

## 太陽発電衛星と スペース デブリ 宇宙ごみ)

平山寛 九州大学 航空宇宙工学部門  
花田俊也 九州大学 宙空環境研究センター  
航空宇宙工学部門

## 概要

- スペース デブリの概要
  - 種類, 特徴, 対策
- SPSとスペース デブリ
  - SPSに対するデブリ衝突の危険
  - SPSがデブリ環境に与える影響



## スペース デブリとは

### 自然デブリ

小惑星や彗星起源の微小天体  
宇宙塵 (メテオロイド)

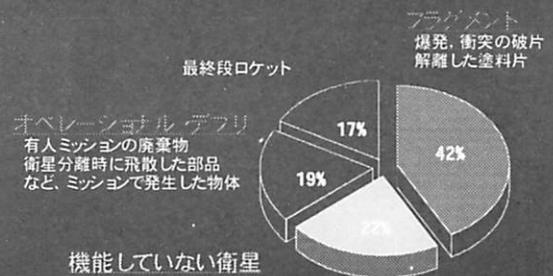
### 人工デブリ

定義  
機能していない人工の軌道上物体

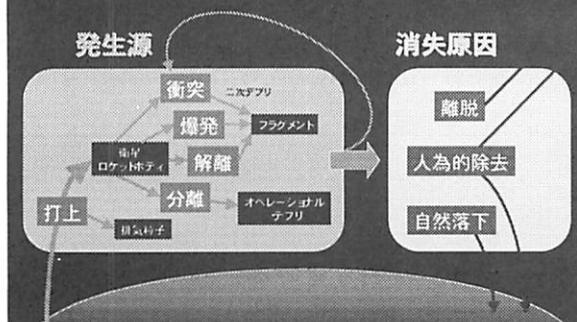
“Debris” (フランス語)

破片, 残骸, 岩屑, がらくた, がれき類, 崩壊堆積物

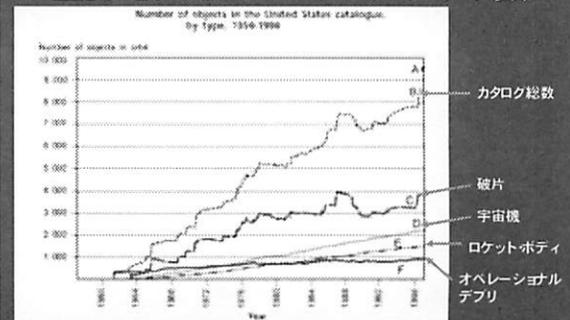
## 人工デブリの分類



## スペース デブリの発生と消失

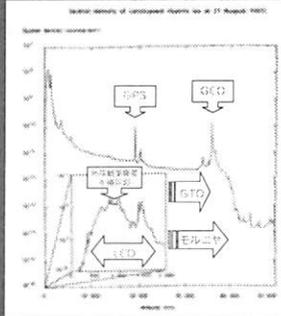


## 登録されたスペース デブリの数



注<sup>1</sup> 第7回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて 2004 年 9 月 16、17 日開催

## スペース デブリの軌道分布



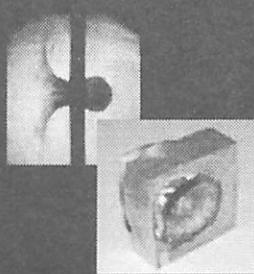
## スペース デブリの衝突速度

- 軌道によって、衝突の速度と飛来方向に特徴がある
  - 低軌道 軌道速度が7.5km/s前後
    - ISSなど傾斜の小さい軌道：主に斜め前方から、7~15km/s
    - 太陽同期軌道 極域で軌道が集中しており、そこで正面衝突する危険が高く、最大15km/s
    - ：超高速衝突であり、衝突したデブリは瞬時に気化する
  - 静止軌道 軌道速度は約3km/s
    - 衛星同士の相対速度は小さく、南北方向から最大で800m/s
    - GTO物体との衝突では、東から1.5~3km/s
    - ：低速衝突であり、相変化のない機械的な破壊現象となる

