

2-1-5 宇宙システムに対する宇宙放射線の影響

2-1-5 Space Radiation Effect on Satellites

秋岡真樹

AKIOKA Maki

要旨

人工衛星を含む宇宙システムの設計や運用においては、宇宙環境や太陽活動を十分に考慮して行われる。特に宇宙放射線は半導体素子の誤動作や衛星の表面帯電、部材の劣化等の原因となることが知られている。このため、太陽活動や放射線、宇宙環境に関する経験モデルは宇宙機の信頼性設計において必要不可欠のものであり、宇宙環境の観測情報は運用に有益である。本稿では、宇宙環境による宇宙システムへの影響と具体的な対処について簡単に解説する。

Solar activity and space environment is considered as fundamental and important factors for space system design and operation. Space and solar radiation is widely known as a cause of malfunction of electronics, surface charging and discharging, and deterioration of materials of space systems. Therefore, empirical model of solar activity and radiation is inevitable tools for reliability design of the systems. Observational data and information may be useful for operation. In this article, influence of space environment to space systems are briefly reviewed.

[キーワード]

宇宙環境, 宇宙システム, 衛星

Space environments, Space system, Satellite

1 はじめに

太陽活動やそれに起因する宇宙環境変動は、さまざまな影響を人間の活動に及ぼすといわれている。特に、人工衛星への障害はその寿命を左右することから、宇宙開発を進めるうえでは必ず注意する必要がある。人工衛星に用いられる電子部品は、基本的に宇宙用に様々な視点から信頼性が確認・検証されたものを用いることが基本であり、放射線に対する耐性は宇宙用として採用できるか否かの重要なポイントのひとつである。そのため、ある部品やコンポーネントを衛星に使用するか否かを考える際には、その部品としての性能・機能とともに宇宙機への搭載実績や放射線耐性の情報に注目して検討する事が普通である。放射線耐性の情報がない部品を新たに採用しようとする場合には、想定される放射線を地上の試験装置(加速器や照射装置)を用いて、設計寿命の間に受けるであろうと思われる量の放射線を照射して、正常

に機能する事を確認する作業が行われる。これには大きなコストと手間がかかるが、衛星の信頼性を確保するためには避けて通れないタスクと考えられている。最終的な衛星システムとして設計をまとめる際には、人工衛星が浴びる宇宙放射線の量を想定して、各部位について宇宙放射線に耐えられるか否かをモデル計算等で確認しながら慎重に進めていく。十分な信頼性が確保できないと考えられる場合には、部品の変更や信頼性向上のための対策の追加(待機冗長や多数決方式の採用など)が検討される。

ここでいう放射線とは、太陽フレア等の宇宙環境に起因する高いエネルギーをもった荷電粒子や電磁波のことで、高エネルギーのイオンや電子、ガンマ線、エックス線などが対象である。これらのエネルギーの高い粒子や電磁波は、その高いエネルギーにより様々な相互作用を引き起こす。たとえば図1は、ESA(欧州宇宙機関)により打ち上げられたSOHO探査機に搭載されたコロナグ

