

## 1.2.3 人工衛星

長妻 努（情報通信研究機構）

（2020年9月30日受付、2021年5月31日公開）

宇宙環境は人間が生活を営む地球表面の環境と大きく異なる。宇宙空間は希薄な電離大気（プラズマ）の領域であり粒子の平均自由行程が長く、大気による太陽放射の吸収の影響が存在しないため、人工衛星等の宇宙機は、銀河宇宙線や太陽プロトン現象等の宇宙放射線や地球磁気圏に捕捉されている放射線帯粒子等の高エネルギー粒子や太陽紫外線の影響を受ける他、周囲に存在するプラズマ粒子との相互作用も生じる。

また、一口に宇宙環境と言っても、領域によってプラズマの温度や密度の特性が異なり、人工衛星等の宇宙機に与える影響も異なる。更に地球周辺の宇宙環境（ジオスペース）は太陽フレアやコロナ質量放出（Coronal Mass Ejection: CME）現象等の太陽活動や、太陽風と地球磁気圏の相互作用によるサブストームや地磁気嵐などの地球磁気圏内のじょう乱現象によって大きく時間変動する。この他に、地球周回低軌道（Low Earth Orbit: LEO）においては南大西洋異常（South Atlantic Anomaly: SAA）と呼ばれる地磁気強度の非一様性に起因する局所的な影響なども存在する。そのため、宇宙機等の宇宙システムの設計段階においては宇宙環境が及ぼす影響を考慮して必要な対策を施すと共に、宇宙機や有人宇宙活動等の運用においては宇宙環境によって生じる影響やそのリスク把握、宇宙天気予報等を活用した宇宙環境変動に伴う人工衛星等の宇宙機に対するリスク回避や、障害発生時には原因の早急な分析を行う必要がある。

ここでは、宇宙環境とその変動が人工衛星等の宇宙機に及ぼす影響とその具体的事例について解説する。なお、LEO衛星の軌道運動に対する熱圏大気の影響については、1.2.5 大気ドラッグにて解説する。

### 1.2.3.1 表面帯電

人工衛星等の宇宙機は、太陽光や周囲のプラズマ粒子との相互作用により帯電する。これを表面帯電（Surface Charging）と呼ぶ。表面帯電は、人工衛星の表面部材および構造体に流入する衛星周辺の宇宙プラズマ（電子、イオン）、流入した宇宙プラズマと表面部材・構造体の作用による二次電子、後方散乱電子、太陽光により及び衛星から放出される光電子により、衛星に流入する電流と流出する電流の時間総和の結果、蓄積された電荷によって生じる（図1）。主に数keV～数十keV程度のエネルギーを持つ宇宙プラズマが、表面帯電に寄与している。

