

E3

軌道上微小デブリ計測技術の研究開発 -JAXA 宇宙環境グループでの開発センサを中心に- R&D on in-situ measurement MMOD sensors at JAXA

○北澤幸人(IHI), 松本晴久, 奥平 修, 木本雄吾(JAXA),
Pauline Faure, 赤星保浩(九州工大), 服部真希(東大), 花田俊也(九大),
唐木 敦(IHI), 桜井 晃, 船越国広, 八坂哲夫(QPS 研究所)
○Kitazawa, Y. (JAXA/IHI), Matsumoto, H., Okudaira, O. (JAXA), Faure, P. (Kyutech),
Akahoshi, Y. (Kyutech), Hattori, M. (The University of Tokyo), Hanada, T. (Kyushyu University),
Karaki, A. (IHI), Sakurai, A., Funakoshi, K., Yasaka, T. (iQPS)

軌道上微小デブリ(ダスト)計測の国内での研究開発を概観するとともにJAXA 宇宙環境グループで開発中のアクティブセンサの開発状況について報告する。軌道上ダスト計測の研究開発は1980年代後半からメテオロイドの計測を目的として活発化した。アクティブ型の計測器は1990年の「ひてん」(Muses-A)に搭載されたMDC(Munich Dust Counter)が日本最初の搭載である。一方、パッシブ型の計測器は宇宙科学研究所で計画された彗星からのサンプルリターンミッション(SOCCOR 計画)での研究成果をベースに開発された「キャリブレーション・エアロジェル」を用いたダストコレクタが1997年にスペースシャトルに搭載されたのが最初である。その後、アクティブ型、パッシブ型とも多くの研究が行われてきている。JAXA 宇宙環境グループは諸外国で計測実績がなく、かつ、宇宙機への影響が懸念されるサイズ領域である大きさ100 μm ～数mmのデブリの存在量の計測を目的としたアクティブ型計測器を開発した。このセンサは2014年の「こうのとり」(HTV)に搭載され実装実証試験を行う予定である。

The history of Japanese R&D into in-situ sensors for micro-meteoroid and orbital debris (MMOD) measurements is neither particularly long nor short. Research into active sensors started for the meteoroid observation experiment on the HITEN (MUSES-A) satellite of ISAS/JAXA launched in 1990, which had MDC (Munich Dust Counter) on-board sensors for micro meteoroid measurement. This was a collaboration between Technische Universität München and ISAS/JAXA. The main purpose behind the start of passive sensor research was SOCCOR, a late 80's Japan-US mission that planned to capture cometary dust and return to the Earth. Although this mission was canceled, the research outcomes were employed in a JAXA micro debris sample return mission using calibrated aerogel involving the Space Shuttle and the International Space Station. There have been many other important activities apart from the above, and the knowledge generated from them has contributed to JAXA's development of a new type of active dust sensor. JAXA and its partners have been developing a simple in-situ active dust sensor of a new type to detect dust particles ranging from a hundred micrometers to several millimeters. The distribution and flux of the debris in the size range are not well understood and is difficult to measure using ground observations. However, it is important that the risk caused by such debris is assessed. In-situ measurement of debris in this size range is useful for 1) verifying meteoroid and debris environment models, 2) verifying meteoroid and debris environment evolution models, and 3) the real time detection of explosions, collisions and other unexpected orbital events. Multitudes of thin, conductive copper strips are formed at a fine pitch of 100 μm on a film 12.5 μm thick of nonconductive polyimide. An MMOD particle impact is detected when one or more strips are severed by being perforated by such an impact. This sensor is simple to produce and use and requires almost no calibration as it is essentially a digital system. Based on this sensor technology, the Kyushu Institute of Technology (KIT) has designed and developed an educational version of the sensor, which is currently on board the nano-satellite Horyu-II, which was built at KIT and launched on May 18, 2012 by JAXA. Although the sensor has a very small sensing area, sensor data were nonetheless successfully received. Moreover, a laboratory version of the sensor fitted on QSAT-EOS, a small satellite, will be launched in December 2012. This version was developed and manufactured by Japan's QPS Institute to evaluate the sensor's capability regarding hypervelocity impact experiments at JAXA. JAXA's flight version, to be employed on satellites and/or the ISS, will be ready soon and a flight demonstration will be conducted on KOUNOTORI (HTV) in 2014. This paper reports on the R&D into in-situ measurement MMOD sensors at JAXA.

軌道上微小デブリ計測技術の研究開発

–JAXA宇宙環境グループでの開発センサを中心に–
R&D activities on in-situ measurement MMOD sensors at JAXA

2013年1月23日

第5回スペースデブリワークショップ, 調布市, 東京

○北澤幸人(IHI), 松本晴久, 奥平修, 木本雄吾(JAXA)
Pauline Faure, 赤星 保浩(九州工大), 服部真季(東大), 花田俊也(九大)
唐木敦(IHI), 桜井晃, 船越国広, 八坂哲夫(QPS研究所)

背景

宇宙の‘微小な固体粒子’（宇宙ダスト）の計測

宇宙でのダスト計測の目的／特徴

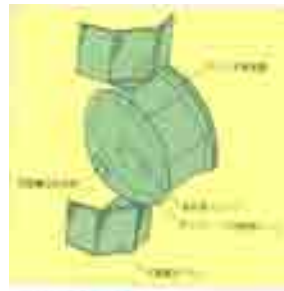
- メテオロイド(Meteoroid) : 天然物
地球起源以外の物質の研究による太陽系生成過程の研究
- スペースデブリ(Space Debris) : 人工物
宇宙‘ゴミ’の存在量とその変化、組成(発生源の情報)などの調査

宇宙ダストの軌道上計測方法

- 「パッシブ型センサ(ダストコレクタ)」
ダストを捕獲し、地上へのサンプルリターン(回収)
- 「アクティブ型センサ」
ダストの軌道情報や物性を軌道上で計測

始まりは「SOCCER計画」(1987年)

