

JAXAにおける宇宙環境計測の現状

宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・宇宙環境グループ

小原 隆博、松本晴久、古賀清一、越石英樹、東尾奈々、古畑智、奥平修

1. はじめに

人工衛星や国際宇宙ステーションが活躍する宇宙空間には、危険な宇宙放射線があります。宇宙放射線は、i)太陽から来る太陽放射線、ii)遠い銀河からやってくる銀河宇宙線、そして iii)地球の磁場に補足されたバンアレン帯の放射線粒子の3つに分類されます。

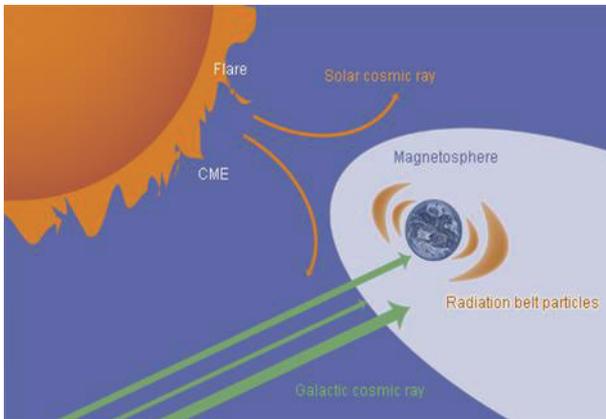


図1 3種類の宇宙放射線が、宇宙空間にはあります。太陽から来る太陽放射線(solar cosmic rays) 銀河宇宙線(cosmic rays)そしてバンアレン帯の放射線粒子(radiation belt particles)です

これら、宇宙放射線は時間変動をしています。短い時間では数分から、長い時間では11年といった、非常に幅の広い時間スケールで変動しています。

銀河宇宙線は、太陽活動周期(11年)によって大きく変動する他、太陽から放出されたガス(CME)の地球への到来によっても、その強度を変えます。太陽放射線は、太陽フレア活動によって増加するとともに、CMEの地球への到来によっても、増加します。また、バンアレン帯の放射線粒子は、磁気嵐(ストーム)やサブストームによって、大きく変化する事がわかって来ました。

このように激しく増加や減少を繰り返す宇宙環境のもとで、宇宙飛行士が危険な放射線の被害に遭わないよう、そして人工衛星が故障を起こさないように、JAXA(宇宙航空研究開発機構)では、宇宙環境モニター装置を用いて、宇宙環境を常に監視しています。現在、以下の7機が稼働しています。

- ・国際宇宙ステーション搭載宇宙環境計測ミッション装置(SEDA-AP):低高度(図2参照)
- ・ALOS(だいち)搭載宇宙放射線環境計測装置(TEDA/SDOM):低高度(図3参照)
- ・GOSAT(いぶき)搭載宇宙放射線環境計測装置(TEDA/LPT):低高度(図4参照)
- ・JASON-2搭載宇宙放射線環境計測装置(TEDA/LPT):低高度(図5参照)
- ・ETS-8(きく8号)搭載宇宙環境計測装置(TEDA/MAM, POM):静止軌道(図6参照)
- ・DRTS(こだま)搭載宇宙放射線環境計測装置(TEDA/SDOM):静止軌道(図7参照)
- ・QZS-1(みちびき)搭載宇宙環境計測装置(TEDA/LPT, MAM, POM):準天頂軌道(図8参照)

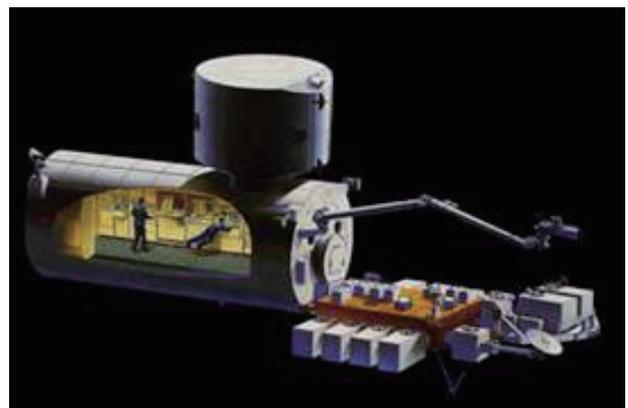


図2 国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」暴露部に、宇宙環境計測ミッション装置(SEDA-AP)が2009年7月に取り付けられ、観測をはじめました



