

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 ΔV 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。

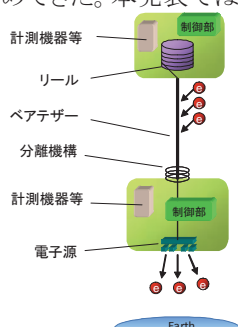


図: 導電性テザーシステム構成図

第4回スペースデブリワークショップ

2010年12月17日 JAXA調布航空宇宙センター



デブリ除去に向けた 導電性テザーシステムの研究



by

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)

発表概要



- 研究背景
 - デブリ除去の必要性
 - 導電性テザー推進の有効性
 - ロードマップ
- 研究目的
 - デブリ除去に貢献する導電性テザーシステムの構築
- 導電性テザーシステムの構成と特徴
 - 基本構成
 - 導電性テザーシステムの特徴
- 要素技術の研究開発状況
 - テザー
 - リール
 - エンドマス分離機構
 - 電子放出装置
- まとめ

2 / 24

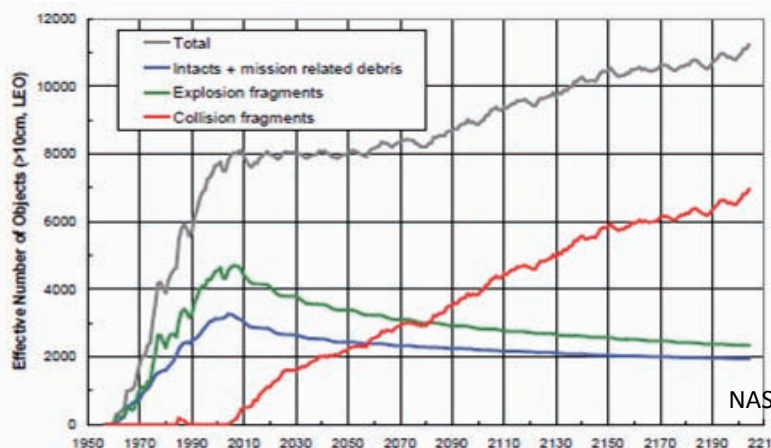
研究背景



- デブリ除去技術開発の必要性
 - 既存デブリ同士の衝突により、今後打上を行わない場合でも低軌道デブリが増加していく現状が、各国の研究によって共通認識となっている
 - 今後のデブリ発生低減だけでは、デブリ問題解決には不十分



軌道上の既存デブリの除去が唯一の解決策



3 / 24

研究背景



- デブリ除去技術開発の必要性(緊急性)
 - 今後も5-10年に1度程度の頻度で軌道上衝突事故が発生すると予測されるため、出来る限り早くデブリ除去を開始する必要がある

除去開始は早ければ早いほど良い

遅れれば遅れる程、負担が増大

研究背景



- デブリ除去(デオービット)に適する推進系
 - 除去による軌道環境改善に最も効果があるのは大型デブリ
 - 対象デブリは姿勢制御されていない
 - 対象デブリは推進系取付I/Fを有していない
 - 低コスト

| 方式 | メリット | デメリット |
|--------------------|--|---|
| 化学推進 | ・成熟した技術 | ・多量の燃料が必要、姿勢制御が必要 ・デブリへの固定が困難 |
| イオンエンジン | ・少量の推進剤でOK | ・電力消費が大 ・長期間姿勢制御が必要 |
| 固体ロケット | ・コンパクト | ・スピンアップが必要 ・排出物に微小デブリが含まれる ・デブリへの固定が困難 |
| 導電性テザー | ・推進剤不要、電力消費が小 ・デブリへの固定が容易 ・姿勢制御が不要 | ・新規技術 ・運用衛星への衝突確率 ・微小デブリによるテザー切断の可能性 |
| 空気抵抗を利用 (膜面展開等) | ・構成がシンプル | ・中・大型衛星には巨大な面積が必要 (例: ADEOSIには230m ² 以上) ・微小デブリによる損傷 |

