



「こうのとりのり」5号機による 微小デブリ計測



奥平修^{ab}、松本晴久^a、北澤幸人^a、上野遥^a、小林正規^b
JAXA^a、千葉工大^b



微小デブリ

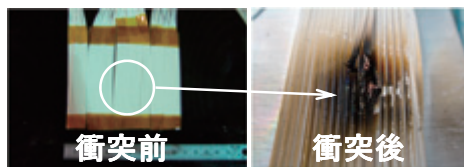


■ スペースデブリ

- ▶ ロケットや人工衛星の廃棄物およびそれらの破片や塗料片などの不用品人工物体で、数 km/sec で高速飛行している。衝突すると宇宙機や宇宙での有人活動に深刻な障害・事故を引き起こす。

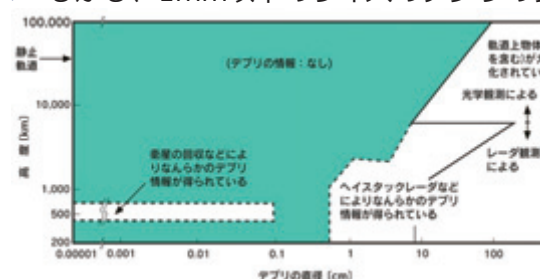
■ 100 μ m から数mmサイズのメテオロイド・微小デブリ

- ▶ 微小粒子でも衝突によりハーネスなどへダメージを与える可能性がある。

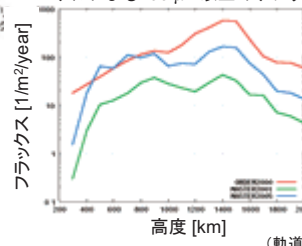


- 衝突粒子径 : 0.3 mm
- 衝突速度 : 4 km/s

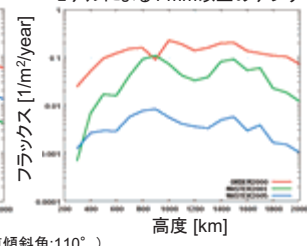
- ▶ しかし、1mm以下のサイズのデブリのフラックスはよく分かっていない。



モデルによる100 μ m以上のデブリ



モデルによる1 mm以上のデブリ



(軌道傾斜角:110°)

➡ 1mm以下の微小なデブリを計測する必要性



SDM : フィルム貫通型微小デブリセンサ

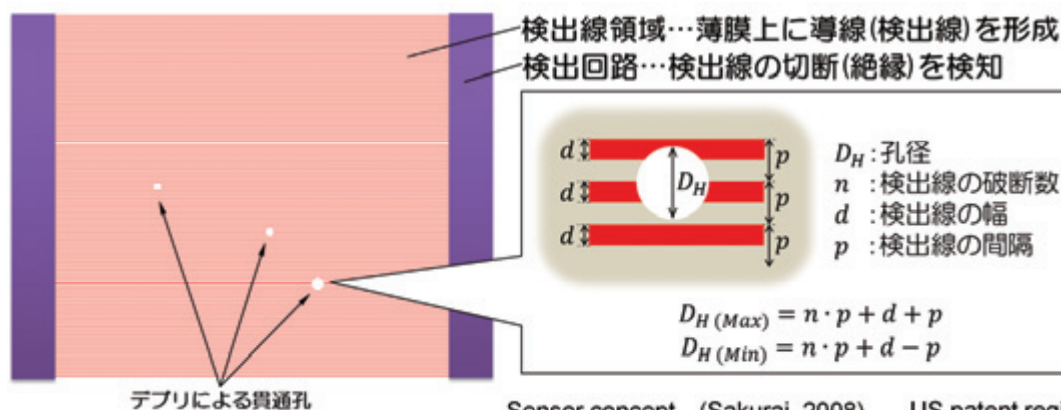


■ 新方式のアクティブセンサを開発

- ▶ 絶縁性薄膜上に、直線状導線を等間隔に細かく形成
- ▶ デブリの衝突貫通により導線が切断される。同時に切断された隣接する検出線の数からデブリの大きさを推定

■ 特徴

- シンプルな原理で精度が良い
- 柔軟な形状（サイズと形状）
- 高速衝突試験（校正試験）が不要
- 有感面積が把握できる
- 有感面積に対して軽量、低電力、低コスト
- 拡張性（速度や入射方向の測定）



Sensor concept (Sakurai, 2008) US patent registered

- 3 -



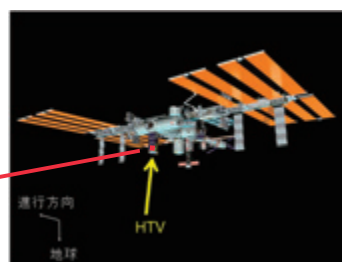
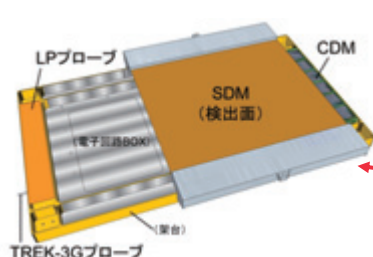
KASPER on HTV-5



