

圧電性 PZT と電流-電圧変換アンプによる宇宙塵検出器

小林正規、宮地孝、大野宗祐（千葉工大）

武智誠次（大阪市大）

服部真季（東大）

1. はじめに

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窮次 ($C_{\infty v}$) 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、ゲインの高いプリ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に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。

本研究では、高速宇宙塵の運動量センサーとして使われてきた圧電性 PZT（以下 PZT）を、運動量だけでなく衝突体のサイズの検出を可能にするための開発を行う。

2. 測定原理

衝突体微粒子のサイズの測定原理としては、微粒子(数 km/s 以下)が PZT に衝突して撃力を加え続ける時間が、衝突点から衝撃応力波が希薄波として戻ってくるまでの時間に相当することを利用する。この時間は、PZT から出力される信号から読みとることができる。このようなアイデアは、Weishaupt [1987]によって実験的に検証されているが、彼は PZT のような大静電容量のセンサーの信号を読み出すには応答速度を速くすることが難しい電荷有感型アンプを使用した。つまり小さなサイズ (μm) の検出が難しい。本研究は速い信号の読み出しに適している電流電圧変換アンプ(以下電流アンプ)を使って衝突体サイズの検出の実証をすることを目的としている。

Weishaupt [1987]によると、150m/s 以上の速度範囲では、撃力が加わる時間は衝突微小球の速度に依存しないことが分かっている、衝突球のサイズのみで出力信号の幅（継続時間）が一義的に求まる。宇宙塵の検出器として電流アンプで読み出して、衝突微粒子のサ

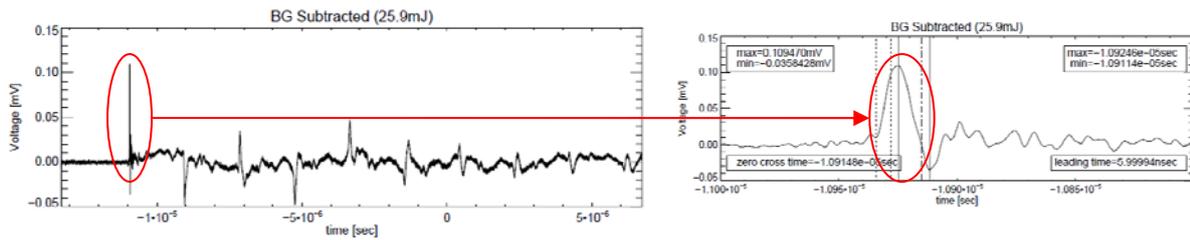


図1 PZT 検出器の信号を試作した電流有感型プリアンプで取得した波形。右は拡大した図。

イズを求める実験はこれまでなく、本研究では電流アンプを使って PZT 検出器の信号を読み出す方法を初めて実証することができると期待している。

3. これまでの成果

電流アンプで PZT 検出器の信号を読みだすのは全く新しい方法である。これまでに、東大杉田教授の所有する軽ガス銃を使って高速の鋼球（ $\phi 300 \mu\text{m}$ ）を衝突させる実験を試みている。ポリカーボネイト製の弾丸をサボに使うと鋼球を一発ずつ加速して検出器に衝突させようとしているが、装置の不具合で弾がうまく加速できないというトラブルもあり、あまり順調ではない。一方で高速粒子の衝突時発生をパルスレーザーで模擬した実験を行っている。電流アンプによって読みだされた信号波形の例を図1に示した。この実験では、レーザーのパルス幅（このレーザーの場合、約 7nsec、撃力の継続時間に相当）をアンプの出力から読みとることができた。

4. PZT 検出器の信号読み出しおよび電流アンプの利点

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リアンプで読み出して、デジタルオシロスコープでプリアンプの出力波形を記録するのが、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、電気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。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