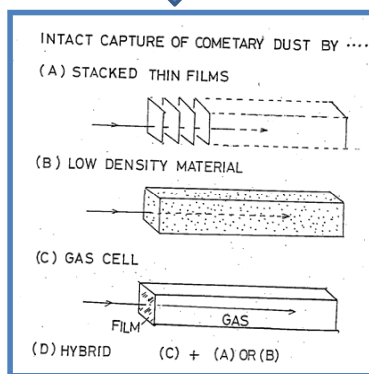
SOCCER:日米共同での彗星塵のサンプルリターン構想



(上杉,1991)

ミッション構想は米国の「STARDUST」へ

日本は「小惑星ランデブー探査計画」と併せ、「はやぶさ」へ(安部、2012)



ISAS藤原研究室の「ダストコレクタ」の研究

NASDA(現JAXA)材料Gr. での国産のダスト(微小デブリ)コレクタの開発へ

3

パッシブ型センサ(ダストコレクタ)

主なコレクタ:シリカエアロジェルを利用



シリカエアロジェル(主成分: SiO_2)の特徴

- 低密度($\sim 0.03 \text{ g/cm}^3$)
 - ➡ ダストの非破壊捕獲に効果的
- 透明
 - ➡ 捕獲したダストや衝突孔の確認が容易
- 宇宙環境に対し安定
 - ➡ 曝露実験に好適

• Status: Flight proven

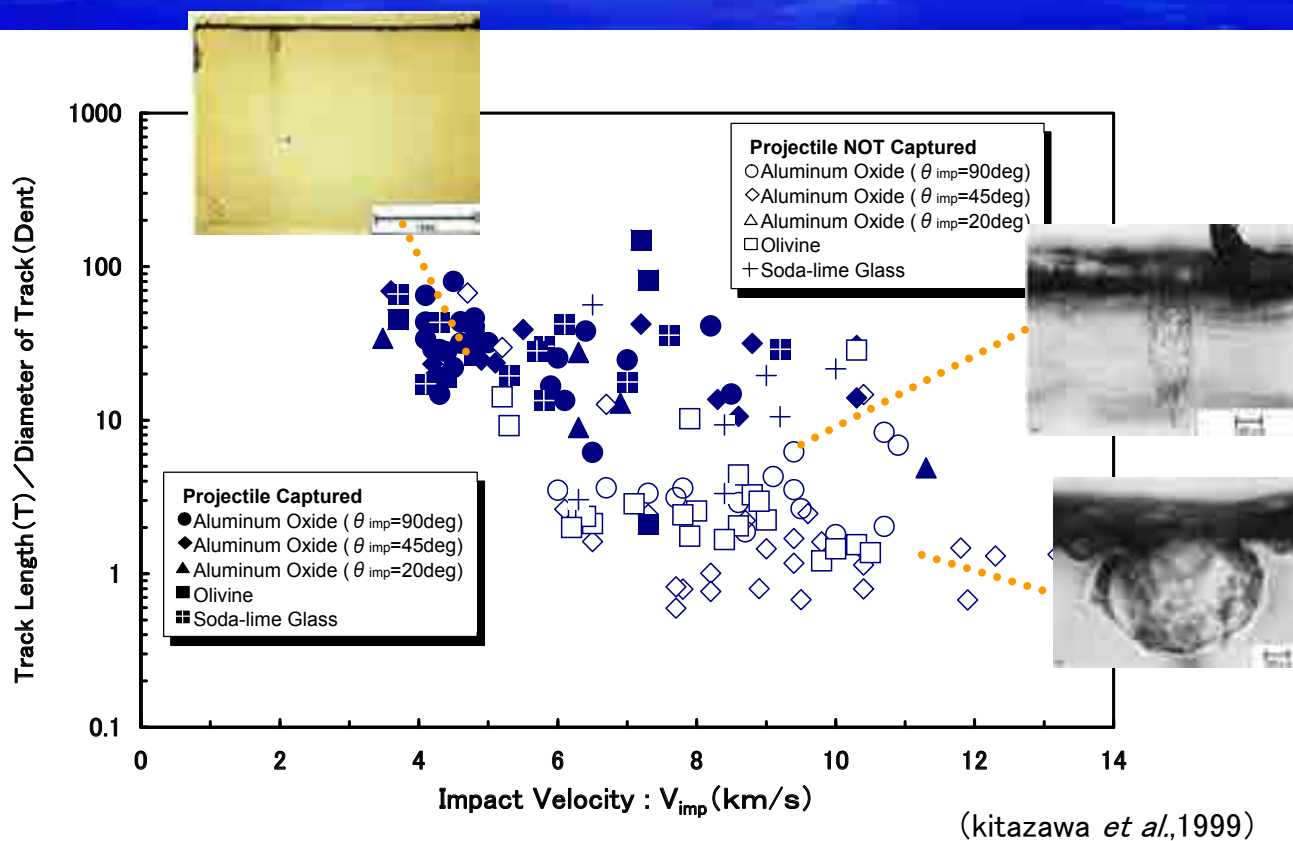
List of on-board experiments

- STS-85 (1997)
- SM/ISS #1 (2001-2002)
- SM/ISS #2 (2001-2004)
- SM/ISS #3 (2001-2005)
- JEM/ISS (2009-2010)

