

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420136

研究課題名(和文)ディンプルを利用した熱遮蔽性能維持下での対流伝熱促進

研究課題名(英文) Heat Transfer Enhancement without Deteriorating Thermal Shield Performance by Using Dimples

研究代表者

村田 章 (Murata, Akira)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60239522

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)：フィルム冷却はガスタービン翼表面への空気膜形成により高温燃焼ガスからの熱流入を遮蔽する高熱効率化に必須の技術である。特に翼後縁部は、薄さのために内部冷却が困難な部位であり、そこでのフィルム冷却では、熱遮蔽性能を維持したままでカットバック面の積極的な冷却(伝熱促進)が要求される。本研究は、三次元熱伝導を考慮した非定常法伝熱計測、ステレオPTV乱流計測、LES・DNS数値解析により、最適ディンプル面形状(回転角度と配列の組み合わせ)の決定とその熱遮蔽冷却原理の説明を行ったものである。

研究成果の概要(英文)：Cooling at trailing edge of gas turbine airfoil is one of the most difficult problems because of its thin shape: high thermal load from both surfaces, hard-to-cool geometry of narrow passages, and at the same time demand for structural strength are the reasons. In this study, heat transfer coefficient and film cooling effectiveness on pressure-side cutback surface were measured by a transient infrared thermography technique with consideration of three-dimensional heat conduction. The flow field was measured by a stereo PTV method. Furthermore, numerical analyses were performed by LES and DNS methods. The optimum dimpled surface configuration (combination of rotation angle and arrangement) was determined and the principle of the thermal shield and convective cooling by the dimpled surface was explained.

研究分野：熱工学

キーワード：フィルム冷却 伝熱促進 ガスタービン翼 ディンプル 非定常法 流れの可視化 LES

1. 研究開始当初の背景

フィルム冷却はガスタービン翼表面への空気膜形成により高温燃焼ガスからの熱流入を遮蔽する高熱効率化に必須の技術である。特に翼後縁部は、図1に示すように両面からの熱負荷が非常に高いがその薄さのために内部冷却が困難な部位であるので、片側壁を除去したカットバック形状を採用している。そこでのフィルム冷却では、熱遮蔽性能を維持したままでカットバック面の積極的な冷却(伝熱促進)が要求される。これは従来とは異なる制約条件下での新たな伝熱促進問題となる。

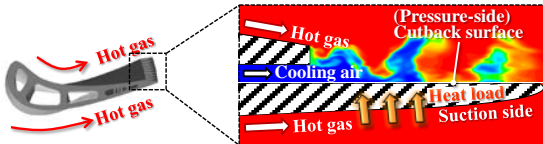


図1 翼後縁部カットバック面フィルム冷却の様子。

2. 研究の目的

本研究は、伝熱計測、PTV(Particle Tracking Velocimetry)乱流計測、LES(Large Eddy Simulation)・DNS(Direct Numerical Simulation)数値解析を流れパラメータとカットバック粗面形状を変化させて行い、最適粗面形状の決定とその熱遮蔽冷却原理の説明を行う。

3. 研究の方法

研究の方法として以下3つの手法を用いた。

(1) 伝熱実験(図2、図3)では、空気を作動流体として固体内3次元熱伝導を考慮した非定常法によって、フィルム冷却効率と熱伝達率の同時計測を行った。ディンプル数密度を一定に保って回転角度の影響を調べるためにティアドロップディンプル面全体を角度0~75度まで15度刻みで回転させた。さらに回転角度と独立にディンプル配列(基盤目、千鳥)の影響を調べるために斜め幅方向にディンプルを移動して配列を形成して実験を行った。主流レイノルズ数は25,000一定とし、冷却流・主流質量流束比であるブロー比 $M=0.5-2.0$ と変化させた。熱遮蔽性能を示すフィルム冷却効率、対流伝熱促進を示すヌセルト数、そして両者を合わせた総合的なフィルム冷却性能指標として正味熱流束低減率(Net Heat Flux Reduction(NHFR))で結果を整理した。

