構成されており、Hole Blockには単純円筒型冷却孔Round Hole（RH）を有したRHモデルを採用している。

供試体の幾何形状を図6に示す。冷却孔直径は $d=10\text{mm}$ 、冷却孔傾斜角 $\alpha=30\text{deg}$ であり、供試体の厚さは $3d$ である。また冷却孔はスパン方向に3つ設けており、冷却孔ピッチ $p=6d$ である。

続いて、図7に主流流入角を変更した際の供試体を示す。実験においても主流に対し $\varepsilon$ だけ角度をつける事で主流流入角を再現している。またそれに伴い、DFCD設置位置も $\varepsilon$ だけ角度をつけている。本実験では冷却孔上流に着脱可能なDFCDを設置し、タグチメソッド用サンプルデータの取得を行なった。

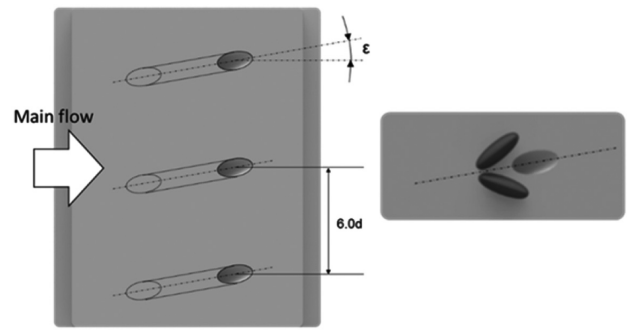


Fig. 5 Test model

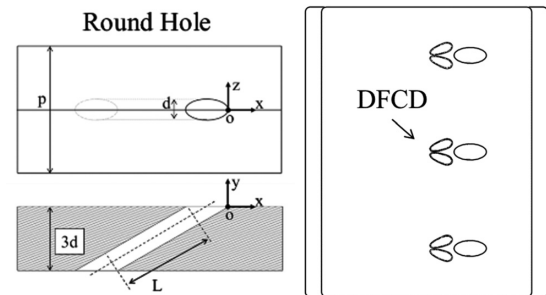


Fig. 6 Round Hole geometry

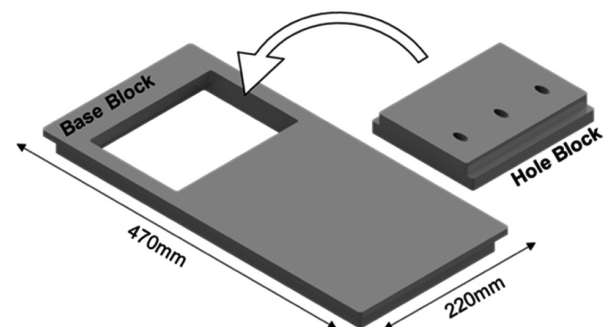


Fig. 7 Hole block (Angled condition)

### 4.3 実験条件

本実験では、解析条件と同様に冷却孔直径 $d$ を代表長さとし、レイノルズ数 $Re=6,000$ とした。吹き出し比 $BR$ は式(2)で定義され、今回は $BR=1.5$ である。主流と二次空気の分子量比 $MW$ は、 $MW=1.5192$ 、主流と二次空気の密度比は式(3)で定義され、 $DR=1.53$ 、主流乱れ $Tu$ は $Tu=1\%$ 程度である。

### 4.4 PSP計測（壁面フィルム冷却効率）

まずPSPについて簡単に説明する。PSPは発光色素をセンサとした機能性塗料であり、特定の波長により励起され発光し、その発光強度は色素周辺の酸素濃度に応じて変化するという性質を持っている。

そこで本研究では、UVLED光源によりPSPを励起し、冷却CCDカメラにより供試体表面のPSPの発光強度を撮影した後、画像処理を施すことでフィルム冷却効率を算出した。図8に撮影時の様子を示す。

今回用いたPSPの感圧色素には常温で高い圧力感度を持つ白金ポルフィリン（PtTFTT）を使用しており、励

起波長は392nm, 発光波長は650nmである。そのためUVLED光源の波長には400nmを採用した。また650nmの発光波長を捉えるために、カットオン波長630nmのロングパスフィルタを取り付けた冷却CCDカメラ (16bit)を採用した。

