

デブリ除去の必要性とストラテジ

○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。



第4回スペースデブリワークショップ
2010.12.17

デブリ除去の必要性とストラテジ

○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)



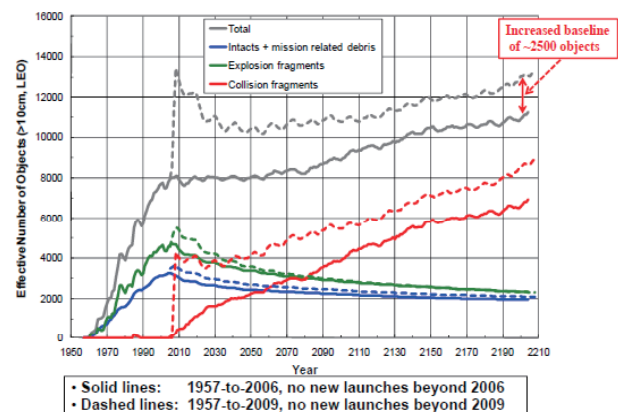
内容

- デブリ環境の現状
- デブリ除去の必要性
- 世界の状況
- デブリ除去の対象、方針
- デブリ除去に必要な技術
 - － 非協力接近、運動推定
 - － 捕獲
 - － 軌道変換
- デブリ除去システム開発の進め方案

2

デブリの現状

- 各国のデブリ推移予測で、今後打上が行われなくても、デブリ同士の衝突により数が増加していくことで一致
- デブリ発生低減だけでは不十分で、デブリ除去が必要
- 実際には打上が行われている上、2007年以降、ASAT、爆発、衝突事故によりカタログ化デブリが急速に増加

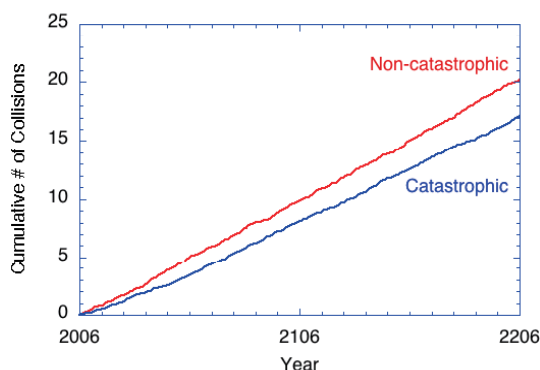


2005年以降打ち上げが行われなくてもデブリ同士の衝突によりデブリが増加する。
2007年の中国ASAT、2009年の衝突等を考慮した結果

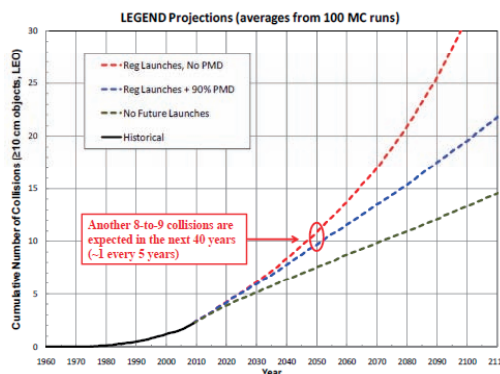
The Top 10 Questions for Active Debris Removal, J.-C. Liou, European Workshop on Active Debris Removal, 22 June 2010, CNES HQ, Paris, France

デブリ除去早期実施の必要性

- 今後も5年に一度程度は衝突事故が発生すると予測されるので、**出来る限り早くデブリ除去を開始する必要がある**。
 - 一度の衝突により、数千個の10cm級以上の物体、数十万個の1cm級デブリが発生しうる。1cm級デブリは宇宙機に壊滅的な被害を与えるが、現状防御手段はない



九大推移モデルによる、低軌道の10cm以上物体の衝突数の予測



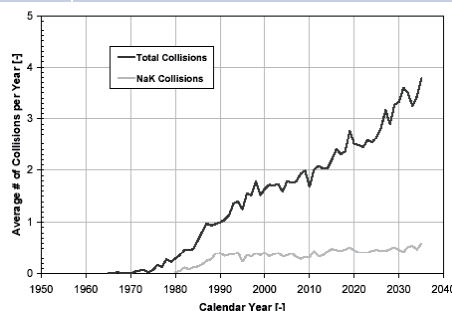
The Top 10 Questions for Active Debris Removal, J.-C. Liou, European Workshop on Active Debris Removal, 22 June 2010, CNES HQ, Paris, France

4

デブリの衝突事例

- カタログ化物体同士の衝突はこれまで4回発生
- カタログ化できない10cm以下のデブリも増加
- カタログ化物体の軌道周期が変化してデブリを放出、衝撃を受けて衛星が故障など、非カタログ化物体との衝突が疑われる事例が近年頻発
- 現在1cm以上のデブリの衝突は全軌道上で1年に2回程度発生していると考えられている
 - 太陽同期軌道の衛星には、ミッション期間中、1%以上の1cm級デブリ衝突があるとも言われている

