

201 宇宙材料・機械に関わる宇宙環境

Effects of Space Environment on Materials and Instruments

佐々木進 (宇宙科学研究所)

Susumu SASAKI, The Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1,
Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa

Space environment, especially near the low earth orbit, has been extensively investigated by the scientific satellites and sounding rockets. However, the effects of the space environment on space materials and onboard instruments have not been well studied yet. This report describes characteristic features of space environment in term of its effects on materials and instruments. Several examples are presented in this context.

Key Words : Space Environment Effect, Spacecraft Induced Environment

科学衛星や観測ロケットによる観測により、地球まわりの宇宙環境の基本的なパラメーターについては、かなり細かいところまで明らかになってきた。しかしながら、宇宙機周辺に形成される宇宙環境や、宇宙環境が宇宙機や搭載機器に与える影響については、ようやく研究が始まったところである。本稿では、宇宙材料や宇宙機器が受ける影響という立場から見た宇宙環境の特性と関連するいくつかの事例について述べる。

1. 宇宙環境の特性と飛翔体に及ぼす影響

宇宙環境は、粒子環境、放射線環境、電磁・光学環境、重力環境に区分される。地球まわりのこれら環境の特性をまとめると以下ようになる。

(1) 粒子・微粒子・デブリ環境

高度200km以上の高度領域は、 10^{-7} Torr以下の超高真空である。ただし、大型飛翔体の表面付近では、通常、キャビンリークや搭載機器からのアウトガスのために 10^{-6} ~ 10^{-7} Torrとなっている。電離層プラズマの最大密度は 10^6 /ccオーダー、温度は数千度であるが、飛翔体のウェイク側では、プラズマ密度は100分の1以下となり、温度は数千度上昇すると考えられている。極域や磁気圏では数十keVの電子やイオンが大量に存在し、宇宙機の高電圧帯電の原因となっている。また、地球周回軌道には、10cm以上のサイズのデブリが約7000個存在している。これ以下の大きさのデブリやメテオロイドについては、分布モデルは確立していないが、小さいもの程、存在密度が大きいことがわかっている。宇宙のごみ、デブリについては、今後適切な対策を施さないかぎ

り、人類の宇宙活動が活発になるに伴い増大し続け、やがて人類の宇宙環境利用に深刻な影響をもたらすことになると考えられている。

(2) 放射線環境

太陽からの高エネルギーの電子とプロトンは太陽フレア粒子と呼ばれ、フレア発生時に突発的に増加する。銀河宇宙線は遠方の諸天体が源となっているもので、太陽活動の影響を若干受けるものの、定常的に存在する。地球をベルト状にとりまいている放射線帯では、地球磁場に捕捉された高エネルギー電子とプロトンが大量に存在し、低軌道衛星に強い影響を与える。特に、南大西洋異常と呼ばれる領域では、放射線帯が低い高度まで張り出し、高度1000km以下の高度の衛星にも、無視できない影響を与える。

(3) 電磁・光学環境

宇宙空間には、エネルギー密度は小さいが極めて多様な電磁場振動(波動)が存在する。定常電場は、微弱で飛翔体に直接影響を与えることは通常ない。定常磁場は、地球磁場のダイポールに基づくもので低高度では地表と大きな違いはない。地球磁場は、周回運動する構造物上に起電力を誘起する。太陽光強度は約 1.35kw/m^2 で、大気で減衰する地表より数十%大きい。熱環境という意味では、地球からの太陽光の照り返し(アルベド)も周回軌道衛星では無視できない。

