

子午面粘性流れ解析に基づく逆解法と最適化手法によるターボ機械の空力設計

岡, 信仁

<https://hdl.handle.net/2324/1931902>

出版情報：九州大学, 2017, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：やむを得ない事由により本文ファイル非公開（3）

氏 名 : 岡 信仁

論 文 名 : 子午面粘性流れ解析に基づく逆解法と
最適化手法によるターボ機械の空力設計

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、ターボ機械の高性能化を目指し、革新的最適空力設計法を構築した成果について述べる。これまでターボ機械の空力設計は、一次元理論を基本として経験的なロスモデルを導入することで実施されてきており、この基礎理論は過去 40 年以上大きく変化していない。このような手法の適用では、羽根車周りの子午面流れ場にはく離や流線の曲率が発生する半開放形ターボ機械やハブおよびシュラウドなどの端面境界層が著しく発達するターボ機械の高性能化に技術的課題が残っている。本課題を解決するために、子午面粘性流れ解析に基づき羽根車周りのく離や流線曲率、ならびに端面境界層の影響を評価しながら逆解法により翼列を設計する手法を構築する。また、この「子午面粘性流れ解析に基づく逆解法翼列設計」により羽根車の空力設計を実施するとともに、「遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法」により、最適解の探索を行うことで、子午面形状と羽根車の空力負荷分布の連成最適化を実施し、これまでの空力設計技術では実現できなかった大幅な性能向上を実現する最適空力設計法を構築する。

本論文は全6章からなり、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、ターボ機械の空力設計法について近年の動向を述べた。また、研究対象とする、外部流れと内部流れが混在する半開放形ターボ機械のレンズ風車およびケーシングに覆われた内部流れ場で高速作動する遠心圧縮機について、それらの流体力学的な特徴を述べた。

第2章では、本研究で用いた子午面粘性流れ解析手法および本手法に基づいた逆解法翼列設計手法の概要を述べた。子午面粘性流れ解析手法は、軸対称流れを仮定した上で、非粘性の翼作用を翼力としてモデル化し、支配方程式に体積力として導入することにより、ターボ機械羽根車周りの流れ場を解析する手法である。また、本解析手法は乱流モデルを用いた RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 解析であることから、ケーシングなどの端面上に発達する境界層や逆圧力勾配によりもたらされるく離の影響を適切に評価することが可能である。羽根車の翼素設計において、レンズ風車では「二次元翼素理論」を用いた翼素設計を、遠心圧縮機では「二次元逆解法」を用いた翼素設計を実施する。これらの空力設計手法はいずれも設計条件として羽根車の空力負荷分布を与え、その空力負荷分布を実現する翼形状を求める逆解法となっている。

第3章では、本研究で用いた実数値遺伝的アルゴリズム (GA) による最適化手法について、その概要を述べ、アルゴリズムの検証を実施した。

第4章では、本空力設計手法によりレンズ風車の最適空力設計を実施した。本最適空力設計では、目的関数として出力係数と集風効果係数を用い、設計変数としてレンズ体の子午面形状および羽根車のスパン方向翼負荷分布を採用した。得られた最適設計結果の中から代表的な設計例を三種抽出し、過去の既存設計例と合わせて、三次元定常 RANS 解析および風洞試験を実施し、空力性能および流れ場を相互に比較した。その結果、いずれの最適設計例も既存設計例を大幅に凌駕する空力性能を発揮し、最高性能を示した設計例では、風車における Betz 限界(出力係数 $C_{p^*}=0.593$)を超える性能($C_{p^*}=0.62$)を有することが判明した。これにより、世界で初めて Betz 限界を超える風車を開発することに成功した。また、レンズ風車まわりの流れ場について三次元定常 RANS 解析および流速測定試験により比較した結果、最適設計例においては、いずれもつば後方およびレンズ体内面のはく離が抑制されており、これらの抑制は最適設計例のレンズ体ディフューザ部における開き角の縮小および羽根車先端側の高い翼負荷分布によりもたらされていることが明らかになった。さらに、本最適設計例に対して Jamieson の理論に基づいたディフューザ付き風車としての出力係数の理論限界値を求めると、その値は Betz 限界よりも大きな値($C_{p^*}=0.729$)となった。すなわち、本最適設計例の性能は Betz 限界を凌駕しているものの、Jamieson の提唱するディフューザ付き風車の理論限界値を超えておらず、世界で初めて Betz 限界を超える性能を発揮する風車であるものの、性能改善の余地が残っていると言える。

第5章では遠心圧縮機の最適空力設計を実施した。本最適空力設計において、設計変数として設計翼負荷分布を、目的関数として断熱効率および全圧比を選定した。本最適空力設計によって得られた設計結果の中から4種の最適設計例を抽出し、三次元定常 RANS 解析によりそれらの空力性能および流れ場を評価した。その結果、本最適空力設計によりインペラの空力性能が向上し、前縁はく離および翼端漏れ渦の縮小などによる低速度域の減少および損失低下が確認された。前縁はく離および翼端漏れ渦に関するこれらの挙動は最適設計例での翼負荷分布の特徴である相対的に低い前縁翼負荷と密接にかかわっており、本最適空力設計により翼負荷分布が最適化された結果、損失の原因となる前縁はく離および翼端漏れ渦の発生が抑制され、性能向上を実現したことが明らかになった。また、本研究では三次元定常 RANS 解析結果をもとに、最も性能が良いと予想された最適設計例を試作し性能試験を実施した。性能試験から得られた空力性能を比較すると、設計回転数においては断熱効率を維持しつつ圧力比が向上し、75%回転数においては圧力比および断熱効率ともに向上することが判明した。

第6章は結言であり、本論文を総括している。