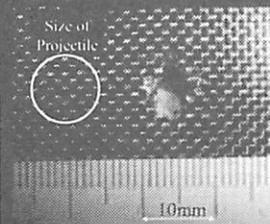


## 超高速衝突と低速衝突

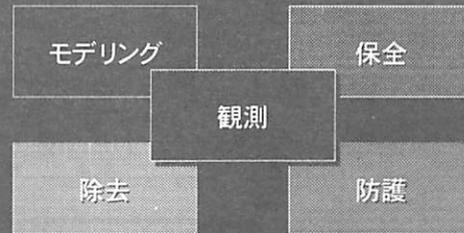
### ● 超高速衝突



### ● 低速衝突 300m/s 九州大学)



## スペース デブリの対策活動



## スペース デブリの観測

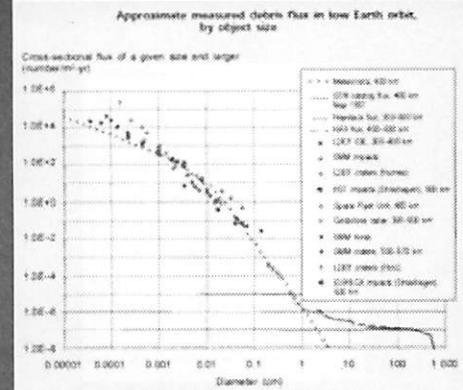
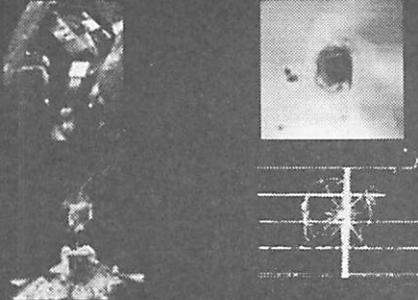
- 地上観測
  - 光学望遠鏡
  - レーダー
  - 微小デブリは観測できない
- 軌道上観測
  - 軌道上から回収した物体表面に残された、微小デブリによる衝突痕を検査
  - LDEF, STS, HST, SFU など
  - 低軌道からしか回収されていない
- 九州大学では、衛星搭載カメラを用いた、遠隔表面検査技術の開発を進めている

## スペースガードセンター

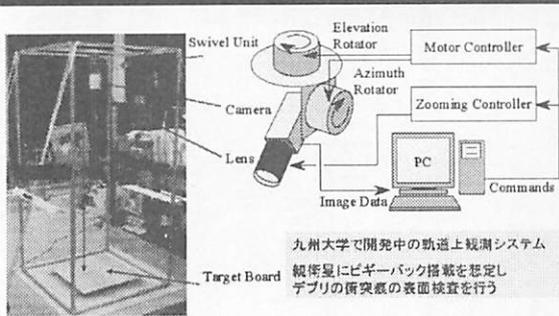
- 美星スペースガードセンター
  - 光学望遠鏡 (1m, 50cm, 25cm)
- 上高原スペースガードセンター
  - レーダー



## 回収衛星表面の衝突痕



## 軌道上観測システム

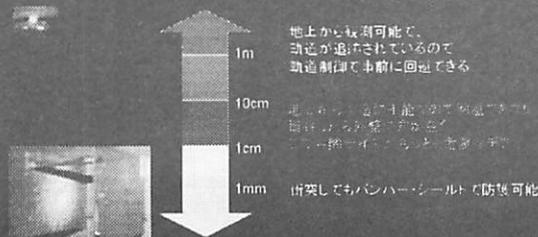


## スペース・デブリのモデリング

- 過去の打上履歴、および現在の観測値をもとに、スペースデブリの環境モデルを構築する
  - NASAのORDEM, ESAのMASTER など
- 環境モデルはデブリの衝突率の計算や、将来予測に用いられる
- 九州大学では独自の静止軌道環境モデル "GEODEEM"を開発

## スペース・デブリからの防御

- 国際宇宙ステーションの場合



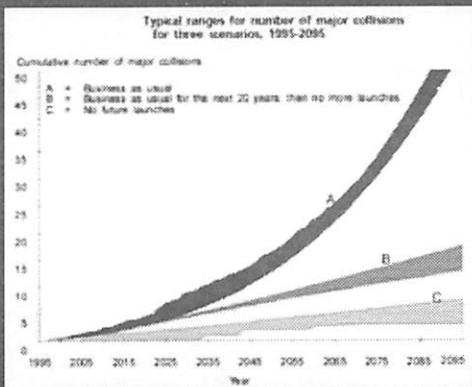
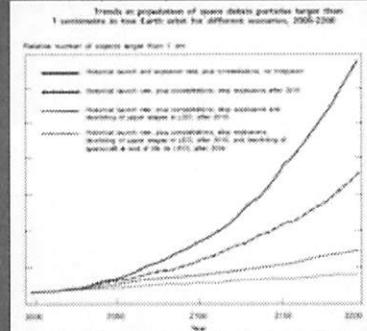
## スペース・デブリの除去

