

ピエゾ圧電素子による超高速微粒子の速度の測定

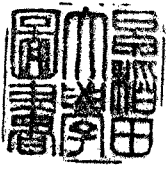
(課題番号 14550049)

平成 14 年度～平成 15 年度科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2)) 研究成果報告書

平成 16 年 5 月

宮地 孝

早稲田大学・理工学総合研究センター・教授)



#### 研究組織

研究代表者 宮地 孝 (早稲田大学理工学総合研究センター教授)  
研究分担者 長谷部 信行 (早稲田大学理工学総合研究センター教授)  
研究分担者 小林 正規 (早稲田大学理工学総合研究センター講師)

#### 交付決定額 (配分額)

〈金額単位:千円〉

	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	2,500	0	2,500
平成 15 年度	900	0	900
総計	3,400	0	3,400

#### 研究発表

##### (1) 学会誌等

T.Miyachi, N.Hasebe, H.Ito, T.Masumura, H.Okada, O.Okudaira, N.Yamashita, H.Yoshioka, M.Higuchi, T.Matsuyama, T.Murakami, Y.Uchihori, M.Kase, M.Sato, T.Tou, Acoustic response of piezoelectric lead-zirconate-titanate to a 400MeV/n xenon beam, Jpn. J. Appl. Phys., 42, pp1456-1457, 2003.

T.Miyachi, N.Hasebe, H.Ito, T.Masumura, H.Okada, H.Yoshioka, M.Higuchi, T.Matsuyama, K.Nogami, T.Iwai, H.Shibata, Y.Hamabe, S.Sasaki, S.Sugita, H.Ohashi, S.Hasegawa, H.Yano, M.Sato, T.Tou, Response of piezoelectric lead-zirconate-titanate to hypervelocity silver particles, Jpn. J. Appl. Phys., 42, pp1496-1497, 2003.

T.Miyachi, N.Hasebe, H.Ito, T.Masumura, H.Okada, H.Yoshioka, K.Nogami, T.Iwai, H.Shibata, Y.Hamabe, S.Sasaki, S.Sugita, S.Hasegawa, H.Yano, H.Ohashi, K.Muranaga, M.Sato, T.Tou, Real-time detector for hypervelocity microparticles using piezoelectric material, Adv. Space Res., in press, 2004.

(2) 口頭発表

吉岡秀樹、長谷部信行、伊藤浩巳、宮地孝、中村勇介、岡田宏之、野上謙一、岩井岳夫、柴田裕実、佐々木晶、村永和哉、大橋英雄、長谷川直、矢野創、佐藤正典、董敦灼、PZT を用いた超高速微粒子用のリアルタイム検出器の開発、日本物理学会 58 年次大会、2003 年 3 月 29 日。

永島敦、藤井雅之、長谷部信行、小林正規、蔵座元英、宮地孝、中村勇介、奥平修、山下直之、野上謙一、佐々木晶、岩井岳夫、村永和哉、大橋英雄、長谷川直、矢野創、柴田裕実、岡田長也、佐藤正典、董敦灼、圧電 (PZT) 素子を用いた超高速微粒子用のリアルタイム検出器の開発、日本物理学会 58 年次大会、2003 年 9 月 21 日。

中村勇介、藤井雅之、長谷部信行、小林正規、蔵座元英、宮地孝、永島敦、奥平修、山下直之、村上健、内堀幸夫、柴田裕実、岡田長也、佐藤正典、董敦灼、ジルコン酸チタン酸鉛 (PZT) を母材とした放射線検出器、日本物理学会 58 年次大会、2003 年 9 月 21 日。

T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, M.Kobayashi, E.Kuraza, A.Nagashima, Y.Nakamura, O.Okudaira, N.Yamashita, K.Nogami, T.Iwai, S.Sasaki, H.Ohashi, K.Muranaga, S.Hasegawa, H.Yano, H.Shibata, N.Okada, T.Tou, Velocity response of a lead-zirconate-titanate element to hypervelocity microparticles, 24th International symposium on space technology and science, 2004 年 6 月 4 日 (ISTS 2004-h-01 として発表予定)。

T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, M.N.Kobayashi, G.Kuraza, A.Nagashima, Y.Nakamura, K.Nogami, T.Iwai, S.Sasaki, H.Ohashi, S.Hasegawa, H.Yano, H.Shibata, Real-time detector for hypervelocity microparticles using piezoelectric material(II), 35th COSPAR Scientific Assembly, 2004 年 7 月 23 日 (PEDAS1/B1.6、発表予定)。

## 研究成果

### 目的

ジルコン酸チタン酸鉛 (PZT) を母体とする検出器を用いて超高速微粒子の速度を決定する実験的研究をテーマとした。

**結論** PZT 素子の出力波形が衝突粒子の速度に依存することを明らかにした。微粒子速度 5~60km/s の範囲のデータから、素子出力の立上り時間が凡そ 4ns/km の割合で早くなる。この現象を説明できる処方法は未知であるが、実験的な経験則を確立できれば、一つの PZT 素子で超高速微粒子の速度を決定できると結論する。

### 背景

本実験を提案した背景を説明する。宇宙空間に於ける活動が活発になるに従い浮遊物（その多くは過去の人工物体の残骸である）が活動の障害になると懸念されている。残骸物のサイズからみると、微小な物ほど多量に存在する。そのサイズが 1 $\mu$ m 程度となると、リアルタイム計測での捕捉が困難となる。即ちこれらのデブリが殆どリアルタイムで計測される訳でない。従って、微小な超高速微粒子のリアルタイム検出器を実現させることは将来の宇宙環境利用の際に、不可欠な要件となる。また斯様な検出器が実用化すれば、探査機に搭載して、微小なスペースダストのリアルタイム計測が実現する。

探査機に搭載する条件を想定する。この場合利用できる資源が制限される。なによりも検出器を軽量化することは必須である。過酷な環境下で、長期間安定に動作するものなければならない。また、搭載した検出器が雑音源となり他の計測機器に影響を与えることをさけることも必要である。

このような事情から、圧電性の PZT に着目した。PZT の圧電特性は他の圧電物質と比較して総合的に勝っている。比較的高温まで圧電性が維持される。特筆すべきは、圧電性故にバイアス電圧を印加する必要がない。従って、当該電源系統が不要となる。さらに、印加電圧を要しないので、雑音源にならない。PZT はセラミックなので、比較的形状を自由にとれる。検出器の構造が簡単であり、長期維持が容易である。材料自体高価でない等の利点がある。

従来 PZT がダスト検出器の一部として使用されてきた。検出器の構成からみると、検出器は粒子捕捉部分と信号変換部分から成る。通常捕捉部分で衝突に伴い発生した物理量は変換部分で電気信号に変換される。PZT はこのうち変換器（ここでは歪 - 電荷変換機）として専ら使用されてきた。我々は PZT の圧電性に着目した。そして捕捉部分と検出部分

を一体化したリアルタイム検出器を開発してきた。この過程で、衝突速度に応じて僅かではあるが信号の形状が変化していることに留意した。

よく誤解されるので一言述べたい。この研究の特徴は圧電性 PZT で一体化した検出器の超高速衝撃に対する反応の研究である。単に振幅のみに着目した従来の視点から、波形全体を視野にいたした検出器応答を基礎とした新規検出器技術を開拓するもので、恐らく最初の実験的研究である。現在この複合過程を矛盾なく統一的に説明できる理論的処方はない。従って、この現象を扱う理論的研究を推進させる資料を提出することも目的の一つである。さらに、水星探査機 (BepiColombo 計画の Mercury Magnetosphere Orbiter, MMO) に搭載するダスト検出器の開発資料としても注目されている。

#### 実施の説明

##### ① PZT 素子。

素子の形状を図 1 に示す。PZT 素子の Q 値 (soft mechanical Q factor) は約 75 である。低 Q 値を使用したのは、受信主体で共鳴の効果を抑制する。素子は厚さ方向に偏極された。各種の形状のものを製作して評価した。本研究では直径 20mm の円盤型を標準とした。以下とくに断らない限り標準の直径寸法の素子である。厚さは 0.5~4mm の範囲で評価した。目的に応じた素子の厚みの最適値を 1~2mm と決定した。素子両面には数  $\mu\text{m}$  厚の銀膜を全面焼付けして、偏極に伴う信号を検出した。

標準外として、断面  $40\times 40\text{mm}^2$ 、厚さ 1mm を使用した。表面には、右端の広い電極 (以下 W 電極、面積は  $19\times 40\text{mm}^2$ ) と 7 個の細い電極 (N 電極、夫々  $1\times 40\text{mm}^2$  で、1mm 間隔で配列左端から順次 1,2,・・・7 とした) を焼付けた。この素子は横方向に広がる信号の検出に使用された。

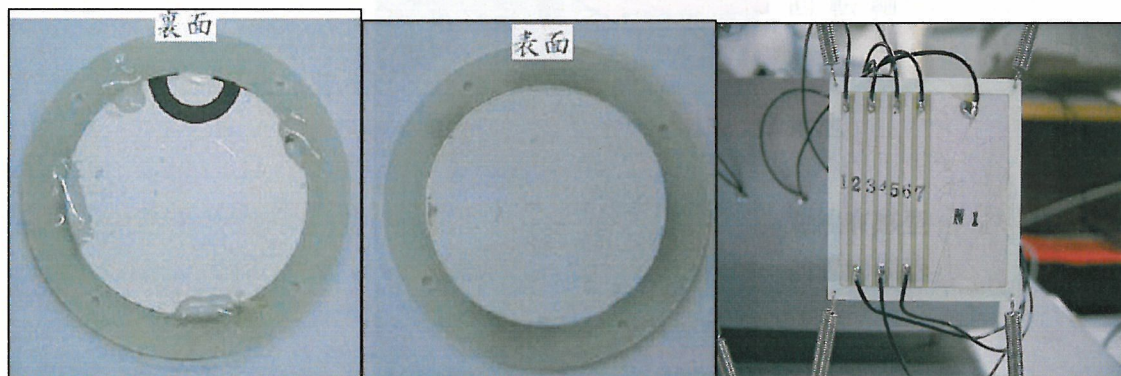


図 1 素子形状。直径 20mm の標準型と  $40\times 40\text{mm}^2$  の標準外を示す。

## ②素子格納

PZT は高インピーダンスで機械的振動に敏感である。従って、これらの雑音を抑制する必要がある。機械的振動であるが、素子をばねで支持する方法が簡単であるが効果的であることが分かった。素子を図 2 に示す方法で低周波雑音を除外した。

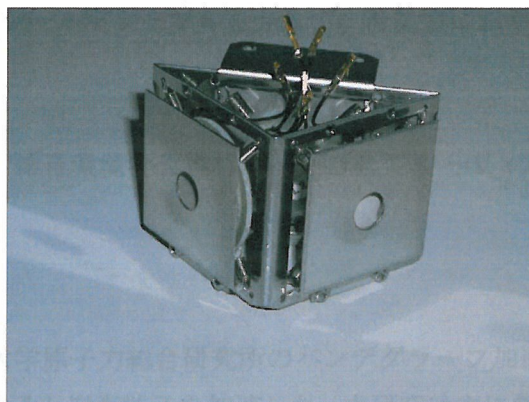


図 2 素子をばねで固定

電氣的雑音であるが、素子に接続される前置増幅器に誘導される雑音の寄与が顕著であった。雑音除去のために素子の直近に前置増幅器をおき、これを電池で駆動する方法が効果的であった。