(4) 微小重力環境

宇宙空間固有の環境ではなく、宇宙機の軌道運動により宇宙機上に形成される低レベルの重力環境で、マイクロGレベルまたはそれ以下の環境が期待

される。ただし、有人飛翔体や各種の可動部分や流体を持つ大型の飛翔体では、これより10~100倍程度高い振動分が存在する。

これらの宇宙環境が宇宙機や搭載機器に及ぼすコンポーネントレベルの影響をまとめるとTable1のようになる。

Table 1 Environmental effects in component level

環境	関連するコンポーネントレベルの影響
ガス環境	アウトガス、熱衝撃、可動部機能不良、放電 原子状酸素作用
プラズマ環境	帯電、放電による破損
放射線環境	LSIのラッチアップ、ソフトエラー、機能低下、太陽電池セルの劣化、高分子材料の劣化
太陽光環境	表面物性変化(熱特性、光学特性劣化)

一方宇宙機のシステムレベルで重要な宇宙環境はTable2のようにまとめられる。

Table 2 Environmental effects in system level

システムの特性	環境	関連する現象
大型構造物	磁場環境	高電圧起電力
	重力環境	フライトダイナミクス
	微粒子、デブリ環境	衝撃破損
高電圧発電	プラズマ・ガス環境	電力損失、アーク放電、質量損失
	放射線環境	生体への影響
有人飛翔体	プラズマ環境	感電、放電事故
	微粒子、デブリ環境	気密破壊、衝撃事故

さらに、宇宙環境そのものではないが、打ち上げ・軌道投入時の、加速度、振動、衝撃、急速減圧、熱環境などの飛翔体環境も実用上重要な問題となる。

2. 具体的な事例

材料・機械に関わる宇宙環境としては、粒子環境(中性ガスやプラズマ)が直接的に関連すると思われるので、以下にガス環境計測、摩擦の評価、及びプラズマ粒子による材料劣化の研究事例について述べる。

2.1 大型飛翔体で計測したガス環境

1983年に実施されたスペースシャトルSEPAC実験(Space Experiment with Particle Accelerators)では、オービタからの電子ビームとプラズマビームの放射が宇宙環境に与える影響を研究するために、各種のセンサから構成される宇宙環境計測器が搭載された。この装置により、高度250kmを周回するオービタ貨物室の中性ガス密度が計測され、自然のガス密

度よりはるかに大きいことが示された¹⁾(Fig.1)。これは、オービタに搭載されている各種の気密装置からのガスリークと搭載機器からのアウトガスによるものと考えられている。現在飛翔中のSFU(Space Flyer Unit)に搭載されている環境計測器²⁾で測定したSFU周辺の真空度でも、同様な結果が得られている(Fig.2)。このことは、大型宇宙機の表面付近の粒子環境は、科学衛星等で計測されている自然の粒子環境とは大きく異なり、飛翔体そのものからのガスが支配的であることを示している。

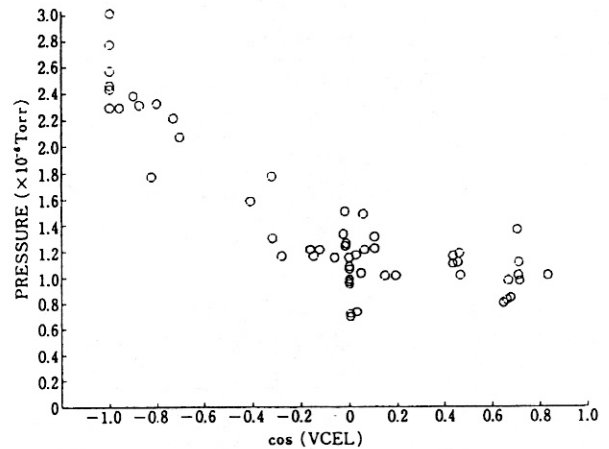


Fig.1 Pressure measured in the cargo-bay of Space Shuttle orbiter. VCEL is the angle between the normal direction of sensor aperture and the orbiter velocity vector.

