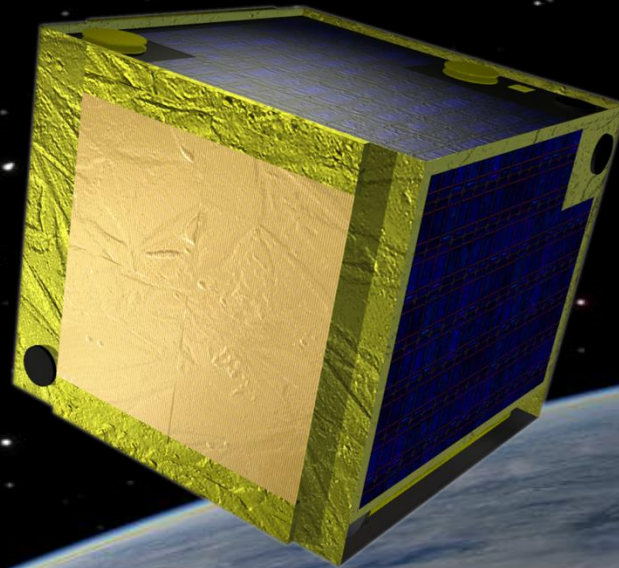


IDEA Project

In-situ
Debris
Environmental
Awareness



2016年度活動状況



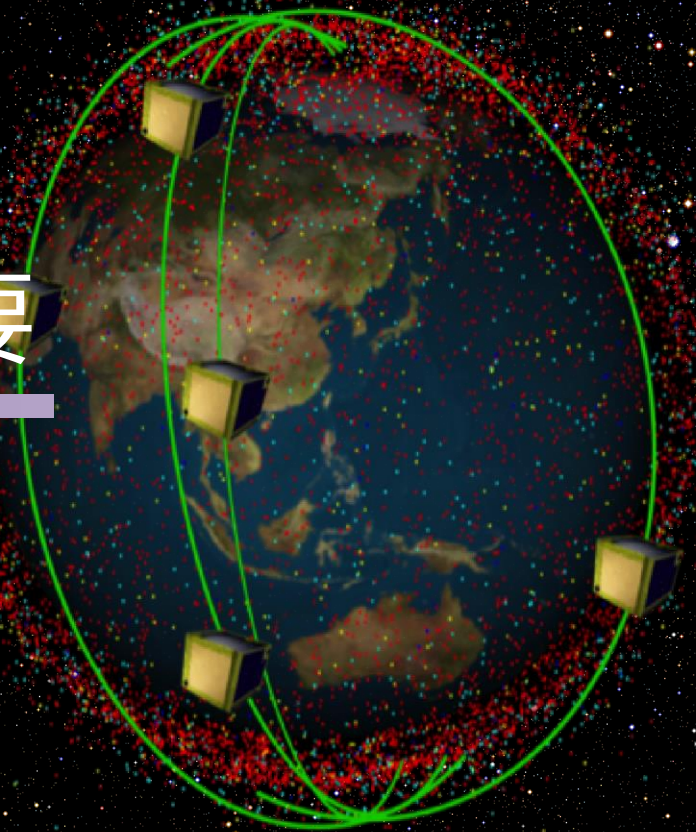
Project Manager : 兒玉 豊

九州大学 宇宙機ダイナミクス研究室 修士1年

Contents

- IDEAプロジェクト概要
- IDEA 1号機の現状
- 次号機以降に向けて
- 解析

IDEAプロジェクト概要

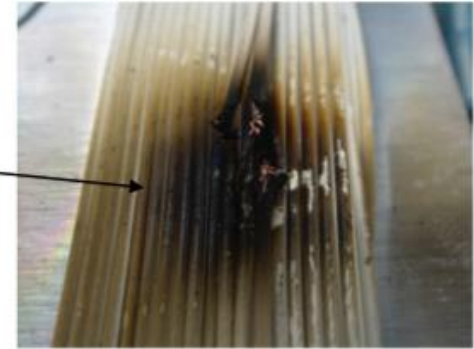


IDEAプロジェクト | 背景

微小デブリ | 砂粒ほどの大きさの宇宙ごみ

- 地上からの観測が不可能
- 衝突で衛星の機能停止も

▶ 軌道上観測が不可欠



微小デブリの衝突により破断したケーブル（実験）

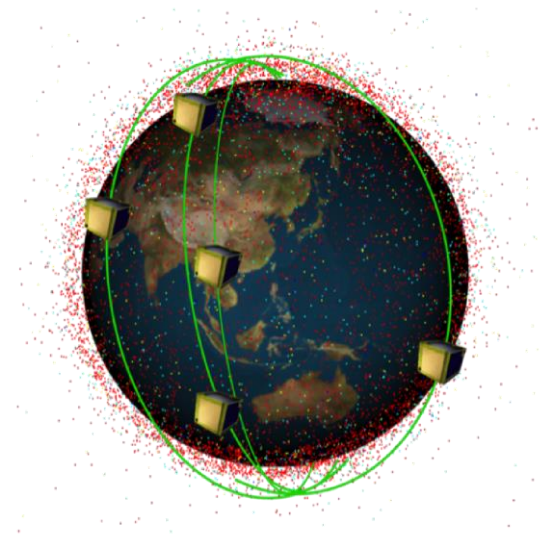
Nitta, K., et al. (2010)

