

「宇宙用ダストセンサ」のこれからと IIC

丸 博史^{*1}
Maru Hiroshi

宇宙空間に浮かぶ大きさが $100\mu\text{m}$ ～ 数 mm のダスト（デブリおよびメテオロイド）は、高速（数 km/s）で衛星に衝突すると故障を引き起こす可能性があることがわかっている。しかしながら、宇宙空間におけるこのダストの分布は不明である。これを計測するための宇宙用ダストセンサが有限会社 QPS 研究所殿と株式会社 IHI 殿によって提案された。原理は薄いポリイミドフィルムに $100\mu\text{m}$ ピッチで直線パターンをひき、これにダストが衝突する時の断線を電氣的に計測するものである。

当社の制御システム事業部では JAXA 殿・IHI 殿からの契約のもとで、このダストセンサの開発を数年前から行ってきた。ここでは今まで開発したダストセンサの紹介と今後の開発目標を紹介する。

キーワード：宇宙用ダストセンサ、衛星、宇宙ダスト（デブリ）、Printed Electronics

1. はじめに

宇宙用ダストセンサとは、薄膜のフィルムに $100\mu\text{m}$ ピッチで直線パターンをひいたものである。これに宇宙空間でダストが衝突すると貫通しパターンが断線する。これを電氣的に検知する。この原理は、QPS 研究所殿と IHI 殿の共同特許と

なっている。

このセンサでは、 $100\mu\text{m}$ ～ 数 mm のダストの検出に使用される。なお、このダストセンサはダストが衝突した時の孔径が大きくなるように、可能な限り薄膜を使用している。

この検出原理と、製造プロセスの検証のため QPS 研究所殿が研究室レベルのモデルを製作し

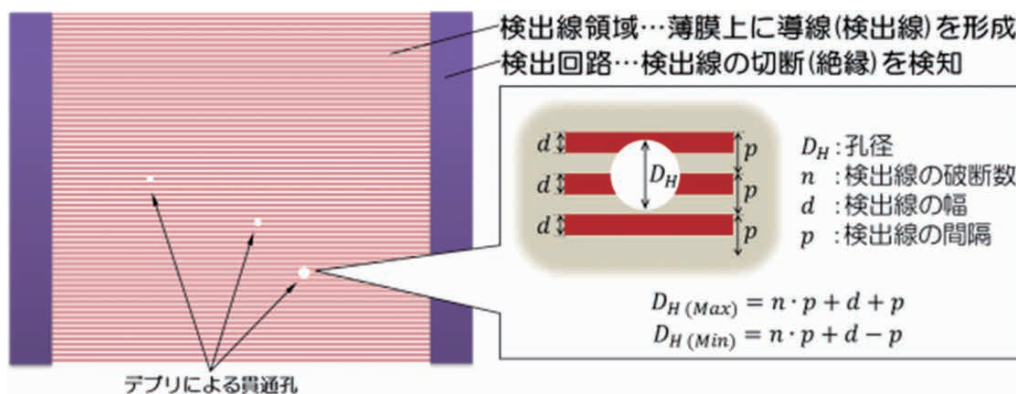


図1 宇宙用ダストセンサ 計測原理図⁽¹⁾
(提供：JAXA/IHI)

*1：制御システム事業部 技師長

た。このモデルはダストを検出するピッチ $100\mu\text{m}$ のパターンをもつ幅 1.2cm、長さ 10cm のリボン 8 本で構成されるセンサ部と、これをコネクタで接続し断線等の状況を計測する回路部からなっている。JAXA 殿はこのモデルで検出原理の妥当性の確認試験、および模擬ダストの高速度衝突試験によるセンサ部の性能評価を行った⁽²⁾⁽³⁾。

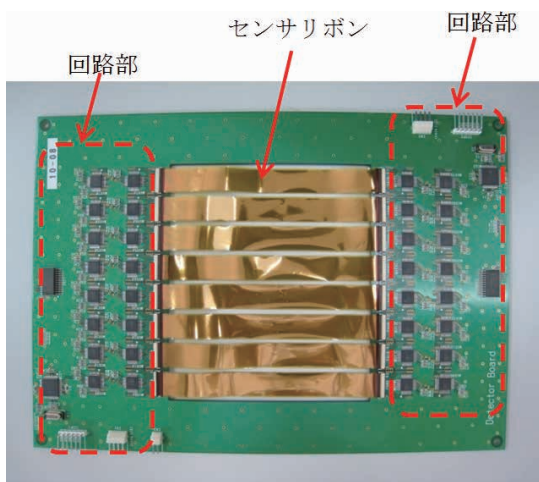


写真1 研究室レベル モデル (提供: JAXA)