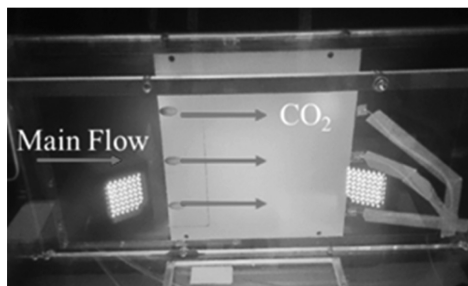


Fig. 8 PSP excitation view

なおPSPの発光強度と圧力の間には、式(5)で定義されるStern-Volmer式が成立することが知られている。

$$\frac{I_{ref} - I_{dark}}{I - I_{dark}} = A + B \frac{P}{P_{ref}} + C \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^2 \quad (5)$$

ここで $I_{ref}$ は主流のみ通風時の画像,  $I_{dark}$ は暗電流画像,  $I$ は二次空気吹き出し時の画像である。また $P/P_{ref}$ は表面の圧力と大気圧の比である。A, B, Cは較正係数であり実験中の供試体表面温度を使用した較正試験により取得する。較正試験を行なった後、式(5)を利用し、画像から圧力比を算出し、その後、Charconnierら<sup>(7)</sup>が提案したフィルム冷却効率の式(6)に圧力比を代入することで、フィルム冷却効率を算出した。

$$\eta = 1 - [1 + MW \left( \frac{(P/P_{ref})_{air}}{(P/P_{ref})_{gas}} \right)]^{-1} \quad (6)$$

MWは主流と二次空気の分子量比 ( $MW=1.5192$ ) である。 $(P/P_{ref})_{air}$ は二次空気に空気を使用した際の圧力比,  $(P/P_{ref})_{gas}$ は二次空気に二酸化炭素を使用した際の圧力比である。なお二次空気に空気を使用した場合の圧力変化は非常に小さく、無視できるものと仮定し,  $(P/P_{ref})_{air} \approx 1$ として計測を行なっている。

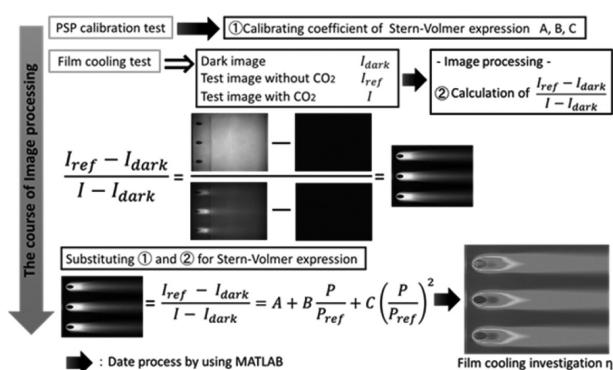


Fig. 9 Data process of film cooling investigation

図9に取得したデータについての画像処理の過程を示す。データ処理ソフトにMATLAB®を使用し、画像処理ソフトにはImage Jを使用している。

## 5. 結果と考察

### 5.1 数値解析結果

#### 5.1.1 要因効果図 (SN比, S: 面平均フィルム効率)

数値解析で調査した54条件 (=形状数:18×誤差要因数:3) から算出した要因効果図を図10に示す。本解析の目的は、探索範囲の中からフィルム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。

要因効果図からは、制御因子D (DFCD高さ), E (DFCD開き角), F (DFCDスパン方向距離) のSN比に対する影響が他の制御因子と比べると突出して高いことが分かる。従って、この3因子がフィルム効率及びロバスト性の向上に大きく寄与していることが分かる。望大特性問題におけるタグチメソッドでは、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。

そこで最適化形状として、A1-B1-C1-D3-E3-F1-G1 (Optimal01) を選択した。

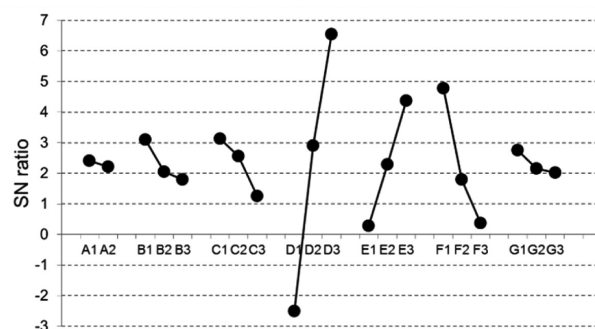


Fig. 10 Response graphs for major effect (film effectiveness)

