

## 講演要旨

### 地球近傍小惑星の接近傾向とスペースガードの現状 ○藤井大地（大阪教育大学）

1900年から現在まで、地球の引力圏に侵入した小惑星の数の変化を調べたところ、1年間のうち春分、秋分に接近する小惑星が圧倒的に多く、夏至、冬至は少ないことが判明した。これは実際に接近数が増えているのではなく、観測条件の変化が検出数の変動を作り出していると思われる。1つの原因として太陽系の小惑星の多くが軌道傾斜角の小さい、黄道面を回っていることが挙げられ、小惑星-地球の公転方向と自転方向が等しい夏と冬は見かけの移動量が小さくなっていると考察できる。本発表では上記の検証に加え、散在流星、隕石、小惑星それぞれの大きさにおける小天体の接近数変化を年単位および日単位で示し、大きさごとの接近傾向をまとめる。また、過去10年間における、地球引力圏内に侵入する小惑星の発見から接近までの猶予期間を示し、現状としてスペースガードがどの程度機能しているのか、観測的な穴場はどこなのかを述べる。

### HTV 軌道高度の TLE 精度評価

#### ○工藤 伸夫、松田 郁未（JAXA）、倉田 育枝、足立 学（富士通）

昨今のスペースデブリ（デブリ）増加に伴い、衛星運用においてデブリとの衝突の可能性を無視できない状況になってきている。このような状況をふまえ、JAXA 統合追跡ネットワーク技術部（JAXA 追跡）では、運用中の人工衛星におけるデブリの衝突を回避する運用の検討を進めてきた。2011年1月に打上予定である宇宙ステーション補給機2号機（HTV2）の運用においても、打上からISSにキャプチャされるまでのランデブフェーズと、ISS離脱後から大気圏に再突入するまでのフェーズにおいて、デブリとの接近解析を実施する予定であり、デブリの軌道情報として、米国Space Trackが公開している軌道要素（TLE）を使用する。本講演では、HTV2軌道高度を通過するデブリ、すなわちHTV2に接近する可能性のあるデブリのTLEについて、軌道・大きさ別に軌道伝播誤差を調べることで、統計的な傾向を把握した解析結果について述べる。

### 環境推移モデルによるスペースデブリの長期環境推移について

#### ○眞庭知成、花田俊也（九州大学）

増加し続けるスペースデブリを抑制する手段としてデブリ低減策に関する議論が活発化してきている。その手法の例として他の宇宙機を用いて能動的にデブリ除去を行う（Active Debris Removal）や、衛星自身が墓場軌道へ移動して廃棄を行う（Post Mission Disposal）などが考えられている。しかしながら、これら低減策を軌道上で実施するには莫大なコストが予想されることに加え、技術的課題がまだまだ山積みしており、実際に低減策を実施する前に長期間にわたる環境推移計算が可能である環境推移モデルを用いて、デブリの増殖抑制効果や他の軌道上物体に対する影響を評価する必要がある。環境推移モデルはデブリ問題を議論していく上で重要なモデルであるため、宇宙開発を進めている主要な国では独自のモデルを保有している。日本では低軌道の環境推移モデルであるLEODEEMと静止軌道の環境推移モデルであるGEODEEMを保有している。本発表ではこれらのモデルを用いてデブリ除去シナリオを行った場合における長期環境推移の計算結果について議論する。

### デブリ除去の必要性和ストラテジ

#### ○河本聡美、大川恭志、照井冬人、西田信一郎、北村正治、木部勢至朗（JAXA 研究開発本部未踏技術研究センター）、花田俊也（九大）、白坂成功（慶應義塾大学大学院）

低軌道などの混雑軌道では、今後打上を行わなくてもすでに軌道上にあるデブリ同士の衝突によりデブリの数が増加していくと予測されている。そのため、宇宙環境を維持するためには今後デブリを発生させないような防止策だけでは不十分であり、今軌道上にあるデブリの除去が必要となっている。昨年来、米国、ロシア、欧州、中国でデブリ除去会議が開催される等、世界的にもデブリ除去に関する活動が活発になってきているが、デブリ除去に必要な軌道接近制御や宇宙ロボット作業などにおいて、日本は世界をリードする技術を有しており、デブリ除去に向け世界に先駆けて実証していくことにより、日本が宇宙環境分野におけるリーダーシップを発揮すること、および将来デブリ除去が産業化された際に優位に立つことができると考えられている。本講

