

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤松 信義

修士（工学）藤松信義提出の論文は、「地面効果によって生じる垂直着陸ロケットの機体底面空気力に関する研究」と題し、本文6章および付録3項から成っている。

逆噴射によって減速しながら降下し地面へ垂直に軟着陸する垂直着陸ロケットは、翼を持たないため軽量化が可能なこと、着陸に長大な滑走路を必要としないこと、などの利点から次世代再使用型宇宙輸送機として有望視されている形式のひとつである。その機体は単段式とするため巨大な燃料および酸化剤タンクを内蔵し、ノズル出口面積に比べ非常に大きな底面積を有する。これは、底面での圧力分布が相対的に大きな空気力を発生することを意味しており、特に、着地直前の噴流が地面と干渉する状況において注意が必要である。しかし、過去に行われた衝突噴流に関する研究では、噴流を出している機体側への空力的影響についてほとんど考慮されていない。

このような観点から、筆者は実験と数値解析を行い、噴流の地面効果によって機体に生ずる下向き空気力の特性を明らかにし、その原因となる機体底面下での特徴的流れ場形成のメカニズム解明に成功している。着地直前での下向き空気力の発生は墜落事故に結びつきかねないものであり、本論文は将来の垂直着陸ロケット開発に際し有用な知見をもたらすものである。

第1章は序論で、これまでの垂直着陸ロケットおよび衝突噴流に関する研究を概観し、本論文の目的と意義を明確にしている。

第2章では、実験とその結果が述べられる。底面に1個ないし合計推力が等しい4個のノズルを持つ模型を製作し、地面板に噴流を噴きつけた時の底面圧力の時間平均値が得られている。機体は着陸時に軽くなっており、大きな推力を必要とせず、設計値より低い圧力比で噴射が行われる。そのため、ノズル壁で流れは剥離し、衝撃波セル構造が形成されているのが特徴である。ノズル1個の場合、底面圧力分布には2種類のパターンがあり、両者が切り替わる臨界高度の存在が見出された。すなわち、臨界高度以上では中央のノズルから機体外縁に向かって弱い負圧が生じるパターンとなり、臨界高度以下ではノズル近傍で圧力が低下し機体外周に向かって大気圧へと回復するパターンとなる。筆者は流れの可視化結果と総合させて、前者を機体底面下への周辺大気の吸込み、後者を底面下ノズル近傍での渦状構造流れの存在で説明できると述べている。さらに、底面圧力を積分することで機体に生ずる下向き空気力を算出しており、その絶対値は地面に近づくほど大きくなり、ついにはノズル推力を上回ることを指摘している。また、地面粗さや底面外周でのスカート装着の効果、ノズルが4個となった時の特性についても明らかにしている。

第3章では数値解析法の詳細が述べられている。基礎方程式は軸対称および3次元層流ナビエ・ストークス方程式であり、計算スキームには SHUS 法が用いられている。また、地面粗さ効果を考慮するために導入された乱流モデルについても説明されている。

第4章では1個のノズルの場合に関する数値解析結果が示されている。まず、時間平均した解析結果が検討され、底面圧力分布と底面空気力ともに実験とよく一致することを確認し、2章で述べた底面流れパターンが数値解析でも得られることを示している。しかし、筆者は、噴流の衝突は本質的に非定常であり、それを考慮しないと現象のメカニズムは説明できないとし、噴流境界における渦の周期的発生と地面衝突後の渦の挙動に分けて詳細な検討を行っている。すなわち、噴流境界では剪断層のケルビン・ヘルムホルツ不安定によって渦が生じるが、その渦が地面と衝突する際に音波を発生し、剪断層とフィードバックループを形成する。これが噴流界面での周期的な渦発生のメカニズムであると述べ、その周波数が Powell のモデルで説明できることを示している。地面に衝突した渦は機体底面に向かって反射される。臨界高度以上において、渦は底面と衝突せずに機体外縁下から出ていくが、その際に周辺大気の吸込み流れを誘起する。一方、臨界高度以下では、渦が底面に衝突し、底面下ノズル近傍で渦状構造流れが誘起されることを明らかにしている。さらに、地面粗さとスカートの効果についても数値解析を行い、前者は底面流れの渦状構造を弱め下向き空気力を小さくすること、後者はその内側に渦状構造流れを誘起し臨界高度以上で下向き空気力を強めること、を見い出している。

第5章は4個のノズルの場合に関する結果とその考察である。このとき、噴流間で再循環領域が形成され、それが機体底面中央部で淀むことにより圧力上昇が起こることを示し、これが底面に4個のノズルを有する場合は1個のノズルの場合と比べて下向き空気力が小さくなる理由であると説明している。

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。

付録は3項から成り、実験に使用した装置の詳細、超音速噴流の非定常振動現象を対象とした数値計算コードの検証、衝突噴流の振動に関する Powell のモデルに関する説明がなされている。

以上要するに、本論文は地面効果によって垂直着陸ロケット底面に生じる下向き空気力の特性を実験的に明らかにし、流れ場の非定常数値解析からそのメカニズムが、噴流境界せん断層での渦発生と、それが地面に沿って流れる際の挙動によって説明できることを明らかにしたものであり、流体力学に新しい知見をもたらすとともに、垂直着陸ロケットの着陸安全性とその対策に重要な指針を与え、航空宇宙工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。