- HTV（こうのとり）5号機に宇宙環境観測装置（KASPER : Kounotori Advanced SPace Environment Research equipment）を搭載
- 飛行～ISS係留～再突入の帯電電位計測、プラズマ電流計測、デブリ計測

KASPERモジュール仕様	
サイズ	75×50×12 cm
重量	約8kg
消費電力	30W（ヒータ16.8Wを含む）
テレメトリ	10秒間隔（2.1 bps）
コマンド	制御用コマンド6個

センサの主要性能			
帯電センサ	TREK-3G	接触型表面電位計測装置。HTV帯電電位を-200 ～ +200Vの範囲で計測する。	測定電圧範囲 -200V ～ +200V 測定分解能 10V以下 時間分解能 10秒
	LP	プラズマ電流計測装置。TREK-3Gの測定値を元に制御され、 $10^{10} \sim 10^{13} / \text{m}^3$ の電子密度を計測する。	測定電流範囲 $5 \times 10^{-7} \text{A} \sim 1 \times 10^{-4} \text{A}$ 測定分解能 $5 \times 10^{-7} \text{A}$ 以下 時間分解能 10秒
デブリセンサ	CDM	圧電素子型デブリ計測装置。数 μm 以上のマイクロデブリが衝突した際の電圧を計測する。	測定範囲 $100 \text{pg} \cdot \text{km/sec}$ 以上 時間分解能 1秒程度
	SDM	フィルム貫通型微小デブリ計測装置。薄膜を貫通した $100 \mu\text{m} \sim$ 数mmのデブリの大きさを計測する。	測定サイズ $100 \mu\text{m}$ 以上 測定精度 $100 \mu\text{m}$ 時間分解能 90分以下（目標値）



- 4 -



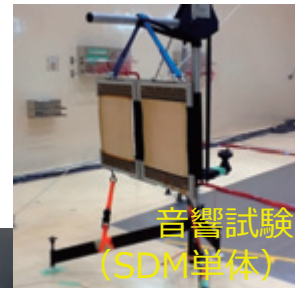
KASPERの開発



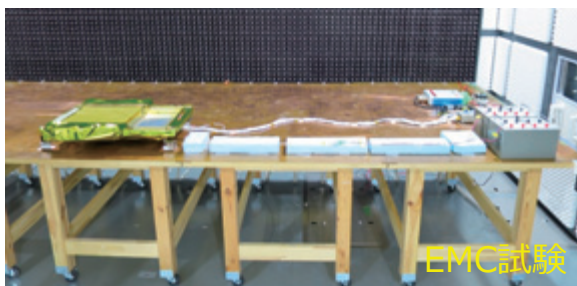
SDM (KASPER)	
2013	設計審査
	初期性能試験
	EMC試験
2014	衝撃試験
	熱真空試験
	振動試験
	最終性能試験
2015	PQR/PSR
	輸送
	打ち上げ/観測



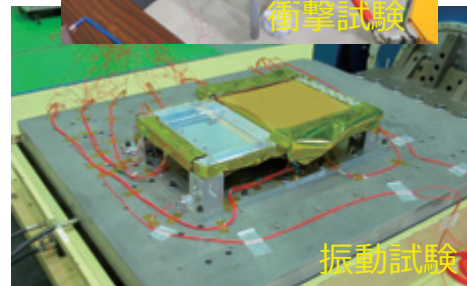
熱真空試験

音響試験
(SDM単体)

衝撃試験



EMC試験



振動試験

- 5 -



SDM高速衝突試験



■ ISASの二段式軽ガス銃を利用し、以下を検証

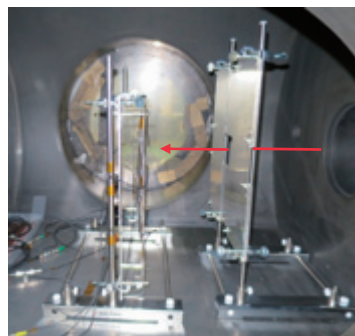
- ▶ プロジェクタイトルと貫通孔（検出線断線数）の関係
- ▶ プロジェクタイトルの材質との関係
- ▶ 耐原子状酸素（AO）コーティング材による影響
- ▶ 衝突時のイジェクタ（2次デブリ）の影響

■ プロジェクタイトル

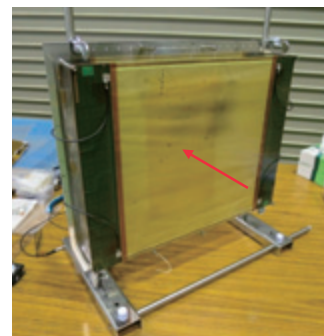
- ▶ 直径：0.3、0.8、1.6、3.2 mmのSUS304など
- ▶ 速度：5km、7km
- ▶ 衝突角度：90度、45度



