

## 論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 手塚重聖

3次元 Bluff Body 周りの大迎角流れには、3次元構造をした大規模な剥離領域が存在し、物体に働く空気力はこの剥離領域の影響を受ける。また、迎角やレイノルズ数をパラメータとして、剥離領域の構造は大きく変化する。本研究では3次元 Bluff Body 周りの大迎角流れとして、回転楕円体周り流れを扱うことにする。

飛行機やロケットが大迎角で飛行する場合、レイノルズ数や迎角の条件により横力が発生することがあり、その1例として飛行機の偏揺れ(ファントムヨウ)があげられる。また、ロケットのフラットスピンも非対称力の影響で起こると考えられる。横力が発生することにより飛行体の飛行力学特性は大きく影響を受け、当初のミッションを遂行できなくなる可能性がある。そのため、軸対称物体周り剥離流れの構造の変化を定性的に把握することは、工学上重要である。

過去に行われた研究によると、定常流れから振動流れに遷移する臨界レイノルズ数の付近で、レイノルズ数の変化とともに流れ場が大きく変わることが知られている。例として球周りの流れが挙げられる。3次元球周り流れは、レイノルズ数が210を超えると、定常で軸対称な流れから、定常ではあるが軸対称性が崩れ、面对称の流れになる。レイノルズ数が270を超えると、振動流れとなる。物体形状が回転楕円体の場合、レイノルズ数のみならず、迎角の影響により、剥離領域が大きく変化する。そこで、回転楕円体の場合で、定常流れから振動流れへの変化の過程で迎角の影響がどのように現れるかを調べることにする。

定常流れから振動流れへの遷移の過程を説明する方法として、全体安定性解析がある。全体安定性解析では、臨界レイノルズ数前後の速度場に対し、基本流成分と摂動成分に分ける。臨界レイノルズ数付近の流れでは、レイノルズ数の増加とともに摂動成分のみが大きくなると考えることで、レイノルズ数の変化に応じて流れ場がどのように変化するかを定性的に説明することができる。なお、安定性解析では、摂動成分のことをモードと呼ぶ。

過去に行われた研究では、2次元円柱や3次元の球に対し、流れ場全体の安定性解析を行った結果を用い、定常な流れから振動する流れへの遷移の様子が明らかにされている。千葉は数値計算スキームの安定性解析法である Eriksson の方法を流れの物理的安定解析に適用し、2次元円柱周りの流れが振動を始める臨界レイノルズ数を数値的に求め、妥当な結果を得ている。そこで、本研究においても全体安定性解析を適用する。

本研究で用いた千葉の方法による全体安定性解析は、速度場に擾乱速度を加え、数値計算のスキームに代入し、擾乱速度の成長/減衰から流れ場の安定性を調べる特徴がある。このため、数値計算スキームの安定性の影響を受ける。本論文では、2次元円柱に対し、対流項を中心差分にした場合と、風上差分にした場合の計算を行い、減衰率の小さいモードに対し、いずれの差分式を用いた場合でも、同じモードが得られることを示す。また、格子のサイズを変えた計算も行い、得られるモードには違いが見られないことを確認した。

収束状態での流れが、基本流に線形安定性解析の結果を重ね合わせることで説明が可能であることを示すため、線形安定性解析から求めたモードを流れに重ね合わせたものと実際の収束状態の解を比較した。両者の流れ場には、定性的な違いが見られないことから、線形安定性解析の妥当性が示される。

