

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06138

研究課題名（和文）実機環境下におけるフィルム冷却制御デバイスの高効率化及び高信頼性化に関する研究

研究課題名（英文）Studies on Development of High-Efficient and Reliable Cooling Flow Control Devices under a Realistic Gas Turbine Environment

研究代表者

船崎 健一（Funazaki, Kenichi）

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） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：ガスタービン用タービン翼開発には高い遮熱効果のフィルム冷却技術の開発が強く求められている。研究代表者らは以前に効果的な制御デバイスを発案し、フィルム冷却性能を劣化させる渦構造を抑制することに成功した。しかし、デバイスによる空力損失、デバイス自体への熱負荷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。そこで本研究では、V字形のデバイスを提案するとともに、その最適化に取り組んだ。最適化評価指標に面平均フィルム冷却効率、全圧損失係数、デバイス表面平均フィルム冷却効率を選定し、最適化手法には実験で検証されたCFDによるタグチメソッドを用いた。結果として、有望な形態のデバイス探索に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガスタービンは、発電用や航空機用ジェットエンジン等に用いられる内燃エンジンの一つであり、現在の文明維持には欠くことの出来ない原動機である。航空機需要は長期的には拡大傾向にあり、燃料消費量の削減はエアラインにとり、また地球環境にとり重要課題である。また、東日本大震災津波の影響による原子力発電所の稼働停止にともなう電力不足分を補うため、また、再生可能エネルギーの大量系統投入による調整機能としても、ガスタービンベースの火力発電の需要が増大している。本研究はそのようなガスタービンの高温化、高効率化等に貢献するものであり、今後のCO2削減にも寄与する研究である。

研究成果の概要（英文）：The development of film cooling technology with high heat shield effect against hot gas is strongly required for the development of turbine blades for gas turbines. The researcher in charge has previously come up with a new idea of an effective flow control device and succeeded in suppressing the vortex structure that deteriorates film cooling performance. However, reducing the aerodynamic loss due to the device and the heat load on the device itself has been recognized as a problem in actual application. Therefore, in this research, we proposed a V-shaped device and worked on its optimization. We selected surface average film cooling efficiency, total pressure loss coefficient, and device surface average film cooling efficiency as optimization evaluation indices, and used the Taguchi method based on CFD that was verified by experiments as the optimization method. As a result, we succeeded in searching for promising flow control devices.

研究分野：流体工学、伝熱工学、推進工学

キーワード：ガスタービン フィルム冷却 最適化 CFD 感圧塗料法

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策は世界の喫緊の課題となっており、エネルギー関連機器、特に発電系、輸送系にも燃料消費量削減が強く求められている。そこで、CO₂排出割合が低く硫化酸化物の排出もほとんどなくかつ入手性も近年格段に向上した天然ガスを使用するガスタービンエンジンへの期待が高まっている。ガスタービンエンジンでは、高出力化、高効率化を目指し過去数十年にわたりタービン入口温度は増加しており、航空用としては1700℃級に、産業用として1600℃級に達している。今後も更なる温度上昇が見込まれているが、その実現のためガスタービンタービン部においては、翼部のみならず翼端部（エンドウォール部、シュラウド部）の全面を少ない冷却空気（圧縮機からの空気）で均一かつ効果的に冷却するとともに、空力性能の劣化を最小限に抑える革新的な冷却手法の開発が強く求められている。

2. 研究の目的

地球温暖化対策として、CO₂排出の少ない天然ガスを燃料とするガスタービンエンジンへの期待が高まっている。ガスタービンエンジンは高出力、高効率を目的としてタービン入口温度が今後も上昇が見込まれているが、その実現のためは効果的な冷却手法が必要である。研究申請者のグループでは突起型制御デバイスにより冷却性能の大幅な向上に成功しているが、実際の流れ場は強い3次元性の存在に加え、パージ空気など現象をより複雑化させる現象が混在し、上述のデバイスが所期の性能を十分に発揮しない可能性が高い。本研究ではこれまでの研究環境面の蓄積を活かしながら、実際のガスタービンエンジン内流れを模擬可能な大型環状セクター風洞装置を開発し、実用環境下におけるフィルム冷却制御デバイスの高効率化及び高信頼性に資する調査を通じて、ガスタービンエンジン関連の空力・伝熱面の学術的及び工業的に貢献可能な知見を獲得する。

3. 研究の方法

【最適化】

- ① 最適化に関しては、CFDを用いたデバイスのロバスト最適化、多目的最適化の準備を進める。最適化の妥当性は、適宜実験によって検証し、信頼性のある探索を実施する。