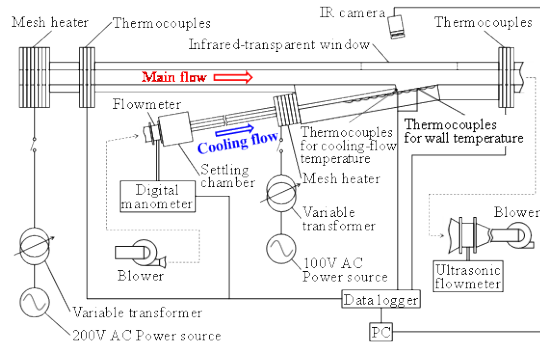


図2 伝熱実験装置概要

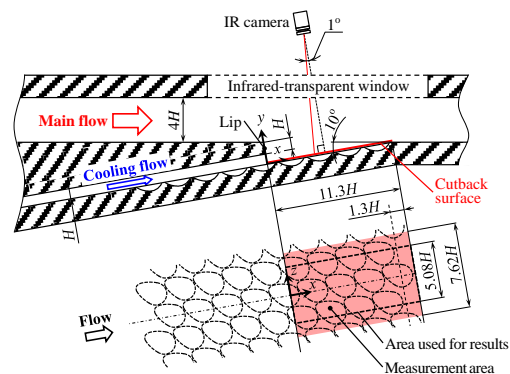


図3 伝熱実験でのカットバック面詳細(30度基盤目配列の場合を示す)

(2) PTV計測では作動流体は水であり、流路形状は伝熱実験と同一である。直径 $50\mu\text{m}$ の樹脂粒子で流れを可視化し、高速度ビデオカメラ2台で撮影する。YLFパルスレーザからシート光(幅1mm)を照射し、連続時刻間での粒子位置追跡から速度場を算出する。このステレオPTV計測を幅方向5断面で行い、断面内の統計量だけでなく、3次元的な流れ(時間平均速度場の流線)の確認も行った。

(3) LES・DNS解析での流路形状は実験と同一である。非構造格子での有限体積法を用い、時間・空間とも2次精度離散化を行った。図4に示すように入口ではドライバ部から発達乱流を与え、幅方向は周期境界、高さ方向上部は滑りなし境界、出口は対流流出境界とする。カットバック面では断熱・等熱流束境界に対応した2つの温度配列を用いて両境界条件の計算を一度で行った。計算は東大情報基盤センターFX10を用いて行った。実験条件に合わせた計算を行うとともに、単純化した系で調べるために二平板間内部流でのティアドロップディンプル面の計算も行った。

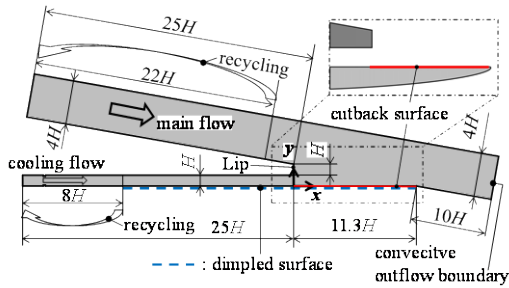


図4 計算領域と境界条件説明図

4. 研究成果

(1) 伝熱実験のティアドロップディンプル面全体を角度 $0 \sim 75$ 度で回転させた実験結果 (図5) では 30 度でヌセルト数と正味熱流束低減率 ($NHFR$) が最大となった. さらに配列の影響を調べるために回転角度とは独立に千鳥・基盤目配列を構成して実験を行い (図6, 図7), 30 度基盤目配列でヌセルト数と $NHFR$ が最大となることを明らかにした.

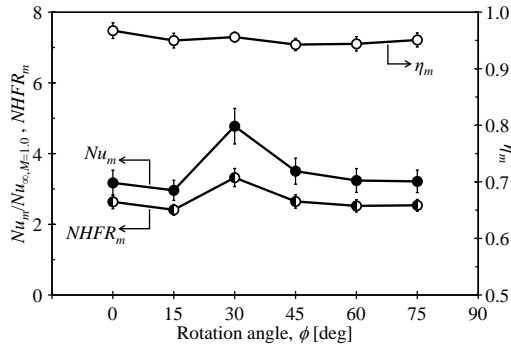


図5 ディンプル面回転角度, ϕ , の面平均値への影響 ($M=2.0$): フィルム冷却効率, η_m (中空), ヌセルト数比, $Nu_m/Nu_{\infty, M=1.0}$ (中実), 正味熱流束低減率, $NHFR_m$ (半中実)