次の課題は、センサ部の大面積化とセンサ部と回路部の信頼性の向上であった。これに当社は JAXA 殿・IHI 殿とともに挑戦した。

この挑戦の最初として BBM (Bread Board Model: 要素モデル) を試作した。このモデルでは厚さ $12.5\mu\text{m}$ のセンサ部と、このセンサ部の断線を検知する部品を搭載するリジット部を一体化し 1 枚の基板とすることを目標とした。この一体化した基板を製造するためにはフレックスリジット基板の製造技術が必要で、このため宇宙用フレックスリジット基板の JAXA 殿認定を持つ山梨アビオニクス株式会社殿に製造を委託した。

このモデルのセンサの幅は 35cm、長さは 46cm である。両側のリジット部にはセンサパターンの断線を計測するためのコネクタを搭載した。山梨アビオニクス殿でも、厚さ $12.5\mu\text{m}$ のポリイミド

フィルムを用いたプリント板の製造は初めてであり、担当者は製造歩留りや製造装置の整備にかなり苦労しながら製造・検査・試験を行った。センサパターンは、クラス 1,000 のクリーンルームで LDI (Laser Direct Imager) を使用して描かれた。また、センサパターンの幅や、ピッチの幅の検査は AOI (自動光学検査装置) を使用して行うことで、製造誤差の評価が可能になった。

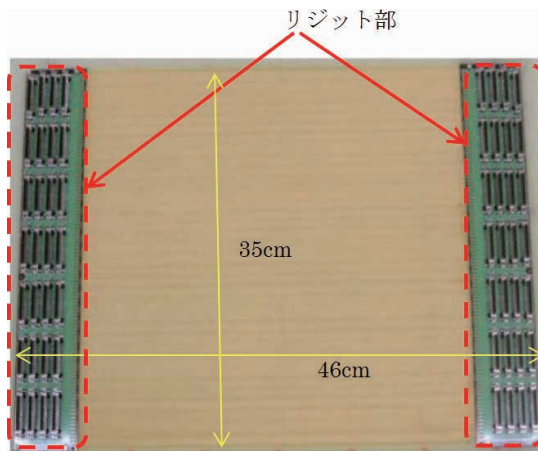


写真2 BBM (提供: JAXA)

このモデルでは宇宙空間での耐熱環境性を評価するために $-65 \sim 125^\circ\text{C}$ の熱衝撃試験を行い、試験後に劣化していないことを確認した。これによって宇宙開発品と同等の品質が維持できる目途が得られた。

また、BBM を用いて JAXA 殿が模擬ダストの超高速度衝突試験を行い、センサの検出性能が研究室モデルと同等であることを確認した。

2. フライトモデルの開発

宇宙用ダストセンサのフライトモデルは、衛星等に搭載されることを前提に、センサパターンの接続 / 断のデータを衛星等のバス機器に通信で出力できるものにした。このために市販の FPGA (Field Programmable Gate Array) を使用してセンサパターンの計測と通信を行う回路素子の開発を

行った。

このダストセンサのフライトモデルは、BBMと同様に山梨アビオニクス殿に製造をお願いした。山梨アビオニクス殿では宇宙用のフレックスリジット基板の生産技術をもとにベアボードと呼ばれるプリント板を製造し、これに部品実装（半田付け）を行った。この部品実装後に外形加工を行った。センサパターンは、リジットプリント板に蓋おおわれている。この外形加工ではセンサパターンを蓋おおっているリジットプリント板を剥がすものである。この工程は非常に難しく、安定するまで何回かの試作が必要であった。