研究背景



■ 導電性テザー (Electrodynamic Tether: EDT) とは

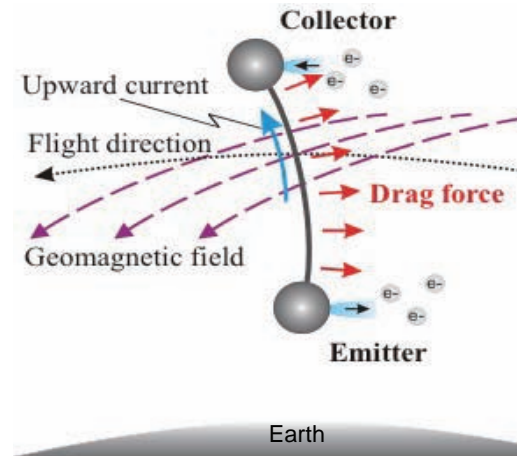
- EDTの原理: テザーが地磁場を横切ることにより生じる誘導起電力を利用し、テザーに電流を流す。電流と地磁場との干渉で発生するローレンツ力を推力(減速力)として利用する

誘導起電力: $E = L \cdot (v \times B)$

ローレンツ力: $F = L \cdot (J \times B)$

■ 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
- デブリの姿勢制御が不要



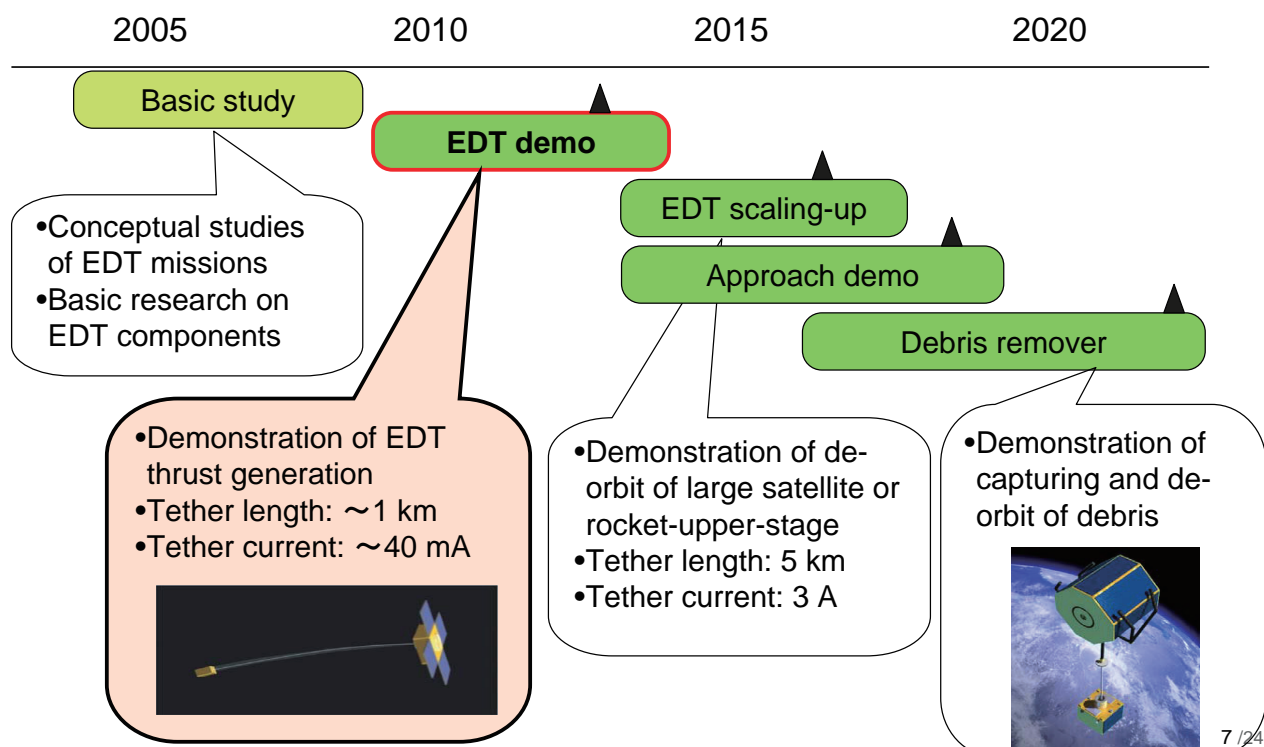
EDT動作概念

6 / 24

研究背景



■ EDTを利用したデブリ除去システム開発ロードマップ

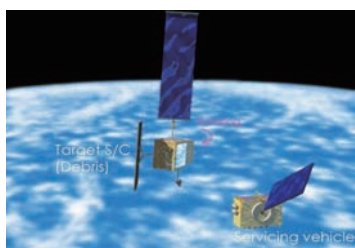


7 / 24

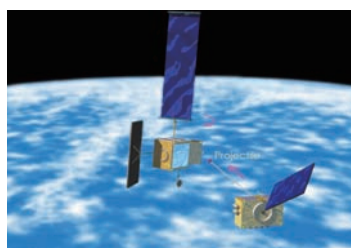