二段式軽ガス銃



KASPERセットアップを模擬（SDM+MLI+AI）



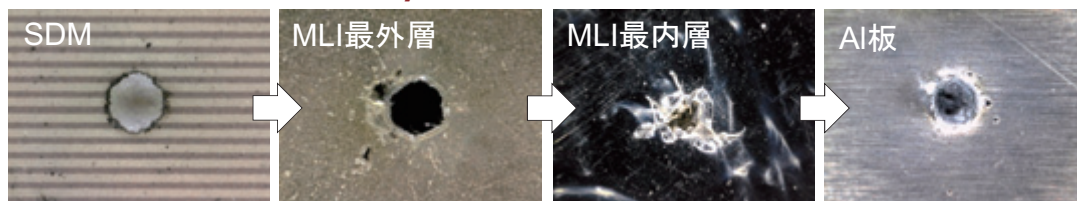
- 6 -



SDM衝突試験結果①



■ 300umのSUSを5km/sで90度衝突させた場合



■ プロジェクティル径と検出線の断線数

Projectile 直径[um]	309	309	800	1600	3200
衝突角[度]	90	45 (線方向)	90	90	90
SDMの 衝突孔					
検出線の 断線数	3 ~ 4	3 ~ 4	8 ~ 9	16	32

- 7 -



SDM衝突試験結果②

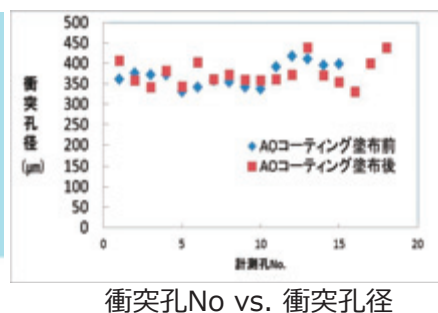
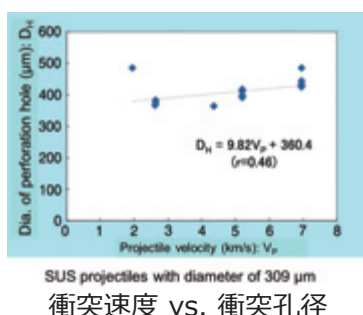
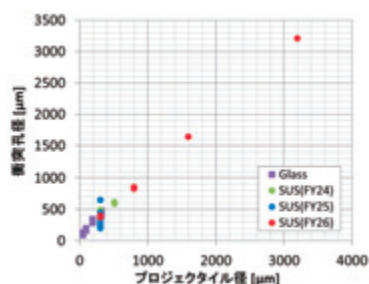


■ 衝突試験結果まとめ

- ▶ 衝突孔径とプロジェクティル径とは極めて良い相関。
- ▶ 衝突孔径は、プロジェクティルの材質や衝突速度に依存しない。
- ▶ 耐AOコーティングによる衝突孔径への影響はみられない。
- ▶ センサ背面のMLIにより、イジェクタ（2次デブリ）のセンサ到達が防止できている。



イジェクタによりMLIに生じた孔 (MLI最内層)



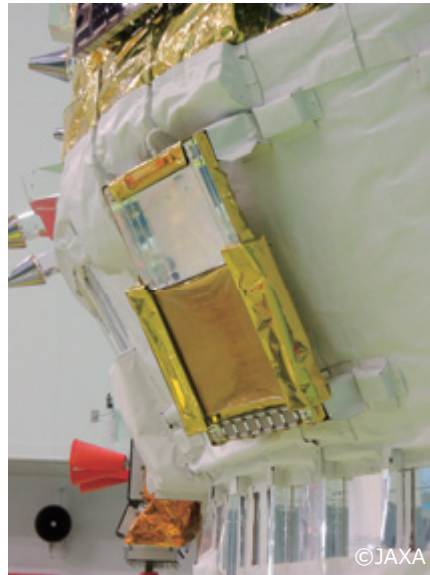
- 8 -



KASPER-フライト前



■ HTV取付～射場試験



- 9 -



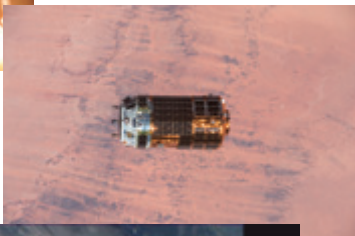
HTV-5フライト



■ 打上



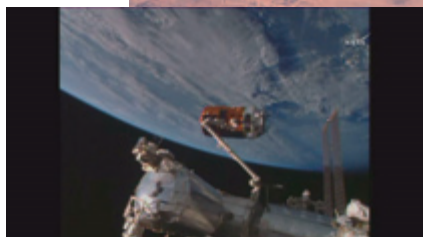
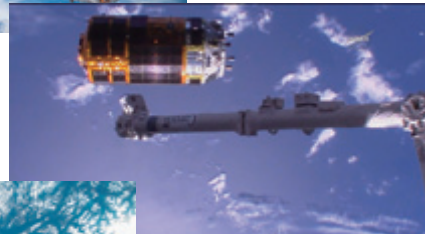
■ 単独飛行