カタログ化物体同士の衝突	
1996.7	仏CERISEとArianeの破片
1991.12	露使用済み衛星と衛星破片
2005.1	米ロケットと中国ロケット破片
2009.2	米イリジウム33と露使用済み衛星
非カタログ化物体との衝突が疑われる事例	
1997.8	米使用済み気象観測衛星NOAA 7 軌道周期が1秒変化して3個のデブリが分離
2002.4	露使用済み衛星COSMOS 539 1370km 軌道周期が1秒変化してデブリが分離
2006.3	露通信衛星 EXPRESS-AM11の故障
2007.5	欧気象衛星Meteosat-8の不具合
	他多数



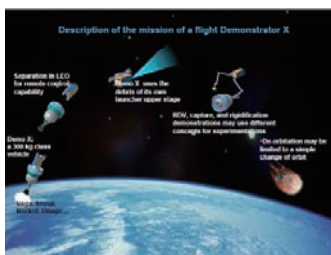
LEGENDによる、1cm以上の衝突 NASA The Orbital Debris Quarterly News 11-1 (2007, Jan)

最近の動向

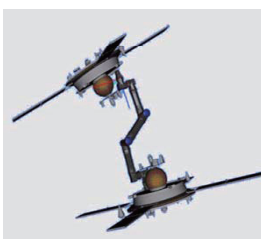
- IAA (International Academy of Astronautics) 2006年環境改善のスタディが開始
 - 2010年draft final report
- IADC(国際機関間デブリ調整会議)の推移予測
 - 2011年4月に報告予定。6機関(NASA, ESA, ASI, ISRO, UK, JAXA)よく一致。
- 昨年末から今年にかけ米露欧中でデブリ除去会議が相次いで開催
 - 2009年12月 NASA/DARPA International Conference on Orbital Debris Removal
 - 2010年4月 ロシアISTC(International Science & Technology Center)
 - 2010年6月 CNES/ESA、European Workshop on Active Debris Removal
 - 2010年10月 中国/ISU、Beijing Orbital Debris Mitigation Workshop
- 外国ではニュース等でもよく登場
 - 米国国防省の報告書は宇宙デブリが衝突することによる衛星利用サービスの損失額は250Bドル(24兆円)規模になると警告
 - エネルギア社社長はデブリ除去は2020年に3Bドル市場になると予測、受注を目指すと言。2Bドルを投資し、2020年までに原子力を用いたデブリ除去を開発、2023年までにサービス開始と発表

他国の状況

- CNES: ATV技術を活用したデブリ除去等の検討
- DLR: DEOS(Deutsche Orbitale Servicing Mission、2007.7MDR、2008.2フェーズA)非協力物体の捕獲、デオービット実証予定
- スウェーデン宇宙公社、CNES、DLR:2010年、Prisma編隊飛行ミッション成功。画像センサによる相対位置・姿勢の計測や、グリーンプロペラントを実証
- ESA、EADS他:ROGER(RObotic GEostationary orbit Restorer)静止軌道デブリ除去の検討
- カナダMDA社は軌道上サービスビジネスに参入計画(2010)
- Tether Unlimited Inc.(米):導電性テザーTerminator TetherTM、デブリ捕獲GRASP(Grapple, Retrieve, And Secure Payload)を提案
- STAR Inc.(米), Tether applications Inc.: ElectroDynamic Debris Eliminator (EDDE) 他を提案。SEDS他4つのテザー伸展成功実績がある
- 米国はXSS (AFRL)、OrbitalExpress(DARPA)、DART(NASA)など自動ランデブーミッションの実施実績。デブリ除去は技術的には可能だが、コストが過大との認識
- DARPA,NASAがRFI発出。RFPを出すという情報



デブリ除去要素技術実証衛星 (CNES)



TECSAS (TEchnology SAtellite for demonstration and verification of Space systems、DEOSの前身、DLR)



ROGER(ESA)



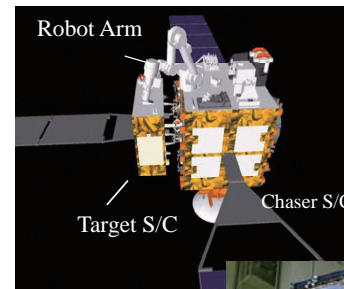
GRASP(左), Terminator Tether(右) (TUI)



EDDE (STARInc.)

