

圧電性 PZT 素子の衝突検出器としての特性(温度特性について)

○中村真季*1 小林正規*2 岩井岳夫*3 野上謙一*4 宮地 孝*5 大橋英雄*6 平井 隆之*6 武智誠次*7
柴田裕実*8 藤井雅之*9 佐々木晶*10 Srama R.* 11 Grun E.*11

*1 東大院 新領域 *2 千葉工大 *3 東大院工 *4 獨協医科大 *5 早大理工学術院*6 東京海洋大 *7 大阪府立大院工 *8 京大院工
*9 JAXA *10 国立天文台 *11 マックスプランク核物理研究所

1. 背景

1.1 宇宙塵

- 宇宙塵は宇宙の主要構成要素であり、個々の天体現象においても重要な存在。次々と発見されている恒星の周りの円盤状の塵雲が、惑星系誕生の母体といわれている。
- 想定する宇宙塵：10 μm 以下、速度：秒速 2~50km。

1.2 BepiColombo 水星探査機への宇宙塵検出器の搭載

- 宇宙塵検出器(Mercury Dust Monitor : MDM)が水星探査機BepiColomboに搭載予定。圧電性PZT素子を利用して、水星近傍での宇宙塵の頻度を観測する目的。
- 2014年に打ち上げ、2020年に水星軌道に投入、約一年間水星周回軌道上の観測の予定。

1.3 宇宙塵検出器

圧電素子とは

- 圧縮や引っ張りの歪み(体積変化分)に応じて電荷を発生。

圧電性 PZT とは

- 強誘電体粉末として、ジルコン酸鉛(PbZrO_3)とチタン酸鉛(PbTiO_3)をモル比 48:52 で混合したチタン酸ジルコン酸鉛($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$: PZT)を母材とした圧電セラミックス。

特徴

- 誘電率が高く、圧電性が大きい(感度が良い)
- キュリー点が高く(約 310°C)、高温環境での使用が可能。
- 圧電特性の温度依存性は小さい。
- セラミックで放射線に強い。

- ⇒ 水星近傍の環境での使用に適している。(従来のタイプのは高温環境では使用困難)
- ⇒ 全く新しいタイプの衝突検出器で、衝突検出器としての特性は知られていない。
- ⇒ BepiColombo で求められているのは宇宙塵の頻度のみだが、宇宙塵の物理量も圧電 PZT の信号から得られる可能性がこれまでの研究で分かっている。(波形信号の波高値が入射宇宙塵の運動量に比例している。)

2. 本研究の目的

水星近傍でのミッション中は-140°C~+170°Cの温度環境にさらされる。そこで本研究では以下の実験から温度特性を評価した。

- ① 静電加速器を使用した超高速衝突実験のデータ解析
- ② 鋼球を使用した落下衝突実験。

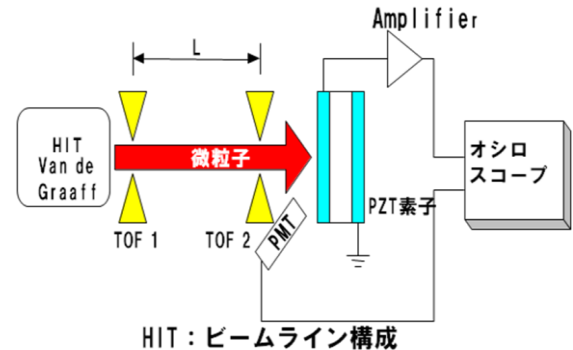


図1. ビームライン構成

3. 実験

① 静電加速器による超高速衝突実験のデータ解析

宇宙空間で想定される速度と質量に近い微粒子で温度依存性の評価の実験を実施。ビームライン構成を図1に表わす。

直径 0.1~1 μm の導電性微粒子(本実験では鉄微粒子を使用)を 2~50km/s の速度まで加速し PZT 素子に衝突させた。

- 衝突させる微粒子の速度は TOF (時間差計測装置) で測定し、その誘導電荷より質量を推定する。
- PZT 素子は 20mm ϕ 、1mm 厚のものを使用。
- ハロゲンヒータランプで PZT 素子を熱して、室温、100°C、150°C、150°Cまで熱し冷却し室温まで戻した状態で衝突実験を行った。

図2に、微粒子が衝突した時の PZT の出力信号をオシロスコープで取得した波形を示す。低周波成分の信号の最初のピークを拡大すると高周波成分の信号見える。

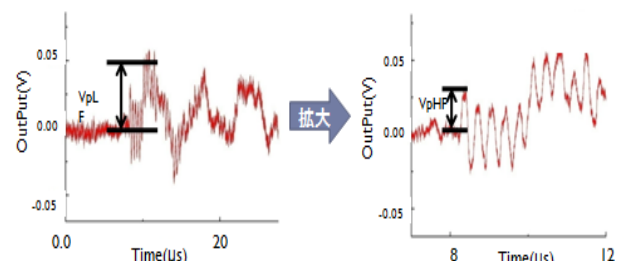


図2. オシロスコープによる PZT 出力波形

【結果まとめ】

高周波：発生電荷と運動量の関係は温度に依存せず比例関係が見られる。

低周波：発生電荷と運動量の関係は温度に依存、同じ室温にもかかわらず加熱前後ではセンサー出力が異なった。

→ 温度サイクルの効果を自由落下による衝突実験で確認する。

②自由落下による実験

衝突実験 1 → 室温での自由落下による実験と加速器実験の関係性の検証を行う。

衝突実験 2 → 自由落下による実験の温度特性の検証を行う。

(a)衝突実験 1

室温において様々な鋼球(直径 0.5mm、1.0mm、2.0mm、5.0mm)で、様々な高さ(0.01m、0.1m、1.0m)