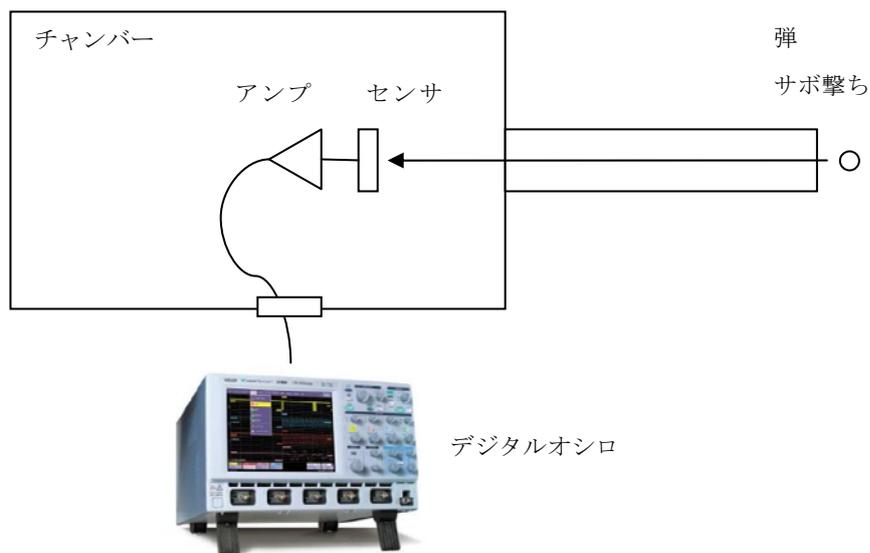


図2. 実験のセットアップの概要

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、そのプロファイル进行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。

図4に示すように、電流アンプの出力信号は特徴的で、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。

5. 衝突銃による実験

最終的には μm サイズのダスト粒子の測定を目標としているが、今後の段階的な開発として JAXA 相模原の二段式軽ガス銃を利用して実証実験を行いたい。微小球を弾としてサボによって加速して PZT センサーに衝突させて、その信号を電流アンプで読みだしてデジタルオシロスコープで記録し解析したい。図2にセットアップの概要を示す。実験で使用する電流アンプは、図3に示すようにすでに製作済みである。真空対応として製作しているので、アンプはチャンバーの中に入れて使用する。BNC コネクタの真空フィードスルーがあれば、電源ラインおよび信号ラインの引き込みおよび読み出しが可能である。

衝突させる弾(微小球)は、可能な限り小さなもの $\phi 30\mu\text{m}$ から $\phi 100\mu\text{m}$ くらいまでで5種類くらいのサイズのものを加速してセンサーに衝突させたい。 $\phi 30\mu\text{m}$ の鉄の弾だと、弾性波が往復する時間が約 10ns である。試作しているアンプは応答速度が 3.5ns なので、期待される出力信号としては概ね台形のような波形になるものと予想している。速度は



図3. 製作している電流電圧変換アンプ。真空対応になっている。

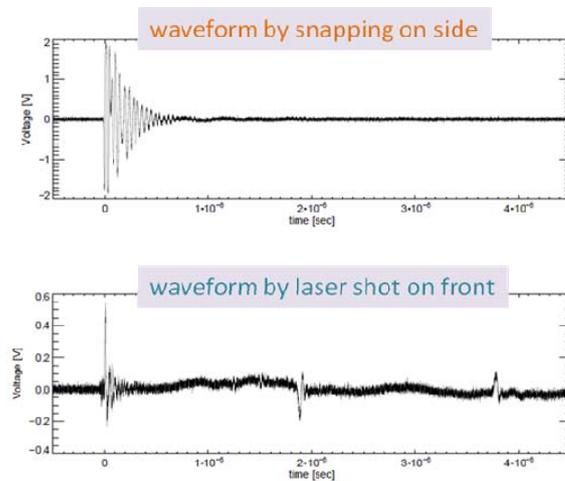


図4. 電流アンプで読みだした信号の例。上図は検出器のフレームを指ではじいた時の応答、下図は検出面をパルスレーザーで照射した信号。

1km/s～5km/s の3パターンぐらいで加速・衝突させて出力信号の違いを解析したい。

上記のように小さな弾の場合サボ撃ちになるが、それは構わないと考えている。その理由は、複数の弾が検出器に衝突しても、例えば $\phi 100 \mu\text{m}$ の場合では図1に示すような波形の先頭のパルスの幅が約 30ns となるが、30ns 以内の時間間隔で衝突が同時でなければ最初に衝突した弾に対する信号応答から撃力継続時間を読みとることは可能であると判断しているためである。これまでにベピコロンボ MDM のための衝突銃実験を JAXA の二段式衝突銃を使って行ったが、弾丸の衝突のタイミングは $1 \mu\text{sec}$ 程度離れているので、信号の分離は十分可能だと考えている。

参考文献

Nogami et al., Planetary and Space Science 58 (2010) 108–115

Weishaupt, International Journal Impact Engineering 5 (1987) 663–670