

審査の結果の要旨

氏名 李 偉 鵬

修士（工学）李偉鵬 提出の論文は、「Noise Radiation and Self-sustained Oscillations in Supersonic Cavity Flows」（和訳：「超音速キャビティ流れにおける自励振動と音響波発生に関する研究」）と題し、本文7章から構成されている。

超音速キャビティ流れは超音速飛行をする飛翔体の機体やエンジン内部で見られ、特定の周波数にピークを持つ非常に強い離散的な流体自励振動とキャビティ音発生の原因となっていることが知られている。このような流れに関して過去に多数の実験や解析的な研究が進められたが、騒音発生の物理メカニズムやその適合範囲などいまだに推測的な域を出ていないものが多く、検証やケーススタディなどを通じて現象の理解を深め、音響波の低減や混合促進への活用へ道を開くことが期待されている。このような流れ場の解析には、物体面のみならず空間内の流れ場情報の取得が可能な数値シミュレーションによるアプローチが有効であり、近年のコンピュータ性能の向上を背景にした高精度非定常シミュレーションによる研究が期待される。

このような観点から、筆者は流れ場の大きな乱れ構造をモデル化せずに非定常に解析するラージエディシミュレーション(LES)を用いて、3次元圧縮性のナビエ・ストークス方程式を解くことで超音速キャビティ流れの解析を行った。特に 1) 流体自励振動の発生メカニズムの解明、2) メカニズム解釈の汎用性を確認するための流入境界層特性の影響評価、3) キャビティ上流側での吹き出しによる制御効果の確認、を目的として研究を行った。従来の定常解析と異なり、超音速キャビティ流れから発生する音響波を捉えるには高い空間解像度が必要となる。筆者は、限られた計算機資源の元でこれを実現するために、高解像度スキームを用いて目的とする超音速キャビティ流れの解析を進めた。

第1章は序論であり、過去の超音速キャビティ流れに関する実験的、解析的研究を概観し、本論文での研究対象を明らかにした上で、本論文の目的と意義を明確にしている。

第2章では、問題設定、基礎方程式、解析手法などについて述べている。

第3章では、本解析で利用する数値解析手法の検証を行っている。実験データが豊富な条件を選び、その解析を行い、数値解析で得られた圧力変動の卓越周波数が実験のそれとよく一致することを示すとともに、計算格子を変えた解析から格子収束を確認し、数値解析手法に問題がないことを示している。あわせて、流入する乱流境界層が適切に解析できていることを確認している。

第4章では、層流境界層および乱流境界層を流入条件にした典型的な2ケースを中心に流体自励振動の発生メカニズムを議論している。過去の研究と異なり、著者は位相平均法を用いて流れ場の定量的評価を試みている。その結果から、音響波がキャビティ前方エッジにおいてせん断層に擾乱を与え、せん断層内の擾乱が移流していく過程で渦として成長し、渦がキャビティ後方エッジを通過する際に音響波を生成し、キャビティ前方に伝播す

るというフィードバックループが流体自励振動の発生メカニズムであるというこれまでの定性的な結論を定量的に検証した。加えて、過去の研究で提案されてきた複数のメカニズムのうち、キャビティ内に入り込む流量の非定常性については自励振動の発生メカニズムに強い影響を与えていないことなどを明らかにした。さらに加えて、層流境界層が流入した場合には、せん断層から発生するマッハ波の反射が流体自励振動に大きな影響を及ぼすことを初めて明らかにした。

第5章では、流入境界層の流体自励振動への影響を複数の解析をもとに議論している。層流境界層、乱流境界層とあわせて仮想的に乱れを加えない乱流境界層プロファイルを入力条件にした解析を行い、層流境界層ではせん断層の2次元性が強くなる結果音響レベルが増加すること、せん断層の途中で乱流遷移が起きるため卓越周波数が乱流境界層の場合と大きく異なることなどを明らかにしている。また、乱れを加えない乱流境界層プロファイルの場合には流体自励振動特性が大きく変化することを指摘している。流入境界層の厚さを変えた解析では、第4章で得られた基本特性に変わりがないこと、流入境界層の厚さが卓越周波数モードに影響を与えることなどを明らかにしている。

第6章では、これまでの知見に基づいてキャビティ上流側での吹き出しによる制御効果を評価している。吹き出しを加えた複数の解析を行い、吹き出しが発生する音響波を低減できることを明らかにすると同時にその効果が吹き出しによって剥離せん断層の位置が上方に移動する効果とせん断厚さが厚くなる効果によるものであることを明らかにしている。

第7章は結論で、本研究で得られた結果を要約している。

以上要するに、本論文は、先端的な数値シミュレーション技術を利用することで、これまで推測的な域を出なかつた超音速キャビティ流れと発生音響波の特性とを、定量性をもって明らかにしたものである。得られた知見は、さまざまな高速飛翔体の外部、内部流れの設計に役立つものであり、今後の航空宇宙工学に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。