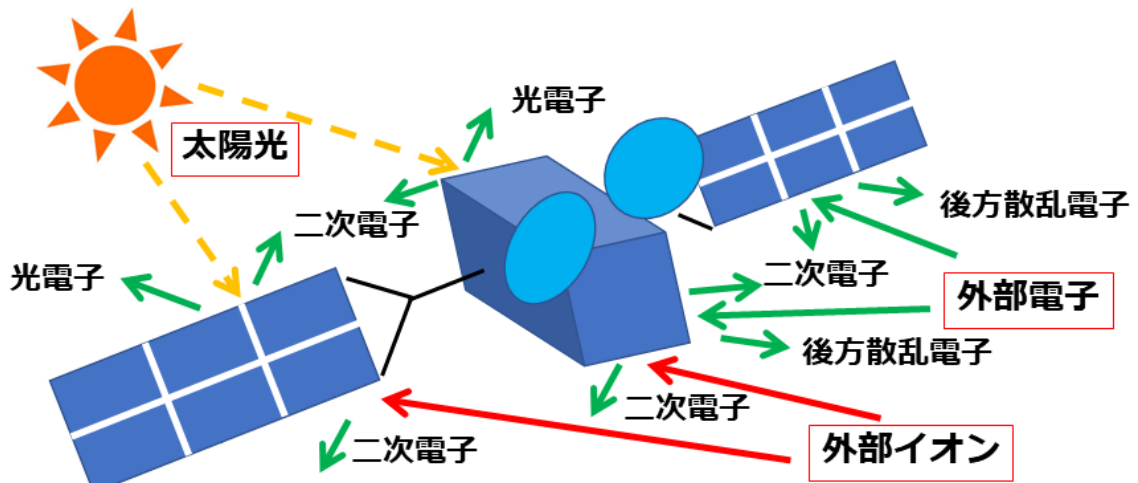


図1. 人工衛星と太陽光・宇宙プラズマとの相互作用により衛星表面帯電に寄与する荷電粒子

周辺の宇宙プラズマに対して帯電することを絶対帯電 (absolute charging) と呼び、その電位は前述したように衛星-宇宙空間間を流出入する電流の平衡状態により形成される浮遊電位 (floating potential) であり、単に衛星電位 (charging potential) と呼ばれることが多い。

材料によって、光電子や二次電子の放出のしやすさは異なるため、各衛星表面部材や構造体の材料が異なれば、それぞれの電位も異なる。衛星表面部材間および衛星構造体との電位差を乖離電位 (differential charging potential) と呼び、その帯電を局所帯電 (differential charging) と呼ぶ。乖離電位が放電電位に達すると放電が発生して衛星表面の太陽電池パネル損傷や衛星の誤動作など、衛星不具合を引き起こす。

衛星電位は太陽光入射の状態 (日照、日陰)、及び周辺プラズマ環境の状態に依存して変化する。静止軌道ではサブストームと呼ばれる現象によって、数keV~数十keVの電子・イオンのフラックスが急増することがある。これに伴って局所帯電が発達すると放電が発生して衛星不具合を引き起こすリスクが高まる。

これまで報告されている表面帯電が原因と考えられている障害は、春や秋の地磁気活動が活発な時期に発生しやすい傾向があり (Choi et al., 2011)、真夜中から朝側にかけての領域で発生しやすい傾向 (McPherson and Schober, 1975) があることから、サブストームに伴う高温の電子が静止軌道に注入されることによって表面帯電・放電に起因する障害が発生していると考えられている。

サブストームに伴う障害事例：1997年4月11日に静止衛星TEMPO 2のトランスポンダと太陽電池が故障する障害が発生した。この障害はサブストームの粒子注入に伴って太陽電池パドルで放電が発生したことが原因であると考えられている (Ferguson et al., 2015)。この放電事故がきっかけとなり、宇宙機帯電放電に関する研究が盛んになり、打上げ前に地上での帯電放電試

験が行われるようになった（豊田, 2018）。

2010年4月5日に、真夜中付近に位置していた静止衛星Galaxy 15が地上局からのコマンド送信に応答しなくなる障害が発生した。この障害発生時に日陰に位置していたGalaxy 15に対して大規模サブストーム現象に伴う高温の電子が注入され、これによって表面帯電・放電が発生したと考えられている（Loto'aniu et al., 2015）。

### 1.2.3.2 内部帯電

物質に入射した荷電粒子は、周囲の原子を電離及び励起することでエネルギーを失う。あるエネルギーを持つ荷電粒子が物質内に侵入する深さを飛程と呼ぶ。飛程よりも物質の厚みが小さい場合、荷電粒子は物質を突き抜ける。図2にアルミニウムに対する電子、陽子の飛程を示す。飛程の計算には米国NIST（National Institute of Standards and Technology）のESTAR（Stopping Power and Range Tables for Electrons）、PSTAR（Stopping Power and Range Tables for Protons）を用いた（Berger et al., 1998）。人工衛星構体の典型的な厚みは0.762mm（30mils）のアルミニウム相当以上であることから、0.5 MeV以上の電子、10 MeV以上の陽子は人工衛星の構体を突き抜け衛星内部に侵入する。侵入した荷電粒子による帯電現象を内部帯電（Internal Charging）と呼ぶ。内部帯電に寄与する粒子のエネルギー範囲は、帯電する部位の材質・厚みとその部位に入射する粒子の経路上の人工衛星の構体の材質・厚みによって異なる。