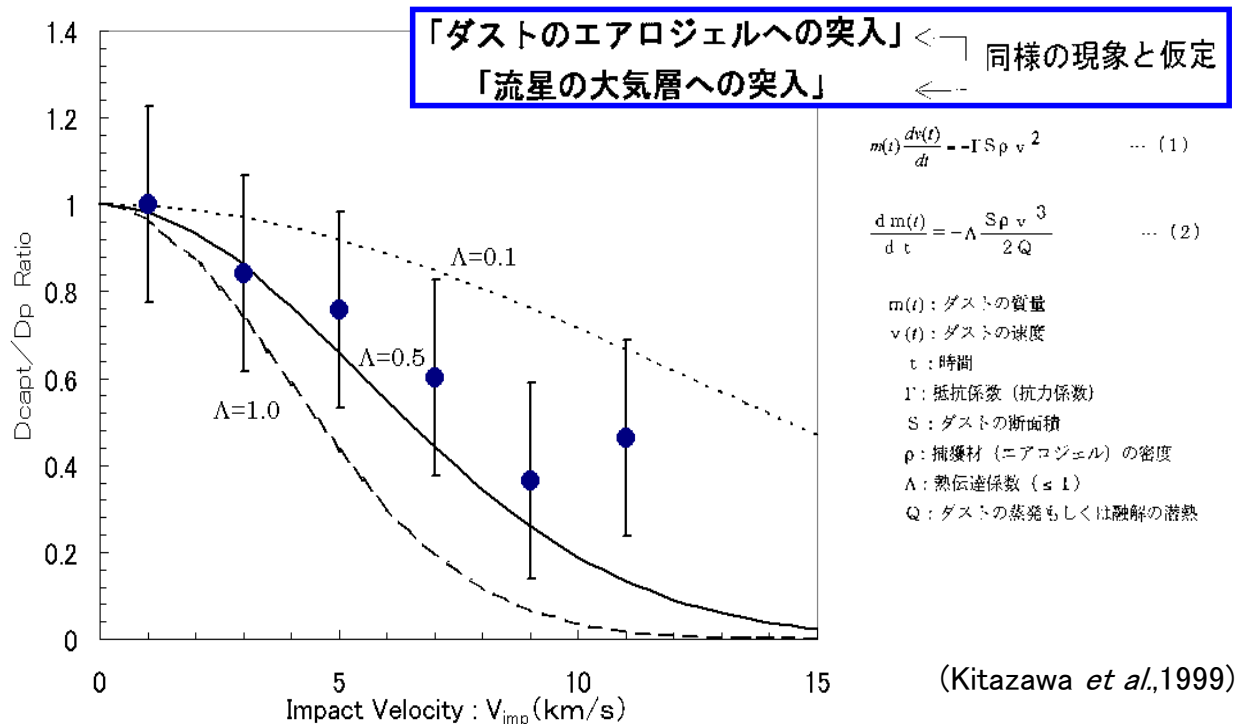
• Feature of JAXA's sensor

- “Calibrated” silica aerogel (density: $\sim 0.03 \text{ g/cm}^3$)
 - Impact parameters can be estimated roughly from shape parameters of penetrations on aerogels.

Example of Calibration Experiments

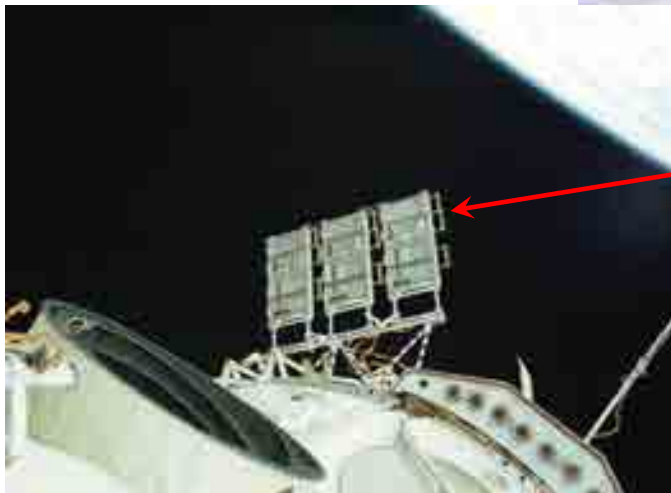
Relation of aspect ratio of the tracks (T/D_{ent}) with impact velocity

Example of Calibration Experiments



国際宇宙ステーションに設置されたMPAC & SEED

© RSC ENERGIA, © NASA, © JAXA

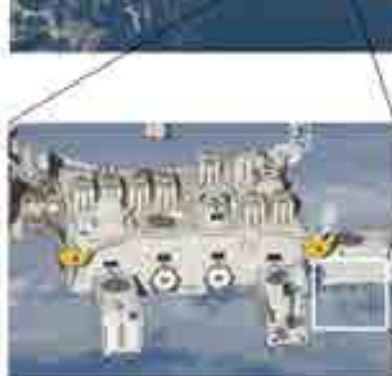
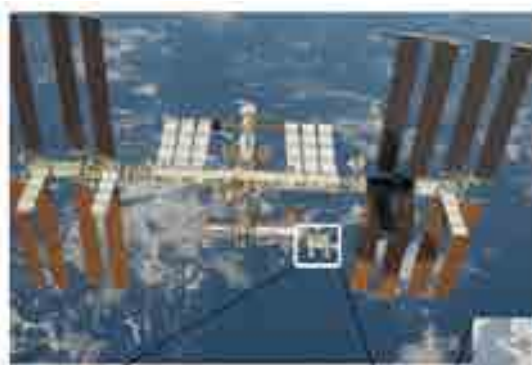


- 3式のMPAC&SEEDを設置
(2001年10月)
- 1年毎に1式を地上へ回収し分析
- 3式の比較により、ダストの年変化
の把握が可能

7
7

「きぼう」搭載MPAC

○「宇宙環境計測ミッション装置 (SEDA-AP)」のミッション機器を構成



MPAC(レリカエアロジェール)

MPAC (金プレート)

