

全天に開口したその場計測型超高速微粒子検出器を構成する圧電性 PZT 素子の特性

宮地 孝¹、藤井雅之¹、長谷部信行¹、野上謙一²、岩井岳夫³、松本晴久⁴、武智誠次⁵

早大¹、獨協医大²、東大³、JAXA⁴、大阪市大⁵

Calibration of piezoelectric PZT elements for a 4π real time detector

T.Miyachi¹, M.Fujii¹, N.Hasebe¹, K.Nogami², T.Iwai³, H.Matsumoto⁴, S.Takechi⁵

Waseda Univ.¹, Dokkyo Med. Univ.², Univ. Tokyo³, JAXA⁴, Osaka City Univ.⁵

Abstract: Piezoelectric PZT elements were studied by bombarding them with hypervelocity microparticles. The characteristics were discussed with respect to velocity during collision, temperature ranging from room temperature to 150 °C, and incident angles from 0 to 60°. A high temperature state occurred immediately after collision was discussed.

超高速微粒子検出器の開発をしている。検出器は圧電性ジルコン酸チタン酸鉛(以下 PZT)を母材とする素子で構成される。PZT は圧電性のためバイアス不要で能動的に機能する。BepiColombo 計画のダスト検出器(MDM)はこの特徴を活用した[1]。更に視野を全天に拡大のため十二面体の形状をとる検出器を提案した(図 1)。



Fig.1. Frame of the dodecahedral detector.

PZT 検出器の信号を解析する上で素子校正が必要である。校正は地上実験から構築された経験則により処理されよう。経験則構築において衝突に起因する高温高压状態の知見が不可欠と予想する。このような背景から、圧電性に関する温度許容範囲、微粒子入射角度の依存性を動的に調べた。また基本的物理量である衝突温度を測定した。これらの結果を中間報告する。

素子・微粒子

十二面体を構成する素子は辺長は 23 mm、厚さ 1 mm で五角形の形状である。素子の背面を図 2 のように電極を細分した：端辺に幅

2 mm の細電極と中心電極から構成される。前者は衝突位置で発生した横波の伝播時間から位置を出す[2]。後者は衝突で発生した縦波を検出し衝突時の物理量を出す。

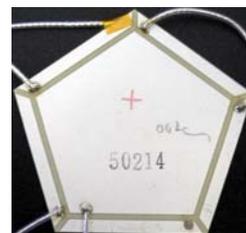


Fig.2. Structure of electrodes of the pentagonal element.

温度および入射角度に関する依存性測定では測定装置の制約から、同一材で 20 mm 四方の素子を使用した。その表面は端辺に幅 2mm の細電極と 14 mm 四方の中心電極で構成された。

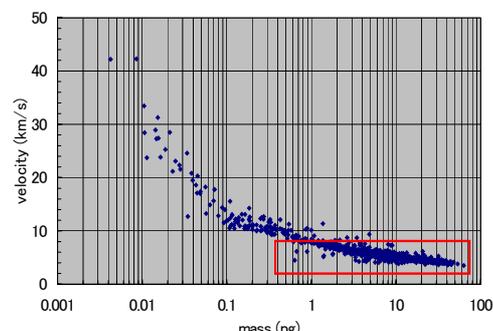


Fig.3. Samples of dust. Events due to particles in the rectangular region are tagged as slow collision events.

素子特性はMPI-KのVan de Graaff 加速器から放出された鉄粒子を照射して調べた。鉄のサンプル例を図3に示す。本報告では図中四角内サンプルによる衝突を低速と称する。

素子容量は10 nF 程度になるので、入力容量の大きな検出器に適した高速増幅器を使用した。静電容量10 nF に対して100 ns の立上りが得られた。

衝突速度依存性

PZTの応答は衝突速度で分類される[3]。低速衝突で得られた信号を図4に示す。低速衝突の特徴は円形素子と類似の波形を示す[4]。パルス状信号の最初のピーク値を振幅として定義する。振幅は衝突粒子の運動量に比例する(図5)。

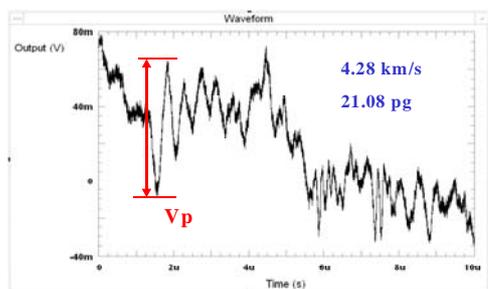


Fig.4. Signal form of a slow event. The amplitude is defined by V_p .