研究背景



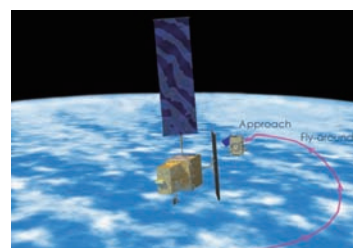
■ EDTを利用したデブリ除去システムの実用化モデル



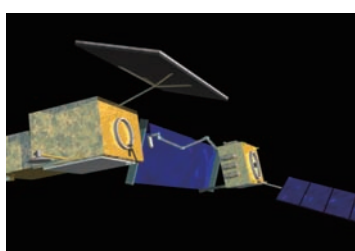
Step 1
Motion measurement



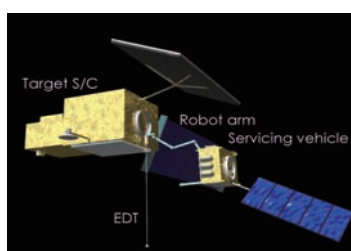
Step 2
Momentum reduction



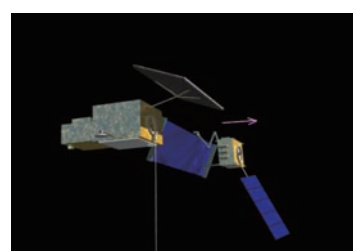
Step 3
Approach



Step 4
Capturing



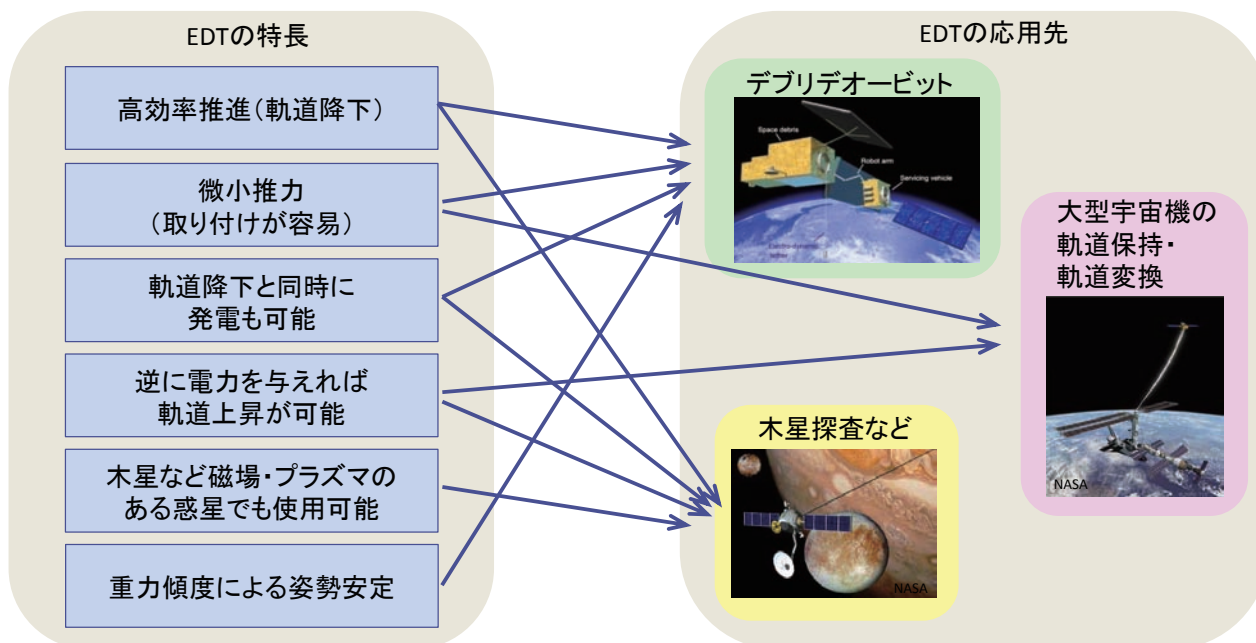
Step 5
Tether deployment



Step 6
Release

8 / 24

研究背景 EDT応用の可能性



* EDTの要素技術である電子放出装置(FEC)は、独立した技術として小型電気推進や衛星帯電制御、科学ミッション等への応用も期待できる

9 / 24

研究目的



