

空と宙

研究開発 —— デブリに対する研究開発本部の取り組み

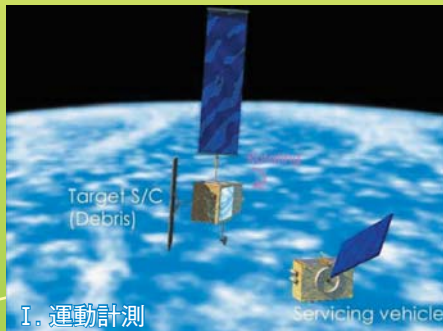
宇宙のごみ「スペースデブリ」

調べ、予測し、守って、減らす。

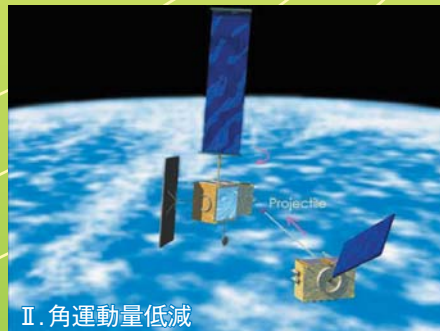
そら そら
空宙情報

データが少ない高度の放射線を計測する
紙飛行機とんだ

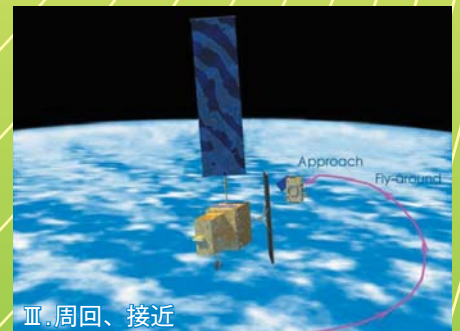
デブリを除去する「お掃除ロボット」



I. 運動計測



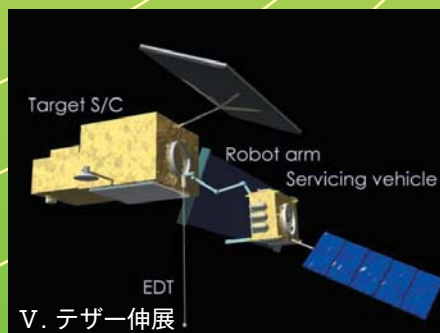
II. 角運動量低減



III. 周回、接近



IV. 捕獲



V. テザー伸展



VI. 分離

No. 27

研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

宇宙のごみ「スペースデブリ」

宇宙開発の陰にある見過ごせない問題

1957年10月、人工衛星「スプートニク1号」がソ連（現ロシア）によって打ち上げられました。これは、人類にとって華々しい宇宙世界の幕開であると同時に、スペースデブリ誕生の幕開でもありました。

スペースデブリとはその名の通り「宇宙のゴミ」です。運用を停止した人工衛星やロケットの上段、爆発や衝突によりそれらから発生した破片など、地球周回軌道上にあるものの現在は役に立っていない人工物体の総称です。現在では、カタログ化^{*}されているものだけで13000を越えるデブリが運用中の人工衛星と一緒に軌道上を回っています（図1）。

2007年1月、高度約850kmの軌道上で老朽化した人工衛星の追撃実験が行われました。中国によって行われたこの実験は、宇宙の軍事利用という視点で新聞やテレビなどで報道されたため、記憶にある人も多いのではないのでしょうか。しかし、問題はそれだけではありません。この実験により、高度約4000kmまでという広い範囲の軌道上に2000を超えるデブリが人為的に発生してしまいました。実は、人工衛星が多く打ち上げられている軌道上では、デ

表1 地球軌道上でのデブリ同士の衝突

| |
|---|
| <p>■カタログ化デブリ同士の衝突：3回</p> <p>⇒ 1991.12 露使用済み衛星と露衛星破片</p> <p>⇒ 1996.7 仏偵察衛星とロケットの破片</p> <p>⇒ 2005.1 米ロケット上段と中国ロケット破片</p> |
| <p>■デブリ衝突が疑われる例：約20件（近年増加）</p> <p>⇒ 2002.4 露衛星の軌道周期が変化してデブリが分離</p> <p>⇒ 2006.3 露通信衛星の機能不全</p> <p>⇒ 2007.5 欧気象衛星の不具合</p> |
| <p>■微小デブリとの衝突：多数</p> <p>⇒ スペースシャトルの窓は約2枚/回交換</p> <p>⇒ ISS、スペースシャトルに衝突痕</p> |