図3 陸域観測衛星 ALOS (だいち) に宇宙環境計測装置 (TEDA/SDOM) が取り付けられ、2006 年 1 月に観測を開始しました



図4 温暖化観測衛星 GOSAT (いぶき) に宇宙環境計測装置 (TEDA/LPT) が取り付けられ、2009 年 1 月に観測を開始しました

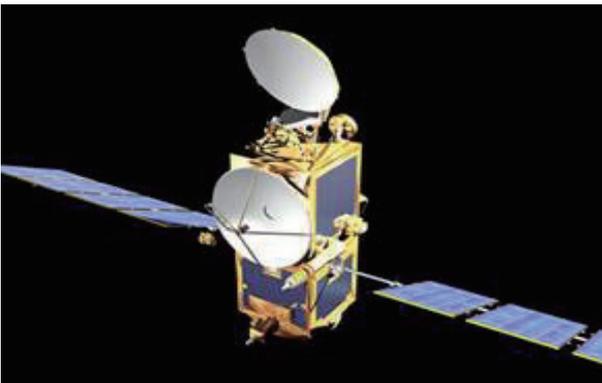


図5 フランスの海洋観測衛星 Jason-2 に宇宙環境計測装置 (TEDA/LPT) が取り付けられ、2008 年 6 月に観測を開始しました

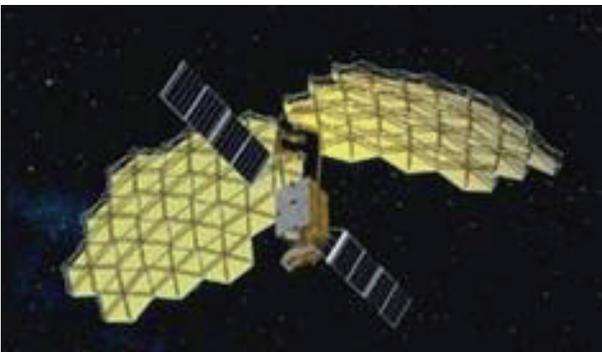


図6 通信実験衛星 ETS-8 (きく8号) に宇宙環境計測装置 (TEDA/MAM, POM) が取り付けられ、2006 年 12 月に観測を開始しました



図7 データ中継衛星 DRTS(こだま) に宇宙放射線環境計測装置 (TEDA/SDOM) が取り付けられ、2002 年 9 月に観測を開始しました



図8 準天頂衛星 QZS-1 (みちびき) に宇宙環境計測装置 (TEDA/LPT, MAM, POM) が取り付けられ、2010 年 9 月に観測を開始しました。

2. 宇宙環境データの利用

2.1 プロジェクト支援

宇宙放射線の変動を引き起こす大きな原因は太陽です。JAXA の太陽観測衛星「ひので」は、24 時間 365 日、太陽の観測を行っています。太陽の表面とコロナの観測は、活発に活動する領域を明確に識別しています。これに、他の国の太陽観測衛星のデータ、地上の望遠鏡の観測データなどを統合することで、危険な太陽表面爆発（太陽フレア）に対する備えが出来ます。

静止軌道にある DRTS や ETS-8 は、太陽からの放射線をいち早く捕まえます。図9には、静止軌道衛星から得られる宇宙環境データを示しています。グラフは、上から、太陽放射線（陽子）、放射線帯粒子（電子）、磁場変動、そして地磁気活動指数（k 指数）です。太陽フレアの影響は、真っ先に陽子（や中性子）に現れます。

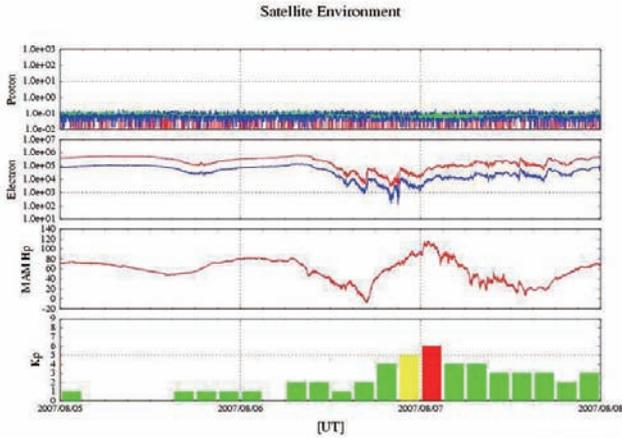


図9 JAXAの静止軌道衛星のデータをリアルタイムで世界に公開しています (<http://sees.tksc.jaxa.jp/>)