【実験的手法】

- ① 装置の改良、高精度化
大型環状セクター風洞試験装置を製作するとともに、平板試験装置も併用して、計測に不可欠なPSP/TSP光学計測手法の高精度化などに取り組む。さらに、高密度比化を実現するための二次空気供給系の設置、トラバース装置の設置などを進める。
- ② 実験では標準的な条件及び実際の流れ場で発生しうる複数の流れ場条件での空気・伝熱面での調査を行うとともに、最適化で探索された複数の種類のデバイスを装着した供試体を用いて行い、最適化の妥当性を実験的に検証する。

【数値解法】

数値解析では、RANS解析を展開するが、LES解析にも備える。

4. 研究成果

① V字デバイスの開発と最適化

本研究では最適化手法にタグチメソッドを用いた。

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. 1に示す。制御因子の水準値については、フィルム冷却効率を評価指標とした最適形状(2)（以降、Baseとする）を基準値として、V字デバイスの特徴に基づいてTable 1の通り選定した。また、本最適化

の直交表はL16直交表を採用し、全16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。また、誤差因子には主流流入角 ε ($=0, 5, 10 \text{ deg.}$) を選定した。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またはNHFR ($0 \leq x/d \leq 20, -3 \leq z/d \leq 3$), $x/d=20$ における全圧損失係数, デバイス表面平均フィルム冷却効率またはNHFRを選定した。式(1)にフィルム冷却効率, 式(2)にNHFR, 式(3)に全圧損失係数 (参照全圧: 式(4)), 式(5), (6)に評価式を示す。

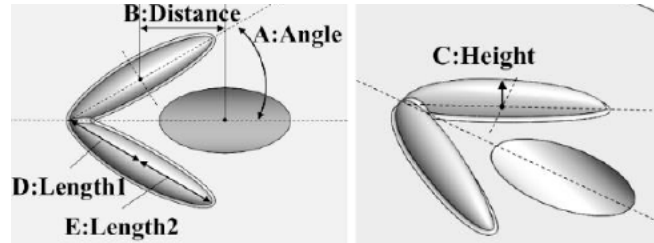


Fig. 1 Control factor

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

$$N = 1 - \frac{h_{fc}}{h_{nfc}} (1 - \eta\theta) \dots (2)$$

$$\zeta = \frac{P_{t,ref} - P_t}{1/2 \cdot \rho_{\infty} \cdot U_{\infty}^2} \dots (3)$$

$$P_{t,ref} = \frac{M_2}{M_2 + M_{\infty}} \cdot P_{t,2} + \frac{M_{\infty}}{M_2 + M_{\infty}} \cdot P_{t,\infty} \dots (4)$$

$$Y1 = a \cdot \eta_{ave} + b \cdot 1/2.7 \cdot 1/\zeta + c \cdot \eta_{vd} \dots (5)$$

$$Y2 = a \cdot N_{ave} + b \cdot 3/5 \cdot 1/\zeta + c \cdot 1/10 \cdot N_{vd} \dots (6)$$

本最適化には式(5)または式(6)を最大化する望大特性を適用した。Table 2の重み係数(a, b, c)を与え、V字デバイスの最適形状導出を行なった。また、全圧損失係数をフィルム冷却効率値またはNHFRの振れ幅と範囲を同じにするため、1/2.7, 3/5, 1/10をそれぞれかけた。さらに、全圧損失係数は低減させたいため式(4)では逆数を取っている。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。また、Yは式(5)または式(6), 添え字 i は条件名 (Case1~Case16), n は誤差要因数であり、本研究では n=3 である。

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 Weighting factor

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

解析ソルバーには、汎用流体解析ソフトANSYS® CFX® ver17.1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モデルを適用した。Fig. 2には使用した解析ドメイン及び境界条件を示す。冷却孔形状はRound hole、冷却孔傾斜角は $\alpha=30[\text{deg.}] \leq 10$ である。また、流入角(5, 10deg.) は、冷却孔とV字デバイスの設置幾何にスパン方向の角度を与え、二次空気の吹き出し方向を傾けることで再現した。

要因効果図より、式(5)での最適形状はOptF1~9、式(6)での最適形状はOptN1の形状が算出された。Fig. 3に冷却孔下流面平均フィルム冷却効率値を示す(その他詳細は省略)。定量的にDFCDより冷却孔下流面及びデバイス表面平均フィルム冷却効率とNHFRが高く、全圧損失係数が低いものがV字デバイスで有望な形状である。