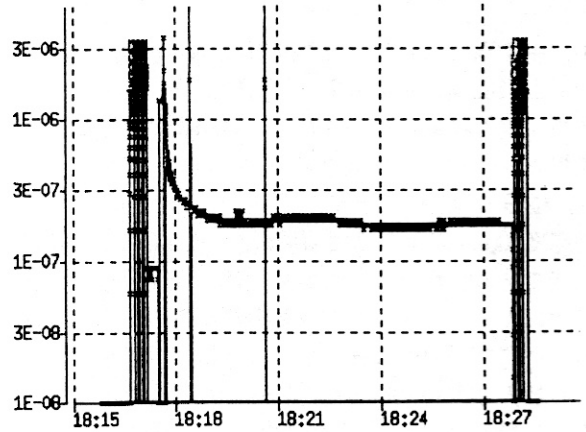


Fig.2 Pressure measured by an ionization gauge onboard Space Flyer Unit which is operating at the altitude of 486km(raw data, not calibrated). Vertical:Pressure(Torr), Horizontal: Time(min:sec)

また、スペースシャトルのような飛翔体では、軌道維持や制御のためのスラスターの動作や、温度制御のための蒸気の放出(flash evaporator)、不要水の排

出(water dump)が行われる。これらにより、宇宙機周辺のガス環境は、大きく影響を受ける。スペースシャトルオービタのスラスタが動作した時の例をFig.3に示す³⁾。スラスタシステムの動作により、ガス環境だけでなく、プラズマ、電磁、光学環境が大きく影響を受けていることがわかる。

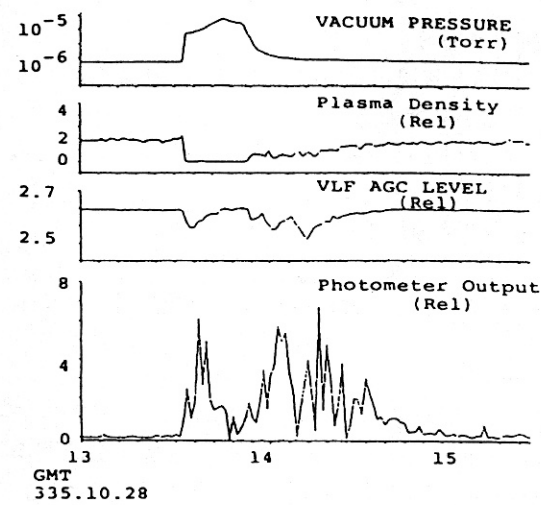


Fig.3 Environmental effects induced by a thruster firing on the Space Shuttle orbiter.

2.2 観測ロケットによるワイヤ伸展実験での摩擦評価

1980年より1992年まで5回にわたり日米共同のテザーロケット実験が実施された。この実験では、ロケットを打ち上げ後、Fig.4に示すように、導電性のワイヤをつけたまま2つに分離して飛翔させ、両ロケット間に高電圧を印加してワイヤに電流を流し、様々な宇宙科学実験を行った⁴⁾。これらの実験では、親ロケットから、テフロン被覆したステンレス撚り線ワイヤ(0.66φ)が、毎秒1~2mの速度で最大400mまで繰り出された。ワイヤはワイヤ導出部の壁を擦りながら出ていくため、摩擦力によるテンションが発生する。これに打ち勝ってワイヤ伸展を行わせるため、子ロケット側では0.44Nのコールドスラスタを動作させた。これらの実験で得られた伸展速度 (Fig.5) の解析によると、宇宙空間で実際に働いた摩擦力は0.078Nと計算され、地上試験で計測された値より約2倍大きかったことを示している。このことは、摩擦力を支配する表面状態が、ロケット打ち上げ後、極めて短時間(10分程度)で変化したことを示している。

