

# 宇宙環境が人工衛星に与える影響について

小原 隆博

東北大学 理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター  
東北大学 災害科学国際研究所 災害理学部門(兼務)  
宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 宇宙環境 G(招聘)

## 1. はじめに

人工衛星が飛翔する宇宙空間は、太陽活動の影響を受けて激しく変動することが、これまでの研究によって判明している。変動する宇宙環境を分類すると、A)中性大気、B)高エネルギー粒子、C)電磁波、D)プラズマ、E)宇宙デブリ・宇宙塵に区分され、影響で分類すると、1) 表面劣化、2)衛星帯電、3)半導体損傷になる。人工衛星ではないが、測位など衛星電波利用への影響や、宇宙飛行士などへの被曝もあり、多岐にわたる影響が識別出来る。

宇宙環境からの影響に対する対策が、近年積極的にとられていて、対策技術の開発も進んでいる。宇宙環境に強い衛星表面材料の開発、光学特性・熱特性が劣化しない表面材料の開発、帯電コーティング、帯電しない宇宙材の開発、帯電を緩和する仕組み、放射線に強い半導体の製造、半導体異常の発生時に自己復旧する回路の設計、などの要素技術の開発が行われている。

また、低高度を飛翔する国際宇宙ステーション (ISS) に特化した対策として、ISS を宇宙塵・宇宙デブリから守ると特殊バンパーの開発や、急激な大気膨張を予測する大気変動モデル、太陽放射線や地球の捕捉放射線の変動を予測する宇宙放射線予測モデルなどの開発も進んでいる。後者は、ISS のみならず、各種人工衛星にも適用され、宇宙天気予報の重要項目でもある。

以上の、宇宙環境技術の開発成果を国際的に展開する努力も続けられていて、衛星設計標準の策定が進んでいる。国際連合の宇宙空間平和利用委員会 (UN COPUOS) では、2011年から長期的宇宙活動維持作業部会(LTS WG)がスタートし、配下の専門家会合として、宇宙環境専門家会合がスタートしている。同会合では、宇宙環境対策にかかわる範例を収集するとともに、具体的指針を宇宙天気専門家会合報告として2014年春に公表した<sup>1)</sup>。

本報告では、表面劣化、衛星帯電、そして半導体損傷に焦点を合わせて、現状の技術開発を、上記の順にレビューする。

## 2. 表面劣化

宇宙機の表面を見ると、構体は熱制御材で覆われている。そして、構体からは、アンテナやセンサーが展開されていたり、切欠きにはラジエーターなどが装備されている。大きな展開物は、電源パネルで、最近では10メートルを超えるものもある。

宇宙機の暴露部は、長期間にわたり宇宙環境に露出する。ここで、懸念になるのが、宇

宙放射線、紫外線、X線、そして原子状酸素である。宇宙材料や宇宙部品には、これらに対して十分な耐性があることが求められる。

## 2-1. 宇宙材料

### a) 熱制御フィルム

宇宙材料の代表格は、熱制御フィルムである。宇宙開発の初期の頃は、良質の熱制御は無かったが、近年では技術開発の結果、品質の良い熱制御フィルムが、多数開発されている。熱制御フィルムは、高分子フィルムを単層（あるいは多層）に加工したもので、裏面に粘着剤を塗ったテープの形状をとるものが多い。熱制御フィルムにはカプトンという商品名のポリミドフィルムや、フッ素系のフィルムがある。裏面に銀やアルミニウムを蒸着していて、ポリイミドの場合は金色に、フッ素系フィルムは銀色に見える。

フィルムは帯電防止の観点から、導電化が行われている。表面に酸化イリジウム (ITO) を被せたり (表面処理)、ポリイミド自体にカーボンを加える内部処理が行われる (ブラックカプトン) など、導電化が励行されている。

熱制御材は、低高度衛星あるいは ISS では、特に原子状酸素への対策が重要である。表面が酸化して失われないように、SiO<sub>2</sub>(二酸化ケイ素) や Ge(ゲルマニウム)を表面付与する事が最近行われている。

### b) 反射材

太陽光を反射させる素子で、OSR(Optical Solar Reflector)と呼ばれる。OSR は、可視光を透過させ、赤外線を反射させる。この事で、適切なエネルギー授受を実現する。OSR は、ガラスを基材としている。

