

圧電性 PZT を使った宇宙塵検出器の開発

小林正規、宮地孝（千葉工業大学 PERC）服部真季（東京大学新領域）

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_{66} ）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出すことで、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、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ピコロンボ 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 (Nogami et al., 2010)。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。

微粒子衝突実験

宇宙塵などの微粒子が衝突する現象を調べるために、あるいは高速微粒子の検出器を開発するために微粒子（直径 0.01 から 10 μm ）を人工的に加速する装置が必要である。微粒子を加速する方法として静電加速器やガス銃・火薬銃がある。中でも静電加速器は帯電させた微粒子を高電圧によって加速するもので、加速電圧 V 、粒子速度 v 、粒子質量 m 、粒子の帯電電荷量 Q とすると、加速エネルギーは $QV=mv^2/2$ となる。現在、MV 級の加速を行っているのは、日本の東京大学重照射施設 (HIT) を含めて数か所しかないが、ガス銃や火薬銃に比べて不純物の混入がなく、粒子一個一個を個別に加速できるという特徴から、宇宙塵検出器の開発には必要不可欠である。加速される微粒子は、銀、鉄、炭素、ラテックス材の微粒子がよく使われる。最近ではドイツ・マックスプランク研究所のダストグループが、輝石などの鉱物の微粒子を作って加速実験を行えるようになった。加速される微粒子は、質量が不均一であるため、ビームライン内に設置された電極の通過時間を測定して速度を求め、それと加速エネルギーから加速された微粒子の質量を求めることができる。

静電加速器を使った実験は、実際の宇宙塵を模擬するのに適しているが、マシンタイムに限りがある。微粒子が衝突した時に発生する衝突応力を模擬するために、パルスレーザーを検出器の検出面に照射してアブレーションして発生するプラズマ蒸気が噴出する反作用によって圧力（アブレーション圧力）を発生させる方法がある。厳密には、運動エネルギーによる圧力と、物質が熱によって蒸発して膨張するときに発生する圧力は異なるものであるが、微粒子衝突を模擬する程度の圧力ならば、数十 mJ のパルスレーザーならば十分発生させることが可能である。実験室内で可能な簡便な方法だが、アブレーションのために検出器表面が傷つくのが大きな欠点である。

PZT 検出器開発

PZT に微粒子が衝突すると、圧電効果によって電極に電荷が現れる。それを電荷有感型プレアンプで読み出して、デジタルオシロスコープでプレアンプの出力波形を記録するというのが、基本的な実験コンフィグレーションである。PZT は比誘電率が非常に大きいため (1300~1700)、板状の PZT 素子の静電容量は非常に大き

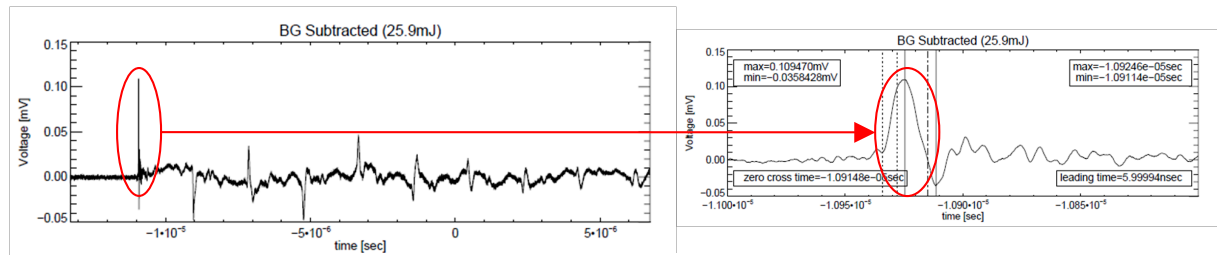


図1 PZT 検出器の信号を試作した電流有感型プリアンプで取得した波形。右は拡大した図。

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オシロスコープ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。こ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。BepiColombo-MDM の場合、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。

このような問題の解決のために、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 1 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。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 $2\mu\text{s}$ ）、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 1 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。

さらにこのプリアンプの出力信号の立ち上がり時間は、電荷有感型に比べて非常に速く、図 1 の例では、約 10ns である。これまでの研究では、PZT による位置検出器の位置の決定精度は 1mm 以下程度となっているが、電流有感型アンプでは立ち上がり時間が 10ns とこれまでの 10 倍以上速いため、位置の決定精度の向上が期待できる。

この他に、読み出しのための電極を PZT 検出器の有効面積よりも小さくして読み出しのアンプの負荷を軽減して S/N 比向上させる研究も進めている。その中で、PZT からの出力信号の周波数成分を調べたところ、共振周波数より低い成分の和をとると、衝突粒子の運動量に比例することが分かった。その原因として、衝突を起因とする PZT 中の弾性波のうち縦波だけでなく表面波も圧電信号に寄与していると考えている。今後、衝突時に発生する表面波の直接観測と表面弾性波の発生モデルの検討を行う予定である。