

PZT 素子による宇宙デブリの微粒子成分の観測装置

小林正規¹、宮地孝¹、藤井雅之²、服部真季³、奥平修⁴、岡田長也⁵

¹千葉工業大学惑星探査研究センター、²FAMサイエンス(株)、³東京工業大学、⁴JAXA、⁵本多電子(株)

はじめに

地球周回軌道上には、メテオロイドとスペースデブリの微粒子成分($<10\mu\text{m}$)が存在している。それらの観測例の多くは、主に回収された探査機の飛行後分析による。回収された部品の表面に残されている微粒子の衝突痕を測定することによって、地球近傍の微粒子環境が調査されている。微粒子が高速で衝突すると蒸発してしまうが、衝突残留物があれば化学的な成分もわかる。数 μm から数十 μm の微粒子では、デブリはロケット燃料に含まれるアルミナ粒子、塗料片および衝突イジェクタ、それからメテオロイドである。

一方で、微粒子衝突をその場で能動的に観測する例は少ない。その少ない例として GORID (Geostationary Orbit Impact Detector)と DEBIE (Debris In Orbit Evaluator)による観測がある。観測例が少ない理由として、正確な検出の難しさがあると考えられる。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がセンサーに、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、高度 600km でスペースデブリの微粒子成分の観測を行った DEBIE は、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。

飛行後分析は、メテオロイド・デブリの成分の詳細を調べることができるが、コスト面を考慮

と効率の良い方法ではない。その場観測によってデータのみを地上に送ってくれば、より効率よく、また年々増加して分布の状況も変化していると考えられるデブリの時間的な変化を調べることもできるだろう。

著者らは、圧電性 PZT 素子を使った惑星間空間の宇宙ダストのセンサー開発を行ってきた。惑星地球周回軌道において、メテオロイドと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、地球周回軌道における高速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 素子による検出イベントの真偽判定に関わる技術について提案し、その方法について実験的に考察した。

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ため ($1300\sim 1700$)、板状の PZT 素子の静電容量は非常に大きくなる。例えば、 $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 2\text{mm}$ 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、電荷有感型プリアンプを使用することは必須である。電荷有感型プリ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リ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。電荷有感型プリアンプは、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、プリ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。

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、プリ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。これまでの波形分析は、実際に分析者が波形を目で見て経験に基づいてノイズと判別するという方法ととっていた。BepiColombo-MDM の場合、ADC を搭載してデジタル化した波形のデータを地上へダウンリンクし、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。機上ソフトウェアで真のイベントと偽イベントの区別がつくような信号解析の方法を確立できれば、メテオロイド・デブリ観測装置の打ち上げ頻度を増やすことにつながると考えられる。

PZT センサーの出力信号の解析

これまで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。

今回、ドイツ・マックスプランク核物理研究所にあるヴァンデグラフ静電加速器を利用して、微粒子衝突実験を行った。用いたセンサーは 40mm×40mm×2mm の PZT 素子である。図 1 に、衝突させた微粒子の質量 - 速度分布を示す。加速した微粒子は鉄である。図 2 に、衝突時の PZT 素子からの信号波形を示し、図 3 にはその波形を FFT 解析した結果を示す。この図からわかるように、ピークになって表れている共振周波数はもっとも強度が強いのは 1 MHz 付近の成分であるが、そのほかにも多数のピークが示されている。ここで示されているもっとも低い周波数は約 50kHz で、その高調波と考えられるピークが多数表れている。

従来、衝突微粒子の運動量と相関があるのは、センサーの厚み方向の共振周波数の成分（2 mm 厚のセンサーの場合、約 1 MHz）だと考えてきたが、開発の過程で面内方向の共振周波数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。これは、1 MHz の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 4 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。

図 5 には、面外（厚み方向）の振動である 1MHz の共振成分と面内方向の振動である 50kHz の高調波成分の相関関係をしめしている。図中で面内振動として示しているのは 300kHz 以上であるが、これは、50kHz 付近の周波数帯域は、環境からと思われる振動が加わっているためである。センサーの検出面に衝突した微粒子イベントは実線で示す直線付近に分布する。一方、周辺からの真空ポンプや電磁ノイズと思われるノイズイベントについては、この図の範囲外になっている。つまり、PZT 素子の検出面に微粒子が衝突して誘発した応力波が持つ周波数の分布は、そうでないものに比べてユニークであり、他のイベントと区別ができ