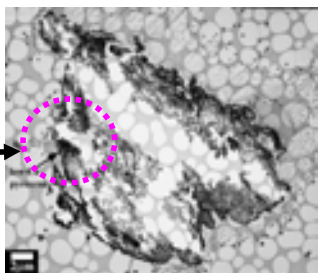
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/images/120830_mpacseed_4.jpg

8

SM/MPACでの成果の例

○成果例1:Ejecta生成デブリの確認

天然物起因の粒子

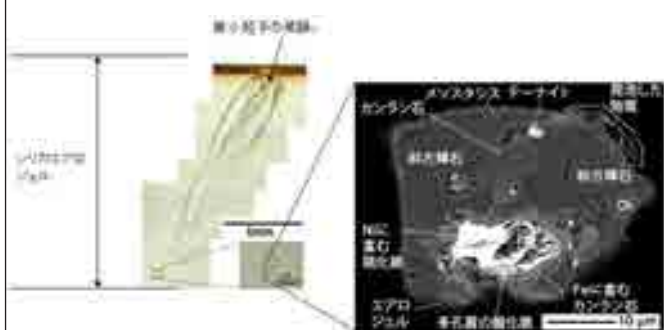


メテオロドが宇宙機外表面に衝突して発生した2次デブリと推定
(被衝突体は銀を含むペイント材の可能性)

Noguchi et al. 2006等による。

捕獲物(直径約20 μ mのデブリ)の切片のTEM画像

○成果例2:これまでにない鉱物学的特徴を持つ新種の地球外物質の発見



○茨城大・HP

<http://www.ibaraki.ac.jp/news/2012/08/310959.html>

○JAXA・HP

http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/120830_mpac_seed.html

T. Noguchi et al., A chondrule-like object captured by space-exposed aerogel on the international space station, Earth and Planetary Science Letters 309 (2011) 198–206

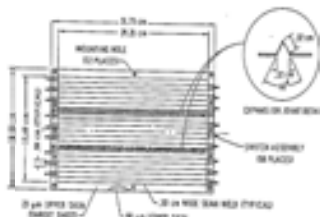
9

アクティブセンサの例

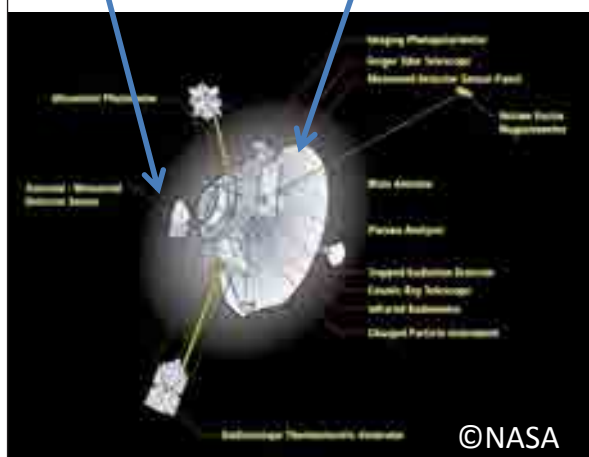
○パイオニア搭載センサ



Soberman et al.,1974



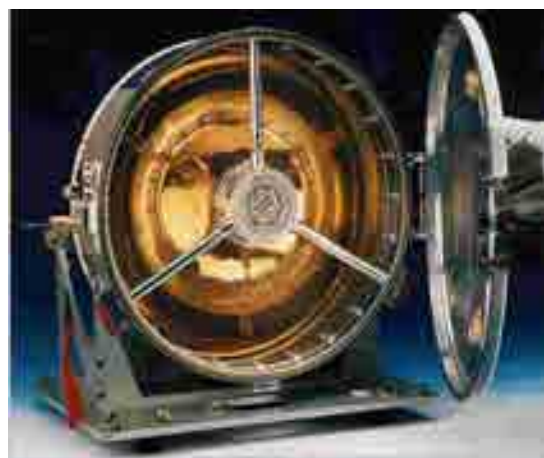
Humes et al.,1974



Pioneer 10号

©NASA

○ESAのダストセンサ



Geostationary Orbit Impact Detector (GORID)