- デブリ除去に貢献する導電性テザーシステムの構築
 - 導電性テザー軌道上実証実験に向けた要素技術の研究

10 / 24

EDTシステムの基本構成

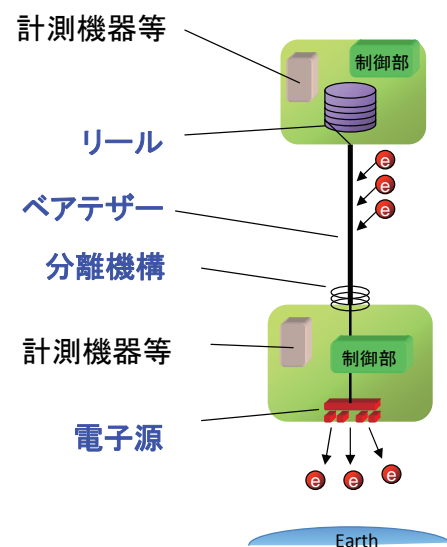


実証実験に向けたEDTシステム主要機器構成

- バアテザー： 発電源、電子収集、推力を発生
- リール・放出機構： テザー格納、エンドマス放出
- 電子源： 電子放出
- EDT動作検証のための計測機器：
 - GPSR、カメラ、エンドマス通信、プラズマ計測器
- EDT用電源系、データ処理系等

EDT実証実験システム目標開発仕様

- テザー伸展長： 1kmオーダー
- テザー電流： 10～50mA級
- システム重量： 30 kg
- システム電力： 30 W



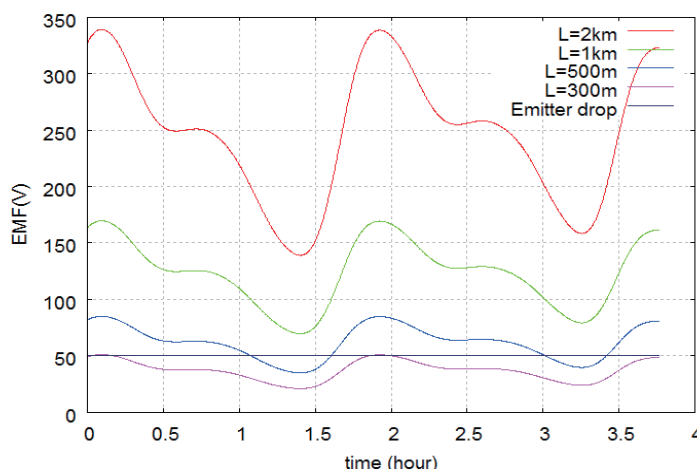
11 / 24

EDTシステムの特徴



■ 自己誘導起電力の時間変化

- 地球磁場およびテザー姿勢の変化により、テザー両端間に発生する誘導起電力が変動



誘導起電力時間変化の一例(軌道高度1000km、傾斜角31度)