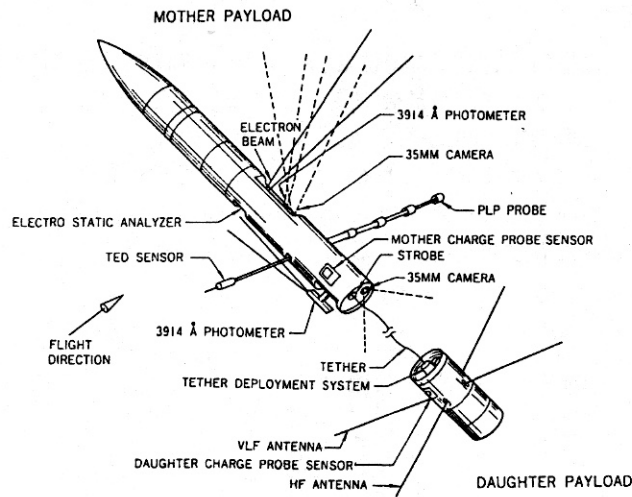


Fig.4 Configuration of tethered rocket experiment. Tether wire was deployed from the daughter section.

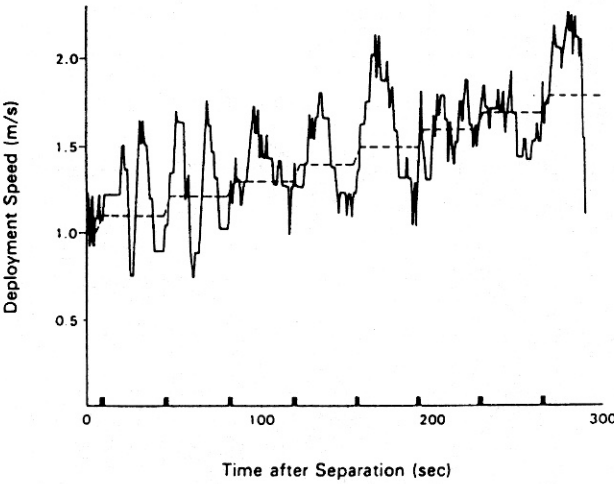


Fig.5 Deployment velocity of tether wire plotted against time after mother-daughter separation. Short bars at the bottom indicate the operation of cold thruster.

2.3 スパッタリングによる宇宙材料の劣化実験 (地上実験)

原子状酸素による材料の表面劣化については、スペースシャトルでの原子状酸素作用の発見以来、多くの宇宙実験がなされた (低エネルギー酸素作用)。現在では各種の材料についてのデータベースが作成され、宇宙材料の選定に利用されている。一方、高電圧発電などで問題となるイオン衝撃による材料の劣化 (高エネルギーイオン作用) については、未だ研究課題が多い。宇宙科学研究所では、各種の宇宙材料に1keV程度のエネルギーの酸素イオンを照射して、その劣化の特性と二次イオン発生に伴う表面汚染の研究を行っている⁵⁾。Fig.6に、実験の配置図を示す。これらの実験で得られたスパッタリング率を電離層を周回する

衛星に適用し、1kVの電位を持ったアルミ材の場合について、1年間の質量欠損量を予測した例をFig.7に示す。これらの結果から、フィルム状の材料については、スパッタリングによる材料欠損が無視できないこと、及び、二次イオンの付着による表面汚染が絶縁破壊をもたらす可能性のあることが結論されている。

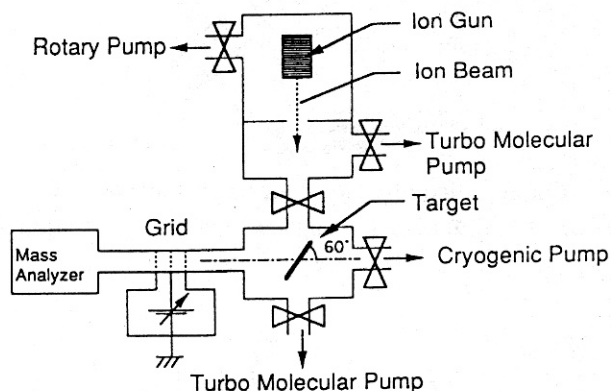


Fig.6 Experimental layout to study the effects of energetic ions on space materials.