図 3. 信号波形と出力波形の定義

から自由落下させ PZT に衝突させたときのオシロスコープから信号を図 3 に示す。出力される波形の振幅(電圧値)にプレアンプのフィードバックコンデンサの静電容量をかけて、発生電荷 Q を導出した。

【結果まとめ】

発生電荷 Q と運動量が比例関係を示した。静電加速器実験と自由落下実験の結果の関係を図 4 に示す。

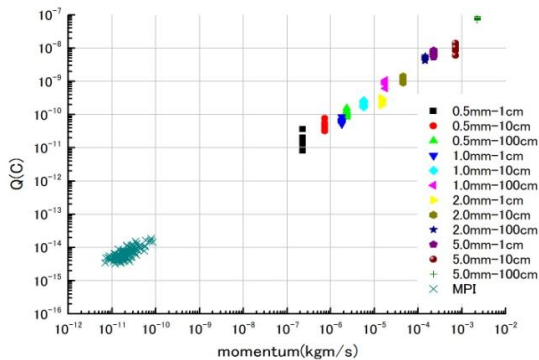


図 4. 静電加速器と自由落下試験の関係性

静電加速器の結果と自由落下の結果を比較すると、一貫した相関を示しているように見える。このことから、静電加速器による高速微粒子の運動量領域の検証は自由落下による実験で可能であると思われる。

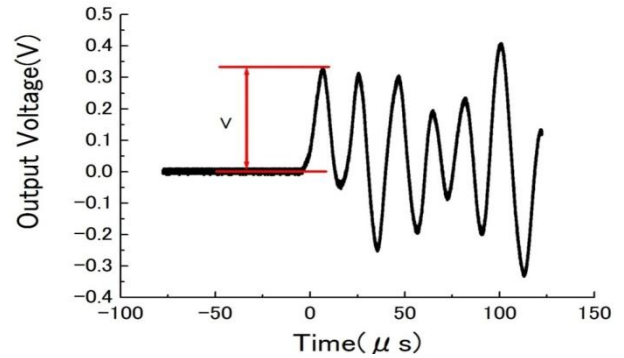
→ 加速器衝突実験と自由落下衝突実験の中間のデータ充実をする。(今後の課題とする)

→ 自由落下での温度特性の実験を行う。(次の項で示す)

(b)衝突実験 2

自由落下衝突実験で温度特性を検証した。

- -169°C~200°Cの温度範囲で測定。
- 高温部は電気オープン、低温部は液体窒素で温度調整。
- 直径 2mm の鋼球を高さ 30cm から自由落下。
- 各温度で 15 回測定。
- 衝突実験 1 と同様にオシロスコープで信号を表示(図 3)。立ち上がり電圧を測り、静電容量を掛け合わせ発生電荷 Q を導出。



【結果まとめ】

図 5 に発生電荷 Q 値の温度依存性を示す。発生電荷 Q は変化量±15%程度の範囲で一定である。温度変動による PZT への影響は限定的であると結論した。

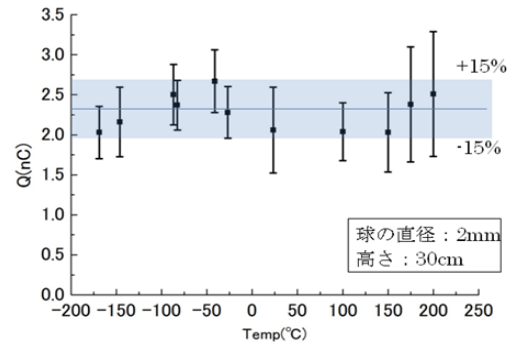


図 5. 温度変動環境下の発生電荷

<衝突実験 2 の不確定要素を取り除いた実験>

以上に示した自由落下の実験ではいくつかの不確定要素があり、それらをできるだけとりのぞいて精度を向上させるための改良を行った。

- 落下方法：ピンセット→電磁石
- 統計を高める(測定回数 15 回→60 回)
- 衝突位置のばらつきを小さく
- PZT 素子の変更(フライトモデル)

温度変動は室温(24°C)から 200°Cの高温部で、2mm の鋼球を高さ 30cm から自由落下させた。

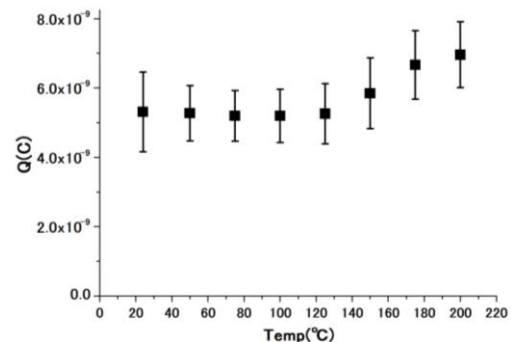


図 6. 温度変動環境下の発生電荷(改良後)

【結果まとめ】

150°C付近から発生電荷 Q が上昇する傾向がみられる。原因は圧電定数の値の増加、あるいは相転移が始まっている可能性がある。PZT 素子への影響は限定的といえる範囲ではあるが、温度依存が見られるため、原因を追及し実測時の影響を考えなくてはならない。