

PZT 素子を利用したスペースデブリの微粒子成分の観測装置の研究

小林正規¹、宮地孝²、藤井雅之²、服部真季³、岡田長也⁴

¹千葉工業大学惑星探査研究センター、²FAMサイエンス、³東京大学新領域、⁴本多電子株式会社

はじめに

スペースデブリの微粒子成分 ($<10\mu\text{m}$) の観測例は少なく、地球周回軌道上の分布などはあまり分かっていない。観測例が少ない理由として、 cm を超えるデブリとは違い、高速衝突による人工衛星の被害の可能性は少ないこともあるだろうが、正確な検出の難しさもあるだろう。高速とはいえ $10\mu\text{m}$ に満たない微粒子の衝突による信号は非常に小さく、磁場に補足されている低エネルギーの荷電粒子や太陽光などによってデブリ微粒子の検出のためのセンサーに、真のイベントと同じレベルのノイズを誘発し、さらにノイズ信号の方が圧倒的に多いという状況が考えられる。例えば、DEBIE (Debris In Orbit Evaluator) では、高度 600km でスペースデブリの微粒子成分の観測を行ったが、プラズマや太陽光の入射によって多数のノイズイベントがあり、ノイズ除去についての難しさが伺える。惑星間空間での宇宙ダストの計測とは異なり、地球周回軌道では、プラズマによるノイズが深刻であるためであろう。

著者らは、圧電性 PZT 素子を使った宇宙ダストのセンサー開発を行ってきた。自然のものと人工物という違いはあるものの、速度やサイズはほとんど同じであるため、測定技術はほぼ同じである。宇宙ダストに限らず、スペースデブリの微粒子成分の観測装置としての最も重要な機能の一つは、インパクトイベントの真偽判定だと考えられる。ここでは、高速スペースデブリの微粒子成分の高精度の測定のためのセンサーとして、圧電性 PZT 素子を提案し、検出イベントの真偽判定に関わる技術について考察した。

圧電性 PZT

圧電セラミックは、未分極の状態では等方性で圧電性は現れないが、分極処理を施すことによって分極軸は無次元 (C_{ov}) の回転対称軸になり、それと垂直な面内では等方性となる。中でも圧電性 PZT 素子は、非常に大きな電気機械結合定数を持ち、特に感度がよいため、従来超音波のセンサー、魚群探知機のソナーセンサー、加速度計などに使われていて、機械振動を電気信号に変換するトランスデューサーとして使われてきた。そして、ゲインの高いプレアンプで読みだすことで、サブミクロンサイズの微粒子が衝突した時の振動も検出することができる。

また PZT は、キュリー点は約 320 度付近にあり、それ以下の温度では転移点がないため、キュリー点の半分の 150°C ぐらいまでなら、脱分極することなく安定して使用できる。そのため PZT は、太陽近傍での運用のため、高温環境に曝されるベビコロンボ MMO に搭載される水星宇宙塵観測装置 MDM に検出器として採用されている⁽¹⁾。コンパクトで、高圧印加が不要、広い温度範囲で使用可能また太陽光およびプラズマの影響を受けずに観測できるという特長から今後も、惑星間塵、星間塵、惑星周辺塵などの観測に重要な検出器である。

微粒子衝突の相互作用

微粒子がある物質に衝突した時、その物質中に衝突による応力波が発生して伝播する。この応力波は元の衝突微粒子の物理的な性質を一部保存している。微粒子が高速で衝突した時、衝突の時に発生する衝突圧力 (分野によっては衝撃応力) P

は $P=\rho u_p U_t$ と表される。ここで、 ρ は衝突体の質量密度、 u_p は衝突速度、 U_t はターゲット物質中の音速である。つまり、発生圧力は単位体積当たりの運動量に比例することが分かる。衝突体が一辺 L の立方体だとすると、圧力が発生し続ける時間 τ は $\tau=L/U_p$ であり、また衝突体が衝突持続時間にターゲット物質を押し続ける力 F は $F=L^2 P$ であるので、衝突体がターゲットに与える力積 I は $I=F\tau=L^2(\rho u_p U_t) \times L/U_p = \rho u_p L^3 = am u_p$ (ただし m は衝突体の質量、 $a=U_t/U_p$) となり、力積は衝突体の運動量に比例することが分かる。力積は衝突によって発生する歪の大きさに関係すると考えられるので、弾性衝突である限り、圧電効果によって発生する電気信号は衝突体の運動量に比例する。しかしながら、 1km/s を超えるような衝突速度であれば、塵微粒子およびターゲット物質の一部またはすべてがプラズマ化したり、破壊されたりすることによって、状況は複雑になると考えられる。

