

# 流れ制御片側デバイスのフィルム冷却向上効果に関する研究

宍戸 昌子 (岩手大学大学院)

## The Study on Film Cooling Improvement Effect of One-Side FCD

SHISHIDO Masako (Iwate University Graduate School)

### ABSTRACT

This study proposes a new flow control device (FCD), called one-side FCD or OFCD, to improve conventional cooling hole film effectiveness of turbine airfoils for gas turbine. 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 for the type of OFCD. It is found that OFCD performs fairly well.

### 1. はじめに

航空業界は、今日、想像もしなかった状況になっている。世界中が恐怖に陥る環境は人間の移動を支えてきた航空機の稼働を阻止している。小型機、中型機、大型機の運航停止、または、便数削減を余儀なくしている。2019年以降、新型コロナウイルスによる急性呼吸器症候群 (COVID-19) を、2020年3月11日、WHOは「新型コロナウイルスの流行について、パンデミック相当である」との見解を示した<sup>1)</sup>。

日本においては、高齢社会に伴い生活の質・人生の質 (Quality of Life : QOL) を重視する考え方が社会に浸透し始めて、安定した生活になりつつ、Society5.0の社会が実現するIoT (Internet of Things) で全てのモノがつながり、様々な知識や情報が共有され、今までにない新たな価値を生み出すことで、課題や困難を克服する<sup>2)</sup>Society5.0計画が、社会の発展を支えてきた。

さて、国際航空運送協会 (IATA) は、新型コロナウイルスの影響で落ち込んでいる国際線需要が2019年の水準を回復するのは、24年までかかる見通しを発表している。需要は旅客数に輸送距離を乗じた「旅客キロ」と呼ぶ指標での国内線を含めた全体の回復は23年までかかるとみている。米ボーイングは次世代中型機の開発計画を打ち切った。2020年にも着手する予定だったが、新型コロナウイルスの影響で需要が見込めないと判断した。現行機種も22年までに3~5割減産する。航空会社の経営悪化で注文キャンセルが相次ぎ、旅客数が減少する局面では、新型機の開発より小型機にニーズがあると説明している<sup>3)</sup>。

本研究は、ガスタービンエンジンの冷却技術の一つであるフィルム冷却について数値解析を用いて結果を出している。流れ制御デバイスFCD (Flow Control Device) の開発を進めており、一つの冷却孔の上流に単独の突起OFCD (One Flow Control Device) を設置して、フィルム冷却効率、面平均フィルム冷却効率値、渦度、損失のコンター図を調査した。片側デバイスによるガスタービンのフィルム冷却の効率向上の研究が、小型機のエンジンのフィルム冷却に良い影響を与える

のではないかと考える。

### 2. 研究背景

ガスタービンは、発電用や、航空機エンジンに用いられる内燃エンジン的一种である。今日、我々の社会生活に欠くことが出来ない原動機である。東日本震災以降、火力発電コストの削減の要求が強く、発電の供給量の割合が非常に大きくなっている。また、今後さらなるガスタービンの高効率化が求められている。ガスタービンの高効率化には、タービン入り口温度 (Turbine Inlet Temperature) の高温化が有効とされており、冷却技術の進歩が大きく貢献している。今回の研究対象は、冷却用空気を翼表面に薄く付着させることで、ガスタービン翼を高温から保護するフィルム冷却技術である<sup>4)</sup>。

○主な記号

$d$  : 冷却孔直径 (10mm)

BR : 吹き出し比

DR : 密度比

$\eta$  : フィルム冷却効率

○頭文字

OFCD : One-sided Flow Control Device

RH : Round Hole

### 3. 片側デバイス

デバイス形状として考案したOFCD (図1) を示す。OFCDから生成される渦に非対称性が見られ、それによるフィルム冷却率の効果が向上<sup>5)</sup>するのではないかとこの考えからOFCDを対象にした。図2にデバイスの設計パラメータを記載している。また、調査したOFCDの設計値 (表1) を示す。