日本がデブリ除去を実施する理由

- ETS-VII、HTV、 μ LabSAT、はやぶさ等による最終接近軌道制御、宇宙ロボット、センサ、自律航法など、世界最先端レベルの関連技術を有する
- 約10年前より世界に先駆けてデブリ除去を検討してきた。世界をリードできる可能性がある分野
- 世界的に必要とされている技術の研究開発を日本の得意技術を基に進め、世界に先駆けて実証すべき
 - 将来ビジネス化の可能性もあり、その場合には先行的に実証した技術がデファクトスタンダード化するものと予測
 - センサ、デオービット等要素技術だけでなく、デブリ除去のシステムをpushすべき
- 宇宙基本計画にもデブリ除去措置の記述



ETS-VII(おりひめ・ひこぼし)1998



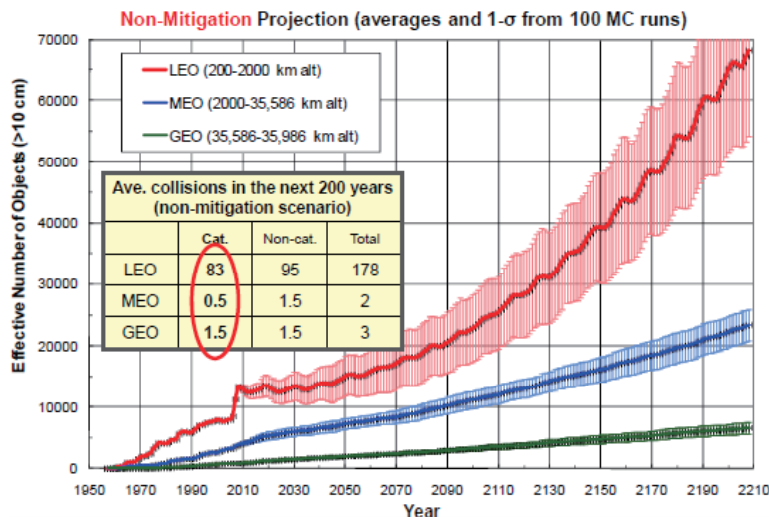
μ -LabSAT(2003)



HTV2009

除去の対象軌道

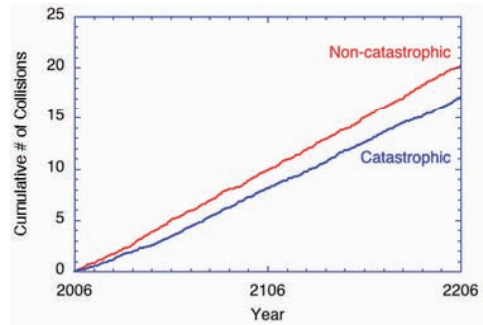
- GEO、MEOよりLEOで指数関数的増加



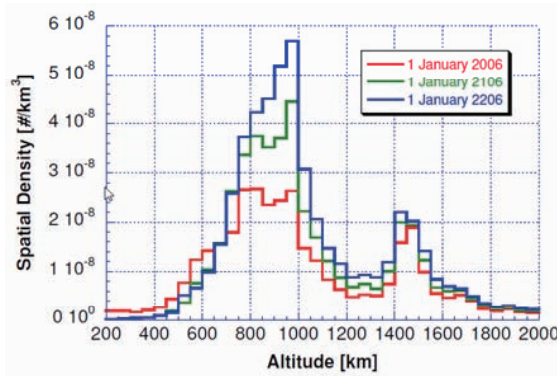
The Top 10 Questions for Active Debris Removal, J.-C. Liou, European Workshop on Active Debris Removal, 22 June 2010, CNES HQ, Paris, France

除去の対象軌道

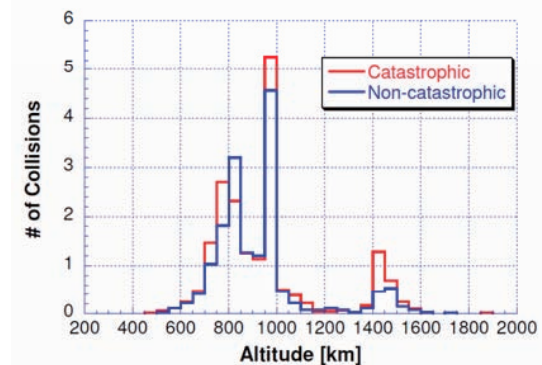
- 今後800km～1000km付近、1500km付近でデブリ衝突、デブリ数の増加が見込まれる
- 高度800～1000km、1400km付近、軌道傾斜角98度、83度付近等の混雑軌道からの除去の必要性



