

令和 5 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：2020～2022  
課題番号：20K04321  
研究課題名（和文）チャンネル脈動流でのディンプル面熱伝達促進の最適化によるフィルム冷却総合性能向上  
  
研究課題名（英文）Improvement of Overall Film Cooling Performance by Optimizing Heat Transfer Enhancement on Dimpled Surface in Pulsating Channel Flow  
  
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） 3,400,000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。本研究ではまず片側ディンプル面チャンネル脈動流でのURANS・LES解析を行い、脈動条件とディンプル面形状の最適値を決定した。次にその最適値をフィルム冷却に適用した。数値解析結果は、伝熱計測、ステレオPTV計測で検証し、伝熱促進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・移動性により再生可能エネルギー系統安定化用・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熱伝達促進という新しい問題設定をする。そしてこれまでの成果を発展させ、混合層発達抑制とディンプル面熱伝達促進の最適化を同時実現することにより、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. In this study, to further improve the film cooling performance, optimization of surface geometry and pulsation parameters was performed for channel flow using URANS and LES. Then, the optimized conditions were applied to the film cooling. The numerical results were verified by experiments. Heat transfer coefficient and film cooling effectiveness 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. From the results, optimum values were identified and the principle of the enhanced convective cooling by the 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。

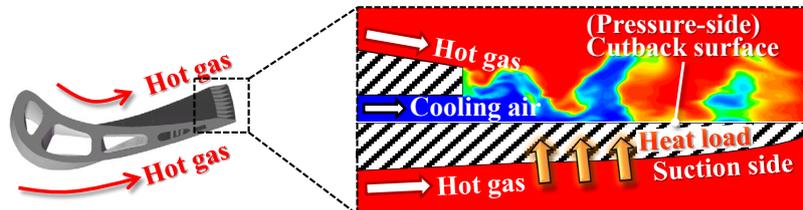


図1 翼後縁部カットバック面フィルム冷却の様子

### 2. 研究の目的

本研究ではこれまでの成果を踏まえ、最初に片側ディンプル面チャネル脈動流でのURANS(Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes)による数値解析を行い、熱伝達促進におけるディンプル面形状と脈動条件の最適値を決定する。次にその最適値をフィルム冷却に適用し、LES(Large Eddy Simulation)解析によりフィルム冷却総合性能への熱伝達促進最適化の効果を確認しその原理を説明する(図2)。URANS・LES解析の結果は、伝熱計測、ステレオ PTV(Particle Tracking Velocimetry)計測、LES・DNS(Direct Numerical Simulation)数値解析で検証する。

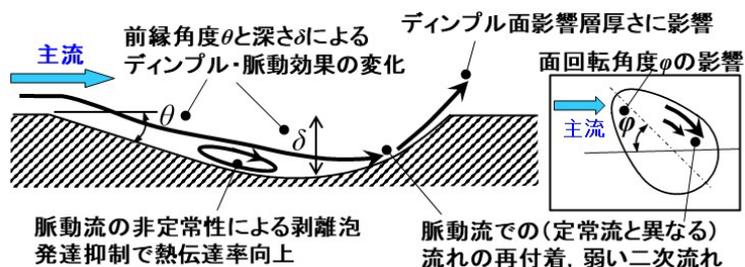


図2 ディンプル形状と流れの脈動化による伝熱促進原理の説明図 (本研究では  $\theta$  と  $\delta$  は固定)

### 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。それぞれ翼後縁部フィルム冷却流とチャネル流の場合を扱ったが、ここではより複雑なフィルム冷却流の場合を中心にその方法を説明する。

(1) 伝熱実験(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。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。脈動冷却流は加振器で形成した。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。流速振幅は位相平均周期成分の rms 値で定義した。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。チャネル流の場合もレイノルズ数は同一であり、ストローハル数  $St_D$  はディンプル直径  $D$  を長さスケールとした。