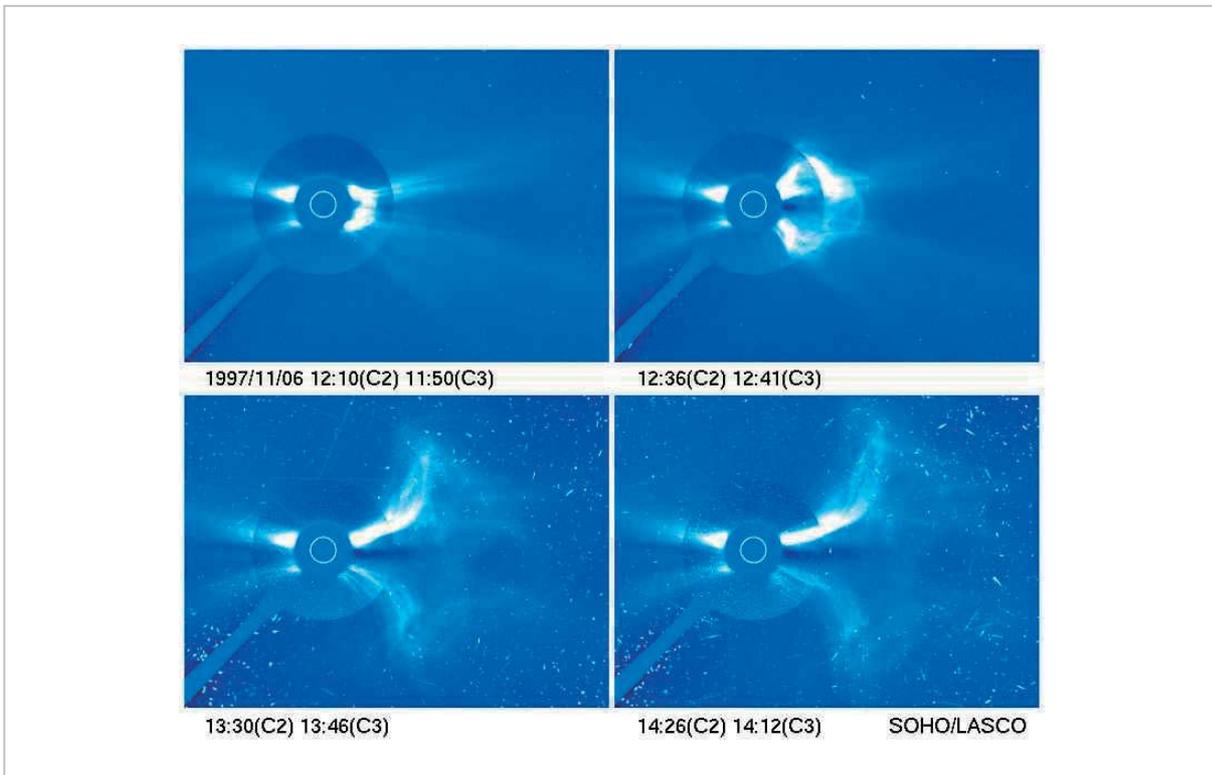


図1 SOHO 探査機により観測されたCMEとCCD表面に入射した太陽放射線の跡

ラフと呼ばれる装置で太陽周辺の大気を撮像した画像である。太陽本体を人工的に隠すことにより、太陽の周囲の淡いガスを観測できるように特殊な工夫がされた望遠鏡である。この一連の画像で、下側の2枚には白い斑点が一面に広がっている事がわかるであろう。これは、太陽フレアに伴う高エネルギー放射線が、コロナグラフの撮像面のCCDに入射して発生したノイズである。この4枚の画像で撮影されているCME (Coronal Mass Ejection: 太陽コロナガスの噴出現象)に伴って加速、放出された高エネルギーのプラズマ粒子がCCDに強いノイズを発生させ、観測の質を著しく下げているわけである。CCDは、光が半導体にあたることによる光電効果で発生する電子を読みだすことにより検出器として機能するものだが、CCD表面に放射線が入射・通過すると、CCD上に電荷が発生し、これが偽信号として読みだされ検出される。強度の大きなイベントでは一面が真っ白になってしまい、ほとんど何も見えないくらいのノイズが発生する事もある。

太陽放射線は地上で暮らしている人間や地上のシステムにとっては、航空機の乗員等ごく限られたフィールド以外では影響があるとは考えられて

いないし、懸念する必要はないであろう。しかしながら、宇宙空間では、常に宇宙放射線環境の問題が付きまとう。このように、宇宙環境に対して注意を払う事は宇宙システムの信頼性確保のために避けられないプロセスの一つであるとともに、昨今の搭載電子機器の高度化に伴い特に影響を受けやすくなる事が懸念されている。宇宙環境が衛星に与える影響は様々なメカニズムがあり、統一的に述べる事は難しいが、本記事では、太陽放射線やプラズマが引き起こす影響について主なものについて簡単な解説を試みたい。

