

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06188

研究課題名(和文)冷却流脈動化によるディンプル面の熱遮蔽性能と対流伝熱促進の最適化

研究課題名(英文) Optimization of Thermal Shield Performance and Heat Transfer Enhancement on Dimpled Surface by Using Cooling-Flow Pulsation

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) 3,700,000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。本研究では新たに冷却流の脈動化を利用して性能向上を図った。伝熱計測、PTV計測、LES・DNS解析を脈動パラメータとカットバック面形状を変化させて行うことで、最適脈動パラメータ、最適カットバック面形状の決定とその熱遮蔽冷却原理の説明を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高出力、高効率なガスタービンは航空機用、定置発電用に加え、その高速起動性・移動性により分散型・非常用電源としても高い関心を集めている。本研究は、高温化によるガスタービン熱効率向上の伝熱工学的制約(冷却困難部位)である翼後縁部のフィルム冷却を研究背景として、熱遮蔽性能維持下での伝熱促進という新しい問題設定をする。そして定常冷却流でのこれまでの成果を発展させ、冷却流の脈動化によるさらなる性能向上とその原理説明を行い、エネルギー変換の高効率化とCO₂削減に寄与する。

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. The objective of this study is to further improve the trailing-edge film cooling performance by using cooling-flow pulsation. Heat transfer coefficient and film cooling effectiveness on 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 measurements and computations were performed by varying the pulsation parameters and the cutback-surface geometries. From the results, optimum values were identified and the principle of the thermal shield and convective cooling by the cooling-flow pulsation was explained.

研究分野：熱工学

キーワード：フィルム冷却 脈動流 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

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

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。

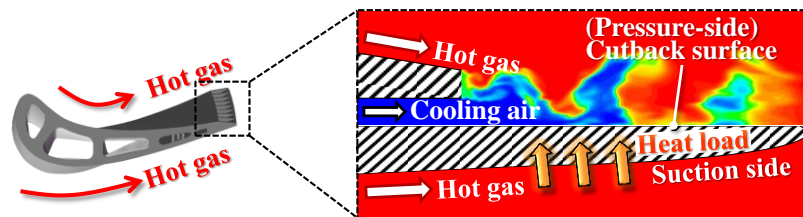


図1 翼後縁部カットバック面フィルム冷却の様子

2. 研究の目的

本研究では、冷却流の脈動化により翼後縁部フィルム冷却総合性能のさらなる向上を目指す。冷却流の脈動化は翼腹側壁面端部（リップ）後流での大規模渦発達抑制により混合抑制・熱遮蔽性能向上につながる（図2）。さらにカットバック面にディンプルを敷設した際の伝熱促進において冷却流の脈動化は、剥離泡発達抑制、定常流と異なる流れの再付着・二次流れ誘起によって伝熱促進を示すと予想される。そこで、伝熱計測、PTV(Particle Tracking Velocimetry)乱流計測、LES(Large Eddy Simulation)・DNS(Direct Numerical Simulation)数値解析を脈動パラメータとカットバック面形状を変化させて行うことで、最適脈動パラメータ、最適カットバック面形状の決定とその熱遮蔽冷却原理の説明を行う。

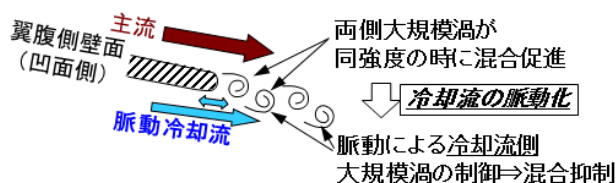


図2 冷却流の脈動化による翼腹側壁面端部（リップ）後流での混合層発達抑制

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3、図4）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度まで回転させた。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 $M=0.5-1.25$ と変化させた。脈動冷却流はスピーカーで形成した。脈動周波数は各ブロー比における定常冷却流での渦発生周波数で規格化したストローハル数比で整理した。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。

