



JAXAにおける宇宙環境防護に関する研究紹介

宇宙航空研究開発機構
松本 晴久

2017年11月8日
第14回 宇宙環境シンポジウム
神戸大学 先端融合研環境統合研究拠点コンベンションホール

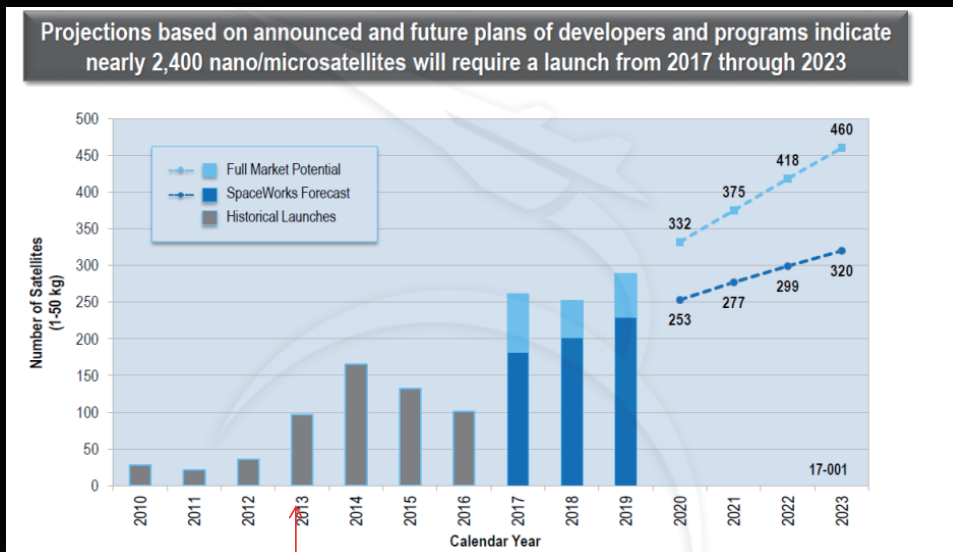


目次

- 背景
 - 小型衛星マーケットの拡大
 - 有人探査
- 研究の目的・範囲・目標
- 研究の現状
- まとめ



背景： マイクロ/ナノ衛星マーケットの拡大

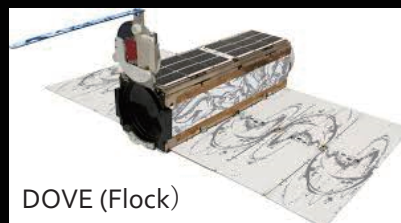


2013年から増加

当初予定よりも成長は鈍化しているものの2013年から増加している。



ナノ衛星の成功例

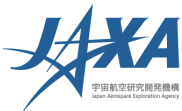


Flock1 3バンド
Flock2 3バンド+近赤外域
5kg, 3U(30cm×10cm×10cm)

- 2017年打ち上げの362機の内135(37%)がDOVE (Flock) 衛星で占める。

【相乗りの打ち上げの例】

- 2017年2月15日、インドの地球観測衛星カートサット2D (Cartsat-2D) (高度505km SSO)と103機の相乗り衛星が搭載され打ち上げられた。
- インドは、地球の太陽光吸収率と反射率を測定する装置、宇宙放射線による民生機器への影響を調べるシングルイベントアップセットモニタを搭載するINS-1Aと、惑星間空間のバックグラウンド観測のためのライマンアルファ線観測装置、小型リモートセンシング用Origamiカメラを搭載するINS-1Bの2機を、10kg級小型衛星バスの検証を兼ねて搭載している。
- 残り101機の内訳は、米国のDove (Flock-3P) 88機、Lemur 8機、イスラエルのBGUSat、カザフスタンのAl-Farabi-1、オランダのPEASSS、スイスのDIDO-2、UAEのNayif-1となっている。



小型衛星マーケットの変化 教育からビジネスに使用

- 小型衛星コンステレーション運用の例

- 通信衛星： ORBCOMM、OneWeb

- リモートセンシング：

DOVE Flock-3p, Skybox Imaging (google)