演では、除去すべきデブリ対象についての方針、必要となる技術や実証ミッションのステップ等について述べる。

### 宇宙デブリ除去システムの技術開発

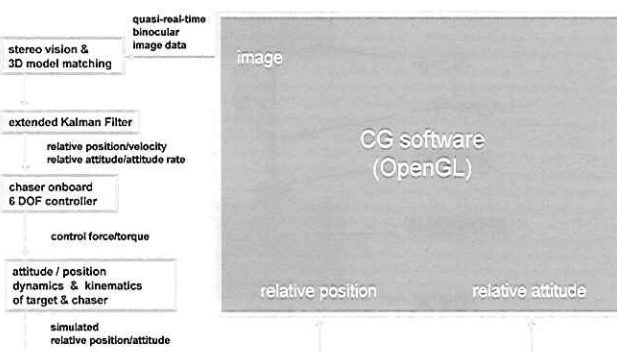
○西田信一郎、河本聡美 (JAXA)

地球周回低軌道では、すでに軌道上にある宇宙デブリ同士の衝突により宇宙デブリの数が自然に増加していく「デブリシンドローム」が起きつつあると、解析されている。従って、新たな宇宙デブリを発生させない防止策だけでは不十分であり、すでに軌道上にある宇宙デブリの除去が必要となっている。本講演では、宇宙デブリの軌道上からの除去に必要な軌道変換・対象接近制御や宇宙デブリの制動・捕獲などの宇宙ロボット作業技術の現状と今後の開発方針について述べる。

### デブリ回収機による故障衛星に対する画像情報に基づく運動推定と近傍飛行マヌーバ

○照井 冬人 (JAXA)

比較的大型のデブリである故障あるいは寿命の尽きた衛星（機能不全衛星）を回収する際、衛星近傍（約 50m 以内）における宇宙機（デブリ回収宇宙ロボット）の運動制御にはフィードバック情報として両者の相対位置・姿勢に関する情報を何らかの方法で計測する必要がある。衛星近傍では画像計測が必須であるため、衛星を覆っているしわのある光沢素材 (MLI) が太陽光や唯一の乱反射光源である地球からの反射光 (アルベド) で照らされるという宇宙特有の条件下で、十分に機能する画像計測アルゴリズムの開発を行うと共に、画像計測結果をフィードバックした宇宙機のデブリ近傍の飛行マヌーバを、CG を活用したシミュレータを用いて評価した結果を示す。



CG を活用したシミュレータの構成

### デブリ除去における非協力対象への接近と宇宙機システムについて

○安田国治 (三菱電機)

故障した衛星やロケット上段のようなデブリへ接近し、これらを軌道上から除去するための宇宙機システムについて検討を進めている。これらデブリの除去においては軌道上にて至近距離まで安全に接近できることが前提となる。また、費用的にも安全面からも有人宇宙活動ではなく無人の宇宙機を用いるのが得策である。我が国は国際宇宙ステーションへの無人機による物資輸送を成功させており、その技術を発展させデブリ除去にも適用できる。ただし、デブリは軌道上での接近・捕獲を意図したマーカやリフレクタを待たず、予期せぬ回転運動を伴っている場合が有り得る。本講演では、このような対象への接近における特徴を明らかにし、課題を明確にする。そして課題解決に向けての接近シナリオや航法システムの検討例を示す。更に軌道上での運用の側面にも着目し、宇宙機システムとして具備すべき事項について述べる。

### デブリ衛星回収ミッション検討

○大塚聡子 (NEC)、桑尾文博 (NEC)、池内正之 (NEC 東芝スペースシステム株式会社)