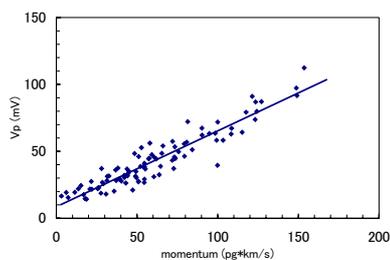


Fig.5. Amplitude vs momentum.

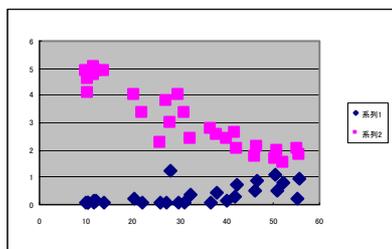


Fig.6. Rise time (top, scale in μs) vs velocity and amplitude (bottom, scale in V) vs velocity. The horizontal scale is in km/s.

高速衝突の場合孤立波形に移行する。この傾向は円形素子と類似である[3]。信号の立上り時間と衝突速度の関係を図6の上図に示す。速度と立上り時間は一次の関係となり先の報告と類似の傾向を示す。

高速衝突で振幅と速度の関係が速度40 km/s を越えた領域で増加傾向になることを示唆した(図6の下図)。この傾向は以前観測されなかった傾向で、今後の課題である。

温度依存性

宇宙環境に於いて素子はある温度環境で使用される。ここではISSとBepiColomboでMDMが使用される環境を考慮した。素子はハロゲンランプの輻射熱で150°C程度まで加熱できた。低速衝突の場合、加熱温度により出力信号に有意の差はなかった(図7)。従ってこの温度範囲では素子感度が温度に依らない。ただし出力信号の周波数解析から特定の成分の温度依存が認められた(図8)。このことはパルス状信号の包絡線が変化することを示している。動的な温度依存は静的に測定された依存と異なる。温度依存の評価は今後の課題である。

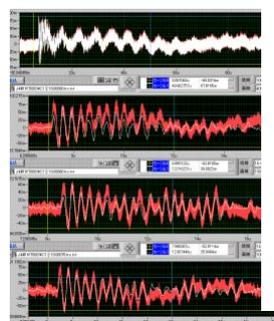


Fig.7. Waveforms of slow collisions at temperatures;

room temperature.

100 °C.

150 °C.

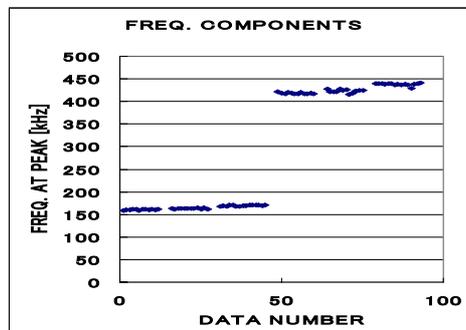


Fig.8. Frequency components appearing ~ 160 and 420 kHz regions depend on temperature. The three clusters of each region correspond to room temperature, 100 °C, and 150 °C, respectively from left.

入射角度依存性

入射角度による依存性実験の様子を図 9 に示す。素子への入射角 θ は回転機構により調整された。垂直入射($\theta = 0^\circ$)から $\theta = 60^\circ$ で角度依存を調べた。事象毎の信号形状を視察で吟味する限り、信号形状と θ との関係は認められなかった。

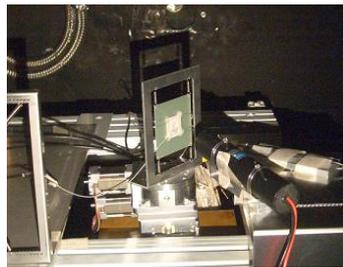


Fig.9. Element on a rotating stage.

