

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560229

研究課題名(和文) 混合抑制に旋回流れを利用した革新的フィルム冷却技術に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study on the innovative film cooling technologies to suppress the mixing process with adding swirling motion to the coolant

研究代表者

武石 賢一郎 (Takeishi, Kenichiro)

大阪大学・基礎工学研究科・招へい教授

研究者番号：70379113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：ガスタービン(GT)は複合サイクル発電の主機として用いられ、熱効率を向上させるために高温化が図られている。最新のGTのタービン入口温度は1600℃、熱効率54%(HHV基準)に達している。空冷タービン動静翼がこれら高温GTの成否を握るが、冷却技術の中でもフィルム冷却技術が最も重要である。本研究ではフィルム冷却孔形状として、従来の円孔、シェイプト孔を用いてフィルム冷却空気に旋回を与えることによってフィルム冷却効率を大幅(約2倍)に向上させる手法を構築した。またその向上の原因を定量的に測定できる実験手法を開発するとともにLESを含む非定常の流動現象の解析を行い解析手法の精度検証を行った。

研究成果の概要(英文)：This study has been conducted to investigate a new film cooling method that utilizes swirling coolant flow through circular and shaped film cooling holes. The mixing phenomena with a film cooling air and a mainstream was measured by a instantaneous and simultaneous LIF and PIV methods, and the film cooling effectiveness on the wall was measured by PSP. It appeared from the results that, in the case of a circular film-cooling hole, the penetration of the coolant jet into the mainstream was suppressed by the strong swirling motion of the coolant and attained 100% higher film cooling effectiveness. As a result, the film cooling effectiveness on the wall maintained a higher value behind the cooling hole over a long range. Additionally, the kidney vortex structure disappeared. For the shaped film cooling hole, the coolant jet spreads wider in the span-wise direction. Thus, the pitch-averaged film cooling effectiveness downstream was 50% higher than that in the non-swirling case.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 熱工学

キーワード：物質伝達 熱伝達 フィルム冷却 旋回流 感圧塗料 レーザ誘起蛍光法 PIV ガスタービン

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境問題に関係して温暖化ガスの削減が急務である。自然エネルギーが究極の解決策であるが現時点での総エネルギー消費量に占める割合は原子力を含めて18%程度であり、当分化石燃料に頼らざるを得ないのが現状である。化石燃料を高効率でエネルギーに変換することはエネルギー消費の観点からも、また温暖化ガス排出抑制の観点からも望まれることである。これを達成する方法の中でエネルギー変換機器の高温化が最も有効な手法である。中でも航空エンジン、複合発電に使用されるガスタービンのタービン入り口温度は1500°Cが実用化され、現在1700°C級が研究され、さらに将来に向けた2000°C級の研究の必要性が高まっている。この高温化を達成できるキー技術にフィルム冷却技術がある。最小空気量をもって高温部材を最適に保護する技術の確立が必要で、この為にはより高性能なフィルム冷却技術を開発しそのメカニズムを解明する基礎研究を行う必要がある。

2. 研究の目的

フィルム冷却空気に旋回を付与すると、付与しない従来のフィルム冷却効率に比べてその効率を100%以上改善できることを発見した。円孔形状、シェイプトフィルム孔に旋回流を適用すると主流への貫通および主流を巻き込む腎臓形渦の形成が抑制される。本研究では、低速風洞を用いて、熱線風速計による空間トラバース、さらにはPIV、アセトンLIFによる詳細な、フィルム空気と主流の混合状態を測定し、併せてLESによる解析を行い混合のメカニズムを解明することによって、旋回付与による高性能フィルム冷却手法を構築する。

3. 研究の方法

既に大阪大学に設置されている低速伝熱風洞、機器(PIV: Particle Image Velocimetry、およびアセトンLIF: Laser Induced Fluorescence)を利用して、旋回を与えたフィルム冷却空気と主流の混合場の詳細な測定を行い、LES(Large Eddy Simulation)との比較検討によりそのメカニズムを実験的・解析的に解明する。パラメータ依存性が強いいため多くの研究がなされているが未だ未解明のフィルム冷却現象を、混合現象の立場から解明する。旋回を付与したフィルム空気と主流との混合の抑制メカニズムを明らかにすることによって、将来の更なる高温化に対処した高性能フィルム冷却に応用可能な基礎研究を実施するものである。