微小デブリの軌道上観測

- 宇宙環境の把握には様々な軌道のデータが必要
- ▶ 複数機の小型衛星による観測が最適
 - ✓ 豊富な打ち上げ機会
 - ✓ 安価な開発費

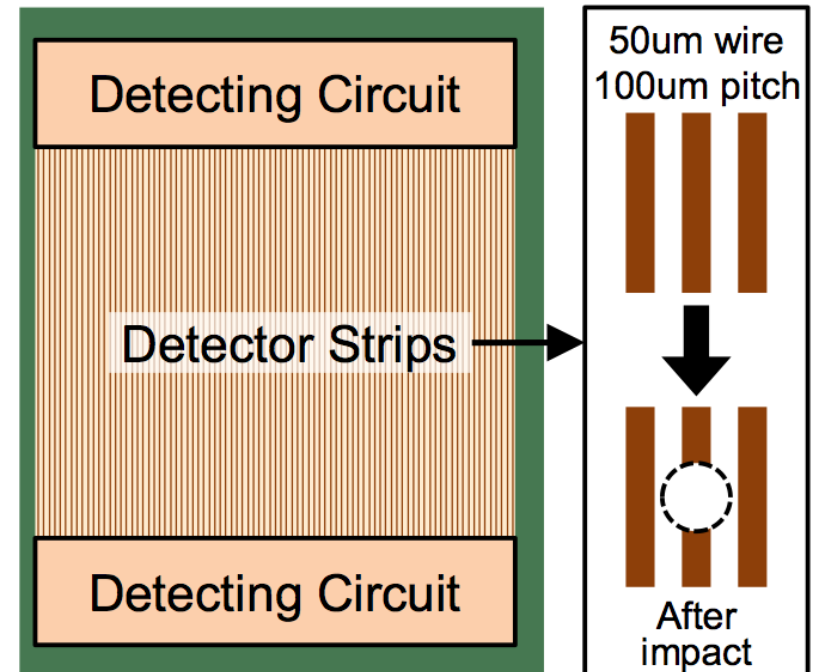
微小デブリの軌道上観測ネットワークを構築

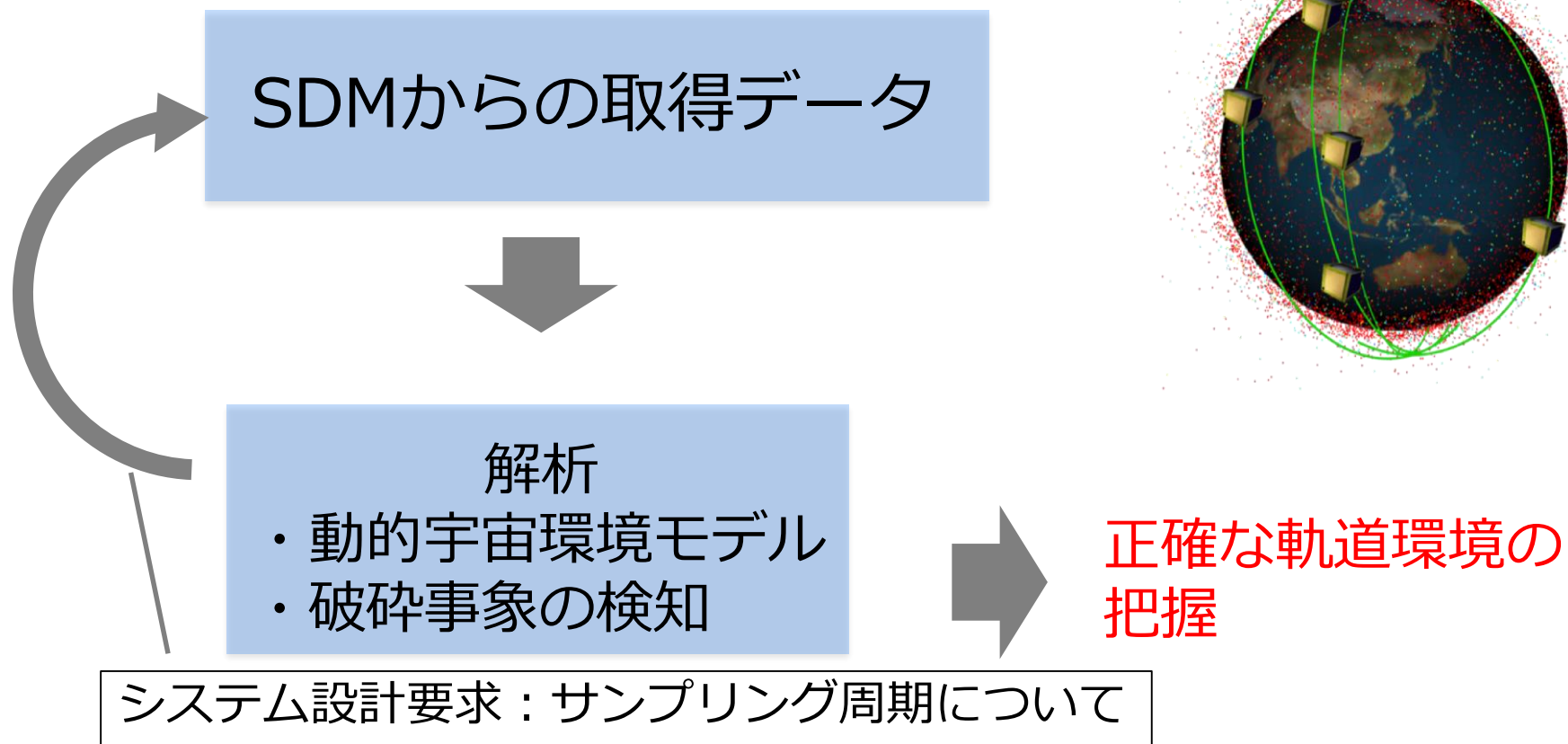
- ❖ 既存のモデルの検証
- ❖ 動的なモデルの開発
 - ▶ 正確な軌道環境の把握
- ❖ 宇宙機破砕事象の検出
 - ▶ 環境変動の迅速な検知



▶スペースデブリモニター (SDM)

- 有限会社QPS研究所と株式会社IHIが共同で出願した特許に基づき宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発





