

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420098

研究課題名(和文) ロバスト流れ制御デバイスによる革新的フィルム冷却機構に関する研究

研究課題名(英文) Studies on Advanced Film Cooling Technologies by use of Robust Flow-Control Devices

研究代表者

船崎 健一 (Funazaki, Ken-ichi)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：00219081

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ガスタービン冷却孔のより良いフィルム冷却性能を達成するために、流れ制御装置(DFCD)を最適化する試みがなされた。DFCDはフィルム効率を劇的に向上させることが以前の研究で検証されていたが、今回入口流れ角をノイズとして採用し、デバイスの形状と形状を最適化した。実験では、冷却空気としてCO<sub>2</sub>を使用し、DR = 1.5の流通条件を達成し、PSP技術によるフィルム効率を測定した。フィルムの被覆率は、流れの角度にかかわらず、DFCDの使用によって顕著に改善された。フィルム冷却の促進は渦構造の変化に起因することが判明した。最適なデバイスの性能は、風洞試験におけるPSP測定を通じて調査された。

研究成果の概要(英文)：Attempts were made to optimize double flow control devices (DFCD) for achieving better film cooling performance of gas turbine cooling holes. Although the device was formerly proven to improve film effectiveness dramatically, CFD-based Taguchi Method was made to optimize the shape and configuration of the device for the flow with the inlet flow angle adopted as noise factor. In the experiment, we employ CO<sub>2</sub> as the cooling air to achieve the flow condition of DR=1.5, which allows us to measure the film effectiveness by PSP technique. The film coverage was notably improved by use of DFCDs, regardless of the flow angle. It was found that the film cooling enhancement was caused by changes of the vortex structure. The performance of the optimal device was then checked by the comparison with no device cases. The optimal device showed overwhelming cooling performance through the PSP measurement in the wind tunnel test.

研究分野：流体工学

キーワード：Robust Optimization Gas Turbine Film Cooling CFD PSP Measurement

## 1. 研究開始当初の背景

高効率化なフィルム冷却を達成するためには、冷却孔下流に発生する**Counter Rotating Vortex Pair (CRVP)**と呼ばれる渦構造に起因する上昇運動を制御、抑制することが重要であるが、その方法として、冷却孔出口形状を変化させる方法と、冷却孔周囲の形状を変化させる方法などが挙げられる。近年のガスタービン用フィルム冷却に用いられる冷却孔は、冷却孔出口形状を変化させた**Fan-Shaped hole**が広く採用されている。この**Fan-Shaped hole**は、単純円筒形状の冷却孔と比較して高いフィルム効率を示すことが知られているが、加工コストが高く、開口部が大きいことから局所的な高温ガスの逆流が発生しやすい、などの欠点が存在する。この欠点を克服する方法として申請者が数年来取り組んでいる方法が、冷却孔上流の形状を変化させた方法（冷却孔上流に突起状流れ制御デバイスを設ける方法）である。これらの研究を通じて、この流れ制御デバイスが大幅なフィルム効率向上の可能性が明らかにされているが、

- 実際の流れが有している不確定な要因（デバイスと翼表面がなす角、主流乱れ、など）に対する依存性が強いこと（ロバスト性の欠如）
- 突起形状による付加的な空力損失発生により、ガスタービン効率を損なう危険性があること
- 突起そのものの高温ガスに対する耐久性を確保する必要があること

などの多くの課題も同時に明らかとなってきている。

## 2. 研究の目的

- 平板試験装置を用いた風洞実験、非定常流れ解析及び多目的最適化
  - 制御デバイスの複数化、複合化による高機能化
  - 流れ制御デバイスのロバスト性向上

上

- 耐久性確保に関する新技術の考案
- 多目的最適化による空力性能、冷却性能の向上
- 翼列試験装置を用いた風洞実験、非定常流れ解析
  - 曲面効果、圧力勾配等の翼面効果が流れ制御デバイスに与える影響の調査
  - 実機における流れ場の影響下での制御機能発現の確認と問題点の洗い出し
  - 技術の実用性の確認