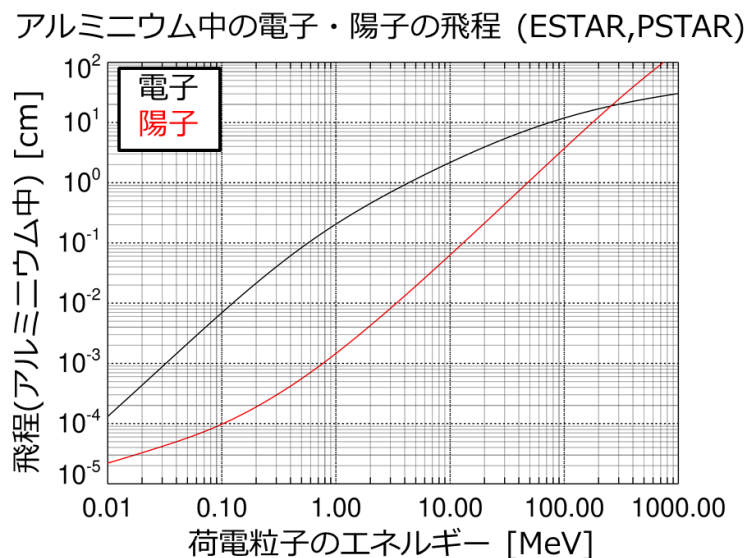


図2. ESTAR,PSTARで計算したアルミニウム中の電子、陽子の飛程

ジオスペースでは地球半径（6,378.2 km）の約2倍から7倍の高度に位置する放射線帯外帯に数MeV程度のエネルギーを持つ電子が捕捉されており、放射線帯外帯を通過する中軌道（Medium Earth Orbit: MEO）や静止軌道（Geostationary Earth Orbit: GEO）の人工衛星の構体内部に侵入して内部帯電を引き起こす。内部帯電における陽子の寄与については、太陽プロトン現象の際に10 MeV以上の陽子が増加することがあるが、放射線帯外帯電子のフラックスと比較するとほぼ無視できる。

衛星構体内部の帯電要因は、ほぼ構体内に侵入した高エネルギー電子のみであることから、内部帯電は放射線帯外帯の電子フラックスが増大している時に発達すると考えられている。放射線帯外帯の電子フラックスは太陽風－地球磁気圏相互作用により大きく変動する。変動のふるまいとそのメカニズムの詳細については、2.2 宇宙放射線を参照されたい。表面帯電と同様に、帯電の発達により乖離電圧が放電電位に達すると放電し、内部の集積回路等に不具合をもたらす。すなわち、放射線帯外帯電子のフラックスが高い状態が継続し、衛星構体内部に入射する粒子数（フルエンス）が増加することで衛星障害のリスクが高まる。衛星に使用する部品の高性能化に伴う要素の複雑化は、内部帯電によるリスクを高めると考えられる。

内部帯電が原因と考えられる衛星障害は昼間側で多く発生することや太陽活動の下降期に頻発することが知られている（Wrenn et al., 2002; Lohmeyer and Cahoy, 2013）。前者は地球磁気圏の昼間側が太陽風の影響で圧縮されており、静止軌道においては昼間側が夜側より放射線帯外帯の電子フラックスが多い中心部に近くなること、後者は放射線帯外帯電子の継続的な増大が太陽活動の下降期で発生しやすいことと整合する。

放射線帯外帯電子増大時の障害事例：放射線帯外帯電子増大と対応して発生し内部帯電が原因と考えられている人工衛星の障害事例をいくつか紹介する。

1994年1月～2月にかけて、静止軌道上の複数の通信・放送衛星で障害が発生した。1994年1月20日に、インテルサットの通信衛星Intelsat K, カナダの通信衛星Anik E-1, 2のモーメントムホイールが故障し、通信が出来なくなる障害が発生した。また、1994年2月22日夕方に日本の放送衛星BS-3aによる衛星放送が60分間中断し、放送衛星BS-3bに切り替えて再開するという障害があった。この時期、気象衛星GOES 7の高エネルギー電子観測によると静止軌道の2 MeV以上の電子フラックスが1月13日、2月8日からそれぞれ回帰性の地磁気擾乱に伴って継続的に高い状態にあり、内部帯電が原因であると考えられている（Leach and Alexander, 1995）。