九大推移モデルによる、低軌道の10cm以上物体の衝突数の予測



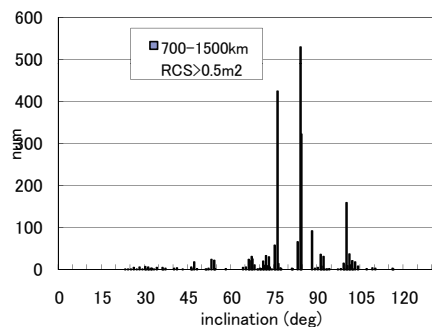
九大推移モデルによる、低軌道の10cm以上物体の空間密度



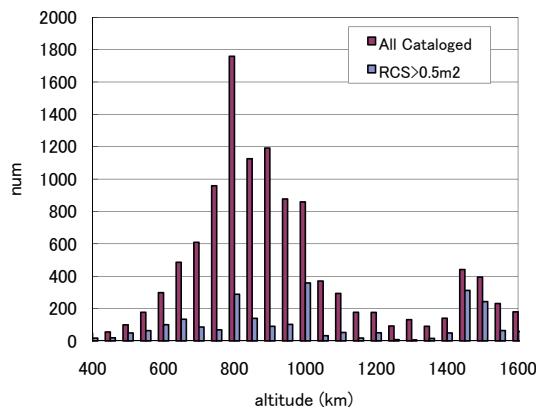
九大推移モデルによる、低軌道の10cm以上物体の衝突高度分布

デブリ分布

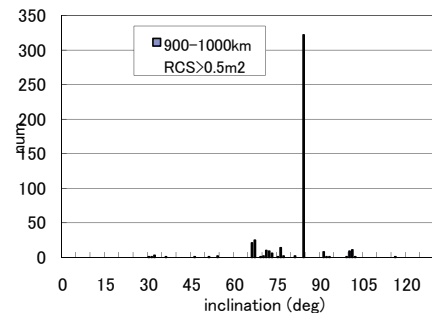
- NORADのTLE、SSR処理結果(2010.12時点)
- 全カタログ物体および、RCS(Radar Cross Section)0.5m²以上の分布
- 特定の高度、傾斜角に多数存在
 - 太陽同期軌道(傾斜角98-100度)
 - 高度900-1000km、傾斜角82-83度



高度700-1500kmの軌道傾斜角分布



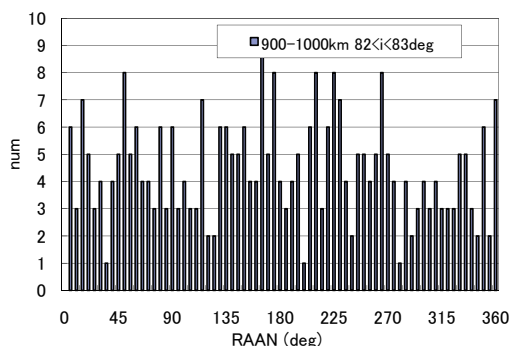
50km高度毎の物体数分布



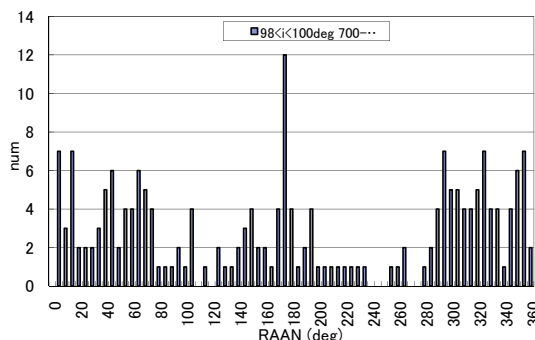
高度900-1000kmの軌道傾斜角分布

デブリ分布

- 混雑軌道では $i < 1$ 度, $\Delta\Omega < 数度$ の範囲に多数のデブリが存在
 - 1機のデブリ除去機で複数デブリの処理が可能
 - 後継機が近傍軌道に投入されれば、ピギーバック小型衛星での除去も可能



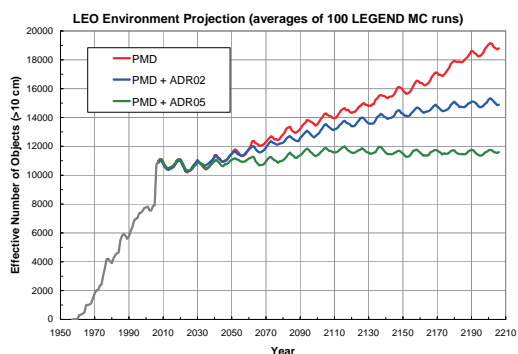
RAAN, 900-1000 km, 82-83 deg



RAAN, 700-1500 km, 98-100 deg

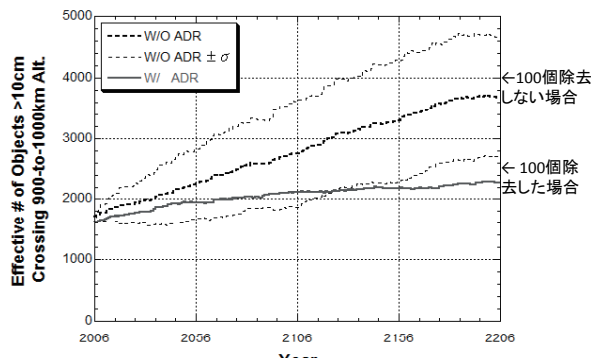
デブリ除去の効果

- 低軌道の混雑軌道の大型デブリを年間5個程度、あるいはトータル**100-150個程度**除去する方針が効果的
 - 2万個全部を除去しなくてもよい
 - 直近のリスクを与えているのは破片サイズデブリだが、破片サイズデブリ除去は短期間に多数除去しないと意味がないので効率が悪い
 - 大型デブリが衝突すれば、微小デブリを大量にばらまく
 - cm級デブリは数十万個存在