最終的には図 3 に示すように、複数の素子を集合させ、各素子の信号を直近においた前置増幅器で処理した。これら増幅器はまた直近においた電池で駆動した。素子は回転して、一組のものが微粒子に照射されるようにした。この集合体を真空容器内に格納した。

素子全面には直径 10mm の孔をもつアルミ板をおいた。この孔により、微粒子衝突が素子中心部分の領域に極限されるようにした。

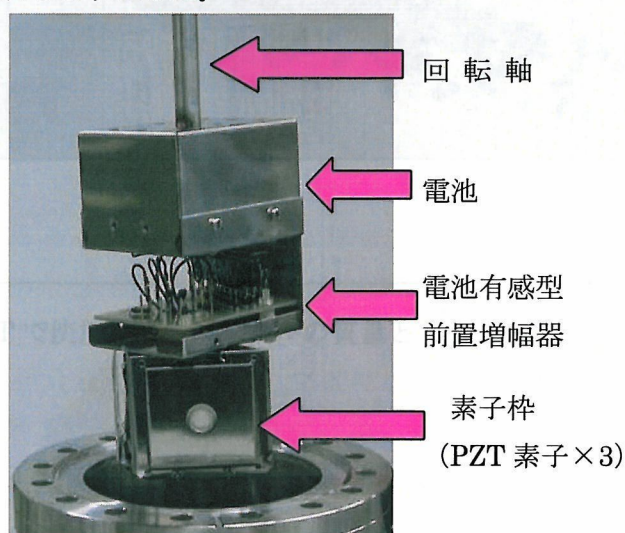


図 3 素子格納器。本文参照。

### ③低雑音高速増幅器

実験で使用した前置増幅器を検討した。当初予想していた周波数領域より高周波領域の信号に意義があることが分かってきたので、結果的に、高エネルギー物理実験の多線式電離函で使用していた回路を基礎にして帯域幅 400MHz の増幅器を使用した。増幅器の出力信号は 40m 長の二重シールドケーブルを介して、計数室におかれたデジタルスコープで観測された。

以上の措置を施し、雑音環境を改善した。その結果数 mV の電圧信号を安定に計測できるようにした。

### ④微粒子照射装置

微粒子加速は東京大学原子力総合研究所のバンデグラーフ加速器装置 (HIT) で行った。この加速器により、銀粒子と炭素粒子を加速した。本研究は主に銀粒子で実施された。HIT では微粒子の速度と質量は予め設定しておくことができない。後述する処理方法により、一イベント毎に速度と質量を決定した。それらの一部を図 4 で示した。この加速装置で得られる銀粒子の標準的な速度と質量の範囲はそれぞれ 2~6km/s、と 1~100pg である。

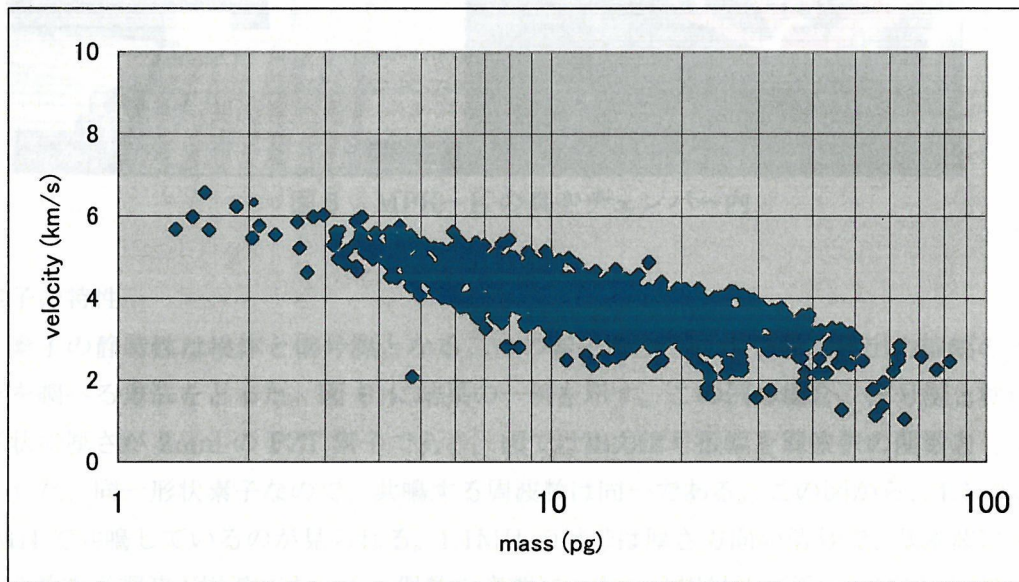


図 4 HIT で使用されたサンプルの質量と速度範囲。

### ⑤Max-Planck 原子核物理研究所 (MPI-K) の実験

速度 10km/s を超える粒子を HIT で得ることが困難なので、MPI-K の加速装置を使用した。この実験では、標準形状と標準外形状の素子に微粒子を照射した。その時の様子を図 5 に示した。同研究所加速器ではビーム照射位置を 5mm 以内に調整できるので、図 3 に示す素子前面のアルミ板を取り付けなかった。

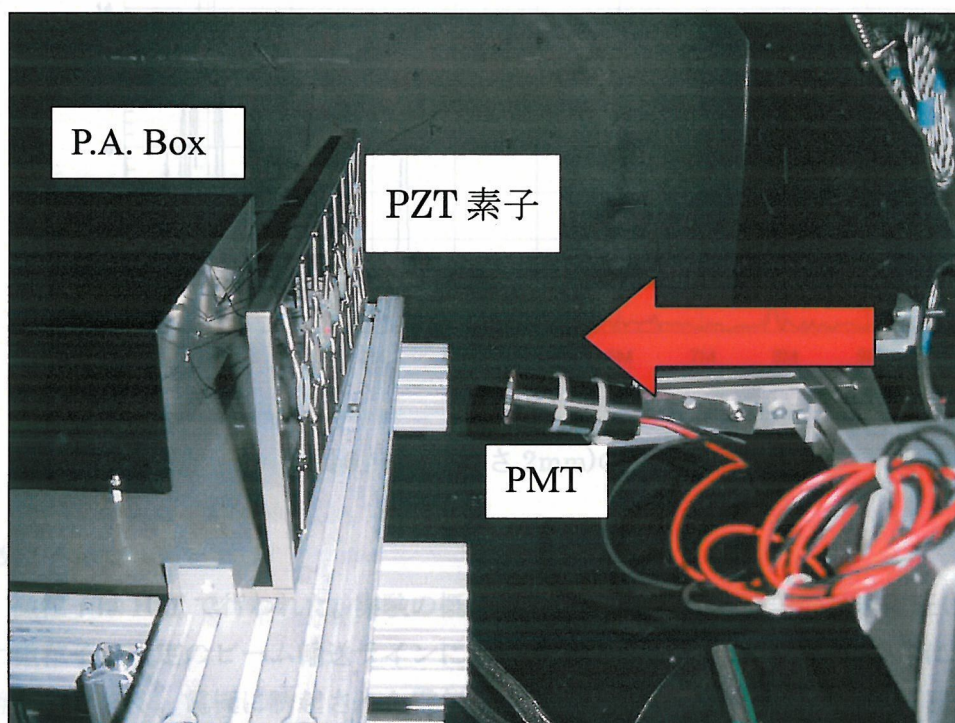


図 5 MPK-K の真空チェンバー内

### ⑥素子の特性

素子の静特性は検体と信号源となる二つの素子を水中に素子を置き出力振幅の周波数依存性を調べる方法をとった。図 6 に結果の一例を示す。この例の場合、信号源と検体は標準形状で厚さが 2mm の PZT 素子である。図では出力信号振幅を周波数の関数としてプロットした。同一形状素子なので、共鳴する周波数は同一である。この図から、1.1, 2.2, 3.3, 4.4MH で共鳴しているのが見られる。1.1MH の信号は厚さ方向の信号で、基本波に相当する。奇数次高調波が顕著であるが、偶数次高調波の寄与は相対的に低い。100kHz 周辺のピーク群は動径方向 (横方向) の共鳴効果を表している。

従来の PZT 使用では専ら横成分に起因する機械的変位を検出器で捕捉してきた。この方法では歪一電圧変換が効率的であるが、高速の時間計測には不適當である。本研究の趣旨から縦方向の振動に着目した。また、衝突の瞬間を出来る限り記憶した状態を抽出するには、共鳴効果の影響を避けたほうがよい。このためにも共鳴現象が単純な高周波領域に着目した。なお非共鳴を活用した測定方法を採用するために、従来から取られている横方



向の振動を利用した方法に比べて、雑音抑制が重要となる。

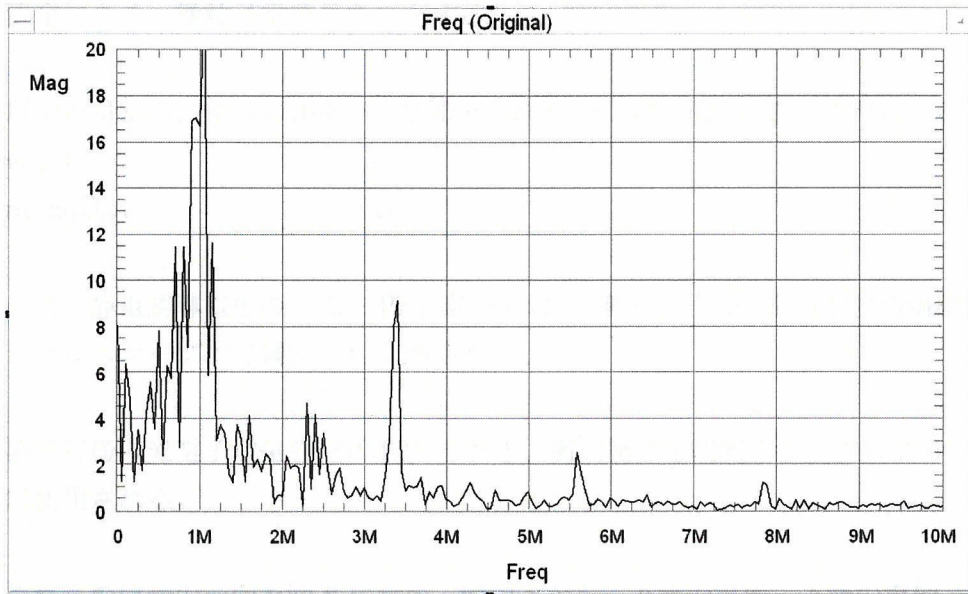


図6 PZT(厚さ 2mm)の周波数特性。

#### ⑦微粒子実験

微粒子は HIT で行われた。実験の概念図を図7に示す。加速器の加速電圧 $U_a$ で加速された微粒子は所定のビーム輸送ラインに沿って引き出される。ラインの途中に一对の静電誘導電極をおく。電極に誘起された電気量はそれぞれの電荷有感型前置増幅器で処理される。それぞれの信号はスコープ上で観測された。

