

審査の結果の要旨

氏名 山田 健翔

修士（工学）山田 健翔 提出の論文は、「**Study on Mechanism of Vortex Breakdown from Aspects of Topology and Stability**（トポロジー及び安定性の観点からの渦崩壊現象のメカニズムに関する研究）」と題し、本文6章および付録3項から成っている。

渦崩壊とは、縦渦がその軸方向速度を失って逆流領域を形成し、トーラス型渦輪の形成など、その流れ場を大きく変える現象である。例えば、デルタ翼背面に形成される縦渦は、迎角を上げていくと、渦崩壊を起こし、軸対称のトーラス渦を伴うバブル型や、縦渦がらせんを描くようにねじれていくスパイラル型などの特徴的な構造を持つことが知られている。渦崩壊についてこれまで様々な研究が行われてきたが、多くは実験および数値解析で得られた流れ場を観察し、その様子を記述するにとどまっておき、流れ場構造の遷移メカニズムについて、数学的明快さをもって説明するものではなかった。流線のトポロジーや流れ場の安定性の観点からの先行研究はあるが、非圧縮性、定常、軸対称を仮定したものに限られていた。本論文は、1) 縦渦がバブル型渦崩壊を起こす際に見られる流線のトポロジー分岐を圧縮性、非軸対称、非定常流れまで対象を広げて明らかにすること、2) バブル型渦崩壊が不安定となり、スパイラル型に遷移していく過程を流れ場の安定性の観点から明らかにすること、を目的としている。

第1章は序論であり、本論文の背景や、これまでの研究の問題点を明らかにした上で、研究目的を述べている。ここで、流線方程式に力学系理論を適用したものがトポロジーの解析であり、流れ場の運動方程式に適用したものが安定性の解析であると位置付けている。

第2章では、淀み点（不動点）まわりで線形化された速度勾配テンソルの固有値と固有ベクトル解析、非線形な2パラメータモデルによる数学的に可能なトポロジー分岐パターン、ポアンカレ断面に見る流線のカオス的構造の形成、全体安定性解析と随伴系の全体安定性解析および感度の導入、などの本研究で用いる数学的理論が簡潔に説明されている。

本研究が扱う課題は、具体的な問題を数値解析することによって解明される。そのためには、それぞれ適切な問題と数値解析手法の設定が必要である。第3章はそれらについての詳しい説明であり、流れ場として軸対称円筒容器内と自由空間中の縦渦（旋回噴流）が設定され、流れ場の支配方程式として軸対称非圧縮性と軸対称低マッハ数近似および三次元圧縮性のナビエ・ストークス方程式が導入されている。さらに、バブル型渦崩壊の安定性には流れの軸対称性の破れが影響すると洞察した上で、軸方向流れの中心を回転中心からずらした **misaligned Grabowski** 型とよばれる非軸対称流れの問題設定を新たに考案している。

第4章では、流線のトポロジーについて得られた知見がまとめられている。バブル型渦崩壊の流れ場は、軸上に形成される一対の鞍点-焦点型淀み点で特徴付けられるが、それが発生する臨界条件でのみ、一対の淀み点が縮退した非双曲型不動点が現れることが示された。また、圧縮性流れが非定常である時、その瞬間流線場において、吸い込みまたは噴き出し型のバブルという、数学的に存在が示唆されていたもののこれまで観測されていなかったトポロジーの存在を示すことに成功している。この時、流線群がバブル構造の内部に入り込むものと、その周辺を回って通り過ぎるものに分かれることを示した。さらに、ポアンカレ断面により、流線がカオス的構造となっていることを見出している。

第5章では、流れ場の安定性解析から得られた知見がまとめられている。まず、三次元圧縮性のバブル型渦崩壊流れについて全体安定性解析が行われ、最も不安定な固有値を持つモードが、バブルの後方でスパイラル型渦崩壊流れと類似のらせん構造をしていることが示された。次に、随伴系について安定性解析が行われ、バブルの上流側で温度や質量などの擾乱に対する受容性が高くなることが明らかにされた。最後に、**misaligned Grabowski** 型縦渦流れに対して感度分布が調べられ、流れ場構造を最も大きく変えることのできる擾乱付加位置、すなわち感度の高い場所は、軸対称性の破れの度合いによって変化していくことが示された。感度の高い位置と流線のトポロジーの間に見られる関係性が議論され、バブル構造の上流側淀み点付近のバブル内部を通る流線と通らない流線の境界線上で最も高い感度となることが明らかになった。

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。

以上要するに、本研究は、渦崩壊における流れ場構造の遷移メカニズムを、流線のトポロジー解析と、流れ場の安定性解析を用いて明らかにしたものであり、数理科学と流体力学、航空宇宙工学の橋渡しをする研究として、航空宇宙工学、特に流体力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。