

再突入時のエアロシェル分離による着地点制御に関する研究

日大生産工(院) ○矢野 啓太郎 日大生産工 今村 幸

1. まえがき

探査機や大気再突入機におけるEDL (Entry, Descent, Landing) 技術は機体の安全の観点から重要であるが、近年は小型機にも高精度化が要求されつつある。特に科学的なミッションの要請から1tを超えるような大型な機器ではなく、50kg以下のシステムでのピンポイントでの着陸の可能性も検討されている。他方、空力加熱の低減も重要な視点であるから、膜面を拡げるなど機体形状を変形して弾道係数を低下させること、それにとりも伴う抗力を変調しての軌道変更することが着地点の制御の積極的に用いることができる可能性もある。以上から、本研究は地球大気を対象として、抗力変調の機構が着地点の分散に与える影響について調べ、抗力変調機構の着地点分散制御の可能性を探るものである。対象としては、宇宙ステーションから再突入する超小型衛星を対象として、膜面を拡げた状態から、途中で膜面を捨てることにより、どの程度のダウンレンジに変化を及ぼすことが可能かを検討した。

2. 解析の手法

前述のように宇宙ステーションから放出された超小型衛星が大気圏突入する場合を考える。宇宙ステーションからの放出衛星であるので、初期条件は速度7663m/s、高度408kmとし、機体重量4.0kg、突入角3.0deg、抵抗係数は2.0で一定として、初期投影面積2.0 m²、膜面を捨てた後の投影面積0.2m²と仮定した。膜面の分離は高度0km～120kmの間で変化させて解析を行った。軌道解析においては2次元平面内の運動を考えて、以下の式(1)から式(4)を支配方程式とした。

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2}C_d S \rho V^2 \frac{1}{m} + g \frac{R_E^2}{r^2} \sin\gamma \quad (1)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \left(\frac{g R_E^2}{V r^2} - \frac{V}{r} \right) \cos\gamma \quad (2)$$

$$\frac{dr}{dt} = -V \sin\gamma \quad (3)$$

$$\frac{dR_d}{dt} = R_E \frac{d\theta}{dt} = \frac{R_E}{r} \times V \cos\gamma \quad (4)$$

ここで、 V [m/s]: 機体速度、 r [m]: 地球中心からの機体高度、 g [m/s²]: 重力加速度、 ρ [kg/m³]: 大気密度、 C_d : 抵抗係数、 γ [degree]: 機体突入角度、 θ [degree]: 地球と突入機の初期位置からの角度、 S [m²]: 機体の投影面積、 t [s]: 時間、 R_d [km]: ダウンレンジ、 R_E [km]: 地球半径である。

大気モデルは、NASAのNRLMSISE-00大気モデルを利用した。2017年5月14日12:00(UTC)の日本上空(東経135度、北緯35度)の大気を基準として、大気密度 ρ [kg/m³]を高度 z [km]の関数としてプロットしたものがFig. 1である。この図から133.5km以下と以上に分けて、大気密度を以下のように近似した。

$$\rho = 1.2202 \times 1.4618 \times \exp(-0.148 \times z) \quad (z < 133.5) \quad (5)$$

$$\rho = 9.9402 \times 10^7 \times z^{-7.682} \quad (z > 133.5) \quad (6)$$

式(1)から式(4)を4次のルンゲクッタ法にて積分して解析結果を得た。なお時間刻みは0.1sとした。

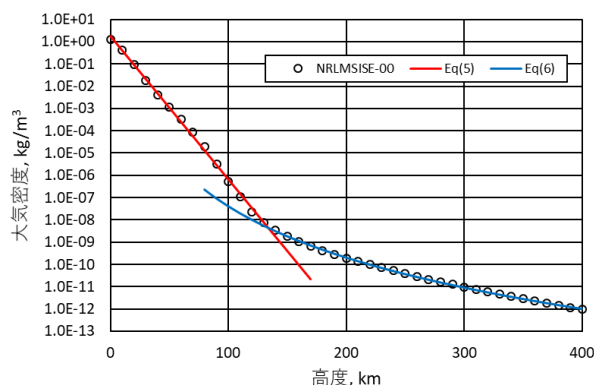


Fig.1 高度と大気密度の関係

3. 解析結果と考察

解析結果をFig.2からFig. 4に示す。Fig. 2には、分離高度が、高度と速度との関係に及ぼす

影響を示している。ここでは、0kmから60kmの間で膜面を分離している場合について結果を示している。高度408kmから地球に向けて再突入してくるが、大気密度が極めて小さいためその減速の程度は小さい。高度100km以下になり、大気の抵抗を受けて徐々に減速してくる様子が見える。図にて時間的には右手から左手に向かって進むこととなる。各々の高度で膜面を分離することによって抗力が低減し、急減速期に高度を下げていく様子が見て取れる。