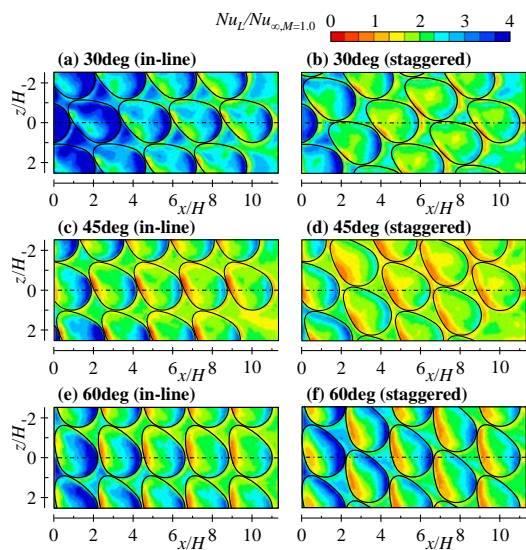


図6 同一回転角度で配列変化させた場合の局所ヌセルト数比分布, $Nu_l/Nu_{\infty, M=1.0}$ ($M=1.0$).

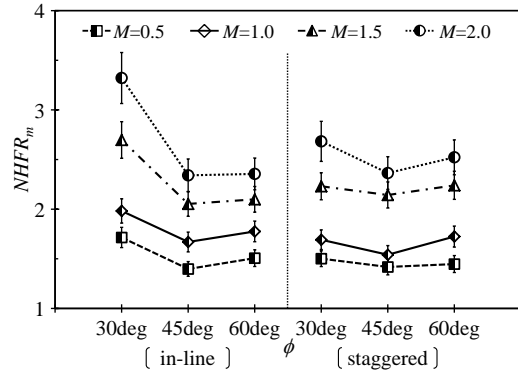


図7 各ディンプル回転角度, ϕ , においてディンプル配列が正味熱流束低減率, $NHFR_m$, に及ぼす影響

(2) PTV 計測実験では, 図8に示すように 30 度基盤目配列は千鳥配列に比べ流れの剥離が抑制され, それが伝熱促進の理由であることを明らかにした.

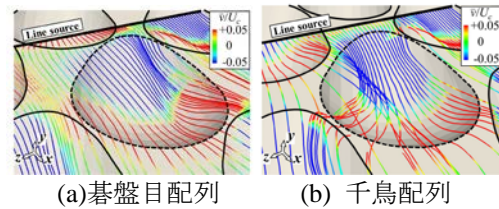
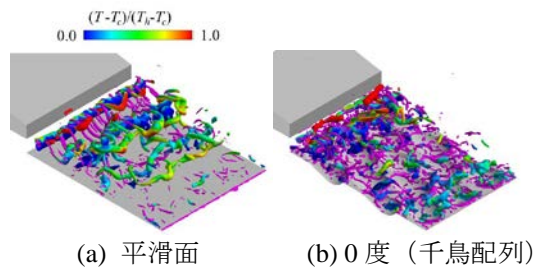
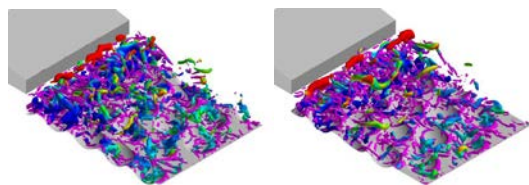


図8 ステレオ PTV 計測による時間平均速度場の流線 (回転角度 30 度, $M=1.0$, 色は壁面垂直速度成分を表す)

(3) LES・DNS 解析結果は図9に示すように, カットバック面形状に応じて冷却流吹き出し部からの大規模放出渦とカットバック面近傍の渦の様子が変わる. ディンプル敷設は壁面近傍のみを乱しフィルム冷却効率にほとんど影響を与えずに伝熱促進をする. 計算結果は一部条件を除き, 面平均値実験結果との一致をみた. 単純化した系である二平板間内部流とフィルム流との結果比較から, ティアドロップディンプル内部の流動は両流路で定性的には同様であった.





(c) 30 度基盤目配列 (d) 30 度千鳥配列

図9 LES 解析による冷却流吹き出し部隔壁端面からの放出渦とカットバック面近傍の渦の可視化結果 (変動圧力の等値面 ($p' = -2 \times 10^{-4}$) に流体温度を色で表示. 速度勾配テンソルの第二不変量の等値面 ($Q=0.015$) は紫色で表示.)