年間5機ずつのデブリ除去により環境が維持できると予測。NASA

PMD: Post Mission Disposal, ADR: Active Debris Removal

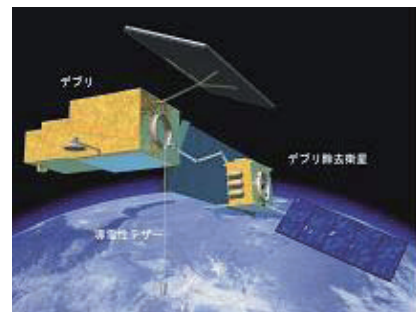


高度1000km、83度付近の100個のデブリを除去した場合の推移予測(九大)

13

デブリ除去の方針

- デブリ除去には、1.除去衛星によるデブリ捕獲・軌道外投棄、2.地上からのレーザー照射、3.sweeperなどがあるが、大型デブリを除去できるのは現状1のみ
- システムサイズのデブリに接近、捕獲、デオービットするデブリ除去システムを検討
- 技術的だけでなく、コスト的、法的な問題点も考慮する必要がある



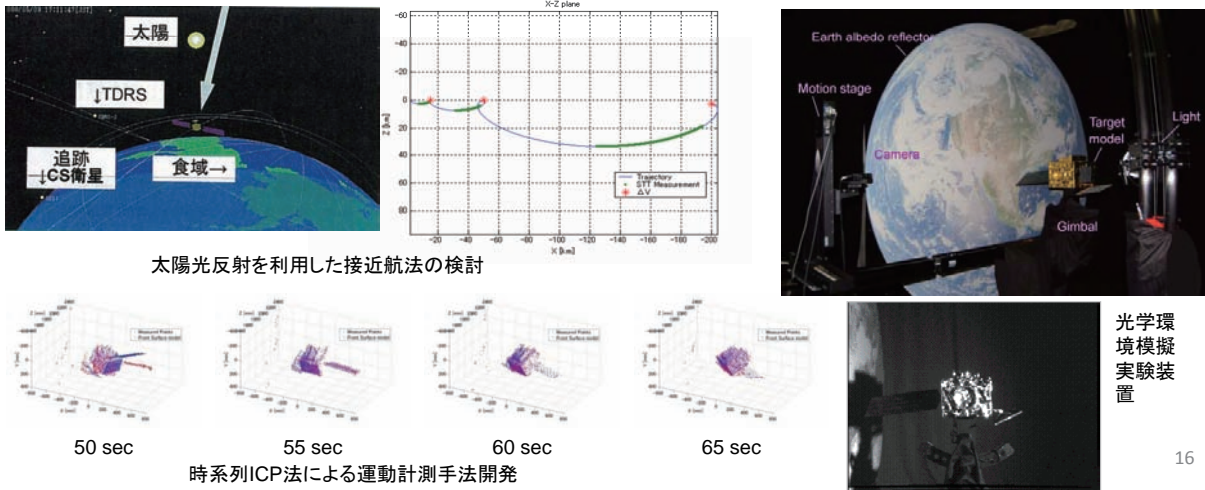
必要技術と保有状況

◎:優位(担当希望)、○:実績あり、△:部分的実績あり、×:実績なし

		JAXA	備考
初期軌道投入	打上機会	○	
遠方ランデブ(数十~数百km)	地上からのデブリ軌道計測	△(軌道による)	レーダ、光学観測による詳細観測
	軌道上でのデブリ軌道計測	△(シミュレーション)	太陽光反射光利用、方向計測による軌道推定精度向上等
	デブリ軌道予測	○(ALOSがCAM実施)	TLEから軌道推定
	自機軌道決定	○	GPSR地上レーンジング
	ランデブ軌道計画	◎(HTV)	
	軌道変換	○(◎1Nスラスタ、Φ420mmタンク)	
	軌道誤差修正制御	◎(HTV)	フィードバックによる微調整
近傍ランデブ(数km~数十m)	遠方センサ(非協力)	△	非協力(レーザレンジファインダ等)
	近傍センサ(非協力)	△(はやぶさ、民生、地上実験)	レーザレンジファインダ、ミリ波レーダなど
	光学カメラ	○	
	ストロボ	○(はやぶさ)	
	画像認識・処理	△(ETS-VII、はやぶさ、μ-LabSAT、地上実験、シミュレーション)	ステレオ視等
	デブリ運動推定	△(μ-LabSAT、地上実験、シミュレーション)	