能動的に、衛星内部から外部に向けて熱放出をする機器もある。サーマルルーバと呼ばれるが、これに対しても、光学特性・熱特性の詳細が検討されている。

### c) ベータクロス

ガラスクロスにフッ素系樹脂を含浸させたもので、外観は白色を呈する。ガラス繊維が基材なので、原子状酸素に対して、特に強い性質がある。また、宇宙デブリ衝突など、機械特性に優れている利点がある。現在、ISS では、ベータクロスを外面に貼って、宇宙環境から ISS 本体や付属物を護っている。

### d) 塗料

宇宙機や ISS に用いられる塗料は、白色や黒色を呈することが多い。白色塗料はシリコン系を基材としているが、黒色塗料ウレタン系を使用している。

衛星塗料の目的は、熱設計を保障することにある。太陽光と地球からの反射光そして内部機器からの発熱が、熱入力である。初期のころは良質の熱制御材も少ないこともあって、特に黒色塗料を塗布する事が多かった。表面に露出していて熱入力が少ない部分は、よく冷える。そのような部分については、現在も熱的結合を図る目的で、黒色塗料を塗布している。

## 2-2. 材料劣化

### a) 放射線

衛星表面材料の劣化を考える時、宇宙放射線は重要な要素である。宇宙空間における放射線は、X線や $\gamma$ 線などの電磁波の範疇に属する物と、宇宙線に代表される非常にエネルギーの高いプロトン（陽子）や重粒子、そして電子も、放射線（放射線粒子）である。

表面材料に与える放射線の影響は、大まかに言って、分子鎖の切断や架橋である。さらに、表面材料の変色や特性の変化も引き起こす。

### b) 紫外線

衛星表面物質に与える紫外線の影響は、特に重要であるので、ここでは、特別に紫外線について詳細を述べる。

放射線と同様に、紫外線も分子鎖の切断・架橋を引き起こす。また、表面の変色やクラックの発生による機械的特性の劣化も発生させる。特に表面の変色は、太陽光や地球の反射光に対する光学特性を変化させ、熱構造に与える影響が大きい。

紫外線の照射による、太陽光吸収率の変化も、厳密に計測されていて、JAXAの衛星設計基準に加えられている。

太陽からの紫外線量は、非常に変化が大きく、最大60%以上も変化する。数年以上の運用を予定する人工衛星にとっては、今後数年の太陽紫外線予測は、熱制御の観点から重要であり、精度の高い紫外線予報が期待されている。

太陽からの紫外線量は、太陽の表面状況、特に活動領域の有無に大きく依存している。今後の太陽活動の推移予測は、重要な宇宙天気予報項目であり、科学研究の早急な進展が強く要請されている分野でもある。

### c) 原子状酸素

衛星表面の多層断熱膜は、化学的に非常に活性な原子状の酸素により酸化や、場合によってはエロージョンを起こす。薄膜の場合は、非常に短い時間（数ヶ月程度）で、完全に消失する事もある。

原子状酸素の存在する範囲は、100km以上の高度であるが、180km程度から650km程度の高度範囲では、大気の主成分になっている。よって、国際宇宙ステーションを含む、低高度衛星において、原子状酸素からの影響が不可避で、十分な対策が必要になる。

工学的・技術的な対策は後述するが、大気科学モデルの開発も喫緊の課題と言える。世界には、幾つかの大気モデルは存在しているが、変動する太陽活動や高緯度のオーロラ活動の影響を含んだ高精度のダイナミックモデル開発も進んでいる。こうしたモデルの実用化は、衛星表面材料の耐久性を評価する上で大切な事項である。

## 3. 衛星帯電

静止軌道衛星や低高度衛星が飛翔する空間は、中性大気の密度が著しく低下しているが、荷電粒子（プラズマ）については、その密度が増加している空間でもある。低高度衛星で

は1立方センチメートル当たり10,000個程度、静止軌道でも100個程度のプラズマが存在している。

この空間がひとたび、オーロラ等に代表される嵐の状態になると、プラズマ密度が大きく増加すると共に、その温度も著しく増加する。このような時に人工衛星の表面が帯電する。帯電は、時間と共に程度を増していき、閾値を超えた時に放電が発生する。放電の影響が、非常にしばしば、衛星搭載の部品や装置に悪い影響を与え、衛星運用に支障が生じる。これを、衛星のアノマリー、あるいはマルファンクションと呼ぶ。

### 3-1. 表面帯電

宇宙機の表面を見ると、構体は熱制御材で覆われている。そして、構体からは、アンテナやセンサーが展開されていたり、切欠きにはラジエーターなどが装備されている。大きな展開物は、電源パネルで、最近では10メートルを超えるものもある。

前述のように、衛星周辺にはプラズマが存在していて、更に太陽光も衛星に照射している。このような状況で、衛星の電位は、外部とやり取りする正電流と負電流が均衡するように決定される。