#### 1. 目的

デブリ等の非協力対象物に、小型衛星によって、接近、捕獲する回収ミッションについて、基本的なミッションシナリオおよびシステムを検討したので報告する。

#### 2. 回収ミッション

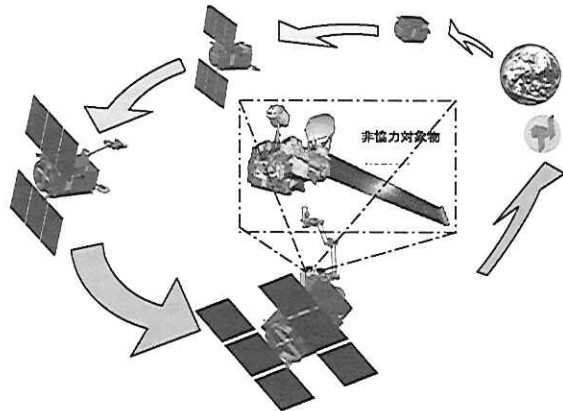
小型衛星による非協力のデブリ衛星の回収ミッションでは、デブリ回収衛星として 500kg 級バスを、また非協力のデブリ衛星として、ADEOS II を検討の前提条件とした。

回収ミッションでは、デブリ衛星に接近して状況調査、ロボットアームで捕獲、テザー装置の取り付け、離脱を範囲とする。

#### 3. デブリ回収衛星

回収ミッションを考察し、必要となる機能・性能を整理し、デブリ回収衛星のシステム要求をまとめた。その要求に基づき、既存のバスシステムをトレードオフし、また、ミッション機器についても、既存品を参考に、構成を検討した。具体例として、バスの一例 (NEXSTAR バス) を元に、システム構成、リソース配分を検討した。また、合わせて開発計画を検討した。

4. ロボットアームによる接触作業と課題  
 回収ミッションでの、捕獲、取付け作業は、ロボットアームにより行う計画である。したがって、作業対象物との相対運動量の減衰が必要となる。今回、ADEOS II を回収対象の例とし、その運動量を推定し、減衰手法を考察して、課題を検討した。



デブリ回収ミッション概念図

軌道上のデブリ識別と相対航法について

○池内正之 (NEC東芝スペースシステム株式会社)

1. 目的

デブリ等の非協力対象物への光学系による接近について、対象物以外のデブリと衝突することなく、かつ対象物へ接近するミッションを達成するための基本的な要求について検討したので報告する。

2. ミッションを達成するためのリスク評価

デブリ衝突頻度および接近対象となるデブリの光学的識別限界の2つの観点から基本的なリスク評価を行うことにより、宇宙機と光学系への要求を検討して、小型宇宙機、FOV 7~10°、デブリ識別限界等級 > 4~7 等星を検討の前提条件とした。

3. GN&C に用いる光学系

光学系によるデブリ識別限界を仮定して、太陽反射光の実視等級、識別限界等級を解析した。ここでは識別限界を直径>5cm と仮定して、光学系性能に依存する対象物の最大識別相対距離を求めた。

光学センサの性能のうち、FOV、識別限界等級、ダイナミックレンジ等は、最大識別相対距離と関係するので、相対接近等に適した光学系と軌道計画を検討した。

4. 光学系の応用による GN&C の課題

対象物の推定軌道情報の有無と精度、可視条件、日照条件等から、宇宙機の GN&C にはある程度の柔軟な自律機能が望まれる。そこで光学系を対象物の相対測位と接近に応用する際の自律性を念頭に置いて、

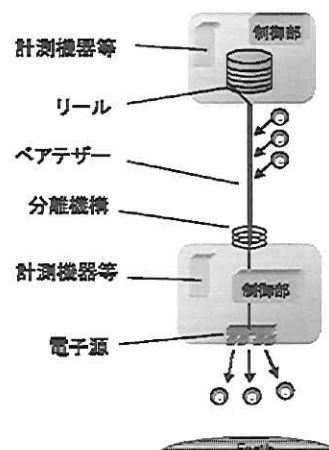
相対軌道計画と GN&C の課題を検討した。

光学系による相対測位に関するこれまでの検討からは、軌道制御による位置等の状態変位 (これをプロービングと呼ぶ) が必要であることが分かっている。プロービングとして行う軌道制御は対象物の可観測性と相互作用があることを紹介し、FOV と識別限界等級等を考慮した相対軌道について概説する。プロービングを応用した相対測位精度としては、相対距離の 1/20 程度を目標としている。

デブリ除去に向けた導電性テザーシステムの研究

○大川恭志、河本聡美、北村正治、東出真澄、上村平八郎、木部勢至朗 (JAXA 研究開発本部未踏技術研究センター) 松本康司、塩見裕 (JAXA 研究開発本部衛星構造・機構グループ)

