

宇宙放射線環境

宇宙航空研究開発機構
松本 晴久

アウトライン

- 宇宙環境により引き起こされる障害
- 宇宙放射線環境
 - 放射線帯
 - 太陽宇宙線
 - 銀河宇宙線
- 不具合の例
- 環境モデル
- まとめ

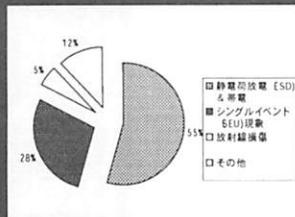
宇宙環境により引き起こされる現象

- 宇宙機帯電
 - 表面帯電
 - 内部帯電
- シングルイベント現象
 - 銀河宇宙線
 - 南大西洋異常 (SAA)
 - 太陽粒子イベント
- トータルドーズ
- メテオロイドの衝突
- 大気抵抗
- 電離層シンチレーション
- 原子状酸素エロージョン

どのような障害が発生するか？

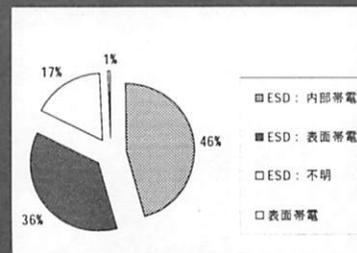
- データの喪失
- 疑似信号
 - フォールスアラーム、ノイズパルス、テレメトリエラー
- ファントム・コマンド
 - GOES-4,5の例 4MHzゲインの変更やVMS(Visist Atmospheric Sounding)の走査鏡がステップを始める
- ミッション又はセンサの劣化
- 太陽電池劣化
- セーフティーモード移行
- サブシステム故障
 - 冗長系の喪失
- ミッションの喪失

衛星不具合 —原因別比率—



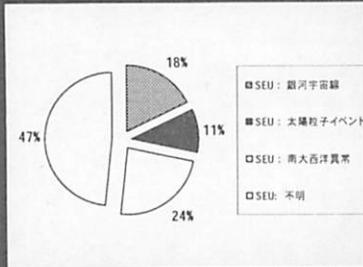
326件の宇宙機不具合データによる結果
AEROSPACE REPORT NO.TR-99(1670)-1 Koons et al. 1999

静電荷放電(ESD)と帯電の内訳

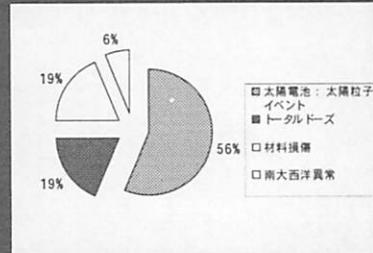


注¹ 第7回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて2004年9月16、17日開催

シングルイベント現象の内訳



放射線損傷の内訳

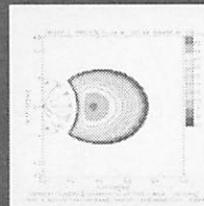


アウトライン

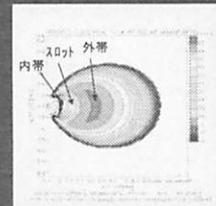
- 宇宙環境により引き起こされる障害
- 宇宙放射線環境
 - 放射線帯
 - 太陽宇宙線
 - 銀河宇宙線
- 不具合の例
- 環境モデル
- まとめ

放射線帯の構造

米国のエクスポーラ1号、3号のガイガーカウンターの計測で始まった放射線帯の探査結果を、Van Allen、吉田セキ子、McIlwain等が解析し、エネルギーの高い放射線粒子が地球磁場に捕捉され、定期的存在することが分かった。



10MeV以上陽子の分布



1MeV以上電子の分布

放射線帯の粒子(電子、陽子)の運動形態

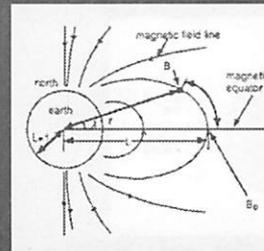
電子や陽子の荷電粒子は磁力線の周りをサイクロトロン運動をするが、極域の方では磁力線がその曲率と勾配で収束状態にあるので、磁力線に垂直に運動してきた粒子は、磁気ミラーと呼ばれる反射をし、緯度方向に往復運動する。往復運動中には磁力線の内側と外側の磁場の強さの違いから、経度方向のドリフト運動が生じる(電子:東、陽子:西)。