	最終接近軌道制御	◎(ETS-VII,HTV他)	微小インパルス多噴射によるスラスタの熱的問題回避など
	フライアラウンド軌道制御(3次元)	△(ETS-VII、シミュレーション)	
	点検	△(地上での画像解析)	画像その他のセンサ、高画質ダウンリンク、解析
	FDIR	◎(ETS-VIII,HTV他)	異常検知、不良部位の切り離し、系の再構成
捕獲	フォールトトレラント計算機	◎(ETS-VII,HTV他)	
	異常時軌道計画	◎(ETS-VII,HTV他)	
	捕獲前角運動量除去	△(地上実験、シミュレーション)	ブラシコンタクタ、投射物等
	捕獲計画	△(ETS-VII遠隔操作)	どの部位をどの方向から捕獲するか
	ロボットアーム	◎(ETS-VII他)	
	エンドエフェクタ	○(ETS-VII他)	
	デオービット推進系固定	△~×(地上実験シミュレーション~アイデアレベル)	PAF固定、網、銲、接着剤、抱え込み等
デオービット	捕獲後運動量除去(運動停止)	△(シミュレーション)	
	デオービット	○~△	従来型推進系~EDT等
全体	軌道上作業機システム化	◎(ETS-VII他)	
	運用管制設備	◎(ETS-VII,HTV他)	運用支援技術を含む
	中継衛星	○(DRTS、かぐや)	
	小型衛星バス	○	
地上試験	地上相対運動シミュレータ	○(RDOT、捕獲シミュレータ他)	
	光学環境シミュレータ	○~△	
	分散シミュレータ	○(HTV)	通信回線を用い国際間で運動と運用をリアルタイムシミュレーション

非協力接近・運動推定

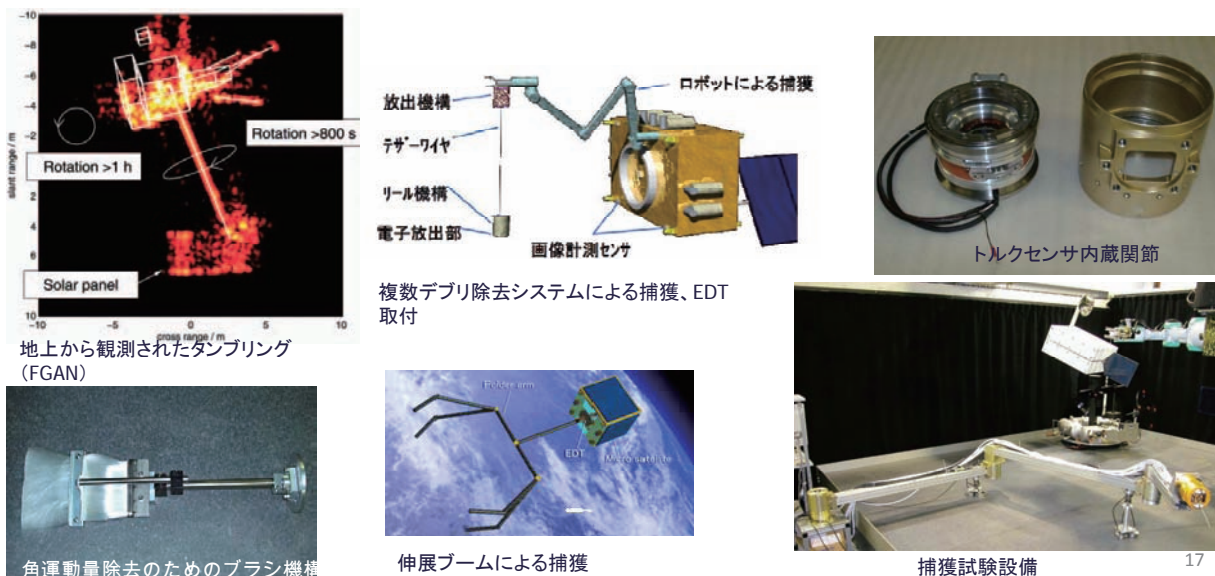
- 地上からの観測によるデブリの位置計測精度は数km。マーカもない非協力対象に、衝突せず接近する必要がある
 - 太陽の反射光を利用した光学航法、推進系構成検討などの非協力接近実証システム検討を実施
- デブリは姿勢制御されていないため、回転運動している
 - ステレオカメラによる相対位置・姿勢の計測などの研究を実施
- 技術レベル: 次期中期計画の実証実験を目指しシステム検討中
 - 日本起源デブリに接近、運動推定、調査(、接触)等のミッション