有効なデブリ除去システム実現のためには、低コストで簡素な軌道変換用推進系が必要となる。候補となる推進系は、除去対象デブリの大きさや軌道等の条件により様々だが、本研究では小型衛星サイズ以上の低軌道高度デブリの軌道変換に有効と考えられる導電性テザー (EDT) を研究対象とする。EDT は、導電性のワイヤ (テザー) を軌道上で展開して電流を流すことで、電流と地球磁場との相互作用により生じるローレンツ力を推進力として利用する。その最大の長所は推進剤を必要としない点であり、自己誘導起電力により電流を駆動できるため、軌道降下  $\Delta V$  の発生に要する消費電力も小さい。さらに、通常の推進系と異なり推力方向制御が不要なため、非協力物体の軌道変換に適する。JAXA 研究開発本部では、この EDT 技術を獲得するため、軌道上実証実験に向けてテザーや分離機構、リール、電子源などの主要機器の研究開発を進めてきた。本発表ではその現状を報告する。



図：導電性テザーシステム構成図

## 低密度材料を用いた受動的なスペースデブリの除去方法

○有吉雄哉、嘉嶋秀一、平山寛、花田俊也（九大）、北澤幸人（IHI/JAXA）、川辺有恒（IHI）、松本晴久（JAXA）

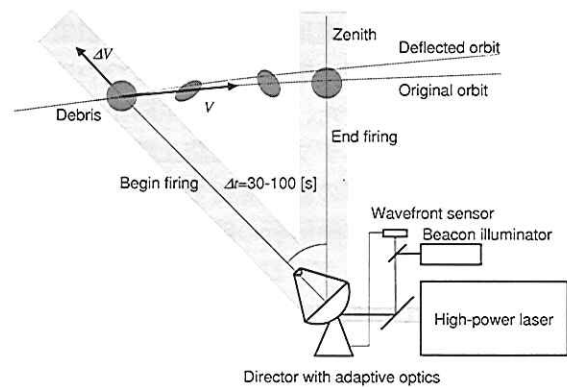
大型のスペースデブリに対してはランデブーと捕獲を組み合わせた能動的な除去方法がさまざまに提案されている。しかし10 cm以下のデブリに対しては、軌道が同定されていないものが大半のため、能動的にランデブーを行い、対象を捕獲するといったこれまでの提案方法を適用することは難しいと考えられる。そこで10 cm以下のデブリを対象として、低密度材料を軌道上に配置し、受動的にデブリを捕獲または減速させ大気圏へ再突入させるデブリの除去方法を提案する。また、この方法を適用先として、(1) ある軌道にすでに存在する微小デブリを除去する、(2) 破砕イベント直後にその近くに配備して破片を除去する、(3) 主衛星と同じ軌道に投入し、主衛星に衝突するデブリを減らす、という3つのミッションシナリオを考えている。本発表では、このデブリ除去方法の実現方法とともに、これまでに行ったミッション解析結果について紹介する。

## 大出力レーザーによるスペースデブリ除去の可能性

○遠藤雅守（東海大・理）

現在、高度400 km以下のLEOにおけるスペースデブリの数は最新の統計で30万と言われているが、このうち直径1cmから数十cmのものはシールドでは防ぎ切れず、数が多いため今のところ有効な対処法は無いと言われている。

地上に設置したレーザーでデブリを除去する方法は、アイデアとしては古くからあったが利用可能なレーザーが無かったため机上検討に終わっていた。レーザーはデブリを蒸発させるわけではなく、照射により軌道と直角方向にわずかな速度成分を与えるだけでよい。それでも必要なレーザーの出力を見積もるとおよそ1MWのオーダーになる。最近米軍により開発された化学酸素ヨウ素レーザー（Chemical Oxygen-Iodine Laser=COIL）はこの要求をクリアしている。我々はCOILに変わる新しいヨウ素レーザーであるAll Gas-phase Iodine Laser=AGILの発振に初めて成功し注目を集めた。講演では、レーザーによるスペースデブリ除去の原理、要求されるレーザーや光学系の条件、現在及び近い将来の技術水準について概観する。