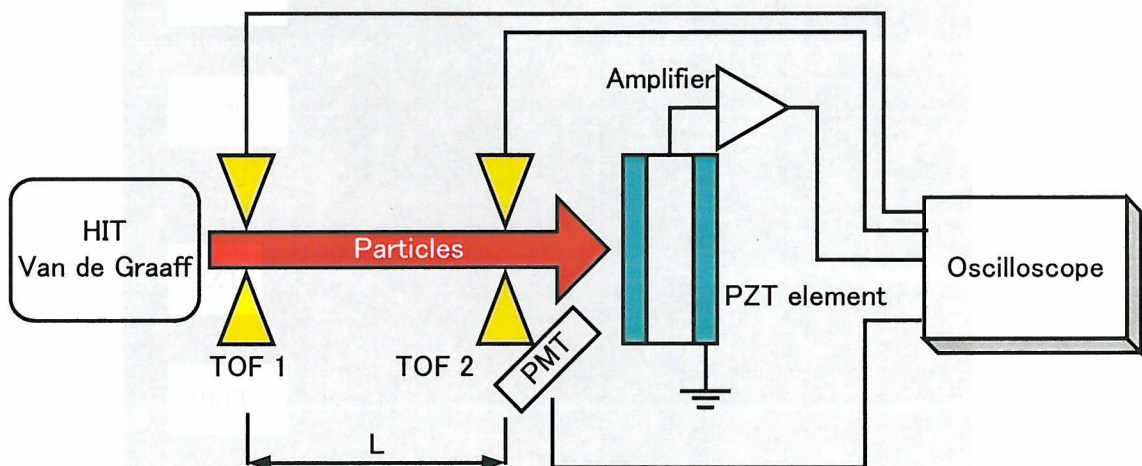


図7 HITにおける実験方法の概念図。

一对の電極間の距離を  $L$  とする。一对の電極で発生する信号の時間差を  $t$  とする。下流の電極に接続された増幅器は校正されていて、誘起電圧と微粒子の電荷量の関係は一義的に決定できる。微粒子電荷量を  $q$  とする。

以上の量から、粒子の速度  $v$  と質量  $m$  はそれぞれ次の(1)と(2)式で得られる

$$v=L/t, \quad (1)$$

$$m=2qU_a/v^2 \quad (2)$$

一对の静電誘導電極の下流に PZT 素子をおく。素子信号は所定の前置増幅器を介して、デジタルスコープ上で観測され、記録される。

素子近傍に光電子増倍管 (PMT) をおき、衝突発光を観測する。この信号も基準時間として使用される。

これらの信号の一例を図 8 に示す。図中上から、上流の電極、下流の電極、PZT 出力と PMT の出力信号を示す。PMT の発光と PZT の出力とは同時に発生している。同時性を確認のため、図 9 に時間軸を拡大した。

各イベントについて、波形を視察して、その衝突反応の適否、飛行時間  $t$ 、出力振幅を決定した。

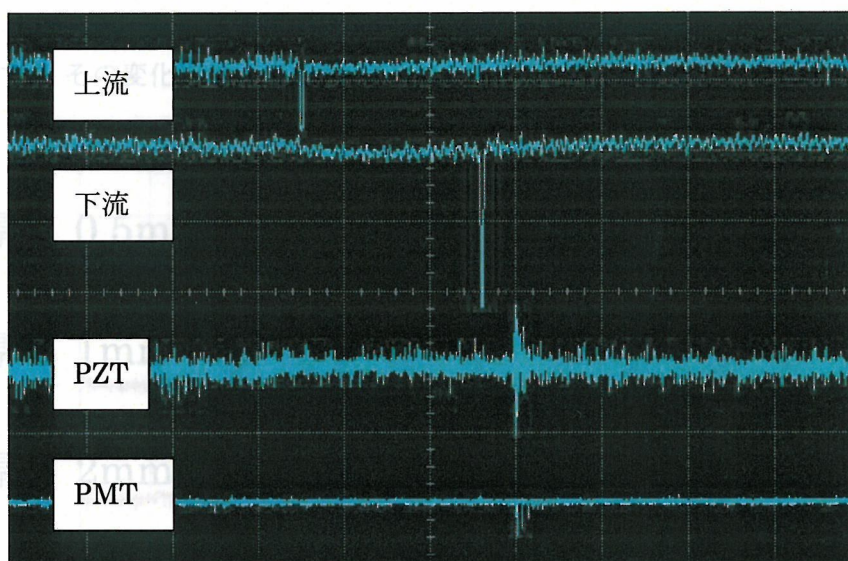


図 8 オシロスコープ上の信号像。上から、上流電極、下流電極、PZT 出力、PMT 出力。

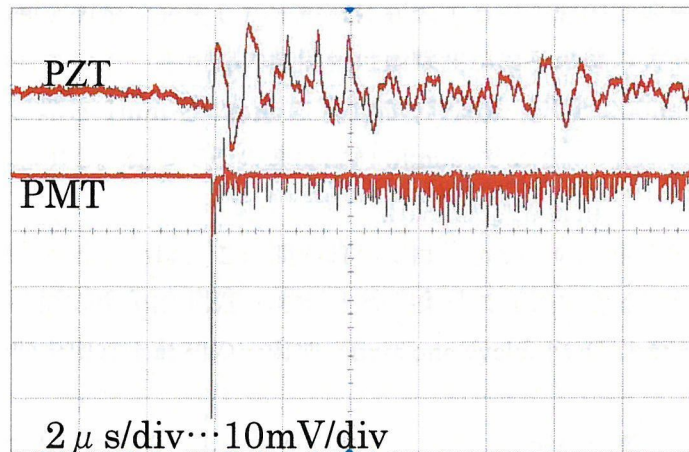


図9 PMT 発光と PZT 信号形成の同時性。

超高速粒子を圧電性 PZT に照射して発生する信号のどの部分の波高に着目すればよいかはア prioriに分かっていない。より根源的であるが、どのようなプロセスを経過して出力信号が現れるか明らかではない。本研究では、衝突直後の信号の形状に着目しているので、衝突直後の信号がどのように振舞うかを調べた。図 10 では、厚さ 0.5, 1, 2mm の 3 種類の素子の信号を上から順次プロットした。その結果、厚さ 1 mm と 2mm の素子出力信号は平坦部が認められるが、0.5mm 素子では明らかでなかった。図中示すように、衝突直後に見られる立上り時間と振幅をそれぞれ  $T_f$ ,  $V_f$  とする。衝突後数 100ns 後の最初の急激な波形の変化は衝突に際して発生した衝撃波が素子の反対面で反射することによって生ずるとしてよい。最初の反射で観測される時間と振幅のそれぞれの差を  $T_r$  と  $V_r$  とする。観測結果から、これらの量には、凡そ  $2T_f = T_r$ ,  $2V_f = V_r$  の関係がある。即ち、反射により偏極状態を反転する。その変化率は一定である。

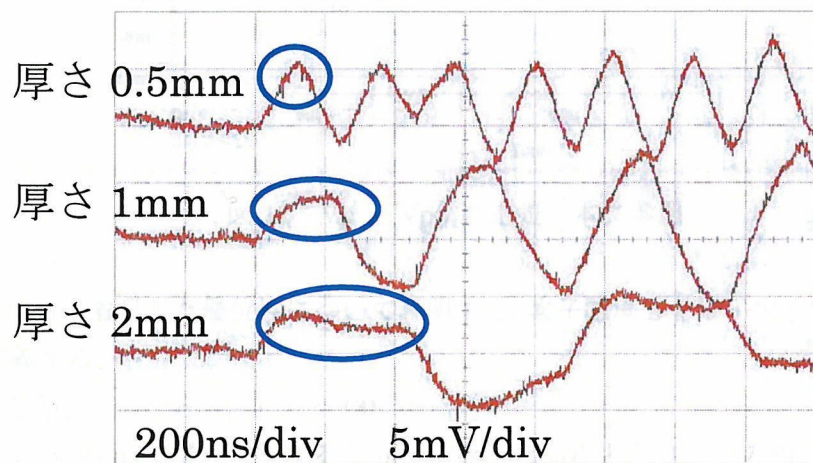


図 10 衝突直後の信号。上から 0.5mm, 1mm, 2mm 厚の標準型素子出力。

立上り部分は衝突衝撃で発生した圧縮波に起因する歪が原因で偏極し、この状態が維持されることを示している。平坦部の時間幅は衝撃波が素子の厚み方向に運動する速度に関係する。従って、厚さ 1mm と 2mm の平坦部の時間差（凡そ 200ns）は衝撃波が 1mm 移動することに対応する。従ってその速度は約 5km/s である。

平坦部が維持されることは、この間の波形では他所からの作用を無視できると考えてよい。従って、この間の現象は PZT の物性と衝突条件で記述できると仮定する。信号の発生と最初の反射の間を便宜上最初の一周期（first one cycle, FOC と略記）と仮称する。

厚さ 0.5mm の素子の場合、平坦部が成長するまえに反射の影響が到来して平坦部のない波形となると考えれば図 10 の振舞いは説明がつく。

実際の振幅は視察による誤差を抑えるために図 11 に示す振幅  $V_p$  とみなすことにした。なお数周期間で見られる最大の振幅  $V_{pp}$  をとることも考えられる。後述するが、素子感度（後述する(3)式で定義）を波高値の定義を  $V_{pp}$  で行うと感度は素子厚さに依存する量となる。

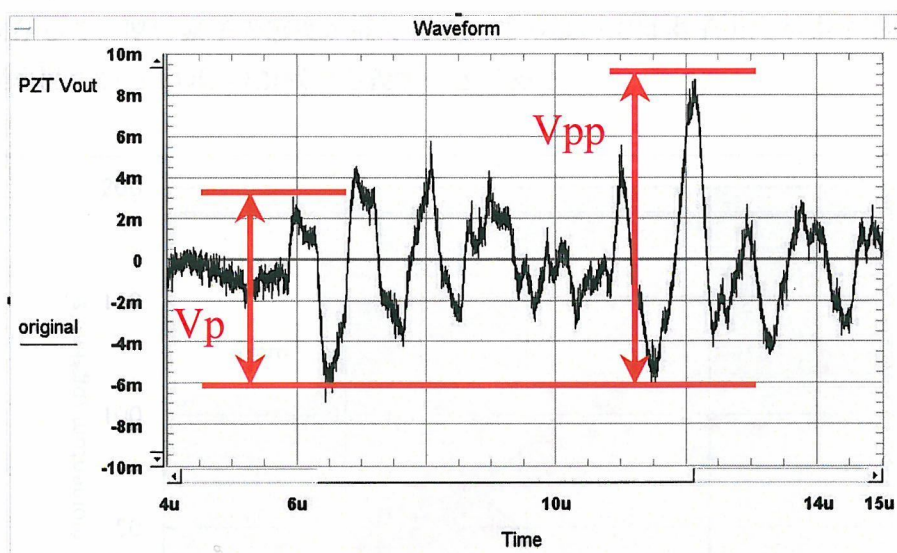


図 11  $V_p$  と  $V_{pp}$  の定義。本文参照。

FOC 部分に着目した優位性について説明する。素子感度  $s$  を素子出力電圧  $V$  と運動量  $p$  により定義する、

$$s = \Delta V / \Delta p. \quad (3)$$

従って、 $s$  は  $V$  vs  $p$  でプロットすると  $p$  に依存した曲線となり、その傾斜が感度を表す。(3)式で  $V = V_p$  にとり、図 12 に  $V$  vs  $p$  をプロットした。図中素子の厚さは 1mm と 2mm である。この定義をとると感度は素子の厚さに依存しない量となる。

