

審査の結果の要旨

氏 名 手塚 亜聖

修士（工学）手塚 亜聖 提出の論文は、「3次元流れ全体安定性解析による定常流から振動流への遷移モードの解明」と題し、本文6章および付録5項から成っている。

大迎角をとる飛行体やブラフボディなどでは、背面の剥離流れの構造の変化によって空力特性が大きく変化するため、その遷移機構を明らかにすることが重要である。定常流から振動流へ流れ場の構造が遷移する現象については、円柱周りの2次元流れや球周りの3次元流れを対象に、これまで多くの実験的あるいは数値的研究がなされ、臨界レイノルズ数の存在とその前後における流れ場の変化の様子が調べられている。数値流体力学を用いた流れ場構造の遷移機構解明においては、近年、全体安定性解析法と呼ばれる手法が注目されている。これは、流れ場の解に微小な擾乱速度を加え、その時間発展を追跡して安定性を判定するものである。擾乱は、モードと呼ばれる空間分布パターンの重ね合わせで表現され、固有値実部が正となるモードが出現する際に、擾乱が増幅して流れ場の構造が変化すると理解される。このとき、固有値の虚部は変動の周波数を表している。これまで、全体安定性解析は定常流から振動流への遷移問題に適用され、臨界レイノルズ数の算出などにおいてその有効性が確認されている。しかし、定常対称流から定常非対称流への遷移現象や迎角をパラメータとした流れ場構造の遷移についてはまだ明らかにされていない。

このような観点から、筆者は細長物体の代表例として回転楕円体を選び、その周りの3次元流れに全体安定性解析を適用することで、定常非対称流の発生機構や流れ場構造に対する迎角とレイノルズ数の影響の解明に成功している。本論文は、剥離を伴う物体周りの流れとその空力特性の解明に際し有用な知見をもたらすものである。

第1章は序論で、剥離流れ場の構造の遷移や全体安定性解析に関するこれまでの研究を概観し、本論文の目的と意義を明確にしている。

第2章は、本論文で用いた非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の数値解析法および、流れの全体安定性解析方法について、その原理と手法の詳細が述べられている。

第3章は、本研究で作成した非圧縮性流れ全体安定性解析コードの検証である。まず、円柱周りの2次元流れを解析し、定常双子渦流れから振動流れに遷移する臨界レイノルズ数の値が、過去の研究結果と比べて妥当なものであることを示している。その際に、波長の長い大きな空間構造を持つ擾乱モードほど減衰しにくい傾向があることを指摘し、このことは後流の安定性に対する古典的解析法である2次元平行流の安定性解析による結果とも一致していることを見い出している。球周りの3次元流れでは、

円柱周りの2次元流れと異なり、定常で軸対称な流れから振動する流れに直接遷移せず、その間に軸対称性が失われた面対称の定常流れが出現する。筆者は、全体安定性解析の結果において非振動性モードに着目することで、軸対称流れから非軸対称流れへの遷移機構を明らかにしている。

第4章では、回転楕円体周りの3次元流れについて、レイノルズ数と迎角をパラメータとして変化させ、詳細な数値解析を行った結果とその考察が述べられている。すなわち、細長比4の回転楕円体では、全長でとったレイノルズ数が5000付近で定常流から振動流へと遷移するが、その中間領域において迎角0度では非軸対称、迎角をとった時には非面対称な流れが定常かつ安定なものとして存在することを見い出している。これら定常非対称流は固有値虚部がゼロとなる非振動性モードが不安定となるため励起されたものであり、対称流の解は不安定であることを全体安定性解析を用いて明らかにしている。また、このような定常非対称流が安定であるレイノルズ数領域が存在するには、物体の細長比や迎角に条件があると指摘している。全体安定性解析は定常流れの安定性を調べるものであるが、臨界レイノルズ数近傍であれば、得られたモードと固有値から流れ場のどの領域でどのような周波数の変動が卓越するかを推定することができ、遷移後の振動流の特性を理解することにも有用であることを明らかにしている。

第5章では、形状の影響を調べるため、底面を切り落とした回転楕円体や有限長の円筒などの物体周りの3次元流れについて数値解析および全体安定性解析を行っている。その結果、いずれの形状においても定常非対称な流れが安定となる場合に共通する特徴として再循環領域で渦線が閉じて輪となっていることを見い出している。また、このように渦線が閉じることが、3次元流れにおいて定常非対称流れが安定化する理由であり、2次元流との根本的な違いであると述べている。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

付録は5項から成り、計算結果の検証のために行った回転楕円体周りの定常非対称流れに関する風洞を用いた可視化実験、3次元流れ場の数値解析における一般座標系への変換の定式化、2次元平行流に対する安定性解析法の概要、モードの重ね合わせで擾乱成長後の流れ場を説明することの妥当性に関する考察、全体安定性解析の工学的応用の可能性、に関する説明がなされている。

以上要するに、本論文は数値流体力学と全体安定性解析を組み合わせることで、物体周りの剥離を伴う3次元流れ場が定常流から振動流に遷移する機構を解明し、定常から振動への遷移過程で非振動性のモードが不安定になる場合は定常非対称流れが生じることを明らかにしており、流体力学に新しい知見をもたらすとともに、飛行体の大迎角空力問題やブラフボディ流れへの適用を示した点で、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。