16

捕獲

- 回転運動しているデブリを、自機を損傷させずに捕獲する必要がある
 - 角運動量除去のためのブラシコンタクタ、軽量アーム、トルクセンサ内蔵関節などの試作検討、数値シミュレーションによる解析
- 技術レベル: 捕獲方法はまだ確定しておらず、部分試作、基礎研究レベル



17

軌道変換技術

- 低軌道のデブリ除去では、
 - 対象デブリは大型かつ高高度(800-1000km)
 - 対象デブリは姿勢制御されておらず、推進系取付I/Fも有していない
 - 安価に実現するために軽量であることが重要になる
- ため、導電性テザーが優位と考えられている
- 技術レベル
 - 導電性テザーは要素機器の試作・試験、数値解析他システム検討を実施

方式	メリット	デメリット	選定
化学推進	<ul style="list-style-type: none"> ・成熟した技術 ・軌道変換時間が短い(数日) ・コントロールドリエン트리も可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・多量の燃料が必要 ・長期間姿勢制御必要 ・デブリへの固定が困難 	原子力衛星等
固体ロケット	<ul style="list-style-type: none"> ・コンパクト ・軌道変換時間が短い ・コントロールドリエン트리も可能? 	<ul style="list-style-type: none"> ・スピニアップが必要 ・排出物に微小デブリが含まれる ・デブリへの固定が困難 	原子力衛星等
イオンエンジン	<ul style="list-style-type: none"> ・少量の推進剤でOK 	<ul style="list-style-type: none"> ・電力消費が大 ・長期間姿勢制御必要 ・コントロールドリエン트리が不可能 	GEO
導電性テザー	<ul style="list-style-type: none"> ・推進剤、高電力が不要 ・微小推力なのでデブリへの固定が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・実績のない新規技術 ・運用衛星への衝突確率がある ・微小デブリで切断の可能性(メッシュ化等により対策可) ・コントロールドリエン트리が不可能 	LEO
空気抵抗を利用(膜面展開等)	<ul style="list-style-type: none"> ・構成がシンプル 	<ul style="list-style-type: none"> ・中・大型衛星には巨大な面積が必要(例:ADEOSには230m²以上) ・ミッション期間後までの耐久性・信頼性 ・コントロールドリエン트리が不可能 	小型衛星

18

導電性テザー推進

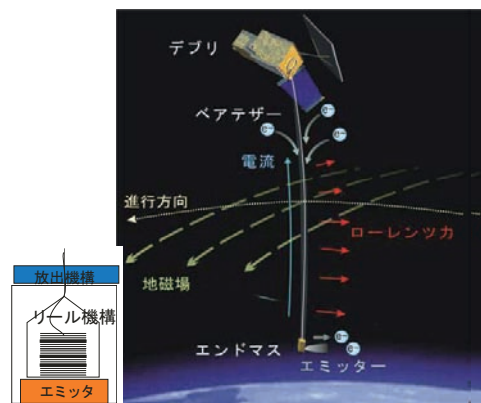
2. JAXAにおけるデブリ除去研究開発状況

- EDTの原理:テザーが地磁場を横切ることにより生じる誘導起電力を利用し、テザーに電流を流す。電流と地磁場との干渉で発生するローレンツ力を推力(減速力)として利用する

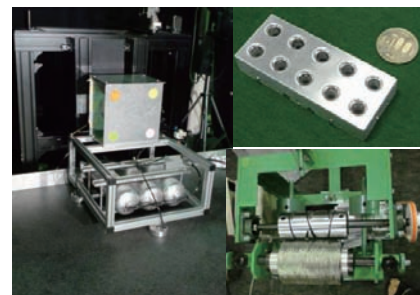
$$\text{誘導起電力: } E = L \cdot (V \times B)$$

$$\text{ローレンツ力: } F = L \cdot (I \times B)$$

- 主な特徴
 - 燃料を必要とせずに軌道降下が可能
 - 軌道降下と同時に発電も可能
 - 微小推力のためデブリへの取付が容易
- 状況
 - 要素試作・試験、それらの結果を反映した数値シミュレーションによるダイナミクス評価等を実施
 - 小型衛星での実証実験検討中