よく知られたように、衛星から流れ出す負電流は、外部から飛び込む電子が電流のほとんどである。一方、衛星に流れ込む正電流は、外部から飛び込む正イオン、衛星から飛び出す光電子、そして外部から飛び込んだ電子によって生じた二次電子が主たるキャリアーである。

低高度の極軌道衛星は、夜側オーロラ帯上空で帯電をする事がある。磁気緯度65度から75度はオーロラ帯と呼ばれ、オーロラが頻発する。オーロラを起こす電子は、磁力線に沿って非常に速いスピード（高速の数10%程度）で降下してくる。加速電圧に換算すると10キロボルト(kV)にも達する。このような電子が大量に衛星に衝突すると、瞬時に衛星はマイナスに帯電する。帯電は絶縁部分に顕著で、電子が拡散せずに誘電体部分に滞留する事による<sup>2)</sup>。こうした帯電は、部分的に起こることから局所帯電と呼んでいる。

次に静止軌道について考える。静止軌道では、衛星に衝突するプラズマは、プラズマシートのプラズマである。プラズマシートとは、赤道域にシート状に薄くそして広く分布するプラズマのシートであるが、通常の状態では、シートの地球側境界は、静止軌道より遠い位置にある。ひとたび、オーロラ活動が活発化すると、プラズマシートの内側境界は、夜側の静止軌道位置まで近づき、静止軌道はプラズマに浸ることになる。プラズマのエネルギーは約1キロ電子ボルト(keV)あることから、衛星は、1kV程度、容易に帯電を起こす。

太陽電池の表面は、次に述べる宇宙放射線対策で、カバーガラスで覆われることが多いが、太陽光の影響で、カバーガラスから光電子が放出される。負に帯電した衛星構体との間に、より大きな電位差が生まれ、放電事故に至るケースが、静止軌道には多い。

基本的に帯電が発生する衛星表面や太陽電池パネルであるが、以下のような対策が取られている。いずれも、電荷を逃がすことが、指導原理になっている。

- ・表面に物体間を銅線で結線する。

- ・太陽電池のカバーガラスの導電性被膜を塗布する（酸化イリジウムを多く用いる）。
- ・熱制御材表面に酸化イリジウムを被覆する。
- ・熱制御材は、高誘電率の素材（テフロン）を避けて、高電導度の素材を用いる。

などである。

工学的・技術的な対策は前述の通りであるが、オーロラ発生の科学モデルの開発も喫緊の課題と言える。世界には幾つかのオーロラ発生モデルは存在しているが、変動する太陽活動の影響を含んだ高精度のダイナミックモデル開発も進んでいる<sup>3)</sup>。こうしたモデルの実用化は、衛星のライフタイム全般をカバーする表面材料の帯電特性を設計する上で、大切な事項である。

### 3-2. 内部帯電

放射線電子など高いエネルギーを持つ電子は、衛星の構体を貫通し、衛星内部に帯電する。具体的には、アースのない金属、電子回路の基板間、同軸ケーブルの線間の容量や誘電体に帯電する。

衛星内部には達するため（衛星構体を貫通するため）に、 $0.1\text{keV}$ 以上のエネルギーを持つ必要があるが、あまりに高い場合は、通り抜けてしまう。よって、 $0.1\text{MeV}\sim 3\text{MeV}$ が、内部に影響を及ぼす電子エネルギーと言える。

内部帯電の対策として、

- ・アルミ  $3\text{mm}$  に相当するシールドで囲む。
- ・テフロンやカプトンなどの誘電体材料の使用量を少なくする。
- ・回路基板などに、電流のリークパスを必ず付ける。
- ・スポット的な放射線シールドの金属材には、必ずリークパスをつける。

などである。

## 4. 半導体損傷

人工衛星には、多くの半導体素子が搭載されており、昨今は、その集中化が著しい状況にある。そうした集積回路に放射線粒子が飛び込むと、半導体中にて電離作用により、電荷が発生する。以下では、半導体の損傷の視点から、現象を記述していく。

### 4-1. 電離損傷

放射線粒子によって、半導体中の電子が励起されて、伝導電子や正孔が生じることで、素子の特性が変化する。これを総称して、電離損傷と呼ぶが、以下のようにいくつかの区分され理解されている<sup>3)</sup>。

#### a) シングルイベントアップセット

宇宙機器が受ける放射線影響の一例として、放射線電子による内部帯電については、3-2で述べた。ここでは、もう一つの放射線粒子である陽子（プロトン）について述べることにする。