荷電粒子は、地球磁場に沿って運動していることから磁力線方向と粒子の運動方向とのなす角によりFluxの個数が異なる。ピッチ角分布



(R. Kubota)

BL座標

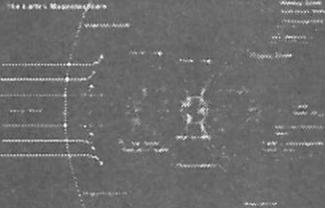


●放射線帯粒子は地球の磁力線に沿って運動しているので、地磁気の座標で記述するのが良く、McIlwainが考案したBL座標系が使われている。

● 捕捉軌道 ここでは磁気シェルというを指定するのに、地球磁場をダイポール磁場で置き換えた各磁力線の(磁気)赤道距離 L を地球半径 R_E (約6400km)の倍数で表す。捕捉軌道 L の磁気シェル上の位置をその場の地磁気の大きさ(磁束密度) B を、同じ磁気シェルの(磁気)赤道上の磁束密度 B_0 で除いた B/B_0 で示す。

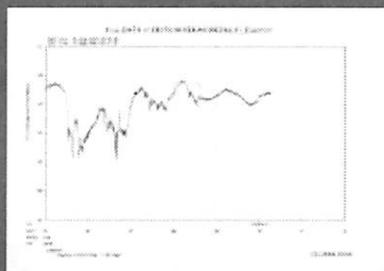
地球磁気圏の構造

放射線帯の外部は対称ではなく、太陽風の影響を受けて、右図にて示すように非対称となり、太陽側は地球半径の約10倍から11倍、大きな太陽フレアでは静止軌道の6.6倍の内側にまでくる。反太陽側は、地球半径の数1,000倍くらいまで彗星の尾のような形状で延びている。

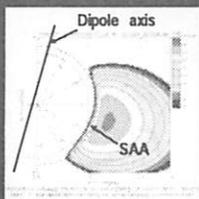


地球磁気圏と放射線帯(太陽左側)

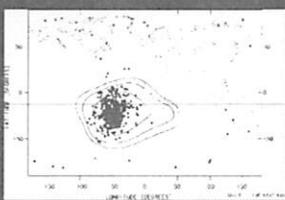
静止軌道での電子環境 日変化)



低軌道の陽子環境

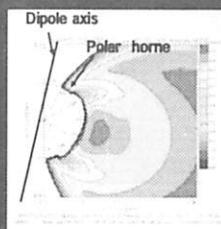


陽子 (>30MeV)環境

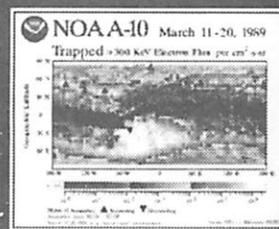


MOS-1(高度909km)で発生したシングルイベントと陽子30MeV以上の等高線マップの重ね合わせ

低軌道の電子環境

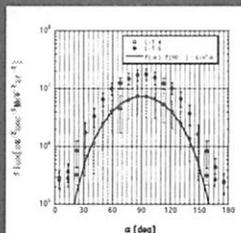


電子(<300keV)環境

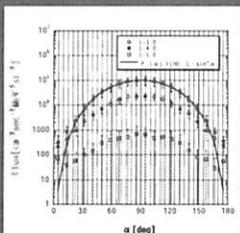


NOAA-10での不具合発生場所

MDS-1で観測されたピッチ角分布

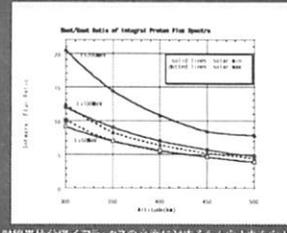
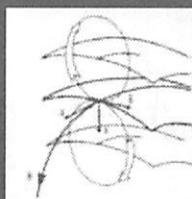


電子 0.35-0.78MeV)



