

1G17 超低高度衛星 SLATS の熱制御と高層大気

○川崎春夫, 高畑博樹, 此上一也, 佐藤洋平, 今村俊介 (宇宙航空研究開発機構)

Upper atmosphere and Thermal control of the Super Low Altitude Test Satellite
Haruo Kawasaki, Hiroki Kohata, Kazuya Konoue, Yohei Satoh and Shunsuke Imamura (JAXA)

Key Words: Super low altitude satellite, SLATS, Thermal control

Abstract

The Super Low Altitude Test Satellite (SLATS) is an engineering test satellite currently under development in JAXA in an attempt to open a new frontier of space utilization on extremely low earth orbits. The altitude of SLATS orbit is around 200km altitude. In this altitude, rarefied aerodynamics and high-density atomic oxygen effect on the thermal design of SLATS. The thermal control of SLATS was introduced in this paper. And, the equilibrium temperature on the bumper of SLATS was estimated with upper atmosphere data.

1. 目的および背景

JAXA では、従来実現できなかった超低高度 (250km～180km) を継続的に飛行する超低高度衛星の研究を 2007 年から進めている^(1,2,3)。この軌道では、ごく微量に存在する大気による抵抗による加熱、また衛星表面の材料を劣化させる原子状酸素が多く存在するため、多層断熱材に対しての対策など、従来の衛星と異なった熱設計が求められている。本発表では、最も高層大気の影響を受けるバンパ面を覆う MLI の最外層についてどのような熱的影響を受けるか研究を行ったので報告する。

2. 超低高度衛星 SLATS の熱制御

SLATS の目指す高度 200km 付近及びそれ以下の高度においては通常の地球周回衛星の運用される環境と比較すると、空気濃度が大きくなる。この高度での大気濃度 (mol 基準) は高度 1000km の場合の約 10^7 倍に相当するが、地上大気と比較すると、約 10^{-10} 倍と希薄である。また、この高度領域は、高層大気分野では熱圏または電離圏とよばれる領域で、温度は約 1000 K に達する。しかし、大気密度が希薄で大気から衛星に与えられるエネルギーは小さいため衛星の温度はそこまで上昇しない。これは、周囲の大気圧力は 10^{-5} Pa のオーダーであり、伝熱は輻射伝熱支配となっている。周囲大気温度の影響より 4 K の深宇宙への放熱、太陽光、地球アルベド、地球赤外の影響が大きい。このため後述する進行面 (+X) 以外は、従来の地球周回衛星と基本的には解析手法が用いることが出来る。熱解析については、前回の発

表⁽⁴⁾で報告をおこなっているので、本発表では省略する。

3. 熱制御材料

SLATS の最外面の熱制御材料について述べる。SLATS の最外面の熱制御材料は、取り付け面による大小の差はあるが、AO に対する耐性を考慮しなくてはならない。AO に対する影響は、国際宇宙ステーションでの材料評価試験を反映して表 1 のように熱制御材料の選定を行っている。ただし SLATS の場合、国際宇宙ステーションより低い高度の軌道であるためより多くの AO の影響を受ける。このためある程度安全率をみて、宇宙空間を見る最外層となる熱制御材料の選定を行っている。また、今後の SLATS 実用機等に反映するため、原子状酸素モニタ機器を搭載している⁽⁵⁾。さらに、国内の大学等でも AO の影響についての研究が進められている⁽⁶⁾。このため SLATS の将来実用機では、SLATS の運用結果と研究の進捗によって異なった最外表面材料が使われる可能性は十分ある。

表 1 SLATS 最外表面材料

位置	機能	使用材料
バンパー外面	断熱面 (MLI)	ITO 付 Al 蒸着ポリイミド
バンパー内面	放熱面	Ag テフロンテープ
構体±X 面	断熱面 (MLI)	ITO 付 Al 蒸着ポリイミド
	放熱面	Ag テフロンテープ
構体±Z 面	断熱面 (MLI)	ITO 付 Al 蒸着ポリイミド
	放熱面	Ag テフロンテープ
SAP 裏面	断熱面 (SLI)	Ge 着ポリイミド (Ge 面)