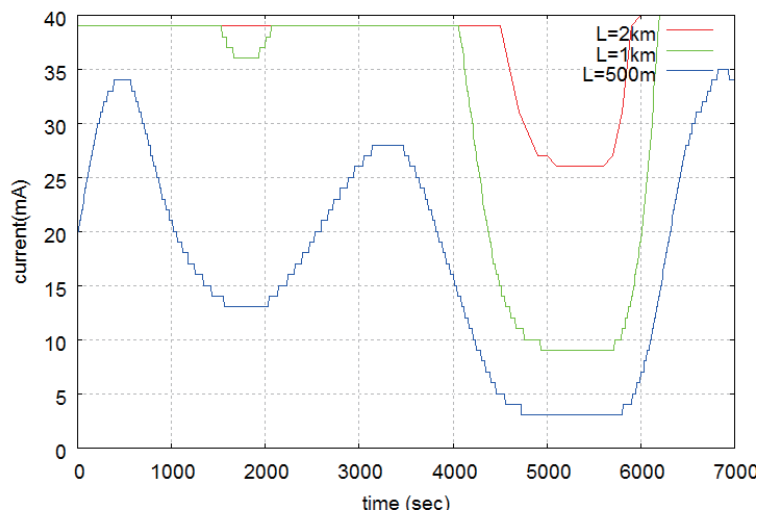
12 / 24

EDTシステムの特徴



■ テザー電流の時間変化

- 誘導起電力およびプラズマ環境の変化によりテザー電流も変動



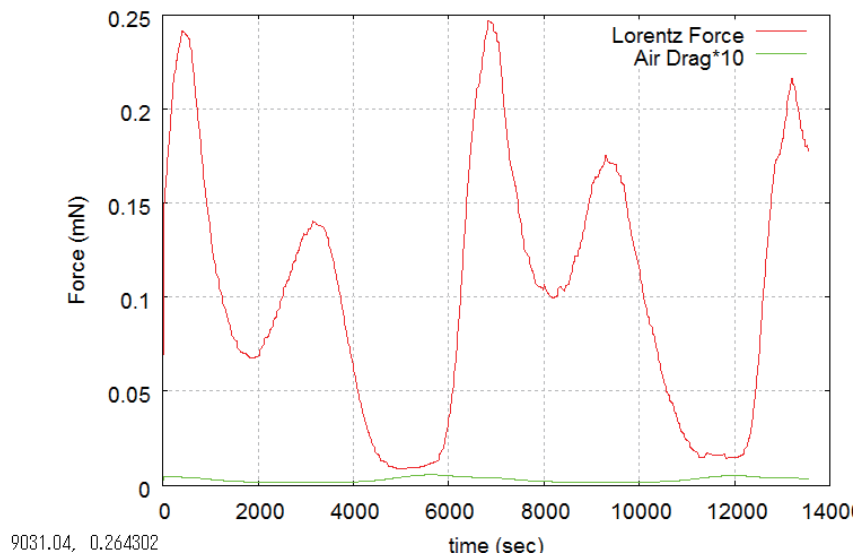
テザー電流変化の一例(軌道高度1000km、傾斜角31度、40mA上限設定)

13 / 24

EDTシステムの特徴



■ 発生推力の時間変化



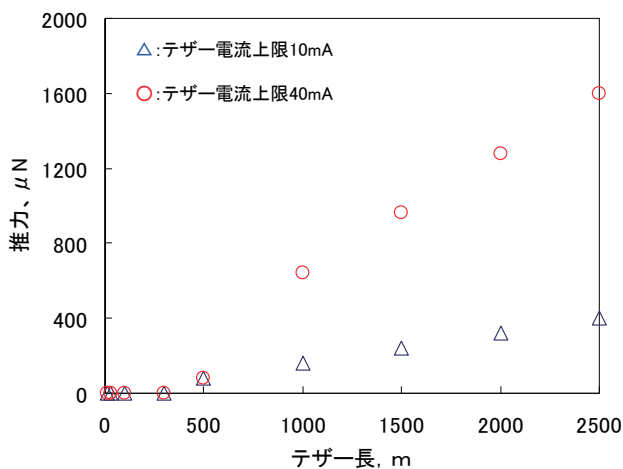
テザー電流変化の一例(軌道高度1000km、傾斜角31度、テザー長500m)