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 4 件)

① Murata, A., Yano, K., Hanai, M., Saito, H., and Iwamoto, K., Arrangement Effects of Inclined Teardrop-Shaped Dimples on Film Cooling Performance of Dimpled Cutback Surface at Airfoil Trailing Edge, Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol.107(2017), pp.761-770. (査読有)
DOI
10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.081

② Murata, A., Hanai, M., Tokutake, T., Saito, H., and Iwamoto, K., Three-Component PTV Measurements of Film Cooling Flow in Multiple Planes over Cutback Surface with Inclined Teardrop-Shaped Dimples at Airfoil Trailing Edge, Proc. of Int. Gas Turbine Congress (IGTC2015), Nov. 15-20, 2015, Tokyo, Japan, IGTC2015-0039(7pages). (査読有)

③ Yano, K., Murata, A., Sekijima, M., Saito, H., and Iwamoto, K., Effects of Dimpled-Cutback-Surface Rotation Angle on Film Cooling Performance at Airfoil Trailing Edge, Proc. of Int. Gas Turbine Congress (IGTC2015), Nov. 15-20, 2015, Tokyo, Japan, IGTC2015-0032(8pages). (査読有)

④ Murata, A., Mori, E., and Iwamoto, K., Effects of Surface Geometry and Blowing Ratio on Film Cooling Performance at Airfoil Trailing Edge Investigated by Using Large Eddy Simulation, Proc. of 15th Int. Heat Transfer Conf.(IHTC-15), August 10-15, 2014, Kyoto, Japan, IHTC15-8914 (15pages). (査読有)
DOI 10.1615/IHTC15.gtb.008914

[学会発表] (計 7 件)

① 村田章, 徳武太郎, 岩本薫, 傾斜ティアドロップディンプルを敷設したガスタービン翼後縁部カットバック面フィルム冷却の LES 解析, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, 2017/5/24, 大宮ソニックシティ (埼玉県さいたま市) .

② 村田章, 固体内 3 次元熱伝導を考慮した過渡応答法によるフィルム冷却効率と熱伝達率の同時計測 (ディンプルを利用した熱遮蔽性能維持下での対流伝熱促進), 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会 (招待講演), 2017/3/16, 東京理科大学 (東京都葛飾区) .

③ 藤本慶, 村田章, 齋藤博史, 岩本薫, ガスタービン翼後縁部傾斜ティアドロップディンプル付きカットバック面上フィルム冷却流の多断面 3 成分 PTV 計測, 日本機械学会関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会, 2017/3/16, 東京理科大学 (東京都葛飾区) .

④ 徳武太郎, 村田章, 岩本薫, 脈動冷却流による翼後縁部フィルム冷却性能向上の LES 解析, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016/12/14, タワーホール船堀 (東京都江戸川区) .

⑤ 徳武太郎, 村田章, 岩本薫, ティアドロップディンプル傾斜角度と配列がディンプル面の熱伝達特性に与える影響の LES 解析 (層流域と乱流域での評価), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016, 2016/10/23, 愛媛大学 (愛媛県松山市) .

⑥ 村田章, 矢野幸汰, 関島峰秀, 齋藤博史, 岩本薫, 三次元熱伝導を考慮した過渡応答法によるティアドロップディンプル付きカットバック面のフィルム冷却性能評価 (ディンプル面回転角度の影響), 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015/6/4, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) .

⑦ 森愛奈, 村田章, 岩本薫, 45 度傾斜ティアドロップディンプルを敷設したガスタービン翼後縁部カットバック面フィルム冷却の LES 解析, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014/12/11, タワーホール船堀 (東京都江戸川区) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：タービン翼の冷却方法
発明者：村田章
権利者：東京農工大学
種類：特許
番号：特願 2017-032455
出願年月日：2017/2/23
国内外の別： 国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

村田研究室 研究紹介

<http://www.mmlab.mech.tuat.ac.jp/mmlab/research/research-gt-j.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 章 (MURATA, Akira)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60239522

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

岩本 薫 (IWAMOTO, Kaoru)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50408712

齋藤 博史 (SAITO, Hiroshi)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり

工学科・助教

研究者番号：40401450