Fig. 3には、分離高度が速度と輻射平衡温度に及ぼす影響について示している。分離高度が0kmのとき、すなわち再突入の間中、膜面を上げた状態で突入している場合には、速度が6500m/s程度のときに最高温度をとり、その時の温度は693°Cであり、比較的安全な運用ができる見込みがある。他方で、仮に60kmで分離をした場合、その後に急激な温度上昇が認められ、速度5200m/s程度で、最高温度は890°C程度となる。これはFig.2より、高度の低く大気密度がの大きいところで減速するからである。仮に48kmで分離をした場合、その後に温度上昇は認められるが、最高温度は672°C程度であった。以上から膜面展開による空力加熱低減の優位性を損なわないようにするためには、高度48km以下での分離が必要であるといえる。

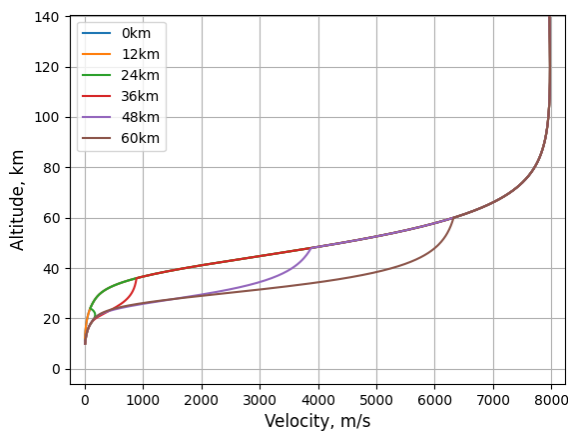


Fig.2 分離高度が高度と速度との関係に及ぼす影響

Fig.4には、各分離高度におけるダウンレンジを示している。横軸は再突入からの時間である。分離高度が0kmのときに比べて、分離高度が24kmくらいまでには、ダウンレンジに大きな変化はない。分離高度が48kmの場合、ダウンレンジが70kmほど長くなることわかる。分離高度が60kmになると、分離高度が48kmの場合に比べて、さらにダウンレンジが70km

ほど伸びることになる。Fig. 3と比較すると、高度24kmから48kmの間で分離することによって、ダウンレンジを70kmほど制御することが可能であるといえる。

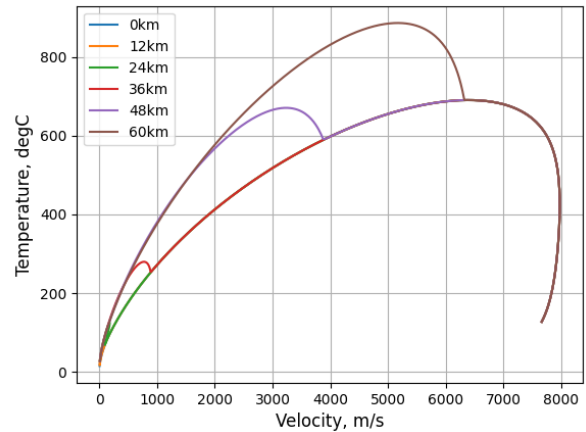


Fig.3 分離高度が速度と輻射平衡温度に及ぼす影響

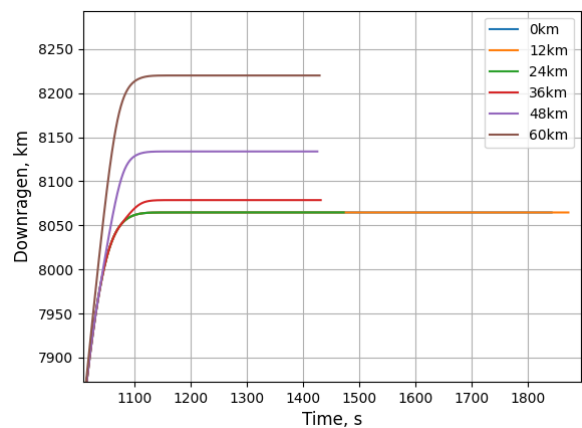


Fig.4 分離高度がダウンレンジに及ぼす影響

4. まとめ

膜面を持つ再突入衛星について、膜面を上げていることによる空力加熱の低減の利点を失わずに、途中で膜面を分離することによる着地点の制御の可能性について検討した。検討した結果、高度24kmから48kmの間で分離することによって、ダウンレンジを70kmほど制御することが可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) CCMC NASA, NRLMSIS, <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>, (2023年10月11日アクセス)