また、2003年9月19日には静止衛星Telstar 4の全損事故が発生した。この時は9月16日に到来した高速太陽風に伴う地磁気擾乱によって静止軌道の高エネルギー電子フラックスが数日間高いレベルにあった（Choi et al., 2011）。

### 1.2.3.3 シングルイベント効果

高エネルギーの陽子、重イオン等の荷電粒子（宇宙放射線）が人工衛星内の半導体素子に入射すると、粒子の軌跡に沿って電子・正孔対が生成される。生成された電子・正孔対は半導体素子に過渡的な電流・電圧変動を引き起こし、一過性の誤動作（ソフトエラー）を発生させたり、素子・回路に恒久的な損傷（ハードエラー）を発生させたりする。半導体素子の種類や回路によって生成された電子・正孔対の影響は異なるため、単一荷電粒子の入射に伴う電離作用がもたらす影響を総称してシングルイベント効果（Single Event Effect: SEE）と呼ぶ。デバイスの種類や発生機構の違いから様々なSEEが存在し、デバイスの微細化や新たな素子の登場により新たなSEEも報告されている。主なSEEは以下の通りである。

Single Event Upset (SEU)：メモリやフリップフロップなどのLSI内の回路に放射線が入射することで生じた電荷によって誤動作を生じ、データが反転するソフトエラー現象。

Single Event Transient (SET)：論理素子に高エネルギー粒子が入射し、生成された電荷による論理素子の出力電圧変動が生じ、論理回路中を伝播するデジタルパルスが引き起こすソフトエラー現象。

Single Event Latchup (SEL)：主にCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）に含まれるサイリスタ構造に高エネルギー粒子が入射することで、雑音電流によってオン状態となって大電流が流れるソフトエラー現象。回路をリセットせず長時間大電流が流れた場合は、ハードエラーとなる場合もある。

Single Event Burnout (SEB)：Power MOSFETなどに放射線が入射することによりOFF状態の素子がONとなって大電流が流れることでジュール熱による熱損が発生するハードエラー現象。BJT（Bipolar Junction Transistor）、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）などでも発生する。

Single Event Gate Rupture (SEGR)：高エネルギー粒子の入射により、高電界が印可されているゲート絶縁膜が破壊されるハードエラー現象。

ソフトエラーは、メモリ上のデータの誤りや誤動作の原因となるため、誤り訂正機能や3重多数決などの手法を導入するなどの対処方法が考えられている。一方、ハードエラーは衛星の機能損失の原因となるので、重要な素子・回路についてはシールドを厚くするなどの対策も必要となる。

また、人工衛星の軌道によってSEEに主に寄与する粒子は異なる。MEOやGEOの人工衛星においては、銀河宇宙線や太陽高エネルギー粒子、LEOの人工衛星においては放射線帯内帯陽子が主なSEEの要因となっている。

SEEの障害事例：太陽プロトン現象発生時に、SEEが原因と考えられる障害が発生することがある。2001年9月25日16時17分JSTに静止軌道上の放送衛星BSAT-2aの姿勢制御に不具合が生じ、1時間程度放送が中断する障害があった。この時、9月24日のX2.6/2Bフレアに伴って10MeV以上の陽子が最大12,900 PFUに達する太陽プロトン現象が発生しており、これに伴って発生し

たSEUが不具合の原因と考えられている。また、2005年1月17日21時26分JSTに軌道制御を行っていた静止軌道上の放送衛星JCSAT-1Bの姿勢及びテレメトリ信号が喪失する障害が発生した。この時、10MeV以上の陽子が5,130 PFUに達するプロトン現象が発生しており、何らかのコマンド異常が障害要因だった可能性がある。

LEOにおけるSEEの事例として、図3に英国の人工衛星UoSAT-2のSEUの発生分布を示す。地磁気強度の非一様により、放射線帯内帯陽子がLEOの高度まで分布しているSAA領域や内帯の根元の領域においてSEUが頻発している様子が分かる。