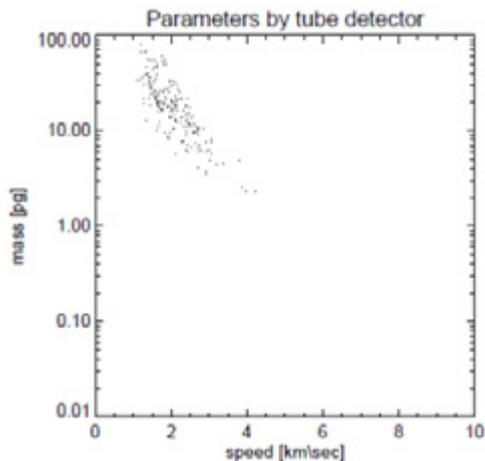


図1. MPIK での実験で PZT 素子に衝突させた鉄微粒子の質量 - 速度分布

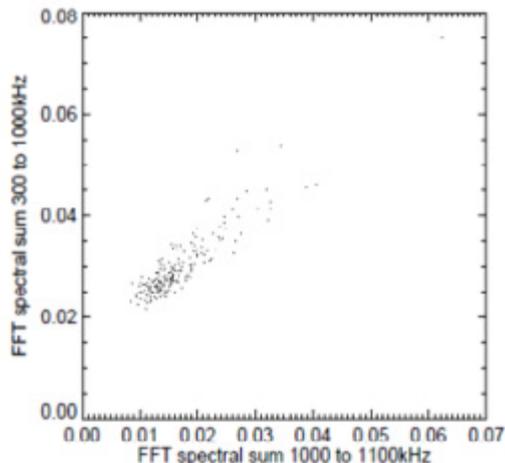


図5. PZT 素子の面外振動成分と面内振動成分の相関関係

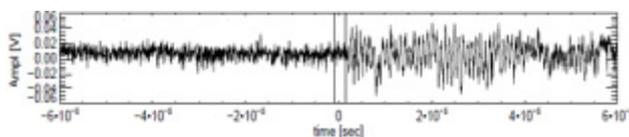


図2. 高速微粒子が PZT 素子に衝突して出力した信号波形

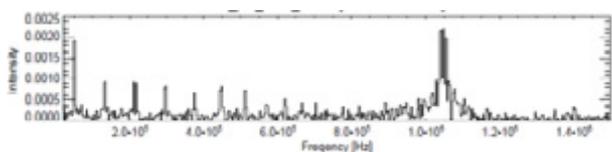


図3. 図2に示した衝突イベントの信号波形を FFT 解析して得られた周波数分布

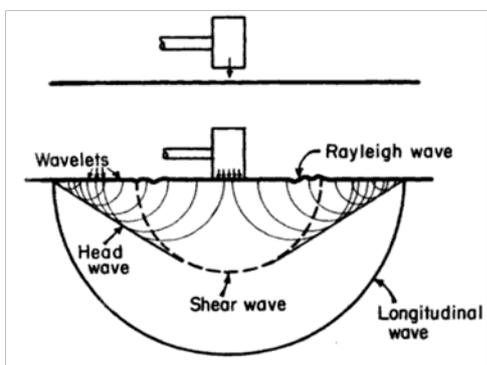


図4. 固体表面をハンマーで打った時に固体中で発生する応力波。縦波、せん断波、レイリー波が発生している。

と思われる。単純に、面内振動である低周波成分（50kHz）と面外振動による高周波（1MHz）の比をとって、ある一定の値になるものが、真のイベントで、そうでないものは偽イベントつまり、衝突面に固体である微粒子が衝突することによって誘発される信号以外のものといえるだろう。

以上で述べたことは、さらに実験で検証を深める必要があるが、軌道上でのメテオロイド・スペースデブリの微粒子成分をその場観測するためのセンサーとしての可能性を示すものと考えている。

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。