2 太陽並びに地球周辺の放射線について

宇宙空間には、太陽や惑星間空間及び惑星磁気圏等におけるプラズマの電磁的相互作用や、太陽系外で起こる超新星爆発等に起因する高エネルギーの放射線に満ちている。太陽フレアに伴い発生、加速されるもの(太陽宇宙線、太陽高エネルギー粒子などとも呼ばれる)以外に、地球磁気圏の特定の領域(ヴァン・アレン帯、放射線帯等と呼ばれる)で加速され、捕捉されているものや、

超新星爆発等太陽系外の宇宙空間を起源とするものがあり、それぞれ太陽フレア粒子、捕捉粒子、銀河宇宙線と呼ばれる。物理的に厳密な区分けとは言い難いが、衛星設計の実務ではよくこの用語が用いられるので、ここではこのような分類としておく(特に太陽フレア粒子という表現は、太陽や宇宙環境を専門とする研究者には違和感を感じるところである)。

太陽フレア粒子は、太陽フレアやそれに伴うCMEにより生成・加速されるものである。その発生・加速メカニズムについてはこれまでの観測・理論的研究により様々な仮説が提唱されているが、まだ未解明の部分が多く残された問題であるといえる。大きく分けて、フレアが発生している太陽大気中において粒子加速が起こっているという考え方と、フレアに伴うCMEによって生成される衝撃波(惑星間空間衝撃波)における粒子加速が原因であるという2つの考え方が議論されてきた。最近では、この両者の組み合わせで観測を説明しようとするハイブリッドモデルが盛んに議論されている。筆者の私見ではあるが、太陽フレア粒子の問題は二者択一ではなく、ハイブリッドモデルのように様々な要因を統合的に組み合わせ、かつ地球近傍までの伝播プロセスも含めて議論していくことが重要と思われる。

捕捉粒子は、地球磁気圏内に捕捉された状態で存在する粒子であることからこの名称がある。捕捉されるまでのプロセス(つまり発生、加速機構)については、2つ考えられている。1つは、太陽フレアも含め、宇宙空間から飛来した粒子が地球磁場に捕捉されたと考えられるものである。もう一つは、オーロラ嵐等地球磁気圏内のじょう乱現象や電磁流体波動による加速と考えられるものである。発生、加速機構については今後の研究が必要であるが、太陽フレア粒子に比べれば詳しい議論がなされている。

銀河宇宙線は、太陽系外から侵入してくる高エネルギー粒子であり、超新星爆発がその起源のひとつであると考えられている。極めて高いエネルギーのものも含まれていることや重粒子の割合が大きいことなどから、一つ一つの粒子の作用は大きい、粒子の総量は少ない。

通常、宇宙機システムに対する放射線の影響を考える際には、上記の3つのカテゴリーに分けて

議論・評価する事が多い。放射線の評価には標準的な工学モデルがあり、それを用いることにより機械的に算定する事も可能ではあるが、適切な設計のためにはそれぞれの起源や特徴を理解しておく必要がある。このため、欧州では衛星設計のために必要な宇宙環境に関する知見を集めたものを欧州全体の標準として制定している(ECSS標準)。

3 放射線による半導体素子の誤動作

人工衛星には様々な用途でコンピュータやメモリ、ゲートアレイ等半導体集積回路が用いられており、半導体素子なしには人工衛星は成り立たない。しかしながら、高度に集積された半導体素子は放射線の入射による誤動作があり、これは衛星開発に常に付きまとう問題と言える。たとえば、衛星の姿勢制御系は、姿勢センサからのデータを入力として、それを姿勢制御系のコンピュータで機上処理し、姿勢制御用のアクチュエータ(リアクションホイールやモーメンタムホイールと呼ばれるものなど)を適切に動作させることにより姿勢を保っている。いわば、半導体素子(センサも含む)で構成される系により常に閉ループ制御された系が衛星の姿勢制御系と言える。衛星の姿勢を正しく制御する事ができなくなると、十分な通信ができなくなったり、観測ミッションを適切に実施する事が困難になったりと様々な問題が生じる。また、太陽電池パドルを正しく太陽方向に指向させることができなくなると、発生電力が低下し、衛星にとって致命的な事態になる。