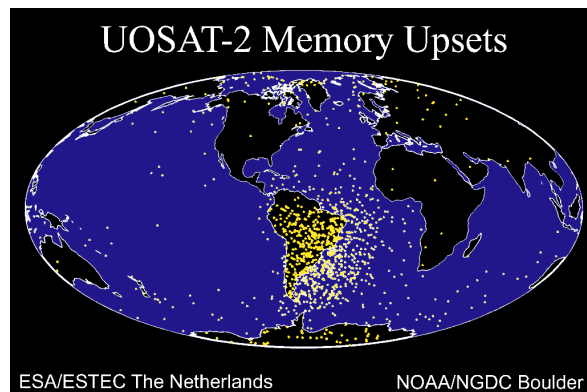


図3. UoSAT-2衛星のSEU発生分布（提供：NOAA/NCEI）

#### 1.2.3.4 トータルドーズ効果/累積線量効果

入射する高エネルギー粒子の影響の累積によって人工衛星の半導体部品や材料に生じる恒久的損傷をトータルドーズ効果/累積線量効果（Total Dose Effect）と呼ぶ。トータルドーズ効果を引き起こすのは、主に放射線帯の陽子・電子、太陽高エネルギー粒子（陽子）である。トータルドーズ効果は電離損傷効果（Total Ionizing Dose Effect: TID）と変位損傷効果/はじき出し損傷効果（Displacement Damage Dose Effect: DDD）に分類される。

高エネルギー荷電粒子の入射によって半導体素子の構造内に電子正孔対が発生し、これが蓄積することで物性の劣化が生じることを電離損傷効果（Total Ionizing Dose Effect: TID）と呼ぶ。半導体素子内のSiO<sub>2</sub>の絶縁膜中に蓄積された電荷は固定電荷や界面準位を形成し、閾値電圧のシフトや電源電流（リーク電流）の増大、動作タイミングの変化、半導体素子の諸特性を劣化させる。電離損傷効果は吸収線量に比例する。

高エネルギー粒子の入射によって半導体結晶内に格子欠陥が生じ、物性を変化させることを変位損傷効果/はじき出し損傷効果（Displacement Damage Dose Effect: DDD）と呼ぶ。DDDは半導体素子の特性劣化を引き起こす。DDDを受けやすい半導体素子には、光デバイス、CCD素子、太陽電池セルなどがある。例えば、太陽電池の出力電圧低下は、DDDによる影響の一つである。

トータルドーズ効果の事例：TIDの具体的な事例として、ある民生用CPUに $^{60}\text{Co}$ 線源による $\gamma$ 線を照射した結果を図4に示す。横軸は総照射量（照射時間と等価）を縦軸にCPUを流れる電流を示す。照射量が増大するにつれて計測される電流量が増加していることがわかる（秋岡, 2009）。宇宙環境においても同じ放射線照射量により、同様の影響が生じると考えられる。

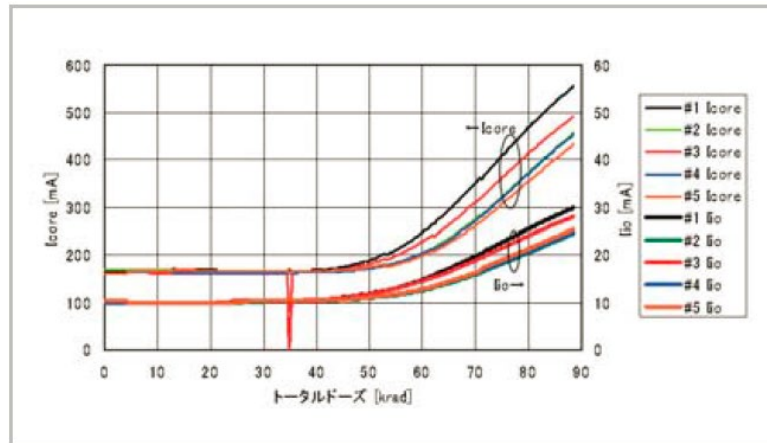


図4. CPUへの放射線照射試験の一例（秋岡, 2009）

DDDの具体的な事例としては、1989年8月12日、9月29日、10月19日に発生した太陽プロトン現象（それぞれ、最大値が9,200 PFU, 4,500 PFU, 40,000 PFU）によって、静止軌道の気象衛星ひまわり3号の太陽電池の出力電圧が急激に低下していたことが報告されている（電波を利用した宇宙環境モニタリングの在り方に関する調査研究会, 1993）。