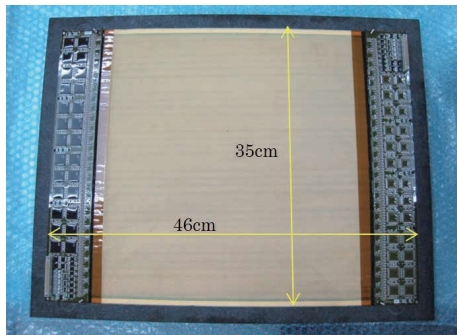


写真3 フライトモデル（提供：JAXA）

フライトモデルは、宇宙空間での実証のためHTV5号機に搭載されて、H-II Bで2015年夏期に打上げられることになった。このためのセンサは2013年上期に製造され、JAXA殿に納入された。ま

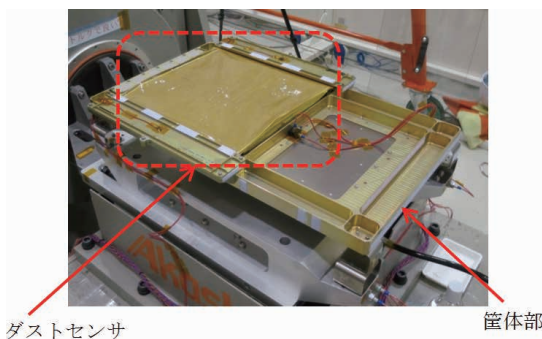


写真4 振動試験装置にセットされたダストセンサ（提供：JAXA）

た、同時にこのダストセンサを固定し、HTVの構体に固定するための筐きょう体部も開発され納入された。

このフライトモデルのセンサは、納入後にJAXA殿で打上げ環境等を模擬した、振動、衝撃、熱平衡、熱真空試験の環境試験等を実施し、搭載性の確認を行った。

さらに、宇宙空間にある原子状酸素によるセンサへの悪影響（ポリイミドの侵食）が懸念され、

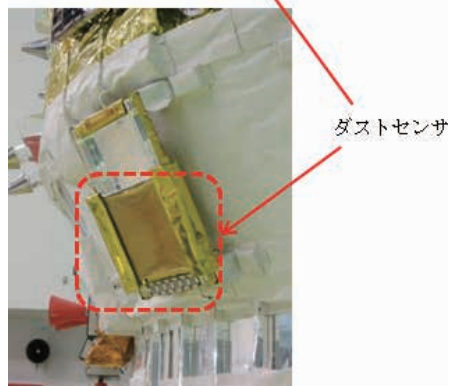


写真5 HTV5号機に搭載されたダストセンサ（提供：JAXA）

このため JAXA 殿がセンサ膜に耐原子状酸素コーティングを行った。これでセンサの厚さが当初より厚くなり、その影響評価のため再度超高速衝突試験を実施し、問題ないことを確認した⁽³⁾。

なお、2016 年には日本のある宇宙ベンチャー企業が、このセンサを搭載した衛星を打上げる予定であり、現在その準備を進めている。

3. 改良型ダストセンサ

この方式のダストセンサの検出効率は、そのセンサ面積に依存する。例えば現状のダストセンサは、センサの有効面積が約 0.1m² である。これを高度約 500km で周回する衛星が搭載した場合には、搭載場所にもよるが、数十回 / 年程度の計測確率である。

現状のダストセンサの大きさは、幅が 350mm、長さが 460mm である。この大きさは、フレックスリジット基板製造機械で加工できる最大のものである。

ダストセンサは、左右両側に回路素子等を搭載するリジット部を持つ。また、センサ部を保護するためのカバーレイを約 10mm 持つ。これらが実際にダストを検知するセンサ有効面積を縮めている。現状のフライトモデルは、両側にリジット部とカバーレイを約 67mm、合計で 134mm 持っている。これはセンサ全長の 460mm に対し約 30% である。これからセンサの有効面積を増加させるために、まずリジット部の小型化を行う。

また、面積を増やすためにはセンサ枚数を増やすことも有効である。

HTV の搭載でもそうであったが、衛星等を通してセンサデータを地上送信するには制限があり、センサパターン 1 点 1 点の生データを送信することは効率が悪い。このためセンサ自体でデータの編集を行い、衛星に渡すことが必要である。さらに、衛星によって通信方式が違うことも考慮