14 / 24

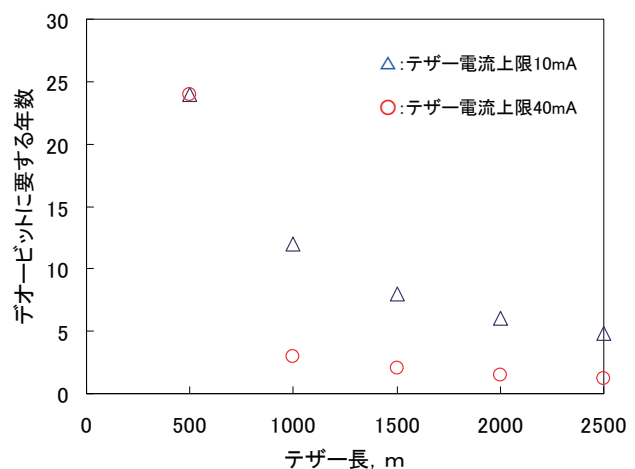
EDTシステムの特徴



■ デオービット能力(概算)



テザーによる減速力(平均)



高度650kmまでのデオービットに要する年数

(初期軌道高度1000km、傾斜角31度、全体質量400kg弱)

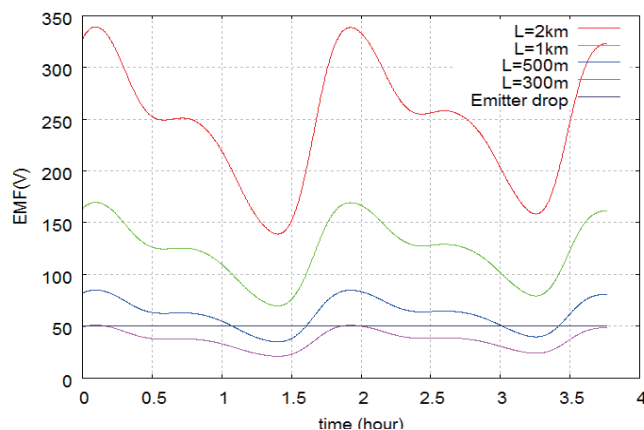
15 / 24

EDTシステムの特徴

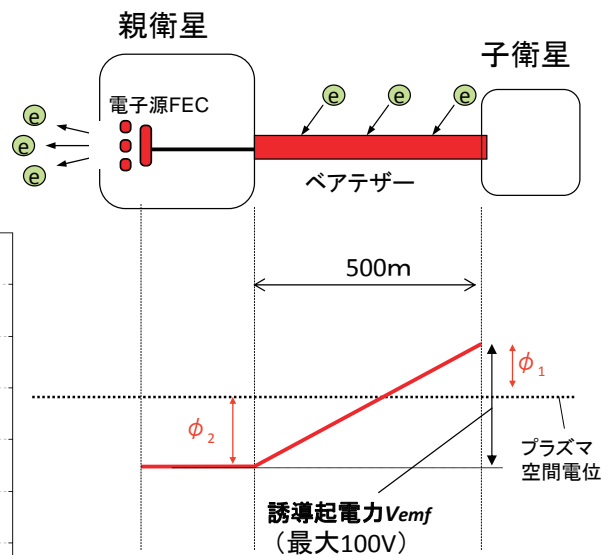


■ 誘導起電力によるテザー両端での電位差の発生

- 宇宙プラズマ空間電位に対するEDTシステムの電位も変動する

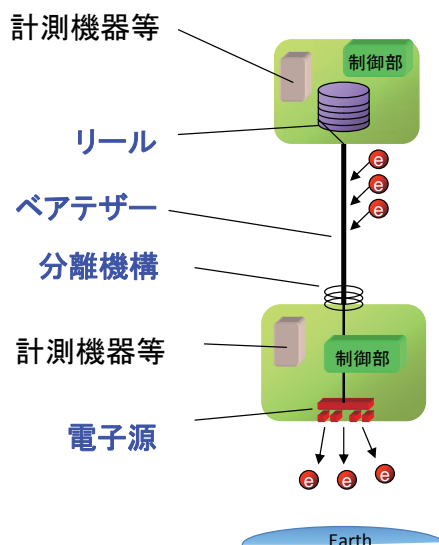


誘導起電力時間変化の一例(軌道高度1000km、傾斜角31度)