#### 5.1.2 最適形状の性能調査 (フィルム効率分布)

数値解析から導出した最適形状 (Optimal01) におけるフィルム効率分布を図11に示す。今回の比較対象には、case1, case10を選択した。ここでcase10は取得したサンプルデータの中で、流入角変化によらず一定以上の高い効率を示したcaseである。

図11より、0deg条件においてOptimal01は二次空気のスパン方向拡散を促進し、かつ冷却孔直下のフィルム効率を大きく向上させていることが分かる。Case10との比較においては高効率領域が、よりスパン方向に拡大していることが確認できた。5deg条件、10deg条件においてもOptimal01は広範囲に一定のフィルム効率値が分布している様子が確認でき、case10との比較においても広範囲に二次空気が付着している様子が見られた。このことから今回導出した最適形状は流入角変化に対するロバスト性が高いといえる。

### 5.1.3 最適形状の性能調査（面平均フィルム効率）

数値解析から導出した最適形状（Optimal01）における面平均フィルム効率を図12に示す。面平均フィルム効率のデータ処理範囲は、 $0 \leq x/d \leq 35$ ,  $-3 \leq z/d \leq 3$ である。比較対象には、前節と同様にcase1, case10を選択した。

Case1, case10の結果と比較すると、流入角の変化によらずOptimal01の効率値が最も高いことがわかる。Case10とOptimal01を比較すると、0deg条件では23%, 5deg条件では6%程度、Optimal01の効率値が高い結果を示した。以上より、面平均フィルム効率の結果からも、今回導出した最適形状は最もフィルム効率が高く、流入角変化に対するロバスト性が高いといえる。

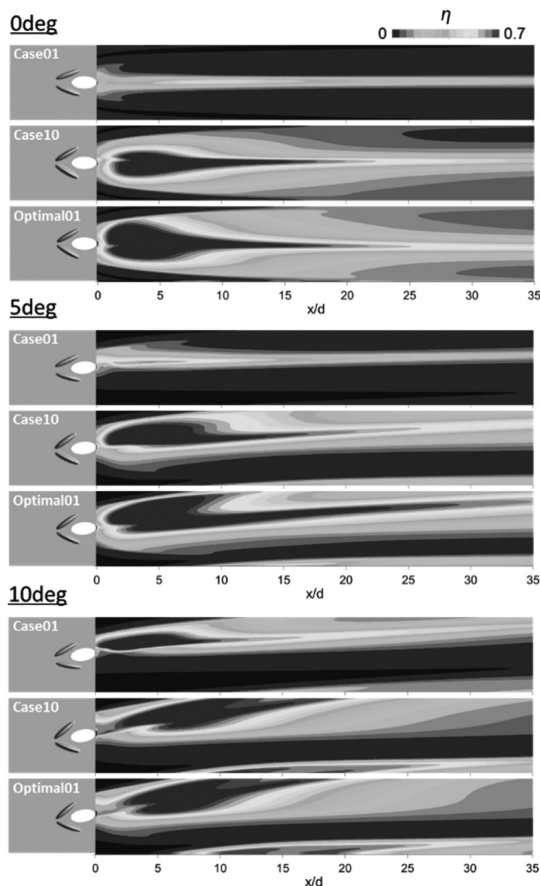


Fig. 11 Contour of film effectiveness ( $\varepsilon = 0, 5, 10\text{deg}$ )