図1 OFCD

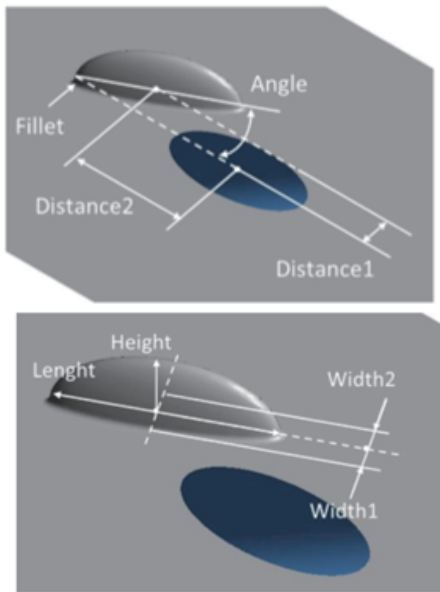


図2 デバイスのパラメータ

表1 OFCDの設計値 (単位: mm)

	Fillet	Width1	Width2	Height	Angle [deg]	Distance 1,2
OFCD_Part1	0	2	2	6	30	7.5,25
OFCD_Part1	0.5	2	2	6	30	7.5,25
Rep1	0	1	1	5	25	4,11
Rep3	0	1	3	7	35	5,13
Rep5	0	2	2	6	35	5,11

## 4. 数値解析

### 4.1. 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>9)</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を使用し解析を行った。

### 4.2. 解析ドメイン・計算格子

#### 4.2.1. 解析ドメイン

図3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。冷却孔形状は直径 $1d$ のRound Hole、冷却孔傾斜角 $\alpha=30\text{deg}$ である。

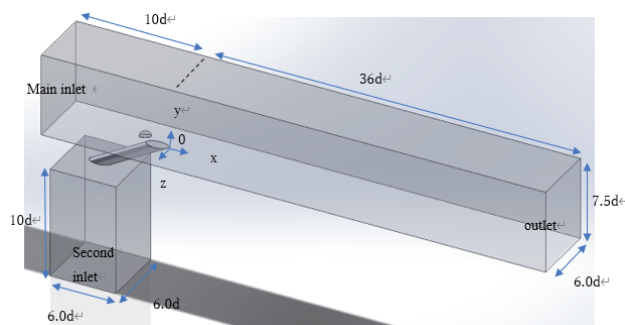


図3 解析ドメイン

#### 4.2.2. 計算格子

格子生成ソフトにはANSYS®ICEM™ver17.1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生成が容易であることが挙げられる。主流部ダクトの格子サイズは、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 $1\text{mm}$ 、 $2.5 \leq y/d \leq 3.5$ の範囲で $3\text{mm}$ 、 $3.5 \leq y/d \leq 7.5$ の範囲で $5\text{mm}$ 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： $0.0045\text{mm}$ 、拡大率1.2、生成層数21（プリズム幅： $\sim 1\text{mm}$ ）とした。

冷却孔の基本的サイズは $0.5\text{mm}$ とし、二次空気部ダクトの基本的サイズは、 $-3.0 \leq y/d \leq -3.2$ の範囲で $1\text{mm}$ 、 $-3.2 \leq y/d \leq -13d$ の範囲で $3\text{mm}$ 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： $0.0045\text{mm}$ 、拡大率1.2、生成層数21と主流ダクトと同様である。

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2500万セルである。図4に全体と図5に片側デバイスとホールの計算格子を示す。

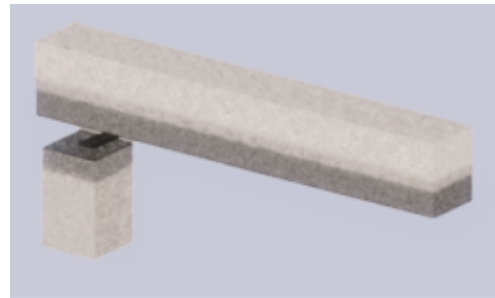


図4 全体の計算格子

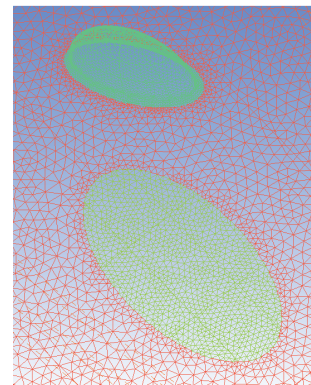


図5 片側デバイスとホールの計算格子

### 4.3. 解析条件

本研究で適用した解析条件を表2に示す。代表長さに冷却孔直径 $d$ 、代表速度に入口速度を用いたレイノルズ数 $Re=6,000$ とした。式(1)で定義される吹き出し比BRは1.0、式(2)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。