4. 研究成果

(1) フィルム冷却空気の流れに旋回を付与する構造として、図1に示す衝突面から角度 α 傾斜して配置した2個のインピンジメントノズルを用いた。流量コントロールを兼ね

たノズルから流出した冷却空気は、その旋回を保持した状態で、フィルム冷却孔から主流に吹き出される。壁面のフィルム冷却効率をPSP (Pressure Sensitive Paint) で測定した。

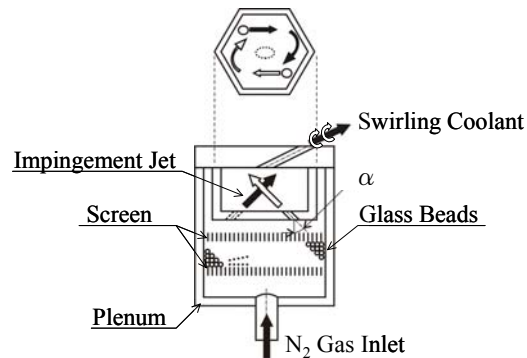


図1 スワールを持つフィルム冷却構造

円孔フィルム冷却孔から吹き出した状態で、PSPで測定したフィルム冷却効率を図2に、スパン方向に平均化したフィルム冷却効率を図3に示す。剥離したフィルム冷却空気は、旋回の無い状態から旋回強さを増すと一端再附着が弱くなり、さらに旋回を増すと旋回が強くなるほどフィルム冷却効率が高くなることが明らかになった。実験を実施した $\alpha=30^\circ$ の場合で平均フィルム冷却効率は、旋回の無い場合に比較して100%効率が改善されることが明らかになった。