2次元円柱まわりの流れは、レイノルズ数の増加とともに、定常な双子渦の流れから振動する流れに遷移するが、3次元球周りの流れは、定常で軸対称な流れから振動する流れに遷移の前に、定常で面对称の流れになる。迎角のない回転楕円体の場合、2次元円柱同様にし、定常で軸対称な流れから振動する流れに遷移するのか、それとも、3次元球と同様にし、定常で軸対称な流れから定常で面对称の流れに遷移するのか、もしくは、2次元円柱や3次元球とは違う遷移の過程をとるのかについては、これまでに研究されていない。また、迎角がある回転楕円体の場合は、レイノルズ数の増加とともに、どのような遷移の過程をとるのかについても、これまでに研究されたことはない。大迎角剥離物体の背後流れでは、剥離のパターンが非常に複雑である。そして、剥離の様子は迎角をパラメータとして複雑に変化する。そこで、本研究では大迎角剥離流れのモデルとして、細長物体の典型的形状である回転楕円体を扱い、定常流れから振動流れへの遷移領域において、流れ場が迎角やレイノルズ数の変化と共にどのように変わるかを調べる。また、物体形状による影響を考慮するため、軸のある回転楕円体、鈍頭円柱、低アスペクト比円柱と形状を変えた場合に、定常非対称流れが観察されるかどうかを調べる。

2次元円柱の安定性解析で得られたモードには、長波長ほど減衰にくい傾向がある。モードの波長と周期の関係を調べ、位相速度がほぼ一定であることを示す。このことから、周期の長い振動モードは波長も長く、周期の短い振動モードは波長も短い傾向が見られることがわかる。これらのモードの空間的な配置を調べたところ、後流が周期的に振動する現象であることがいえる。そこで、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比較し、後流の振動現象が長波長のものほど減衰しにくい点で同じ傾向となることを示す。

本研究では、迎角のある回転楕円体周りの流れの数値計算及び全体安定性解析を行い、迎角がない場合は、軸対称で定常な流れから振動する流れに遷移する前に、面对称で振動しない流れになること、また、迎角がある場合は、面对称で定常な流れから振動する流れに遷移する前に、非面对称で振動しない流れになることを見出した。迎角の変化より、臨界レイノルズ数の値は変化するが、レイノルズ数 5000 前後の場合では、迎角によらず定常非対称の流れとなることがわかった(図 1)。

臨界レイノルズ数に近いレイノルズ数で時間発展の Navier-Stokes 方程式を解く場合、計算の初期段階では、減衰率の大きいモードの擾乱が減衰し、面对称の解になる。しかし、この段階の解は安定ではなく、擾乱が成長して最終的に非面对称の解となる。不安定なモードの擾乱の増幅率が小さいため、擾乱が成長するまでには、時間がかかる。そのため、注意して計算結果を解析しなければ、面对称な解で収束していると判断する恐れがある。全体安定性解析の結果は、非面对称な解と面对称な解との差分を与えるため、擾乱速度場の形状から、面对称の流れを非面对称の流れに変えるモードであると判定することは容易である。本研究では、擾乱を成長させるため、無次元時間で 150 以上の長い時間(主流が回転楕円体の長径の 150 倍の距離を進むことに相当)計算を行うことで、非振動非対称の解で収束することを示す。この解が安定な解であることを示すため、得られた解を基本流として全体安定性解析を行う。これらの結果から、迎角のある回転楕円体の場合、非振動非面对称の流れが観察されることを示す。

迎角のある回転楕円体周り流れの全体安定性解析で得られたモードに対し、擾乱速度の表面流線を描き、迎角の有無に関わらず、形状が類似していることを示す。

また、振動しないレイノルズ数の流れに対し全体安定性解析を行い、基本流に得られたモードの重ね合わせを行うことで、振動流となるレイノルズ数の流れに対して、定性的な説明ができることを示す。

第 1 章では、本論文の目的と意義が述べられている。第 2 章では、本論文で用いた非圧縮流れ全体安定性解析方法についての詳細が述べられている。第 3 章では、非圧縮流れ全体安定性解析の計算コードの検証問題として、2 次元円柱周りの流れが、定常な双子渦の流れから、振動する流れに遷移する臨界レイノルズ数の値を求め、これまでに行われた全体安定性解析結果と一致することを示す。また、3 次元の計算コードの検証問題として、球周り流れの全体安定性解析を行う。これまでに行われた数値計算の結果および全体安定性解析の結果と比較し、結果が妥当であることを示す。また、これらの検証計算で得られた結果をもとに考察を加える。