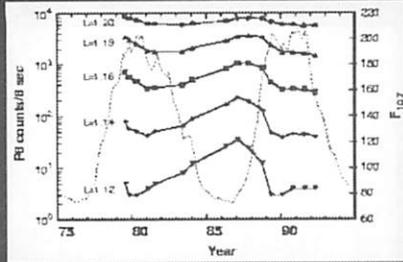
陽子 94.27-212.04MeV)

低軌道での東西効果



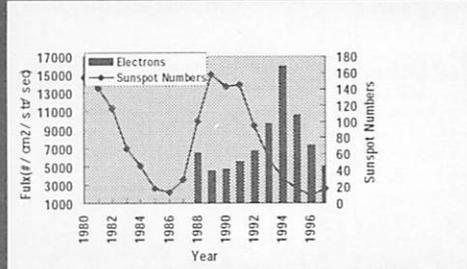
放射線帯積分電子フラックスの緯度に対する南方向と東方向との比率
文献: NASA-CR-18406 Characteristics of Trapped Proton Anisotropy at Space Station Freedom Altitudes (上)

太陽活動サイクル規模での陽子の変動



Lの違いによる8-215MeV陽子カウントレートの変動 [Huston et al, 1996]
点線は、13ヶ月でスムージングしたF10.7を示す。

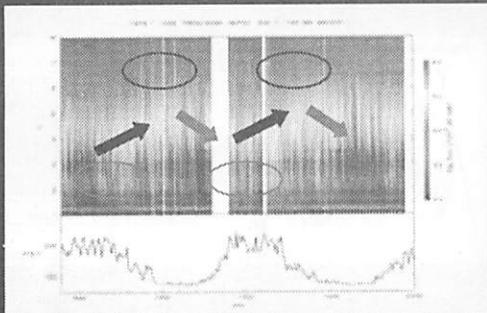
静止軌道での電子の長期変動



ETS-Vで観測された電子 (>0.4MeV) Flux (赤棒)と太陽黒点数の関係

太陽活動サイクル規模での電子の変動

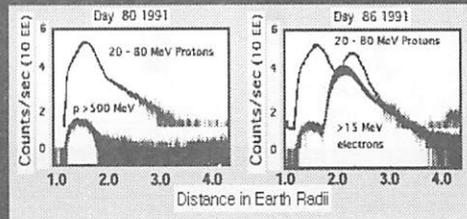
TIROS/NOAA 電子 (0.3MeV, 1979-1999)



(Miyoshi et al., 2002)

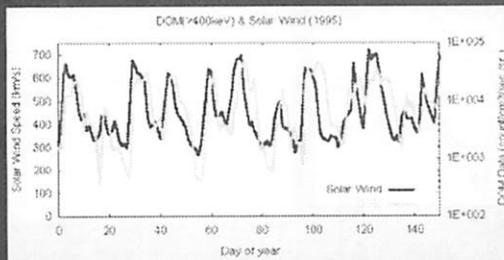
第2の放射線帯

CRRES衛星が、1991年3月24日03:24 UTの SSC S from Sudden Commencement移行の半年以上の期間 $L \geq 2Re$ の領域に密度の高い第2放射線帯を観測した。



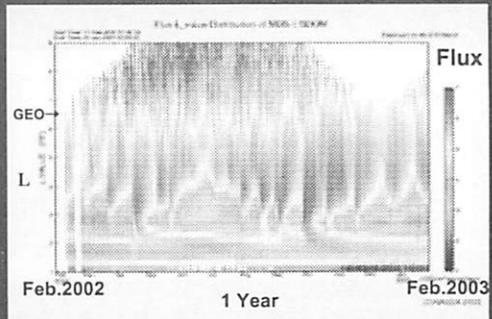
静止軌道における太陽風と電子 flux の関係

ETS-V Electron Flux (>400 keV) and Solar Wind Speed (WIND)



磁気嵐による電子の変動

MDS-1が観測した0.4~0.9MeV電子の変動

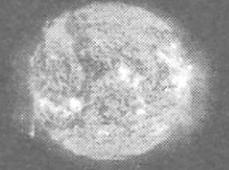


アウトライン

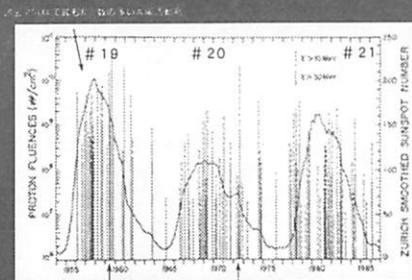
- 宇宙環境により引き起こされる障害
- 宇宙放射線環境
 - 放射線帯
 - 太陽宇宙線
 - 銀河宇宙線
- 不具合の例
- 環境モデル
- まとめ