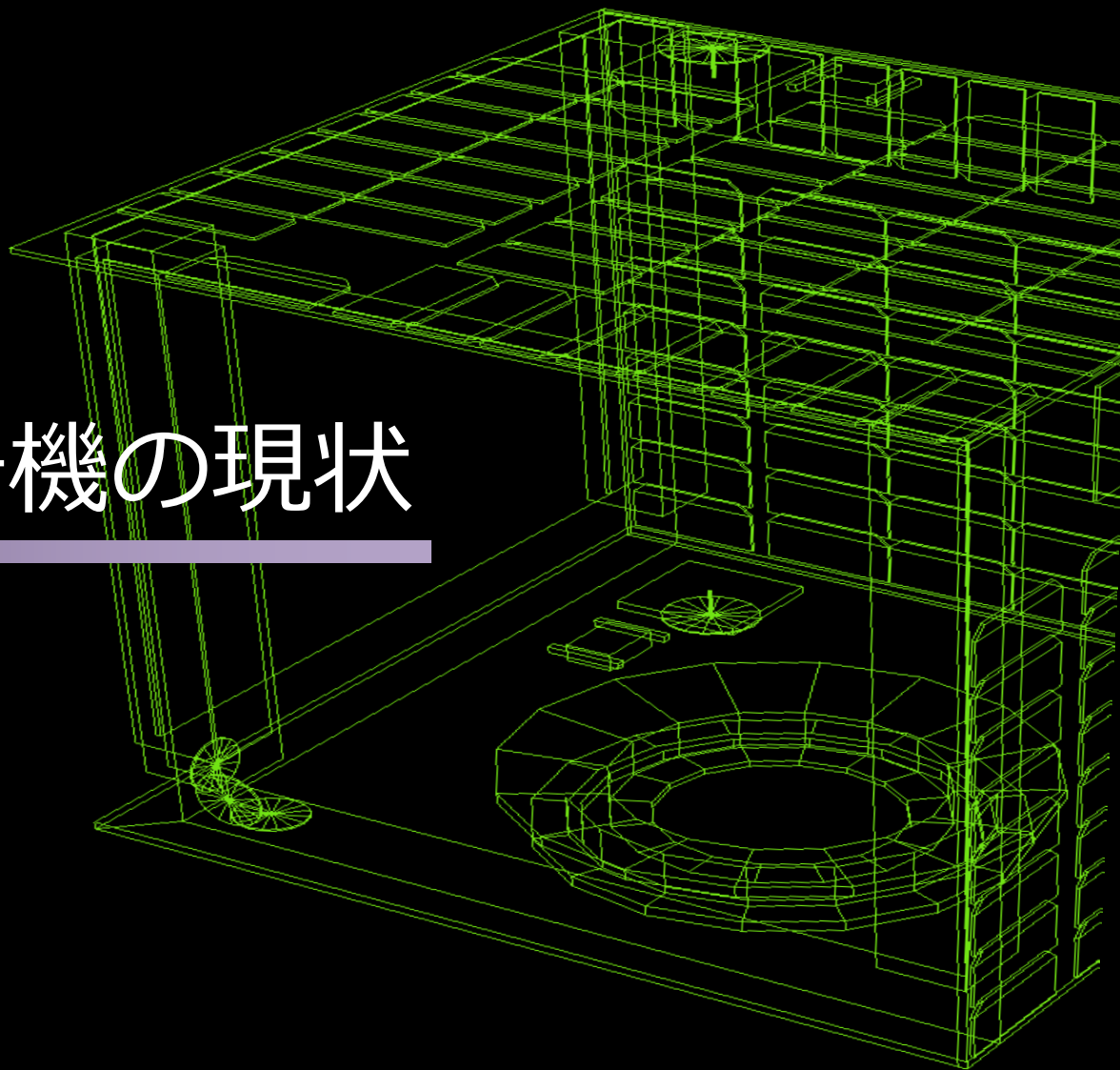
IDEAプロジェクト | プロジェクト体制

- 宇宙機ダイナミクス研究室の学生を中心に、他研究室からも参加（学部～博士課程まで）
- JAXA, IHI, Astroscale, 地元中小企業との協力



NPO法人 e-SETの方々との
設計会議

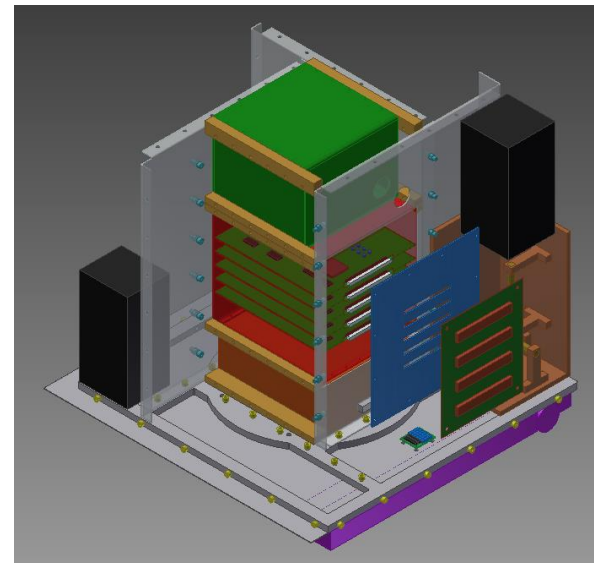
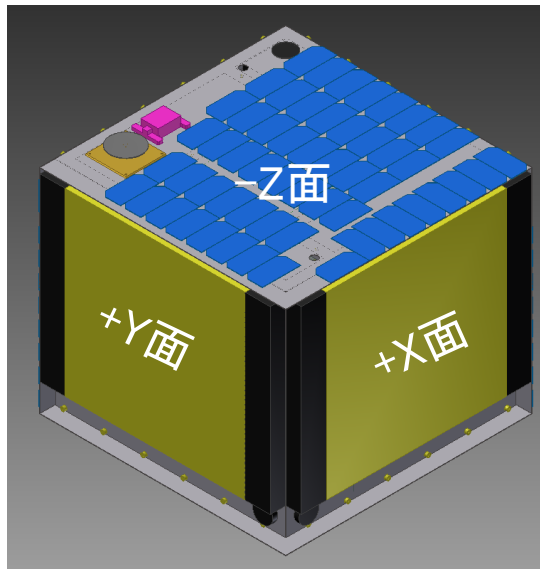
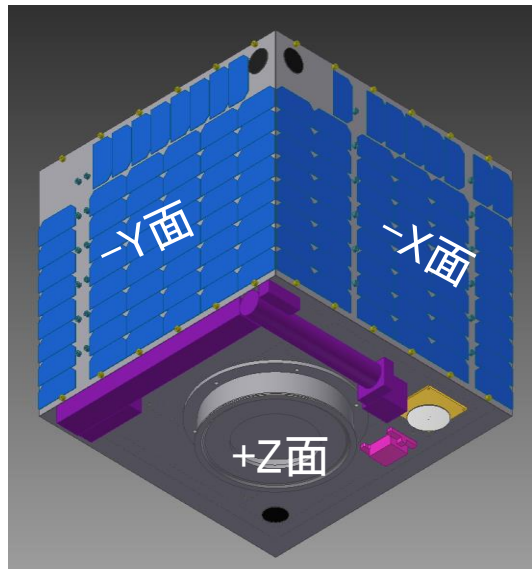
IDEA衛星 1号機の現状



設計コンセプト

デブリ計測データ取得に特化した**シンプル**・**堅固**なシステム

- メインCPUによってほぼ全てのタスクをこなす
中央集権処理
- できる限り枯れた技術や実績のある機器を使用



初号機 IDEA-1

- 50cm級超小型衛星
- デブリ衝突検知センサを2面に搭載

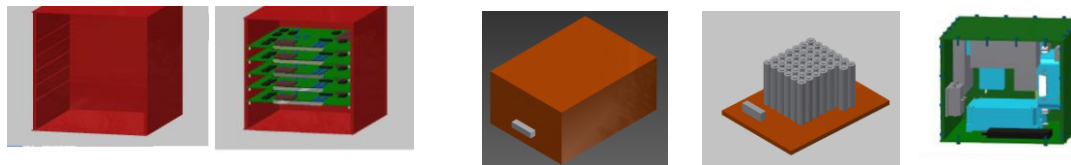
ミッション

デブリ観測衛星の**技術実証**
微小デブリ衝突の
準リアルタイム観測

各系概要

熱構体系

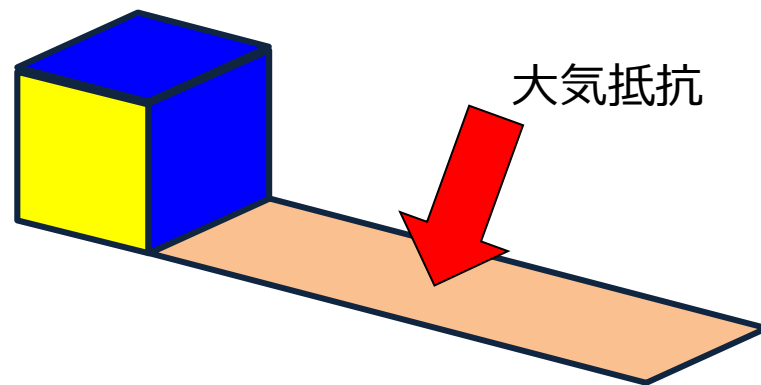
- ❖ 2mm以下のデブリの衝突に耐える設計
- ❖ 機器のユニット化
- ❖ 受動的熱制御



左から処理系ユニット, 電源ユニット, 通信ユニット

デオービット系

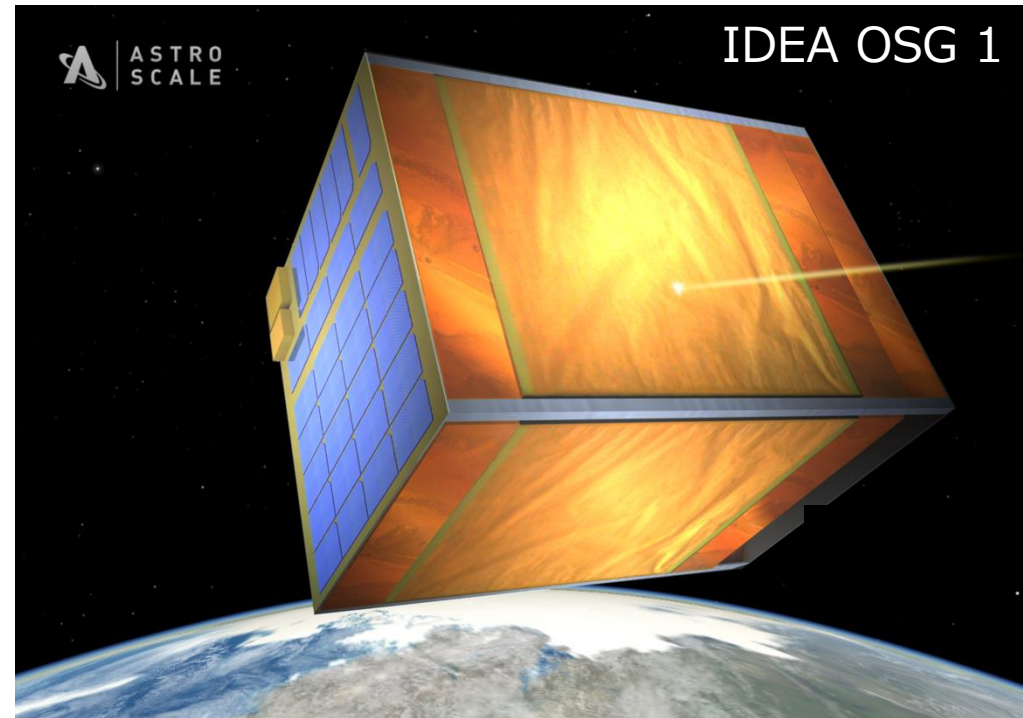
- ❖ IDEA自身がデブリとならないよう, IADCの25年ルールを遵守
- ❖ ミッション終了後, 薄い膜面を展開し大気抵抗を利用して軌道を下げる