ブリ同士の衝突は既に自然に起きているとも言われています（表1）。

それなら、人工衛星の打ち上げそのものを止めてしまえば良い、という意見もあるかもしれませんが、しかし、GPSシステムによる位置ナビゲーションシステムや天気予報など、私たちの生活は人工衛星の恩恵を受けています。近年、異常気象や大地震による災害が多発していますが、災害監視という立場からも人工衛星は有益です。宇宙という高い位置からの眼差しによって状況を詳しく知ることができるため、対策をとる際の判断材料として利用できるからです。

^{*}カタログ化：デブリの軌道を精度よく決定すること。

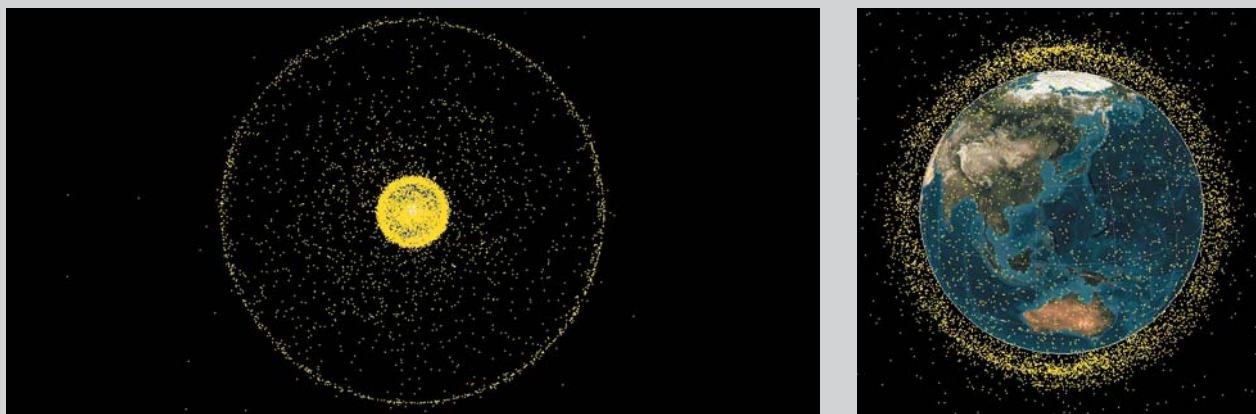


図1 地球を取り巻くスペースデブリ

現在行われているデブリ対策

スペースデブリに対する問題意識が高まったのは、高度400kmに浮かぶ宇宙の家「国際宇宙ステーション (ISS)」の打ち上げが検討されたこともきっかけのひとつでした。ISSには宇宙飛行士が常時滞在しているため、人命が最優先されなければなりません。そのため、デブリの監視や防御壁の設置などのデブリ対策をとっています。

デブリが多く存在するのは、ISSやスペースシャトル、様々な人工衛星が周回する高度2000km以下の低軌道と、放送・通信衛星や災害監視衛星などが周回する高度36000kmの静止軌道です(図2)。また、静止軌道に衛星を運ぶためのトランスファー軌道や、GPS衛星などが使う軌道周期12時間の軌道にもロケットの上段などの多数のデブリが存在しています。そのため、これらの軌道を中心に対策を行うのが効果的です。

デブリ問題に関しては、日本も参加している「国際機関間スペースデブリ調整会議 (IADC)」などによって対策が検討されています。2002年には技術的なデブリ低減策の指標として「スペースデブリ低減ガイドライン」が制定されました。それを受け、2007年には国連の宇宙空間平和利用委員会 (UNCOPUOS)の科学技術小委員会において「スペースデブリ低減ガイドライン」が制定されました。これらの動きから、デブリ問題が世界的な問題であることがうかがい知れます。



図2 デブリの多い軌道

JAXAはどうデブリ問題に対処していくのか

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) でも、宇宙機の製造および打ち上げの際の指針として「デブリ発生防止標準」を制定しており、できるだけデブリを増やさないよう努めてきました。

2006年度には「スペースデブリ対策推進会議」を設置し、人工衛星やロケットの運用に伴うデブリ対策に関する課題の抽出や、その課題を解決するための研究開発を進めてきました。また、海外機関との調整やJAXAのデブリ対策の方針についても検討を進めています。