EDTシステムの電位

EDTシステムの基本構成

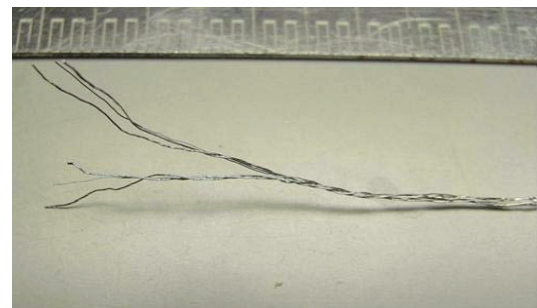


EDTシステムの要素技術



■ テザー

- 絶縁被覆のないベアテザーを用いることで、テザー自体が宇宙プラズマからの電子収集装置の役割を担う
- 微小デブリによりテザー切断の確率を下げるため、網状構造のテザーを採用
- 軽量化(1g/m)
- 下記の試験により基本機能を確認
 - 引張強度試験
 - 電子収集試験、放電試験
 - 微小デブリの超高速衝突試験



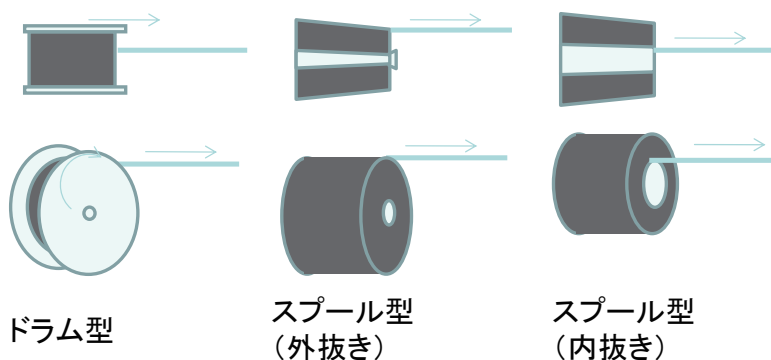
18 / 24

EDTシステムの要素技術



■ リール

- テザー格納用のリール機構
- ドラム型：リールが回転。TSS-1Rなどで採用。回転速度と伸展速度が一致しないとテザーが弛んで噛みこむなどのリスク
- スプール型(外抜き)：固定リールの外側から内側の順にテザーを伸展。SEDS、PMG、TiPSなど実績多数
- スプール型(内抜き)：テザーを内側から外側の順に伸展。外抜きのスプールリールより伸展摩擦を低減可能。
→ スプール型(内抜き)を採用



19 / 24

EDTシステムの要素技術



■ エンドマス放出機構

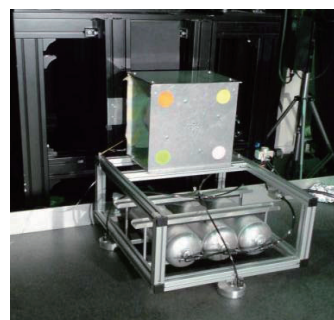
- テザーを伸展するためにエンドマスを放出する機構部
- バネ機構および保持機構で構成
- バネ機構: SDS-1で実績のあるバネの使用を検討中
- 保持機構: 実績豊富なNon Explosive Actuator (NEA) の使用を検討中
- 試作モデルにより、10kg級のマスを約1m/sで放出可能を確認(石定盤上試験。ステレオカメラによる三次元計測)



バネ機構



ステレオカメラ



石定盤上での試験の様子

20 / 24

EDTシステムの要素技術



■ 電子放出装置

- 宇宙プラズマに電子を放出して、テザーに電流を流すための装置
- EDT用電子放出装置に求められる性能
 - 小型、軽量、小電力、簡素、ロバスト、低熱負荷

熱電子源(フィラメントカソード)

- 高温動作のため、小型のものでも数Wの電力が必要。また宇宙機への熱負荷が大。短寿命

ホローカソード

- 10A以上の大電流放出が可能でかつ長寿命だが、作動ガスが必要なため装置が複雑。また動作維持には最低10W程度必要

電界放出型電子源FEC

- 電子の電界放出を利用した冷陰極であるため、宇宙機への熱負荷が小。また、必要放出電流に応じて微小電力(例えば0.1W以下)からの動作が可能。さらに、並列構成による冗長化が容易