IDEA衛星 | IDEA OSG 1

IDEA
Project

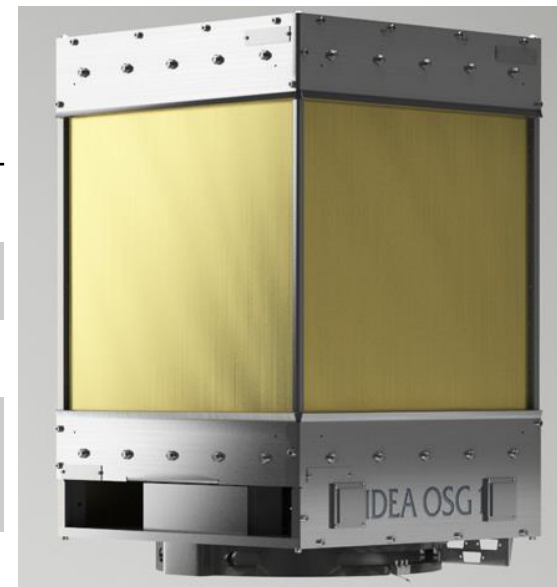
- IDEA-1をベースにAstroscale社が開発
- 2018年初頭打ち上げ予定
- OSG株式会社の支援を受け、「IDEA OSG 1」と命名




設計情報

サイズ	400mm×400mm×600mm
質量	22kg
打ち上げロケット	ソユーズ2
ミッション機器	スペースデブリモニター (SDM) 350mm×350mm×2sheets
姿勢制御・決定	サンセンサ, 磁気センサ, MEMSジャイロ, 3軸制御磁気トルカ
時間, 位置決定	GPSセンサ
デオービット機能	膜展開機構

情報提供 : Astroscale.HP



IDEA Project

九州大学
宇宙機ダイナミクス研究室 

IDEA 1
概念設計
フェージビリティスタディ (終了)

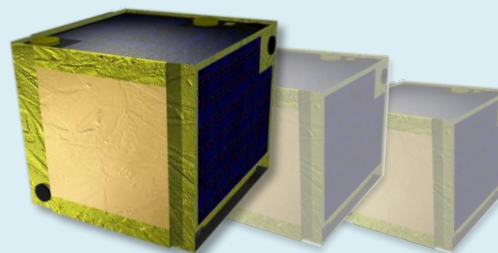
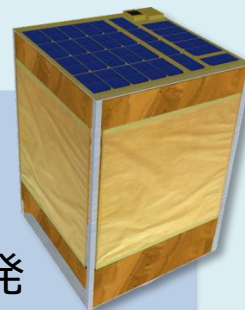
IDEA 2, 3...
次号機以降に向けた検討・提案

- データ解析・環境推定
- 安全な宇宙開発への貢献

パートナー

ASTROSCALE

IDEA OSG 1
詳細設計・開発



観測データ

今年度の活動

- キューブサットの開発
次号機に向けたシステムの搭載
- IDEA衛星へのシステム要求解析
ミッション機器のサンプリング周期
- データ利用
デブリ環境把握，破砕事象検知

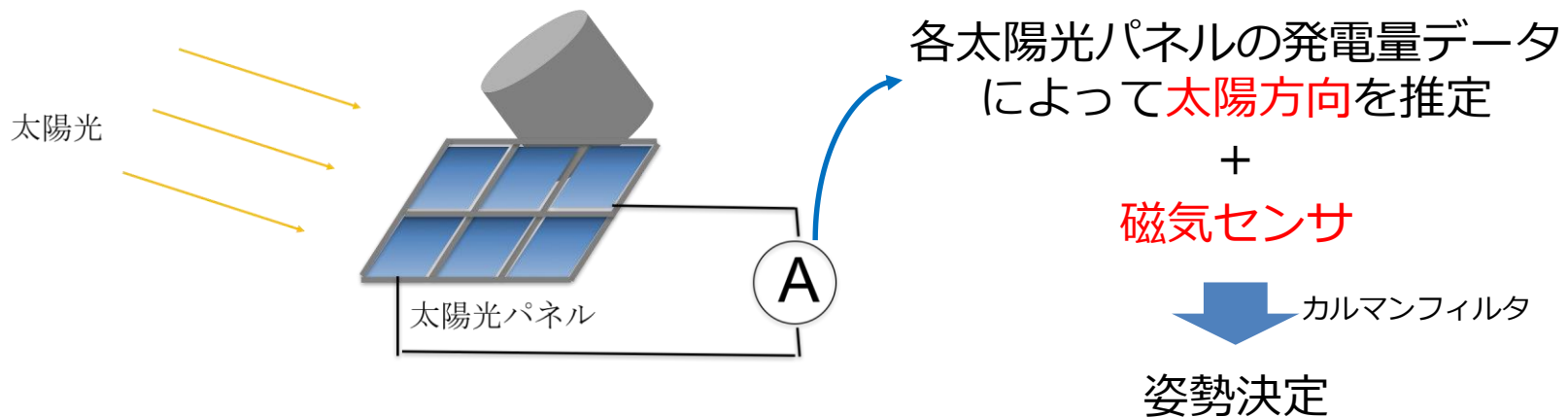
今年度の活動

- キューブサットの開発
次号機に向けたシステムの搭載
- IDEA衛星へのシステム要求解析
ミッション機器のサンプリング周期
- データ利用
デブリ環境把握，破砕事象検知