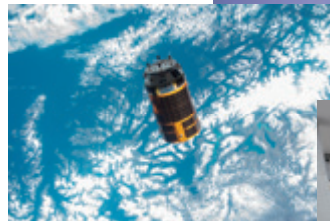
■ 係留



■ 離脱



■ 把持

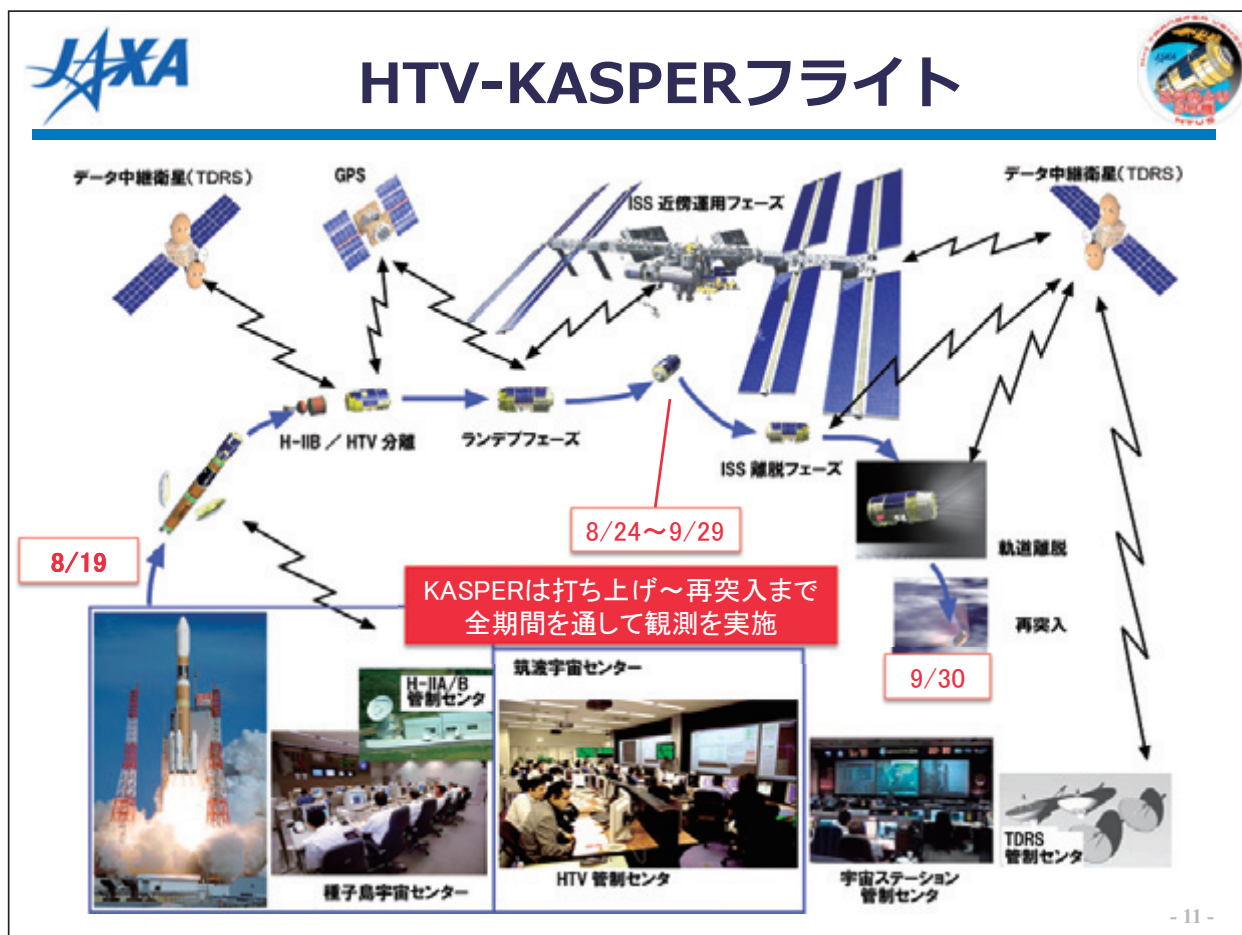


■ 単独飛行～再突入

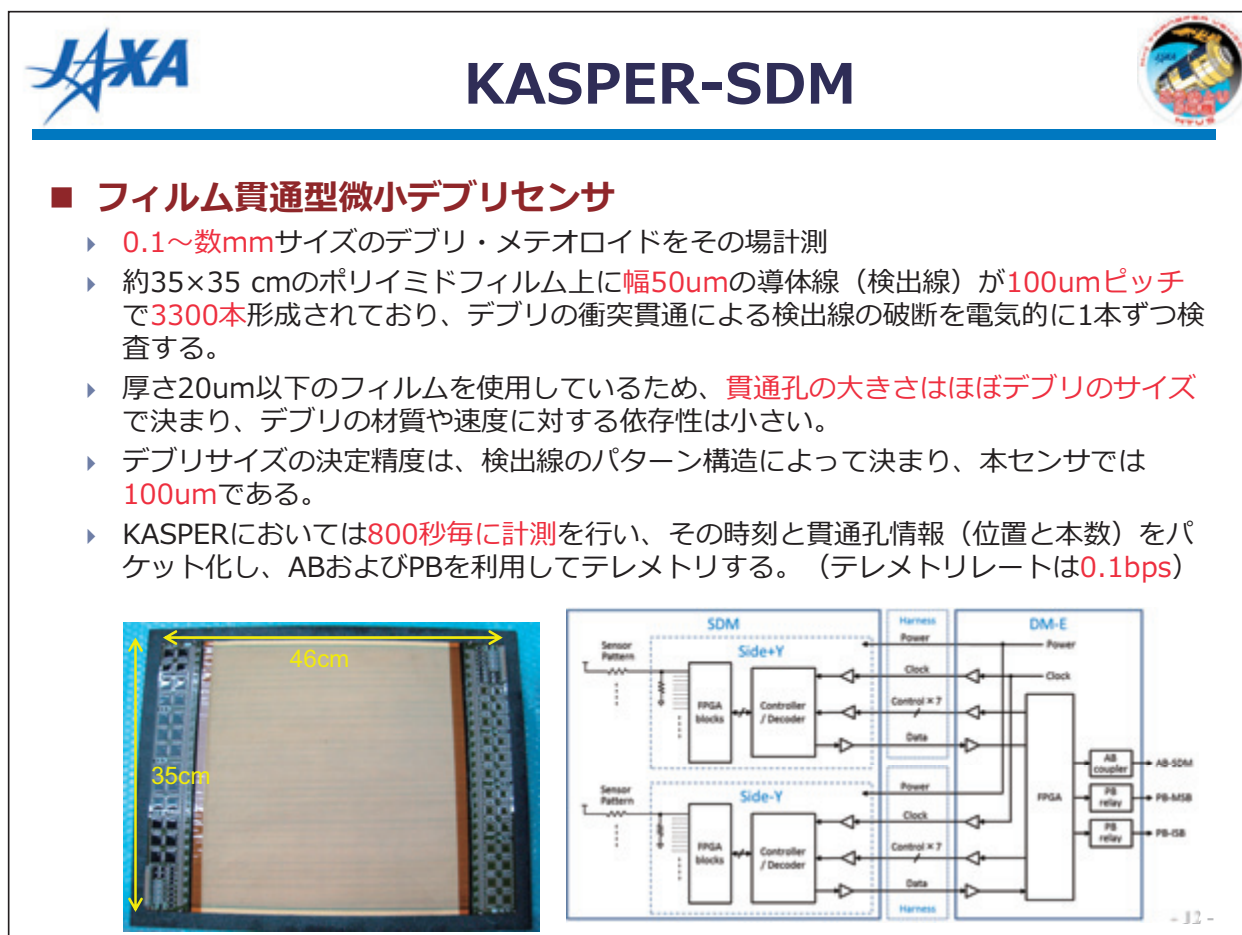


©JAXA/NASA

- 10 -



- 11 -



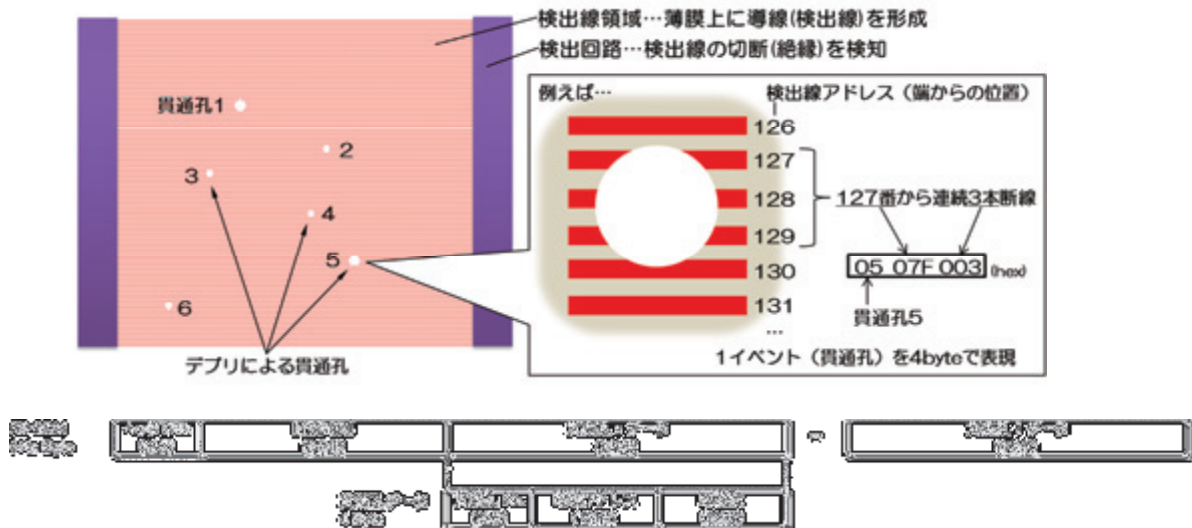
- 12 -



SDMの断線データ表現



- 検出線の総数は3300本（うち16本は打上前に断線）
- 下図のようなデータ表現にて貫通孔（断線箇所）の数、位置、断線本数をテレメトリ



- 13 -



SDMフライトデータ①



SDMデータ推移のまとめ

- 打ち上げ直前 ~ 8/20 15:50 UT頃
 - ▶ 「アドレス2446から1箇所（6本連続）の断線」のみ（打ち上げ前に設定した既知の断線）
 - ▶ その他の断線箇所はオンボードソフトにより無効化
- 8/20 15:50 UT頃 ~ 8/25 00:30 UT頃
 - ▶ 「アドレス2646から1箇所（1本or2本連続）の断線」の発生・消失を繰り返し、8/25に消失。
 - ▶ 低速度のデブリ衝突により”破れ”状態になった可能性。（製造時に切れ掛かっていた箇所が断線に至ったこともあり得る）