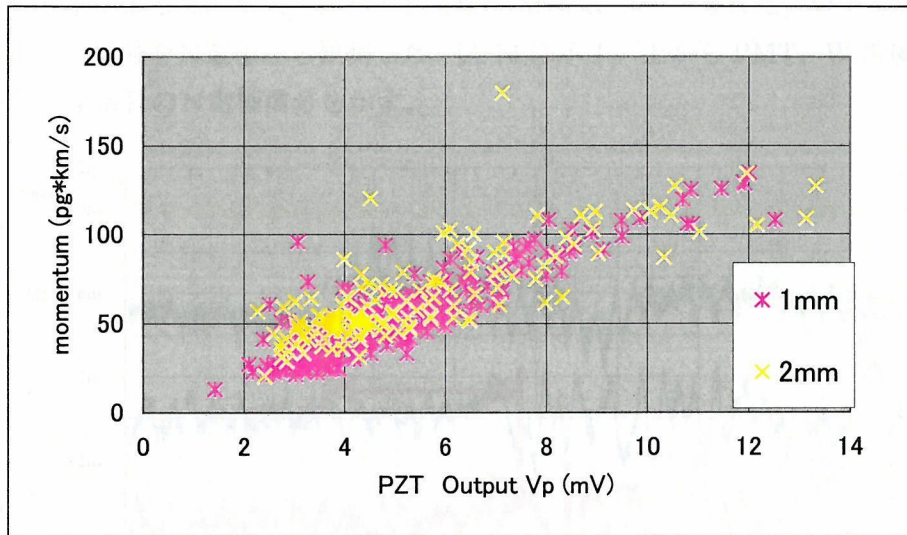


図 12 最初の一周期で見られた素子感度。黄色と紫色はそれぞれ 2mm と 1mm 厚の出力。感度が素子厚によらない。本文参照。

他方  $V=V_{pp}$  として、同様に処理したものを図 13 に示す。この場合は素子感度が素子の厚さに依存して、厚い素子の感度が高くでる。この扱いは素子出力が素子形状に依存する。物理的視点から FOC の領域で定義すべきである。

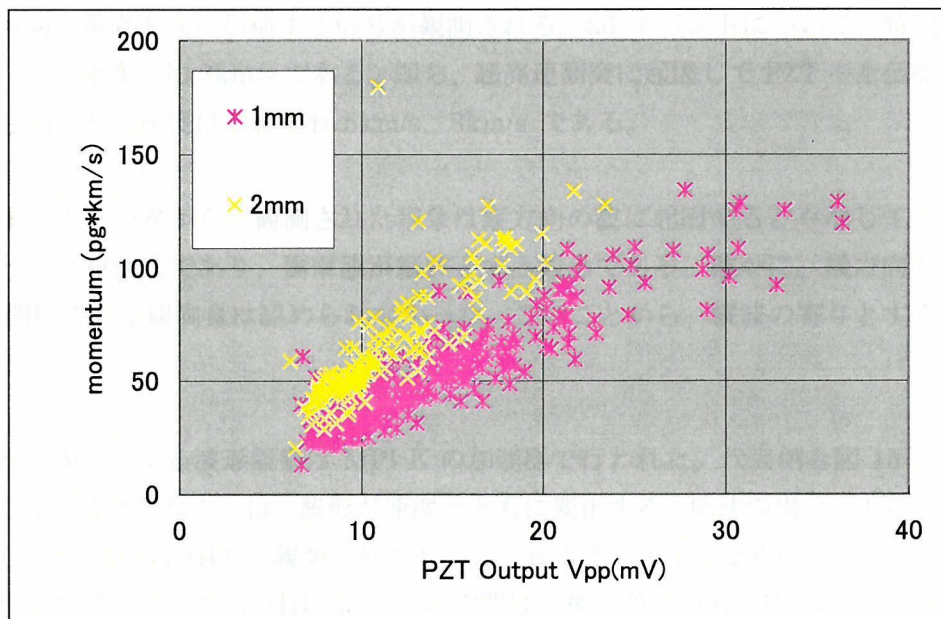


図 13 最大振幅でみた素子感度。黄色と青色はそれぞれ 2mm と 1mm 厚の出力。感度が素子厚に依存する。本文参照。

標準外素子による実験結果を述べる。実験は MPI-K で実施された。粒子をW電極に照射して発生した信号をN電極から観測した。図 14 に示す。上から PMT、W 電極、W 電極から 5 番目と 4 番目の N 電極信号を示す。

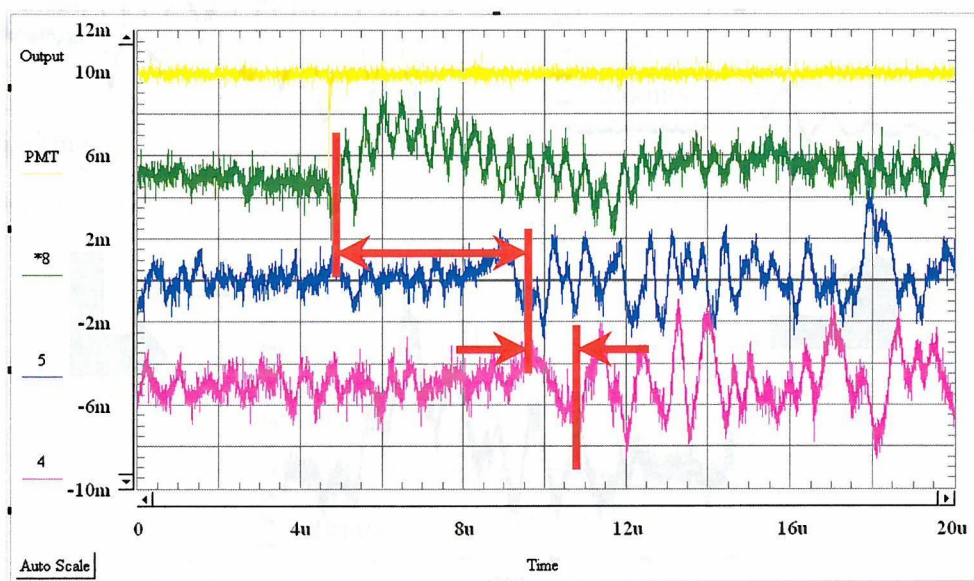


図 14.標準外素子で見られた信号。上から、PMT、W 電極、4 番 N 電極、5 番 N 電極信号。

W 電極からの信号は PMT の信号と同時に発生している。二つの N 電極の信号から、粒子入射方向と垂直方向に伝播する信号が観測される。26 イベントについて、時間差を平均すると、その速度は約  $3\text{km/s}$  である。即ち、超高速衝突に起因して PZT 中を伝播する縦方向と横方向の波の速度はそれぞれ  $5\text{km/s}$ 、 $3\text{km/s}$  である。

これまでのデータから、観測された現象は縦方向の波に起因するとみなしてきた。その根拠の一つは波速度であり、衝撃波が縦波とする観念である。確かに、横方向の波速度  $3\text{km/s}$  に関係できる観測量は認められなかった。このことから、縦波の寄与とする見方を正当化する。

高速粒子衝突による波形観察は MPI-K の加速器で行われた。代表例を図 15 に衝突速度の順で示す。特徴的なことは、波形が速度とともに変化する。低速の場合（I 類と略記。以下同様）、その波形は HIT で観測されたものと一致する。速度が  $20\text{km/s}$  をこえると、波形は単純化して孤立型となる（III 類）。この中間は一種の過渡領域（II 類）とみなせる。即ちこの領域ではパルス上の部分と連続的な部分との重ね合せとなっているが、順次連続部分が相対的に成長するとともにその時間特性が短くなる。衝突速度の増加に応じて、I → II → III 類と順次推移していく様子がわかる。

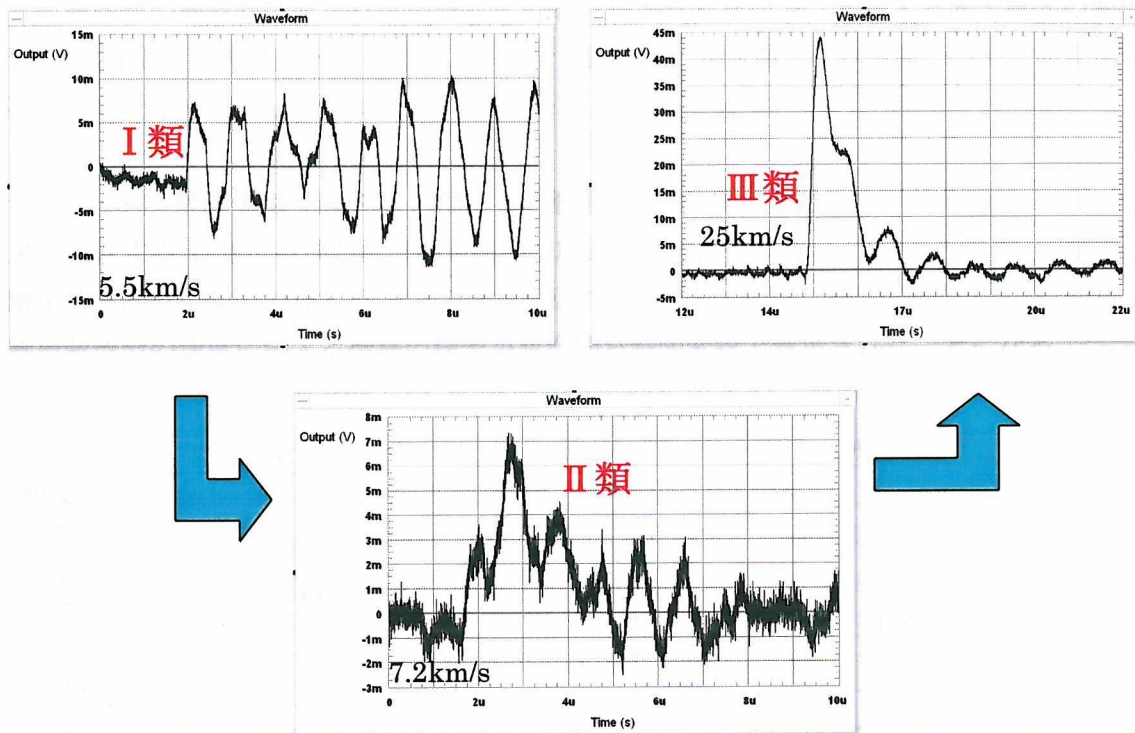


図 15 MPI-K 加速器で観測された信号例。速度に応じて波形が変化する。本文参照。

周波数解析を行った。その結果について述べる。図 10 に示された波形について高速 Fourier 変換 (FFT) を行い、夫々の波形に関して、周波数スペクトルを得た (図 16)。この分布から、基本波と奇数高調波成分が顕著である。奇数高調波に関する性質は素子静特性の結果と一致する。奇数次が顕著であることから表面に於いて偏極方向が反転する波の運動が顕著であることを教唆している。