4. バンパ

衛星の高度を下げてゆき高度 200km 程度に達しても、衛星の進行方向 (+X 面) 以外は通常の地球周回衛星と同じ様な設計手法が使える。

進行方向 (+X 面) は、地上大気に比べて約 10^9 倍と希薄であるであるが、衛星は高度 200 km で約 8 km/s 程度で移動する。このため、高度が下がるに伴い自由分子流加熱が大きくなる。また原子状酸素 (AO) のフルエンスが大きくなり、エロージョン等対策が必要となる。

このため図 1 に示すように構体+X 面パネルの前方にバンパを設置した。これは主として+X 面パネル放熱面及び搭載センサをこれらの環境から防護することを目的としている。

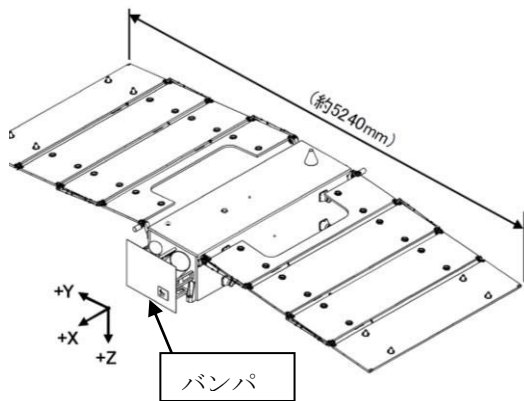


図 1 SLATS 本体とバンパ位置

ここで、バンパのうける熱的影響を図 2 である。通常の地球周回衛星と同じく、太陽入射、地球アルベド、地球赤外の影響を受けるほか、自由分子流加熱の影響を受ける。太陽入射、地球アルベドは SLATS が超低高度 (250 km 以下) に投入されてから一周回上の位置によってバンパに入射しない場合もある。

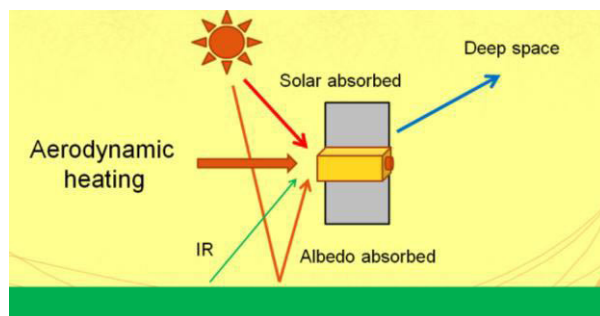


図 2 SLATS バンパの受ける熱的影響

一方、地球赤外や自由分子流加熱は、超低高度の場合、常に影響を受ける。

この自由分子流加熱 Q [W/m^2] は式 1 によって求めることができる。

$$Q = (1/2) mV^2 = (1/2) \rho V^3 \quad (1)$$

ここで、

V : 空気分子の衝突速度 (≒衛星の飛行速度) [m/sec]

m : 単位面積及び単位時間に衝突する空気の質量 (= ρV) [$kg/(m^2 \cdot sec)$]

ρ : 高層大気の密度 [kg/m^3]

衛星高度に対する宇宙環境が平常時の高層大気密度 (NRLMSISE-00) と SLATS バンパのうける自由分子流加熱量を図 3 に示した。高度 800 km ではほとんど自由分子流加熱による影響がないことが分かる。高度 200 km の場合の加熱量は約 $60 W/m^2$ であり、太陽光強度と比較して小さく熱制御への影響は小さいことが分かる。しかし高度 170 km まで低下すると、約 $190 W/m^2$ に増大し、さらに高度が低下すると急激に加熱量が増加することが分かる。

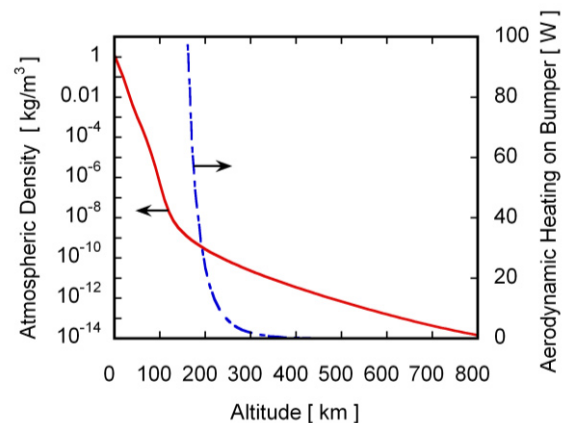


図 3 大気密度と SLATS バンパのうける自由分子流加熱との関係

SLAT は高度 180 km 以上での運用を計画しているためバンパには、アブレータや耐熱タイルなどは必要なく、多くの人工衛星に用いられる多層断熱材 (MLI) での断熱で十分である。