今年度の活動 | ZARMのキューブサット

ミッション内容

太陽光パネルの発電量から得られたデータを用いた
姿勢推定



目的：IDEA後継機にこのシステムを取り入れて
冗長系を強化し、ミッションの達成率を向上させる

今年度の活動 | ZARMのキューブサット

ミッション定義

ミニマムサクセス

- 各太陽電池パネルの発電量による回転軸(太陽方向)の決定

フルサクセス

- キューブサットに搭載されているサンセンサーのデータと推定結果の比較

エクストラサクセス

- 太陽電池パネルの発電量のみで姿勢決定可能か検証する

現在の進捗状況

- ミッション提案書を作成
採択され次第, 本格的に開発開始
- 開発の準備及び技術的課題点の洗い出しのため, BBMを用いた地上実験を計画

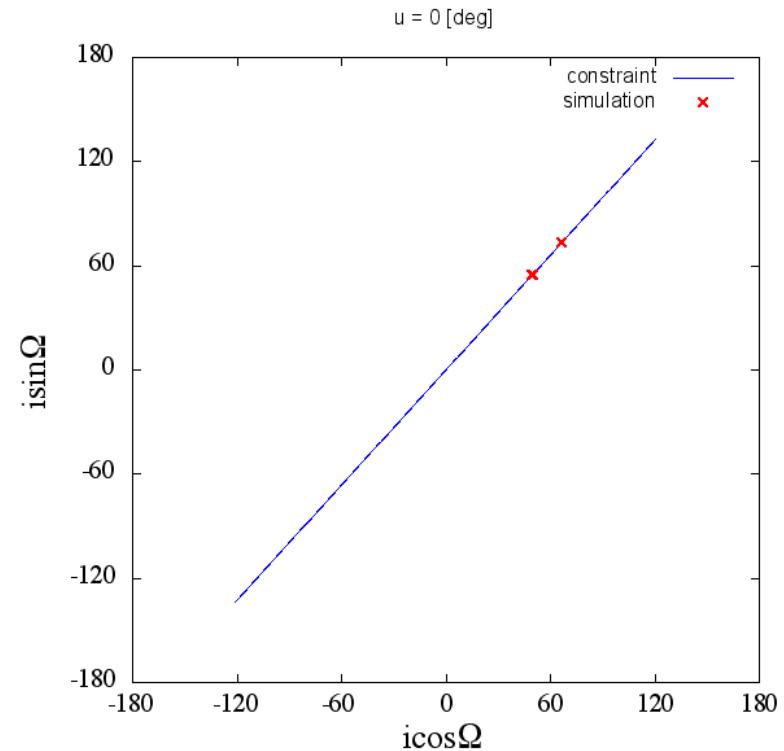
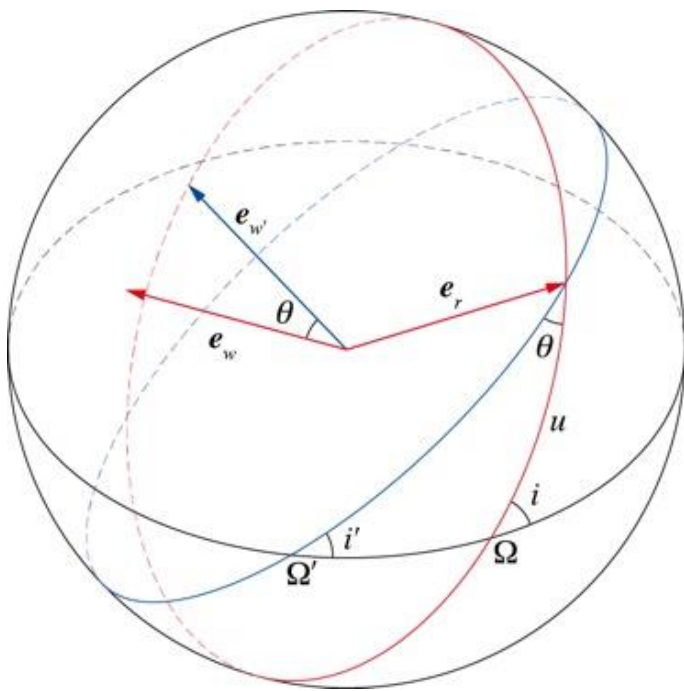
今年度の活動

- キューブサットの開発
次号機に向けたシステムの搭載
- IDEA衛星へのシステム要求解析
ミッション機器のサンプリング周期
- データ利用
デブリ環境把握，破砕事象検知

今年度の活動 | システム要求の提示

SDMのデータから得られる情報

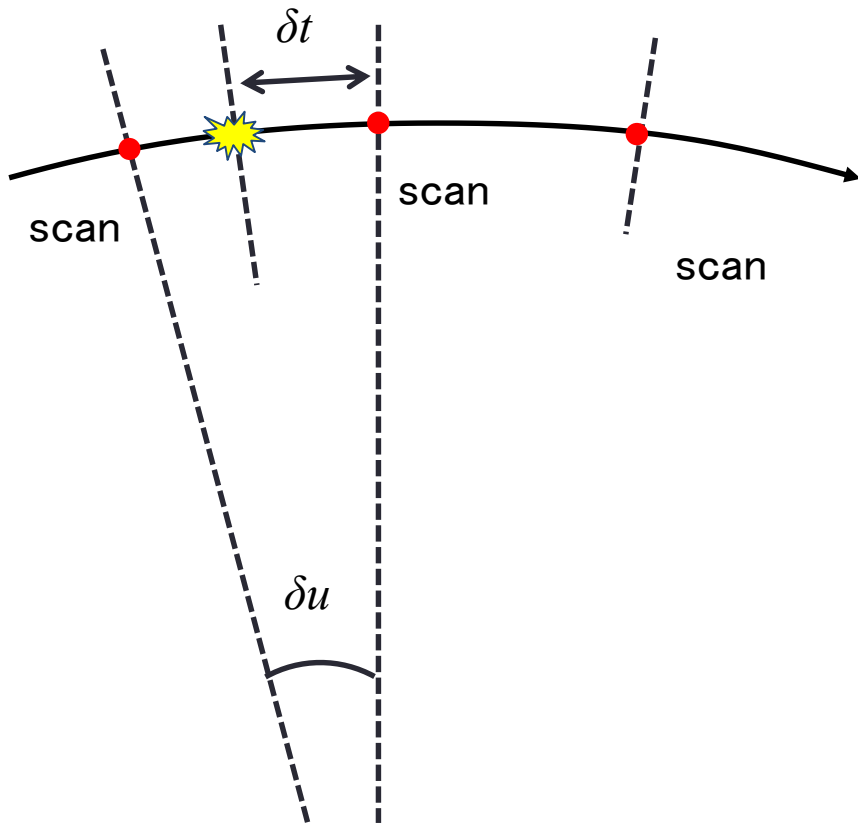
観測された位置データから，衝突したデブリの軌道面が拘束される
 (図中青線上のみ可能性を持つ)



拘束方程式 $F(i, \Omega, u) = \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{e}_{w'} = 0$

今年度の活動 | システム要求の提示

観測により生じる誤差



時刻の誤差 δt により軌道要素に誤差が生じる

- ❖ 軌道運動と摂動による軌道要素の時間変化率

$$\dot{\Omega} = -\frac{3J_2 a_e^2}{2p^2} n \cos i \sim 1^\circ/\text{day}$$

$$i = 0$$

$$\dot{u} = \dot{f} + \dot{\omega} = \frac{h}{r^2} - \dot{\Omega} \cos i \approx \frac{h}{r^2}$$

$$\sim 4^\circ/\text{min}$$

⇒ 真近点離角のみ考慮すればよい

$$\delta u = \dot{u} \delta t = (\dot{f} + \dot{\omega}) \delta t \approx (h/r^2) \delta t$$

今年度の活動 | システム要求の提示

観測頻度の設計要求

観測データの誤差が拘束方程式に与える影響

$$F(i, \Omega, u + \delta u) \approx F(i, \Omega, u) + \delta u \frac{\partial F}{\partial u} = \delta u \frac{\partial F}{\partial u}$$

(1次のテイラー展開)

$$\frac{\partial F}{\partial u} = -\sin \Delta \Omega \sin u \sin i' - \cos \Delta \Omega \cos i \cos u \sin i' + \cos u \sin i \cos i' \leq 1$$