## 3. 研究の方法

流れ制御デバイスの複数化によりフィルム冷却内渦構造の影響を抑制し、また、ディンプルなどの新たなデバイスとの複合化を行った制御デバイスを考案し、その効果を風洞試験、可視化試験、大規模 CFD (URANS/LES) で検証し複合制御機構の挙動確認を行う。

上記の成果及び耐久性・ロバスト性向上の取り組み結果を踏まえ、複合型流れ制御デバイスの多目的最適化を行い、その結果を実験的に検証する。探索デバイスをモデル冷却翼に実装し、大規模 CFD を通じて実装の効果を検証するとともに、試験用タービン翼を3次元プリンターにより精密に製作し、翼列試験装置を用いた風洞実験により空力性能、冷却性能を詳細に調査し、可視化実験を行うとともに、さらなる改善のための調査を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 最適化

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ロバストな設計を実現するなどの特徴があり、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。本最適化では冷却孔下流領域におけるフィルム冷却効率を最大まで引き上げることを目的とした

DFCD 形状の最適化を行った。

解析ソルバーに関しては、汎用流体解析ソフト ANSYS CFX 15.0(ANSYS Inc.)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、乱流モデルには SST を用いた。

DFCD の形状最適化に用いた制御因子 A ~G を図 1 に示す。今回は過去の最適化から得た知見を参考として各水準値を決定した。なお、今回の最適化に使用する直交表は L18 直交表を採用した。従って今回の解析には全 18 種の DFCD 形状を作成し、調査を行った。また、誤差因子には主流流入角  $\varepsilon$  を選定した。選定理由は流入角の変化が 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ことが予想されるためである。今回はこの誤差因子に対してロバストな性能を発揮する DFCD 形状を探索した。

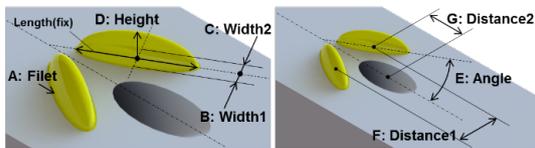


図 1 デバイス形状

(2) ターゲット BR 及び解析条件

実機においては  $BR(=\rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty) = 1.5 \sim 3.0$  の範囲で設計される冷却孔が多く存在しているが、通常この吹き出し比条件における単純円筒型冷却孔のフィルム冷却性能は著しく悪い。本調査では高吹き出し比条件で性能を発揮するデバイス開発の導入として、 $BR=1.5$  における DFCD の形状最適化を実施した。本研究では冷却孔直径  $d(=10\text{mm})$  を代表長さ、主流流速を代表速度とし  $Re=6,000$ ,  $DR(=\rho_2 / \rho_\infty) = 1.53$  で解析を実施した。

図 2 に今回使用した計算ドメインを示す。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。また、流入角条件 ( $5\text{deg}$ ,

$10\text{deg}$ )における解析では、冷却孔のとりつけをスパン方向に傾けて主流と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。

格子作成は ANSYS ICEM CFD ver.15.0 にて行った。格子は全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、各計算格子の総格子要素数は約 2,500 万セルである。計算格子は非構造格子を用いて作成しており、格子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。

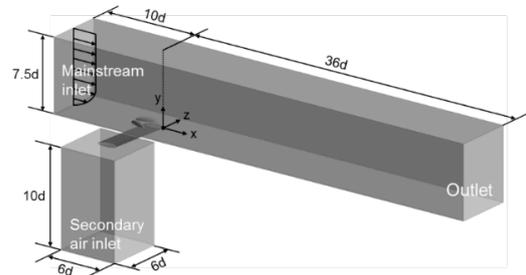


図 2 計算ドメイン

今回の調査結果 54 条件 (=形状数:18 × 誤差因子数:3) から導出した要因効果図を図 3 に示す。本解析の目的は探索範囲の中からフィルム効率に大きく影響する制御因子を発見することである。また、グラフに因子 H が存在するが、これは SN 比算出時の誤差を簡易的に評価する見かけ上の因子である。グラフからは、因子 D: Height, E: Angle, F: Distance1 の SN 比が突出して高いことを確認でき、この 3 因子が効率向上に大きく寄与していることが分かる。この傾向は過去の最適化における知見と同様である。望大特性問題におけるタグチメソッドでは、各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。今回は A1-B1-C1-D3-E3-F1-G1 の組み合わせによって作成される DFCD を最適形状 (Optimal) とした。また、タグチメソッドにおいては、18 形態分 (誤差要因含め) のサンプリングを