- 9/1の05:05 UT頃より
 - ▶ 「アドレス2836から1箇所（1本）断線」が増加
 - ▶ その後、状態は変化していないため、新たな断線が発生していると判断。
 - ▶ 100μm前後の大きさのデブリ衝突による可能性が高い。
- 9/9 20:10 UT頃 ~
 - ▶ 一度消失していた「アドレス2646から1箇所（1本or2本連続）の断線」の発生・消失が再びを繰り返し
- 9/21の06:50 UT頃より
 - ▶ 「アドレス1415から1箇所（1本）の断線」の発生・消失を繰り返し

- 14 -



SDMフライトデータ②



■ SDMまとめ

- ▶ ミッション全期間を通してセンサの健全性が維持されていたことを確認
 - ▶ センサの正常動作
 - ▶ AB/PBデータからパケットを再構成し、正常なフォーマットであることを確認。時刻、重複ビットエラー等も想定通り。ただし、再構築上のデータエラーが多発。
 - ▶ 初期データが、打ち上げ直前のデータと一致。（初期設定孔）
 - ▶ 打ち上げ直後の写真からフィルムは外観上大きな問題なし。
- ▶ デブリ衝突によるものと考えられるイベントを1つ検出
 - ▶ イベント発生時刻あたりでのCDMに特異なデータはなく、100 μ m程度（50～250 μ m）のデブリの可能性が高い。
 - ▶ 統計は少ない（1か月程度の計測）が、既存の環境モデル（MASTER）と矛盾しないレベル。