### 1.2.3.5 その他（宇宙環境における材料劣化・特性変化）

これまで人工衛星の半導体素子や電子回路に影響を及ぼす現象を紹介してきたが、ここでは原子状酸素による材料劣化と紫外線・放射線による硝材（ガラス）の光学的特性変化について紹介する。

原子状酸素による材料劣化：地球の表層大気において酸素は体積比約21%を占め、窒素に次ぐ地球大気の主成分である。酸素は対流圏・成層圏においては分子として存在するが、高度が上がるにつれ太陽光中の真空紫外線により解離し原子（原子状酸素）として存在している。図6にMSIS-E-90大気モデル（Hedin, 1991）で計算した主要大気成分（O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, He, H, N）の数密度の高度分布を示す。太陽活動の極小期では高度200~500 km、極大期では高度200~700 kmの領域において原子状酸素が支配的であることがわかる。人工衛星の軌道速度をV、衛星高度の原子状酸素の数密度をnとするとnVのフラックス（照射線量率）で原子状酸素が人工衛星の表面材料に衝突する。

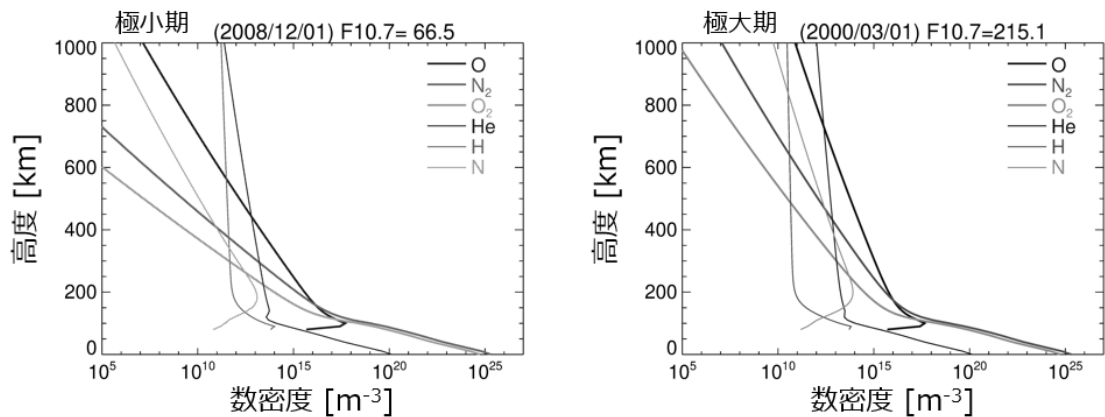


図6. MSIS-E-90大気モデルによる主要大気成分 (O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, He, H, N) の数密度の高度分布  
(左：太陽活動極小期、右：太陽活動極大期)

原子状酸素は化学的な活性が高いため衝突した物質を酸化させる。酸化した物質が気体、あるいは剥離しやすい性質を持つ場合、材料表面の侵食（エロージョン）が起こる。酸化した物質が固体、あるいは安定な性質を持つ場合、材料表面に酸化物層が生成される。いずれも、表面材料の熱光学特性（太陽光吸収率、赤外放射率）や機械特性を劣化させる要因となる。このため、LEOで衛星を運用する際には、表面材料に無機物をコーティングすることにより原子状酸素に対する安定性を向上させるなどの対策が必要となる（木本 他, 2009）。

原子状酸素による材料劣化の事例：NASAのスペースシャトル計画の初期ミッション（1981～）において、原子状酸素による表面材料の劣化の問題が表面化した。スペースシャトルのミッション計画STS-1からSTS-3の間に宇宙空間で暴露していたスペースシャトルオービターのペイロードベイに用いられている表面材料を調査した結果、塗料やポリマー、特にカメラのサーマルブランケットに用いられているカプトンが劣化していることが判明した。原因を分析したところ、スペースシャトルの飛行高度である200～300 kmの原子状酸素のフラックスに起因する材料劣化と考えると定量的に説明できることが示された（Leger, 1983）。