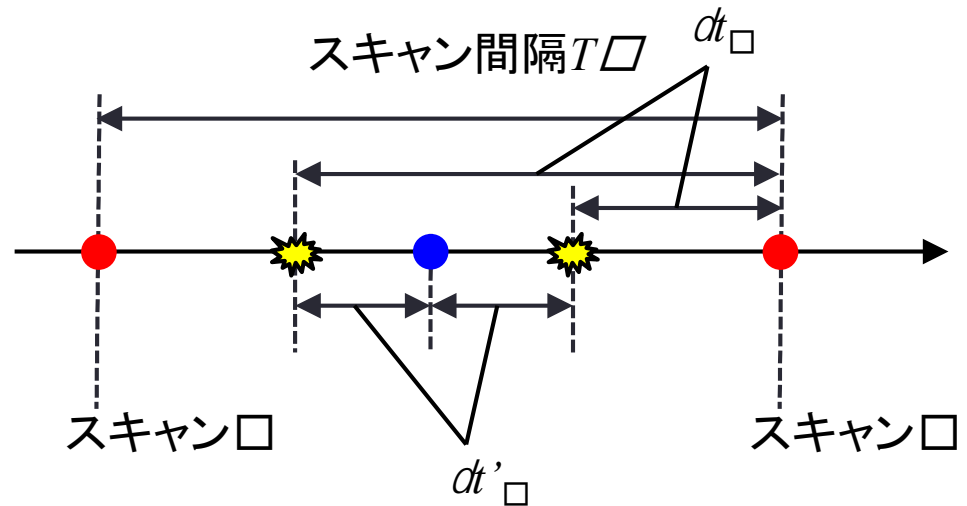
拘束方程式の誤差 (= デブリの軌道面のずれ) は, 緯度引数の誤差 δu 以下となる

▶ δu が所望の値となるよう δt を設定する

今年度の活動 | システム要求の提示

- ❖ 高度800km, 許容誤差 1° のとき, δt が10秒以内であれば良い
- ❖ データ処理の工夫による要求の緩和

スキャン時刻の中間 (青丸) を時刻データとして扱うことで, 時刻の誤差 δt をスキャン間隔 T の半分までに抑えられる



⇒ IDEA OSG 1は15秒おきにスキャンするよう設計

今年度の活動

- キューブサットの開発
次号機に向けたシステムの搭載
- IDEA衛星へのシステム要求解析
ミッション機器のサンプリング周期
- データ利用解析
デブリ環境把握，破砕事象検知

データ利用解析

- 宇宙機破砕事象の検出

破砕由来の微小デブリを検出することによる破砕発生軌道面の特定

- 微小デブリの動的宇宙環境モデル構築

データ取得ごとに随時モデルを更新できる環境モデル

宇宙機破砕事象の検出

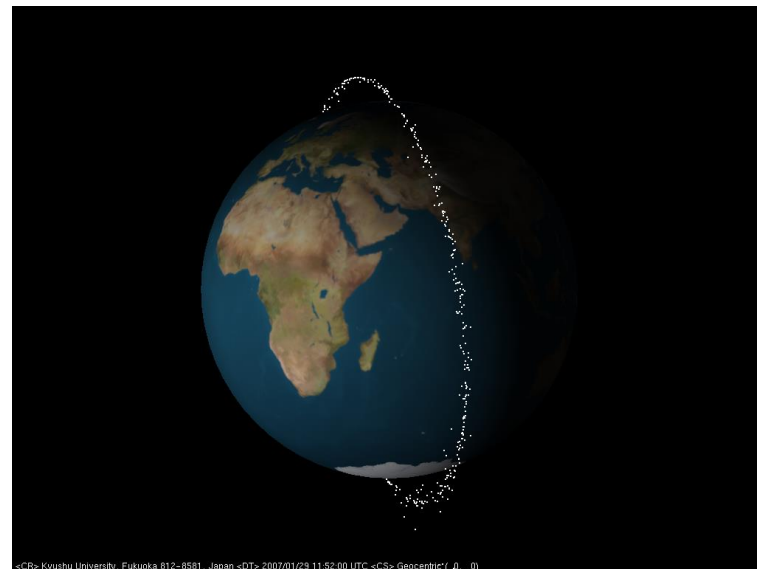
破砕発生



破砕由来のデブリの検出



破砕発生軌道面の同定



<CR> Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan <DT> 2007/01/29 11:52:00 UTC <CS> Geocentric(Z, 0)

中国衛星破壊実験



- 破砕親物体の迅速な識別
- 周辺宇宙機への警告により被害の軽減

<観測データ>

衝突位置 $r_j : j = 1, 2, \dots, n$

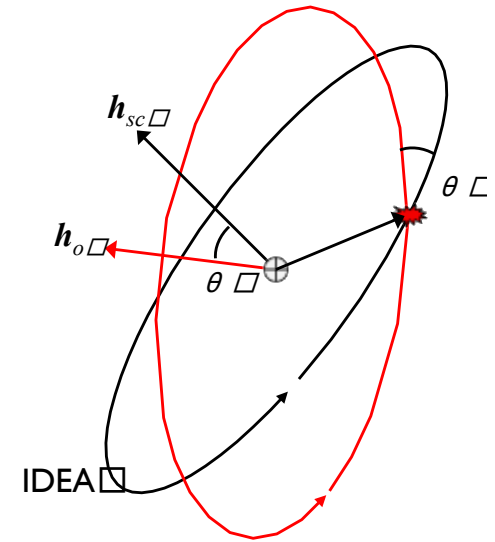
衝突時間 $t_j : j = 1, 2, \dots, n$

- ✓ 位置ベクトルと角運動量ベクトルは垂直.

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_w = 0$$

- ✓ 低軌道で支配的なJ2摂動により, 昇交点赤経が変化.

$$\dot{\Omega} = -\frac{3J_2 a_e^2}{2p^2} n \cos i$$



<拘束方程式>

$$x_j \sin \Omega \sin i - y_j \cos \Omega \sin i + z_j \cos i = 0$$

$$\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega}(t_j - t_0)$$

- x_j, y_j, z_j : j番目に衝突した時の位置ベクトル
- Ω_0 : $t = t_0$ 時のデブリの昇交点赤経
- i : デブリの軌道の傾斜角
- t_j : j番目の衝突データ取得時間
- t_0 : 最初に衝突データを取得した時間
- $\dot{\Omega}$: デブリの軌道の昇交点移動率

今年度の活動 | データ利用 IDEA-1

<拘束方程式の多次元化>

$$1 \text{ 回目の衝突データ : } x_1 \sin(\Omega_0 + \dot{\Omega}(t_1 - t_0)) \sin i - y_1 \cos(\Omega_0 + \dot{\Omega}(t_1 - t_0)) \sin i + z_1 \cos i = 0$$

$$2 \text{ 回目の衝突データ : } x_2 \sin(\Omega_0 + \dot{\Omega}(t_2 - t_0)) \sin i - y_2 \cos(\Omega_0 + \dot{\Omega}(t_2 - t_0)) \sin i + z_2 \cos i = 0$$



$$j \text{ 回目の衝突データ : } x_j \sin(\Omega_0 + \dot{\Omega}(t_j - t_0)) \sin i - y_j \cos(\Omega_0 + \dot{\Omega}(t_j - t_0)) \sin i + z_j \cos i = 0$$

- ✓ 同じ破砕由来の微小デブリを複数個検出することにより、複数の拘束方程式を得る事ができる。
- ✓ 昇交点赤経 Ω_0 、傾斜角 i 、昇交点移動率 $\dot{\Omega}$ の3つを変数とした多次元非線形方程式