する必要がある。

また、ダストの軌道に関する情報を得るためには、精度の高い衝突時刻も重要なデータとなるので、ダストの衝突を加速度計等で検知することも検討している。このようにダストセンサシステムとしては、多くのデータの収集・処理が必要である。

このためのコントローラ部は、ダストセンサ本体とは分離した別 BOX を設ける方針である。これで個々の衛星とのインタフェースをコントローラ部で取り、センサ本体の衛星ごとの変更をなくすことができる。これはダストセンサのシステム化である。また、コントローラ部を本体から分離することによって、限られた大きさのダストセンサ本体のセンサ有効面積の減少を可能な限り防ぎ、また複数のセンサのデータを集めることができる。

この改良型ダストセンサシステムの開発は、今後 JAXA 殿・IHI 殿との契約で開始される予定である。

4. 次世代センサ

宇宙空間のダスト環境を調べるためには、ダストセンサを多くの衛星に搭載する必要がある。そのため衛星側とダストセンサのインタフェースを少なく、また簡単にして、衛星側の負担を少なくする必要がある。

ダストセンサと衛星との電氣的インタフェースは、電源と通信である。この中で電源は、センサシステムとして太陽電池等のハーベスト電源（環境発電）を衛星から独立して持つことを検討をしたい。また、通信については衛星との配線を少なくするため、Zig Bee 等の無線をデータ通信に用いることを検討したい。

また近年、回路基板の製造コストを下げるため、印刷電気回路技術（Printed Electronics）の研究が進

んでいる。この印刷電気回路技術は薄膜のフィルムにパターンを印刷し、それを熱や光で固定する方式である。この印刷技術では、有機半導体等を使用したアクティブな回路素子も実現している。これにより印刷技術で素子を含んだ基板の実現が一貫してでき、大幅なコストダウンの可能性がある。

ダストセンサ本体の大きさは、フレックスリジット基板の製造工程による制限がある。この大型化を図るためにも、この印刷電気回路技術の採用を検討したい。

衛星は通常 MLI（多層断熱材：Multi-Layer Insulator）で覆われている。この、MLI は衛星を厳しい宇宙の熱環境から守るために不可欠な部材で、薄膜の数層（数枚）のポリイミドフィルムで構成されている。

印刷電気回路技術では $5\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムの使用が可能である。これを用いて製造した薄膜のダストセンサを、衛星の MLI の表面に装着することが可能であれば、熱的インタフェースでも衛星の負担を減らすことが可能である。また、1機の衛星に搭載されるダストセンサも増やすことが可能である。

5. まとめ

宇宙用ダストセンサを世界の多くの衛星に搭載してもらうため、衛星とのインタフェースを最小にして衛星にやさしいものとしていきたい。

謝辞

この宇宙用ダストセンサの原理の特許の使用を快く承諾していただいた IHI 殿、QPS 研究所殿に感謝いたします。

また、この紹介を書くに当たって何度もチェックをしていただいた JAXA 殿、IHI 殿の担当者の方に感謝いたします。

さらに、実際にこのダストセンサを開発・製造し、今後の改造や次世代型センサの開発に携わってもらう山梨アビオニクス殿には深く感謝するとともに、期待することが大です。

参考文献

- (1) JAXA ホームページ：<http://www.ard.jaxa.jp/research/kankyou/kan-sub5.html>（最終アクセス日 2015 年 8 月 12 日）
- (2) Y. Kitazawa, H. Matsumoto, O. Okudaira, P. Faure, Y. Akahoshi, M. Hattori, T. Hanada, A. Karaki, A. Sakurai, K. Funakoshi, T. Yasaka : Research and Development on In-situ Measurement MMOD sensors at JAXA, The Sixth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, April 22-25, 2013
- (3) M. Nakamura, Y. Kitazawa, H. Matsumoto, O. Okudaira, T. Hanada, A. Karaki, A. Sakurai, K. Funakoshi, T. Yasaka, S. Hasegawa, M. Kobayashi : Development of In-Situ Micro-Debris Measurement System, Advance in Space Reserch, Volume 56, Issue 3, 1 August 2015, pp. 436-448



制御システム事業部
技師長

丸 博史

TEL. 045-523-8319

FAX. 045-523-8320