終了した後、統計的に最適形態の性能予測を行うことが可能であり、予測した SN 比と実際の SN 比の差が  $\pm 3\text{dB}$  以内であれば最適化に再現性があると判断できる。本調査における予測値と実際のサンプリングとの差は  $2.1\text{dB}$  であり、SN 比の差は  $\pm 3\text{dB}$  以内に収まっていることから今回の最適化に再現性があると言える。

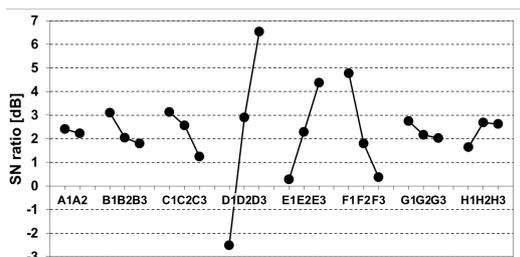


図3 要因効果図 (CFD)

図4に各流入角条件における **Optimal** 適用時の壁面フィルム効率分布を示す。 **Optimal\_0deg** をみると、DFCD の適用が二次空気のスパン方向拡散を促進し、且つ冷却孔直下流のフィルム効率を大きく向上させていることが分かる。また流入角増加条件 **Optimal\_5deg** 及び **Optimal\_10deg** をみると、主流流入角の増加に伴ってフィルム効率分布の傾向は変化しているが **Optimal** は **0deg**~**10deg** をとおして高いフィルム効率向上効果を維持する結果となった。

また、図5は **Case01** 及び **Optimal** の面平均フィルム効率を示している。 **Case01** は今回の最適形状導出時に用いたサンプルデータの一つである。 **Optimal** は全条件において **Case01** を凌駕する効率値を示しており、タグチメソッドの特徴の一つであるロバスト設計の効果がこの結果に表れていると考えられる。

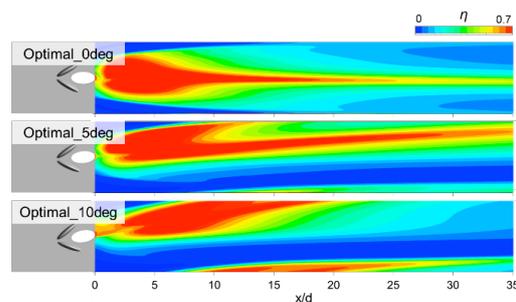


図4 最適化後のフィルム効率分布

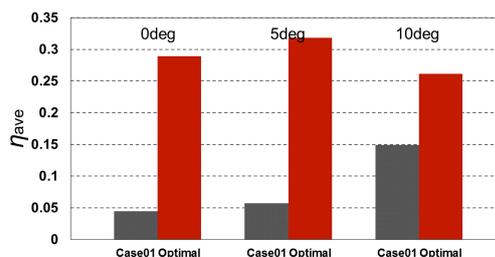
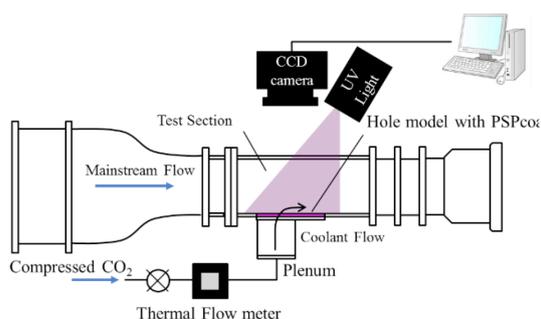