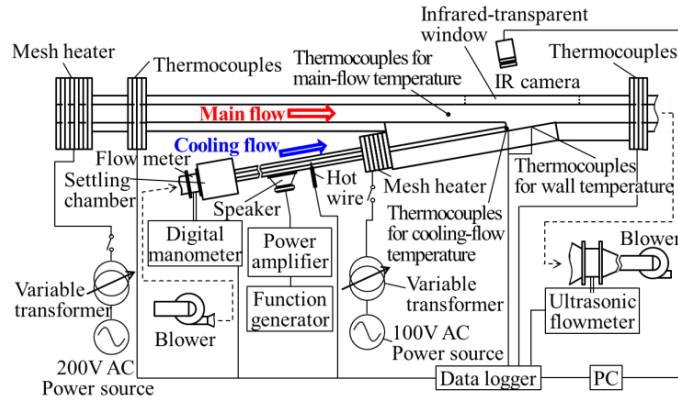


図3 伝熱実験装置概要

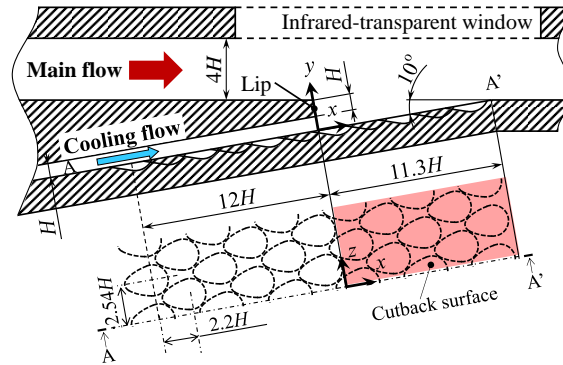


図4 伝熱実験でのカットバック面詳細 (0度千鳥配列ティアドロップディンプル面の場合)

(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台で撮影した。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した。脈動冷却流はゴム管をレシプロモータで変形させて形成した。伝熱実験にパラメータを合わせてこのステレオ PTV 計測を幅方向5断面で行い、断面内の各種統計量 (時間平均値, 位相平均値, (3成分分解による) 周期成分, ランダム成分の算出) に加え、3次元的な流れ場 (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5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した。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。脈動は冷却流ドライバ部で正弦波状流量変動として与えた。計算は東大情報基盤センターOakforest-PACSを用いて行った。実験条件に合わせて計算を行った。

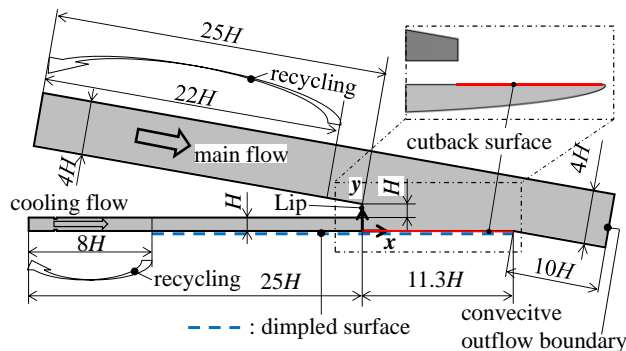


図5 計算領域と境界条件説明図

4. 研究成果

(1) LES 解析結果では図6に示すように冷却流の脈動化はストローハル数比が1以外の場合に後縁部リップ後流での大規模放出渦を(定常冷却流(steady)の場合に比べて)弱める. 実験に先行してストローハル数比(0.33~1.5)と流速片振幅(1~10%)を系統的に変化させて, 平滑カットバック面でのLES解析を行い, 図7に示すようにストローハル数比が無理数 $\sqrt{2}$ で正味熱流束低減率の値が最も向上することを確認した.

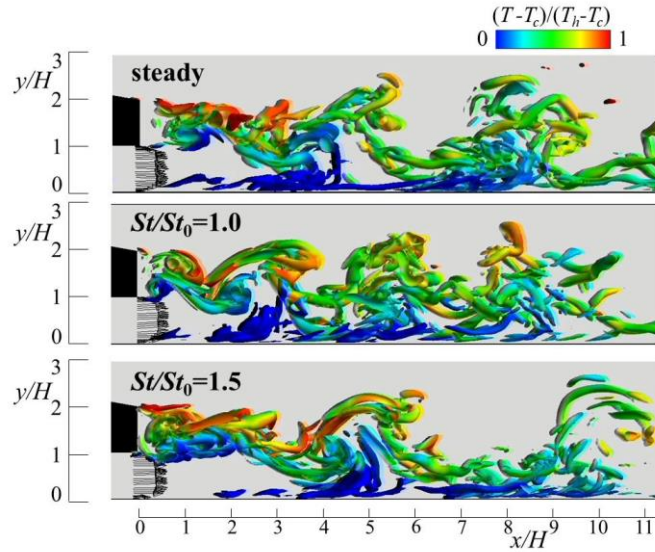


図6 定常(上図), 脈動(中図, 下図)冷却流での大規模放出渦と温度(ブロー比 $M=1.0$, LESでの第二不変量の等値面に色で無次元温度を表示(赤:高温, 青:低温), 流速片振幅10%)