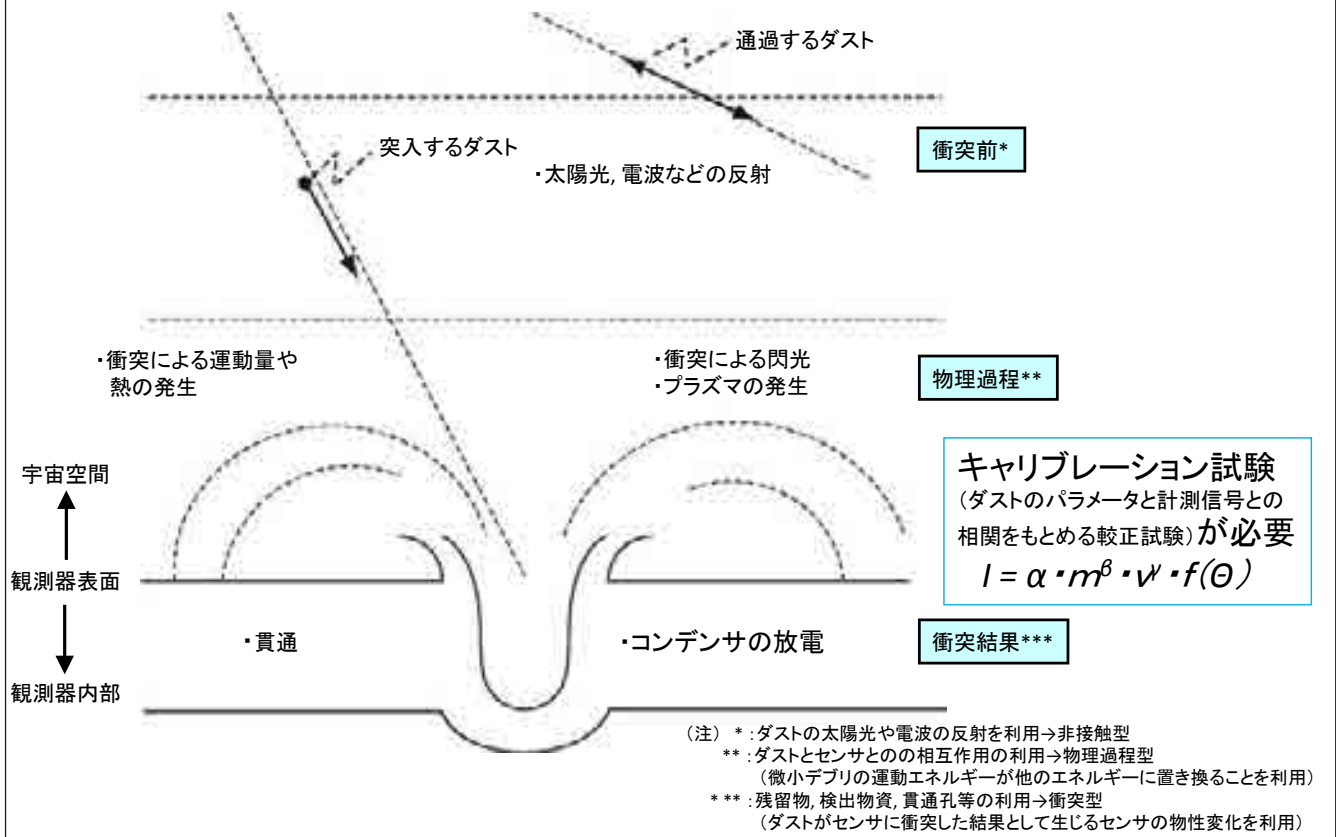
計測面積: 0.1 m².

(計測エリアの直径は43 cm)

(ESAによる)

微小デブリ計測器(アクティブ型センサ)の計測原理

Concepts of micro-debris detection techniques (McDonnell [1978]、山越 [1983]等)



国内でのアクティブセンサ例



ひてん(MUSES-A)
(1990年打上げ)

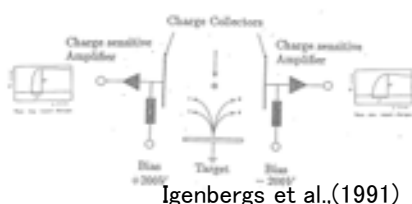


Munich Dust Counter (MDC)
(故山越和雄教授提供)
開口面は約10cmx10m



「のぞみ」搭載用
Mars Dust Counter (MDC)
(佐々木, 2007)
開口面は約10cmx10m

○MDCの原理



衝突プラズマの波形からのダストの衝突速度・質量をもとめる

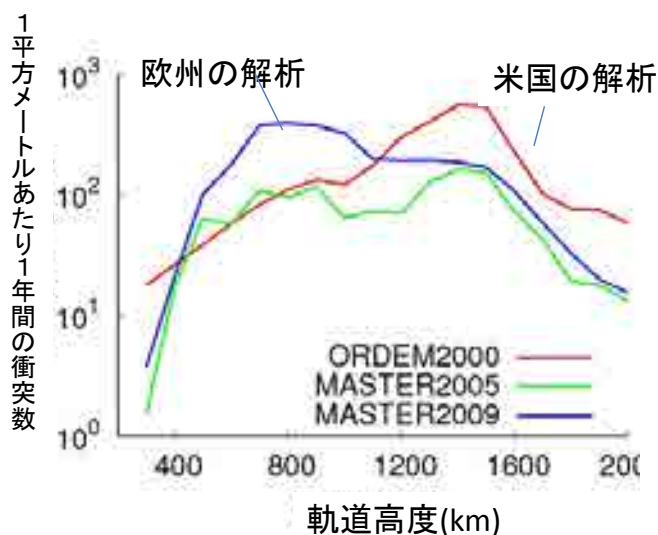
【最近の主要センサ】

○IKAROS搭載のPVDFセンサ(ALADDIN)
(例えば, Yano et al., 2012)

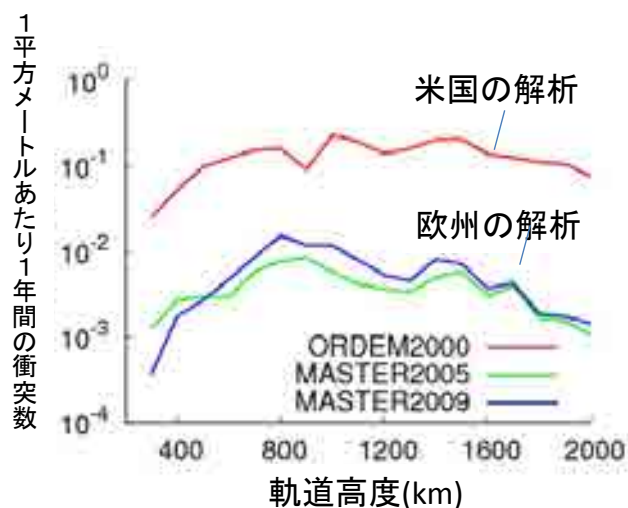
○水星探査機(BepiColombo)搭載用のPZT素子センサ(MDM)
(例えば, Nogami et al., 2010, Hattori et al., 2012, Hattori et al., 2013)

微小デブリ環境の問題点

デブリの大きさ:
約100 μm (=0.1mm)

