

	とくやまゆうき
氏 名	徳 山 雄 己
本 籍（国 籍）	岩 手 県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	工博 第263号
学位授与年月日	平成28年 3月23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	流体－構造連成効果を考慮したロケットエンジン用 高効率高信頼性タービン開発に関する研究
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 副査 教授 山本 悟

## 論 文 内 容 の 要 旨

ロケットは人や人工物を宇宙空間に投入する現状唯一の輸送手段である。その推進を担うロケットエンジンでは、液体の燃料と酸化剤を燃焼室に高圧で供給するためにターボポンプが用いられ、そのターボポンプの駆動はタービンが担っている。したがって、ロケットをより正確に打ち上げるにはタービンの高信頼性化が重要となる。また、エンジンサイクルにもよるが、タービンの駆動にはガス化させた推進用燃料の一部を用いるため、より少量の燃料でタービンを駆動できる高効率タービンも強く要求される。このようなタービンへの要求に対し、設計時のタービン形態の選択肢としては全周挿入タービンと部分挿入タービンがある。前者は、一般的な航空エンジンや発電用ガスタービンで用いられるものと同様に、ノズル全周から駆動ガスを挿入するものである。一方、後者はノズル入口を周方向に部分的に塞ぐものである。全周挿入タービンでは、タービンに要求される出力がさほど小さくなく、その結果タービン流量も少ない場合、流量にノズル面積を合わせようとするタービン径や翼高さを小さくせざるを得ない場合があり、いずれもタービン効率の低下を招く。このような場合、ノズル入口を部分的に塞ぐことでタービン径や翼高さを確保し、高効率化を図るというコンセプトが部分挿入タービンである。しかし、部分挿入タービンでは、強制的なノズル閉塞に伴う付加的な損失による効率低下や動翼に対する低周波な流体力変動のような構造強度面での懸念事項も存在する。したがって、どちらのタービン形態がより高効率高信頼性に適しているかを判断するには、同じ要求仕様で設計された各タービンの比較研究が必要となるが、そのような研究報告は過去になされていない。そ

ここで、本研究ではこれらタービンを対象として、CFD による流れ場把握と空力性能の直接比較評価、CFD と FEM を用いた流体-構造一方向連成解析によるタービン構造強度の直接比較評価を実施する。そして、空力性能と構造強度の点で総合的に優れたタービン形態を判断し、新たな設計指針を獲得することを目的とする。

CFD 解析の結果、部分挿入タービンでは非定常で極めて周方向に不均一な流れ場が形成されることが確認された。特に、ノズル閉塞部へ動翼が侵入する側では、ノズルガスの加速や閉塞部背後への周方向の流れ込みが表れ、その結果動翼に対するインシデンスが増加して瞬間的に周方向負荷が大きくなることが確認された。また、閉塞部背後では流れがハブ側から大規模に剥離することや閉塞ノズルの滞留ガスと周方向ガスとのミキシングなどによる損失が確認された。また、部分挿入タービンでは、ディスクキャビティ内ガスの主流への吹き出しや主流のキャビティ内への吸い込みも確認され、その流れ場は極めて複雑なものであることがわかった。しかしながら、同じ要求仕様で設計された全周挿入タービンと部分挿入タービンのタービン効率を比較したところ、部分挿入タービンの方が高効率となり、部分挿入損失を加味しても速度比を大きくとることの有用性が確認された。

流体-構造一方向連成解析では、非定常 CFD 解析によって得られた変動流体力を FFT 処理することで周波数毎に分離し、変動振幅が大きい周波数成分やキャンベル線図上で設計回転数近くでタービン固有振動数と一致するような周波数成分に対する周波数応答解析を実施した。その際、実際に想定されるタービン材料である Inconel718 と 64 チタンそれぞれについて解析を行った。周波数応答解析の結果、全周挿入タービン・部分挿入タービンそれぞれにおいて、荷重振動数と固有振動数が一致すると極めて強く応答するモードが存在することが確認されたが、本研究で対象としたタービンでは設計点近くに材料疲労限度に至るような共振点は存在しないことが確認された。また、部分挿入タービンではタービン周速度が大きいため、遠心力によって大きな応力が翼根本に作用し、Inconel718 では材料の降伏応力を超えてしまうことが明かとなった。しかし、64 チタン材を用いることで、最大応力を降伏応力未満に抑えられることがわかった。

以上の検討から、本研究で扱ったタービン要求仕様においては、64 チタン材を用いた部分挿入タービンとして設計することによって、高効率高信頼性タービンの実現が期待できると考えられる結果を得た

## 論文審査結果の要旨

本論文では、人や人工物を宇宙空間に輸送する唯一の手段であるロケットのエンジン用ターボポンプタービンの高性能化、高信頼性に関する大規模かつ高精度非定常数値解析（流れ解析、構造解析）を行っている。

ロケット用エンジンでは高信頼性が最重要設計要件となるが、衛星打ち上げビジネスの激

化などにより、次世代ロケット開発には打ち上げコストの削減が強く求められている。我が国では、次世代ロケットエンジン用サイクルには、エキスパンダーサイクルなど比較的簡素なシステムが採用される傾向にあるが、そのシステムの特性的ため、より少量の燃料でタービンを駆動できる高効率タービン開発も強く要求されている。このような要求に対し、特に上段エンジン用タービン形態としては全周挿入タービンと部分挿入タービンがある。前者は、ノズル全周から駆動ガスを挿入し、後者はノズル入口を周方向に部分的に塞ぐものである。いずれのタービン形態にも一長一短があり、両者の直接的な比較研究は日本では行われたことがなく、かつ世界的に見ても極めてまれであり、新型ロケットエンジン開発上の大きな課題の一つとである。

本論文では、同一の仕様（流量、出力、出口圧力条件等）の下で新たに設計された部分挿入式タービンと全周挿入式タービンと対象として、準3次元または3次元高精度非定常流れ解析を2段タービンまたは単段タービンの非定常流れ場及び空力性能解析に適用することで、両者の直接的な比較評価を国内で始めて実施するとともに、流体-構造一方向連成解析によるタービン構造強度の直接比較評価も実施するなど、極めて新規性に富む研究を展開している。

以上の結果として、同じ要求仕様で設計された全周挿入タービンと部分挿入タービンのタービン効率を比較したところ、部分挿入タービンの方が高効率となり、部分挿入損失を加味しても速度比を大きくとることの有用性が確認されたこと、流体-構造一方向連成解析での周波数応答解析の結果、全周挿入タービン・部分挿入タービンそれぞれにおいて、荷重振動数と固有振動数が一致すると極めて強く応答するモードの存在が確認されたが、本研究で対象としたタービンでは設計点近くに材料疲労限度に至るような共振点は存在しないことも確認されている。

これらの検討から、本研究で扱ったタービン要求仕様においては、64 チタン材を用いた部分挿入タービンとして設計することによって、高効率高信頼性タービンの実現が期待できるとの結果を得ている。

以上、本論文は、空力性能と構造強度の点で総合的に優れたタービン形態を判断し、新たな設計指針を獲得するという目標を達成しており、得られた知見は学術的にも工業的にも非常に重要なものである。

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）

徳山雄己，船崎健一，加藤大雅，島垣満，内海政春、部分流入機構を有するロケットエンジン用超音速タービンにおける非定常流体力とタービン効率に関する研究、ターボ機械、43巻5号，pp.55-61、2015