次のページでは、デブリ低減に向けてJAXAが取り組む「観測」「モデル化」「防御」「発生防止」の研究の内、研究開発本部が中心となって進めているものを紹介します。



【未踏技術研究センター】
スペースデブリユニット

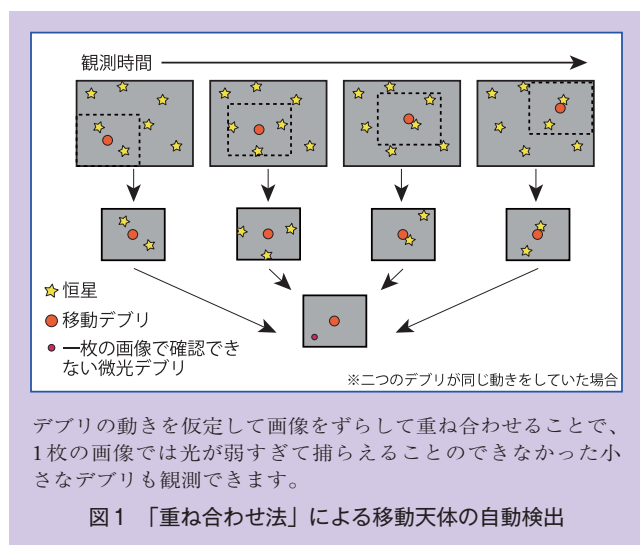
(後列左より) 武田 真一、黒崎 裕久、西田 信一郎、吉村 庄市
(前列左より) 大川 恭志、河本 聡美、中島 厚、柳沢 俊史

調べ、予測し、守って、減らす。

まずは現状をよく知ることから

デブリ対策として一番はじめに取り組むべきことは、デブリの現状をよく知ることです。地球近傍のデブリについては、アメリカの宇宙監視ネットワーク（SSN）によって13000個を超えるデブリの位置および軌道が「カタログ化」され、随時監視されています。しかし、SSNでカタログ化されているデブリの大きさは、静止軌道で直径50cm以上、低軌道でも直径10cm以上のものに限られています。それより小さいデブリについては、観測は行えるものの、軌道を決定してカタログ化するまでには至っていません。JAXAでは、より小さなデブリもカタログ化できる技術の開発を目指し、研究を進めています。

静止軌道上のデブリは地球からの距離は遠いのですが、赤道上を地球が自転する速度とほぼ同じ速度で周回しており、地上からは静止して見えます。これに対して低軌道上のデブリは、地球からの距離は近いものの平均角速度毎秒 0.5° という高速で移動しているうえに、その周回方向も様々です。そのため、各軌道に合った方法でデブリを観測し、カタログ化するための技術を開発しています。



静止軌道に対する取り組み

長野県にある入笠山光学観測所に2種類の光学観測系を整備し、未知デブリの観測および軌道決定を目標に観測技術の開発を進めています。開発しているのは、自動観測ソフトによって望遠鏡を自動制御し、取得した画像データから微小デブリを自動で検出する技術です(図1)。これまでの技術開発により、30~40cmの大きさのデブリまでは検出できるようになりました。今後はそれらのデブリをより効率よく検出し、カタログ化することが目標です。そのためハードウェアの開発も進めています。

低軌道に対する取り組み

●より暗いデブリをカタログ化する

静止軌道のデブリ同様、微小デブリ観測技術の構築を進めています。低軌道のデブリは天球上を様々な速度で様々な方向に移動しています。そのため、画像処理の手法などに工夫が必要です。また、計算量も膨大になるため、ハードウェアの開発も進めていく予定です。

●カタログ化されたデブリの姿勢を知る

小さなデブリを地上から観測しても、その形は分かりません。しかし、大抵のデブリは回転運動をしているため、回転に合わせて光の強さが変化します。この光度変化からデブリの運動形状を推定する技術を開発しました。この技術は、デブリを回収・除去するための技術の開発に役立ちます。

●宇宙空間で直接観測する

2001年から2005年にかけて、ISSのロシアサービスモジュールにデブリを捕まえるための装置（ダストコレクタ）を3式搭載し、それぞれ約1年、2年半、4年間と宇宙空間に曝し続け、デブリを計測（捕獲）しました。捕まえたデブリについては、現在分析を進めているところです。また、今後の計画として、ISSの進行方向前面にある日本の実験モジュール「き