太陽からの放射線が地球に到達したと思うと、短い時間に急激に放射線陽子の量は増加して行きます。放射線の津波が押し寄せる兆候は、まず中性子に現れると私たちは考えています。国際宇宙ステーションでは、太陽中性子の実験的観測をはじめています。

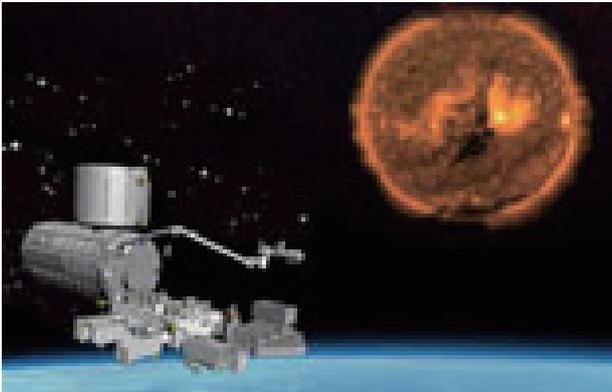


図10 太陽から来る中性子を、国際宇宙ステーション搭載のSEDA-APがリアルタイムで観測します

宇宙環境の突然の変動は、非常な脅威です。宇宙環境の計測情報は、有人宇宙環境ミッション本部の宇宙飛行士健康管理グループに常時送られていますが、緊急時は、携帯電話による通報も行われています。さらに、宇宙環境情報は、JAXAの運用する実利用衛星、および関連する科学衛星にも送られていて、宇宙環境のリアルタイム監視に役だっています。

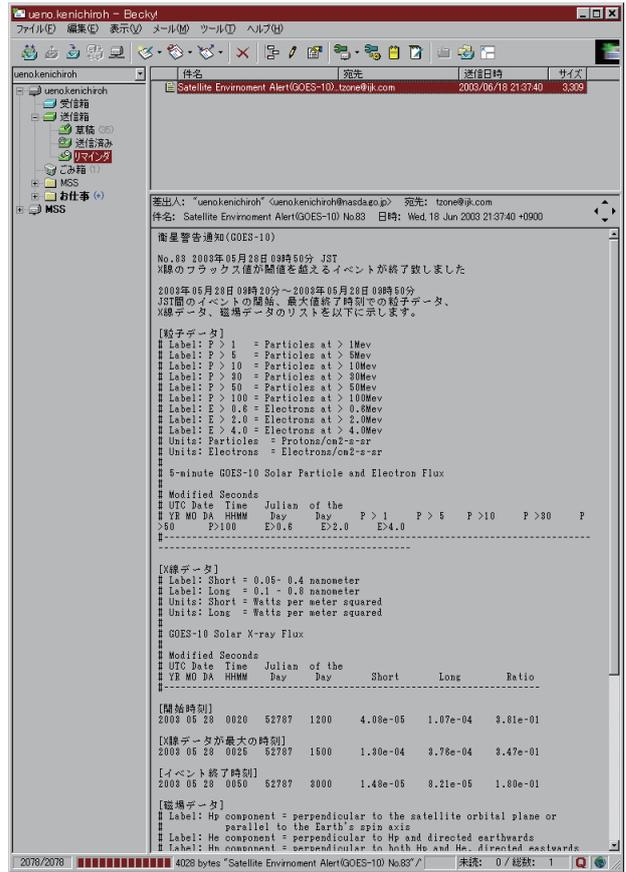


図11 JAXA衛星プロジェクトに緊急時に送られる電子メール(衛星警報通知)の例

2.2 放射線帯モデル

2002年に打ち上げられたMDS-1(つばさ)衛星は、近地点500km、遠地点36000kmの遷移軌道をとった数少ない衛星です。1年半に渡りバンアレン帯の観測を行い、世界的にも非常に重要なデータを得ることが出来ました。

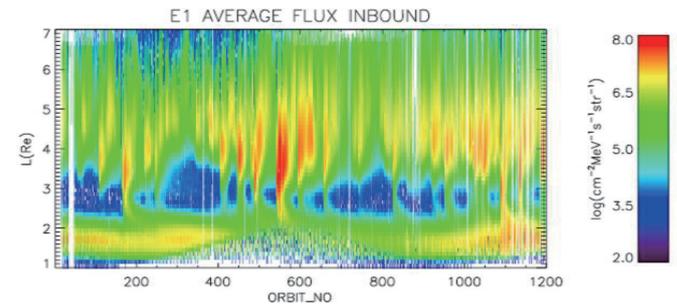


図12 つばさ衛星が観測した、放射線帯電子の空間分布・時間変化の様子

図 1 2 は、縦軸に地球からの距離（L 値）、横軸に衛星の周回数をとっています。衛星の 1 周は、約 10 時間ですので、1 日に 2 周と少し、放射線帯の観測を行いました。