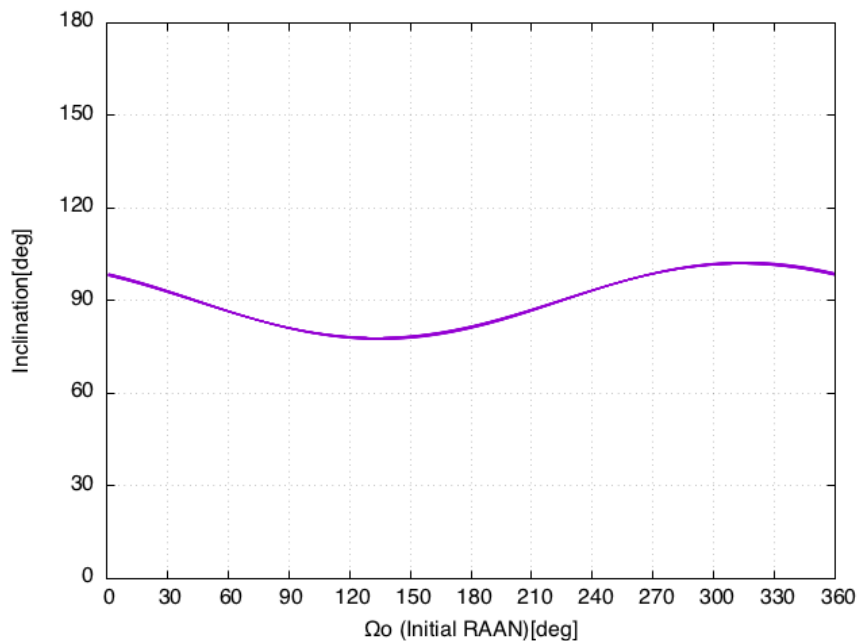


3変数の解を求めることにより、破砕が発生した軌道面を特定することができる

今年度の活動 | データ利用 IDEA-1

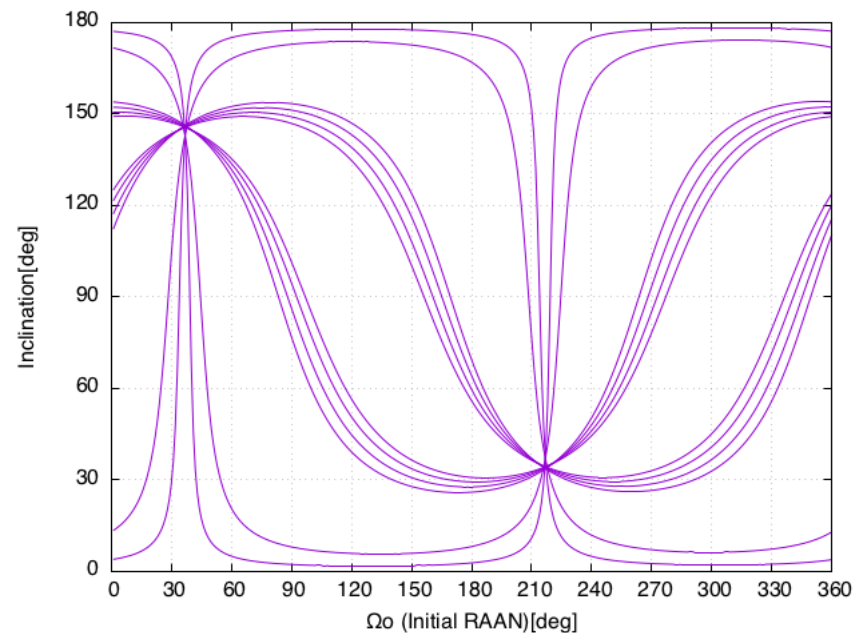
<中国衛星破壊実験>

IDEA-1 Fengyun-1c
 $\dot{\Omega} = 0.98$ VS $\dot{\Omega} = 0.98$



<破砕軌道がある順行軌道>

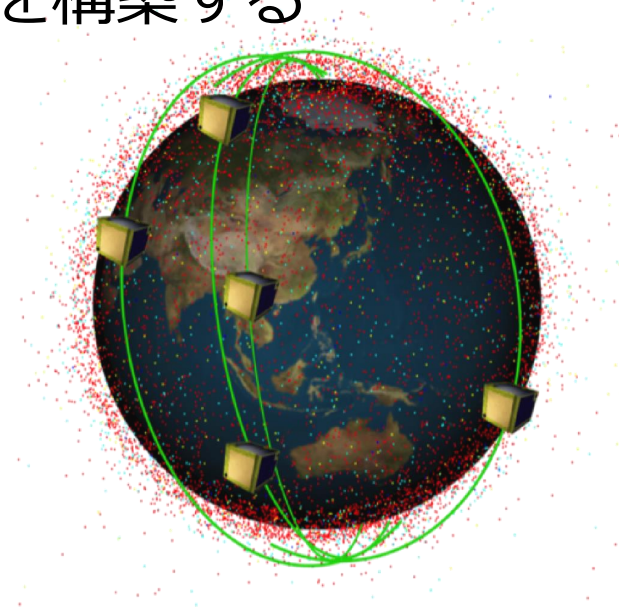
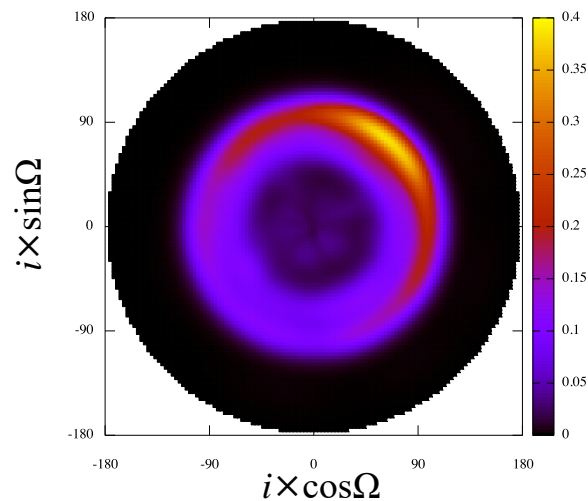
IDEA-1 順行物体A
 $\dot{\Omega} = 0.98$ VS $\dot{\Omega} = -3.1$



- ✓ 観測衛星との昇交点移動率の差が大きな破砕物体に対しては、発生した微小デブリを検出することで破砕軌道面を特定できる。

微小デブリの動的宇宙環境モデル構築

- ✓ 超小型衛星で観測された微小デブリの衝突から、デブリの分布を推定する手法を確立する
- ✓ 最終的に、デブリ分布の未来予測と任意の衛星に対する衝突率の予測が可能なモデルを構築する