## ダスト計測技術の研究開発

○北澤幸人（IHI、JAXA）、松本晴久（JAXA）、桜井晃、船越国広、八坂哲雄（（有）QPS研究所）、花田俊也（九州大学）、長谷川直（ISAS/JAXA）

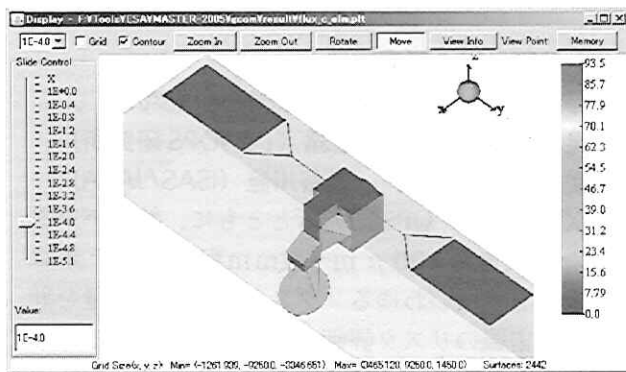
JAXAは（有）QPS研究所とともに、特にデータの少ない大きさ100 μm～数mm程度のメテオロイド&デブリ（いわゆる「ダスト」）の存在量を計測し、宇宙機のリスク評価の精度を向上させることを目的としたセンサ（QPS式ダストセンサ）の基礎検討を行った。このセンサは、ポリイミドなどを材質とする絶縁性薄膜（厚さ10 μm程度）上にエッチングなどの技法により、ピッチ（空間周期）100 μm以下の直線状の細長い導線（検出線）のパターンを印刷しておき、検出線の破断を電氣的に検出することにより、ダストの衝突を検知するものである。また、隣り合う複数本の検出線が切断された場合には、それらの本数からダストのサイズを推定することが可能である。単純な原理に基づくため、複雑な機構や回路が不要である。本年度はこれまでの検討成果に基づきBBM相当品の設計・製作を実施中である。ここでは超高速衝突試験による性能評価を中心に現在の研究開発状況について報告する。

## デブリ衝突解析について

○河本聡美、東出真澄（JAXA 研究開発本部未踏技術研究センター）

近年デブリの増加により、デブリ衝突による宇宙機の損傷リスクはすでに無視できないレベルに達している。JAXA 研究開発本部未踏技術研究センターでは、デブリモデル・解析研究の一つとして、宇宙機の形状、姿勢も考慮して各部位への衝突率、損傷発生確率を評価するための「デブリ衝突損傷解析ツール」（図）を開発し、JAXAプロジェクトに提供、支援している。本ツールは、宇宙機の開発時にデブ

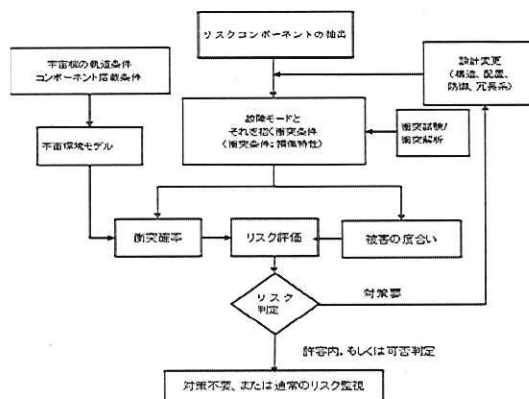
り衝突損傷発生確率を考慮して衛星構造や重要機器の配置を検討したり、流星群通過時などの損傷リスクを低減するための宇宙機の姿勢変更について検討することができる。また、デブリ発生防止標準の適合を支援するための「デブリ発生防止標準支援ツール」はデブリ衝突確率の簡易解析の他、宇宙機の軌道上寿命や地上落下溶融解析の簡易評価等が可能なツールであり、JAXA プロジェクトの他、JAXA 外部にも提供されている。本講演ではこれらツールについて紹介する。



