

氏名(本籍)	山脇栄道(埼玉県)
学位の種類	博士(工学)
学位授与番号	甲第 233 号
学位授与日付	平成 16 年 3 月 25 日
専攻	環境エネルギーシステム工学専攻
学位論文題目	高性能タービン翼冷却構造の研究 (Research of high performance turbine cooling structure)
学位論文審査委員	(主査) 教授 熊田雅彌 (副査) 教授 安里勝雄 教授 若井和憲 助教授 三松順治

## 論文内容の要旨

ガスタービンの効率向上には、冷却空気流量を最小限に抑えて、タービン入口温度を上げることが有効である。しかし、対流冷却する従来の冷却方法には限界があり、さらに作動温度を上げていくには、新しい形態の冷却方法の開発が必要である。産業用ガスタービンでは、蒸気や水を新たな冷却媒体として活用する新たな冷却形態が想定されているが、航空用ガスタービンには適用が困難であり、新しい代替冷却方法の開発が待たれている。

そこで、本研究ではヒートパイプを利用した新しい冷却システムとして、空冷されている静翼にヒートパイプを取付けて、静翼に流入する熱の一部を外部へ放熱させて冷却し、その放熱量に相当する冷却空気削減を図るシステムを提案した。このシステムの成立性を評価するには、始動性、最大許容熱流束、重力加速度の影響等、ヒートパイプ特有の特性と熱輸送能力の把握が必要であり、常温時に固体または液体である作動媒体の違い、非凝縮ガス封入の有無、ヒートパイプシールの耐熱温度の違いを考慮する必要がある。

一方、ヒートパイプのみでは冷却が不足する領域は、従来の対流冷却が不可欠となる。タービン翼全体の冷却空気を最小限に抑えるには、対流冷却部についても新たな冷却構造を開発し、冷却空気量を削減することが必要である。そこで、高い熱伝達率を実現できるインピンジ冷却と伝熱面積拡大を図るためのピンフィンを組み合わせた複合型インピンジ冷却構造を提案し、実績のある精密鋳造で製造可能な多層の冷却構造を検討した。

本論文は、7章より構成され、以下に各章の要旨を記述する。

第1章では、ガスタービンの現状を総括し、高効率化のためには、冷却システムの開発が如何に重要であるか述べている。そこで、本システム提案の背景と意義を述べ、本研究の目的と概要を記述している。

第2章では、冷却システム成立性を評価するに必要となるヒートパイプの基本的な伝熱特性把握するため基礎的な試験を行い、ヒートパイプの性能予測方法を明確にした。これまでのヒートパイプの性能評価結果を整理し、それを基にタービン翼に適用可能なヒート

パイプの材料・構造・寸法の設定を行い、赤外線加熱炉を用いて冷却システムを模擬した装置で熱輸送量と始動特性について評価試験をした。その結果、一般的に入手可能なヒートパイプとして、ニッケル焼結金属ウイックを有するナトリウムヒートパイプに、非凝縮ガスとしてアルゴンガスを封入した耐熱金属製ヒートパイプは、加熱部最大熱流束  $38\text{W}/\text{cm}^2$  以上実現可能であることがわかった。さらに、その結果を基に、理論的に性能予測する手法を整理し、試験結果と比較することにより、その妥当性を検証した。

第3章では、冷却システムとしての成立性を評価する手法を検討し、ヒートパイプの伝熱特性の実験結果を基に、航空機用ガスタービンでの成立性を評価した。成立性の条件として、冷却システム適用による冷却空気量削減が比推力の向上、すなわちガスタービンの重量低減が本システムによる重量増を相殺することとした。冷却空気削減量について、タービン冷却に係る一般的なパラメータを設定して、予測する手法を提示し、代表的なガスタービン仕様について成立性の評価を行った。

第4章では、対流冷却部の冷却空気量削減が可能な複合型インピンジ冷却構造の選定を行い、試作した拡大モデルによる冷却性能実験を行った。冷却構造として高い熱伝達率が得られるインピンジ冷却構造に多数のピンを立てて伝熱面積を増大させる、従来に比べ高効率に冷却できる構造を1次元熱伝導解析によって選定した。選定した2種類の複合型インピンジ冷却構造の平板上拡大モデル試験片を鋳造で製作し、燃焼ガス流下でガスタービンの作動条件と等価な条件下で冷却性能を評価した。その結果、当初設定した性能予測手法では、ピン密度の増加による伝熱面積増加量の予測が過大評価されるが判明した。

第5章では、冷却構造内部のCFD解析を行い、冷却性能予測手法の改善について検討し、CFD解析を援用した冷却性能予測手法を新たに構築し、冷却性能試験結果でその妥当性を検証した。まず、冷却性能試験条件に合わせ、メタル部の熱伝導も連成させたCFD解析を行い、冷却構造内部の熱伝達率分布を評価した。その結果を分析し、当初設定した1次元解析手法での仮定を見直した。一方で、CFD解析の予測精度の限界を考慮し、ベースとする冷却構造からの違いのみを評価することで、任意の複合型インピンジ構造の冷却性能予測ができる手法を構築し、冷却性能試験結果でその妥当性を検証した。