- 現在の技術で、効果的な手段は無い
- 研究中の技術
  - サービス衛星(ランデブー・ドッキング)
  - エレクトロ・ダイナミック・テザー
  - ソーラー・セイル
  - レーザー・アブレーション

## スペース デブリ環境の保全

- スペース デブリは宇宙の「環境問題」
- スペース デブリ環境の保全のために
  - オペレーショナル デブリを出さない
    - 分離機構の工夫
    - 衛星破壊兵器実験の自粛
  - 衝突を防ぐ
    - ミッション後に軌道外に待避
  - 爆発を防ぐ
    - 余った推進剤をタンクから放出

## スペース デブリ環境の将来予測



## (ここからSPS)

## SPSとスペース デブリ

- SPSは通常の衛星とくらべて、スペース デブリとの相互作用が大きい
- 大面積、大質量、運用期間が長い
- ↓
- デブリが多数衝突する ⇒ **デブリからの防御**
- ↓
- デブリの発生源となる ⇒ **デブリ環境の保全**

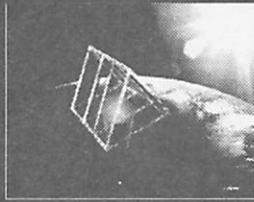
## SPSに対するデブリ衝突の脅威

- 3種類の典型的SPS軌道について評価する
  - デブリ環境モデル MASTER2001
  - ミッション時期\*2010年
  - 直径1mm以上のデブリのみ考慮



## 赤道LEOのSPS

- 特徴
  - 赤道地域に間欠送電
  - 打上コストを抑えられる
- 例
  - SPS2000
- 仮定したモデル
  - 高度 :1,100 km
  - 軌道傾斜 :0 度
  - SPS2000の軌道)



## 太陽同期 極軌道のSPS

- 極 (太陽同期)LEO
  - 任意の地域に間欠送電
  - 全日照軌道も可能
- 仮定したモデル
  - 高度 :1,234.3 km
  - 軌道傾斜 :100.6 度
  - (1日13周の回帰軌道)



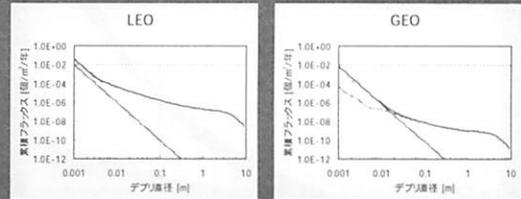
## GEOのSPS

- 特徴
  - ひとつの受電基地に連続送電仮定
- 例
  - NASA/DoEのリファレンスシステム
  - USEFのSSPS案
- 仮定したモデル
  - 高度 :35,786 km
  - 軌道傾斜 :0 度