ハレー彗星探査を行った Giotto に搭載された DIDSY⁽²⁾ は、3種類の運動量センサー(圧電素子、圧電膜、コンデンサマイクロフォン)を用いた。そして、塵微粒子の速度が $0.55\sim 1\text{km/s}$ 以下の時のみ、出力信号は塵微粒子の運動量に比例することが分かった。そしてそれより速い塵微粒子の場合、速度が $1\sim 8\text{km/s}$ の場合、入射塵微粒子からターゲットである検出器へ移行した運動量は $E(v)=1+(0.0005v)^2$ であることが分かった⁽³⁾。Stradling 等⁽⁴⁾ は、速度が $5\sim 21\text{km/s}$ の塵微粒子について実験を行い、そのデータに基づいて Beard⁽⁵⁾ が $E(v)=0.96+(0.00015v)^2$ であることを示した。これらが意味することは、速度が大きくなると、衝突圧力の大きさが運動量に単純に比例しないということである。これは、衝突した場所が高温になることで、ガス状、液状、または固体状のイジェクタによって、衝突微粒子の運動量以上に運動量が発生することが原因として考えられている。

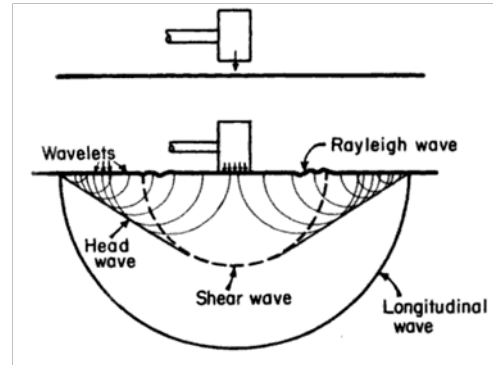


図1. 固体表面をハンマーで打った時に固体中で発生する応力波(引用文献⁽⁶⁾の図2.5(b))。縦波, せん断波, レーリー波が発生している。

圧電素子による高速微粒子センサー 衝突による応力波発生

物質の表面に衝撃が加わると、応力が発生してその物質内部に波として伝播する。応力が波として伝わることから応力波と呼ばれ、弾性的な範囲のものを弾性応力波という。弾性応力波の代表的なものとして、縦波(圧縮波とも呼ばれ、伝播方向と固体中の粒子の運動方向が同じ)、せん断波(横波とも呼ばれ、伝播方向と粒子速度が垂直)、表面波であるレーリー波(固体表面に沿って伝播して、表面からの深さが大きくなるにつれて振幅が減少)がある。

それぞれの応力波のエネルギーの分配比は、ポアソン比 $\nu=0.25$ の半空間の場合、表面波が 67%、せん断波が 26%、縦波は 7%となっていて、ほとんどのエネルギーが表面波のエネルギーになっている⁽⁶⁾。上で述べた応力波以外にも表面波の一種でラブ波などがある。地震などでは重要な存在であるラブ波は、異なる弾性率を持つ層の境界面で発生し、伝播速度が異なる地層の境界面で現れるが、上で述べた例のように、単一の物質の場合は存在しない。

圧電効果による電気信号の発生

圧電セラミックの結晶は、構成している原子やイオンの対称性によって 32 の晶族に分類され、そのうちの 20 の晶族に属する結晶では、機械的応力を加えると、応力に比例した電気分極を生じて電界が発生し、逆に結晶に電界を加えて電気分極を起こさせると電界に比例した歪を生ずる。このような現象を圧電効果という。通常、分極軸方向を 3 軸 (z)、それに垂直な軸方向を 1 軸 (x)、2 軸 (y) とする。圧電素子を使った微粒子衝突検出器は、分極軸に垂直な面を電極面として、電極面に微粒子を衝突させる。衝突の瞬間、3 軸方向に応力および歪が発生し、等価圧電定数 d_{33} によって換算される量の電荷が電極面上に発生する。その電荷量は衝突応力に比例し、衝突前の微粒子が持つ運動量に概ね比例する。発生する電荷量は非常に微小であり、また圧電素子は大きな静電容量を持つため、電荷有感型有型プレアンプで信号を読み出す。