- 科学衛星；BRITE



超小型衛星・小型衛星で、民生部品が使われて成功しているなかで、今後、ビジネス向けの超小型衛星の発展が予想されている。
商用目的になると、投資効果を最大にするため、軌道上寿命が、**3年～5年と伸びる事が必然条件**である。そうすると、放射線耐性のうちでトータル・ドーズ耐性が、まず、民生部品の放射線耐性値に近づいて、それが**大きな使用制限**になる。また、シングルイベントやシングルイベントラッチアップを**抑える工夫（評価方法、放射線防護等）**が必要となる。



背景：有人探査

- 火星無人探査

	1960	1970	1980	1990	2000	2010
火星周回軌道	△ Mariners4号(米)				△△△ Mars Odyssey号(米) Mars Express号(欧州) Mars Reconnaissance (米)	△
火星表面着陸		△ △ マルス3号(ソ連) Viking1 (米)				MAVEN(米) MOM (インド)
火星表面の無人探査				△ Mars Pathfinder(米) Spirit Opportunity (米)	△ Curiosity (米)	△

- 火星有人探査

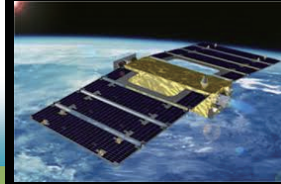
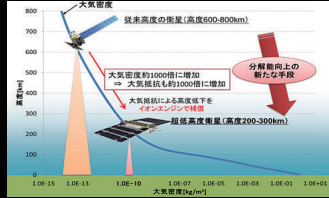
- NASA 2030年に有人火星探査を行うことを表明
- アメリカの民間企業SpaceXやオランダの非営利団体Mars Obeが、それより早い2020年代に人類を火星に送ることを計画

有人火星探査は、長期間の無重力、長期間の閉鎖空間と大量の放射線被ばくが非常に高いリスクになる。

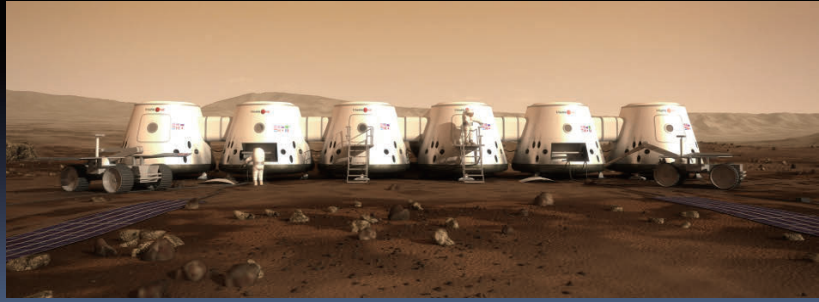
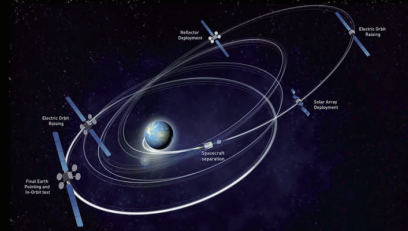


研究の目的

- 超低高度衛星
- オール電化衛星
- 有人探査



- 宇宙機や人を過酷な宇宙環境から防護する技術を確立し、宇宙利用を拡大する。



研究範囲

「放射線防護」「中性大気防護」「汚染防護」「紫外線防護」「帯電防護」の5つのテーマについて実施する。

宇宙機と人を宇宙環境から防護する技術

有人探査 月面居住モジュール http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/series/moon/why_go_back.html
 超低高度 光学観測衛星 先進光学衛星 HT 周回衛星

