

氏名	ししど まさこ 宍戸 昌子
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第335号
学位授与年月日	令和3年9月24日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科機械・社会環境システム工学専攻
学位論文 題目	流れ制御片側デバイスによるフィルム冷却性能向上に関する研究
学位審査委員	主査 教授 船崎 健一 副査 教授 柳岡 英樹 副査 教授 上野 和之

論文内容の要旨

ガスタービンは発電機用や航空機エンジン等に用いられる原動機である。また、再生可能エネルギーの系統大量投入時代を迎え、ベース電力の供給のみならず負荷変動に対する急速な応答を有するガスタービンへの期待が高まっている。このようなガスタービンの高効率化手法としてタービン入口温度 TIT(Turbine Inlet Temperature)の上昇が挙げられる。TIT の上昇には冷却技術の進歩が大きく貢献しており、特にフィルム冷却の性能向上の寄与が大きい。

本研究では、過去の研究で高いフィルム効率増加効果を有することが確認されている DFCD を基に、その片側だけを冷却孔上流に設置するデバイス、すなわち単独の流れ制御片側デバイス FCD（以下、片側 FCD または OFCD と称する）の性能評価について調査している。通常の丸形の冷却孔について冷却孔周辺を変化させる手法でフィルム冷却を対象に、タグチメソッドによる最適な形状と OFCD のフィルム冷却効率を調査目的としている。そして、新規デバイスの提案を行っており、全6章で構成されている。

第1章は緒言であり、本研究の研究背景、フィルム冷却概要、過去に提案された流れ制御技術、本研究における流れ制御技術、そして、本研究の目的を述べている。現代社会において、ガスタービンは欠くことの出来ない原動機となっており、社会生活を支えてきた。発電機用ガスタービンにとって、効率化の一途を辿りタービン入口温度 TIT (Turbine Inlet Temperature) の上昇と冷却技術の向上が、貢献度の大きいものになっている。特に、フィルム冷却については、技術の進歩を示す指標ともなるものである。過去に行われてきた流れ制御技術の紹介と、本

研究における流れ制御手法を考案するまでに至った経緯と比較を行っている。

第2章は実験及び実験手法であり、岩手大学庶流の簡易吸い込み式風洞実験装置について概要及び詳細な計測機器について説明を行っている。フィルム冷却性能の評価指標には主としてフィルム冷却効率を用いている。実験的にフィルム冷却効率を計測する方法として感圧塗料 (PSP) 法を用いている。その特徴としては、励起光に対する蛍光・燐光の強度が周囲の酸素分圧に依存するというものであり、二次空気流れに二酸化炭素を使用し吹き出し比を変化させることによりフィルム冷却効率を熱的な方法等よりも正確に計測することが可能である。PSP は、温度依存性があるために、ペルチェ素子を用いて温度をコントロールしながら、酸素分圧と発光強度の関係を求めている。

第3章は、数値解析手法の説明を解説している。計算ソルバーとして ANSYS® CFX® を用い、RANS による解析を実施した。乱流モデルには、過去の調査結果を元に、予測性能が比較的良好な SST モデルを採用した。格子生成ソフトには、ANSYS® ICEM CFD™ を用い、壁近傍及びそれ以外の場所での格子解像度を考慮しながら、非構造格子で格子生成を行った。主流側領域の格子生成では、使用ソフトの機能であるメッシュサイズ (MS ; 格子の一辺の最大値) を層状に使い分け、格子解像度と計算負荷の間のバランスを図っている。試験と数値解析の比較を行うとともに、実験では把握できない流れ場の詳細を理解することを目的としているのであるが、実験より安易にできるというメリットがあり、最適化を行うことも可能となる。

第4章は、OFCDの性能調査についての内容である。先行研究による調査はDFCDの調査が主流であったのでOFCDの研究に至った経緯を明らかにした。本研究では、丸形冷却孔によるフィルム冷却を対象に、今回新たに提案した片側デバイスOFCDが、空力損失を制御しつつDFCDなどの両側FCDと同等のフィルム冷却性能向上を有し得るかの調査を、RANS解析及びPSP法を用いたフィルム効率計測を通じて行った。5種類のOFCDに対するCFD解析の結果から、孔ピッチ方向及び流れ方向への冷却空気付着性の改善が確認された。また、DFCD及びV字デバイスの両側デバイスを比較対象に選び、フィルム効率、NHFR及び空力損失についての比較を行った。その結果、フィルム効率については両側デバイスには及ばないものの、OFCDはNHFR及び空力損失の点では両側デバイスよりも良好な性能を示しうることを確認した。

第5章では、まずタグチメソッドによる最適形状探索手法を説明している。本研究においては、OFCDの改良手法は、18直交表を利用した。それを基に3Dプリントで形状を作成して試験を行った。その結果、フィルム冷却効率の高い2つの形状を見出した。また、数値計算においても実験で見出された形状のフィルム冷却効率が高いことが分かった。さらに詳細な流れ解析を行い、流れの可視化結果から、高いフィルム冷却効率発生のメカニズムを検討した。

