

フレーム式可変展開エアロシェルを用いた惑星大気圏突入機の 高精度着地点制御に関する研究

学生証番号 47-216055 氏名 緒方 友亮
(指導教員 鈴木 宏二郎 教授)

Key Words : Deployable aeroshell, Aerodynamic coefficient, Newtonian flow, Precise landing control

近年、アメリカや欧州をなどの先進国を中心に、火星をはじめとした惑星への探査、利活用への関心や小惑星へのサンプルリターンによる科学探査の機会が高まっている。それに伴い、惑星大気への突入、降下、着陸(EDL)技術をより洗練させ、より安価かつ信頼性の高いEDLシステムを考案する必要性が高まっている。これまでの火星や地球へのEDLミッションでは、ほとんどの場合において耐熱シールド、パラシュート、ロケットエンジン等を組み合わせたEDLシステムが用いられてきた。このような多数のデバイスからなるシーケンスでは、そのデバイスのうちどれか一つでも正しく動作しなかった場合には適切な減速が行えず機体の損壊につながるため、システム全体の信頼性を保証することが難しい。加えて、開発費用の増加、システムの重量増加による熱負荷の増大なども課題として存在する。

このような課題に対処するため、近年展開型柔軟エアロシェルによるEDLシステムが注目を集めている。このシステムでは高高度で柔軟膜によるエアロシェルを展開し、大気によって膜面上に発生する抗力をブレーキ源として減速、降下するものであり、従来用いられてきたEDLシステムに対して軽量、低熱負荷、低コスト、高信頼性などの特長を持つ。一方で低弾道係数であることから、EDL時の軌道が大気密度のモデル化誤差や風などの外乱によって大きく乱されてしまう欠点を抱えている。過去に提案されてきた展開型エアロシェルではこの問題に対処できない、あるいは複雑な機構を用いて対処しているため、シンプルかつ高精度のEDLが行えるような展開型エアロシェルが求められている。

そこで本研究では、適用対象を火星にEDLを行う小型無人着陸機と定め、これに対して雨傘のような膜面をフレームで支持し、膜面全体が可変する展開型エアロシェルを提案した。そして飛行の大部分を占める超音速領域における空力特性や空力加熱による膜面の温度変化に対する知見を得るとともに、得られる着陸精度向上の度合いを評価した。

問題設定として、過去の火星着陸機の突入条件をもとに突入開始時の高度、速度、経路角のノミナル条件を設定した。また、本研究では軌道誤差の原因として初期の高度、速度、経路角の誤差ならびに大気の流れと密度誤差を取り上げ、各々について過去の事例や観測結果をもとに誤差の程度を設定した。また、風洞実験やシミュレーションにおけるモデル機を決定するため、梁のたわみの式を用いてフレームの外径、内径、本数、結節点位置をパラメータとして探索し、軽量かつたわみの少ない機体パラメータ例を得た。

設定した機体に対してフレームの開き角を変化させた際の空力特性、および熱特性を取得するため、東京大学柏極超音速風洞を用いて風洞実験を行った。実験にあたっては、開き角15度から75度までのモデルを用い、6分力天秤を用いて機体の空気力を測定したほか、シュリーレン画像による衝撃波観測、サーモカメラによる熱分布取得も行った。

実験結果より、ニュートン流近似によって抗力を非常によくモデリングできること、揚力では定性的な傾向は掴めるものの模型作製時の作製精度や膜面の変形に起因すると考えられるずれが認められた。横力では揚力の場合と同様、模型作製精度に起因すると考えられるずれが認められた。また、シュリーレン画像と熱画像から、開き角が60度以上の領域では膜面上から大きな角度を持った衝撃波が立ち上がっており、膜面後端から1/3フレーム長程度の位置で大きな加熱が生じていることが明らかになった。また、膜面の加熱は機体先端からの衝撃波ではなく膜面の変形によって膜面上に生じる衝撃波が支配的であることが示唆された。

実験結果を踏まえ、ニュートン流近似を用いたEDLシミュレーションを行った。条件としては風条件として向かい風、横風の2ケースを考え、各々に対して位置誤差が大きくなるように初期経路角条件を設定し、初期位置、初期速度誤差については着陸機がセンシングできないためシミュレーション後別途影響を考慮することとした。開き角制御においては、先行研究を踏まえIMUによりノミナル軌道との位置誤差を十分正確に取得できるとし、位置誤差をPD制御器によりフィードバックするものとした。比較対象としては、開き角を固定した制御なしのケース、全てのフレームが同一の開き角を取る1自由度のケース、ダウンレンジ方向の制御を担うフレームとクロスレンジ方向の制御を担うフレームがそれぞれ独立に変化する2自由度のケースを用いた。

シミュレーション結果から、向かい風の場合、1, 2自由度の制御を施した場合ほどどちらも制御なしと比べ着陸誤差を1/100にすることができた。横風の場合、2自由度モデルは制御なしや1自由度の場合に比べ着地点誤差を抑制できたものの、機体のロール回転により制御を失った結果、向かい風条件に比べ誤差が増大した。また、初期位置、速度誤差の影響解析結果から機体の初期位置誤差が着地点に支配的な影響を与えることがわかり、高精度火星着陸における位置測位システムの重要性が示唆された。