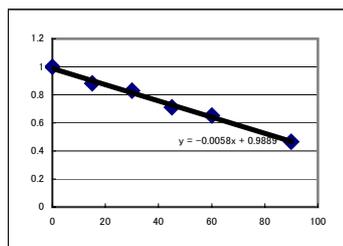


Fig.10. Angular dependence of the sensitivity normalized to that at $\theta = 0^\circ$. The sensitivity depends on θ but $\cos\theta$.

統計的視点から論じる。低速衝突で観測される素子感度は角度に依存する。しかし依存の程度は微量である。速度の区分を施さずに、素子感度の角度依存性を図 10 に示す。同図で感度は $\theta = 0^\circ$ で規格した。この結果から、感度は θ に一次的に関係するが $\cos\theta$ にはよらない。この依存性の解明は今後の課題である。

衝突温度

校正の処方は不可欠であり、今後地上実験データを基礎にして開発されよう。現実には地上実験で取りうる速度と質量領域は限られるので、地上実験データの範囲を超えた広い領域で適応する経験則が要請される。そのため衝突直後の短時間に実現する高压高温の状態に注目する。ここでは温度測定を試みた。

衝突温度は黒体放射を仮定した方法で得られた【例えば 5】。微量光を短時間で観測する

ので光電子増倍管(以下フォトマル)使用が基本的に正しいと考える。しかしフォトマルで光の個数を観測して衝突温度を推定するのは容易でない。さらに輻射光が衝突直後に二次的に放出されたダストより遮蔽されるので、実際の温度よりかも低温値を示すことになる予想される。

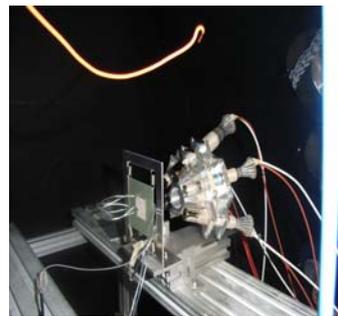


Fig. 11. Assembly of a PZT element and five photomultipliers. A particle from right hits the PZT and the flashes of light are viewed with the photomultipliers.

その為従来の方法を改善した。応答関数の異なるフォトマルを集合的に使用した(図 11)。その上で、以下の方法を取り衝突温度を推定した：①温度の絶対値を決定、②黒体温度と光量の相対的な関係を計算で出す、③速度とフォトマル出力の関係を実験で出す、④計算と実験の結果を対比する。

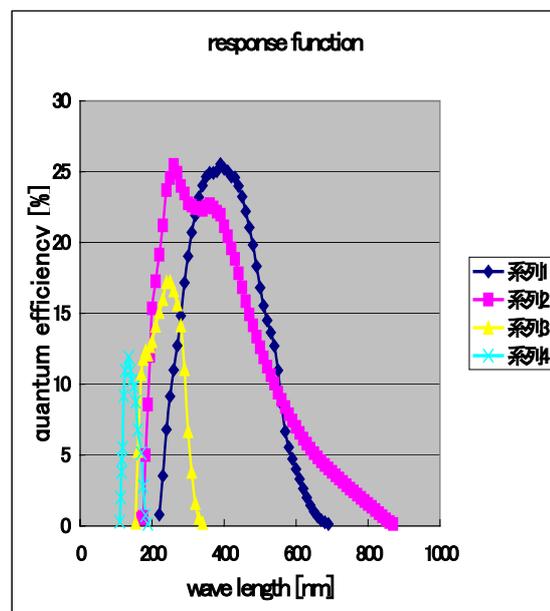


Fig.12. Response functions are shown; visible normal (v_1), visible wide (v_2), blue (b), and ultraviolet (uv).