- ▶ ある検出線が断線と接続の間でゆらぐ現象が見られた。
 - ▶ 遅いデブリ衝突によりフィルムが破れた状態になったことが考えられる。（当初から切れかかっていた検出線があった可能性もある）



- 15 -

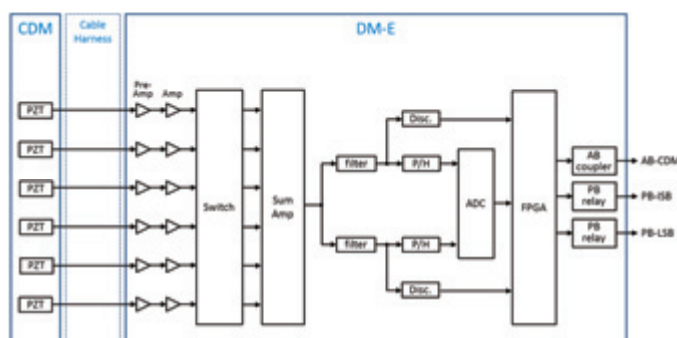


KASPER-CDM



■ 圧電素子型微小デブリセンサ

- ▶ 100 μ m以下のサイズのデブリ・メテオロイドをその場計測
- ▶ 4×4cmの圧電性素子PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）を6枚並べ、そのいずれかにデブリが衝突した際に発生する電圧パルスを検出する。
- ▶ 6つのPZTの信号はアンプを通して加算され、フィルタで2つの帯域を取り出して各々の波高を計測（AD変換）する。2つの帯域信号を比較することで衝突イベントを判断する。
- ▶ 設計上は運動量10pg・km/sec以上を検出できるが、実際の下限は軌道上でのノイズレベル（機械ノイズと電気ノイズ）に依存するため、常時ノイズレベルをモニタし、イベント判断のトリガレベル（閾値）を自動で決定する。
- ▶ 信号の2つのAD値に検出時刻と条件を付加してパケット化し、ABおよびPBを利用してテレメトリする。（テレメトリレートは0.1bps）