衛星に搭載されたコンピュータは大量のメモリを持っている。メモリには、いわゆるデータのほかにコンピュータのプログラムやその実行を制御するパラメータ等が適切に保持・更新されることにより正しく動作する。そこに電気を帯びた高エネルギー放射線が入射すると、半導体素子の荷電状態に影響をあたえる。つまり高エネルギー粒子が入射する事により、素子の材質と相互作用をして素子に一定の割合で外来の電荷を発生させることになる(図2)。これは、突然のメモリエラーであり、コンピュータをハングアップさせるなど衛星システムの様々な誤動作の原因となる。また、発生した電荷により、

本来絶縁されている箇所に導通が発生し、電流が流れ続ける現象(ラッチアップ)が発生する事がある。電流が流れ続けることにより焼損が発生すると永久故障につながるため、素子を選ぶ際にはラッチアップを起こしにくい物を選択する必要がある。また、パワー MOSFET 素子では荷電粒子の発生による通電により焼損が発生するバーンアウトやゲートラプチャ現象が放射線に起因する障害として知られている。

長期間にわたって継続的に放射線を受けることにより発生する特性変化をトータルドーズ効果 (Total Ionization Dose Effect) と呼んで区別する事がある。CMOS 素子の特性劣化や太陽電池パドルの劣化などがその代表的な例である。図 3 [1] に、ある高性能民生用 CPU にコバルト 60 線源によるガンマ線を照射した結果の一部を示す。横軸に総照射量(照射時間に等価)を、縦軸に CPU に流れる電流を示す。照射量が増大するにつれて計測される電流量が増大している事がわかる。電流が素子の定格最大電流に達する照射量を知ることにより、素子がどの程度の総照射量に耐えることが

できるかの目安が得られる。

この試験は、民生用 CPU の衛星搭載用データ処理装置の CPU としての利用を検討するために実施したものである。宇宙用の CPU は通常極めて高価であるとともに、飛翔実績に裏付けられたものでないと宇宙用と認定されない事が多い。これは、最新のデバイスがなかなか宇宙に適用できないという構造的な問題をはらんでいる。つまり、十分な飛翔実績を積んだころには、CPU が時代遅れになっている可能性が高く、進歩のスピードの速い半導体素子では問題は深刻である。それでも高性能の民生用素子を使いたいという場合には、図 4 に示すようなコバルト 60 照射試験や重粒子線照射試験などの耐放射線確認試験を新たに実施して使用の可否を判断していくことになる。

筆者は、ある CPU 素子の放射線耐性を調べるために、10 MeV 程度の比較的エネルギーの低いプロトンを照射する試験を行った事がある。その際、通常であればケーブルを別の部屋まで引きまわしてきちんと隔離されたところに計測系とデータ収集系を配置するのであるが、照射ラインから少し離れただけの場所に PC を持ち込んでデータ収集をしてしまったため、何度も PC がハングアップして計測に苦勞したことがある。10 MeV は、太陽放射線では比較的エネルギーの低い領域であるが、本試験を通じて自らが一定の確率でハングアップが発生することを体験し、放射線の影響を知らずとも実感してしまったわけである。