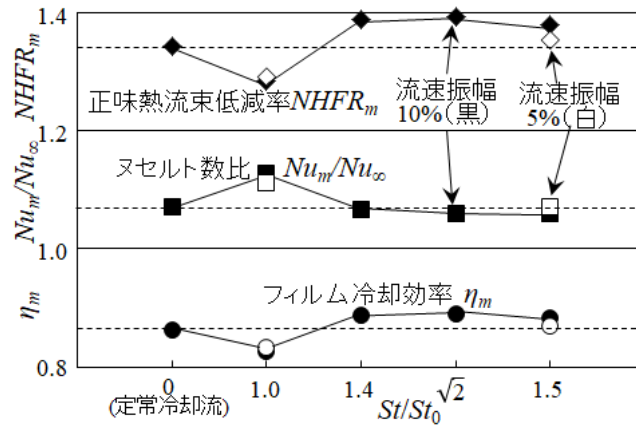


図7 LESでの脈動周波数(ストローハル数比 St/St_0)と流速片振幅の影響(平滑面, ブロー比 $M=1.0$)

(2) PTV 計測実験では、図8に示すように0度千鳥配列ティアドロップディンプル面でも平滑面（図省略）同様の大規模放出渦の位相変化が観察され、ストローハル数比 $\sqrt{2}(=1.41)$ の場合（図8右図）に、大規模放出渦が抑制された。

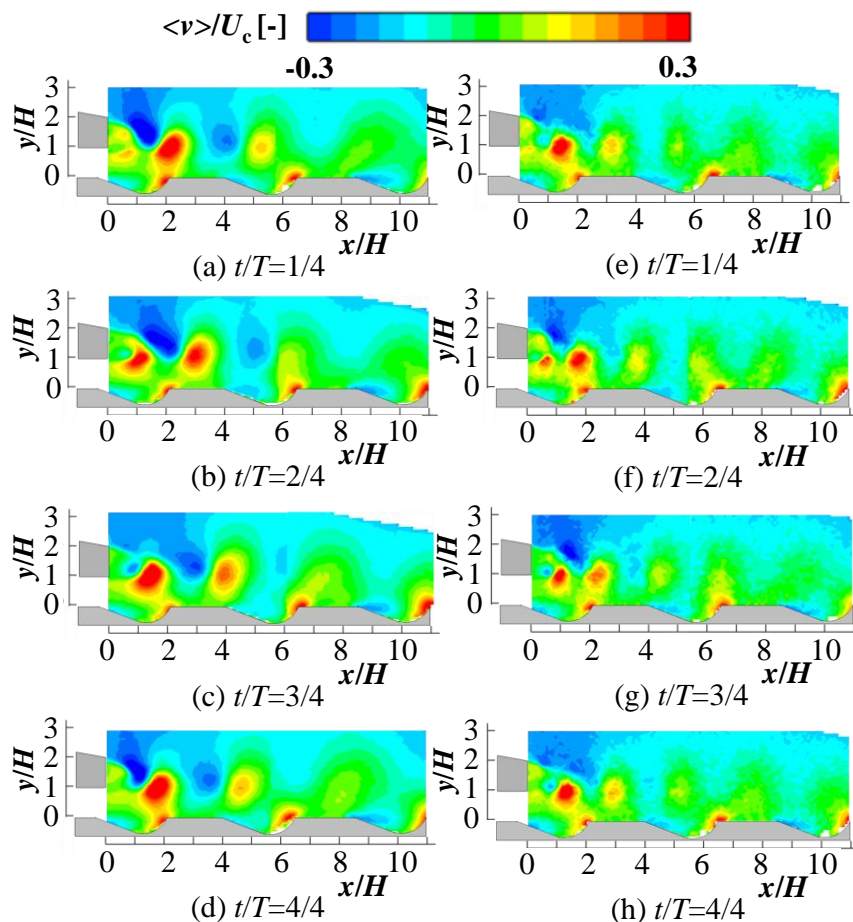


図8 0度千鳥配列ティアドロップディンプル面での位相平均壁面垂直速度成分の位相変化 (t は時刻, T は周期を表す. 左図: $St/St_0=1.0$, 流速片振幅 2%, 右図: $St/St_0=1.41$, 流速片振幅 3%)

(3) 伝熱実験でもディンプル面を含め数値解析結果と同様の傾向を示し、ストローハル数比1以外の場合に定常冷却流に比べてフィルム冷却効率は増加し、正味熱流束低減率の増加が確認された。