		放射線		中性大気	汚染	紫外線	帯電
影響(例)		人：被ばく	部品：放射線損傷による誤作動、永久故障等	表面材料の機械的・熱光学的劣化	光学性能劣化 観測感度低下 熱光学特性変化	熱光学・機械特性変化	放電に伴う電源関係等の不具合
防護		・遮蔽技術と線量低減・効果の検証		・耐AOコート ・多量の原子量の大きい大気成分への対策	・付着防護・抑制	紫外線防護技術	帯電防護技術
モデル化・予測	影響	放射線耐性試験		・超低高度における中性大気密度の研究	・影響評価試験 ・J-SPICE2 (入力用材料パラメータの取得)	・劣化予測の高度化	地上での帯放電試験
	環境	・宇宙船内線量予測 ・放射線(GCR、太陽陽子、捕捉陽子)モデル		惑星別モデルの検討		NA	・MUSCATの高精度化
	宇宙	・被ばく線量管理 ・ダイヤモンド検出器	・XEP-e	・軌道上材料劣化評価	・QCOMIによる軌道上観測	軌道上材料評価	APD型電子計測装置
	地上	NA	NA	NA	・汚染管理最適化	NA	NA



研究の現状

- 放射線遮蔽技術
 - 「異種材料の組合せ」による効果的な遮蔽
 - ミッション汎用性の高い「被ばく線量予測ツール」の開発
 - 月/火星面上の「実製造を視野に入れたレゴリスの遮蔽材」の開発または選定
- 環境モデル・ツール
 - 銀河宇宙線モデル (CREME96に代わる日本独自のモデル、ロケット軌道等にも利用できるモデル)
 - 太陽陽子モデル (被ばく線量算出で重要なモデル。実測値とかい離の少ない、適用エネルギー範囲(1~200(or 1000)MeV)の大きなモデルを目指す。)
 - 捕捉陽子モデル (変動を考慮したモデル)
- 放射線計測
 - 宇宙飛行士の被ばく管理支援ならびに被ばく管理支援技術の向上
 - ダイヤモンド検出器
- ERG搭載XEP-eデータの解析



銀河宇宙線モデル(1)

磁気カットオフ(COR)の作成

COR 理論値と SEDA-AP/HIT, SDOM の観測データ比較

①COR 理論値の算出
→ 高度、緯度、経度、COR[GV] のテーブルデータ

- 方法 : Back-tracing method (Force: Lorentz, E=0, 4次のルンゲクッタ法で anti-proton 追跡)
- 地磁気モデル : Tsyganenko model
- 計算コードは茨城高専の三宅先生の協力にて作成

GCR モデルの選定

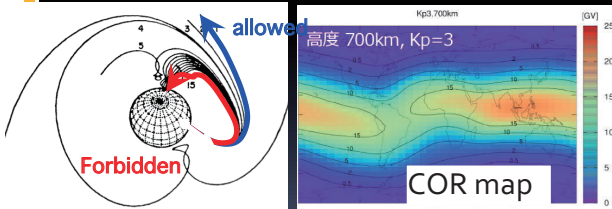
Matthia, Daniel, et al. "A ready-to-use galactic cosmic ray model." *Advances in Space Research* 51.3 (2013): 329-338.

→ ISO モデルの考え方に基づいたモデル。Wholf Number が宇宙線変動パラメータな点は CREME96 と同じ。

Wholf number の算出に用いるデータが異なる。

- ✓ ISO (CREME96) : 太陽黒点数
- ✓ D. Matthia : ACE/CRIS の炭素フラックスデータ

観測 (粒子)	年	観測値とモデルのずれ		
		Matthia	ISO	BO-10
ACE/CRIS (Fe)	2001	8%	73%	58%
BESS (H)	1998	4%	17%	5%
HEAO-3 (C)	1979	6%	7%	7%



陽子フラックスの最悪環境

CREME96, CREME86 で選択可能な Carrington級 + 年1、10回起きるプロトンイベントのフラックスの選択



銀河宇宙線モデル (2)

低高度GCRフラックスの計算検討

(ロケット高度用) 100 km以下での銀河宇宙線フラックス

→ JAEAで開発した PARMA (PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere) のコードを使用 (前述のCOR検証結果の共有を前提に協力)