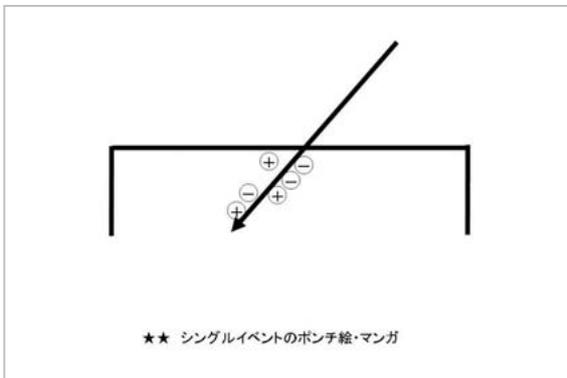


図2 高エネルギー粒子の入射による半導体素子内の電荷の発生

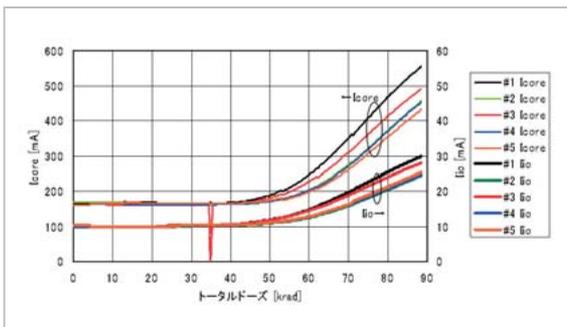


図3 CPU の放射線照射試験の一例

CPU に照射した放射線量の増大に伴って、消費電流が増大している。

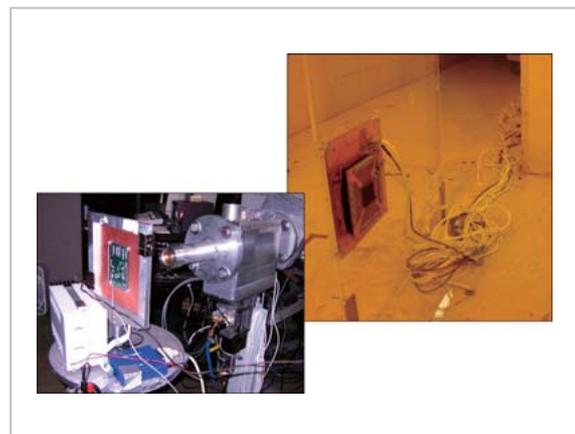


図4 CPU の放射線照射試験の様子

重粒子線の照射(左)とコバルト 60 の照射(右)

4 衛星の帯電、放射線による部材の劣化など

人工衛星の周囲の宇宙空間はプラズマで満たされており、太陽光による光電効果により発生した電子の作用(図5)もあって、衛星表面は帯電しやすい状態になっている(表面帯電)。また、放射線帯の比較的高エネルギーの高い粒子は、衛星表面を貫通してその深部まで到達する。そして、衛星内部の部材やハーネスを帯電させ、何かの拍子で放電する事により衛星の障害をもたらす可能性がある。このような事が簡単に起こらないように衛星の電気設計において様々な工夫がなされているが、帯電とその放電が原因ではないかと考えられる不具合が増えている。

放射線は衛星の部材の材料特性を変化させてしまう事がある。たとえば光学機器の硝材の屈折率変化やブラウニング(着色)などである。大きなエネルギーをもった放射線が入射してくると、その大きな運動量のため周囲の材料の原子構造に何らかの変化を引き起こす事がある。これを変位損傷といい、光学硝材の場合、屈折率等の物性値の劣化(変化)の要因となる。屈折率の温度依存性は、高精度の光学系の性能確保のためには無視できない特性であり、それが宇宙空間において経年変化する可能性をきちんと考慮する必要がある。

また、硝材には酸化鉛が含まれているために、放射線の照射による作用によって硝材の透過率が劣化する現象が知られている。図6は、さまざまな硝材に放射線を人為的に照射してその変化の様子を調べたものである。図に写っている5つのサンプルは、それぞれ同じ量の放射線を照射したものであるが、硝材の種類の違いにより着色の様子が大きな違いがあることがわかる。