地球に近いところから、放射線の内帯、スロット（空隙の意）そして、放射線外帯という構造です。軌道が少し傾いています（28 度）ので、内帯は、ゆっくりとした変化を示します。注目したいのは、外帯の電子で、非常に激しい時間変化をしています。時々、放射線電子量が大きくなるのは、磁気嵐（ストーム）が起こった事によっています（磁気嵐は、太陽フレアの影響で放出された太陽ガスのエネルギーが地球に押し寄せて来て発生します）。

現在、世界で使われている NASA のモデルを用いて、MDS-1 がどれだけの放射線を計測するか、モデル計算をした結果を図 1 3 にしめています。

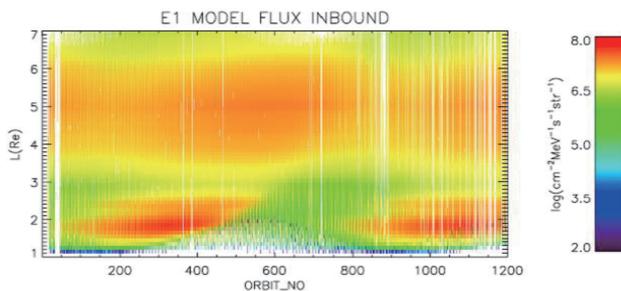


図 1 3 NASA の放射線帯モデルで予測した、MDS-1 軌道での放射線量を示しています。観測と比べて、時間変動が表現されていないことがすぐにわかります

図 1 3 を見るとわかりますが、NASA のモデルは、時間変動が入っていない平均値のみのモデルです。JAXA の私たちのグループでは、観測に基づいて、時間変動するモデルを構築しています。

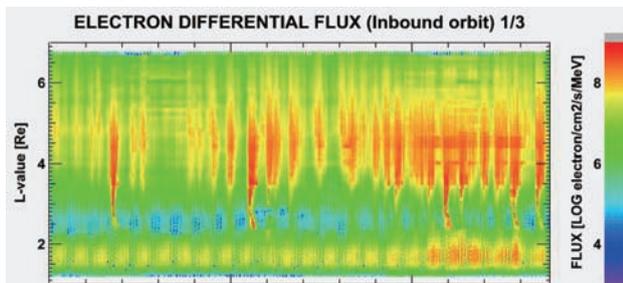


図 1 4 JAXA の放射線帯変動モデル。時間変化が、表現されはじめて来ました

太陽から吹いて来る太陽風と地磁気活動の激しさをパラメータにした実験的なモデルを、JAXA では構築して来ました。この新しいモデルを評価して明らかになったことは、これまでの NASA のモデルは少し放射線量が大きすぎたことです。そして、変動の幅も定量的に分かってきました。こうした知識は、今後の衛星を設計する上で、部品や装置をシールドする技術に生かされます。適量のシールド量を見積もることは、衛星設計の重要な項目です。

2.3 南大西洋異常領域（SAA）

低高度衛星の宇宙環境は、さらに複雑な構造になっています。図 1 5 から図 1 7 は、違った高さでの放射線電子の測定結果を世界地図にしたものです。南大西洋上空は、地球磁場が弱い影響で、放射線帯内帯の粒子が降り

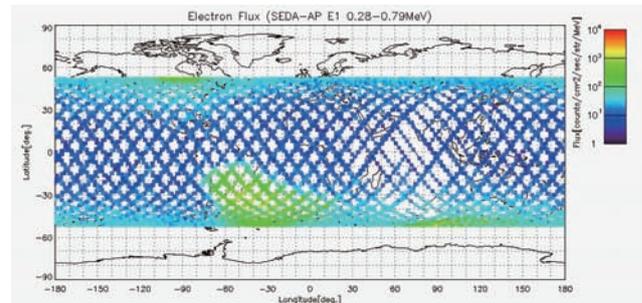


図 1 5 国際宇宙ステーション高度（400km）での放射線電子の計測結果です。南大西洋上空の磁場の弱い領域に、放射線粒子が侵入しています。その他、カナダの上空、オーストラリア上空にも、放射線粒子が観測されています