次にBaseと比較する。冷却孔下流面平均フィルム冷却効率及びNHFRにおいて、流入角0[deg.]ではOpt1, 2, 4, 5, 9がBaseより高い平均値を示したが、流入角5, 10[deg.]では流入角5[deg.]のOptF2以外の全OptがBaseより平均値の低い結果を示した。流入角0[deg.]でBaseより冷却性能がよかったOpt1, 2, 4, 5, 9は、全圧損失係数の高い結果を示した。デバイス表面平均フィルム冷却効率ではOpt1, 2, 4, 5, 9がBaseより高い平均値を示した。

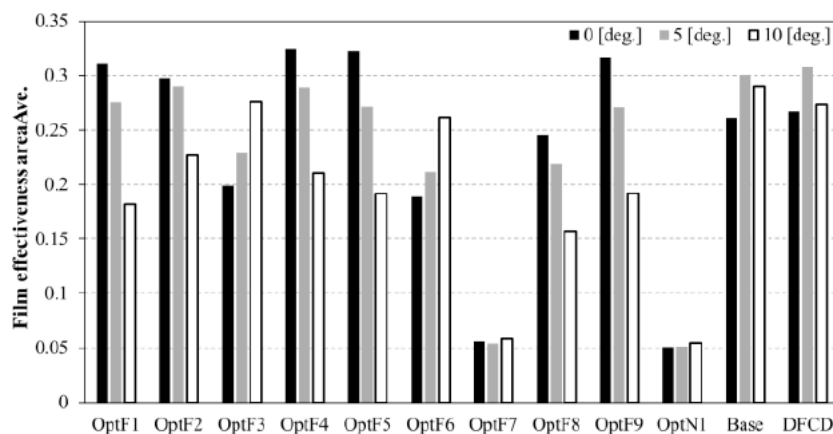


Fig. 2 Area-averaged film cooling effectiveness

② 大型環境セクター風洞によるエンドウォール部のフィルム冷却に関する研究

Fig. 3のような大型環境セクター風洞を用い、感温塗料法(TSP法)によりエンドウォール部のフィルム冷却特性を、複数のフィルム冷却機構を導入して計測した(冷却機構はエンドウォールの上流に位置する前縁流れと上流冷却孔)。その際、TSPの発光に及ぼす要因も調査した。その結果、TSPの発光には塗布厚と励起に用いるLEDライトの強さが大きく影響し、時間経過による発光の仕方は励起光の照射直後が高くなることが分かった。

環状翼列を用いたフィルム冷却効率については、どの冷却機構においても二次空気の流量に比例してエンドウォールの冷却が向上した。また単体の冷却孔のみの場合よりも、複数の冷却機構を組み合わせた方が相乗効果を持ち良い結果をもたらした。