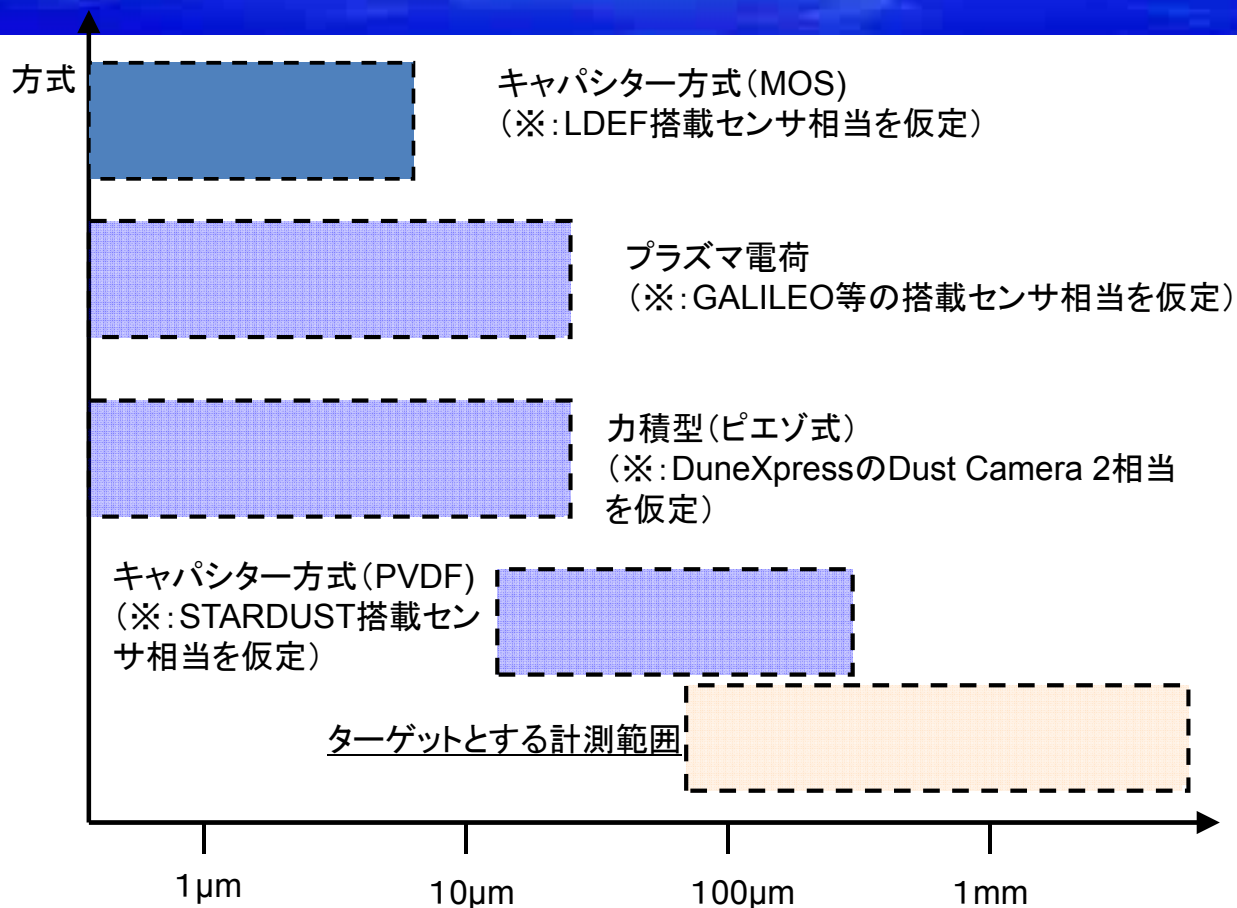


デブリの大きさ:
約1 mm



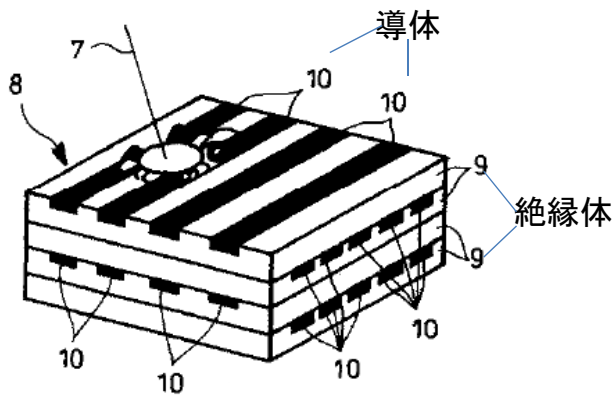
(Kanemitsu et al., 2012)

搭載実績のある方式の計測範囲と研究開発ターゲットとする範囲



他と違うアイディアは？

○1990年度の実用新案から



森初男(1990)

IHI 出願実用新案 (実願平2-94558)