「宇宙環境美化」に必要な技術の開発を目指す

ぼう」船外実験プラットフォームにダストコレクタを設置し、直接観測を行う予定です。

(担当：未踏技術研究センター 柳沢 俊史、黒崎 裕久、中島 厚、材料グループ 木本 雄吾、市川 正一、山中 理代)

今後どうなっていくのかを冷静に予測する

デブリの現状を把握したら、次に必要なのはデブリの状態が今後どうなっていくのかを的確に予測することです。そのための解析ツールとして「デブリ推移モデル」を九州大学と共同で開発しています。また、これから打ち上がる宇宙機をデブリの脅威から守りつつ適切なデブリ対策を行うために「デブリ発生防止標準支援ツール」と「デブリ衝突リスク解析ツール」という2種類の解析ツールも作成しました。

デブリ推移モデル

現状のデブリ状態に対し、今後デブリの増減がどうなっていくかを予測することができます。

もし、現段階で人工衛星などの全ての宇宙機の打ち上げを中止したとしても、1000km前後および1500km前後の低軌道ではデブリ同士の衝突により、デブリが指数関数的に増え続けてしまうとも言われています。どのような対策を行えば軌道上環境は改善できるのでしょうか。デブリ推移モデルは、デブリ対策の有効性を評価することができます。

デブリ発生防止標準支援ツール

JAXAでは、「スペースデブリ発生防止標準」により、宇宙機の計画、設計および運用段階において、デブリの発生を最小限に抑制するために考慮すべき事項を規定しています。デブリ発生防止標準支援ツールは、新しく打ち上げる宇宙機が標準を満たしているかを評価し、適合を支援するためのものです。軌道上でデブリが衝突する確率や、標準に則ったデブリ対策が行えているかを評価することができます。

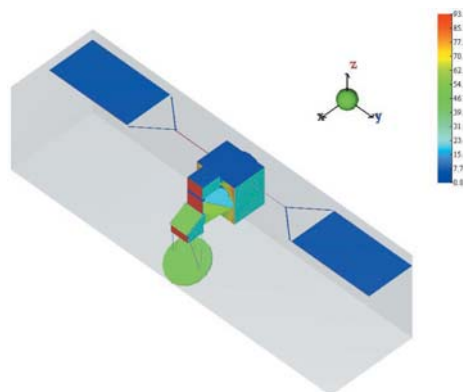
例えば、運用を停止した低軌道の宇宙機は25年以内に地球大気に再突入させて燃え尽きさせると標準で定めていますが、この標準を満たせるかどうか、満たせない場合、強制的に軌道降下させるためにどの程度余分に燃料を積み込む必要があるのか、といったことを求めることができます。

デブリ衝突リスク解析ツール

このツールは、設計仕様がある程度固まった衛星に対し、その形状や軌道上での姿勢などを考慮して、どの場所にどの程度デブリがぶつかるかという衝突頻度を求めるためのものです。例えば、衛星の壁面がアンテナなどの陰に入っている場合、その壁面のデブリ衝突頻度は低くなります。そういった点を考慮してどの位置にどの程度デブリが衝突するのかという確率を求めることができます(図2)。解析結果から、デブリ衝突頻度の高い位置にある機器に防御対策を施すなどの具体的な対策を検討できます。

衝突頻度に加えて、デブリの衝突によりどの程度の損傷を受けるかも解析できれば、より設計に役立ちます。そこで今年度は、「防御」の研究で得られた結果をツールに反映できるようにしたデブリ損傷リスク解析ツールを開発しています。

(担当：未踏技術研究センター 河本 聡美)



(赤：衝突危険部分 青：衝突安全部分)

図2 デブリ衝突解析ツールの解析結果

働き盛りの人工衛星をどうやってデブリから守るか

地球軌道上の物体は、高度が高くなるほど速度が遅くなります。また、低軌道のデブリは様々な方向に向かって飛び交っているため、衝突の危険性も高くなります。低軌道のデブリの平均秒速は7kmです。この高度の物体同士が正面衝突する場合、その相対速度は秒速14km、側面からの衝突でも秒速10kmもの超高速です。ライフルの実弾の秒速が800m程度ですから、その破壊力がうかがい知れます。