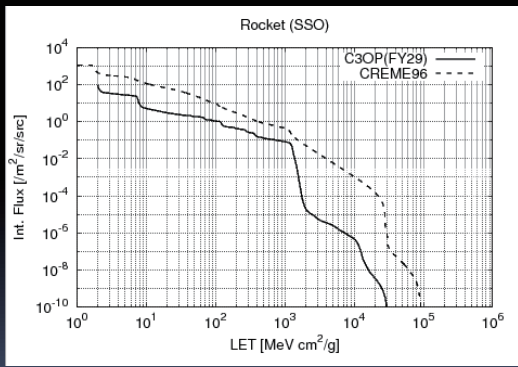
①モデル概要

大気の影響を考慮したモデル (高度100 km 以下)

- ・ 言語: Fortran
- ・ 銀河宇宙線モデル: D. Matthia et al. 2013

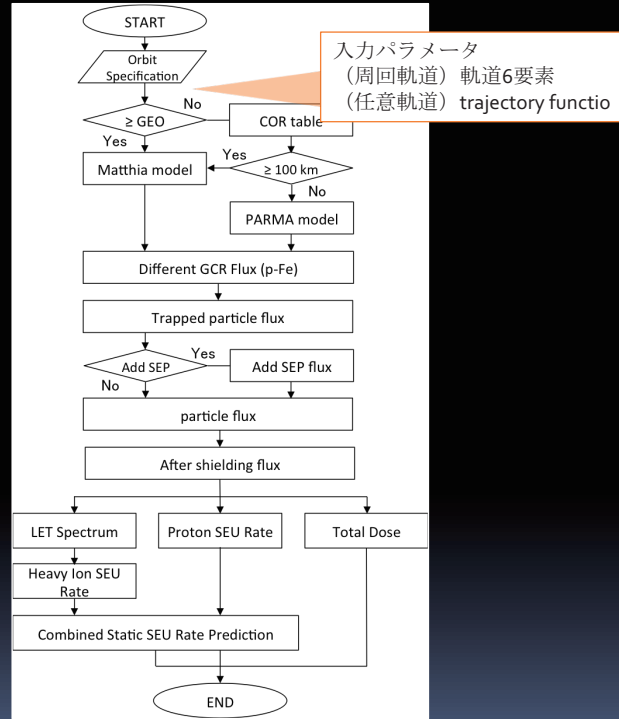
RANG計算

HZETRN2015を使用することにした。



ロケット軌道 (SSO)におけるCREME96と開発したモデルの差

計算プロセス



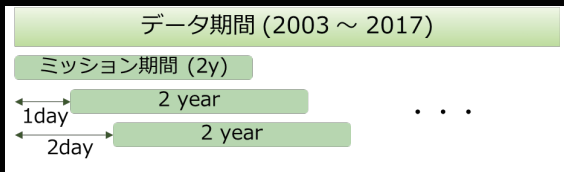
入力パラメータ
(周回軌道) 軌道6要素
(任意軌道) trajectory function



