

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 17 日現在

機関番号：36102  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26420145  
研究課題名(和文) 2000 級ガスタービン用先進的フィルム冷却の流動伝熱場の基礎データベースの構築

研究課題名(英文) Basic database construction of advanced film cooling mixing flow field for 2000C class gas turbines

研究代表者  
武石 賢一郎 (Takeishi, Kenichiro)  
徳島文理大学・理工学部・教授

研究者番号：70379113  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：低速伝熱風洞を用いて、風洞の底辺に2種(円孔、シェイプト孔)のフィルム冷却模型を装着して実験を実施した。フィルム冷却空気と主流の定常・非定常の3次元混合場の状況および壁面におけるフィルム冷却効率に関する定量的測定を実施した。混合場の3次元的速度分布をLIF、PIV瞬時・同時計測を行った。また同時刻の時間平均されたフィルム冷却効率をPSPを用いて測定した。さらに申請者等が開発したLESに基づく解析を実施し測定データとの比較により解析精度の向上を図った。伝熱風洞で測定されたデータは、フィルム冷却孔形状、主流の条件と共に、数値解析の検証用データベースとして活用を図る目的で公開データとして整備した。

研究成果の概要(英文)：The experiments were conducted using two types (circular hole and shaped film cooling hole geometries) of scaled-up model of film cooling holes installed at the bottom surface of a low-speed wind tunnel in order to measure detailed examination of mixing flow features of film cooling air with mainstream. Instantaneous and simultaneous 3-D flow field was measured by LIF and PIV, and time-averaged film cooling effectiveness was measured by PSP. Furthermore, numerical analysis based on Large Eddy Simulation developed by one of the applicant was conducted and the accuracy of numerical analysis is improved by comparison with measured data. The 3-D mixing flow field data and film cooling effectiveness data together with film cooling hole geometries and main flow conditions measured in the wind tunnel were prepared as an open data in web site for the purpose of utilizing as a database for the verification of numerical analysis of film cooling,

研究分野：熱工学

キーワード：フィルム冷却 熱物質伝達 乱流混合 LES アセトンLIF PSP 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の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1600°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。フィルム冷却翼の製作法の進歩によって高性能なフィルム冷却孔形状が製作できる時代になろうとしている。パラメータが多いフィルム冷却孔形状を最適化するためには数値解析的に最適化するのが時代の趨勢である。そこでフィルム冷却を解析する数値解析の精度検証を行っていく必要がある。

2. 研究の目的

2000°C 級超高温ガスタービンの成否はフィルム冷却技術にかかっている。2000°C 級のフィルム冷却技術は益々局所化し、それを適用する場の多用性と、現象が複雑な壁近傍における主流との非定常混合現象であるため、フィルム冷却の最適化は困難を極めてい。数値解析的手法が望まれるが現状では予測精度が低い。

そこで、フィルム冷却空気と主流の3次元混合流動場を測定し、定量的データベースを構築する。in-house LES コードを用いた数値解析精度検証を進め、高性能フィルム冷却孔の形状を調べる。またフィルム冷却の混合現象を精度良く測定したデータベースが存在しないことからフィルム冷却空気と主流の3次元混合流動場を測定した定量的データを数値解析検証用データとして公開する。

3. 研究の方法

典型的なフィルム冷却形状である円孔とシェイプト孔の2種のモデルを用いて、低速風洞試験により、フィルム冷却空気と主流の混合の流動伝熱場を数値解析の精度検証が出来る精度で申請者のグループが開発した PIV, LIF で測定し、さらに壁面におけるフィルム冷却効率を、PSP を用いて測定する。また、申請者のグループでは、これらの測定結果を用いて自主開発した LES コードで解析し乱流モデルなど解析精度の向上を検討する。さらに、フィルム冷却の混合現象を精度良く測定したデータベースが無いことから、解析の精度検証、解析手法の向上への利用を考えた実験データを整備して公開したデータベ

スの構築を目指す。

4. 研究成果

図1に示す低速伝熱風洞を用いて、風洞のテストセクション底辺に図2に示すフィルム冷却模型2種(円孔, シェイプト孔)を装着して、フィルム冷却空気と主流の混合場および壁面におけるフィルム冷却効率に関する詳細な測定を行った。