人工衛星をデブリの脅威から守るためには、デブリが実際にあたった時の様子を詳しく調べることが有効です。数年前まで、人工衛星の構造部分はアルミニウムやチタンなどの金属材料が採用されていました。しかし近年では、軽くて強い材料である「炭素繊維強化プラスチック (CFRP)」が主流となっています。CFRPは比較的新しい材料のため、世界的に見ても体系だてたデブリ衝突のデータはほとんど蓄積されていません。そこで、衛星設計に役立つデータベース構築を目指し、実験や解析を進めています (図3)。

人工衛星の壁面に衝突したデブリはそのまま壁面を貫通したり、貫通しないまでも内側に大量の微細なデブリ (デブリクラウド) を発生させてしまう恐れがあります。貫通したデブリやデブリクラウドが、衛星内部の機器に影響を及ぼすことが考えられます。また、電気を作り出す太陽電池パネルや、その発生電力を衛星本体に供給する電力ハーネスは、宇宙環境に曝されていることからデブリが衝突する確率が高く、その影響が懸念されます。これまでの研究により、ある程度の大きさのデブリが衝突しても、太

陽電池パネルの故障は起こりにくいことを確認しています。電力ハーネスに関しては、衝突による衛星システムへの影響が懸念される場合は、アルミ板にてハーネスを保護することで、その発生確率を低減させる対策が施されています。

一般的なデブリの衝突実験では、デブリを模擬したアルミを加速するために「2段式ガスカン」という装置を使います。この装置により得られる最高速度は秒速7km程度のため、実際の衝突速度には及びません。そこで日本でも「成形爆薬射出装置 (図4)」による加速方法に着目し、15年前に装置を開発、改良を加えながら実験を行ってきました。現在、秒速11kmでアルミを射出できるまで技術の改良を進めています。今後は、JAXA宇宙科学本部所有の2段式ガスカンによる実験を並行して行い、データの蓄積と合わせて成形爆薬射出装置の性能確認を進める予定です。

(担当：未踏技術研究センター 武田 真一、材料グループ 永尾 陽典、東出 真澄、電源グループ 川北 史朗)

最終的な目標は「宇宙環境の美化」

デブリを低減する方法としてもっとも有効なのは、デブリを直接除去することです。特に、デブリが込み入っている低軌道を周回している、運用が終了した人工衛星などの大型の残滓を取り除くことが有効だと考えています。そのための方法について、当本部内の宇宙技術に特化したグループのメンバーも交えて、検討および研究開発を進めています。

検討しているのは、除去システムによって直接デ

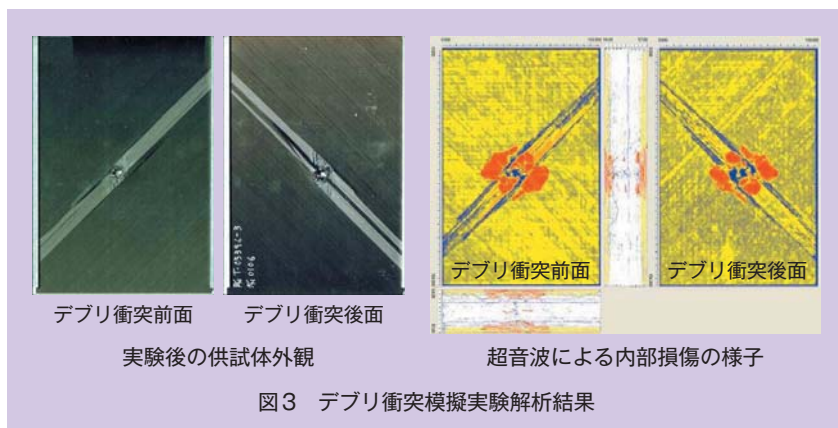


図4 成形爆薬射出装置の外観

ブリを捕まえ、その軌道高度を下げることで強制的に大気圏に再突入させ、燃え尽きさせる方法です。そのためには、デブリの位置や状態を把握する「目」、デブリに近づく「足」、デブリを捕まえる「手」の機能を持った「お掃除ロボット」衛星が必要になります。これまでに、ロボットの目となる光学センサ系、足となる非協力ターゲットへの航法・誘導系、手となるロボットアームに関する技術の研究開発を進めてきました（図5）。