○絶縁性の薄板に、直線状の細長い導線のパターンを形成。積層構造

○導線の破断を電氣的に検知することにより、ダストの衝突(貫通)を検知する。

○導線の破断数、破断層数から「衝突クレーター」の大きさを測定し、ダストの大きさ(質量)、速度、方向を推定

【アイディアとしての困難さ】

○「衝突クレーター」ではクレーターの大きさが、ダストの大きさ(質量)、速度、方向の関数となり、一意的に決定が困難

○キャリブレーション試験が膨大

【技術的困難さ】

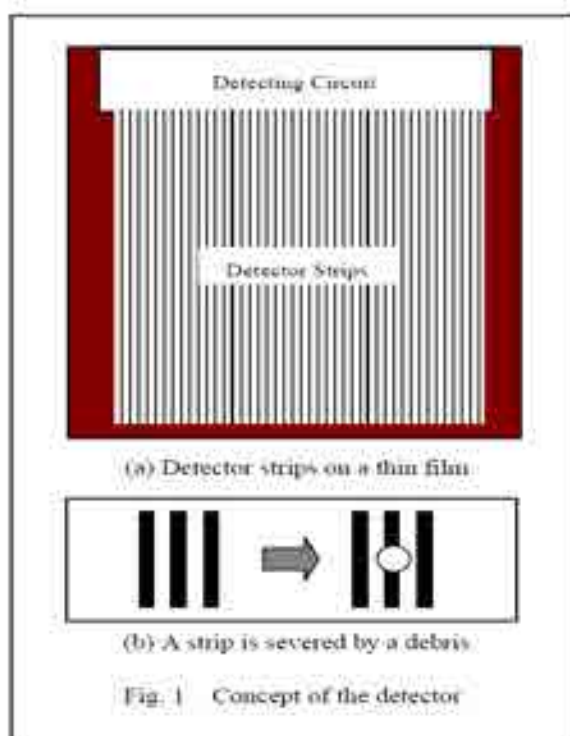
○細い導線を細かいピッチで生成するのが困難

○特に導線の検出回路との接続が困難

○軽量で大面積なものがつくりにくい

15

微小デブリセンサの計測原理 ＜アイディアのブレークスルー＞



QPS方式

(1)計測対象／計測項目

- ・計測対象: 粒径 $100\mu\text{m}$ 以上のダスト
- ・計測項目: **デブリ(ダスト)粒径、衝突頻度**

(2)基本原理

厚さ約 $10\mu\text{m}$ ～ $20\mu\text{m}$ 程度の絶縁性の**フィルム**上に、(空間周期) 約 $100\mu\text{m}$ 程度の直線状の細長い導線(太さ約 $50\mu\text{m}$)のパターンを形成(図1(a))。

検出線の破断を電氣的に検知することにより、ダストの衝突(貫通)を検知する。

破断した導線の数、導線の幅、ピッチからダストのサイズを計測(図1(b))。

[桜井(2008)による。(有)QPSとIHIで共同特許出願中]

16

製造技術の発展 ＜技術のブレークスルー＞

エッチング技術を用いセンサ面に導線を形成

はやぶさ衛星のターゲットマーカ、
80万人の名前を印字(AI微細エッチング法、
文字サイズ30 μm 、線幅5 μm)



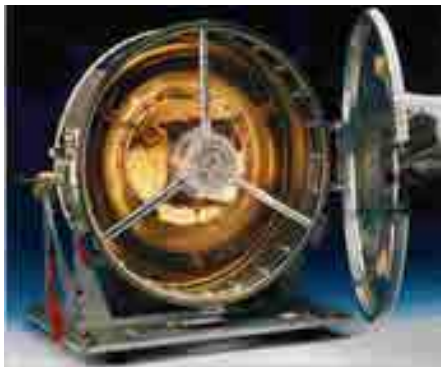
フレキシブルプリント基板製造技術を応用し、センサ部をプリント基板の一種として作成

フレキシブルプリント基板(フレキシブルプリント
きばん)は、柔軟性があり大きく変形させることが
可能なプリント基板。

厚み12 μm から50 μm のフィルム状の絶縁体
(ベースフィルム)の上に導体箔を形成した構造



JAXA宇宙環境Grの開発センサ



(直径43 cm)



(35 cm(横) x 30 cm(縦))

○欧州が開発したセンサの一例

- ・大きさ0.1mm程度以下のデブリ計測用
- ・質量5kgと重く、信号処理も複雑。
- ・計測項目がデブリには十分過ぎる。
(速度、質量、方向、基本組成、
ダストの帯電等)
- ・キャリブレーション試験の量が膨大

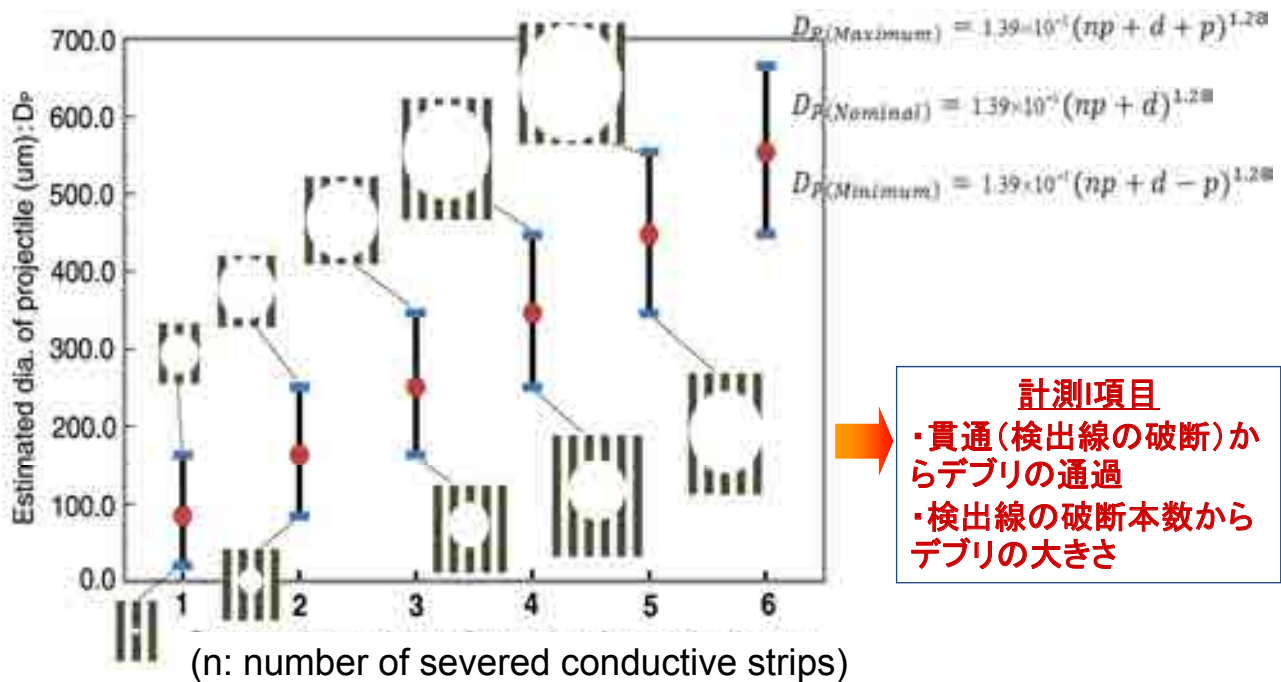
⇒多種多様な衛星への搭載は困難

○JAXA宇宙環境Gr.開発センサ

- ・大きさ0.1mm～数mmのデブリの計測用
- ・質量0.2kg程度と軽く、信号処理も単純
- ・フィルム状(厚さ:0.025mm)のため、形や大
きさの調整が容易