陽子（プロトン）の半導体に与える影響の代表例が、シングルイベントである。半導体

に陽子が飛び込むと、電離作用により発生した電荷が、疑似パルスが発生させる。これをシングルイベント（単発現象）とよび、その結果生じる論理反転をシングルイベントアップセット（SEU）と呼んでいる。この現象は、放射線帯内帯において顕著であるが、静止軌道にも見られる。前者は、放射線帯内帯の主たる構成要素の陽子（プロトン）が原因であるが、後者は、太陽フレアによって発生したプロトンや重イオンが、SEUの原因となる。

シングルイベントの防止には、プロトンの侵入を防ぐ事が重要で、半導体を十分にシールドする等の手段がとられている。しかし、シールド厚を増すことは衛星の重量に直接に影響するので、部品レベルでの対策が極めて重要になる。もちろんプロトンの異常増加を予知する事により、危険な状況から回避出来るが、その時は通電オフなどの動作は免れない。

#### b) その他の現象

シングルイベントアップセットの他の単発現象に、シングルイベントラッチアップ、シングルイベントバーンアウトがある。

シングルイベントラッチアップは、CMOS素子全体に見られ、異常電流の生成によって、誤動作が継続される。通電を止めて、状態の復帰を行うが、完全復帰は難しい場合もある。

シングルイベントバーンアウトは、突入した放射線の影響で、回路中に大電流が流れるパス（経路）が形成され、その部分が課題電流によって焼失してしまう現象であり、復帰は出来ない。

電子や陽子などの定常的な放射線被曝によって、半導体素子の特性変化が起こることが多い。これをトータルドーズ効果と呼ぶが、リーク電流の増加、消費電流の増加を伴う場合が多い。

### 5. 国連ベストプラクティス・ガイドラインにおける宇宙環境対策

宇宙環境対策技術は、日々、進化している。放射線による論理反転については、設計段階で自己修復回路を導入したり、放射線耐性の大きい素子の開発も、進んでいる。宇宙材料についても、帯電対策を施した新材料が製造されているなど、世界的に宇宙環境対策技術開発が進んでいる。

一方、人工衛星の高度化に伴い、衛星自体の宇宙環境への耐性が低下することも顕在化していて、世界の各国・各機関にて、ノウハウを出し合って、宇宙空間で安全を確保しようとする機運が近年、高まっている。

#### a) 国連宇宙天気専門家会合の設立

国連宇宙空間平和利用委員会(UN COPUOS)は、56年前に国連の宇宙活動の平和利用支援のために設立され、これまで月面の平和安全利用、宇宙ステーションの平和安全利用などについて、国際協調の視点から、技術的・法律的に検討を続けて来ている。

今般、宇宙デブリの異常な増加に伴う宇宙活動の安全性への危惧が高まりつつある中で、2010年に宇宙天気専門家会合をスタートさせた。同会合では、共同議長システムが採用され、筆者とカナダ・アルバータ大学のイアン・マン教授が宇宙天気専門家会合の共同議長に選出され、2011年後期から活動を開始した。

#### b) 範囲

宇宙天気専門家会合の所掌する範囲は、以下の4点に集約されている。

- i) Collection, sharing and dissemination of data, model and forecast tool (データ、モデル、および予報に関する情報の収集、共有、および配布に関して)
- ii) Capabilities to provide a comprehensive and sustainable network of sources of key data in order to observe and measure phenomena related to space weather in real time or near-real time (リアルタイム・準リアルタイム観測と持続的データ交換をサポートする情報ネットワークに関して)
- iii) Open sharing of established practices and guidelines to mitigate the impact of space weather phenomena on operational systems (宇宙天気影響軽減するための手法およびガイドラインの非制限的共有に関して)
- iv) Coordination among State on ground-based and space-based space weather observations in order to safeguard space activities (安全な宇宙活動遂行を目的とした、地上と宇宙からの観測に関する各国調整に関して)

以上の項目に対して、本専門家会合では、2種類の文書を準備する事を合意した。それらは、グループレポートと、ガイドラインである。

・グループレポートは、各国ならびに国際的な範囲で活動する機関からの、最新の宇宙天気活動にかかわる情報、すなわち観測の状況、モデルの開発状況、衛星などへの影響に関する取組などについて、情報を収集し、統括的にまとめる。

・ガイドライン文書は、宇宙天気のリスクの評価と、宇宙天気影響を低減する手法、技術標準などの開発について、ベストプラクティスを紹介しつつ、統括的にまとめる。

宇宙天気専門家会合では、年に2回の会合を持ちながら、上記の1) および2) について2014年2月までに仕上げた。

#### c) 策定されたガイドライン

報告書については、昨年、本シンポジウムで報告したので<sup>4)</sup>、今回はガイドラインについて述べる。2014年2月までに合意された5項目のガイドラインは、以下の表1の通りである。