デブリを捕まえたら、強制的に再突入させるためデブリにブレーキをかけなければなりません。その方法として考えているのが「導電性テザー」による方法です（図6）。

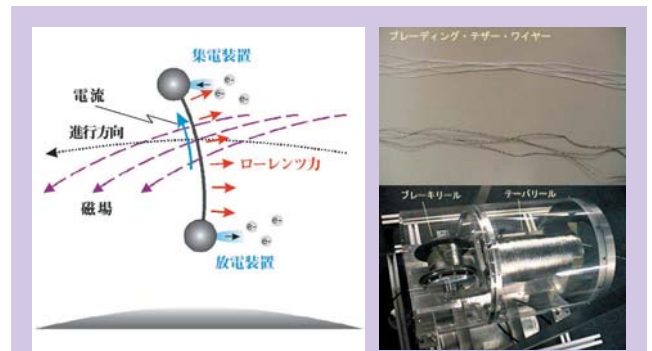
これらの機能を備えたお掃除ロボットとして、1機で1個のデブリを除去するシステムと、1機で複数のデブリを除去するシステムを検討しています。

小型衛星型除去システム（図7）

ピギーバックによって打ち上げが可能な小型のお掃除ロボットです。大きな手の形をした伸展式のロボットアームで、デブリを包み込むように捕まえます。衛星そのものがテザーの先端のおもりとなり、導電性テザーによる制動によってデブリもろとも大気圏へ再突入します。運用期間を限定した構成にすることで、製造コストを抑えることができます。

複数デブリ除去システム（表紙）

いくつかの放出機構（導電性テザーモジュール）を携帯した大型のお掃除ロボットです。ロボットアームでデブリを捕まえ、導電性テザー機構を取り付けます。取り付けた導電性テザー機構のテザーを伸ばすことで、デブリを再突入させます。軌道間を移動して1機



地球の周りには磁場が形成されています。導電性テザーは金属でできているため、磁場内を横切ることによって起電力が発生します。そのため、宇宙空間プラズマとの間で電子のやりとりを行うことにより、テザーに電流が流れ続けます。その電流と磁場との相互作用によりテザーには進行方向逆向きの力（ローレンツ力）が働き、速度が減速します。

図6 導電性テザーの原理とテザー試作品

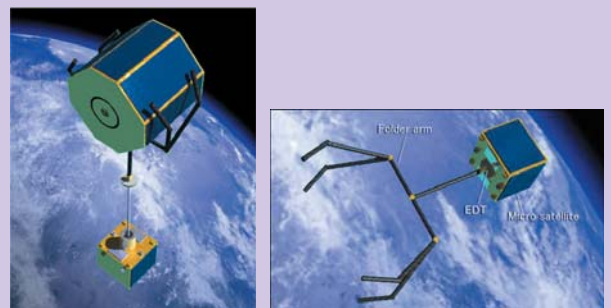


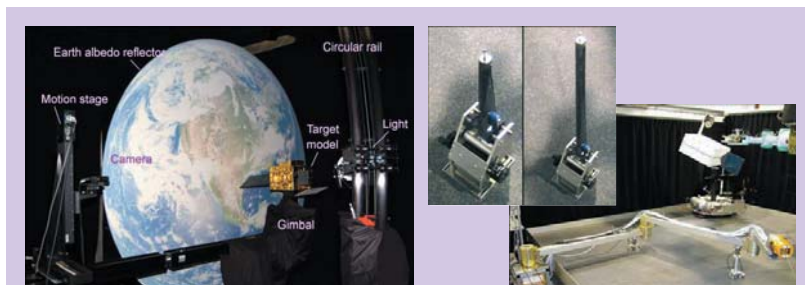
図7 小型衛星型除去システム

で複数のデブリを除去できる汎用的なシステムです。

デブリに近づく「ランデブー技術」やデブリを捕まえる「ロボットアーム技術」は技術試験衛星VII型（ETS-VII）などで経験を積んできた日本が得意とする研究分野です。そのような理由もあり、JAXAでは世界に先駆けてデブリ除去技術の研究開発に取り組んできました。

お掃除ロボットの目、足、手の技術については地上での実証試験も行い、良好な結果を得ています。しかし、テザーシステムについては地上での環境模擬が難しいため、解析的な検証しか行えません。今後は宇宙での実証も視野に入れつつ「お掃除ロボット」衛星の開発を進めていきたいと考えています。