その後、NASAは宇宙空間に長期間暴露された様々な材料や宇宙システム等の機械的・電氣的・光学的特性が、宇宙放射線・流星物質・宇宙塵・原子状酸素等によって、どのような影響を受けるかを調査するために1984年4月にLDEF（Long Duration Exposure Facility）をLEOに投入した。LDEFは当初1985年3月に回収予定だったが、1986年1月のチャレンジャー号の事故により遅れ、1990年1月に回収された。この実験により、原子状酸素が宇宙機に用いる材料に与える影響の詳細が明らかになった（Levine, 1991）。図7は国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）の太陽電池アレイ端部をカバーするポリイミドフィルムの劣化の例である（Banks et al., 2002）。



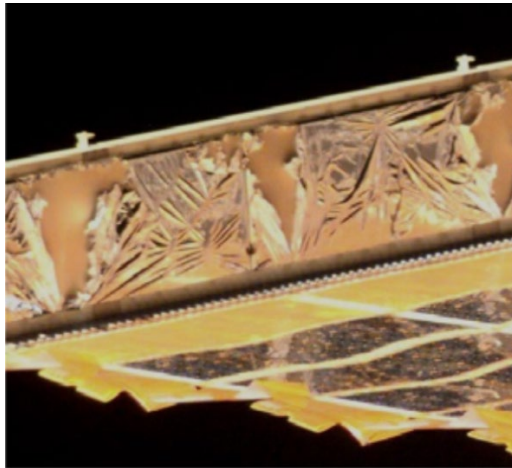


図7. 国際宇宙ステーションの太陽電池アレイ端部をカバーするポリイミドフィルムの劣化 (Banks et al., 2002)

紫外線・放射線による硝材の光学的特性変化：硝材（ガラス）に紫外線やX線、 $\gamma$ 線、放射線粒子が照射されると、透過特性や屈折率等の光学的特性に変化が生じることが知られている（横田, 1957）。光学ガラスの主成分は $\text{SiO}_2$ であることから、トータルドーズ効果と同様に高エネルギーの電磁波や粒子の入射によって、硝材内に電子・正孔対が発生し光学的特性を変化させるためである。これを硝材のブラウニング又はソラリゼーションと呼ぶ。

硝材には光学的特性の調整の為に様々な添加物が加えられている。酸化鉛を含む硝材（鉛ガラス）は透明度や屈折率が高い反面、放射線等の照射により光学的特性が変化しやすい。一方、酸化セリウムを添加することで放射線耐性を持たせることができる（沢井, 田代, 1957）。

このため、宇宙環境で用いる光学機器のガラスには、想定しているミッション期間中の宇宙放射線の累積線量に対し、光学的特性の変化が許容範囲に収まる材料を用いる必要があり、地上での放射線照射試験等を実施して予め特性を確認しておく必要がある（Doyle and Czichy, 1994, 西野 他, 1998）。

紫外線・放射線による硝材の光学的特性変化の事例：宇宙空間でのガラスのブラウニング・ソラリゼーションについては、前述したNASAのLDEFミッションにより調査が行われている。また、図8は、様々な硝材に放射線照射試験を行った後の変化を示したものである。図中の5つの硝材サンプルには同じ量の放射線が照射されているが、硝材の種類の違いにより着色の様子が大きく異なることが分かる（秋岡, 2009）。

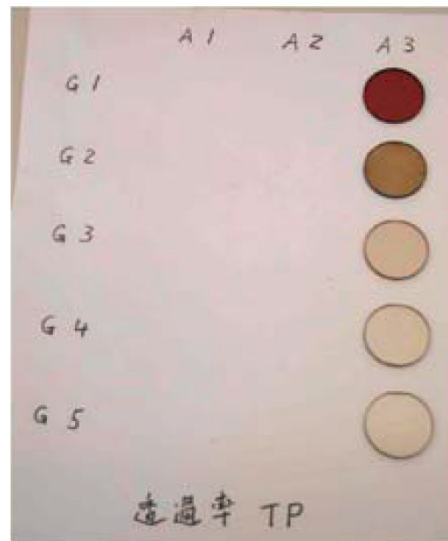


図8. 硝材の種類の違いによる放射線照射試験後の透過率の変化 (秋岡, 2009)