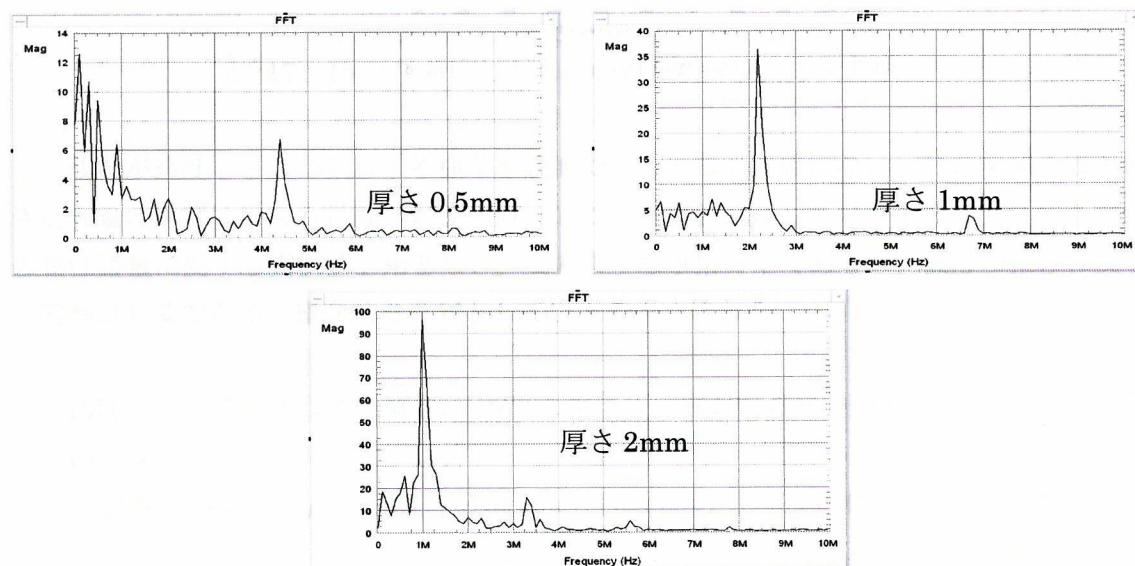


図 16 図 10 に対応したものの周波数解析。本文参照。

基本波の周波数は厚さに反比例している。基本波において、波長 $\lambda$ と素子厚 $d$ の関係を $\lambda=2d$ とし、波速度 $v$ を $5\text{km/s}$ とすると、基本波の振動数 $f$ との関係、 $f=v/\lambda$ の関係を再現している。

図 15 の MPI-K の測定結果に関する周波数解析の結果を図 17 に示す。I 類は HIT の結果と一致する。II 類では周波数成分が速度増加とともにぼやけていく。そして III 類になり、離散的な固有振動が消失する。そしてこの領域では  $1\text{MHz}$  近傍で dip が観測される。即ち、周波数成分の速度に関する推移の様子が波形即ち時間変数で表示されたことになる。

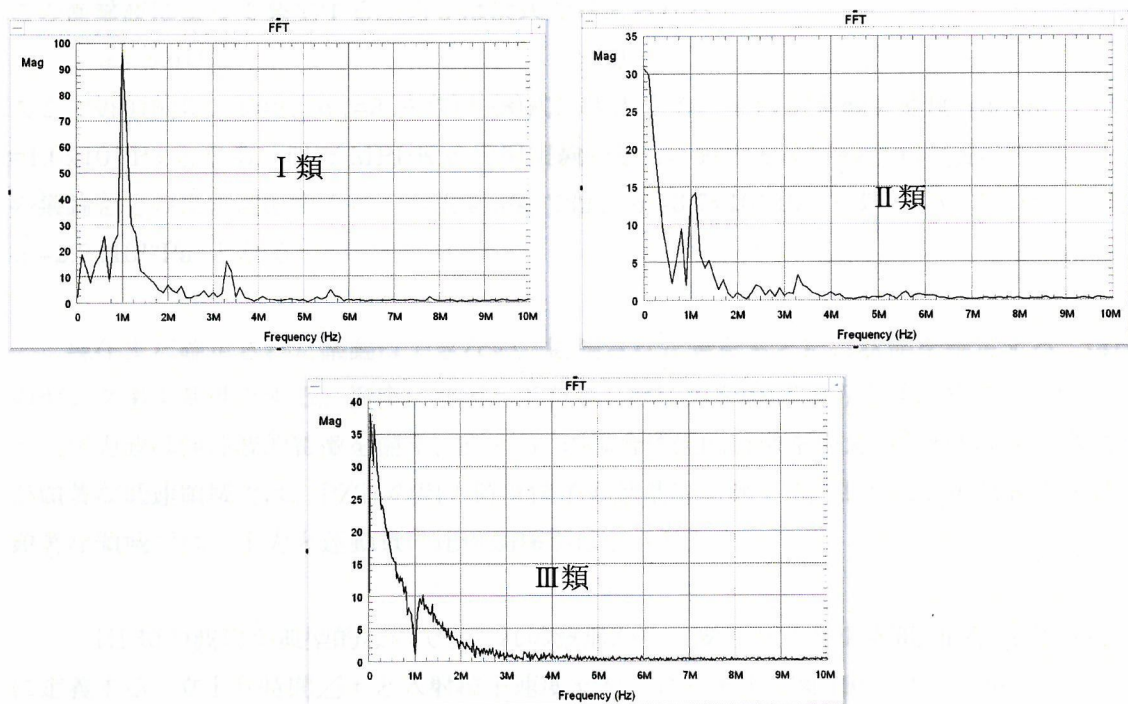


図 17 15 図に対応したものの周波数解析。本文参照。

波形が速度とともに推移する様子を説明できる理論的基礎はない。この現象を説明できる理論の構築は将来の問題である。さらに、この現象を記述していく上で要求される PZT の物性諸量に関する実験値が殆どない。このような事情の下であるが、波形の推移に関する考察は必要である。概念的な考察として以下のようにした。

PZT のヤング率  $E$ 。この概数は PZT の密度  $\rho$  と縦方向の波の速度  $s$  から、

$$E = \rho s^2 \quad (4)$$

として求めた。(4)式で  $\rho \sim 7 \times 10^3$ 、 $s \sim 5 \text{km/s}$  と代入して、 $E = 2.5 \times 10^{11} \text{Pa}$  と推算した。

粒子衝突速度  $v$  とする。PZT 内の粒子速度  $u$  はインピーダンスマッチ法により推算す



る。銀と PZT の密度は近似的に等しいので、衝突速度の半分とする

$$u=v/2. \quad (5)$$

波の速度  $U$  は、定数  $a$  と  $b$  により次式で表示される

$$U=au+b. \quad (6)$$

ここで  $a$  と  $b$  は実験的に求められる量である。これらの実験値を得られなかったので、以下のようにした。

$$a=(1+\Gamma)/2, \quad (7)$$

$$b=u_0. \quad (8)$$

ここで  $\Gamma$  は Grueneisen 計数であり、 $u_0$  は圧力のかからない状態下の音速である。

この衝撃波によって発生する圧力  $\sigma$  は次式で与えられる、

$$\sigma = \rho uU. \quad (9)$$

ここで近似的に、 $\Gamma=2$ 、 $u_0=3$  を(7)と(8)式に代入する。その結果衝突速度  $6\text{km/s}$  では  $\sigma = 1.6 \times 10^{11} \text{Pa}$  となる。他方 MPI-K の照射実験の場合、鉄の密度が銀と同程度なので、上記の議論をそのまま適応すると、 $v=10\text{km/s}$  では、 $\sigma = 3.7 \times 10^{11} \text{Pa}$  であり、 $v=30\text{km/s}$  では、 $\sigma = 2.7 \times 10^{12} \text{Pa}$  となる。

現在まだ確定された議論はできない。観測された量をもとに、状態を推定する。(4)式のヤング率を基準とする。衝突に起因して発生した圧力を(9)式とみなす。 $E > \sigma$  なら発生した圧力波は弾性波的特徴を備え、 $E < \sigma$  の場合塑性的特徴を備えると解釈する。弾性波が顕著な低速領域では、PZT の出力値は粒子運動量に比例する。しかし、塑性波的特徴が顕著な領域では、出力と運動量の比例関係がはっきりしない。

III 類の波形が典型的なので、これの波形から、波形の立上り時間  $\Delta t$  を図 18 のように定義する。立上り時間  $\Delta t$  と入射粒子速度  $v$  をプロット下 (図 19)。サンプルとして一義的に波形が決定できるものを集めた。この図から立上り時間と速度の関係は明らかであると結論する。図中直線はガイドのために書き込んだものである。この図から速度が速いほど立上り時間は短くなる。立上り時間の縮小率は約  $4\text{ns/km/s}$  である。ここでは直線関係を仮定すると以下の近似式がえられる;

$$\Delta t(\text{ns}) \approx 420 - 4v(\text{km/s}). \quad (10)$$

従来のような PZT 素子の使用法ではこのような関係は認められなかった。一つの PZT の波形から速度を推定できることを示した初めての結果である。(10)式で表示される線形関係は限られた領域で得られたもので、自ずと適応限界があろう。現在の知見では、このような線形関係が成立する理由はあきらかでない。

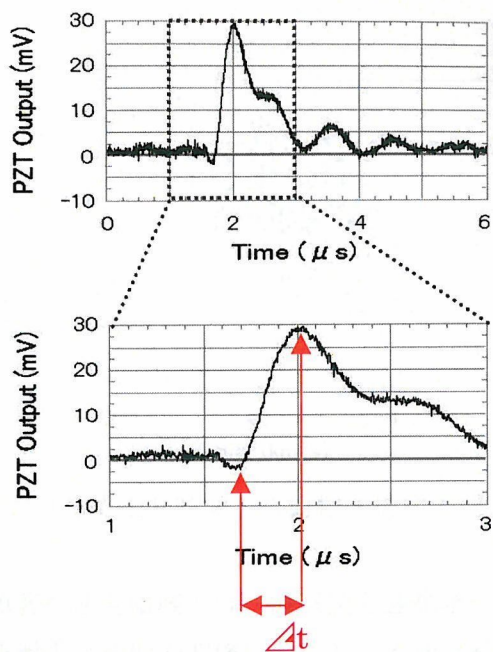


図 18 立上り時間の定義

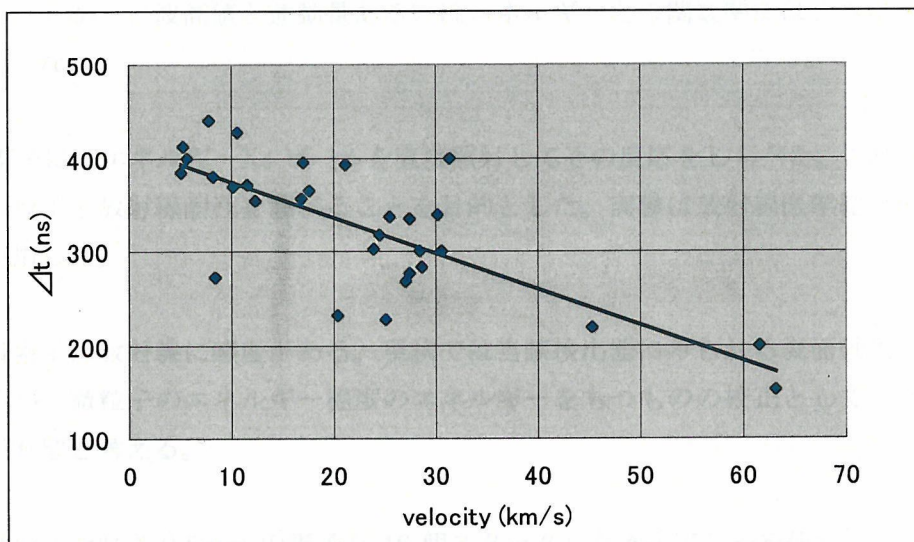


図 19 立上り時間と入射粒子速度の関係。本文参照。

なお I 類の領域についてのべる。波形の位相が反転するまでの時間と速度の関係をプロットすると図 20 となる。この図から、III 類の結果のような速度との関係は明らかでないが、減少傾向にあるとの印象をもつ。速度範囲がファクター3程度なので、はっきりしないのであろう。さらに弾性波としての特性が考えられる。今後に残された課題である。