第6章では、ヒートパイプ冷却システム複合型インピンジ冷却構造を組み合わせた総合冷却性能を評価するとともに、今後の展望について述べた。

第7章は、以上の結果をまとめた結論である。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、ガスタービンの効率向上には、冷却空気流量を最小限に抑えて、タービン入口温度を上げることが有効であるが、しかし、対流冷却する従来の冷却方法には限界があり、さらに作動温度を上げていくには、新しい形態の冷却方法の開発が必要であることを背景としている。産業用ガスタービンでは、蒸気や水を新たな冷却媒体として活用する新たな冷却形態が想定されているが、航空用ガスタービンには適用が困難であり、新しい代替冷却方法の開発が待たれているのが現状である。

そこで、本研究ではヒートパイプを利用した新しい冷却システムとして、空冷されてい

る静翼にヒートパイプを取付けて、静翼に流入する熱の一部を外部へ放熱させて冷却し、その放熱量に相当する冷却空気削減を図るシステムを提案した。このシステムの成立性を評価するためには、始動性、最大許容熱流束、重力加速度の影響等、ヒートパイプ特有の特性と熱輸送能力の把握が必要であり、常温時に固体または液体である作動媒体の違い、非凝縮ガス封入の有無、ヒートパイプシェルの耐熱温度の違いを考慮する必要がある。

一方、ヒートパイプのみでは冷却が不足する領域は、従来の対流冷却が不可欠となる。タービン翼全体の冷却空気を最小限に抑えるには、対流冷却部についても新たな冷却構造を開発し、冷却空気量を削減することが必要である。そこで、高い熱伝達率を実現できるインピンジ冷却と伝熱面積拡大を図るためのピンフィンを組み合わせた複合型インピンジ冷却構造を提案し、実績のある精密鋳造で製造可能な多層の冷却構造を検討する重要性を記述している。

第1章では、ガスタービンの現状を総括し、高効率化のためには、冷却システムの開発が如何に重要であるか述べている。そこで、本システム提案の背景と意義を述べ、本研究の目的の重要性を記述している。

第2章では、冷却システム成立性を評価するに必要となるヒートパイプの基本的な伝熱特性把握するため基礎的な試験を行い、ヒートパイプの性能予測方法を明確にした。これまでのヒートパイプの性能評価結果を整理し、それを基にタービン翼に適用可能なヒートパイプの材料・構造・寸法の設定を行い、赤外線加熱炉を用いて冷却システムを模擬した装置で熱輸送量と始動特性について評価実験し、その結果、一般的に入手可能なヒートパイプとして、ニッケル焼結金属ウイックを有するナトリウムヒートパイプに、非凝縮ガスとしてアルゴンガスを封入した耐熱金属製ヒートパイプは、加熱部最大熱流束  $38\text{W}/\text{cm}^2$  以上実現可能であることを確認している。さらに、その結果を基に、理論的に性能予測する手法を整理し、試験結果と比較することにより、その妥当性を検証した意義は実用化するために不可欠なことである。

第3章では、冷却システムとしての成立性を評価する手法を検討し、ヒートパイプの伝熱特性の実験結果を基に、航空機用ガスタービンでの成立性を評価した。成立性の条件として、冷却システム適用による冷却空気量削減が比推力の向上、すなわちガスタービンの重量低減が本システムによる重量増を相殺するという実的な仮定で行っている。冷却空気削減量について、タービン冷却に係る一般的なパラメータを設定して、予測する手法を提示し、代表的なガスタービン仕様について成立性の評価を行い、成立することを示した。

第4章では、対流冷却部の冷却空気量削減が可能な複合型インピンジ冷却構造の選定を行い、試作した拡大モデルによる冷却性能実験を行った。冷却構造として高い熱伝達率が得られるインピンジ冷却構造に多数のピンを立てて伝熱面積を増大させる、従来に比べ高効率に冷却できる構造を1次元熱伝導解析によって選定した。選定した2種類の複合型インピンジ冷却構造の平板上拡大モデル試験片を鋳造で製作し、燃焼ガス流下でガスタービンの作動条件と等価な条件下で冷却性能を評価した。その結果、当初設定した性能予測手法では、ピン密度の増加による伝熱面積増加量の予測が過大評価されるが限界を示した。

第5章では、冷却構造内部のCFD解析を行い、冷却性能予測手法の改善について検討

し、CFD 解析を援用した冷却性能予測手法を新たに構築し、冷却性能試験結果でその妥当性を検証した。まず、冷却性能試験条件に合わせ、メタル部の熱伝導も連成させた CFD 解析を行い、冷却構造内部の熱伝達率分布を評価した。その結果を分析し、当初設定した 1 次元解析手法での仮定を見直した。一方で、CFD 解析の予測精度の限界を考慮し、ベースとする冷却構造からの違いのみを評価することで、任意の複合型インピンジ構造の冷却性能予測ができる有効な手法を構築し、冷却性能試験結果でその妥当性を検証した。

第 6 章では、ヒートパイプ冷却システム複合型インピンジ冷却構造を組み合わせた総合冷却性能を 1 次元解析で評価し、冷却空気量で 55% 削減、または同一冷却空気量でタービン入口温度を 260℃ 上昇させることが可能である見通しを得ている。今後の展望について述べ、より実現の可能性を明確にしている。

以上の結果より、ヒートパイプ冷却システム複合型インピンジ冷却構造は、その実現性が実証された。これらの結果は、学問的に重要であると同時に、工業的にも貴重な知見を与えるもので、学位論文に値すると判断される。

## 最終試験結果の要旨

学位論文の内容および関連する専門分野に関する口頭試問の結果、学位申請者は学位授与に相応した学力を有することが確認されたので、最終試験に合格と判断した。