デブリデオービットへの使用例



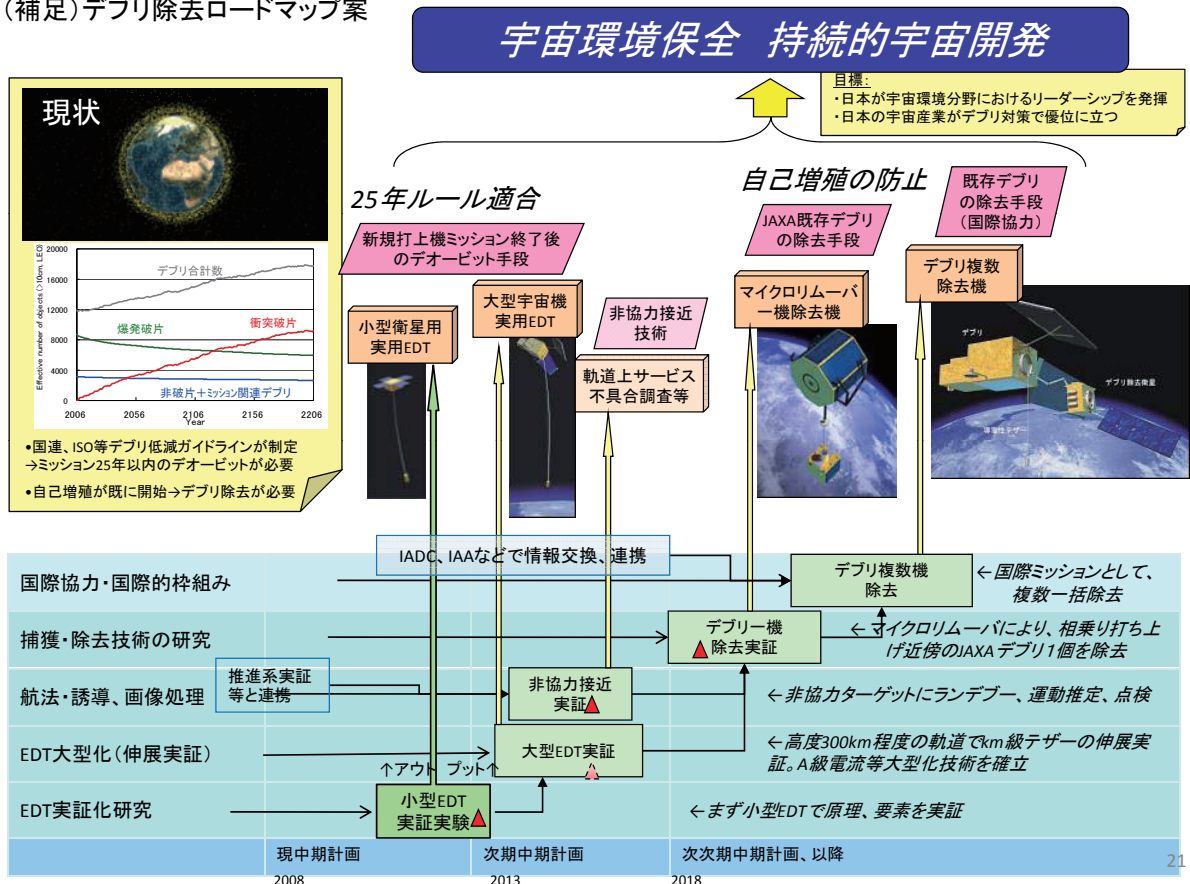
要素機器の試作、試験

19

3. デブリ除去システム開発の進め方案

- デブリ除去に向け、下記のようにそれぞれの段階でアウトプットを出しつつ、小型衛星や相乗りを有効活用して段階的に実証(次ページロードマップ案参照)
 1. 小型衛星を用いた小型EDT実証実験
 - デブリ除去を実現するキーとなる軌道変換技術について、小型衛星で要素、原理を実証する。
 - アウトプットとしては小型衛星のミッション終了後のデオービット(25年ルール適合手段)の他、様々な応用が期待される高効率推進系である導電性テザー技術の確立
 - (1') 大型EDT実証
 - 数kmテザー、数A級電流で大型デブリをデオービットするEDTを実証する。
 2. 非協力接近実証
 - CNES、DLRと協力して非協力接近実証を検討。ETS-VIIやHTVの技術蓄積を活かし、将来国際的枠組みでデブリ除去を実施する際の優位性を確保
 - 推進系の種類(EDTを使用するかしないか)に関係なく必要な技術を実証
 - アウトプットは軌道上不具合調査、軌道上サービス等につながる技術の確立
 3. デブリー機除去実証
 - 捕獲、デオービット手段の取付。軌道変換技術、非協力接近技術と合わせ、デブリ1機の除去を実証する
 - 日本のデブリ1機を除去する技術を確立
 4. デブリ複数機除去
 - デブリ除去を実施する国際的枠組みについて検討、ISOやIADCで提案し、日本が将来デブリ除去で主導することを目指す
 - 国際的枠組みでデブリ除去を実現

(補足)デブリ除去ロードマップ案



まとめ

- 今後も宇宙開発を継続するためには、デブリ除去が必要
- できる限り早く、低軌道混雑軌道の大型デブリを年間5個程度あるいはトータル100～150個程度除去する必要がある
- デブリに接近、捕獲、デオービットするデブリ除去システムは日本が世界最先端レベルの技術を有する分野
- 日本が世界に先駆けて開発することにより、宇宙環境分野において世界をリードすること、および将来のビジネス化における優位性を確保することを目指すべき