⇒多種多様な衛星への搭載が可能

超高速衝突試験によるセンサ性能評価 (検出線の破断本数に対するデブリ径)



Kitazawa et al., 2010

19

QPS方式のセンサラインアップ

○Educational Model (under Operation)



- 搭載機
高電圧技術実証衛星「鳳龍式号」
- 打上げ
H24年5月18日 H-II A21号機 @種子島宇宙センター
- 特徴
IH/QPS研究所の特許及びJAXAの開発情報を元に九州工大で独自の開発・製作・搭載

○Laboratory Model (will be launched after December 2012)



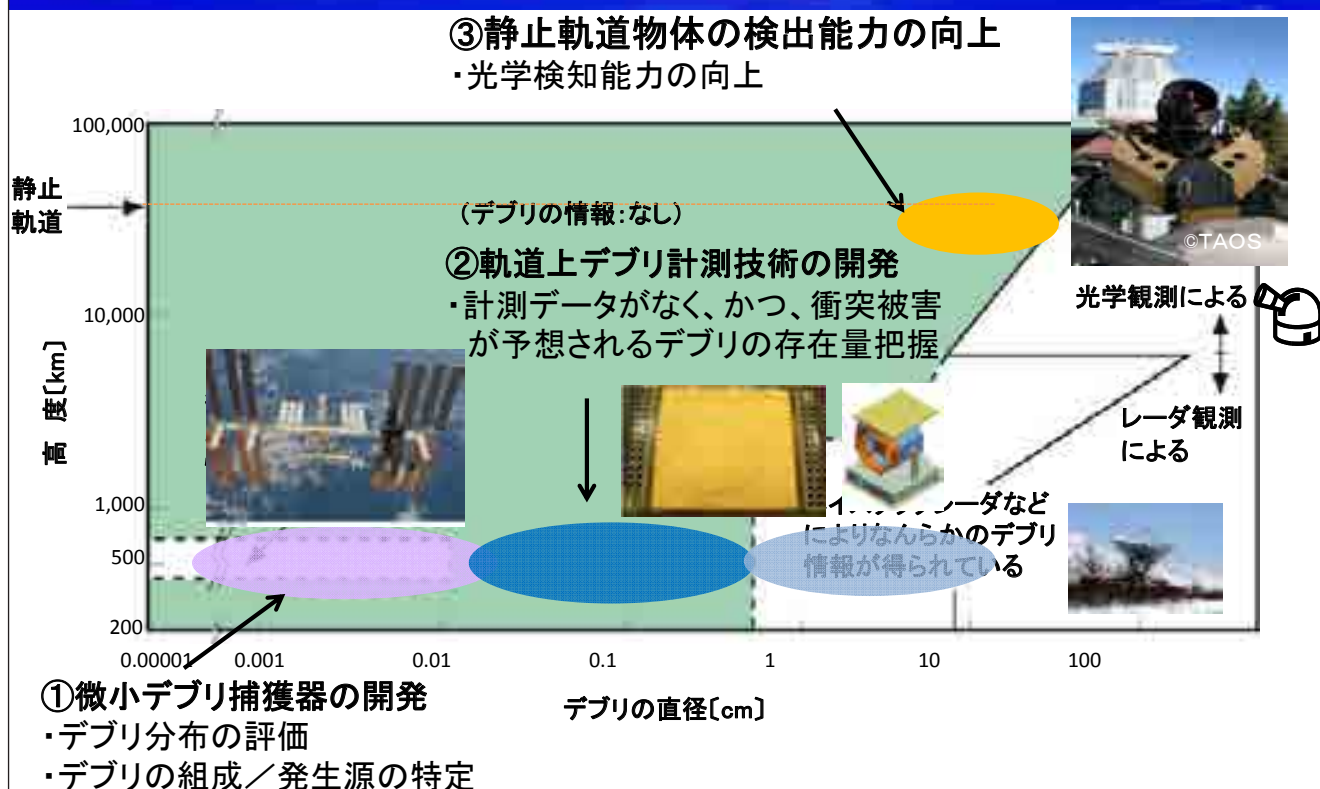
- 搭載機
九州の『超小型地球観測システム実証衛星、(QSAT-EOSstration)』
- 打上げ
H24年12月(以降)ロシアのヤスネ基地
- 特徴
JAXAセンサ開発の委託業務の過程で(有)QPS研究所が製作した「研究室モデル」をQSAT-EOSチームが製作・搭載。

○JAXA Flight Experiment Model



- 搭載機
TBD
- 打上げ
TBD
- 特徴
フレキシブルプリント基板技術により大面積化を実現

研究開発のフィールド



今後の主要課題

- JAXAアクティブセンサの早期のフライト実証
- JAXAアクティブセンサの本格運用／ネットワーク化
ex. 九大のIDEAの提案
(環境変動の迅速な把握体制の整備)
- データ／技術アーカイブの整備・リスク評価への活用
- 「環境モデル」構築



<http://idea.aero.kyushu-u.ac.jp/>

(九州大学花田研究室による)

<http://idea.aero.kyushu-u.ac.jp/>