高速微粒子検出のための PZT センサー開発

PZT は比誘電率が非常に大きい (1300~1700)、板状の PZT 素子の静電容量は非常に大きくなる。例えば、40mm×40mm×2mm の PZT 素子であれば、約 10nF の静電容量をもつことになる。そのため、電氣的と機械的との変換能力を表す係数である電気機械結合係数が大きな PZT であっても、読み出しの回路に気をつけないと、S/N 比が小さくなり、信号を読み出せない可能性がある。そのために、電荷有感型プレアンプを使用することは必須である。電荷有感型プレアンプを使う目的は二つある。一つは、すでに述べた大きな静電容量の検出器から信号を読み出すためであるが、もう一つは検出器の持つ静電容量の温度依存性に影響されないようにするためである。もし、PZT 検出器の出力を電圧モードのプレアンプで読み出したら、温度によって静電容量が大きく変化するため、読み出した信号も温度依存性を持

つことになる。電荷有感型プレアンプは、設計を正しくしていれば、入力静電容量には影響されずに信号を読み出すことができる。信号の立ち上がりは速い場合で 100ns 程度になるため、プレアンプの立ち上がり応答時間や記録のためのデジタル回路のサンプリングレートや周波数帯に気をつける必要がある。

図 2 に板状の PZT 素子を使ったセンサーの概念図を示している。センサーの両面には銀の電極をつけていて、衝突によってセンサー内部に応力が発生した場合、電極表面に電荷信号が現れる。それを電荷有感型プレアンプによって読み出す。図 3 には、読み出された信号の例を示す。この例では、2mm 厚のセンサーであり、PZT の縦波応力波の伝播速度は約 4km/s のため、応力波が厚さ方向を往復する時間に相当する周波数 1.1MHz の共振周波数を持つ波形となっている。そして、図 4 にはこのような波形の振幅と衝突した高速微粒子の運動量の関係をプロットしたものを示す。示されているように、非常に小さな微粒子の衝突による信号ながらも、両者はほぼ線形関係にあって、衝突の検出とその微粒子の運動量を求めることができる。

真イベントと偽イベントの判別

このような圧電素子による宇宙塵検出器には欠点もある。あまりにも振動に対して感度がよいため、高速微粒子が検出面に当たった時の振動以外の信号もひろってしまうことである。また、強い放射線場ではなんらかのノイズ信号が発生する可能性もある。これらの信号の真偽判定をするためには、プレアンプで読みだされる信号の波形を記録し、そのプロファイルを分析する必要がある。圧電性 PZT をセンサーとして利用する BepiColombo MDM の場合、センサーの出力信号の振幅がノイズレベルを上回るよう設定された閾値を超えるときにオンボードでのイベントのトリガーをかけるが、真イベントか偽イベントかを出

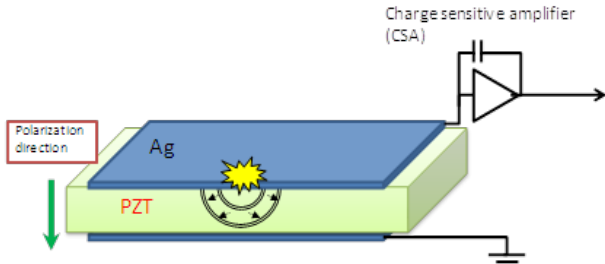


図 2. PZT センサーと読み出し回路。

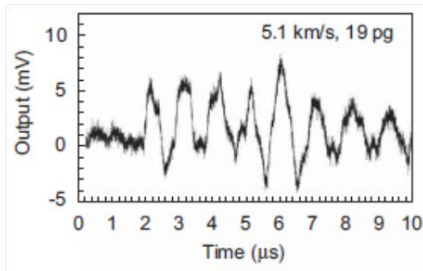


図 3. PZT センサーの出力信号の例。電荷有感型アンプで読みだした信号。

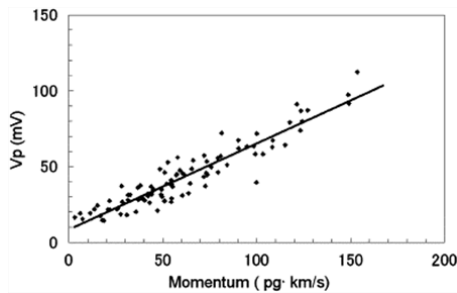


図 4. 衝突微粒子の運動量と PZT センサー出力信号の振幅の関係。

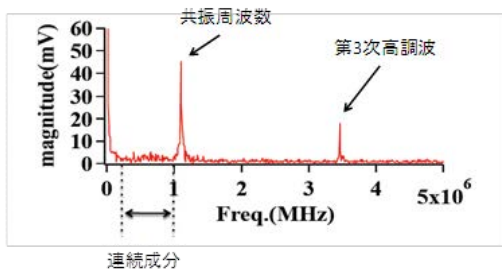


図 5. PZT センサーの出力波形の高速フーリエ解析スペクトル。

力信号の波形から判断するためにフラッシュ ADC を搭載して、波形のデータをダウンロードし、本当の微粒子衝突イベントとそうでないものを区別する。

一般に宇宙ミッションには、電力消費量や通信

レートには厳しい制限がある。フラッシュ ADC の電力や波形データをダウンロードするための通信レートは決して小さくない。その中で、機上ソフトウェアで真のイベントと偽イベントの判別ができるような信号解析の方法を確立する必要がある。