図5 面平均フィルム効率の比較

## (2) 実験的検証

図6に検証用に使用した風洞と計測方法である PSP 計測での計測状況を示す。図7には、実験ベースで行った最適化における要因効果図を、CFD ベースのものとの対比で示す。この結果、感度の違いは現れているものの、実験によっても最適な形状因子が探索されており、最適化デバイスの妥当性が検証された。図8には、探索された最適化デバイスによるフィルム効率分布の変化を示す。デバイスの導入により著しい効率向上が得られており、本研究の所定の目標がほぼ達成されたことが確認された。



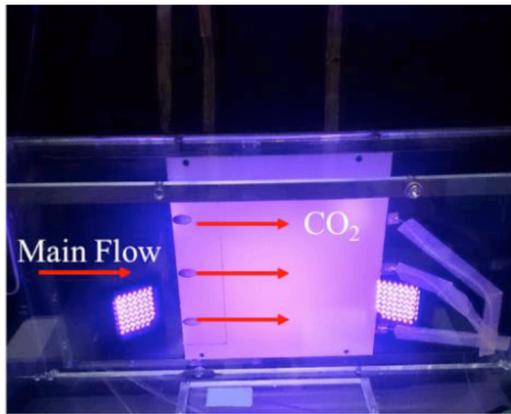


図6 実験用風洞とPSP計測

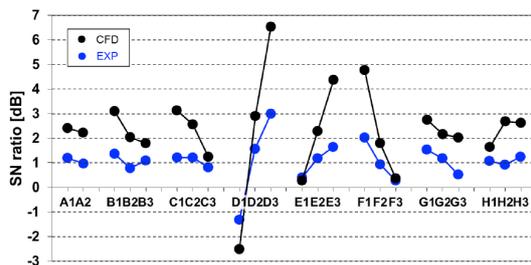


図7 実験による要因効果図

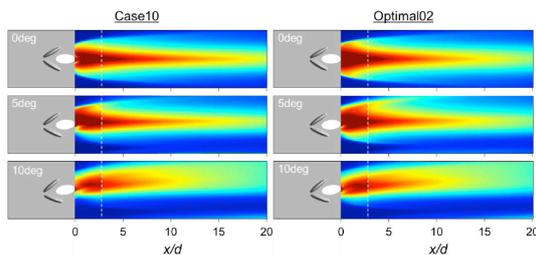


図8 最適化デバイスのフィルム効率分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計6件)

- ① 瀧澤隼人、船崎健一、河村朋広、田川久人、中野晋、ガスタービン用フィルム冷却における流れ制御デバイスの開発 (高噴き出し比条件下における最適形状検討)、52 期日本機械学会東北支部総会講演会、2017 年 3 月 14 日、東北大学工学部 (仙台市)
- ② 佐々木宏和、船崎健一、瀧澤隼人、田川久人、中野晋、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 (高密度条件下における PSP 計測)、第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会、2016 年 10 月 25 日、ホテルリッチ&ガーデン酒田 (山形県酒田市)

- ③ Hayata Takkizawa、Ken-ichi Funazaki、Hirokazu Sasaki、Tomohiro Kawamura、Hisato Tagawa and Susumu Nakano、Improvement of Flat-Plate Film Cooling Performance by Double Flow Control Devices under High Density Ratio、ACGT2016、2016 年 11 月 14 日、Bombay、India
- ④ 船崎健一、藤田駿、菊池史哉、ガスタービン用フィルム冷却における冷却孔複合角に関する研究、日本機械学会第 93 期流体力学部門講演会、2015 年 11 月 07 日、東京理科大 (東京都葛飾区)
- ⑤ 中田諒大、船崎健一、川端浩和、瀧澤隼人、田川久人、堀内康広、流れ制御デバイスを付加した太列型フィルム冷却に関する研究、日本機械学会東北支部総会講演会、2015 年 3 月 13 日、東北大学工学部 (仙台市)
- ⑥ 船崎健一、瀧澤隼人、中田諒大、田川久人、堀内康広、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 (吹き出し比の効果)、日本機械学会東北学生会卒業研究発表会、2015 年 3 月 10 日、八戸高専 (八戸市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)  
なし

○取得状況 (計0件)  
なし

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

船崎健一 (FUNAZAKI Ken-ichi)  
岩手大学・理工学部・教授  
研究者番号：00219081