太陽陽子モデル解析手法

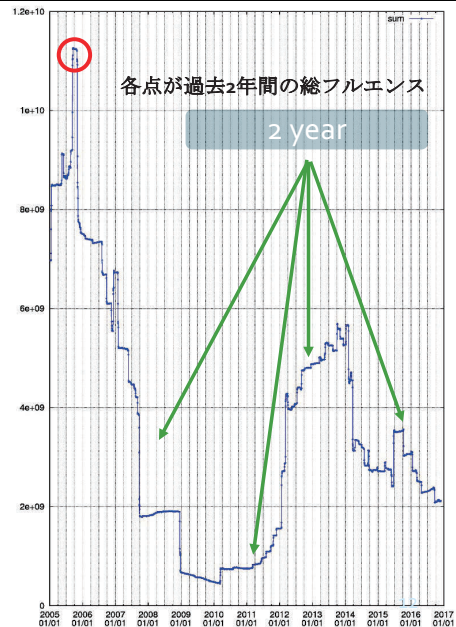
JAXA (ISO) モデルと同じ手法を利用

DRTSおよびGOESが計測した太陽プロトンデータから
求めたいミッション期間ごとの積算値を取得



各点から最も大きな積算値
(ワーストケース)
→ 2年間の太陽陽子数の
予測値とする

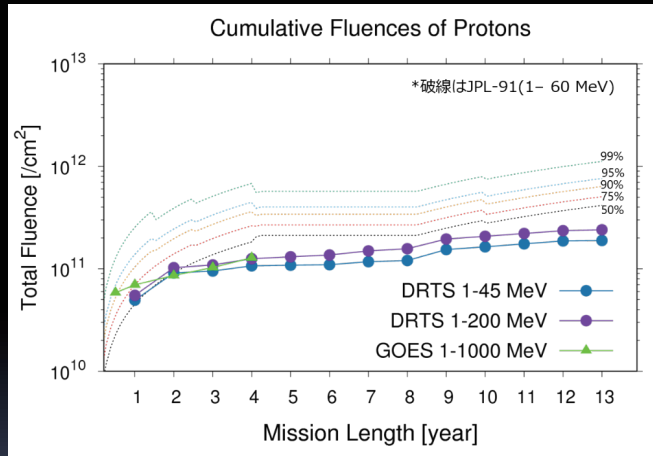
1, 2, 3, 4...年と、データ期間における
プロトン量の予測値を計算...





太陽陽子モデル

- DRTS (2002年-2017年) 1-200MeV、及びGOES (2010年-2017年) 1-1000MeVのデータを用いた太陽陽子モデルを作成した。業界標準として使用されているJPL-91モデルは、実測値よりも高く見積もってしまうという欠点があった。それに対して、今回の予測値は、より実測値に近い値を見積もることができる。



1986～2010年のGOESデータを解析し、本研究のモデルを完成させる

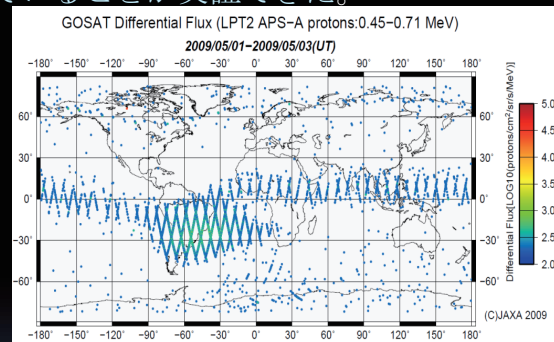
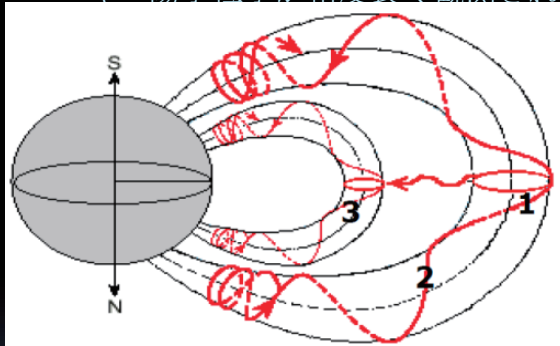


捕捉陽子モデル

GOSAT観測データ(50keV～150MeV,2009年～：約8年) を中心に開発中。

■ イベント現象

- LPT2は、天頂方向からの粒子を観測しているが、磁気赤道での二重電荷交換による(限られた時間だけ捕捉される) Fluxを確認。低エネルギー陽子粒子が精度良く観測されていることが実証できた。



$H^+ + H \rightarrow H^+ + H^+$, リングカレント
 $H^+ + O \rightarrow H^{*+} + O^-$, 地球近傍大気
 *は、エネルギー粒子(原子)の意味

図1 二重電荷交換の原理

図2 GOSATで観測されたデータ



捕捉陽子モデル

■ データクリーニング

- 昨年度、地球半径1.8Re以下でのAPS-AとAPS-BセンサのFluxの不一致が確認され、検出器正面外からの高エネルギー陽子の侵入がコンタミになっていると推測した。今年度、検出器に様々な方向から一様に粒子を入射させるシミュレーションを実施し、実際の観測データをシミュレーションで概ね再現できた（エネルギースペクトルをPower-law： AE^{-1} として仮定）。（図3参照）
- APS-A, APS-Bに対して個別にシミュレーションを、周りにある他の検出器を通り抜けてくる粒子もあるため、検出器全体でシミュレーションを行う必要がある。（図4参照）