PZT センサーの偽イベントとして検出される信号の原因は次のようなものと考えられる。

- ① 衛星構体または検出器周辺の機構が熱歪などによって軋むことによる機械的な振動。
- ② 大量のプラズマ粒子などによるセンサーへの作用。
- ③ 太陽光でセンサーの表面電位が変化することによる電子信号の誘導。
- ④ 信号読み出し用の電子回路への高速粒子などの放射線の作用。
- ⑤ 衛星の姿勢制御用リアクションホイールなど搭載機器の振動。

特に①は、過去のミッションでも問題になっている。また、③の太陽光による影響は、衝突電離型の宇宙塵検出器では非常に大きなノイズ源である。以上の偽イベントは、偽イベント信号源の特性上発生周波数は低いため、出力信号の波形を見れば区別できる。ただし前述の通り、宇宙ミッションには、電力消費量や通信レートのリソースには厳しい制限があるため、できるだけオンボードでの判別処理が好ましい。そのためにシンプルなアルゴリズムによる判別方法が必要になる。

PZT センサーの出力信号の解析

前節までに述べた真のイベントというのは、センサーの検出面に衝突することで機械的振動を発生させるイベントで、偽イベントはそれ以外の要因による信号を発生させるものと定義すると、PZT センサーの出力信号を解析することで、両者の区別する方法が必要である。以下に、2通りの方法についてこれまで得られた知見をまとめた。

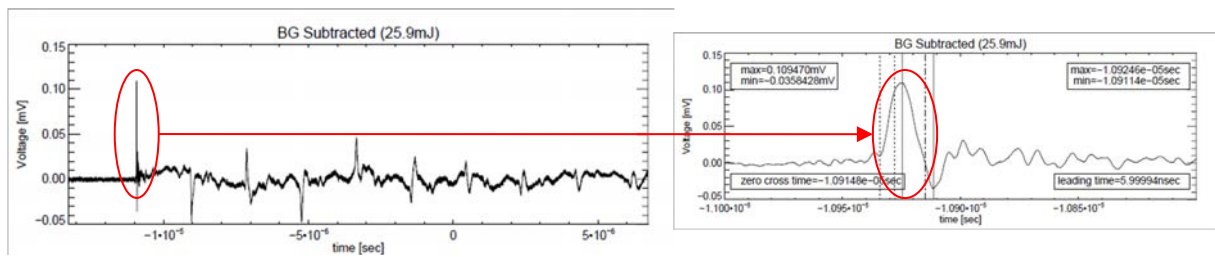


図6 PZT 検出器の信号を試作した電流有感型プリアンプで取得した波形。右は拡大した図。

電極を小さくした PZT センサーの出力信号

前節で述べたように、PZT は比誘電率が非常に大きく、1 枚のセンサーの検出面積を大きくすることは、電荷有感型アンプを使ったとしても、読み出すためのアンプには入力負荷の増大になる。我々は、センサー面積が大きくなっても読み出しアンプの入力負荷容量が大きくなるないように、読み出し用電極の縮小化を試みた⁷⁾。これは、電極を検出面積いっぱいのサイズのするのではなく、40mm 角のセンサーの中心に 5mm 角の電極を配置するものである。

従来、衝突微粒子の運動量と相関があるのは、共振周波数の成分だと考えてきたが、上記開発の過程で、共振周波数以外の連続成分も衝突微粒子の運動量に相関があることが分かった。この理由として、図5に示すような、強い共振周波数の成分はセンサーの厚み方向の縦波によって引き起こされるが、図1に示しているように、衝突によって発生する応力波は、厚さ方向のみでなく、面内方向も伝播する。このような波も面内方向を往復することで共振していると考えられ、電極が中心に配置されていることでその信号がより強く増幅されていると考えられる。正方形の形状をした検出面だと様々な距離を往復する波の重なりで連続成分になると推定している。この連続成分がどこに由来しているかは今後の検証が必要であるが、これらの異なる周波数成分の信号は、検出面に物体が衝突することで発生する応力波によって引き起こされるものであり、センサーが太陽光に照らされたり、プラズマ粒子によって誘起されたりするノイズ信号とは異なる特徴である。この特徴を利用することで、微粒子が衝突面に衝突した時の