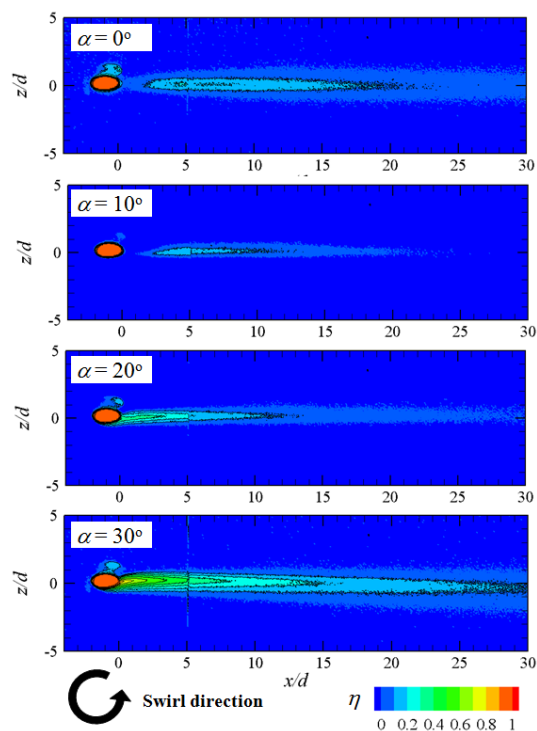


図2 円孔フィルムで旋回を有した場合のフィルム冷却効率の分布

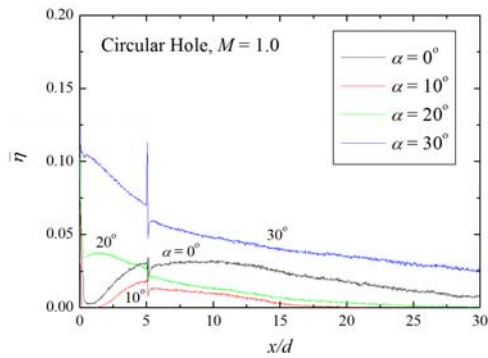


図3 円孔の平均フィルム冷却効率

シェイプトフィルム冷却孔の場合の PSP によるフィルム冷却効率およびスパン方向平均フィルム冷却効率の測定結果をそれぞれ図4、図5に示す。

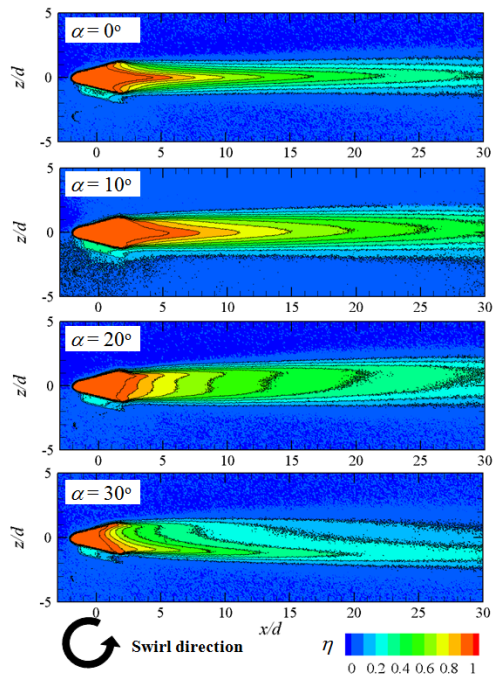


図4 シェイプトフィルムで旋回を有した場合のフィルム冷却効率の分布

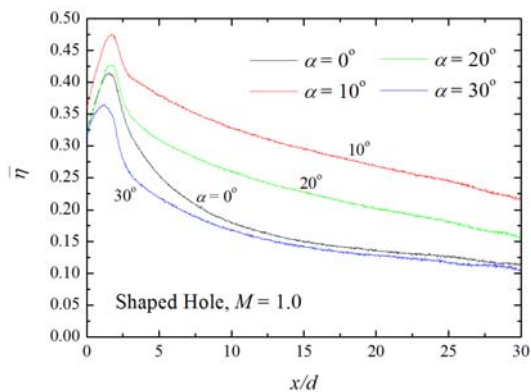


図5 シェイプト孔の平均フィルム冷却効率

シェイプトフィルム孔の場合、 $\alpha=10^\circ$ でフィルム冷却効率が最大となり、旋回のない場合に比較して 50%効率が向上する。しかし、さらに旋回を強くすると主流の巻き込みを生じてフィルム冷却効率は低下する。

(2) フィルム冷却空気と主流の混合状況を、PIV と図6に示すアセトン LIF を適用して、フィルム冷却の混合場の濃度、速度場の測定を行った。二次元瞬時値ではあるが吹き出し位置より後流における中央断面の空間濃度分布および速度分布の詳細な定量データが把握された。数百枚の瞬時値を平均化することによって平均量を求めた。