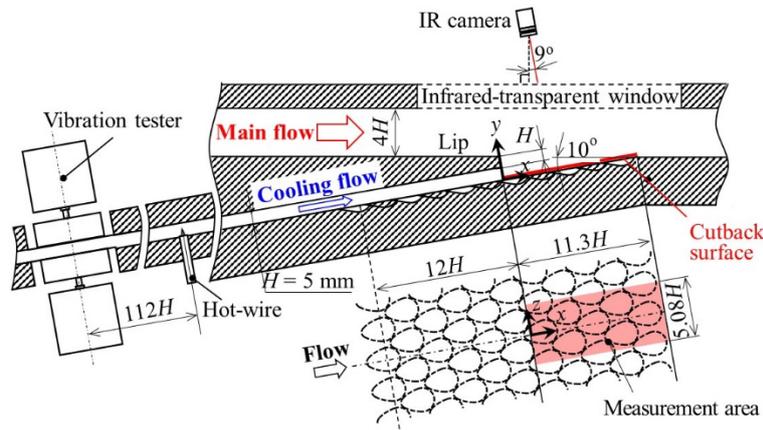


図3 フィルム流伝熱実験装置での脈動発生部とカットバック面（0度 staggered 配列ティアドロップディンプル面の場合）

(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  $1\text{mm}$ ）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．また当初の計画にはなかったが，高空間解像度での計測を行うために，カメラ1台を追加し，側面からの2成分 PIV (Particle Image Velocimetry) 計測も行った．

(3) URANS・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のスパコン Oakbridge-CX を用いて行った．チャンネル流では，流れ方向にも周期境界条件とし，ティアドロップディンプル面を角度  $0\sim 60$  度で回転させ，配列を staggered/in-line に変化させて計算を行った．また，ディンプル直径定義のストローハル数を  $St_D=0\sim 1.33$ ，流速 rms 振幅（平均流速で規格化）を  $\Delta U/U_m=0\sim 0.14$  と変化させた．

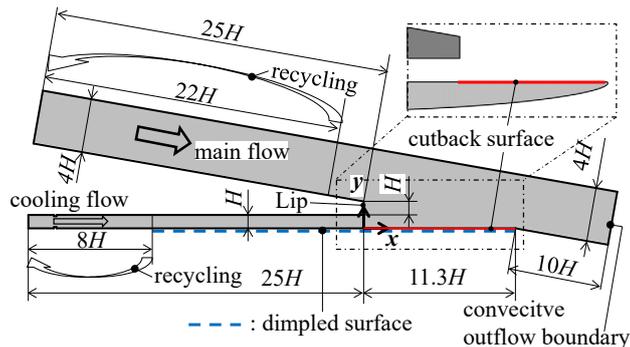


図4 フィルム流での計算領域と境界条件説明図

#### 4. 研究成果

(1) 図5にチャンネル定常流 30度傾斜ティアドロップディンプル(in-line 配列)面でのヌセルト数分布を示す．前縁傾斜のあるティアドロップディンプルでは前縁部での流れの剥離そして熱伝達率低下が抑制される．また，長軸を主流方向から傾斜させることで二次流れが誘起され熱伝達率も向上する．LES 解析と伝熱実験の結果は一致した．

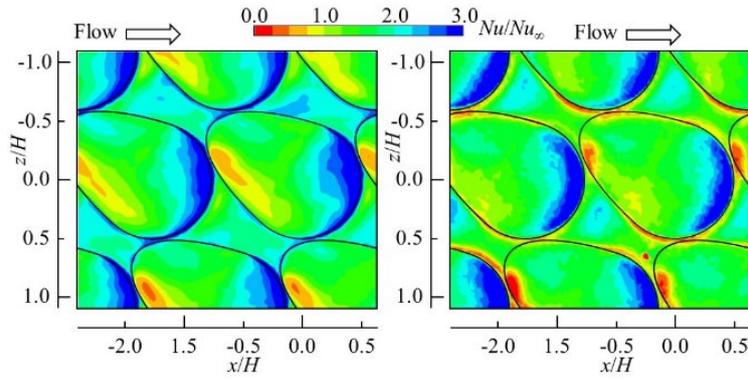


図5 チャンネル定常流での局所ヌセルト数分布 (左図: LES, 右図: 実験, 30度 in-line 配列,  $Re=25,000$ )

(2) 図6にティアドロップディンプル付きチャンネル流路でのディンプル面回転角度と脈動付与の影響を示す. 定常流 (○: 実験, △: LES) ではディンプル面回転角度は30度でヌセルト数, 摩擦係数, 伝熱性能係数  $\eta_{\text{eff}}$  (同一送風動力での平滑面に対する熱伝達促進を表す) が最大値を示す. また, 脈動付与 (◇: 実験, □: LES) は伝熱性能係数を増加させる. 脈動化による熱伝達率の増加は30-60度の in-line 配列で特に高く,  $St_D=0.3$  までは増加し,  $St_D \geq 0.6$  では低下または飽和した (図省略). チャンネル流の伝熱実験結果は, 計算と同一の傾向を示した. 図7に30度傾斜ティアドロップディンプル(in-line 配列)付きチャンネル流路での LES 解析による脈動付与の瞬時流れ場への影響を示す. 脈動付与そして脈動周波数の増加は流れを乱し, 熱伝達率を増加させるが, 圧力損失の増加も大きく, 伝熱性能係数はストローハル数  $St_D=0.3$  辺りで最大となる (図省略). 脈動付与による伝熱促進は脈動によるディンプル前縁での剥離泡の生成・消滅 (図8) が理由と考えている. 伝熱計測, PTV 計測の結果は数値解析結果と一致した.