### デブリ防護設計標準 (WG3) の活動状況

○松本晴久 (JAXA), デブリ防護設計標準 WG グループ

平成 17 年 2 月 22 日に第 1 回のデブリ防護設計標準の WG が開催された。本 WG でみどり 2 号の軌道上不具合の一要因として最後まで残ったサブミリ級の微小なデブリ及びメテオロイドに対する設計防護の議論が開始された。発足当初は、1) IADC PROTECTION MANUAL に何が書いてあるかまとめよう。2) 今後どのような基準化を行うべきか、どのような評価試験を行うべきか? 3) ADEOS-II を考慮して、露出しているパワーラインがどのようにダメージを受けるか? オープンが多いのか? ショートが多いのか? 調べよう。等基礎データがないため模索状態で作業を進めてきた。メンバーの努力により、平成 21 年 7 月 8 日、スペースデブリ防護設計マニュアルを制定することができた。また、現在は、今年度为目标に、スペースデブリ防護設計標準 (仮) の制定を進めている。本報告では、WG のこれまでの活動状況と課題、スペースデブリ防護設計マニュアルの内容、更には今後の計画について述べる。



リスクアセスメントの流れ

### 防衛大におけるスペースデブリ衝突模擬実験

○田村英樹 (防衛大)

防衛大では、耐スペースデブリシールドの構成材料に関する超高速衝突破壊現象と防護性の解明を目的とした実験研究を行っている。模擬スペースデブリのアルミニウム合金小球を、バンパーに見立てたアルミニウム合金薄板とチタン薄板に衝突させ、破碎直前における板のバルジ変形のひずみとひずみ速度を計測している。また、強化型 Whipple シールドの充填材と同種の Nextel 織布や Kevlar 織布に衝突させ、織布の特性に依存した衝突体の破壊と織布の防護性の相違を見出している。さらに、非球形衝突体が有する侵徹性を明らかにするために、アルミ円柱付きサボをアルミニウム合金塊に衝突させ、円柱の形状に依存する特異なクレーター形状と侵徹深さの相違を見出している。

### エジェクタ (二次デブリ) に関する国際標準規格案 CD11227 の紹介

○赤星保浩 (九工大), 松本晴久 (JAXA), 北澤幸人 (IHI)

国際標準化機構 (ISO) において、「Space systems ミ Test procedures to evaluate spacecraft material ejecta upon hypervelocity impact」と題した規格案が検討されている。当初の規格案では宇宙機器表面に微小宇宙ごみまたはメテオロイドが超高速衝突した際に反対方向に放出される破片 (実際の宇宙空間では新たな宇宙ごみとなる可能性があるもの) の大きさ分布ならびに速度分布を実験結果として記録するというものであった。その後、ISO 総会、秋の WG などの議論を通じ、本規格案は合意し得る内容に一部修正がなされてきている。本講演では現在の規格案の状況と日本ならびに他国での対応状況について紹介する。

## 講演要旨

た結果、デブリ直径から最大クレータ深さを導出する実験式を得ることができた。この式から、衛星の筐体厚さはA2024板に生じる最大クレータ深さ以上の厚みが必要であると言える。更に、ハニカムサンドイッチパネルとA2024板の距離を10mm離して設置すれば、最大クレータ深さを約15%低減できることがわかった。

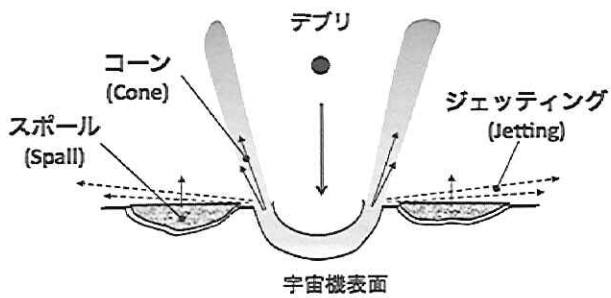


図 エジェクタ発生の概略図

### 衛星構体パネルのデブリ衝突損傷評価

○東出真澄, 小野瀬直美, 長谷川直 (JAXA)

スペースデブリ衝突が無人宇宙機へ与える影響を評価するため、衛星構体パネルに超高速衝突試験を実施した。模擬筐体として厚さ5mmのA2024板をチャンバ内に設置し、その表面に模擬構体パネルとしてアルミハニカムサンドイッチパネルを図のように配置した。直径0.15~1mmのSUS304球を6km/secで衝突させた。飛翔体直径が0.3mm以上の時、飛翔体はハニカムサンドイッチパネル裏面を貫通した。X線でハニカムコアを観察すると、飛翔体の衝突でハニカムセルは変形したが、裏面の損傷は飛翔体衝突を受けたセルのみに集中することがわかった。A2024板上に生じたクレータを計測し