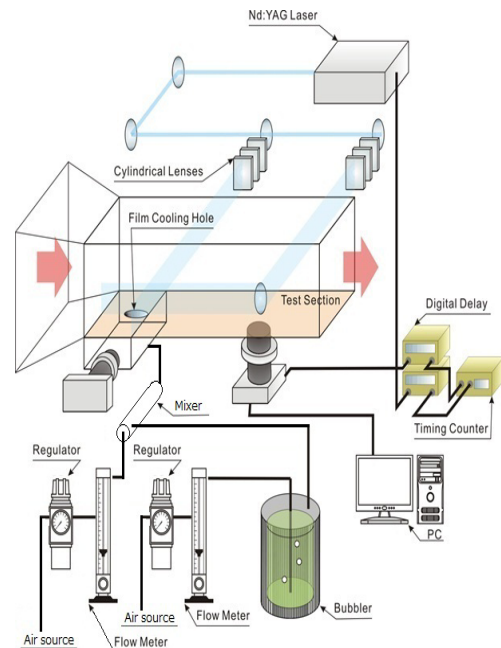


図6 アセトン LIF 測定システム

円孔フィルム空気に強い旋回をかけた場合の LIF 測定結果を図7に示す。強い旋回により冷却空気が壁面に衝突噴流的に固着する。

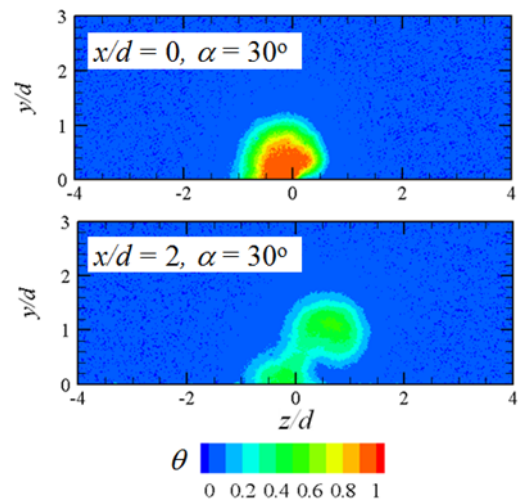


図7 強い旋回を受ける円孔フィルム

シェイプトフィルム孔の場合 $\alpha = 10^\circ$ で平均フィルム冷却効率が最高値を示した。 $\alpha = 10^\circ$ におけるシェイプトフィルム孔の LIF 測定結果を図 8 に示す。フィルム冷却空気がスパン方向に広がり高い効率を示すことが明らかになった。

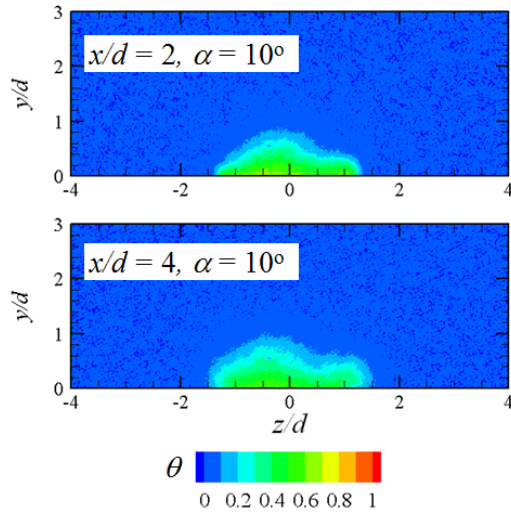


図 8 旋回を受けるシェイプトフィルム

(3) 実験と同じ形状および条件での非定常の混合現象を LES コードで解析を行った。LES 解析値と PSP 実験値との比較を図 9 に示すように両者はよく一致した。円孔から噴き出した旋回を持つフィルム冷却空気の片側が、壁面に衝突し壁面上に広がっていく状態が明らかになり、旋回を持つフィルム冷却のフィルム冷却効率を改善するメカニズムが解明された。

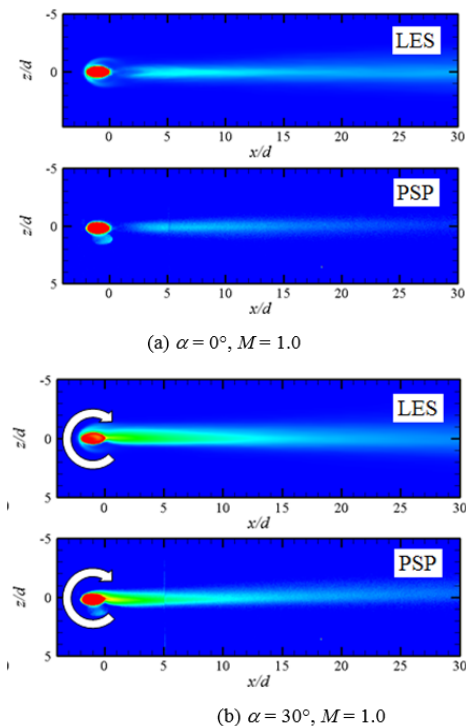


図 9 LES 解析値と実験値の比較

(4) フィルム冷却空気に旋回を付与することによって、平均フィルム冷却効率を円孔フィルム孔の場合 100%、シェイプトフィルム孔の場合 50%改善することができる。フィルム冷却を高効率化する手法として、旋回を付与する方法は非常に有効があり、タービン冷却翼内部を冷却時に発生する種々の渦と組み合わせることで最適化することによって現状より高効率なフィルム冷却手法が考えられ、将来の 1700°C 級高温ガスタービンの冷却翼に採用する有望な冷却手法が構築された。

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 1 件)