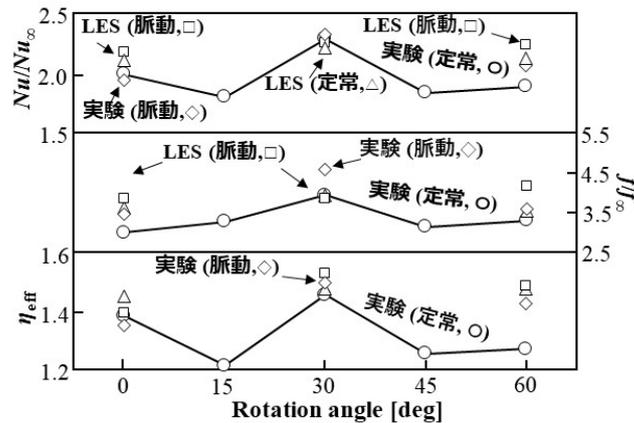


図6 ティアドロップディンプル面の回転角度と流れの脈動化が面平均ヌセルト数, 摩擦係数, 伝熱性能係数  $\eta_{\text{eff}}$  に与える影響 ( $Re=25,000$ ,  $St_D=0.15$ ,  $\Delta U/U_m=0.14$ )

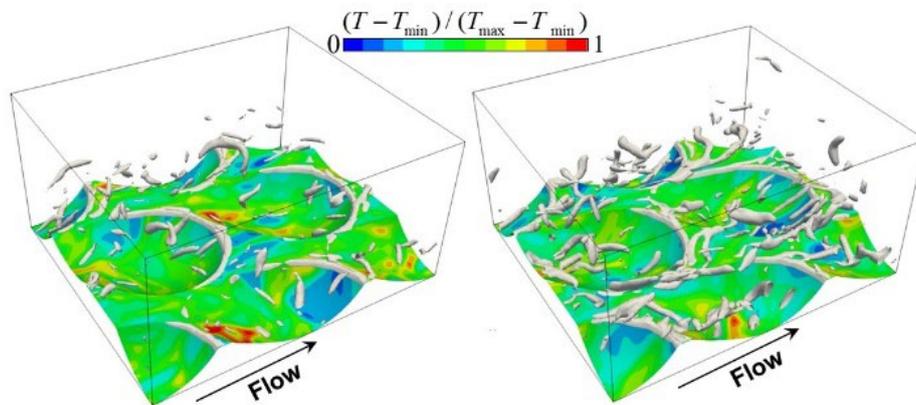


図7 30度 in-line 配列での LES 解析による瞬時場 (等値面は速度勾配テンソルの第二不変量, 色は壁面温度, 左図: 定常流, 右図: 脈動流 ( $Re=25,000$ ,  $St_D=0.3$ ,  $\Delta U/U_m=0.14$ , 位相  $\omega t=\pi$ ))

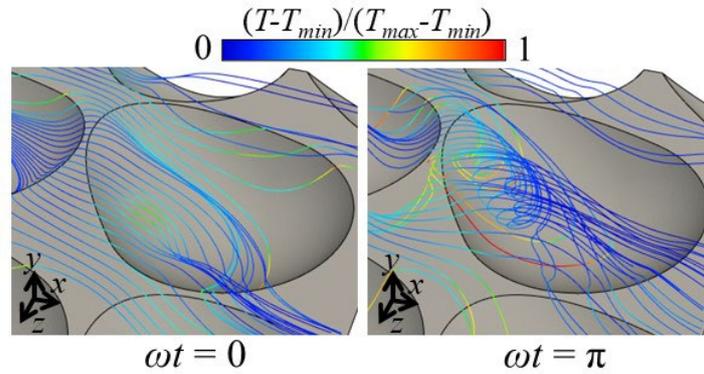


図8 30度 in-line 配列での LES 解析による位相平均場の流線と温度分布（左図が位相  $\omega t=0$ , 右図が位相  $\omega t=\pi$ , 流線の色で流体温度を表示,  $Re=25,000, St_D=0.3, \Delta U/U_m=0.14$ ）