信号（真イベント）とそれ以外のイベントを区別することができると考えている。

電流アンプによる信号読み出し

前節までは電荷有感型アンプを利用した信号の読み出しであったが、その代わりに電流有感型のプリアンプによる読み出しを試みた。これは、衝突の瞬間の信号の立ち上がり時間を読みとるために、高周波数帯域まで延びている電流-電圧変換アンプを応用したものである。

電流有感型のプリアンプを試作し、高速微粒子の衝突を模擬するためのパルスレーザー照射実験で、図6のような信号が検出器から読み出されることを確認した⁸⁾。原理的には、前節の電荷有感型アンプの信号を一回微分した形になっているのだが、検出面で受けた衝撃応力が他面まで伝播して（伝播時間は約 2 μ s）、自由端で反射する様子（信号のピークが正と負を繰り返している）が波形から読みとれる（図6左）。真のイベント以外の偽イベント（例えば、検出器の周囲への微粒子衝突や、温度変化による検出器とホルダーの熱歪によって生じる微小振動など）ではこのような波形にはならないため、真偽判定に利用できるだろう。

この方法では、PZT 検出器からの信号読み出しを、電流アンプを使って読みだすことで衝突微粒子のサイズと速度を推定することができると考えている。そして、この手法で機上ソフトによるイベントの真偽判定が可能になると考えている。ただし、電流アンプは電荷有感型アンプに比べてゲインが低下するので、検出対象となるのは 10 ミクロン以上のサイズの微粒子となるだろう。

まとめ

スペースデブリの観測は、イベントの真偽判定が重要になるだろう。本論文では、圧電性 PZT 素子を利用したセンサーを使うことで、スペースデブリの微粒子成分である高速微粒子を、ノイズイベントと区別して検出する方法を紹介した。基本的には読みだした信号波形の周波数解析をすることで、本当のイベント（微粒子衝突）かどうか判別する方法だが、機上のプログラムでも簡易に解析できるようにしたい。

リソース要求が小さい PZT 検出器はこのようなスペースデブリ観測に適している。今後は、実用化に向けてさらに考察を深めたい。

参考文献

- (1)Nogami K., M. Fujii, H. Ohashi, T. Miyachi, S. Sasaki, S. Hasegawa, H. Yano, H. Shibata, T. Iwai, S. Minami, S. Takechi, E. Grün, R. Srama : “Development of the Mercury dust monitor (MDM) onboard the BepiColombo mission”, *Planetary and Space Science*, Vol. 58, pp. 108 (2010).
- (2)McDonnell, J. A. M., Alexander, W. M., Burton, W. M., Bussoletti, E., Clark, D. H., Grard, J. L., Gruen, E., Hanner, M. S., Sekanina, Z., and Hughes, D. W.,: "Dust density and mass distribution near comet Halley from Giotto observations", *Nature*, vol. 321, pp.338-341 (1986)
- (3)McDonnell, J. A. M., Stevenson, T. J., Evans, S. T., Alexander, M., Lyons, D., Tanner, W., Anz, P., Hyde, T., and Chen, A.-L.: “The impact of dust grains on fast fly-by spacecraft: Momentum multiplication, measurements and theory” , *Adv. Space Res.*, Vol.4, pp. 297 (1984)
- (4)Stradling, G. L., G.C. Idzorek, P.W. Keaton, J.K. Studebaker, A.A. Hopkins Blossom, M.T. Collopy, H.L. Curling Jr. and S.D. Bergeson: “Searching for momentum enhancement in hypervelocity impacts” , *Int. J. Impact Eng.*, Vol.10, pp.555 (1990)
- (5)Beard, R.: "Impacts on the meteoroid and rear shields of the Giotto spacecraft at the GEM encounter with Grigg-Skjellerup", In *Hypervelocity Impacts in Space*, ed. J.A.M. McDonnell (Canterbury: Univ. of Kent), pp. 94 (1991)
- (6)Meyers, M. A.: “Dynamic Behavior of Materials”, John Wiley & Sons, Inc., pp.30 (1994)
- (7) M. Hattori, M. Kobayashi, T. Miyachi, S. Takechi, O. Okudaira, T. Iwai, S. Sugita: “ Position-Dependent Behavior of Piezoelectric Lead-Zirconate-Titanate Cosmic Dust Detector” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**(2012) 098004.
- (8) Masanori Kobayashi, Takashi Miyachi, Maki Hattori, Seiji Sugita, Seiji Takechi, Nagaya Okada, "Dust detector using piezoelectric lead zirconate titanate with current-to-voltage converting amplifier for functional advancement", *Earth, Planets and Space*, 2012 (Accepted).