$$BR = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty \quad (1)$$

ここで、主流流速 $U_\infty$ 、主流密度 $\rho_\infty$ 、二次空気流速 $U_2$ 、二次空気密度 $\rho_2$ である。

$$DR = \rho_2 / \rho_\infty \quad (2)$$

ここで、主流密度 $\rho_\infty$ 、二次空気密度 $\rho_2$ である。

二次空気部ダクト、主流部ダクト壁面には対称境界、周期境界、壁面すべりなし条件を適宜与えている。

表2 解析条件

格子生成ソフト	ICEM17.1
総格子要素数	約2500万程度
ソルバー	ANSYS CFX 17.1
支配方程式	RANS
乱流モデル	SST
レイノルズ数	Re=6,000
吹き出し比	BR=1.0, 1.5
密度比	DR=1.53
ダクト部壁面	等温壁：194.85[K]
境界層厚さ (主流入口位置)	$\delta_{99}=0.24d$
入口境界 (主流、二次空気)	流速 温度：298.15[K] 乱れ度：1%
出口境界	静圧 0[PaG]

4.4. 定義式 (フィルム冷却効率)

(3) にフィルム冷却効率の定義式を示す。平均化した領域は図6に示す。 $0 \leq x/d \leq 35$ 、 $-3 \leq z/d \leq 3$ 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y軸、スパン方向にz軸をとっている<sup>7)</sup>

$$\eta = T_{\infty} - T_w / T_{\infty} - T_2 \quad (3)$$

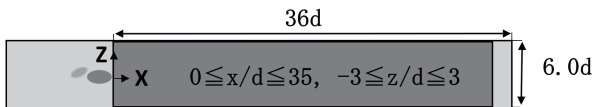


図6 フィルム冷却効率の平均領域

5. 結果と考察

5.1. フィルム冷却効率分布

フィルム冷却効率分布を図7に示す。フィルム冷却効率分布図において、4形状のOFCDについてBR=1.0とBR=1.5について計算を行っている。また、1形状は、OFCD\_Part1のFilletを0.5mmにして計算している。Rep1、Rep3、Rep5は、基本形OFCD-Part1を基にWidth、Height、Angle、Distanceを変化させている。デバイスの長さ(Length)は10mmで統一している。フィルム冷却効率分布図を比較する場合、Round Holeと各形状の分布図を比較するとそれぞれの特長がわかる。

Rep5は、主流流れ方向とスパン方向に冷却効果が表れている。同様にRep3においても同様な傾向を示し、OFCD\_Part1(BR=1.0)、Rep1(BR=1.5)、OFCD\_Part1(BR=1.0,F=0.5)、OFCD\_Part1(BR=1.5)、Rep1(BR=1.0)の順に効率が低下していることが分布図から分かる。デバイスの形状とAngle、そしてDistance 1, 2の距離によってフィルム冷却効率が変わる。また、BR=1.0とBR=1.5の差については、OFCD\_Part1の結果から必ずしもBR=1.5の効率がいいとは言えない。