太陽宇宙線

太陽宇宙線は、太陽フレアによって、太陽表面の黒点(群)から放出される高エネルギー荷電粒子をいう。太陽宇宙線は、定常的な銀河宇宙線と違い、突発的に起こる性質と、フレア毎にエネルギースペクトラムと組成が異なるという性格を持ち、フレアの発生予測が困難という特質をもつ。



太陽フレア粒子と黒点周期

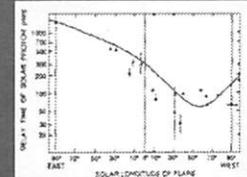


太陽フレアの予測

フレアの発生を観測直後に、太陽陽子が地球周辺に届くまでの予測は可能である。光、X線、中性子等の非荷電粒子は約8分間で太陽から直進して観測できるが、荷電粒子は太陽磁場のアルキメデス螺旋に沿って飛来するので、太陽表面のフレアの発生場所の位置によって到着時刻が変わってくる。フレアの発生程度により、約30分から5~6時間までの遅延時間の差がある。



太陽磁場に沿った荷電粒子の飛来パス



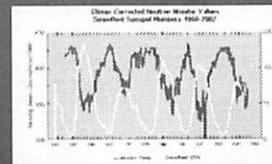
フレアの発生程度と太陽陽子の飛来時間

アウトライン

- 宇宙環境により引き起こされる障害
- 宇宙放射線環境
 - 放射線帯
 - 太陽宇宙線
 - 銀河宇宙線
- 不具合の例
- 環境モデル
- まとめ

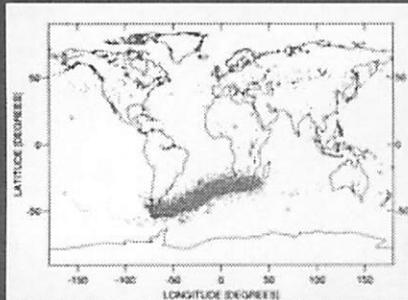
銀河宇宙線

銀河系内で、超新星(質量が太陽の3倍から30倍の量)の爆発や銀河系加速等により発生し、銀河系内を伝搬中に、水素、炭素、酸素、鉄等の元素から軌道電子をすべてはき取られた(例外あり)裸の原子核が、原子番号と同じ電荷を持って高速に近い速度となった粒子を銀河宇宙線(Galactic Cosmic Ray: GCR)と呼ぶ。銀河宇宙線環境は、シングルイベント現象を引き起こす。



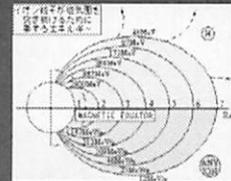
ADEOSにより観測された異常宇宙線

図 2. 5に捕捉された異常宇宙線 (酸素) 分布



地球磁場による遮蔽

銀河宇宙線 (次陽宇宙線) は、荷電粒子であるため、その運動は磁場の影響を受ける。このため地球磁場は、シールドの役目を果たす。地磁気の低緯度領域に対して、入射銀河宇宙線のうち硬いエネルギーの高い成分のみが地表近くまで到達し、高緯度領域に対してより低エネルギーの宇宙線も到達できる。



切断磁気剛度マップ(単位 GV)

アウトライン

- 宇宙環境により引き起こされる障害
- 宇宙放射線環境
 - 放射線帯
 - 太陽宇宙線
 - 銀河宇宙線
- 不具合の例
- 環境モデル
- まとめ

通信放送技術衛星COMETS かけはしの不具合

[経緯]

平成10年2月21日、打ち上げ、第2段エンジンが予定の噴射時間より短くなるというロケットの不具合より、静止衛星への投入が不可能になり2日で9週回という準回帰軌道に投入されることとなった。

[大幅に多い陽子による影響]