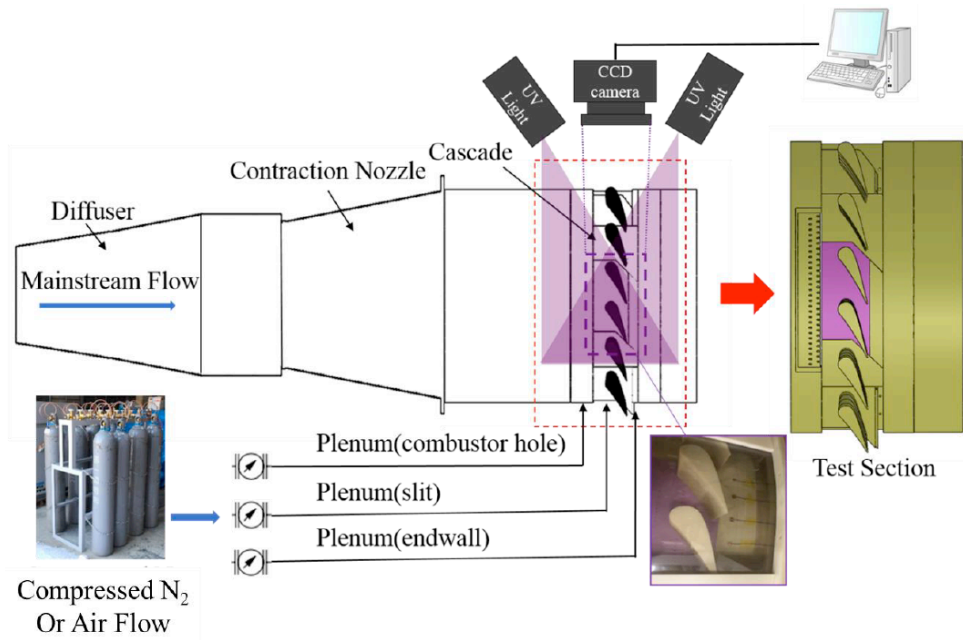


Fig.3 Large-scale sector test section

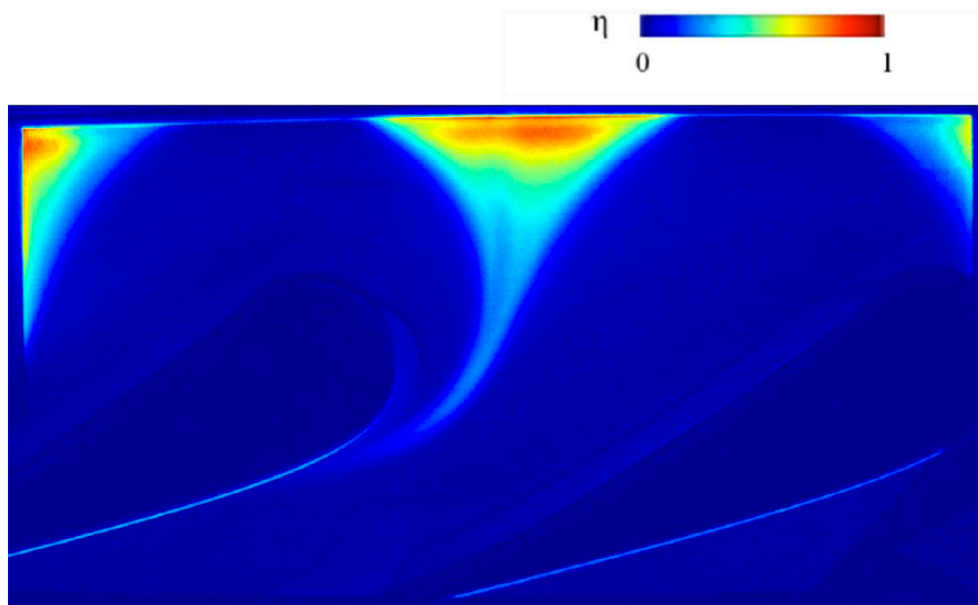


Fig.4 Contour of film cooling effectiveness from upstream slot (MFR=0.8%)

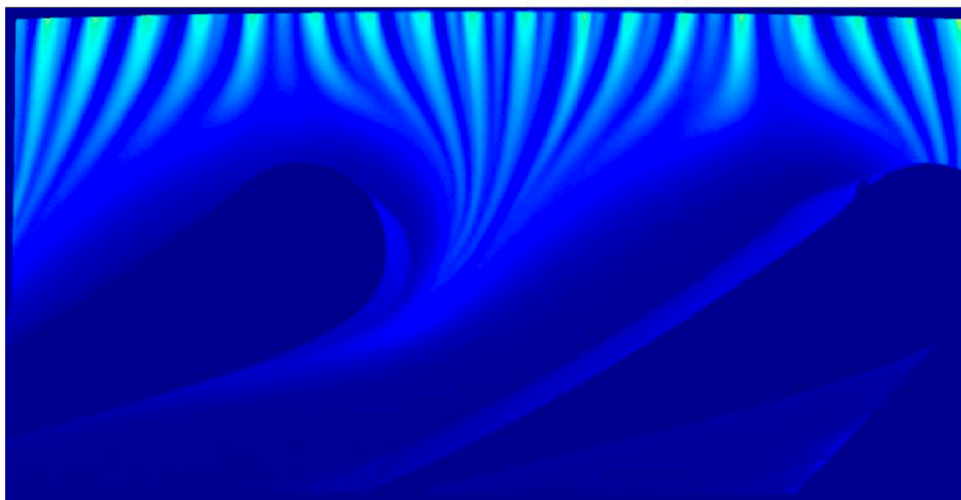


Fig.5 Contour of film cooling effectiveness from upstream cooling holes (MFR=0.7%)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 齋藤涼、船崎健一、河村朋広、森本哲郎	4. 巻 48
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 50,57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 齋藤 涼、船崎健一、河村朋広、森崎哲郎	4. 巻 48
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 50,57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 河村朋広、船崎健一、瀧澤隼人、田川久人、森崎哲郎	4. 巻 46
2. 論文標題 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—	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 306,313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤涼、船崎健一、河村朋広、森崎哲郎
2. 発表標題 フィルム冷却の高効率化に関するV字デバイス形状の最適化
3. 学会等名 第46回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河村朋広、船崎健一、瀧澤隼人、田川久人、森崎哲郎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第45回日本機械学会定期講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三浦誠貴、船崎健一、橋本光一郎、田川久人、森崎哲郎
2. 発表標題 環状翼列を用いた高圧タービン部エドウォールにおけるフィルム冷却に関する研究
3. 学会等名 第48回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 船崎健一、齋藤涼、河村朋広、田川久人、森崎哲郎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第48回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----