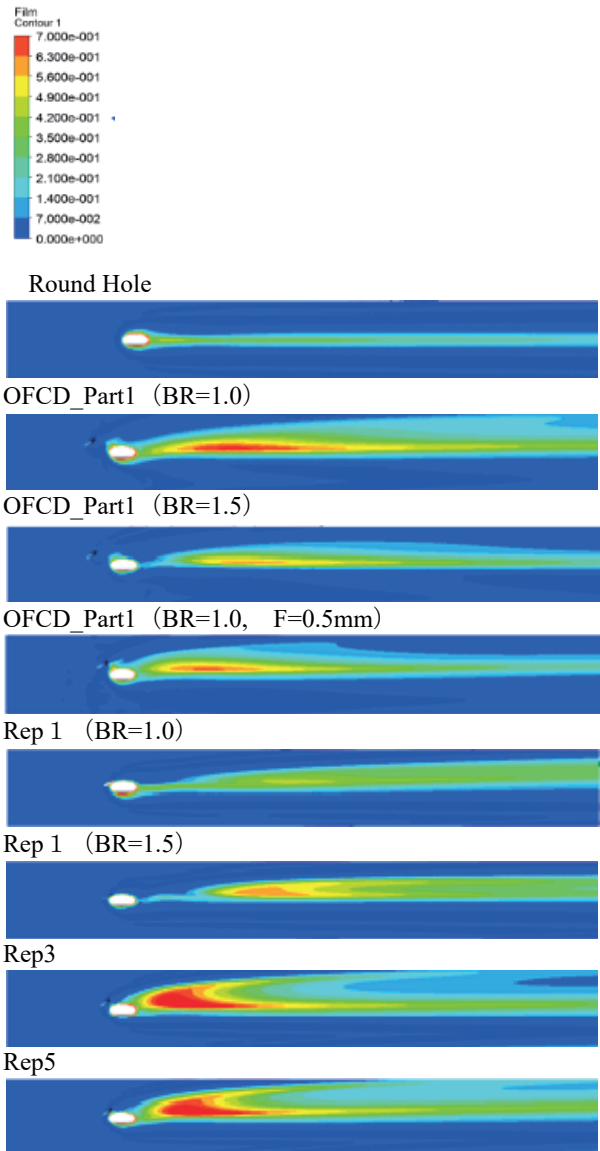


図7 フィルム冷却効率分布

5.2. 面平均フィルム冷却効率値

面平均フィルム冷却効率値のグラフを図8に示す。面平均フィルム冷却効率値のグラフは、図7のフィルム冷却効率分布図を数値化したものである。よって、5.1の結果と同様の傾向をしている。Rep5、Rep3、OFCD\_Part1(BR=1.0)、Rep1(BR=1.5)、OFCD\_Part1(BR=1.0,F=0.5)、Rep1(BR=1.0)、OFCD\_Part1(BR=1.5)の順に効率値が下がっている。

OFCD\_Part1において、F=0.5mmとBR=1.5の優位は、見られなかった。Rep1、Rep3、Rep5においては、形状の数値とDistanceの数値の小さいRep 1のフィルム冷却効率値が下がっている。形状のWidth1、2が各2mm、Heightが6mm、Distance1が5mm以上、Distance2が11mm以上の形状が面平均フィルム冷却効率値0.1以上を示す結果となった。