21 / 24

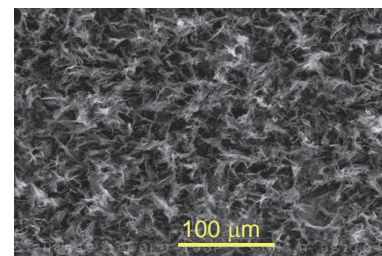
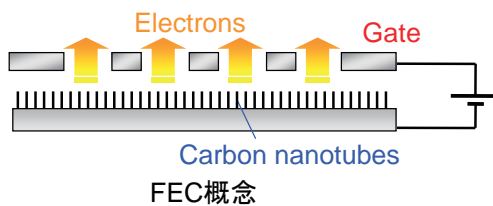
EDTシステムの要素技術



■ 電子放出装置(つづき)

■ FECとは

- 電界放出型電子源 Field Emission Cathode, FEC
- 鋭い尖りを持つ陰極先端に強電界を形成することにより、その先端から電子を放出
- エミッタ材料をカーボンナノチューブとすることで、駆動電圧の低下および耐久性向上を実現
- カーボンナノチューブの先鋭性および機械的/化学的強さ



カーボンナノチューブエミッタ
表面のSEM画像

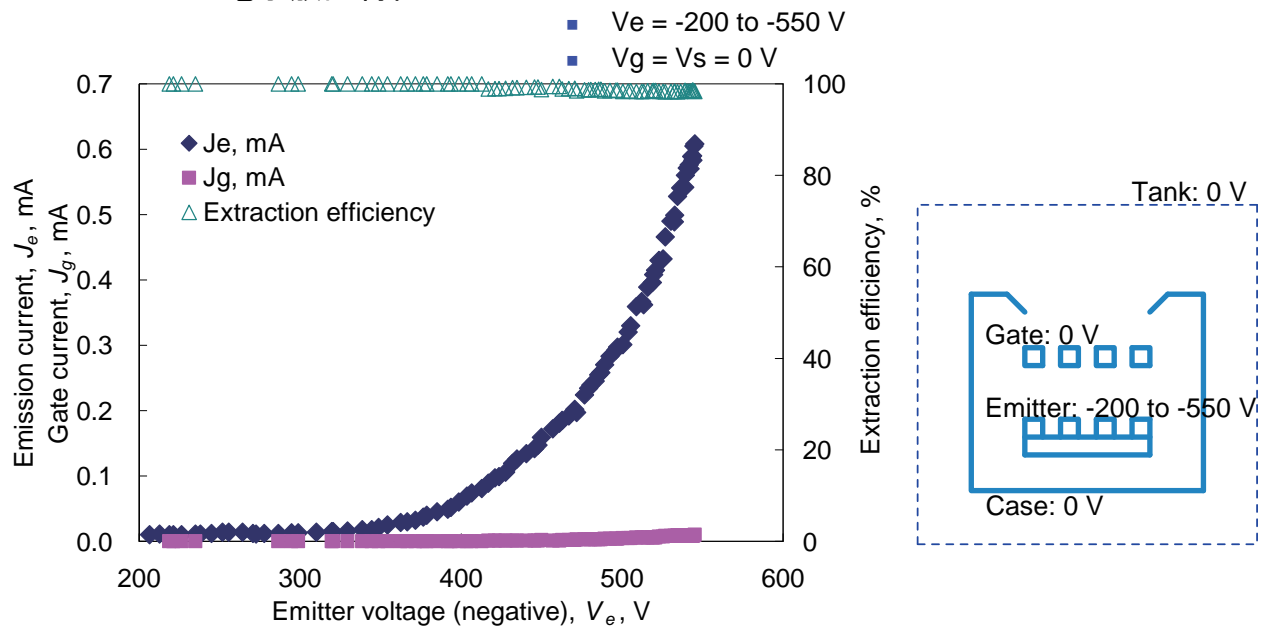
22 / 24

EDTシステムの要素技術



■ 電子放出装置(つづき)

■ FECの電子放出特性



23 / 24

まとめ



- デブリ除去システムへの適用を目指し、デオービット用推進系として有望な導電性テザーシステムの研究を進めている
- 導電性テザー推進は、推進剤不要かつ推進方向制御が不要なため、軌道上デブリ捕獲後のデオービットに適する
- 導電性テザーに必要な要素技術として、下記コンポーネントの研究開発を進めている
 - ベアテザー
 - スプール式リール
 - バネ式エンドマス放出機構
 - 電界放出型電子源