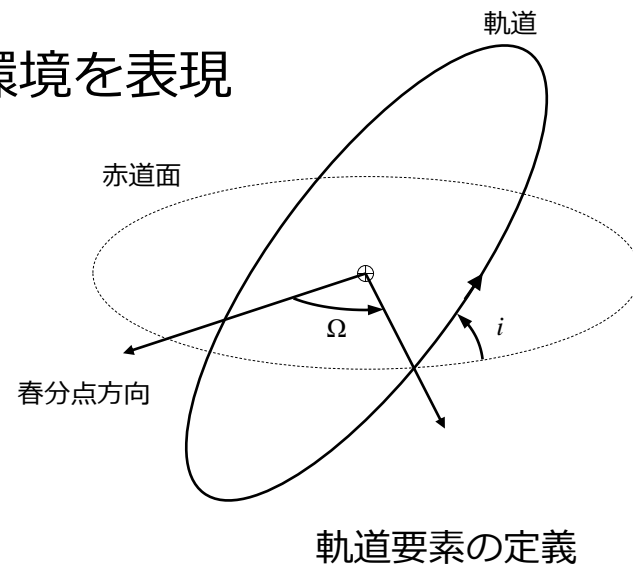
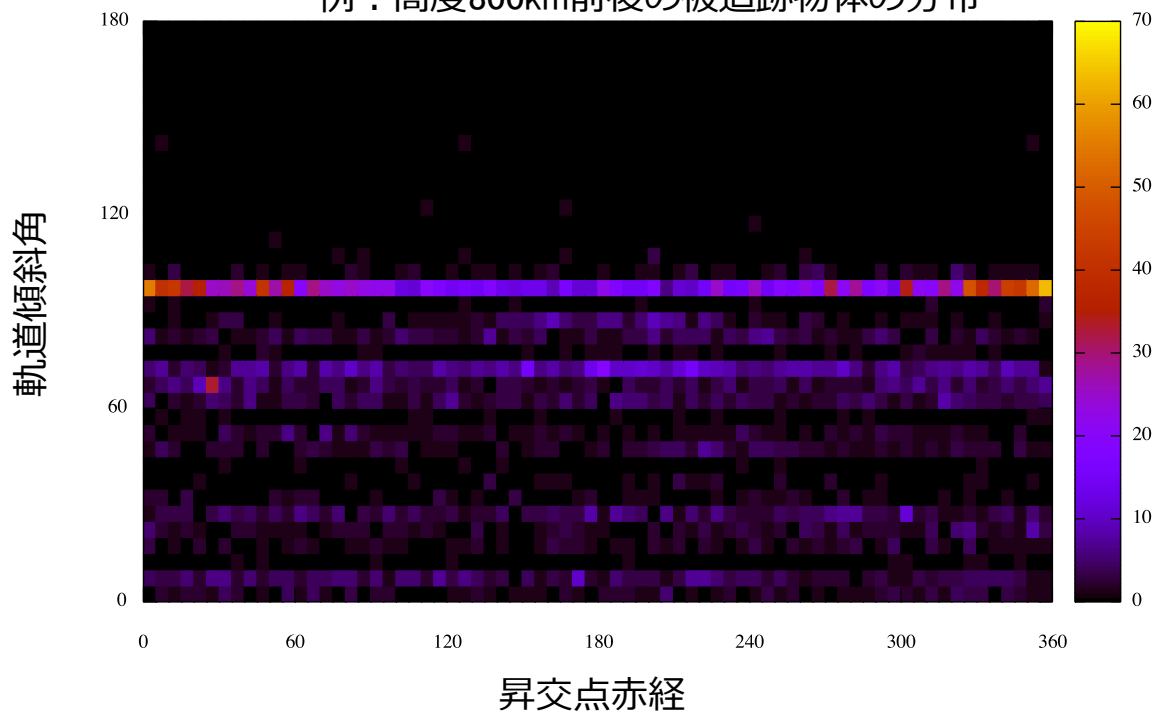


デブリ分布の表現

デブリを円軌道と仮定すると、地心距離 r は衛星と同一なので昇交点赤経 Ω と軌道傾斜角 i のみで軌道が一意に決まる

→軌道 (Ω, i) に存在するデブリの個数で軌道環境を表現

例：高度800km前後の被追跡物体の分布



今年度の活動 | データ利用 IDEA-1

手法

- ✓ データが得られる度に更新できるモデル
→ 逐次データ同化
- ✓ 環境の時間変化および観測は非線形
→ 粒子フィルタ
- ✓ デブリの分布形状を関数で近似

1. 分布形状を近似する関数を定義

$$F(\Omega, i, t)$$

2. 正規化

$$p(\Omega, i, t) \equiv \frac{F(\Omega, i, t)}{\iint F(\Omega, i, t) d\Omega di}$$

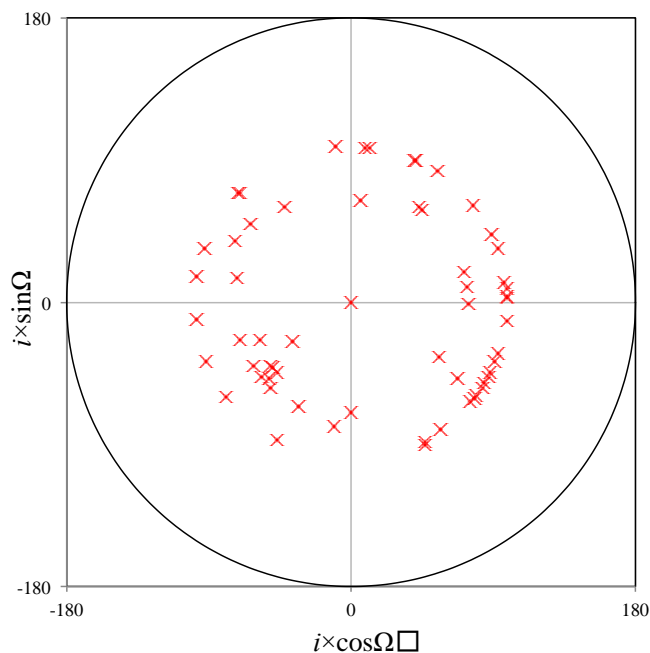
3. 空間全体のデブリ数 N_0 をかけ,
求める軌道のデブリ数を求める

$$N(\Omega, i, t) = N_0 p(\Omega, i, t)$$

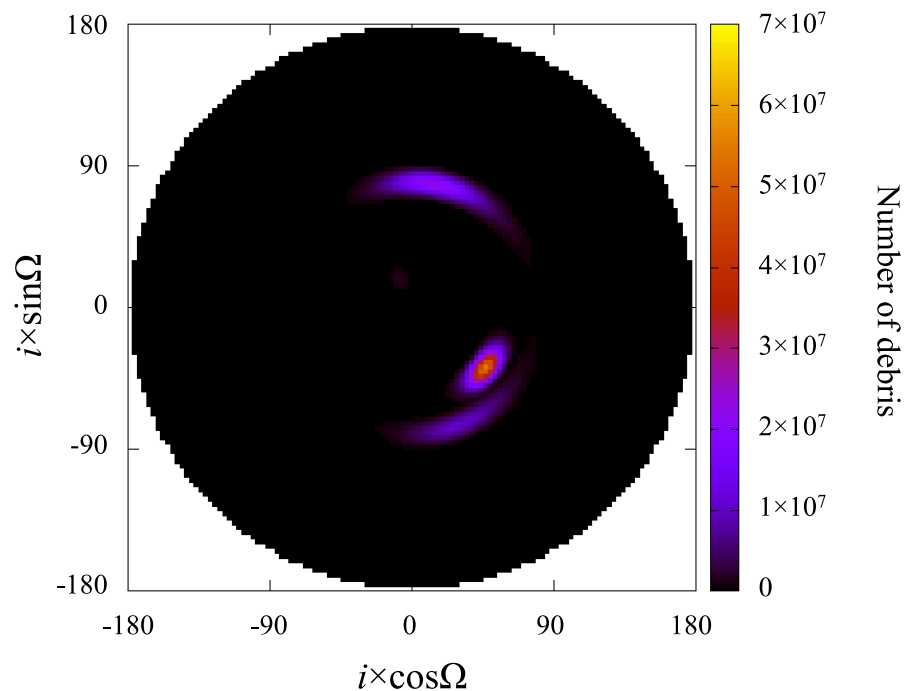
環境変数は N_0 と F の係数 (近似モデルにより異なる)

デブリ分布の推定結果

一つのプロットに 5×10^5 個のデブリ



与えられたデブリ分布



推定されたデブリ分布

今年度の活動 | データ利用のまとめ

- 宇宙機破砕事象の検出
 - 順行軌道のような昇交点移動率が，観測衛星と十分に異なるような破砕物体に対して推定可能
- 微小デブリの動的宇宙環境モデル構築
 - より正確なモデルを模擬できるような近似関数，手法の検討が必要

まとめ

- 九州大学宇宙機ダイナミクス研究室では、微小デブリ観測衛星の開発を進めている
- プロジェクトの1号機IDEA OSG 1は来年初頭に打ち上げ予定である
- 次号機のシステム開発に向けてキューブサットの開発を進めている
- 打ち上げ後に得られるデータ利用の解析をしている

今後の目標

- IDEA OSG 1の運用体制作り
- 観測データの解析・実装
- 広報活動
- IDEA次号機の開発