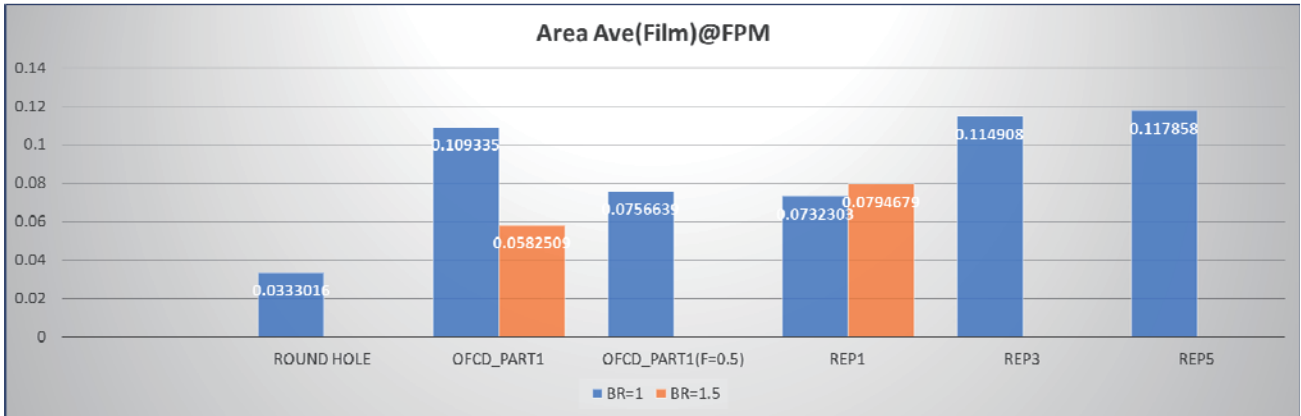


図 8 面平均フィルム冷却効率

### 5.3. 渦度

渦度を、図 9 に示す。渦度の図は、フィルム冷却性能の悪化を招く、Counter Rotating Vortex Pair (CRVP) の制御をするために、逆位相の渦を発生させる OFCD の効果を表している流れ場である。位置は、冷却孔から主流流れ方向下流に 5mm である。Round Hole の渦形状に似ている OFCD\_Part1、Rep3、Rep5 が、CRVP を制御している。

### 5.4. 損失

図10に損失の図を示す。損失の図において、5.3 渦度で効果のあったOFCDは、CRVPを縮小させて損失の低減を期待できる。測定位置は、冷却孔から主流流れ方向下流に5mmである。フィルム冷却効率の良かったものは、損失が大きい結果となった。Round Hole、OFCD\_Part1(BR=1.0, F=0.5)、Rep3、Rep5においては、計測の場面に下層と中間層と主流層の3層が表れている。フィルム冷却効果とは、高温ガスと壁面の間に冷却膜を形成して高温ガスから壁面を守る手法である<sup>8)</sup>。よって、損失のコンター図によると下層の上に見える中間層は、冷却層であると思われる。

### 6. 結言

本研究では、4形状のOFCDを用い、OFCD\_Part1においては、吹き出し比BR=1.0、1.5、Fillet=0.5mm(BR=1.0)、Rep1においては、吹き出し比BR=1.0、1.5、Rep3とRep5においては、吹き出し比BR=1.0の数値解析を行った。フィルム冷却効率分布図、面平均フィルム冷却効率値、渦度、損失の結果から以下の知見を得た。

(1) フィルム冷却効率分布図と面平均フィルム冷却効率値の比較によると、フィルム冷却効率分布図において効果のよい形状と面平均フィルム冷却効率値の良い形状は、一致していることが確認できた。フィルム冷却効率分布図によると、スパン方向に広がりのある形状が面平均フィルム冷却効率値の良いものと一致している。