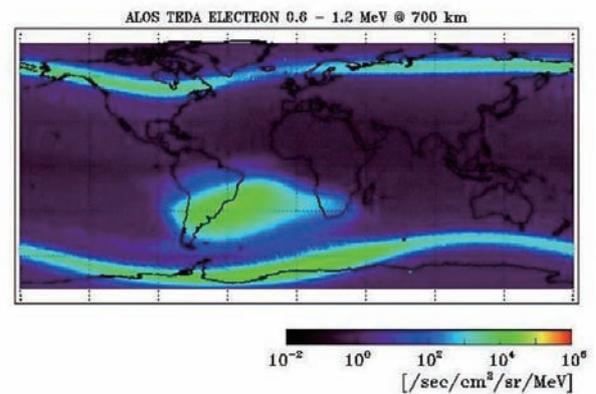


図 1 6 高度 800km を飛ぶ、ALOS（だいち）衛星も、同じような構造を観測しています。南大西洋上空の異常領域は、高度の増加とともに広がっています

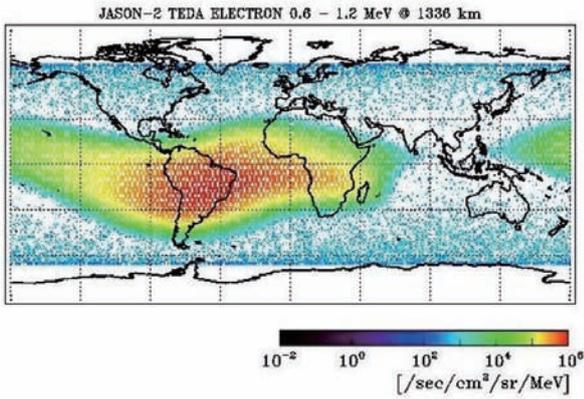


図 1 7 高度 1336km を飛ぶ、Jason-2 衛星でも、この傾向が確認されています。南大西洋上空の異常放射線領域は、高度の増加とともに、さらに広がっています。

て来ています。ここを横切る人工衛星は、強い放射線の影響で、機器が時々誤動作しています。

2.4 高緯度の放射線ベルト

国際宇宙ステーション、Jason-2 衛星とも、軌道傾斜角が小さい（55 度前後）ので、極域の情報が得られません。GOSAT（いぶき）は、軌道傾斜角 98 度であることから、極域の全貌が観測出来ています。図 1 8 は、GOSAT 衛星が観測した 1MeV 電子の分布です。北半球、南半球に分けてプロットしています。南半球では、南太平洋異常が見えていますが、注目したい構造は、極をぐるりと囲む輪状の構造です。放射線のベルトのように見えます。

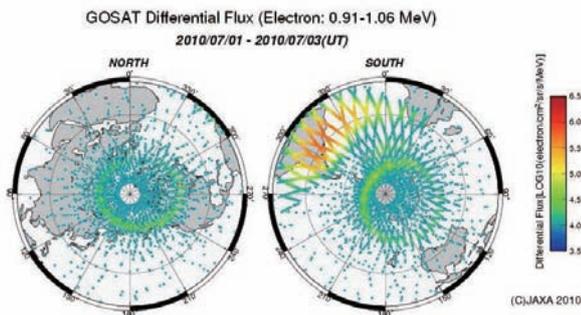


図 1 8 GOSAT 衛星が観測した 1MeV 電子の分布。北半球、南半球に分けてプロットしています。南半球では、南太平洋異常が見えています。

図 1 6（ALOS 衛星）でも、このベルトははっきりと見えています。磁力線をトレースすると、このベルト領域は、放射線帯の外帯に

繋がっていました。図 1 9 に、図 1 3 と同じフォーマットのプロットを示します。極軌道の低高度衛星でも、放射線外帯変動が十分にモニター出来ることが、GOSAT 衛星にとって判明しました。

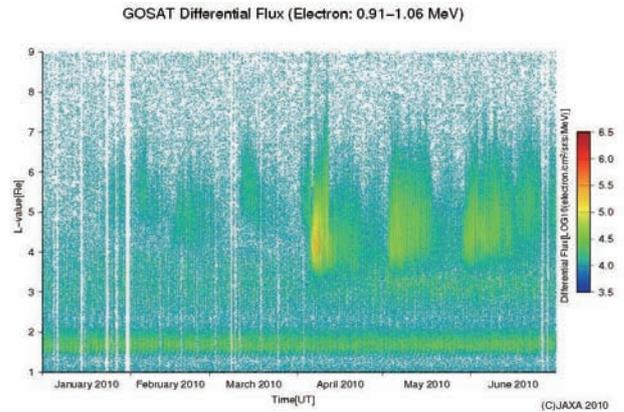


図 1 9 GOSAT 衛星が観測した 1MeV の放射線電子の空間分布・時間変化の様子。つばさ衛星の赤道付近での観測に比べて 1 桁以上、フラックスは少ないが、外帯領域に同じような変動が観測されています。