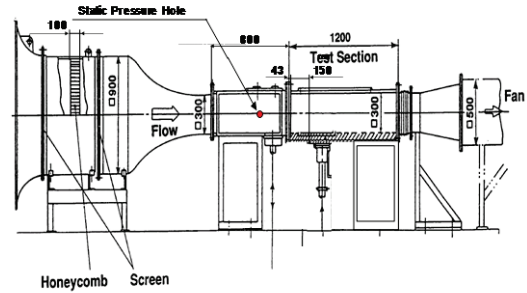


図1 低速伝熱風洞

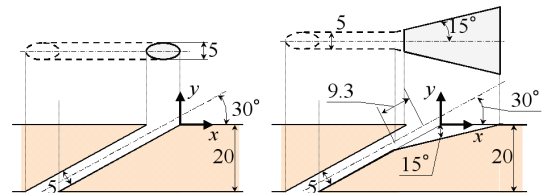


図2 円孔およびシェイプト孔

申請者等が開発した図3に示すアセトン LIF 法および図4に示す PIV 法を用いて主流とフィルム冷却空気の3次元混合場における速度分布およびアセトン濃度を測定した。

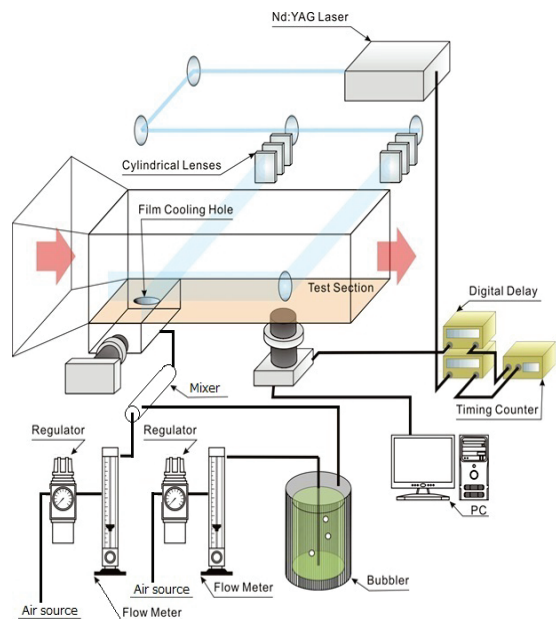


図3 アセトン LIF 法によるアセトン濃度の3次元分布測定

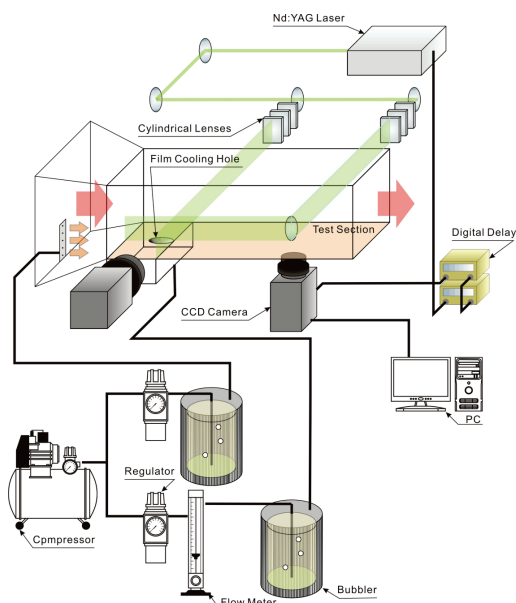


図4 PIVによるフィルム冷却空気と主流の混合場の速度分布の測定

以上の方法で測定した2次元断面内のアセトン濃度分布および速度分布の測定例を図5, 図6に示す。

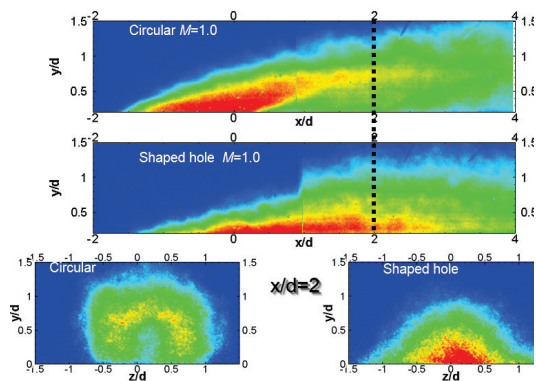


図5 アセトン LIF によるアセトン濃度の混合場の分布測定例 (X-Y 面上段円孔, 下段シェイプト孔, Y-Z 面左図円孔, 右図シェイプト孔)

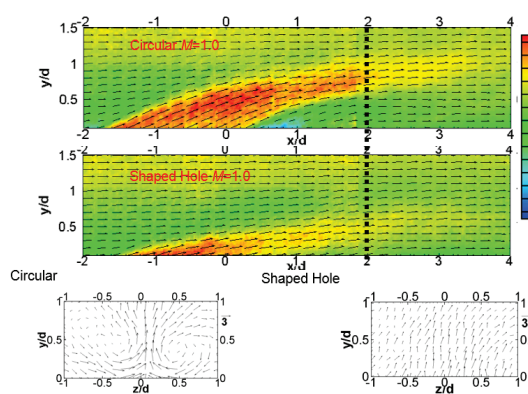


図6 PIVによる速度分布測定例 (X-Y 面上段円孔, 下段シェイプト孔, Y-Z 面左図円孔, 右図シェイプト孔)

LIF 法, PIV 法を用いたフィルム冷却空気と主流の混合場を測定する光学系を流れ方向にトラバースすることで時間平均された3次元混合場を定量的に測定した. 測定例を図7に示す.