バンパ上の MLI の受ける自由分子流の影響を図 4 に図示した。バンパの外表面は Al 蒸着の厚めのポリイミドフィルムカプトンを最外層とした多層断熱材 MLI を用いている。MLI は、10 Pa オーダーの加圧に対して層密度が上昇し MLI の接触コンダクタンス成分が増加するため断熱性能が変化することが知られ

ている。パンパ上の MLI の受ける動圧は 10^{-2} Pa 程度であり、MLI の層密度を変化させるほどの影響はない。また、対流による MLI 内部の通過熱量が増加するが、 10^{-2} Pa であればその影響は小さい。

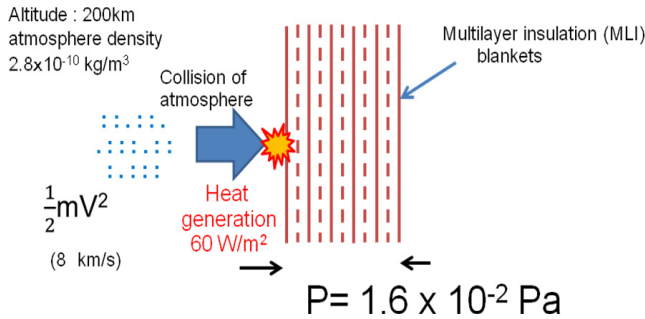


図4 自由分子流加熱とバンパ MLI との関係

次にバンパが受ける地球アルベドおよび地球赤外の影響を計算した。図5に太陽からの直接入射がない場合のバンパ上への入射を示した。地球アルベドおよび地球赤外は衛星高度に対して、自由分子流加熱ほどではないが、緩やかに影響を受けている。

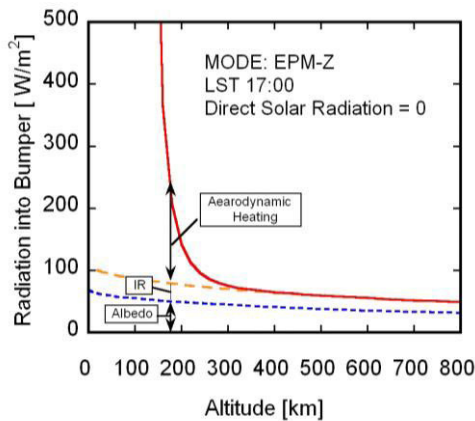


図5 衛星高度とバンパへの入射量

高度 200 km での 1 周回での入射量の変化を図6に示した。バンパに太陽光が直接入射するケースもあるが、時間によってはアルベドの影響も小さく、地球赤外と自由分子流加熱だけの安定した期間もあることが分かる。入射するエネルギーは表面の MLI などの表面材料で一部は反射され、一部は MLI の最外層に吸収される。よってバンパに入熱するエネルギーは MLI 最外層の表面光学特性によって左右され、さらに MLI の断熱性能によって左右される。

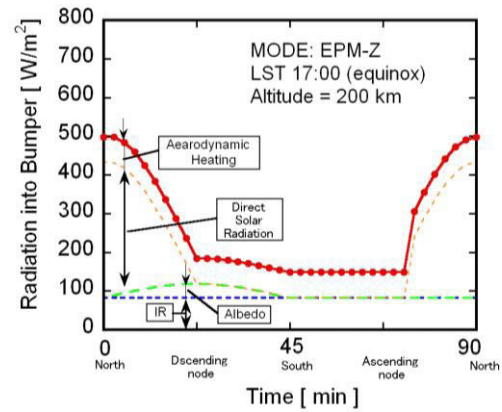


図6 高度 200 km で 1 周回でのバンパへの入射量変化

バンパを裏面断熱とした板した時の各位位置での平衡温度について計算した。平衡温度は式(2)を用いて計算した。

$$Teq = \{(\alpha_s/\varepsilon)(A_s/A_r)(Es/\sigma)\}^{1/4} \quad (2)$$

ここで α_s/ε はバンパの表面光学特性の比でこの計算では MLI の最外層としてよく用いられるカプトンの値を用いた。 A_s/A_r は入射面積と放熱面積の比でここでは $A_s/A_r=1$ 。 Es は自由分子流加熱を含むバンパへの合計入射量、 σ は Stefan-Boltzmann 定数である。

