

1. 研究背景

惑星大気を利用して減速することで、惑星周回軌道へ投入するエアロキャプチャは推進剤の大幅な削減が可能となる。一般的な揚力型の場合、大気不確定性を保証するために精密誘導システムを導入し揚力を制御する必要があることから、低リソースの超小型衛星への応用は困難であった。一方、抗力変調エアロキャプチャでは抗力及び減速量を制御できるため、精密誘導システムが不要かつ変調幅を大きくすることで高高度からの減速及び大幅な抗力変調が期待できる。この方式の場合、大気圏突入時の極超音速環境においてエアロシェル分離が可能かどうか、そして突入回廊幅を十分に得られるかどうか、が実現への鍵を握っている。本研究では、極超音速風洞においてエアロシェル分離試験を実施し、空力特性を取得することでエアロシェル分離時の挙動を把握する。また、軌道解析によって金星へのエアロキャプチャ回廊を求め、さらに 3 次元化することで風やリフトの影響を考慮する。

2. エアロシェル分離試験

試験設備は、JAXA 調布の 1.27m の極超音速風洞を利用した。また、試験条件は、貯気槽圧 1.0MPa、淀み点温度 650 度、マッハ数 9.45、レイノルズ数 $10^6/\text{m}$ であり、最も風洞に負荷を与えない条件の下で試験を実施した。計測項目としては、天秤後方に内装された 6 分力天秤によって力特性を取得し、シュリーレン可視化装置で流れ場の可視化を行うことで、分離時の挙動を調査した。

次に、試験模型に関して、用いたカプセル模型及びエアロシェル模型はそれぞれ、80mm と 180mm であり、エアロシェル模型は ZYLON 布で作製した。この模型がマッハ 9.45 の気流中で分離された後、エアロシェルは天秤カバー後方にあるエアロシェル捕獲部にて、天秤に力を伝えない状況で止まるように設計されている。模型自体は、模型支持部のみと接続されており、エアロシェルはカプセルにベクトランリングであるワイヤーを介して接続した。その機構を以下で具体的に示す。カプセル背面に溝が切っており、そこにワイヤーを貼着、そのワイヤーの両端を小さな穴の開いたエアロシェル模型に通し、ネジで引っ掛けることで止める。その後、カプセル背面にある機構でワイヤーにテンションをかけることで、エアロシェルとカプセルを固定する。テンションのかかったワイヤーに通電し熱されたニクロム線を当てることで、切断し、エアロシェルは分離される。

次に試験結果を示す。シュリーレン可視化装置のハイスピード映像によってエアロシェルは、瞬間的かつスムーズに分離されたことが確認された。また、天秤の力測定によって、抗力係数が分離の瞬間に約 80% 程度減少することが明らかとなった。

3. 軌道解析

まず、2次元面内における解析に関して示す。初期条件としては、高度 400km から速度 11km/sec で大気圏に突入させることを想定した。本研究で検討している抗力変調エアロキャプチャの重要なポイントであるエアロシェル分離に関しては、加速度計を搭載した機体を想定しており、金星大気の空気抵抗による減速量が 1.8km/sec となった時点での分離とした。そのエアロシェルのサイズとしては、製作実績のある最大 3.5m を本解析でも想定しており、総重量は超小型サイズとしては最大 100kg とした。また、本解析の大気モデルは Venus-GRAM によって推算される大気データの中から、最大の大気密度と最小の大気密度となるものを使用した。これらの条件を 4 次のルンゲクッタ法を用いて解析を行った。続いて、解析結果を示す。

まず、突入経路角と遠金点高度からエアロキャプチャ回廊を推算した。本解析における制約条件は高度 1000~5000km としており、想定される最も濃い大気と最も薄い大気のどちらにも満たす突入経路角を成功としている。結果としては、エアロシェルの投棄によって突入経路角を大きくしたときに遠金点高度の減少具合が緩やかになることが確認された。具体的に得られた回廊幅としては、エアロシェルを分離しない場合 0deg、分離する場合 0.23deg であることが明らかとなった。つまり、エアロシェルを分離することによって回廊幅が劇的に広がり、エアロキャプチャが成功する確率が上がることが示唆された。

続いて、3次元での解析結果を示す。今回は、赤道面内への突入を仮定し、解析を行った。初期条件は、2次元面内での解析と同様の値を使用し、3次元化に伴い、導入した金星風は大気密度と同じく Venus-GRAM によって推算される値を使用している。金星では、スーパーローテーションと呼ばれる強風が周方向に吹いており、高度 200km 以上では約 200~250m/sec にもなる。一方、極方向はほとんど風が吹いておらず、自転速度に関しては約 2.0m/sec と極めて遅いものになっている。本解析では、周方向の風を考慮した。結果としては、突入速度が金星風に比べて極めて速いため、回廊に与える影響は小さくその回廊幅は同様の値を得ることができたが、遠金点高度において、最大 1500km 程度変化するという結果を得ることができた。

4. 結論

エアロシェル分離試験では、極超音速気流中においてエアロシェルは回転を伴わず瞬間的かつスムーズに分離され、大きな抗力変調となることが確認された。軌道解析では、エアロシェル分離によって回廊幅は大幅に増加し、0.23deg 存在することが示唆された。また、東西方向の風を考慮したところ、突入速度が金星風に比べて極めて大きいため、回廊幅に与える影響は小さいと見積もられた。一方、遠金点高度が 1000km 程度変化することも明らかとなったため、軌道自体の変化を検討していく必要があると示唆された。