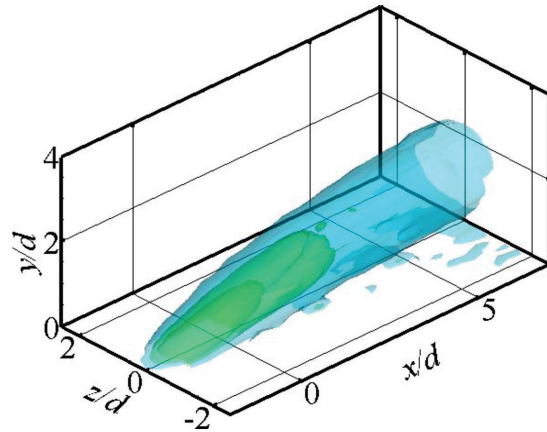


図7 フィルム冷却空気と主流の混合場におけるアセトン濃度の3次元分布測定例 (円孔, 質量流束比  $M=1.0$ )

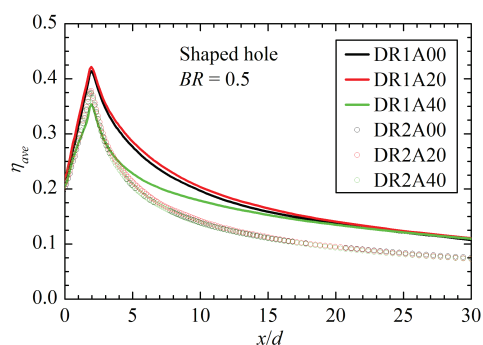
風洞実験でアセトン LIF 法, PIV 法で測定されたフィルム冷却空気と主流の混合場の測定データは, フィルム冷却孔形状, 主流の入り口条件, フィルム冷却空気の実験条件などと共に数値解析の検証用データベースとして活用を図るため公開データとして整備した.

数値解析による成果としては, フィルム冷却の実験データベースとの比較を行うために必要なプログラムの開発を行った. 非定常乱流場を解析可能な Large Eddy Simulation に基づく数値シミュレーションプログラムの開発を行った. 本研究ではこのプログラムを用いてフィルム冷却空気に旋回を付加する新方式のフィルム冷却の数値解析を実施した. 具体的にはタービン翼エンドウォール内部で互いに交差する2本の傾斜衝突噴流により, 内部冷却を兼ねつつフィルム冷却空気に旋回を付加する方式を対象として, キャビティ内部の旋回流を含めた LES 解析を実施し, フィルム冷却性能の向上メカニズムの解明を試みるとともに, 実験データとの比較を行った. その結果, 旋回を付加した場合, 円形冷却孔では冷却孔出口での翼面垂直方向の流速分布が非対称となり, 冷却空気が翼面に付着する側では冷却空気の剥離が抑制されることにより冷却効率が大きく向上し, これが全体として冷却効率の向上に寄与することを明らかにした.

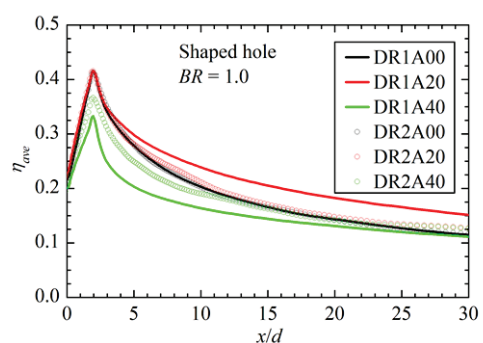
さらに, 実際のフィルム冷却で重要なパラメータとなる主流高温ガスとフィルム冷却空気の密度比を考慮するため, 開発したコードに低マッハ数近似による解析ルーチンを導入し, 主流とは密度が異なる冷却空気を用

いたフィルム冷却の数値シミュレーションの実施を可能にした。具体的には、冷却空気と主流の密度比を  $DR = 1.0$  と  $DR = 2.0$  とした数値解析を実施し、密度比がフィルム冷却効率に及ぼす影響を検討した。その結果、質量流束比が  $BR = 1.0$  の条件では、 $DR = 2.0$  の場合に冷却空気の吹き出し速度が  $DR = 1.0$  に比べて半分になるため、 $DR = 2.0$  では主流方向の冷却効率分布が下流域で低下する傾向にあることが分かった。