光学機器に用いる硝材の放射線による劣化・変化は、その最終性能を左右する可能性がある。そのため、特に天体観測や地球観測をミッションとする衛星に搭載される望遠鏡や衛星のバス機器であるスタートラッカや地球センサなどの光学機器にとっては時に設計上の大きな問題になることがある。光学設計の結果、放射線耐性の情報が十分でない硝材を用いる設計を採用する場合、独自に放射線試験を行う必要がある。石英は放射線に強く、フリント材等の高屈折率硝材は放射線に弱い

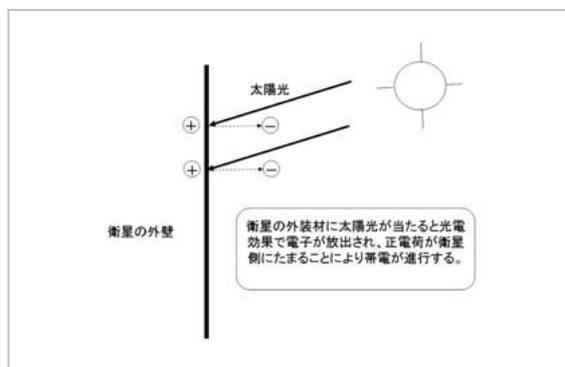


図5 太陽光の光電効果による衛星表面帯電

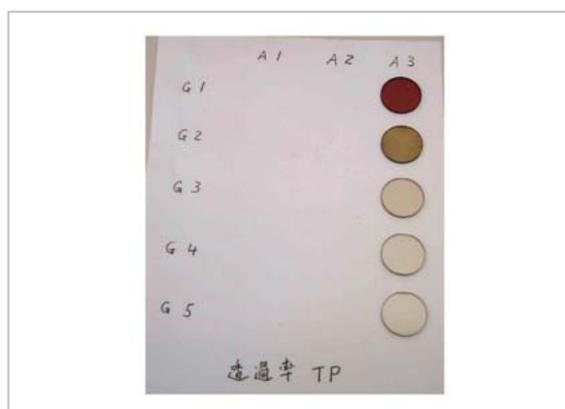


図6 硝材の種類の違いによる放射線照射試験後の透過率の変化

傾向があるようである。

このほか、太陽電池パドルの劣化にも太陽放射線や宇宙放射線は大きな影響をもたらすため、電源系の設計や運用においても十分な注意がはらわれている。ただし、その影響評価が過大なものにならないよう適切なモデルが使用されることが必要である。放射線による太陽電池パドルの劣化の評価手法については、過去に気象衛星に搭載された宇宙環境モニタ装置のデータを用いた方法が日本によって提案されており、ISOにおいて国際的な設計標準とするよう審議が進められているところである(「Methods for Calculation of Solar Cell Degradation due to Energetic Particles (ISO DRAFT)」)

5 おわりに

電子部品が高度化し、集積度が上がるにつれて一般的に放射線に対する耐性は小さくなると考えられる。また、消費電力を小さくするために低電

圧で動作する素子が増えているが、これも放射線耐性の観点からは懸念材料となる。ゲート数の著しく大きな FPGA 等は放射線に対して極めて脆弱なものも多く、地上の技術と同等の高度な実装を宇宙で実現しようとする、今後ますます放射線に対する影響の理解が重要になるであろう。現在は、工学的なモデルを参照して、十分な尤度を

もった設計を行う事が標準的な取り組みであるが、設計の自由度の向上や衛星や機器開発コストの低減の観点からは、宇宙環境の観測データをリアルタイムに参照しながら運用状況をフレキシブルに変えていくような技術も必要となっていくであろう。

参考文献

- 1 秋岡眞樹, “太陽からの光と風(監修:秋岡眞樹)”, 技術評論社, pp.145-146, 2008.

あき おか ま き
秋岡眞樹

新世代ワイヤレス研究センター推進室
主任研究員 博士(理学)
太陽物理、光学システム、宇宙天気