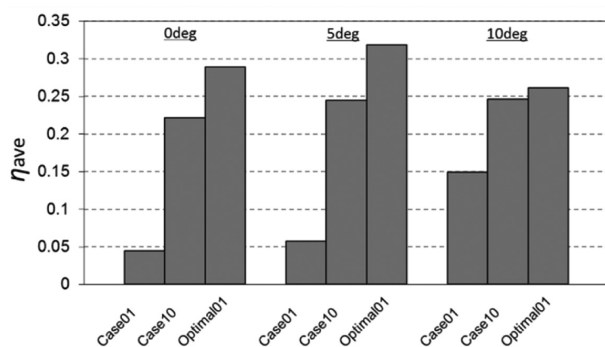


Fig. 12 Area-averaged film effectiveness

## 5.2 実験結果

### 5.2.1 要因効果図（SN比, S : 面平均フィルム効率）

実験で調査した54条件（=形状数:18×誤差要因数:3）から算出した要因効果図を図13に示す。要因効果図より、制御因子の影響度は、制御因子D（DFCD高さ）、E（DFCD開き角）、F（DFCDスパン方向距離）が比較的高いといえる。また制御因子G（DFCDと冷却孔中心からの距離）も比較的フィルム効率のロバスト性に影響していると分かる。加えて、制御因子C（DFCD外側の幅）はロバスト性への影響度が小さく、C1とC2の差がほとんど見られない。従って実験から得られた最適化形状は、A1-B1-C1-D3-E3-F1-G1（Optimal01）もしくはA1-B1-C2-D3-E3-F1-G1（Optimal02）である。

続いて、実験から得られた要因効果図と数値解析から得られた要因効果図（図10）を比較する。制御因子の影響度は、数値解析から得られた結果と傾向はおおむね一致しているが、実験値による要因効果は小さく出ている。これは各サンプルデータにおける実験値の個体差が数値解析結果よりも小さく現れたために、各因子の効果もそれに対応する形で小さいものになったと考えられる。また数値解析及び実験から得られた最適形状は、数値解析ではA1-B1-C1-D3-E3-F1-G1（Optimal01）、実験ではA1-B1-C1-D3-E3-F1-G1（Optimal01）もしくはA1-B1-C2-D3-E3-F1-G1（Optimal02）であった。よって数値解析及び実験結果から得られた最適形状は、ほぼ一致することが分かり、タグチメソッドでは比較的精度の高い最適形状予測が可能であるといえる。

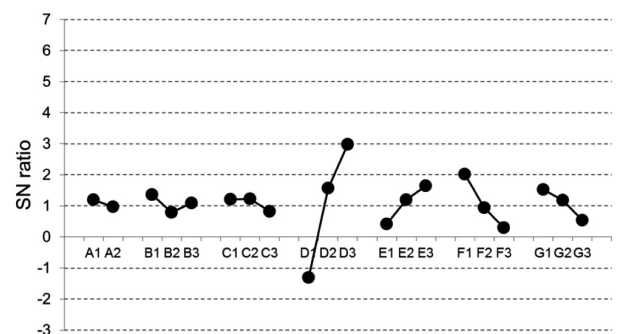


Fig. 13 Response graphs for major effect (film effectiveness)

### 5.2.2 最適形状の性能調査（フィルム効率分布）

実験から導出した最適形状におけるフィルム効率分布を図14に示す。なお導出された最適化形状は2形状あるが、試験の都合上、Optimal01の制御因子Aのみを変化させた形状（A2-B1-C1-D3-E3-F1-G1, Optimal03）を使用し、最適形状の評価を行なっている。また、 $x/d=3.0$ 付近は供試体はめ込み部であり、点線で表示している。比較対象には、数値解析結果と同様にcase1, case10を選択した。Case10は数値解析の結果と同様に、実験においても取得したサンプルデータの中で流入角変化によらず高いフィルム効率を示したcaseである。

図14より、0deg条件においてcase1,case10と比較するとOptimal03は冷却孔直下流の高効率領域がよりスパン方向に拡大していることが確認できる。また5deg条件、10deg条件においても0deg条件と同様の傾向が見られ、実験結果においても導出した最適形状は流入角変化に対し、ロバスト性が高いといえる。

### 5.2.3 最適形状の性能調査（面平均フィルム効率）

数値解析から導出した最適形状（Optimal01）における面平均フィルム効率を図15に示す。面平均フィルム効率のデータ処理範囲は、 $0 \leq x/d \leq 20$ ,  $-3 \leq z/d \leq 3$ である。比較対象には、前節と同様にcase1, case10を選択した。

Case1, case10の結果と比較すると、流入角の変化によらずOptimal03の効率値が最も高いことがわかる。Case10とOptimal03を比較すると、0deg条件では3%、5deg条件では7%、10deg条件では2%程度、Optimal03

