

審査の結果の要旨

氏名 金森 正史

修士(工学) 金森 正史 提出の論文は、「Shock wave visualization and identification based on the theory of characteristics from CFD data (和訳: 特性曲線理論に基づく CFD 解析結果からの衝撃波可視化・同定法)」と題し、本文 8 章および付録 3 項から成っている。

航空機や宇宙機など超音速で大気中を飛行する物体周りの流れ場を理解する際、衝撃波の構造を正しく把握することは重要である。数値流体力学(CFD)解析において、得られた結果から衝撃波の位置や形状などの構造を正確に抽出することができれば、その理解を飛躍的に向上させるものと期待される。筆者は、特性曲線理論に基づいた新しい衝撃波検出方法の開発に成功している。

第 1 章は序論であり、本論文の目的と意義を明確にしている。CFD 解析結果から衝撃波を抽出する手法として、圧力など衝撃波で急変する物理量の等高線の観察、圧力勾配方向のマッハ数が 1 となる面の検出、1 次元リーマン問題解析解の当てはめなど、これまでに提案された手法を概観し、解釈に恣意的フィルターが入ること、数値誤差から来る誤検出の除去、多次元への拡張性、などに問題があると指摘している。特性曲線理論を応用した方法は、定義の厳密性、経験的パラメータの排除などの点で優れていると述べている。

第 2 章では解析対象の流れ場を得るための CFD 解析手法が、第 3 章では提案する手法の基礎となる特性曲線理論の数学的導出が、詳細に説明されている。

第 4 章では、2 次元定常流れ CFD 解析結果からの衝撃波同定手法が詳しく説明されている。まず、衝撃波を同種の特性曲線の衝突として定義し、特性曲線のベクトル場を局所的に線形化して衝撃波を抽出する方法を提案している。2 次元定常の超音速流れには、2 種類の特性曲線 $C+$ および $C-$ が存在するため、そのどちらかの積分曲線が収束する臨界線として衝撃波を捉えることができる。CFD 解析では各格子点における流れ場の物理量が得られるため、それを用いて特性曲線のベクトル場を局所的に線形化すれば、解析的に臨界線を抽出することが可能である。CFD 解析結果に適用した例を示し、鈍頭物体前方の離脱衝撃波のような強い衝撃波だけでなく、転向角の小さい楔から発生する付着衝撃波のような弱い衝撃波も適切に検出することを実証している。さらに、検出精度の計算格子依存性についても明らかにしている。

第 5 章は 2 次元非定常衝撃波流れへの拡張である。局所的に移動衝撃波が止

まっで見える動座標系を導入していけば、第4章で述べられた定常流れにおける衝撃波捕獲と同じ手法を適用することができる。全エンタルピー保存則を用いた座標変換を導入し、ランキン・ユゴニオ条件を用いて衝撃波速度を推算し直すことで、精度よく移動衝撃波を検出することに成功している。

衝撃波発生 endpoints や端線を捕獲することは、流れ場物理量の等高線観察では得ることができない本法の優れた点である。第6章は、円弧と直線で形成された2次元定常非粘性斜面流れについて、圧縮波が集積して衝撃波が形成される問題を扱う。衝撃波発生点を解析的に導出して本法による数値解析結果と比較することで、その妥当性を論じている。その結果、本法では衝撃波だけでなく圧縮波まで検出されてしまう問題を指摘している。これは、衝撃波と圧縮波で異なる特性曲線の収束度合いを判別していなかったため、その対策として特性曲線の曲率を導入している。適切な閾値を設定すれば、特性曲線が収束し、かつ、そこでの曲率が閾値より大きな場合のみ衝撃波として認識することで圧縮波を適切に除外することが可能となる。多数の数値実験により、この閾値は一様流マッハ数などの条件に依存せず、計算格子が十分な解像度を持っていれば、格子に対しても依存しないということなどを確認している。

第7章は、3次元定常流れへの拡張である。まず、流線とその曲率中心方向を含む面を流線の運動平面と名づけ、その面内に含まれるマッハ円錐の母線を衝撃波発生に寄与する特性曲線と定義する。2次元の場合と同様に特性曲線のベクトル場を局所的に線形化し、3次元空間において特性曲線が収束していく臨界面の形で衝撃波面を捉える方法を提案している。まず、迎角のある鈍頭円錐流れのCFD解析結果に適用し、その妥当性を実証している。さらに、大迎角デルタ翼周りの粘性超音速流れに適用し、本法によって翼背面の特徴的な衝撃波を検出することができること、衝撃波の分岐現象が明確に捉えられること、粘性流と衝撃波の干渉が強くない場合は、粘性流CFD解析結果に対して本法を適用しても妥当な結果が得られること、などを見出している。

第8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3項から成り、線形ベクトル場の解曲線の数学的性質に関するまとめ、ベクトル場の解曲線を得る数値積分アルゴリズム、CFD解析結果から渦中心を同定する方法、について述べている。

以上要するに、本論文は、CFD解析結果から衝撃波を抽出する特性曲線理論に基づく精度の高い手法を提案し、非粘性の2次元定常および非定常流、3次元定常流、3次元粘性流への適用性を示したものであり、衝撃波流れ構造の理解を大きく向上させる点で、航空宇宙工学、特に高速空気力学上、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。