- ① Takeishi, K., Komiyama, M., Oda, Y., Egawa, Y. and Kitamura, T., “Aerothermal Investigations on Mixing Flow Field of Film Cooling with Swirling Coolant Flow,” *Trans. of ASME J. of Turbomachinery*, 査読有, 136, 051001, 2014, pp. 1-9.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 近藤慎平, 武石賢一郎, 永川悠太, 北村剛, “旋回流を伴うシェイプトフィルム冷却に関する研究,” 第 47 回日本伝熱シンポジウム, 2010, pp.113-114.
- ② Takeishi, K., Oda, Y., Egawa, Y., and Kitamura T., “Film Cooling with Swirling Coolant Flow,” *Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XI*, Tallinn, Estonia, 2010, pp.189-200.
- ② 清水大, 武石賢一郎, 小田豊, 永川悠太, “冷却空気に旋回を付加したフィルム冷却の数値シミュレーション,” 日本流体力学会年会 2010, 272, 2010.
- ③ Shimizu, D., Takeishi, K., Oda, Y., and Egawa, Y., “Numerical Simulation of Film Cooling with Swirling Coolant Air,” *21th International Symposium on Transport Phenomena*, Kaohsiung, Taiwan, Paper No. 152, 2010.
- ④ 長尾 哲史, 武石 賢一郎, 小宮山 正治, 梶内 丈史, “フィルム冷却流れの PIV・LIF 同時計測によるメカニズム解明,” 第 39 回可視化情報シンポジウム, 2011, pp.335-336.
- ⑤ 武石 賢一郎, 小田 豊, 永川 悠太, “翼内部の交差噴流冷却により生成する旋回を伴うフィルム冷却,” 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, 2011, pp.29-30.
- ⑥ Oda, Y., Takeishi, K., Shimizu, D., and Egawa, Y., “Large Eddy Simulation of Film Cooling with Swirling Coolant Flow,” *8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Honolulu, USA, AJTEC2011-44536, 2011,.

- ⑦ Takeishi, K., Komiyama, M., Oda, Y., Egawa, Y., and Kitamura, T., “Aerothermal Investigations on Mixing Flow Field of Film Cooling with Swirling Coolant Flow,” *ASME Turbo Expo 2011*, Vancouver, Canada, GT2011-46838, 2011.
- ⑧ Takeishi, K., Oda, Y., Egawa, Y., and Hada, S., “Film Cooling with Swirling Coolant Flow Controlled by Impingement Cooling in a Closed Cavity,” *International Conference on Power Engineering-2011 (ICOPE-11)*, POWER2011-55390, 2011, Denver, USA.
- ⑨ 武石賢一郎, 小田豊, 近藤慎平, “旋回を伴うフィルム冷却のタービン翼端壁部冷却への適用について,” 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012, 2012, pp.161-162.
- ⑩ Kondo, S., Takeishi, K., Oda, Y., and Schappals, M., “An Experimental Study on a Film Cooling with Swirling Coolant Flow on the Endwall of a High Loaded First Nozzle,” *The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Incheon, Korea, 2012.
- ⑪ Takeishi, K., “Progress of the film cooling for ultra-high temperature gas turbines,” *5th International Symposium on Fluid Machinery and Fluids Engineering*, Jeju, Korea. Keynote Speech, 2012.
- ⑫ Oda, Y., Takeishi, K., And Oshio, T., “Large Eddy Simulation of Film Cooling with Swirling Coolant Air,” *23rd International Symposium on Transport Phenomena*, Auckland, New Zealand, 2012.
- ⑬ Takeishi, K., “A Review of Turbine Film Cooling,” Keynote Speech, *15th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, ISROMAC-15, Honolulu, USA, 2014.
- ⑭ 小田豊, 武石賢一郎, 大塩哲哉, “旋回を付加したフィルム冷却に関するLES解析,” 第51回日本伝熱シンポジウム, 2014,

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武石 賢一郎 (TAKEISHI, Kenichiro)
 大阪大学・大学院基礎工学研究科・招へい教授
 研究者番号：70379113

(2) 研究分担者

小宮山 正治 (KOMIYAMA, Masaharu)
 大阪大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：40178372

(3) 連携研究者

小田 豊 (ODA, Yutaka)
 大阪大学・大学院工学研究科・講師
 研究者番号：50403150