

## 審査の結果の要旨

氏名 河合 宗司

修士（工学）河合宗司提出の論文は、「**Computational Analysis of the Characteristics of High Speed Base Flows**」（高速気流中のベース流れ特性に関する数値解析）と題し、本文7章から構成されている。

高速で飛翔する物体の底面背後に生ずるベース流れは宇宙輸送に代表される工学的諸問題において現れ、飛翔体の空気力学特性に強い影響を与えるため、その流れ場構造の解明は重要な空気力学的課題である。ベース流れ現象に関しては、過去に多くの実験的研究が行われてきたが、単にベース面圧力の評価といった限られた議論にとどまっており、低速から高速までの広範囲の速度域についてベース流れ現象を理解し、それをベース面圧力変化と関連づけた研究は見られない。実験と並んで、近年 CFD 手法を用いた研究も試みられるようになってきたが、乱流モデルを利用した実用解析手法では、定性的にも、定量的にも予測が不十分な状況であり、流れ現象の議論は行われていない。一方で、このような複雑流れに適していると考えられる LES 手法の適用は、計算コスト面で困難であるのが現状である。

このような観点を基に、筆者は亜音速から超音速にかけてのマッハ数領域でのベース流れ特性を明らかにすることを目的として研究を行った。実験によるアプローチでは支持装置の影響や得られるデータ量の制限といった課題があることから、数値シミュレーションを利用した解析を選択し、まず、実用的な計算コスト内で流れ場の基本現象を定量的に評価しうる手法を開発した。この新しい手法には信頼性の評価や数値計算上の知見が不足していることを考慮し、流れ現象の解明に先立って、ベース流れ解析における検証を行い、その上で、亜音速から超音速領域にかけてのベース流れ特性解析を行っている。

第1章は序論で、過去のベース流れ現象に関する研究を概観し、本論文の研究対象を述べている。そして、過去の研究によって明らかにされた事実と残された課題や問題点を示し、それに基づいて本論文の目的と意義を示している。

第2章では、問題設定と数学モデルの詳細が述べられている。ベース流れ現象の本質を明らかにするため、単純な形状である円柱および円錐形状を解析対象とした問題設定を行っている。数学モデルとしては、対象とする流れの本質を捉えつつ実用に供することができる高度な数学モデルの1つとして LES/RANS ハイブリッド手法を提案している。

第3章では、詳細な実験データが存在する超音速ベース流れの解析を行い、既存の RANS 手法の限界と、用いる LES/RANS ハイブリッド手法の超音速ベース流れ予測能力を確認している。実験データとの比較により定量的評価が可能であることを示すとともに、他の計算手法との比較から、超音速ベース流れ解析に対する信頼性や計算コスト面での有効性を確認している。あわせて、格子解像度や圧縮性解析におけるスマゴリンスキー定数についての指標も明らかにしている。

第4章では、亜音速ベース流れに対する解析を行い、本手法の亜音速ベース流れ予測能

力を調べている．利用可能な実験データとの比較によって，本手法の亜音速ベース流れ解析に対する信頼性を確認している．亜音速域での本手法の有効性を追認するために，翼型失速というテーマを別途取り上げ，研究内容の詳細を付記に，得られた検証結果を第 4 章の本文中に記載している．過去の実験から得られている流れ場の特徴変化や揚力特性変化を再現できたことによって，亜音速大規模剥離流れに対する本手法の有効性を確認している．

第 5 章では，亜音速から超音速にかけての広いマッハ数領域でのベース流れ解析を行い，時間変動特性および時間平均特性の観点からベース流れ特性を調べている．ベース圧の周波数解析を利用した時間変動特性の評価から，その変動が亜音速，遷音速，超音速の各速度域で全く異なるものであることを示し，さらにベース圧変動特性の要因となる支配的流れ現象を明らかにしている．続いて，ベース流れの時間平均特性の解析を行っている．時間平均ベース圧はマッハ数の増加とともに減少するが，亜音速，遷音速，超音速の各速度域でそれぞれ異なる特徴的变化を示すことや，その特徴的变化に各速度域の流れ場の変化がどう影響を与えているかを明らかにしている．

第 6 章では，先頭形状に円錐を有する物体のベース流れ特性解析を行うことで，物体先頭形状がベース流れ特性に与える影響を確認している．先頭形状が異なる場合でも，円柱形状を利用して行われた第 5 章の議論が適用できることを示し，流れ場の定性的な特徴は先頭形状に依存しないことを明らかにしている．また，同一マッハ数における先頭形状変化による流れ場の比較によって，物体後端から発生する渦の強さ，発生位置などの変化によって，鈍い物体ほどベース圧が低くなることが明らかにされている．

第 7 章は，結論であり本研究で得られた結果をまとめている．

以上要するに，本論文は，ベース流れ解析を行う上での LES/RANS ハイブリッド手法の信頼性や解析上重要となる指標を確立し，それに基づいて，亜音速から超音速にわたる広いマッハ数領域でのベース流れ特性を時間変動特性および時間平均特性の両観点から明らかにしたものである．これまで，低速から高速まで広範囲のマッハ数領域を連続的に解析し，ベース面圧力の変化と，それを支配している流れ現象を明らかにした研究例はない．ここで得られた結果は，空気力学的基礎課題としてのベース流れ現象にとどまらず，突入カプセルの動的安定性，エアロスパイクノズルの推力性能や宇宙輸送機の空力特性等を理解する上で有用な情報を提供し，高速の飛翔体設計や開発に役立つものであり，本論文により得られた結果は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．