(3) フィルム流の伝熱実験では渦放出周波数のストローハル数で規格化したストローハル数比  $0\sim 1.0$  で計測を行い, 30度 in-line 配列のブロー比 1.0, ストローハル数比 0.3 ( $St_D$ =約 0.2), 流速振幅 0.10 では熱伝達率が 9%上昇, 正味熱流束低減率も 6%上昇した。

今後の展開について以下説明する。上記の通り, 片側ディンプル面チャンネル流において比較的低いストローハル数(周波数)での脈動付与は熱伝達率, 伝熱性能係数を向上させた。しかし, 一部の幾何学パラメータは固定であり, また, ディンプル面による影響層厚さの定量的把握も不十分である。そこで 2023 年度からの科研費課題では, チャンネル脈動流に焦点を絞り, 数値解析と PIV の結果にモード解析 (POD(Proper Orthogonal Decomposition)など) や位相平均を適用し, より多くの幾何学パラメータ (図2のディンプル前縁角度  $\theta$ , ディンプル深さ  $\delta$ ) を変化させ, より伝熱促進に効果的な形状とその促進原理を調べる。さらに, 評価関数としてディンプル面側の値だけでなく対向平滑面のせん断応力とヌセルト数を加えることで, 対向面に影響を与えない (ディンプル面 (粗面) による影響層厚さの小さい) 粗面形状と脈動条件を探索する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 村田章	4. 巻 61
2. 論文標題 ガスタービン翼の強制対流内部冷却と翼後縁部フィルム冷却	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本伝熱学会誌	6. 最初と最後の頁 40-49
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 Yamamoto Shohei, Murata Akira, Oho Katsumi, Hayakawa Chihiro, Hayakawa Shumpei, Iwamoto Kaoru	4. 巻 143
2. 論文標題 Pulsating Film-Cooling Flow Over Smooth Cutback Surface at Airfoil Trailing Edge Measured by 2D3C-PTV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Heat Transfer	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4051669	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本翼, 村田章, 猪熊健人, 岩本薫
2. 発表標題 ティアドロップディンプルを敷設したチャネル脈動流における乱流熱伝達のPOD解析
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村真慈, 村田章, 猪熊建登, 岩本薫
2. 発表標題 ガスタービン翼後縁部カットバック面上フィルム冷却性能の過渡応答法計測（ティアドロップディンプル傾斜角度と冷却流脈動化の影響）
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第29期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 猪熊建登, 村田章
2. 発表標題 衝撃波の連続付与によるティアドロップディンプル敷設壁面の乱流熱伝達促進
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hayakawa, C., Murata, A., Inokuma, K., and Iwamoto, K.
2. 発表標題 Film Cooling Flow over Cutback Surface at Airfoil Trailing Edge Measured by Three-component Particle Tracking Velocimetry
3. 学会等名 2nd Asian Conference on Thermal Science, Oct. 3-7, 2021, Fukuoka, ACTS-1209 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪熊建登, 村田章, 矢和田祐己, 岩本薫
2. 発表標題 重畳波形をもつ脈動流がティアドロップディンプル面の伝熱総合性能に与える影響のLES解析
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林津平, 村田章, 猪熊健人, 岩本薫
2. 発表標題 脈動流がティアドロップディンプル面の伝熱総合性能に与える影響の過渡応答法計測
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第28期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本翼, 村田章, 中村真慈, 猪熊健人, 岩本薫
2. 発表標題 ガスタービン翼後縁部フィルム冷却総合性能にティアドロップディンプル面形状と脈動冷却流が与える影響
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢和田祐己, 村田章, 猪熊健登, 岩本薫
2. 発表標題 脈動流がディンプル面の熱伝達性能に与える影響のURANS・LES解析
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早川千紘, 村田章, 清水皐佑, 猪熊建登, 岩本薫
2. 発表標題 多断面3成分PTV計測による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フィルム冷却流脈動化の影響評価
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪熊建登, 村田章, 早川洋人, 中村真慈, 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のフィルム冷却性能に与える冷却流の脈動周波数の影響
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村真慈, 村田章, 早川洋人, 猪熊建登, 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フィルム冷却総合性能に脈動冷却流が与える影響
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

村田研究室 研究紹介 <a href="https://www.mm1ab.mech.tuat.ac.jp/mm1ab/research/research-gt-j.shtml">https://www.mm1ab.mech.tuat.ac.jp/mm1ab/research/research-gt-j.shtml</a>
---

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
研究協力者	岩本 薫  (IWAMOTO Kaoru)		
研究協力者	齋藤 博史  (SAITO Hiroshi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------