論文審査の結果の要旨

氏名　大道　勇哉

本論文は、「Global Linear Stability Analysis of Compressible Vortical Flows（圧縮性渦流れの全体安定性解析に関する研究）」と題し、本文６章から成っている。

第１章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。流れの安定性を知ることは、流体物理のみならず、空力騒音の発生や燃焼器の燃料混合など、工学的にも重要な課題である。定常な流れ場に対して擾乱が加えられた時、振幅が十分に小さければ、その成長や減衰は線形安定性解析で評価することができる。主流など特定の方向に伝播する波を仮定し、その波数をパラメータとして成長を調べる局所安定性解析は、その代表的手法である。近年、数値流体力学(CFD)と計算機の急速な発達に伴い、流れ場全体の安定性を直接解析する全体安定性解析が注目されており、平行流などの近似を必要とせず、不安定に遷移する臨界条件や不安定モードの空間構造を正しく予測できる手法として期待されている。しかし、全体安定性に関するこれまでの研究のほとんどが非圧縮性流れに対してであり、圧縮性流れについてはまだ確立していないのが現状である。筆者は上記の状況を踏まえ、１）圧縮性流れに対し、高精度かつ高効率な全体安定性解析法を確立すること、２）それを用いて圧縮性が渦流れの安定性に影響を及ぼすメカニズムを明らかにすること、を研究目的としている。

第２章では、全体安定性解析の理論と計算法が述べられている。CFD において空間を離散化すると、流れ場は、計算点の個数だけ密度や速度、圧力などの変数が並ぶ巨大な要素数の状態量ベクトルで表すことができる。定常流の解が得られたとして、そのまわりで線形化すると、状態量ベクトルの変動は線形常微分方程式で記述され、全体安定性解析は、この大規模係数行列に対する固有値問題に帰着する。安定性に重要となる固有値実部が大きなモードを効率よく計算する手法としては、アーノルディ法とスペクトル変換法の組合せについて詳しく説明している。

第３章は流体の支配方程式とその数値解析法に関する説明である。定常解には２次元圧縮性ナヴィエ・ストークス方程式を、微小擾乱の時間発展については線形化された圧縮性ナヴィエ・ストークス方程式を用いており、その定式化が示されている。流れの安定性を数値解析する際、計算スキームが持つ誤差や人工粘性による影響をできるだけ排除するため、高精度 CFD スキームの使用が必要である。ここでは、空間の離散化にコンパクトスキームを、時間積分には３段階 TVD ルンゲクッタ法を選択し、その詳細を説明している。

第４章は、圧縮性流体に対して構築した全体安定性解析法の説明とその検証である。まず、スペクトル変換法に関して time-stepping 法と shift-invert 法を比較し、計算時間はかかるものの、省メモリー性や拡張性の観点で前者が現実的であるとしている。検証

問題として２次元円柱背後のカルマン渦を取り上げ、マッハ数が 0.2 と低い場合は、過去の非圧縮性流れ解析で得られている臨界レイノルズ数や不安定モードを再現することを確認している。さらに、計算領域外縁の流出境界の適切な取扱法についても詳細な検討がなされている。次にマッハ数 1.3 の場合の解析を行い、衝撃波を含む流れ場への適用を調べている。その結果、衝撃波との干渉が弱ければ、正しく自由剪断層のモード抽出が可能であるが、衝撃波での強い非線形性や衝撃波捕獲スキームの人工粘性に起因するモードが新たに発生するので結果の解釈に注意が必要であるとしている。

第５章では、開発した解析手法を用いて気体の圧縮性が渦の安定性にもたらす影響とそのメカニズムを解明している。解析対象として２次元キャビティ渦を取り上げ、不安定モードは、渦度一定の剛体回転円盤的な構造とその周囲の剪断層に関する構造から成っており、レイノルズ数が臨界に近づくと後者が卓越することを確認している。異なるマッハ数の不安定モードを比較し、圧縮性により生ずるバロクリニックトルク（傾圧項）が剪断層構造の成長を阻害し、渦流れが安定化されていくメカニズムを見出している。

第６章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上要するに、本論文は、圧縮性気体流れに対する高精度かつ高効率の全体安定性解析法を開発し、その検証を行った後、キャビティ渦にそれを適用し、圧縮性による渦の安定化効果を明らかにした点で、先端エネルギー工学、特に高速空気力学に貢献するところが大きい。

なお、本論文の第２章から第５章は鈴木宏二郎氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上１９８５字