Guideline 1	Support and promote the collection, archiving, sharing, inter-calibration and dissemination of critical space weather data (データの共有、相互利用)
Guideline 2	Support and promote further coordinated development of advanced space weather models and forecasting tools in support of user needs (モデル、予測ツール開発の情報交換)

Guideline 3	Support and promote the coordinated sharing and dissemination of space weather model outputs and forecasts (モデル出力、予測情報の共有)
Guideline 4	Support and promote the collection, sharing and dissemination of the data and access to information relating to best practices for mitigating the effects of space weather on terrestrial and space-based systems and related risk assessments (データ並びに減災技術情報へのアクセス)
Guideline 5	Promote the education, training and capacity-building required for a sustainable global space weather capability (啓蒙・教育)

表 1：現在議論されているガイドラインの内容

## d) 現状

その後「宇宙天気ガイドライン」は、宇宙活動の長期的持続の観点から、「宇宙デブリのガイドライン」とマージされて、統一的に議論が進んでいる。そこに至る過程で、上記の1～4は、整理統合され、以下の2つの大くくりのガイドラインになりつつある。

即ち、

- 1) Sharing operational space weather data and forecasts(宇宙天気データと予報の共有):

States and international intergovernmental organizations should support and promote the collection, archiving, sharing, intercalibration, long-term continuity and dissemination of critical space weather data and space weather model outputs and forecasts, where appropriate in real time, as a means of enhancing the long-term sustainability of outer space activities. (国家・国際政府組織は、宇宙活動の長期持続性の強化手段として、クリティカルな宇宙天気データと宇宙天気モデルの出力並びに予報について、リアルタイムでの収集・保管・共有・校正・配布を支援し、促進すること。)

- 2) Development of space weather models and tools and collection of established practices on the mitigation of space weather effects (宇宙天気モデル・ツールの開発と宇宙天気の影響低減のベストプラクティスの収集):

States and international intergovernmental organizations should support and promote the development of advanced space weather models and forecasting tools and the collection, sharing and dissemination of, and access to, information relating to established practices for mitigating the effects of space weather on terrestrial and space-based systems, as a means of enhancing the long-term sustainability of space activities. (国家・国際政府組織は、宇宙活動の長期持続性の強化手段として、先進宇宙天気モデルと予報ツールの開発、宇宙天気の地上及び宇



宙システムに対する影響を低減するために確立された実行手段に関する情報の収集・共有・配布・アクセスを支援し、促進すること。)

に集約された。

上記に示した、策定過程のガイドライン・勧告は、世界における宇宙天気研究の一層の推進を促す内容であり、宇宙天気サービスの精度向上に繋がる内容である。

## 6. 結語（今後に向けて）

国連での動きについても、第5節で加えたが、今後、早急に進めるべき内容は

- ・クリティカルな宇宙天気データを継続的に取得するシステム
- ・高精度宇宙天気モデル開発の推進
- ・上記情報のリアルタイム公開
- ・地上及び宇宙システムに対する影響を低減するための技術開発
- ・上記内容の非制限的共有

である。

翻って、日本の状況を考えると、宇宙開発の担当機関である JAXA（宇宙航空研究開発機構）と、宇宙天気予報の実施機関である NICT（情報通信研究機構）への期待が大きい。もちろん、大学など JAXA, NICT 以外の研究組織に於いても、宇宙天気科学と宇宙環境技術開発が実施されている。よって、オール日本の宇宙天気に関する協議会組織を、アドホック的に設立し、その中で、今後のアクションプランを議論する必要がある。

本シンポジウムのもう一つの意義は、宇宙天気にかかわる関係者が集うところにあり、この機会を積極的に活用したいと筆者は考えている。

## 謝辞：

JAXA 研究開発本部宇宙環境G、松本G長、古賀主任には貴重な情報とご助言を頂きました。感謝申し上げます。

## 参考文献：

- 1) Obara Takahiro and Ian Mann, Working report of expert group C: Space weather, UN COPUOS Report, pp. 53, A/AC.105/C.1/2014/CRP.13, 2014
- 2) 小原隆博、第5章磁気圏、宇宙環境科学、オーム社、2000
- 3) 小原隆博、放射線粒子環境、P251-258, 日本航空宇宙学会誌、2003
- 4) 小原隆博、第10回宇宙環境シンポジウム報告、2013