- 16 -



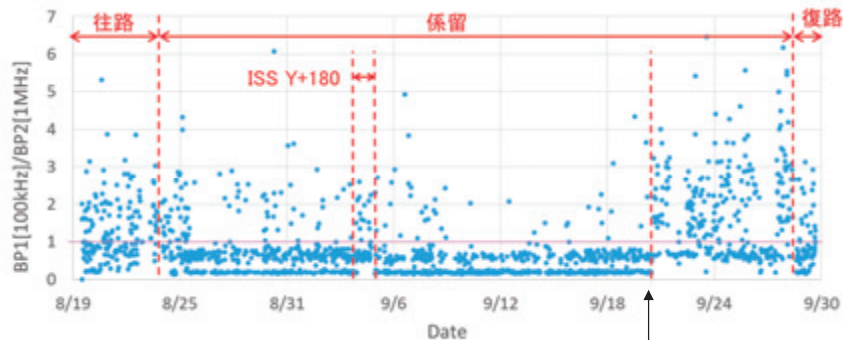
CDMフライトデータ①



■ CDMデータの推移

- ▶ BP1：100kHz帯域の振幅
- ▶ BP2：1MHz帯域の振幅

⇒ BP2がBP1に時間的に先行している場合にトリガーを発生。さらに、振幅が $BP1 < BP2$ のとなる場合が衝突イベント



■ 振幅比が高いイベント ($BP1/BP2 > 1$)

- ▶ 低周波成分が大きい。
- ▶ 検出面へのデブリインパクト（高速衝突）ではない。
- ▶ 周辺から伝わる振動の可能性。

■ 振幅比が小さいイベント ($BP1/BP2 < 1$)

- ▶ 本来は、検出面への高速粒子のインパクトによるもの。
- ▶ 予想されるデブリインパクトの頻度にならべてあまりにも多い。
- ▶ 往路、係留、復路など何度か傾向が変化している。
- ▶ 係留中は $BP1/BP2$ が0.2付近のものと0.6付近のものが強くでている。

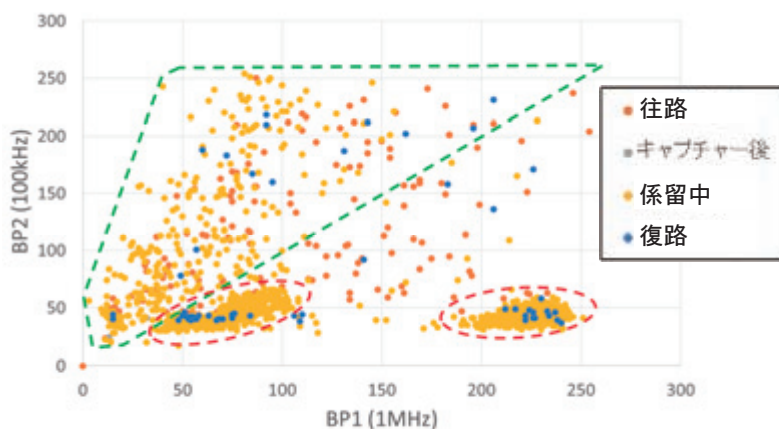
- 17 -



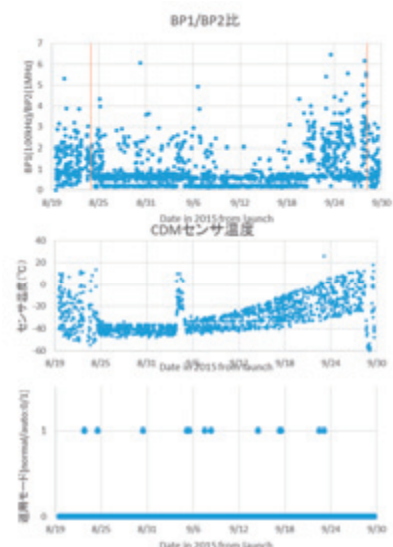
CDMフライトデータ②



BP1とBP2のスカッタープロット



※信号が飽和しているイベントは除いている



- 緑で囲まれたイベントは、周辺からの振動によるノイズ
- 赤で囲まれたイベントは、電気的なノイズによりセンサーアンプが反応している可能性
- センサ温度が低い期間に $BP1/BP2$ 比が小さなノイズが多い（特に $BP1/BP2 = 0.2$ ）
→地上での検証実験を予定。データ解析を継続。