## デブリ・フラックス

— 合計 — 人工デブリ — メテオロイド

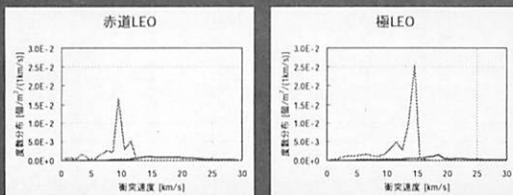


メテオロイドのフラックスに大きな差はない  
人工デブリのフラックスはGEOではLEOより2桁ほど少ない

LEOでは人工デブリが支配的  
GEOでは小さい物はメテオロイド、大きい物は人工デブリが支配的

## 衝突速度分布 (LEO)

— 人工デブリ — メテオロイド

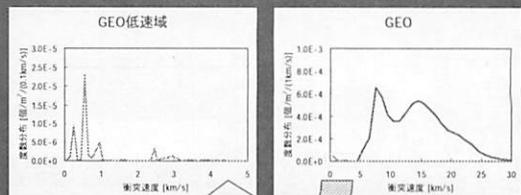


10km/s 前後の衝突が多い

14km/s 前後の衝突が多い

## 衝突速度分布 (GEO)

— 人工デブリ — メテオロイド

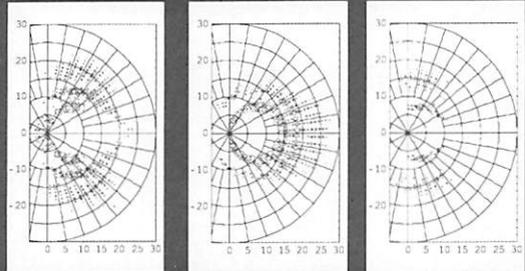


低速域の拡大図

人工デブリとの衝突は、低速衝突となる

## 衝突方向 速度

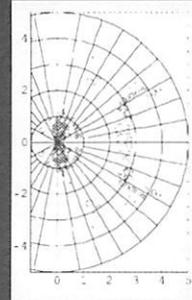
— 人工デブリ  
— メテオロイド



赤道LEO 北東・南東から入るデブリ  
極LEO 正面から入るデブリ  
GEO 北東・南東から入るデブリ

## 衝突方向 速度 (GEO低速衝突)

- GEOの人工デブリは低速衝突となる
  - 東, 3km/s
    - 赤道面GTO物体起源
  - ±30度方向, 3km/s
    - アメリカ/日本からのGTO物体起源
  - ±60度方向, 3km/s
    - ロシアからのGTO物体起源
  - 南北方向, 1km/s以下
    - 古い静止衛星や上段ロケット
    - 最大15度の軌道傾斜を持っている



## SPSのデブリ衝突対策

- 衝突しないように
  - 使用軌道のデブリ環境をよく知る
  - デブリ・フラックスの低い軌道を選ぶ
  - 面積の大きい、発電面やアンテナ面を、デブリ飛来方向に対して投影面積を小さくする
  - 既知のデブリから待避できるよう、軌道制御能力を持たせる (これは別の問題あり)
- 衝突してもよいように
  - 発電部や送電部の部分破壊に対して、耐久性があるように設計する (損傷で効率が落ちるだけで、全滅しないように)
  - 重要部分はデブリ・シールドで守る

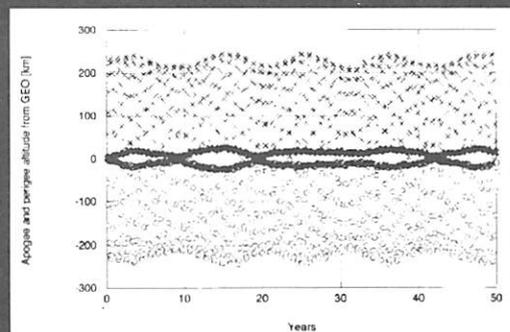
## SPSによるデブリ環境への影響

- もしSPSが破碎したら、大量の二次デブリが飛散し、軌道環境が悪化が加速する
- 寿命後のSPS自身が巨大なデブリとなり、他の衛星の障害となる
- SPSの破碎現象
  - 「爆発」は起こりにくい、ほとんどが「衝突」であろう
- 大きな破碎が起きなくても、小さな衝突から発生した二次デブリが長期にわたって蓄積される
  - およそ高度1000km以上では大気の抵抗も非常に弱く、半永久的に落下してこない

## SPSからのデブリ発生対策

- 爆発性推進剤や化学バッテリーをできるだけ避ける
- 建設中にデブリを出すような工法は使わない
- デブリが衝突しても、二次デブリの発生が少ない素材を使う
- ミッション終了後、落下または軌道離脱させる

## 太陽輻射圧による摂動



## 運用終了後の廃棄

- 地球へ落下させる
  - LEOで有効
  - 燃え残りの落下被害を防ぐため、制御して安全な海域を狙う
  - 分解する必要があるかもしれない
  - 一方で、空気の分子が難しく、落下距離の予測は難しい
- 高軌道へ上げる
  - GEOで有効
  - 太陽輻射圧の作用が大きいので、一般の衛星の廃棄より、高く上げる必要がある
  - ただし、閉鎖の死地帯であり、世界的解決ではない
- どちらの場合も が必要
- マニューバ方法は？
  - ロケット(化学/電気)
  - テザー
  - セイル
  - 空気抵抗
  - ...



## 廃棄コスト

- 地上の発電システムとのコスト比較を行う場合は、SPSにも廃棄コストを含めて見積もるべきではないか