（担当：未踏技術研究センター 西田 信一郎、河本 聡美、大川 恭志）



デブリ捕獲のための画像計測技術の実験

ロボットアームによるデブリ捕獲の実験

図5 目、足、手の実証実験

空 宙 情 報

データが少ない高度の放射線を計測する

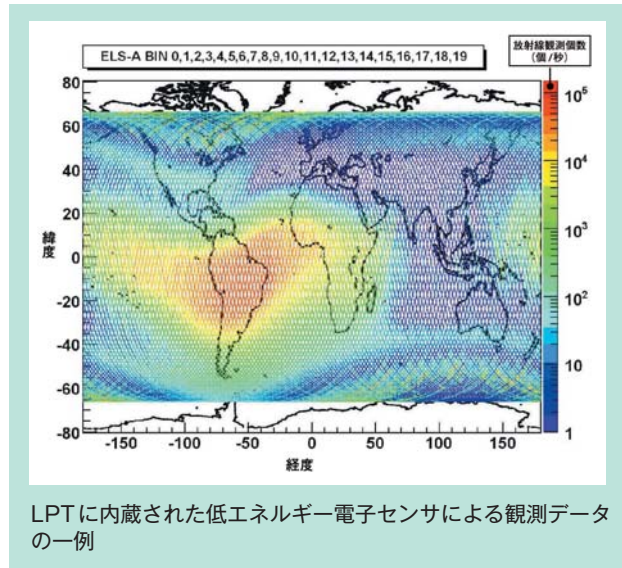
2008年6月20日、フランス国立宇宙研究センター（CNES）が開発した海洋観測衛星 Jason-2 が、米国カリフォルニア州バンデンバーグ空軍基地より打ち上げられました。この衛星には、宇宙環境グループが開発した放射線環境計測装置（TEDA LPT）が搭載されています。

Jason-2は、海面高度を高精度で計測することが主目的の衛星で、その際、衛星位置の特定が非常に重要になります。LPTには、衛星位置測定に影響を及ぼす放射線データを提供することが期待されています。また、Jason-2の軌道高度（1330km）付近は観測データが少なく、放射線帯の様相を観測しやすいことから、放射線帯に係る新しい知見が得られ、新放射線帯モデル構築への貢献が期待されます。

LPTは打ち上げの2日後に電源投入され、これまでに得られた初期テレメトリデータの解析処理の結果、正常に動作し、CNESより期待されているエネルギー帯の放射線も正常に計測できていることを確認しました。

今後は、データ校正を行い、CNESなどの関係機関のほか、一般ユーザへもデータ提供を行えるよう準備を進める予定です。

（宇宙環境グループ 込山 立人）



紙飛行機とんだ

飛行機は翼の裏表に発生する圧力差により機体を浮かせるための力である「揚力」を得ます。しかし、この圧力差は目で見ることはできません。ところが、感圧塗料（PSP）と呼ばれる圧力により明るさが変わる塗料を使うと、翼面の圧力分布の様子を視覚的に捉えることが可能になります。

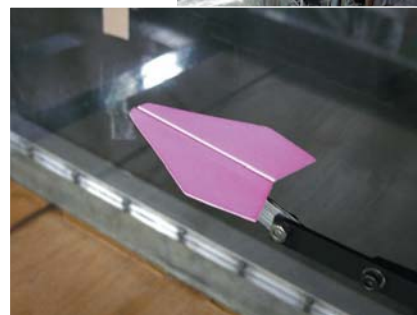
いつもは実際の航空機の模型に塗られるPSP。今回は紙飛行機の模型に塗って風洞試験を行いました。でも、JAXAで紙飛行機の研究を行っているわけではありません。JAXAでは外部の人が持つ科学技術に関する疑問の解明に貢献する目的でも、所有の設備や開発中の技術を提供しています。今回の実験は、「目に見えない空気の不思議」を解明するNHK BSハイビジョンのテレビ番組の撮影のために行いました。60cm程度の高さを持つ低速風洞にPSPを塗装した紙飛行機型の模型を入れ、その様子を撮影しました。普段とは異なる模型での実験やテレビ製作の現場に触れ、研究者たちも撮影を楽しんでいたようです。

番組は11月4日に放映されたので、ご覧になった方もいるかもしれませんね。

（担当：風洞技術開発センター 渡辺 重哉）



撮影風景



PSPを塗布した紙飛行機の模型（長さ5cm）