応答関数を図 12 に示す。便宜上、可視領域 v_1 , 広い可視領域 v_2 , 青に感度領域を持つ b , と紫外に感度を持つ uv と命名する。 uv は狭い応答特性を持つので一種の閾値検出器として機能する。

応答関数と Planck の輻射式の合成して各フォトマルの出力の黒体温度依存性をだす。 uv 特性の場合応答波長域が狭いので閾値検出器としても機能する。後述する計算値と実験値の対比から uv 特性のフォトマルでは衝突速度 20 km/s に於いて 2.5×10^4 °K の温度の閾値に達する。

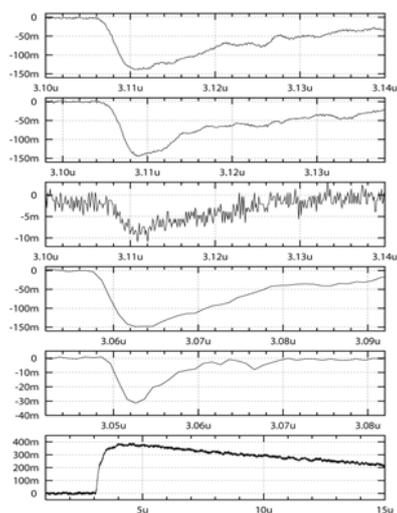


Fig.13. Output waveforms. From top to bottom, signals of v_1 , v_2 , b , v_1 , uv , and PZT are shown. The amplitudes of phototubes peak ~ 5 ns.

実験結果を概説する。5本のフォトマルとPZTが応答したものを示す(図13)。 uv の波高と速度の関係を図14に例示する。

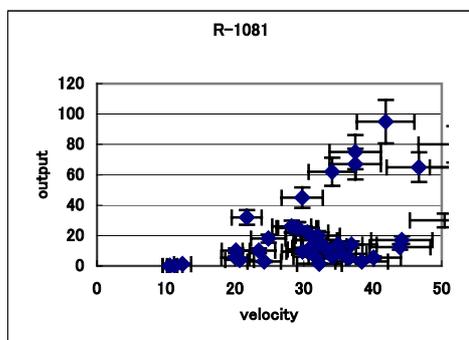


Fig.14. Output of the uv phototube as a function of the velocity during collision.

この図から波高値はある極限值より低い領域に分布する。このことは二次的に発生したダストにより輻射光が遮蔽されたとしてよい。また大部分のフォトマル波形はスムーズではなく、遮光の存在を示唆する。そのため極限値を連ねた関係式で温度と速度の関係が得られると仮定する。

以上の関係を図 15 に示す。この図から、20 km/s 以上の領域での温度・速度変換は概ね速度 1 km/s あたり 10^3 °K 増加する。

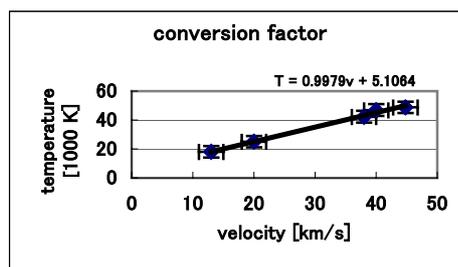


Fig.15. Conversion factor between temperature and velocity.

結論

PZT 材素子の衝突速度に関する特性は形状によらない。素子出力は低速領域と高速領域で異なり従来報告された傾向を示す。動的な素子感度は室温 ~ 150 °Cの範囲で実質変らない。入射角度依存は認められる。しかし個々の信号から入射角度を決定できない。黒体輻射法による温度測定では二次的な遮蔽効果の抑制が必要である。衝突温度は以前の報告より高温である。

参考文献

- [1] K.Nogami, M.Fujii et al., Present Status of the Experiment on the Collision of Dust Particles in Space, presented at 4th Annual Meeting of AOGS (Bangkok, 2007).
- [2] T.Miyachi et al., Adv. Space Res. in press.
- [3] T.Miyachi et al., Appl. Phys. Letters **86**, 234102 (2005)..
- [4] T.Miyachi et al., J. Appl. Phys. **98**, 014110 (2005)
- [5] Eichhorn, Planet. Space Sci. **23**, 1519(1975), ibid. **26**, 463(1978)