## 参考文献

- 秋岡 眞樹, 宇宙システムに対する宇宙放射線の影響, 情報通信研究機構季報, Vol.55 Nos. 1-4, 43-48, (2009)
- Banks, B., M. Lenczewski, and R. Demko, Durability issues for the protection of materials from atomic oxygen attack in low earth orbit, 53rd IAC, (2002)
- Berger, M. J., Coursey, J. S., Zucker, M. A., and Chang, J., Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions, NIST Standard Reference Database 124, (1998) doi: 10.18434/T4NC7P
- Choi, H.-S., J. Lee, K.-S. Cho, Y.-S. Kwak, I.-H. Cho, Y.-D. Park, Y.-H. Kim, D. N. Baker, G. D. Reeves, and D.-K. Lee, Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships, Space Weather, 9, S06001, (2011) doi:10.1029/2010SW000597
- 電波を利用した宇宙環境モニタリングの在り方に関する調査研究会 第二期報告書 一太陽環境問題一, 平成 5 年 7 月.
- Doyle, D. B., and R. H. Czichy, Influences of Simulated Space Radiation on Optical Glasses, SPIE, 2210, 434-448 (1994)
- Ferguson, D. C., S. P. Worden, and D. E. Hastings, The space weather threat to situational awareness, communications, and positioning systems, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 43, No.9, 3,086-3, 098, (2015) doi: 10.1109/TPS.2015.2412775
- Hedin, A. E., Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere, J. Geophys. Res. 96, 1159, (1991)
- 木本 雄吾, 宮崎 英治, 石澤 淳一郎, 島村 宏之, 低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価, J. Vac. Soc. Jpn., 52, 9, 475-483, (2009) doi:10.3131/jvsj2.52.475

- Leach, R. D., and M. B. Alexander, Failures and Anomalies Attributed to Spacecraft Charging, NASA Technical Report NASA-RP-1375, pp. 30, August, (1995)
- Leger, L. J., Oxygen Atom Reaction with Shuttle Materials at Orbital Altitudes, NASA Technical Memorandum 58246, (1983)
- Levine, A. S., LDEF 69 Months in Space. First Post-Retrieval Symposium, NASA-CP-3134 (1991).
- Lohmeyer, W. Q., and K. Cahoy, Space weather radiation effects on geostationary satellite solid-state power amplifiers, Space Weather, 11, (2013) doi:10.1002/swe.20071
- Loto'aniu, T. M., H. J. Singer, J. V. Rodriguez, J. Green, W. Denig, D. Biesecker, and V. Angelopoulos, Space weather conditions during the Galaxy 15 spacecraft anomaly, space weather, 13, 484-502, (2015) doi:10.1002/2015SW0001239
- McPherson, D. A., and W. R. Schober, Spacecraft charging at high altitudes: the SCATHA satellite program, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.12, No.10, 621-626, (1975) doi:10.2514/3.57027.
- 西野 洋平, 末松 芳法, 常田 佐久, 一本 潔, 木挽 俊彦, 武山 芸英, 次期太陽観測衛星用光学ガラスの放射線体制試験, 国立天文台報, 3, 145-150, (1998)
- 沢井 郁太郎, 田代 仁, 放射線遮蔽材料としてのガラス, 材料試験, Vol. 6, No. 49, 638-644, (1957) doi:10.2472/jsms1952.6.638.
- 豊田 和弘, 宇宙機最悪停電プラズマ環境の国際標準化, 日本航空宇宙工業会 航空と宇宙, 第 774 号, 1-3, (2018)
- Wrenn, G. L., D. J. Rodgers, and K. A. Ryden (2002), A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging, Ann. Geophys., 20(7), 953-956, doi:10.5194/angeo-20-953-2002.
- 横田 良助, ガラスに対する放射線の影響, 窯協, 65,740, p. C244-C252, (1957) doi:10.2109/jcersj1950.65.740\_C244