第 4 章は、本論文の中核である。3 次元回転楕円体周り流れが、迎角 0 度から 30 度、レイノルズ数 5000 前後の範囲において、迎角の有無によらず定常で非対称の流れになることを示す。また、迎角が 0 度、10 度、30 度の場合に対し、全体安定性解析を行い、レイノルズ数の変化により流れがどのように変化するかを述べる。第 5 章では、物体形状の違いに

よる影響を調べるため、軸のある回転楕円体、鈍頭円柱、3次元低アスペクト比円柱の流れ場に対し、流れの数値計算及び全体安定性解析を行い、物体形状を変えた場合に非振動非対称な流れになるか否かを調べ、非振動非対称な流れになる条件の考察をする。第6章で、本論文で得られた知見をまとめる。なお、数値解析で得られた迎角をとる回転楕円体まわりの定常非対称流れが実際に存在することは、低速風洞を用いた可視化実験で確認している。その詳細については、Appendix Aで述べられている。

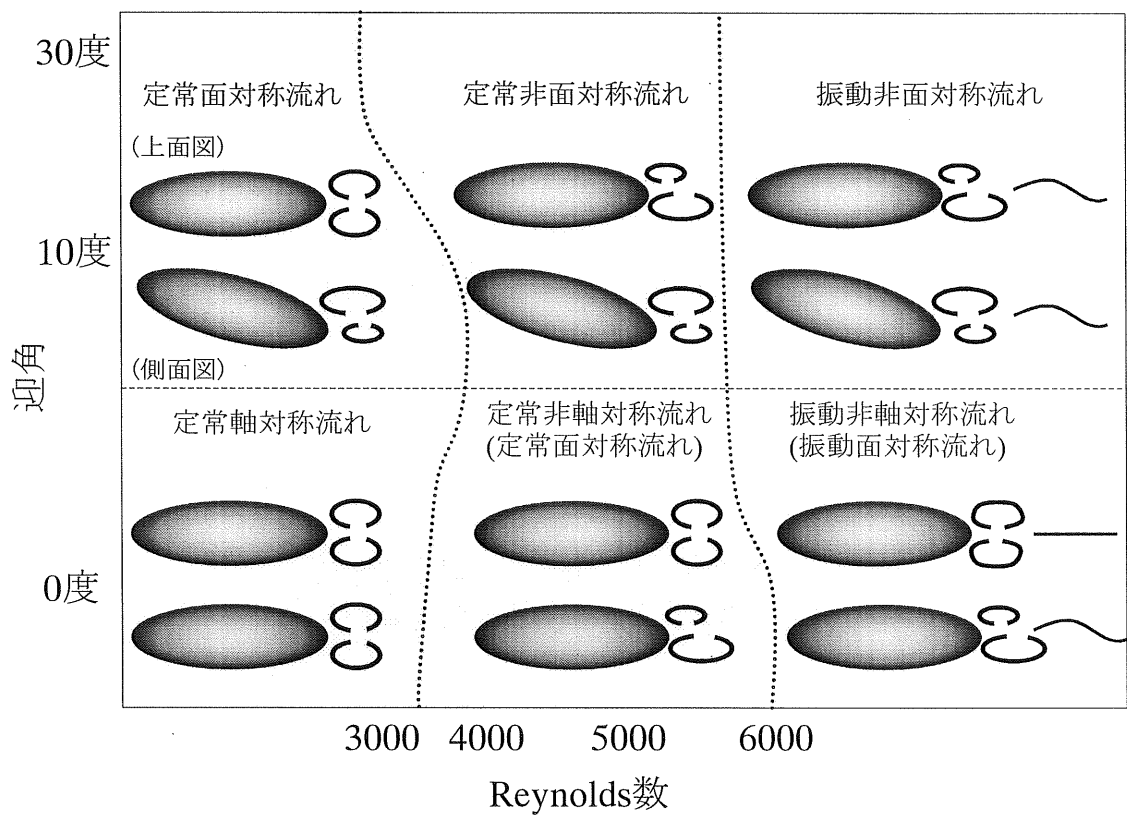


図1 迎角とレイノルズ数による回転楕円体周り流れ場の変化の様子