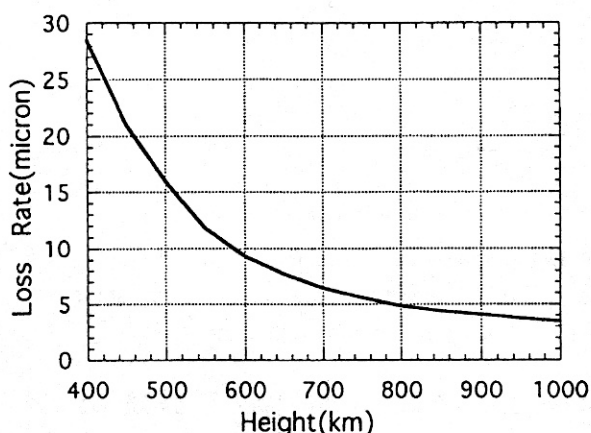


Fig.7 Mass loss per year for an aluminum sphere of 1 m diameter biased at -1000V, estimated by the laboratory experimental results.

3. 宇宙環境に関する研究シナリオ

3.1 宇宙開発と利用の動向

宇宙機は今後、宇宙基地タイプの母船型のものはより大型化し、通信衛星のような単機能のものはより大量に軌道の上に配備されると予測されている。大型宇宙機からのガス放出、粒子放出、高電圧露出、電磁波放射等は、宇宙環境との強い相互作用をもたらす。その結果、宇宙機周辺に自然の宇宙環境と大きく異なった独特の宇宙環境(Spacecraft-Induced Environment:SIE)を形成する。今後、宇宙環境利用の立場からのSIEの環

境計測やその制御(汚染や電位のコントロール)が必要となると考えられる。また、より重要な点は、大量に宇宙空間に配備、投入される宇宙機は、特に対策を施さない限り、宇宙環境そのものの変質と環境汚染をもたらす可能性があることである。今後、宇宙環境保全の立場からのグローバルな環境計測、環境管理が必要になると考えられる。

3.2 研究シナリオ

3.1に述べた状況に対処するため、今後以下のような研究開発が必要である。

- (1) 能動的作用を持つ大型の飛翔体が形成する宇宙環境の計測とデータベース化。
- (2) 環境制御技術(汚染コントロール、電位コントロール等)の研究。
- (3) 能動的作用を持つ大型飛翔体や多数配備される飛翔体が、グローバルな宇宙環境に与える影響の計測、評価。
- (4) (1)~(3)に関わる新しい計測技術、研究手法の開発と試験。例えば、デブリ計測技術、三次元広範囲環境計測技術(副環境衛星、テザー環境衛星など)、宇宙能動実験(ガス放出実験、デブリ放出実験、電波放射実験)などの研究開発。

4. まとめ

宇宙機とその搭載機器への影響という観点から、宇宙環境の特性を論じるとともに、これらに関連して、ガス環境、宇宙環境での摩擦、高速酸素イオンによる材料劣化の研究の事例を示した。また、今後の宇宙環境利用と人類の宇宙活動という視点から、宇宙環境の計測と制御及びその保全のための研究の必要性について論じた。

参考文献

- 1) M.Yanagisawa et al., Vacuum-environment around Spacelab-1, ISAS Report No.617, 1985.
- 2) S.Sasaki et al., Study of Spacecraft-generated Environment on Space Flyer Unit, Proc. of the 19th ISTS, Yokohama, 769, 1994.
- 3) 佐々木進、河島信樹、飛翔体環境科学、宇宙科学研究所報告、第45号、1987年
- 4) S.Sasaki et al., Tethered Rocket Experiment(CHARGE-2):Initial Results on Electrodynamics, Radio Sci., 23, 975, 1988.
- 5) 佐々木進、高速酸素イオンによる宇宙飛翔体表面材料の劣化の研究、平成6年度科学研究費補助金一般研究(C)研究成果報告書、1995年