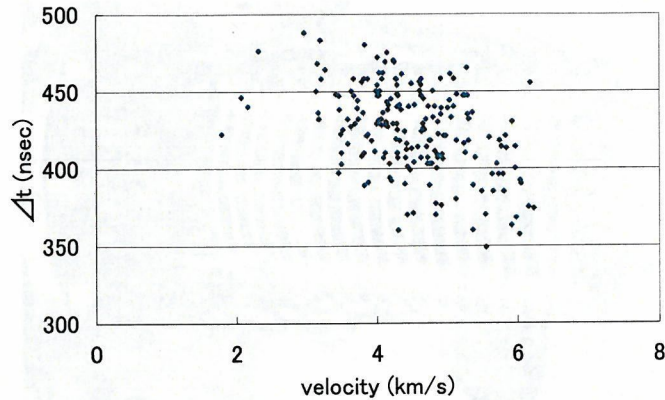


図 20 低速度領域における立上り時間と入射粒子速度の関係。本文参照。

即ち、弾性波の特性が顕著な速度領域では、波高値と運動量従ってエネルギーとの関数関係はあきらかであるが波形歪と速度の関係は、とりうる速度範囲が狭いので、関数関係を確定できない。他方塑性波の特性が顕著な領域では波形歪と速度の間関係はあきらかである。しかし、波高値と運動量あるいはエネルギーとの関数関係は、本研究の範囲では肯定的でない。

PZT 素子に高エネルギーXe ビームを直接照射してその反応をしらべた。これはエネルギー反応の校正と放射線耐性を調べることを目的とした。実験は放射線医学総合研究所の加速器を使用した。

圧電素子は放射線に感度がある。現状では当該検出器にみられる表面効果その他の問題があるが、微粒子のエネルギー程度のエネルギーをもつものの校正としてイオンビームの計測が有望と考える。

標準形状で厚さ 0.5mm の素子を 16 個スタックした素子アレーを使用した (図 21)。このアレーに Xe ビームを透過させた。Xe ビームはチョッパーにより 150  $\mu$ s の間アレーに照射した。素子で観測された波形とその振幅を図 22 に例示する。個々の素子で観測された振幅を上流から順次プロットした (図 23)。横軸は積算された PZT の厚さであり、横棒は素子の厚さの範囲を示す。図中曲線は Bethe-Bloch 式によるエネルギー損失 (相対量) を表す。従って、素子のエネルギーに対する感度が分かり、微粒子エネルギーと比較できる。素子出力 10mV は素子励起エネルギー500nJ に相当する。他方に粒子の場合、運動エネルギーが 100~1000nJ の粒子に対する出力振幅は 10~100mV となる。即ち、共通のエネルギー領域をもつことになる。このように重イオンによる校正法の有効性を示した。

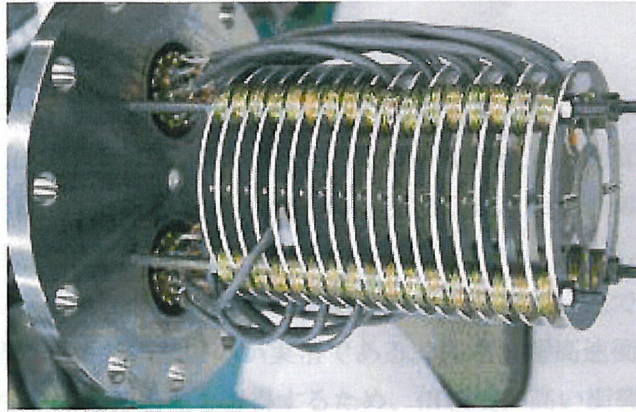


図 21 重イオン照射校正に用いた PZT 素子アレー

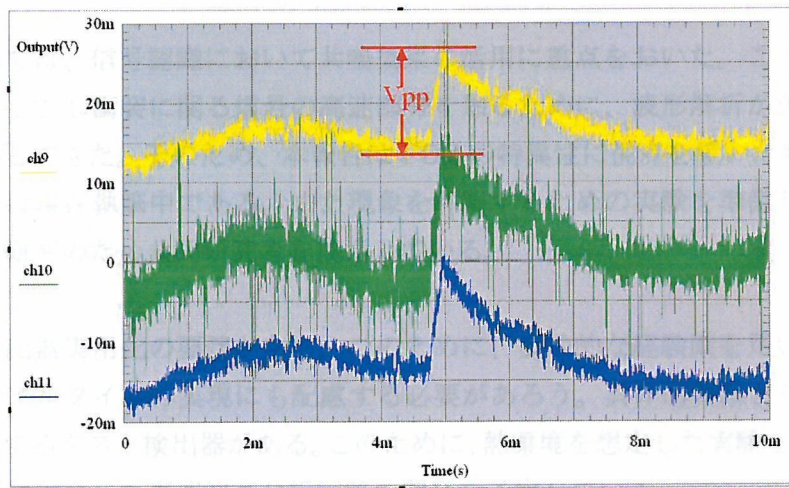


図 22 Xe ビームで観測された波形と振幅。本文参照。

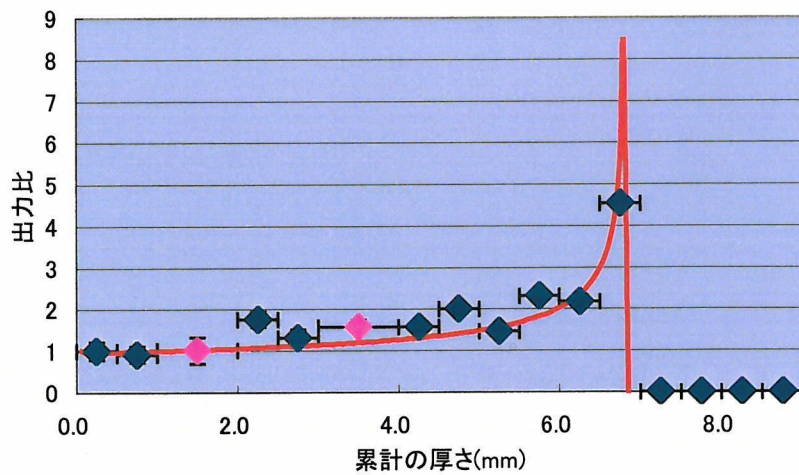


図 23 Xe ビーム照射で観測された出力と Bethe-Bloch 式の比較。本文参照。

今後のこと。

当初衝突速度に対する波形形状の変化が以上で報告したように多様な様相を示すとは考えられなかった。出力信号の波高値と予測した微少な波形歪を通常の波高分析とピーク検出で行う方法を予定していた。しかし研究の過程で、高速な波形解析が必要との認識に至った。同時に、信号形成のプロセスを知る必要に直面した。しかし、超高速粒子衝突と圧電効果を統合して素子衝突直後の振舞いに関する報告は実質皆無であり、観測される現象を説明できる段階に至っていないのが実情である。即ち、超高速衝突が原因となる、圧電性 PZT の電圧発生に関する諸過程を習得するため、信頼度の高い衝突実験データを集積する。

初期段階では、信号認識において共鳴効果の活用に重点をおいた。この範囲での研究報告をした。しかし衝突に関する信号の高速部分を知るために、波形解析が深化するに依りて認識が推移してきた。そのため、本報告は FOC の特異性に視点を置いた報告とした。専門誌への報告は現在執筆中である。また現象を解明するための実験を準備している。並行して、理論的研究のため共同研究者を模索している。

ダスト検出器実用化の要請がある。このために、実験的な経験則を用いて、超高速微粒子衝突のリアルタイムの実現にも配慮する必要がある。具体的要請として水星探査機 MMO に搭載するダスト検出器がある。このために、熱環境を想定した実験を計画している。また波形処理に適合した高速波高分析回路の開発を予定している。

***Reprinted from***

Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003) pp. 1456–1457

Part 1, No. 3, March 2003

©2003 The Japan Society of Applied Physics

**Acoustic Response of Piezoelectric Lead–Zirconate–Titanate to a 400 MeV/n Xenon Beam**

Takashi MIYACHI, Nobuyuki HASEBE, Hiroshi ITO, Takahiro MASUMURA, Hiroyuki OKADA, Osamu OKUDAIRA, Naoyuki YAMASHITA, Hideki YOSHIOKA, Masato HIGUCHI<sup>1</sup>, Tadayoshi MATSUYAMA<sup>2</sup>, Takeshi MURAKAMI<sup>3</sup>, Yukio UCHIHORI<sup>3</sup>, Masayuki KASE<sup>4</sup>, Ryusaburo KIKUCHI<sup>5</sup>, Masanori SATO<sup>6</sup> and Tonshaku TOU<sup>6</sup>

*Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan*

<sup>1</sup>*Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan*

<sup>2</sup>*Laboratory of Nuclear Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 982-0826, Japan*

<sup>3</sup>*Department of Accelerator Physics and Engineering, National Institute for Radiological Sciences, Inage, Chiba 263-8555, Japan*

<sup>4</sup>*Institute of Physical and Chemical Research, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

<sup>5</sup>*Graduate School of Science, Kyoto University, Sakyo, Kyoto 606-8502, Japan*

<sup>6</sup>*Honda Electronics Co., Ltd., Toyohashi, Aichi 441-3193, Japan*

## Acoustic Response of Piezoelectric Lead–Zirconate–Titanate to a 400 MeV/n Xenon Beam

Takashi MIYACHI, Nobuyuki HASEBE, Hiroshi ITO, Takahiro MASUMURA, Hiroyuki OKADA, Osamu OKUDAIRA, Naoyuki YAMASHITA, Hideki YOSHIOKA, Masato HIGUCHI<sup>1</sup>, Tadayoshi MATSUYAMA<sup>2</sup>, Takeshi MURAKAMI<sup>3</sup>, Yukio UCHIHORI<sup>3</sup>, Masayuki KASE<sup>4</sup>, Ryusaburo KIKUCHI<sup>5</sup>, Masanori SATO<sup>6</sup> and Tonshaku TOU<sup>6</sup>

Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

<sup>2</sup>Laboratory of Nuclear Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 982-0826, Japan

<sup>3</sup>Department of Accelerator Physics and Engineering, National Institute for Radiological Sciences, Inage, Chiba 263-8555, Japan

<sup>4</sup>Institute of Physical and Chemical Research, Wako, Saitama 351-0198, Japan

<sup>5</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, Sakyo, Kyoto 606-8502, Japan

<sup>6</sup>Honda Electronics Co., Ltd., Toyohashi, Aichi 441-3193, Japan

(Received August 12, 2002; revised manuscript received September 24, 2002; accepted for publication October 17, 2002)

Characteristics of lead–zirconate–titanate (PZT) elements were studied by directly irradiating them with a 400 MeV/n Xe beam. The elements were sensitive to  $10^4$  Xe ions and their output amplitudes were proportional to the beam intensity. An ensemble of those output amplitudes displayed a Bragg-curve-like response towards the range of 400 MeV/n Xe ion. We discuss the potential of PZT elements as a radiation detector and their application to high-intensity and high-energy detectors. [DOI: 10.1143/JJAP.42.1456]

KEYWORDS: acoustic radiation detector, piezoelectric radiation detector, heavy ion detector, bias-free detector, PZT element

Thus far, detection principles of radiation have been based on mainly ionization and excitation followed by light emission. On the other hand, there have been a few exceptions, one of which is the case that acoustic methods have been reported to be based on both experimental<sup>1)</sup> and theoretical<sup>2–4)</sup> aspects of measuring high-energy events in deep marine environment. They dealt with the case that acoustic waves were generated in water and detected by hydrophones. For simplicity, a case that involves a signal-transmitting part and a signal-receiving part that are separated from each other is denoted as “indirect style”, and the case wherein the both parts are confined within a single detector itself is denoted as “direct style”.