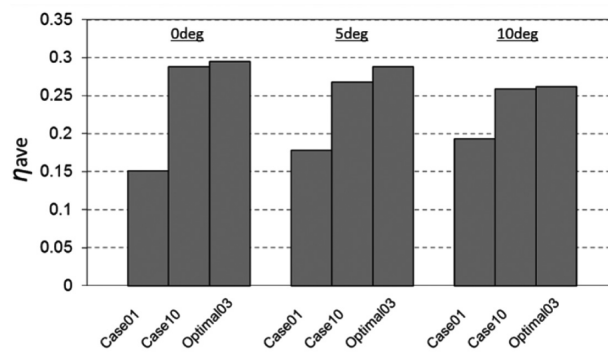


Fig. 15 Span wise-averaged film effectiveness

の効率値が高い結果を示した。以上より、面平均フィルム効率の結果からも、今回導出した最適形状は最もフィルム効率が高く、流入角変化に対するロバスト性が高いといえる。

## 6. 結言

本研究では最適化手法にはタグチメソッドを用い、高密度比条件下 $DR=1.53$ 及び高吹き出し比条件下 $BR=1.5$ におけるDFCD最適形状導出を行ない、以下の知見を得た。

- (1) 要因効果図（評価指標：面平均フィルム効率）における比較では、数値解析及び実験結果から導出された各制御因子におけるSN比の傾向に高い一致性が見られ、因子D（DFCD高さ）、E（DFCD開き角）、F（DFCDスパン方向距離）がフィルム効率のロバスト性に大きく寄与している。
- (2) 数値解析・実験ベースのタグチメソッドにおいて両者の予測した最適形状は一致しており、タグチメソッドでは比較的高い精度の最適形態予測が可能である。
- (3) 今回導出した最適形状Optimal01は、 $DR=1.53$ 及び $BR=1.5$ 条件下において高いフィルム冷却性能を示し、誤差要因として設定した流入角の変化に対しロバストな性能を発揮する形態である。

## 参考文献

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

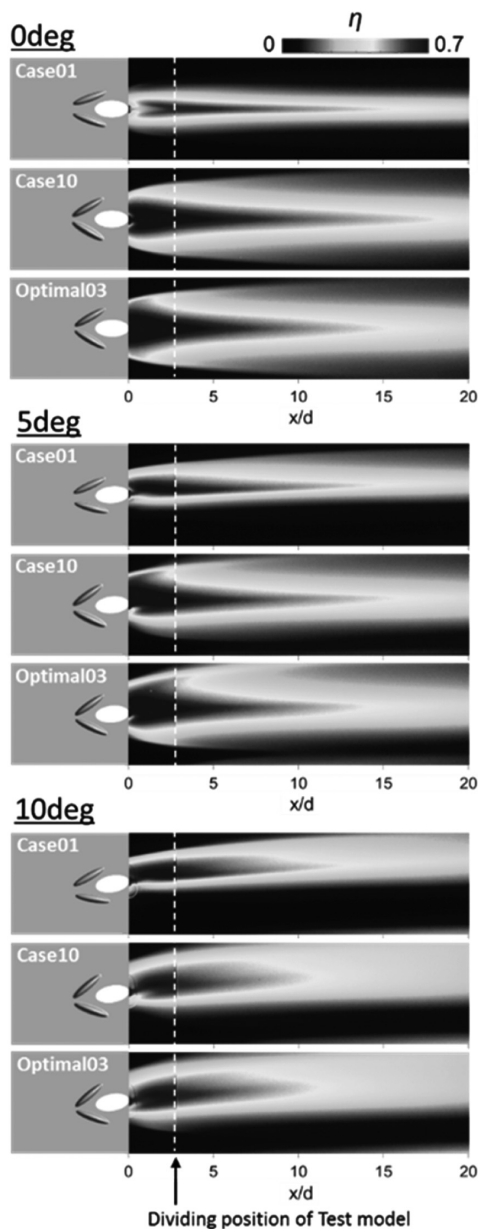


Fig. 14 Contor of film effectiveness ( $\varepsilon=0, 5, 10\text{deg}$ )

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.

- (4) Takisawa, H., Funazaki, K., Sasaki, H., Kawamura, T., Tagawa, H. and Nakano, S., 2016, "Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices Under High Density Ratio", Asia Congress of Gas Turbine 2016, ACGT-123.
- (5) 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.

- (6) 川端浩和, 船崎健一, 中田諒大, 田川久人, 堀内康広, 2014, " 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最適化手法に関する研究", 日本ガスタービン学会誌2014.9.
- (7) Charbonnier,D. et al.,2009, "Experimental and Numerical Study of the Thermal Performance of Film Cooled Turbine Platform", ASME,GT2009-60306.