今後の展開について以下説明する。上記の通り、冷却流の脈動化は大規模渦放出周波数の非整数倍周波数の場合にフィルム冷却効率を向上させ、フィルム冷却総合性能（正味熱流束低減率）を向上させる。一方、冷却流の脈動化によるディンプル面のヌセルト数は定常冷却流とほぼ同一の値となり、脈動化による十分な熱伝達促進が得られていない。そこで2020年度からの科研費課題では、ディンプル面のチャンネル脈動流における最適化（脈動条件、形状）を実施し、その最適化結果をフィルム流へ適用することで正味熱流束低減率のさらなる向上を達成する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamamoto Shohei, Murata Akira, Saito Hiroshi, Iwamoto Kaoru	4. 巻 142
2. 論文標題 Arrangement Effects of 30deg Inclined Teardrop-Shaped Dimples on Film Cooling Flow Over Dimpled Cutback Surface at Airfoil Trailing Edge Investigated by 2D3C-PTV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Trans. ASME, Journal of Heat Transfer	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1115/1.4045752	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Yamamoto, A. Murata, H. Taniguchi, H. Hayakawa, and K. Iwamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Cooling Flow Pulsation on Film Cooling Performance over Smooth Cutback Surface at Airfoil Trailing Edge Measured by Transient Technique with Compensation of Three-Dimensional Heat Conduction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of Int. Gas Turbine Congress (IGTC) 2019, Paper No. IGTC-0097(6pages).	6. 最初と最後の頁 1-6
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Tokutake, A. Murata, D. Nakajima, S. Yamamoto, and K. Iwamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Large Eddy Simulation of Film Cooling Performance of Smooth Cutback Surface at Airfoil Trailing Edge Improved by Pulsating Cooling Flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of Int. Gas Turbine Congress (IGTC) 2019, Paper No. IGTC-0047(7pages).	6. 最初と最後の頁 1-7
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 村田章	4. 巻 46
2. 論文標題 ガスタービン翼後縁部カットバック面のフィルム冷却	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 462-468
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Yamamoto, A. Murata, S. Hayakawa, and K. Iwamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Three-Component PTV Measurements of Pulsating Film-Cooling Flow over Smooth Cutback Surface at Trailing Edge of Gas Turbine Airfoil	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of Asian Congress on Gas Turbines	6. 最初と最後の頁 TS77(4pages)
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Islam, AKM N., Murata, A., Oho, K., Yamamoto, S., and Iwamoto, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Rotation Angle of Teardrop-Shaped Dimples on Heat Transfer Enhancement of Airfoil Internal Cooling Investigated by Transient Technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 16th Int. Heat Transfer Conf.(IHTC-16)	6. 最初と最後の頁 DVD-ROM
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1615/IHTC16.hte.023228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 早川千紘, 村田章, 於保克, 山本昌平, 岩本薫
2. 発表標題 ガスタービン翼後縁部脈動フィルム冷却流の多断面3成分PTV計測による位相平均統計量
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム講演論文集, H311(1page).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早川千紘, 村田章, 於保克, 山本昌平, 岩本薫
2. 発表標題 ガスタービン翼後縁部脈動フィルム冷却流の3成分PTV計測による位相平均統計量解析
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会, No.1616(3pages).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林津平, 村田章, 早川洋人, 山本 昌平, 岩本薫
2. 発表標題 三次元熱伝導を考慮した過渡応答法による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 (冷却流脈動化の効果)
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会, No.1613(3pages).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本昌平, 村田章, 谷口和, 早川洋人, 岩本薫
2. 発表標題 脈動冷却流が翼後縁部フィルム冷却性能へ与える影響の三次元熱伝導を考慮した過渡応答法計測
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム講演論文集, F113(1page).
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早川隼平, 村田章, 山本昌平, 岩本薫
2. 発表標題 ガスタービン翼後縁部ディンプル付きカットバック面上脈動フィルム冷却流の多段面3成分PTV計測
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会, No.318(3pages).
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本昌平, 村田章, 早川隼平, 岩本薫
2. 発表標題 ガスタービン翼後縁部平滑カットバック面上の脈動フィルム冷却流の3成分PTV計測
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集, J325(4pages).
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

村田研究室 研究紹介
<https://www.mmmlab.mech.tuat.ac.jp/mmmlab/research/research-gt-j.shtml>

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
連携研究者	岩本 薫 (Iwamoto Kaoru) (50408712)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	
連携研究者	齋藤 博史 (Saito Hiroshi) (40401450)	東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授 (52605)	