COMETSでは、静止軌道より大幅に多い陽子の影響と考えられる様々な現象が発生した。

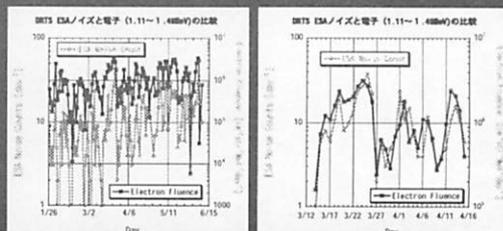
- シングルイベント現象の多発
 - 搭載メモリのシングルイベントアップセット
 - 演算増幅器を含む回路の発信
- 初期機能確認試験でテレメトリ・コマンドがON/OFFできない異常が6件発生
 - テレメトリ・コマンド入出力回路に使用しているフォトカプラの電流伝達比 (CRT) が大幅に劣化することが判明

データ中継技術衛星DRTS (こたま)の不具合

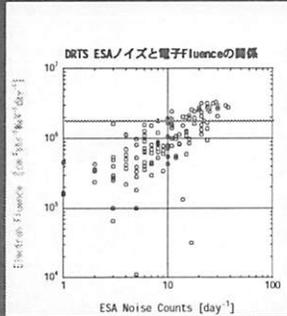
- 平成14年10月9日 静止軌道に打ち上げ
- 平成15年3月24日4:06JST変化率異常モニタ故障検出 (DIR)が動作LA系からB系に切り替わった。
- 3月25日 4:10JSTにB系のみ異常検知
- 4月3日 3:27JSTにB系のみ異常検知
- 5月28日 1:24JSTにB系のみ異常検知
- 6月6日15:37JSTにB系のみ異常検知



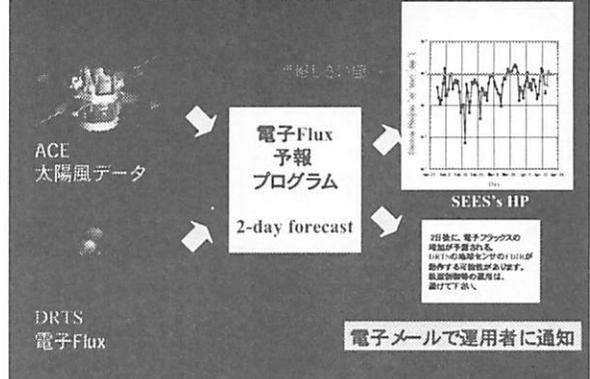
DRTS ESAスパイクノイズと電子フルエンスの比較



DRTS ESAノイズと電子Fluenceの関係



高エネルギー電子警報システム



Space Environment & Effects System (SEES) Web ページ

しきい値はDRTS ESAスパイクノイズに合わせた

- 1) 電子Flux
- 2) 電子Flux (1日平均)
青い四角: 予測
赤丸: 観測
- 3) 前日からの増減

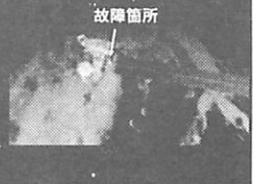
環境観測技術衛星ADEOS-II (みどり2号)の不具合

[経緯]

平成14年12月14日 H-IIロケット4号機により打ち上げ。
平成15年10月25日 発生電源が低下する運用異常発生。

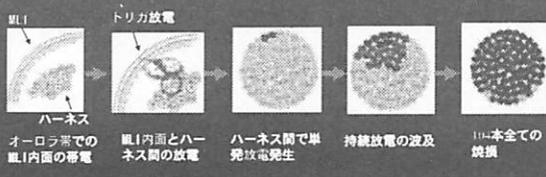
[原因の究明]

異常発生時の衛星状態を把握するため、受信されたデータを整理・解析し、可能性のある故障部位の洗い出しを実施。
故障の本解析 (FTA) により、有力な故障部位を太陽電池パドルと衛星本体間の電力線に絞り込む。