第6章は、結言である。本研究を通じて、高いフィルム冷却性能を有しつつDFCDよりも低損失のデバイスであるOFCDの有効性を示した。

論文審査結果の要旨

申請された学位論文は、発電機用や航空機エンジン用ガスタービンで使用される冷却タービン翼のフィルム冷却性能向上に関する新規提案を展開しているものであり、以下に示す6つの章で構成されている。

第1章は、タービンにおけるフィルム冷却技術の進化について文献調査を行った結果を紹介している。革新的なフィルム冷却技術としては出口形状を工夫した *shaped hole* があり、関連する研究が現在まで数多く行われているが、本研究で取り上げている冷却孔周囲の形状変化についての研究例は少ない。しかし、最近製造コスト等の観点から注目が集まってきており、本研究でもこの方向で新たな提案をしている。関連研究の丁寧な調査が行われており、それを元に研究の方向性を慎重に探っている。

第2章は実験手法について述べている。フィルム冷却の性能評価は、フィルム冷却効率と熱伝達率という伝熱的指標と、空力損失という空力的指標を用いて行われるが、その内最も重要な指標はフィルム冷却効率である。フィルム冷却は周囲よりも低温の冷却空気によって冷却対象物を遮蔽することであるが、その遮蔽の状況は主流と冷却空気の乱流混合に大きく影響を受ける。これに着目し、熱移動と物質移動の類似性を用いた感圧塗料 (PSP) 法が本研究で採用されている。PSPからの発光 (蛍光・燐光) 現象は周囲の酸素分圧に依存することから、酸素濃度ゼロの異種ガス (本研究では二酸化炭素) を冷却空気と見立て、周囲との乱流混合により酸素濃度が上昇する割合を発光強度の変化で計測することでフィルム冷却効率を求めている。評価手法としては、較正装置で発光強度と酸素分圧の関係を予め求めておく *a priori* 発光強度法を採用している。冷却孔下流のフィルム冷却効率計測には、簡易型の吸い込み式風洞内に設置された平板試験装置を用いている。実験手法としては最新のものであり、信頼性の高い実験を行っているとは判断できる。

第3章では、数値解析について詳述されている。解析ソルバー、計算格子生成には汎用ソフト (ANSYS CFX, ANSYS ICEM-CFD) を用い、定常 RANS 解析を行っている。壁面近傍での格子生成には十分配慮しており、格子点数もこの種の問題で用いられる標準的な点数よりも多く、格子依存性の確認もされていることから、十分に信頼に足る計算を行っているとは判断できる。

第4章では、渦の非対称性がフィルム冷却効率改善の効果を維持するという知見をヒントとして、DFCDの片側だけを冷却孔上流に設置するデバイス、すなわち単独の流れ制御片側デバイス FCD (以下、片側 FCD または OFCD と称する) の性能評価について調査している。DFCDはその下流に効果的にデバイス由来の渦を発生させ、最もシンプルな丸孔タイプの冷却孔でも劇的にフィルム冷却効率を高めることが知られているが、その分熱伝達率や空力損失も増加してしまうという難点が以前から指摘されていた。その難点を解決する方法として、OFCDが提案され

ている。調査方法としては、PSP法によるフィルム冷却効率分布とCFDとの比較によりCFDの予測精度を検証した後、CFDによってNHFR (Net Heat Flux Reduction) や空力損失を数種類の配置案に対して算出し、DFCD やV字モデルと比較している。その結果として、OFCD が有望な提案であることを明らかにしている一方で、空力損失については改善の余地があることも示されている。

第5章では、第4章でのOFCDの有効性と課題を踏まえ、底面部の長さを半減したモデルをベースとして、タグチメソッドによる最適形状の探索を行っている。また、その過程で有望な形態のものに対する詳細流れ解析を実施し、新規デバイスの提案を行っている。

第6章では本研究で得られた知見がまとめられている。

ガスタービンは現在電力需要を賄う火力発電システムの主要な機械であるが、再生可能エネルギーの系統大量投入時代を迎え、ベース電力の供給のみならず負荷変動に対する急速応答性という特性から今後ますますガスタービンへの期待が高まっている。このようなガスタービンの高効率化手法としてタービン入口温度TIT(Turbine Inlet Temperature)の上昇があり、その実現に向けてフィルム冷却の性能向上の寄与が大きいことから、本学位論文の取組は十分に意義深いものである。得られた知見は、熱流体力学の学問的推進とともにガスタービンエンジンの更なる高効率化に貢献し、実行性のある脱炭素化推進に大いに貢献するものと期待される。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

原著論文名 (1編を記載)

流れ制御片側デバイスによるフィルム冷却性能向上に関する研究, 宍戸昌子, 船崎健一, 谷口英夫, 河村朋広, 齋藤涼, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 48, No. 5, 2020年9月