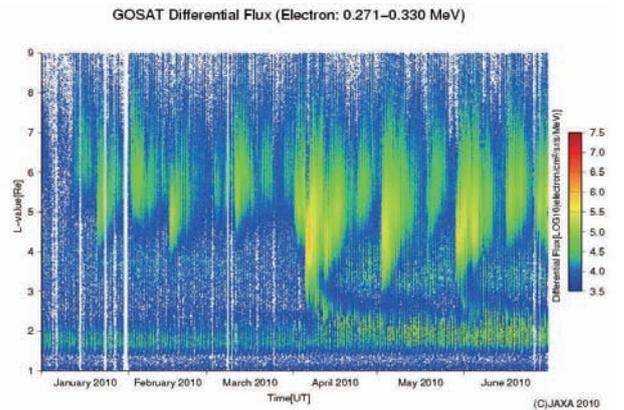


図 2 0 GOSAT 衛星が観測した 0.3MeV 電子の空間分布・時間変化の様子。図 1 8 と比較すると、外帯 MeV 電子の成因に関する手がかりが得られると、期待されます。

GOSAT 衛星では、更に低いエネルギーの電子も計測しています。300keV 電子の観測結果を図 1 9 に示していますが、図 1 8 の MeV 電子の増加の状況と比較することで、外帯 MeV 電子の成因に関する手がかりが得られると、期待されます。

3. むすび

2010年9月に、世界で初めての準天頂軌道にJAXAの衛星が飛びたちました。太陽放射線や地球放射線帯の観測を開始したところですが、静止軌道との共同観測で、放射線粒子の輸送や加速などといった物理的な理解が実現すると、期待しています。

また、本稿では、詳しく述べませんでしたが、オーロラ粒子・オーロラ電流の観測も可能になります。巨大オーロラの発生が原因となって、世界では、多くの衛星が帯電事故を起こしています。JAXA衛星がオーロラの被害を受けないように、オーロラの発生や規模を調査する必要があります。30分程度の時間精度で、オーロラ発生は予測されつつありますが、どの地域に発生するかについては、まだ予測が出来ません。静止軌道の磁場・粒子観測と、準天頂衛星複数機による同時観測は、オーロラの実体について、多くの知見を与えてくれます。準天頂衛星の観測結果に強い期待が持たれています

宇宙環境グループの活動指針を図2-1に掲げます。宇宙環境情報の提供などに代表される「プロジェクト支援」と、宇宙環境モデル

などによる「衛星設計標準」を、2大貢献と考えています。今後、宇宙への民生品の利用が進む状況では、いままで以上に、宇宙環境下での安全・信頼性が強く要求されます。宇宙環境グループは、技術研究開発を担当する各セクションとより強い連携を行い、新しい宇宙利用時代に備えて行きます。

JAXA宇宙環境グループの研究業務のフロー

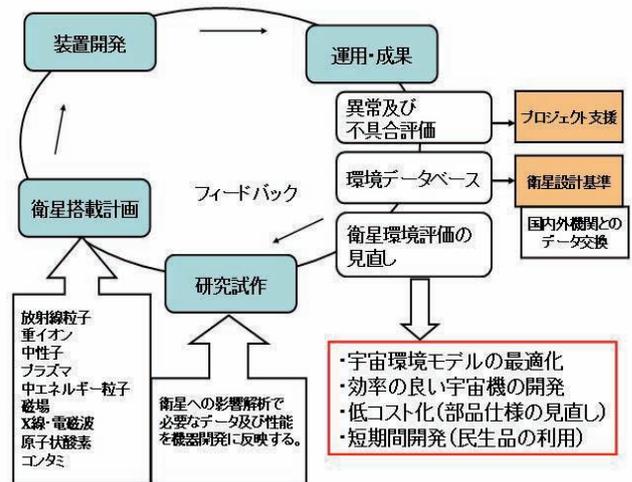


図2-1 宇宙環境グループの業務フローです。「プロジェクト支援」と、「衛星設計標準」が、2大目標です