We have been interested in piezoelectric material PZT ( $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}$ ), because it has unique characteristics; in particular, it can be operated without bias voltage. Thus we discussed a potential of PZT elements as a radiation detector. At first, the detector characteristics of a spherical PZT detector were studied by bombarding a high-energy electron beam<sup>5)</sup> into water by the indirect style. Subsequently, we aimed at detecting heavy ions in flat PZT elements by indirect and direct styles. This note concerns the first experiment, in which acoustic signals by an energetic Xe beam were measured with PZT elements by the direct style.

This experiment was carried out by using low- $Q$  PZT elements; each was 0.6 mm thick and 20 mm in diameter. Each was calibrated, to which hydraulic pressure was applied in a water tank by a PZT transducer, and its sensitivity was found to be almost sample-independent. The fifteen elements were assembled into an array, in which each was separated by 5 mm as shown schematically in Fig. 1. The total thickness, 7.8 mm, of the elements was determined to cover the range of 400 MeV/n Xe in PZT. In order to reduce electromagnetic and mechanical noises, every element was suspended by springs and the array was set in a low-pressure vacuum metal chamber at  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  Torr. Each output signal was treated by amplifiers and processed on a digital oscilloscope. Thus we measured signals with a timing counter, which was a 0.5-mm-thick plastic scintillation counter placed in front of the chamber. This counter

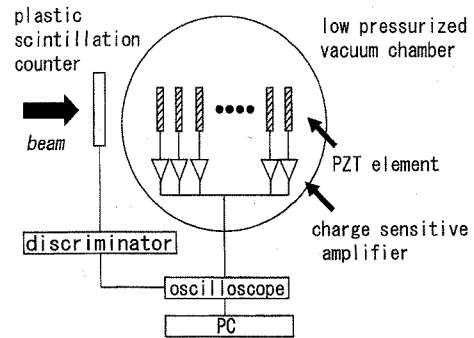


Fig. 1. Experimental arrangement is shown schematically.

served also as an intensity monitor for Xe ions.

The Xe beam was supplied by the heavy-ion accelerator of the National Institute for Radiological Sciences (HIMAC) at an energy of 400 MeV/n with varying beam intensity from  $10^3$  to several  $10^5$  particles per spill (pps), (in total kinetic energies,  $\sim 8 \times 10^3$  to  $\sim 8 \times 10^5$  nJ). The beam size was adjusted to  $\sim 2 \times 2$  mm<sup>2</sup> at the most upstream element. Because it was ejected in the slow extraction mode, the observed signal  $V(t)$  on the scope appeared like a ramp-up form at time  $t$ , as in inset of Fig. 2. We regarded the output voltage as the time-averaged form  $\langle V(t) \rangle = \int V(t) dt / \int dt$ , where the variable was integrated over an ejected period of about 0.5 s. For every element, about fifteen samples of  $\langle V(t) \rangle$  were summed up to obtain the averaged voltage  $\langle V \rangle$  and its deviation  $\Delta V$ .

In Fig. 2,  $\langle V \rangle$  and  $\Delta V$  of each element are plotted in order, from which  $\langle V \rangle$  increased towards the end of the range and showed a maximum. The observed data were compared with the values calculated by the simple Bethe–Bloch formula. A qualitative agreement between experimental and numerical results is verified based on a solid curve which is normalized in a flat region.

As for the intensity dependence, the averaged voltage  $\langle V \rangle$  at the maximum was plotted as a function of the number of Xe ions in Fig. 3. It seems to be linearly increasing at a rate of  $\sim 0.8$   $\mu\text{V}/\text{ion}$ , which corresponds to a sensitivity of a

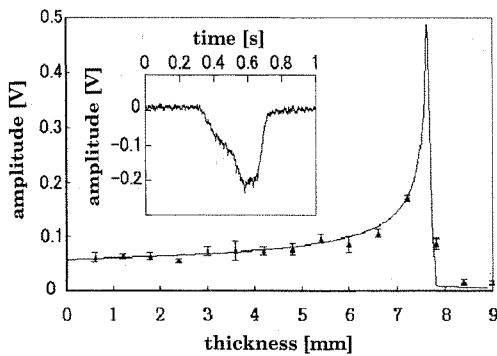


Fig. 2. Output signals in order of elements. The signal amplitudes become maximum towards the range of 400 MeV/n Xe, 7.8 mm in PZT. A solid curve is obtained by the Bethe-Bloch formula. A typical waveform is illustrated in the inset. In this case, the Xe beam was extracted between 0.3 to 0.7 s, whose timing was determined by the plastic counter.

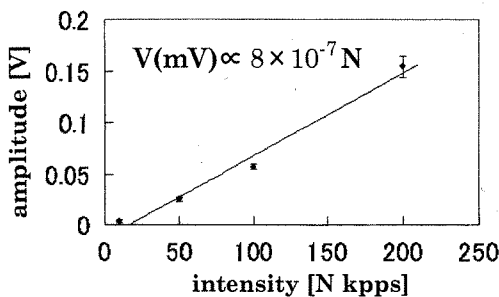


Fig. 3. Intensity dependence. A linear curve is drawn as a visual guide and its slope corresponds to 0.8  $\mu$ V/Xe ion.

single Xe ion of the maximum element by the present experimental configuration.

There was a problem about the observed signal itself, whether it was actually produced via acoustic processes or not. Thus, we carried out another experiment, in which two of the 15 elements were replaced with other two elements; one was an unpolarized element and the other was a normally polarized 2-mm-thick element. Then the output signals of the unpolarized element disappeared down to a background level. As for the latter, the output amplitude was almost unchanged between the original and replaced elements. Consequently, the signal was determined to be inherent in piezoelectricity and substantially thickness-independent.

At present, we have no definite idea concerning the thickness-independence. For a while, we consider a scenario as follows. Although piezoelectricity is a bulk effect, the

conversion of mechanical energy into electrical energy would occur only in a portion near the surfaces, and contributions from the remaining portion seem to be cancelled out. Consequently, it seems apparent that the voltage across the piezoelectric plates is proportional to the relative displacements of the surfaces.<sup>6)</sup> Accordingly the observed signal is mediated by acoustic waves developed in the PZT element.

As described previously, its sensitivity was  $\sim 0.8 \mu\text{V}/\text{Xe}$  ion. Since a practical electronic circuit had a noise level of mV, the threshold of the PZT element corresponded to the order of  $10^3$  Xe ions, which was consistent with a detectable number minimum in Fig. 3. As for the sensitivity in energy, it was interesting to point out that a result by an impact of hypervelocity microparticles,<sup>7)</sup> whose energies ranged from  $10^2$  to  $10^3$  nJ corresponded to the energy loss of  $10^2$ – $10^4$  Xe ions through each element.

The observed data seem to be consistent with those obtained using the Bethe-Bloch formula except for an absolute normalization. It is not clear yet that the Bragg-curve-like charged particles are exactly reproduced by the acoustic measurements.

In conclusion, the PZT element was sensitive to  $10^4$  and 400 MeV/n Xe ions, and whose output amplitude was proportional to the beam intensity ranging from  $10^4$  to  $2 \times 10^5$  pps. Thus, the PZT material can be used as a detector of high-energy and high-intensity phenomena. The observed data could be qualitatively explained by the Bethe-Bloch formula. It is still undetermined whether a possible difference exists between the acoustic results and those obtained by the Bethe-Bloch formula.

We thank Dr. T. Kambara for his interest in this work. This study is carried out as a part of “Grand-based Research Announcement for Space Utilization” promoted by Japan Space Forum, and partially supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research by JSPS.

- 1) L. Sulak *et al.*: Nucl. Instrum. Methods, **161** (1979) 203.
- 2) J. G. Learned: Phys. Rev. D **19** (1979) 3293.
- 3) G. A. Askariyan, B. A. Dolgoshein, A. N. Kalinovsky and N. V. Mokhov: Nucl. Instrum. Methods **164** (1979) 267.
- 4) L. G. Dedenko, I. V. Denisov, A. A. Mironovich and I. G. Zheleznykh: PACON 99 Proc., Moscow, 1999, p. 535.
- 5) T. Matsuyama *et al.*: IEEE 2001 NSS CR, San Diego, 2001.
- 6) M. O’Donnell, L. J. Busse and J. G. Miller: *Methods of Experimental Physics*, ed. P. D. Edmonds (Academic Press, New York, 1981) Vol. 19, p. 29.
- 7) T. Miyachi *et al.*: to be published in Jpn. J. Appl. Phys.