- 18 -



CDMフライトデータ③



■ CDMまとめ

- ▶ ミッション全期間を通してセンサの健全性が維持されていたことを確認
 - ▶ PZTセンサ6枚の正常動作、温度範囲を維持
 - ▶ AB/PBデータからパケットを再構成し、正常なフォーマットであることを確認。時刻、重複ビットエラー等も想定通り。ただし、再構築上のデータエラーが多発。
- ▶ 全期間にわたりデータが取得でき、基本設計には問題ないことを確認
 - ▶ リソース制限のため、信号処理回路をかなり簡略化したが、十分機能することを実証。
 - ▶ ノイズが多く発生した局面では、auto calibration機能が働き、すぐに通常観測モードに復帰。
- ▶ SDMにイベントが発生した際（9/1 5時頃）、デブリ衝突の可能性が高いことを支持する参照データを取得することができた。
- ▶ 想定ノイズ以外のノイズが多く検出された。
 - ▶ 想定していた周辺から伝わってくるノイズ、低周波成分が支配的になるような信号以外のノイズが多く検出された。
 - ▶ 特にセンサ温度が低い状況で検出されており、センサの静電容量やアンプの負荷の変動による影響の可能性。
 - ▶ 異なる周波数帯の信号振幅を取得したことで、限られたリソース条件でも、地上解析でノイズを除去できる可能性。（解析は継続）

- 19 -

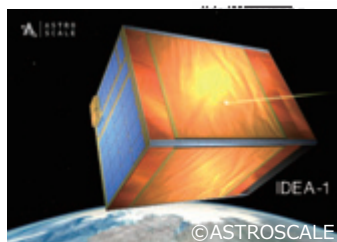


今後の微小デブリ計測

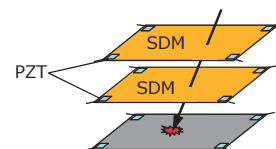


■ アストロスケール社のIDEA衛星による観測

- ▶ 軌道：600×800km
- ▶ ミッション期間：2年（TBD）
- ▶ KASPER-SDMと同等のセンサを2式搭載し、2016年後半に打ち上げ予定

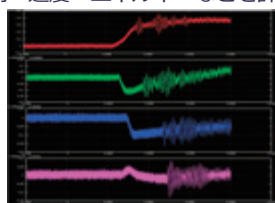
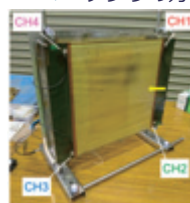


2015.8.14日経新聞



■ 次世代計測装置の開発

- ▶ 新しい製造技術の導入
 - ▶ 2次元の位置検出、低コスト化、大面積化
- ▶ SDM+PZT
 - ▶ 時間分解能の向上
 - ▶ デブリの方向・速度・エネルギーなどを計測





まとめ



■ こうのとりの5号機にて、微小デブリセンサの軌道上実証を実施した。

- ▶ SDMは100 μ m程度のデブリ検出に成功！
- ▶ センサの機能・性能に大きな問題はなかった。（CDMに課題あり）
- ▶ 詳細なデータ解析を継続実施

■ 民間衛星による高度800km付近の微小デブリ計測が予定されている。

■ 次世代のセンサを開発中

宇宙環境観測衛星「KASPER」のSDMがスペースデブリを検知しました！

「こうのとりの5号機」に搭載されているKASPERのSDM（スペースデブリモニター）が、ISS昇降中の9月1日、スペースデブリの衝突によるものと考えられる信号を検知しました。衝突したデブリの大きさは0.1mm程度とごく小さいため、この衝突によるこうのとりの本機やISSへの影響はありません。SDMは引き続きデブリ検知を行っています。なお、「こうのとりの5号機」に搭載された宇宙環境観測衛星「KASPER」は、「こうのとりの5号機」のロケット分離直後から観測を開始し、現在も順調にデータを取得しています。KASPERは、このように観測して再突入するまで観測を継続します。

▶ 「こうのとりの5号機」に搭載された宇宙環境観測衛星「KASPER」

ファン！ファン！JAXA！生放送「ホンモノ研究者に聞いてみた！！」を見ていただきました！

8月24日（月）にJAXA TVで生放送した「ホンモノ研究者に聞いてみた！！」を見てくださった方、下記から是非、ご返信ください。



ファン！ファン！JAXA！生放送「ホンモノ研究者に聞いてみた！！」

宇宙環境観測衛星「KASPER」がきれいに見えています！

2015年8月19日（水）に打上げられた宇宙ステーション補給機「こうのとりの5号機（HTV5）」には当部門が開発した宇宙環境観測衛星「KASPER」が搭載されていますが、軌道上のKASPERが良くわかる写真が撮影されたので是非、ご覧ください。



JAXA研開部門Webページ

- 21 -