また、冷却空気に旋回を付加する新方式のフィルム冷却についても、密度比を変えた数値解析を行った。その結果、 $DR = 2.0$  の場合には冷却空気の主流への貫通力が増加することから、主流中の冷却空気は  $DR = 1.0$  に比べて壁面からやや離れた位置に分布する傾向にあることが分かった。また、 $BR = 0.5$  の条件で  $DR = 2.0$  とした場合には、図 8 (a) に示すようにキャビティ内の旋回流が弱くなり、冷却孔出口まで旋回を維持することができず、フィルム冷却効率に変化が生じないことが明らかになった。一方で、 $BR = 1.0$  の条件では  $DR = 2.0$  の場合でも図 8 (b) に示すようにキャビティ内の旋回が冷却孔出口でも維持されるため、フィルム冷却効率は旋回の影響を受けて変化することが明らかになった。



(a) Effect of density ratio at  $BR = 0.5$



(b) Effect of density ratio at  $BR = 1.0$

図 8 密度比の膜冷却効率への影響

## 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 武石賢一郎, 塚越敬三, 羽田哲, “発電用ガスタービンのタービン冷却翼の変遷と将来展望,” 日本機械学会誌, 査読有, 119, 2016, pp. 450-453.

[学会発表] (計 10 件)

- ① K. Takeishi, M. Komiyama, Y. Oda and S. Kondo, “Film cooling with swirling coolant flow on a flat plate and the endwall of high-loaded first nozzle,” Proceeding of ASME Turbo Expo 2014, Paper No. GT2014-25798, 査読有, Dusseldorf, Germany, 2014
- ② K. Takeishi, M. Komiyama and Y. Oda, “Quantitative measuring methods applied for the mixing phenomena of film cooling,” 13th International Conference on Simulation and Experimental Heat Transfer and its Applications, 査読有, A Coruna, Spain, 2014
- ③ Y. Oda, K. Takeishi and Y. Yanai, “Numerical Study of Curvature Effects on Film Cooling of a First-Stage Stationary Vane,” Proc. of The 25th International Symposium on Transport Phenomena, Krabi, Thailand, Paper No.168, Krabi, Thailand, 2014
- ④ 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, 浜松, 2014
- ⑤ K. Takeishi, Y. Oda and s. Kozono, “An Experimental Study or Leakage Flow on Flow Field and Film Cooling of High Pressure Turbine Blade Platform, ASME Turbo Expo 2015, Paper No. GT2015-42898, 査読有, Montreal, Canada, 2015
- ⑥ K. Takeishi, Y. Oda and S. Mori, “Study on the Mixing Flow Field of Shaped Film Cooling Holes with High Film Cooling Effectiveness,” The 26th International Symposium on Transport Phenomena, Leoben, Austria, 2015
- ⑦ Y. Oda, K. Takano and K. Takeishi, “Large Eddy Simulation of Film Cooling with Swirled Coolant Injected from a Shaped Hole,” Proc. of the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Dynamics, 査読有, Busan, Korea, 2015

- ⑧ K. Takeishi, Y. Oda, T. Nagao and H. Sakamoto., “Superposition method for multi rows of film cooling hole on a turbine stationary vane surface, 14th International Simulation and Experiments in Heat Transfer and its Applications,” Heat Transfer 2016, 査読有, Ancona, Italy, 2016
- ⑨ K. Takeishi, “Progress of film cooling in industrial gas turbine vanes and blades,” 12<sup>th</sup> European Turbomachinery Conference, 招待講演, 査読有 Stockholm, Sweden, 2017
- ⑩ Y. Oda, H. Kiyozumi and K. Takeishi, “Effect of Density Ratio on the Film Cooling with Shaped Cooling Hole and Swirled Coolant,” Proc. of Asian Conference on Thermal Sciences 2017, 査読有, Jeju, Korea, 2017

研究者番号： 40178372

(3) 研究分担者

小田 豊 (ODA, Yutaka)

関西大学 システム理工学部 准教授

研究者番号： 50403150

[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

データベースを公開した URL：

<http://www2.itc.kansai-u.ac.jp/~oda.y/database/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武石 賢一郎 (TAKEISHI, Kenichiro)

徳島文理大学 理工学部 教授

研究者番号： 70379113

(2) 研究分担者

小宮山 正治 (KOMIYAMA, Masaharu)

岐阜大学 工学部 教授