ここでこの平衡温度は、熱容量が小さく、かつ裏面が断熱であることから MLI の最外層の温度に近いと考えることができる。図7に高度 200 km で 1 周回でのバンパ MLI 最外層の平衡温度変化を示す。

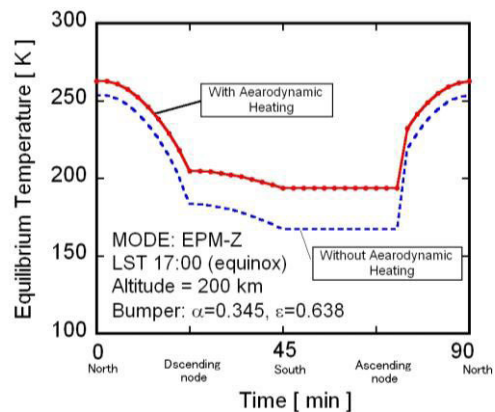


図7 バンパ MLI 最外層の平衡温度変化
高度 200 km, 1 周回分

この図 7 には比較に自由分子流加熱の影響を受けるケースと受けないケースを示している。いずれの時間でも 10 K 以上の差がみられる。特に太陽入射の影響を受けない場所では、さらに温度差が広がっていることがわかる。

これらの計算では、大気密度一定、地球アルベド、地球赤外を一定として仮定して計算を行った。実際にはこれらは変化をするが、MLI の最外層温度は耐熱温度より十分低い温度であることが分かる。

5. 考察

SLATS の運用される衛星高度の大気密度データは一定の精度のものが世界に公開されている。日本国内では、磁気圏-電離圏-熱圏結合シミュレータによる第一原理的な高層大気モデルの構築が進んでいる⁷⁾。しかし高精度の実測データになると入手は困難であり SLATS で高層大気密度の把握は一つのミッションとなっている。週ごと軌道高度から把握するものであり、平均大気密度を得ることができる。

一方、MLI の最外層の温度を計測することにより、1 周回における大気密度の変化を把握できる可能性もあることが分かった。仮に温度から大気密度の変化を計測する場合、自由分子流加熱を受けない場所であつ、地球アルベド、地球赤外の影響を受ける場所での MLI の最外層温度を計測することにより誤差を小さくすることも可能である。

6. まとめ

SLATS の +X 面に取り付けられるバンパについての自由分子流加熱、地球アルベド、地球赤外の影響を述べた。高度に対する変化は、高度が低下すると地球アルベド、地球赤外および自由分子流加熱は増加する。自由分子流加熱は、地球アルベド、地球赤外と比較して高度が 250km 以下で急激に増加することが確かめられた。

これら得られた入射量よりバンパの平衡温度について大気密度一定、地球アルベド、地球赤外を一定として仮定して計算を行った。実際にはこれらは変化をするが、MLI の最外層温度は耐熱温度より十分低い温度であることが分かった。また自由分子流の動圧による MLI の圧縮は、MLI の断熱性能に対して無視できるものであることが確認できた。

MLI の最外層の温度を計測することにより、1 周回における大気密度の変化を把握できる可能性もあることが分かった。

参考文献

- 1) 高畑, 此上, 佐藤, 今村, 川崎, 「超高度衛星 SLATS の研究開発状況」, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1G09, 2013
- 2) 歌島 野田, 「新凍結軌道による超低高度衛星の軌道保持」第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1I12,2007
- 3) 今村, 歌島「地磁気嵐による突発的な大気密度上昇に対する SLATS の軌道制御について」第 54 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2D12, 2010
- 4) 川崎, 高畑, 此上, 佐藤, 今村 「超低高度衛星 SLATS の熱制御」, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3D08, 2012
- 5) 青山, 宮崎, 今村, 木本, 「SLATS の原子状酸素モニタの開発状況について」, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2011-4120, 2011
- 6) 藤本, 安田, 横田, 田川 SLATS/MDM ミッション用 FEP サンプルの超低軌道中性ガス環境地上対照試験」第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1L10, 2012
- 7) Y. Miyoshi, H. Jin, H. Fujiwara, H. Shinagawa, H. Liu, Wave-4 structure of the neutral density in the thermosphere and its relation to atmospheric tides, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 90-91 p.45-51, 2012