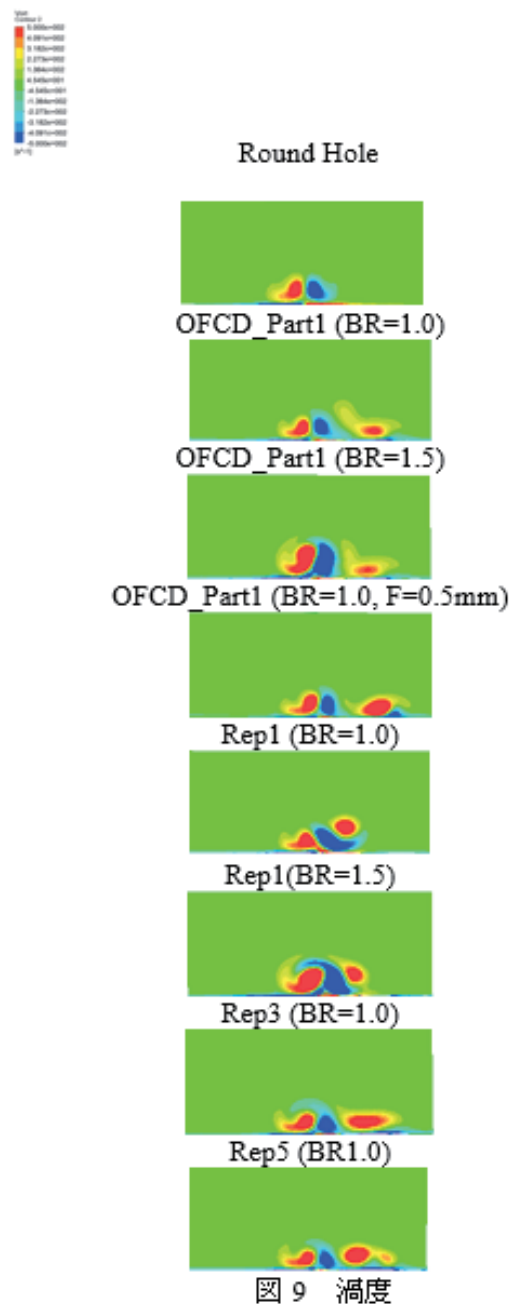


図 9 渦度

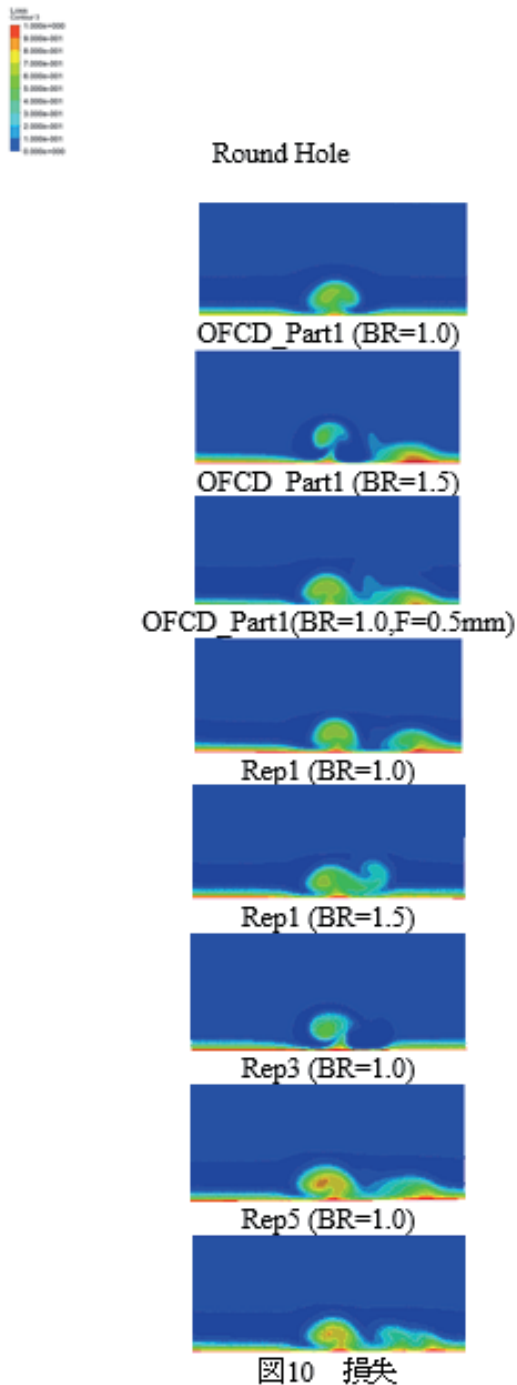


図10 損失

(2) 渦度の比較によると、Round Holeの渦に似ているOFCD\_Part1、Rep3、Rep5がCRVPを制御している。

(3) 損失の比較によると、フィルム冷却効率の良かった形状においては、損失も大きく表れているがRound Holeと同様に中間層が表れていることによって損失の低減を期待できると思われる。

### 謝辞

ご指導、ご協力いただきありがとうございました。感謝申し上げます。

### 参考文献

- (1) <https://ja.wikipedia.org/wiki/パンデミック>  
2020/3/17
- (2) [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html)  
2020/3/20
- (3) <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO58658940Q0A430C2TJ1000/>  
2020/10/23
- (4) 瀧澤隼人, 船崎健一, 谷口英夫, 加藤大雅, 2017, “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”, 修士論文, pp. 1~3.
- (5) 河村朋広, 船崎健一, 谷口英夫, 2019, “流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却性能に関する研究 - 新規デバイス形状の探索 - ”, 修士論文, P.123.
- (6) ANSYS, ANSYS Workbench AUTODYN, CFX, FLUENT and any and all ANSYS, Inc.
- (7) 齋藤涼, 船崎健一, 河村朋広, 森崎哲郎, 2020. “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”, 日本ガスタービン学会誌 2020.1, P.52
- (8) 日本ガスタービン学会, ガスタービン工学, 第3章 伝熱工学, p.123