異常発生の有カシナリオ

1. ハーネスは、軌道上で230℃以上に昇っていたため、接続するハーネスの被覆同士が摩擦し、芯線を露出する損傷が発生する
2. 接地されていないハーネスのMLIが帯電し、MLIと隣接ハーネス間でトリカ放電発生。また、帯電が隣接するハーネス間で単発放電発生。
3. MLIとハーネス間のトリカ放電及びハーネス間の単発放電が連続放電に発展。
4. 連続放電による発熱が隣接するハーネスに波及し、徐々にハーネス全体に至り、大電力ハーネス束が開放または短絡し、...の結果、約1kWから1kWに発生電力低下。



昨年10月23日から11月6日の一連の太陽フレア発生期間中に生じた不具合

故障・不具合の区分	件数
永久故障または大幅に劣化	4
安全モードに移行、または運用を一時的に停止したもの	32
データ内容の誤りが増えたもの、または搭載コンピュータが誤動作したもの	6

アウトライン

- 宇宙環境により引き起こされる障害
- 宇宙放射線環境
 - 放射線帯
 - 太陽宇宙線
 - 銀河宇宙線
- 不具合の例
- 環境モデル
- まとめ

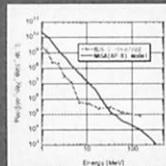
評価方法

放射線の種類	モデル	影響
放射線帯粒子	AP8-MIN,MAX AE8-MIN,MAX	TID, NIEL
銀河宇宙線	CREME96	SEEs
太陽宇宙線	JPL9 1	TID, NIEL

TID: Total Ionizing Dose, NIEL: Non-Ionizing Energy Loss
SEEs: Single Event Effects

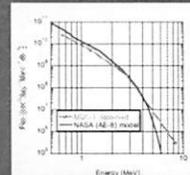
AP8モデルの問題点

- 太陽風と地球磁場との強い衝撃作用等による放射線変動が反映されていない。
- 粒子の方向分布 (ビッチ角分布) を考慮していない。
- 低高度の精度が悪い。
- エネルギースペクトラムが異なる。
- 高エネルギーの観測例が少ないので精度が明らかでない。



AE8モデルの問題点

- 磁気嵐や磁場の変動が放射線帯変動 (特に外帯変動) に反映されていない。
- 粒子の方向分布 (ビッチ角分布) を考慮していない。
- 太陽活動サイクルに対する粒子変動が、実際と食い違っている。
- エネルギースペクトラムが異なる。
- 帯電のための低エネルギー電子 (40keV以下) が評価できない。



オーロラ粒子環境の評価

- オーロラ粒子を評価するモデルとしては、Air Force Research Laboratoryが開発したAURORAサイエンスモデルが存在するが、Fluxの最悪値やエネルギー分布等を評価することができない。

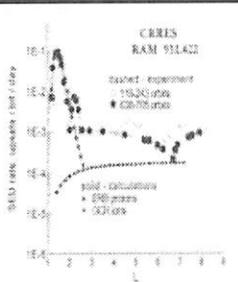
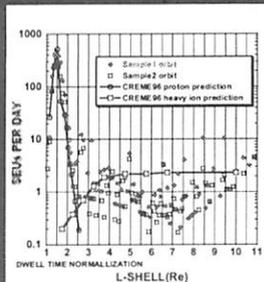


AURORAサイエンスモデルの出力例

CREME96モデルの問題点

- シールドの種類と形状が限定されている。
- 磁場による曲げられにくさ (粒子の硬さ、Rigidity) の精度が十分でない。
- L値に対する発生率が実測と合わない。

L値とSEU率の関係



Bashkurov et al., 1999)

JPL91モデルの問題点

- これまでの観測結果から最大値を決定した。
- フレア粒子が磁気圏のどこまで侵入できるかは、ユーザまかせ。
- 太陽活動期極小の評価ができない。
- 信頼度の設定は、ユーザが決定。

アウトライン

- 宇宙環境により引き起こされる障害
- 宇宙放射線環境
 - 放射線帯
 - 太陽宇宙線
 - 銀河宇宙線
- 不具合の例
- 環境モデル
- まとめ

まとめ

- 宇宙環境による障害は、帯電とシングルイベント現象で83%をしめる
- 光学デバイス等に対するNIEL対策が重要
- 短時間での電子環境の変動にも注意が必要
- 複合環境を考慮した設計が必要
- 環境の変動予測の技術を高めミッションの電源を落とす等の運用も重要