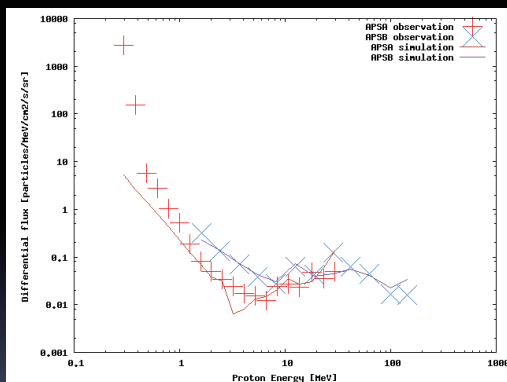


図3 実測(x)とシミュレーション(実線)との比較

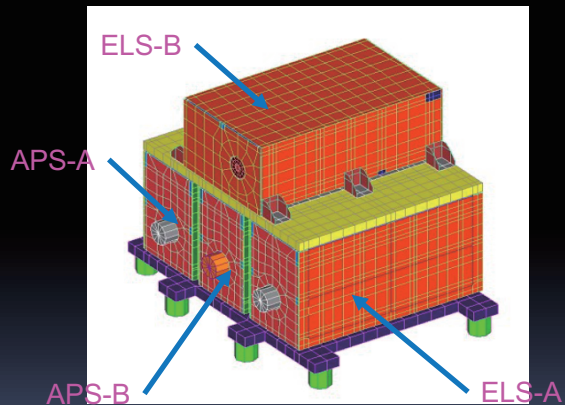
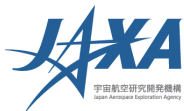


図4 検出器の全体図

15

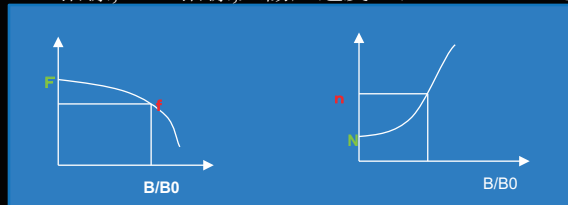


捕捉陽子モデル

■ モデル作成手順

- GOSAT衛星で観測された各点（L,B/B0（衛星の磁力線上の点と磁気赤道との交点の

磁場の強さB、B0の比）のフラックスfから磁気赤道上のフラックスFを求める。同様に観測点での $\sin^n(\alpha)$ でフィッティングしたnから赤道上でNをもとめる。これらのデータからBL座標による放射線帯モデルを構築する。これらの選出のためL*,ミラーポイントの全磁気力、ロスコーン角を算出するプログラムの開発及びAP指標,F10.7指標,太陽風速度のデータベースを整備した。

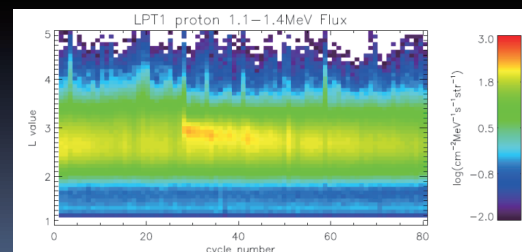


■ 長期変動

- データセットが完了した、2009年5月～12月（8か月）データを用いて陽子の変動を確認した。2009年は、太陽活動極小期で高エネルギー陽子を伴うフレアは、発生していない。但し、太陽からの低エネルギー陽子(>3MeV)が、度々観測されており、磁気嵐と共に3Reの領域まで入り込む様子や拡散する様子も確認された。

高エネルギー（3MeV<）は、安定している。

- 太陽極大期を含む2017年までのデータを解析し、長期変動を予測させるための変動指標、拡散の様子明らかにし、モデルを完成させる。





まとめ

- 放射線を中心とした防護研究の環境モデル・ツール（銀河宇宙線モデル、太陽陽子モデル、捕捉陽子）の現状について報告しました。
- 今後、これらのツールを実際の研究・設計等に活用して頂き、問題点等のフィードバックを通じてより良いものにして行く。
- 研究成果が、有人・無人探査の国際競争力のみならず、宇宙利用拡大につなげていきたい。