

論文の内容の要旨

論文題目 高高度滞空型無人機における圧縮機翼列の空力特性に関する研究

氏名 児玉 大樹

近年、無人航空機の性能は急速に向上しており、世界各地において様々な任務に投入されている。この無人航空機の中で、広範囲での情報収集や無線通信の中継基地などを任務とするものは高高度（高度 20[km]付近）を低速（亜音速）で飛行することが求められる。高高度での飛行が求められる理由は、1）民間航空機への安全性を確保するために民間航空機よりも高空を飛行する必要があること、2）高度の上昇と共に地上の情報収集を行える範囲、また地上へ情報を提供できる範囲が拡大されるため、3）高度 20[km]付近は風速が比較的穏やかであるためである。低速での飛行が求められる理由は、1）長い航続時間が求められるため空力抵抗を小さくする必要があること、また、2）大気のサンプルを採取する際に空力加熱や衝撃波によるサンプルの変異を防ぐ必要があるためである。このような任務を遂行する無人航空機は、特に高高度滞空型無人機と称されている。

高高度滞空型無人機に搭載されるジェットエンジンの内部流れは、空気密度の減少によってレイノルズ数が大きく低下する。一般に、低レイノルズ数域では境界層剥離の発生や二次流れの増大によってターボ機械の効率が急激に減少し、またサージマージンが狭くなることが知られている。このため、低レイノルズ数域で作動する圧縮機翼列の開発においては、レイノルズ数の影響を考慮しなければ、性能が大幅に劣化することになる。低レイノルズ数域で作動する翼列の空力特性を解明するための研究は現在までに種々行われてきたのであるが、未だ明らかではない事象が多く存在する。例えば、低レイノルズ数域での流れ場の計測は直線翼列風洞での実験において数多く行われてきたのであるが、回転翼列風洞での実験においては圧縮機性能の変化について主に計測されており、流れ場の変化についてはほとんど調べられておらず、レイノルズ数の低下によって三次元的な流れ場がどのように変化するかは明らかではない。また、レイノルズ数の低下によってサージマージンが狭くなるという報告がなされているが、レイノルズ数の低下によって失速特性がどのように変化するかということも明らかにはなっていない。更に、過去に行われた研究ではそれらのほとんどが低レイノルズ数且つ低マッハ数域の流れ場を対象としており、現在、高高度滞空型無人機のジェットエンジンで問題となっている低レイノルズ数且つ高マッハ数域の流れ場を対象とした研究は、その実験の困難さからあまり見られず、詳細な流れ場は明らかではない。

本研究は、高高度滞空型無人機に搭載されたジェットエンジンの圧縮機翼列における空力特性に関する知見を得ることが目的である。数値解析によって、レイノルズ数の低下による圧縮機特性の変化と翼列内三次元流れ場の変化の相関を調べ、損失増大とサージマージン減少に関するメカニズムを考察した。これらの知見により、低レイノルズ数域において作動する高性能な圧縮機翼列の開発に寄与することができると考えられる。

研究対象とする流れ場は、高高度滞空型無人機に搭載されたジェットエンジンの内部流れであり、低レイノルズ数且つ高マッハ数域となる。低レイノルズ数且つ高マッハ数域を対象とした研究は、実験を行う場合は実験設備に多大な費用を要し、また、数値解析を行う場合もそのような流れ場を対象とした研究例が少ないことから結果に対する信頼性が十分ではないと考えられる。一方で、低レイノルズ数且つ低マッハ数域においては実験結果が数多くあり、数値解析での研究も報告されている。

以上のような状況より、本研究においては、まず、低レイノルズ数且つ低マッハ数域において過去に行われた実験を対象として、実験と同様な数値解析を行い、解析結果を実験結果と比較した。その結果、全域乱流を仮定した数値解析手法では、レイノルズ数の低下による翼列性能の悪化は見られたものの、翼面境界層での剥離泡や層流剥離を再現できず、流れ場は実験結果と大きく異なる結果となった。一方で、乱流遷移のモデル化として乱流遷移点を指定することによって、レイノルズ数の低下による翼列性能の変化は実験結果と同様の傾向を示し、翼面境界層の挙動も実験結果とほぼ一致する結果が得られた。このことから、レイノルズ数の低下による翼列空力特性の調査においては、翼面境界層の剥離を模擬できるように乱流遷移をモデル化することが重要であり、これによってレイノルズ数の低下による翼列性能の変化や翼面境界層の挙動を再現することができると考えられる。

次に、遷音速回転翼列である NASA Rotor37 が高高度滞空型無人機の圧縮機翼列であることを想定して、地上、高度 10[km]、高度 20[km]において作動している状況の数値解析を行い、レイノルズ数の低下による圧縮機特性の変化と翼列内三次元流れ場の変化を考察した。その結果、作動高度の上昇によるレイノルズ数の低下によって、チョーク流量が減少し、また、圧力比と断熱効率が低下した。これは過去に行われた実験結果と同様な傾向を示しており、レイノルズ数低下の影響を定性的には捕らえることができていると考えられる。この圧縮機性能の低下の要因を調べるため流れ場の調査を行った結果、設計点近傍での作動においては、レイノルズ数の低下によって翼面境界層の剥離域が拡大し損失が増加している様子が見られた。一方で、レイノルズ数の低下によって翼負荷が減少したため、翼端漏れ渦による損失は減少した。また、失速点近傍での作動において流れ場の調査を行った結果、レイノルズ数が高い場合は翼端漏れ渦が形成されている付近において低マッハ数領域が形成されていた。よって、レイノルズ数が高い場合は、翼端漏れ渦によるブロックageが旋回失速開始過程に大きな影響を及ぼすと考えられた。一方で、レイノルズ数が低い場合は、翼端漏れ渦が形成されている付近において低マッハ数領域は形成されておらず、翼面境界層の剥離域において低マッハ数領域が拡大していた。よって、レイノルズ数が低

い場合は、翼面境界層の剥離域によるブロッキングが旋回失速開始過程に大きな影響を及ぼすと考えられた。このことから、レイノルズ数の低下によって失速に至るメカニズムが変化する可能性があることが示唆された。

以上要するに、本論文では数値解析によって高高度滞空型無人機における圧縮機翼列の空力特性の調査を行い、レイノルズ数低下による圧縮機性能の低下の要因を説明したものである。