**Reprinted from**

Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003) pp. 1496–1497

Part 1, No. 3, March 2003

©2003 The Japan Society of Applied Physics

**Response of Piezoelectric Lead–Zirconate–Titanate to Hypervelocity Silver Particles**

Takashi MIYACHI, Nobuyuki HASEBE, Hiroshi ITO, Takahiro MASUMURA, Hiroyuki OKADA, Hideki YOSHIOKA, Masato HIGUCHI<sup>1</sup>, Tadayoshi MATSUYAMA<sup>2</sup>, Ken-ichi NOGAMI<sup>3</sup>, Takeo IWAI<sup>4</sup>, Hiromi SHIBATA<sup>4</sup>, Yoshimi HAMABE<sup>5</sup>, Sho SASAKI<sup>5</sup>, Seiji SUGITA<sup>5</sup>, Hideo OHASHI<sup>6</sup>, Sunao HASEGAWA<sup>7</sup>, Hajime YANO<sup>7</sup>, Masanori SATO<sup>8</sup> and Tonshaku TOU<sup>8</sup>

*Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan*

<sup>1</sup>*Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan*

<sup>2</sup>*Laboratory of Nuclear Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 982-0826, Japan*

<sup>3</sup>*Department of Physics, Dokkyo School of Medicine, Mibu, Tochigi 321-0293, Japan*

<sup>4</sup>*Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo, Tokai, Ibaraki 319-1106, Japan*

<sup>5</sup>*Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan*

<sup>6</sup>*Department of Physics, Tokyo University of Fisheries, Minato, Tokyo 108-8477, Japan*

<sup>7</sup>*Planetary Science Division, the Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan*

<sup>8</sup>*Honda Electronics Co., Ltd., Toyohashi, Aichi 441-3193, Japan*

## Response of Piezoelectric Lead–Zirconate–Titanate to Hypervelocity Silver Particles

Takashi MIYACHI, Nobuyuki HASEBE, Hiroshi ITO, Takahiro MASUMURA, Hiroyuki OKADA, Hideki YOSHIOKA, Masato HIGUCHI<sup>1</sup>, Tadayoshi MATSUYAMA<sup>2</sup>, Ken-ichi NOGAMI<sup>3</sup>, Takeo IWAI<sup>4</sup>, Hiromi SHIBATA<sup>4</sup>, Yoshimi HAMABE<sup>5</sup>, Sho SASAKI<sup>5</sup>, Seiji SUGITA<sup>5</sup>, Hideo OHASHI<sup>6</sup>, Sunao HASEGAWA<sup>7</sup>, Hajime YANO<sup>7</sup>, Masanori SATO<sup>8</sup> and Tonshaku TOU<sup>8</sup>

Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, Tagajo, Miyagi 985-8537, Japan

<sup>2</sup>Laboratory of Nuclear Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 982-0826, Japan

<sup>3</sup>Department of Physics, Dokkyo School of Medicine, Mibu, Tochigi 321-0293, Japan

<sup>4</sup>Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo, Tokai, Ibaraki 319-1106, Japan

<sup>5</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>6</sup>Department of Physics, Tokyo University of Fisheries, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

<sup>7</sup>Planetary Science Division, the Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

<sup>8</sup>Honda Electronics Co., Ltd., Toyohashi, Aichi 441-3193, Japan

(Received August 12, 2002; revised manuscript received September 24, 2002; accepted for publication October 17, 2002)

A lead–zirconate–titanate (PZT) element was studied by bombarding silver particles in the mass range from 1 to 100 pg, and the velocity from 2 to 6 km/s. Output signals were uniquely identified on impact and characterized by Fourier analysis. It was found that incident energies above 100 nJ were uniquely determined by a single PZT element. We discussed its potential as a real-time detector for space dust and debris. [DOI: 10.1143/JJAP.42.1496]

KEYWORDS: space dust detector, real-time dust detector, PZT detector, hypervelocity microparticle detector, bias-free detector

Currently there is a demand to realize a real-time detector for cosmic dust and/or space debris.<sup>1)</sup> To date, dust-hunting detectors have been developed for exploring cometary dust and microparticles in the solar system.<sup>2)</sup> Based on the concept of a “real-time detector in space”, it is considered that the detector should be small in size, and operated for a long time as reliably as possible. From the point of view of making a detection system on a small scale, we were interested in the use of piezoelectric ceramics, PZT ( $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}$ ), because it can be operated without bias voltage. We carried out an experiment, in which a PZT element was found to be sensitive to the microparticles whose energy was reduced to 100 nJ. Therefore, we report exclusively a linear response between particle energies and PZT output amplitudes in this note.

The detector element was made from low- $Q$  PZT. It was 2 mm in thickness and 20 mm in diameter. The element was polarized in the direction of thickness. Then a thin silver electrode was deposited on one surface as a collector. The other surface was entirely covered by another electrode. Its frequency response was measured as shown in Fig. 1, in which there existed several resonance peaks below 3.3 MHz. A dominant peak around 1.1 MHz was due to the thickness expander mode.

Experimental arrangement is schematically shown in

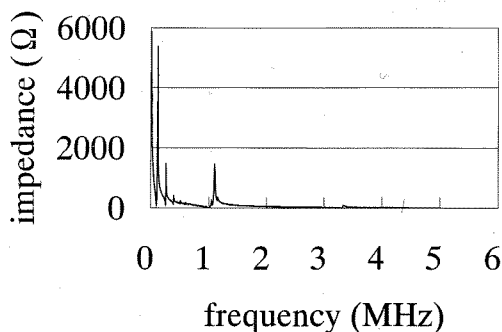


Fig. 1. Frequency dependence of impedance of the PZT element.

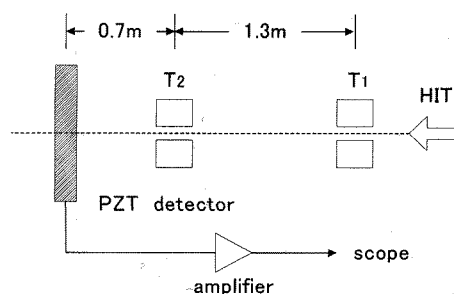


Fig. 2. Schematic drawing of experimental configuration.

Fig. 2. Silver particles were accelerated by the Van de Graaff accelerator of University of Tokyo (HIT). The particle passed through a beam transport duct, along which two electrostatic electrodes ( $T_1$  and  $T_2$ ) were installed at a distance of 1.3 m. At 0.7 m downstream of  $T_2$ , the PZT element was placed, onto which the incident particle hit at a right angle. With this configuration, its velocity ( $v$ ) was given as  $v = l/t$  where  $t$  and  $l$  are the flight time and the distance between  $T_1$  and  $T_2$ , respectively. Its charge ( $q$ ) was  $q = CV$ , where  $V$  is the induced voltage on  $T_2$  and  $C$  is the capacitance of 1 pF, which was the loop capacitance of a charge-sensitive amplifier connected to  $T_2$ . Then particle energy  $E$  was given as  $E = qU$ , with acceleration voltage  $U$  (typically, 2–2.7 MV). Thus, the particle mass ( $m$ ) was determined as  $m = 2qU/v^2$ . The output signal was treated with a fast amplifier of bandwidth  $\sim 400$  MHz, and then processed by a digital scope. As the result, we picked up events, in which  $m$  and  $v$  ranged from 1 to 100 pg and from 2 to 6 km/s, respectively.

One of the observed signals is presented in Fig. 3(a), from which a regular behavior in the first few cycles with a slight attenuation was observed. Since we had no a priori prescription of how to define output voltage, we regarded the amplitude across the first peak-to-peak  $V_{pp}$  as the output voltage. A comparison of kinetic energy with output voltage is shown in a plot in Fig. 4(a). At a glance, there seem to

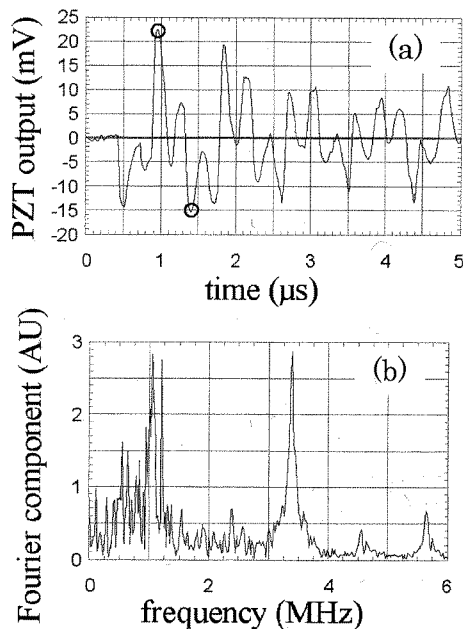


Fig. 3. (a) Typical wave form of A group samples. The amplitude  $V_{pp}$  was defined as indicated by bubbles. (b) Frequency components determined by Fourier analysis. The component at 3.3 MHz is enhanced compared to that at 1.1 MHz.

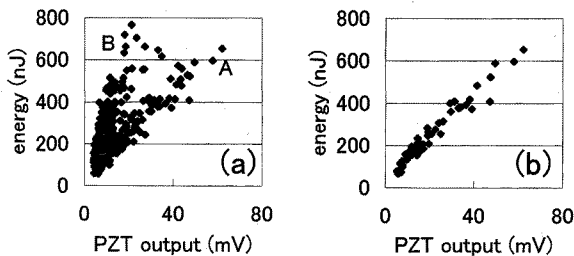


Fig. 4. (a) Two-dimensional plot between output voltage  $V_{pp}$  and kinetic energy  $E$ . A and B in the figure indicate samples belonging to the A and B groups, respectively. (b) A group samples are sorted according to the rule mentioned in the text.

coexist two groups of samples denoted as A and B groups; samples tagged as the A group were more sensitive and better proportioned to the kinetic energy, while those belonging to the B group behaved almost independently of the energy.

Each signal was subjected to Fourier analysis to obtain frequency components, for example, the signal in Fig. 3(a) corresponds to the spectrum shown in Fig. 3(b). By comparing the frequency components in Fig. 1 with those in Fig. 3(b), contributions to the output signal from frequency components below  $\sim 1$  MHz were much less than those above  $\sim 1$  MHz. This indicates that the thickness expander mode was dominant. As for components above

$\sim 1$  MHz, the component at  $\sim 3.3$  MHz ( $A_3$ ) was enhanced more than the component at  $\sim 1.1$  MHz ( $A_1$ ).

Even though we had no criteria to justify the coexistence of either A or B group, the samples belonging to the B group were ruled out by a selection rule through the following procedure. We sorted out the A group samples using a simple condition for the frequency components:  $A_3 = kA_1$ , where we determined  $k$  to be 0.9 in this report. Thus, the A group samples are plotted as a function of  $V_{pp}$  vs  $E$  in Fig. 3(b). By assuming a linear relation between output amplitude ( $V_{pp}$ ) and kinetic energy ( $E$ ), the kinetic energy was determined as  $E$  (nJ) =  $9.8 V_{pp}$  (mV) + 48 by a least-squares fit. Consequently, the kinetic energies were uniquely determined by a single PZT element.

The PZT element was sensitive to particles of their energies above 100 nJ. This indicates that the PZT element has a potential as a real-time detector. At least, it can be used as a counter like the Geiger–Mueller counter. When the output signal was analyzed in detail, we could extract information on the kinetic energy above 100 nJ by means of a single PZT element. That is, the PZT element can be employed as an energy-measuring device. At present, however, we have no clear explanation as to why  $k = 0.9$  was valid, and why the component  $A_3$  was so enhanced in the A group samples. Since a discrimination based on the frequency components seems simple but significant, it is necessary to study the frequency analysis in detail.

It is emphasized that the experimental results for the hypervelocity silver particles were consistent with those for heavy ions in ref. 3. Indeed, the PZT element was sensitive to a bunch of  $10^4$  Xe ions, whose total energy was estimated to be of the order of  $10^3$  nJ.

In conclusion, the PZT element is sensitive to micro-particles of energies greater than 100 nJ. By separating out the A group samples, we can determine the particle energy uniquely. However, possible physical reasons why the simple relations  $A_3 = kA_1$  and  $k = 0.9$  hold, are yet to be determined. The PZT element has potential as a real-time detector to measure the energies of hypervelocity micro-particles.

The authors thank Mr. T. Omata for his help in preparing the experimental setup and in operating the accelerator. This study is carried out as a part of a “Grand-based Research Announcement for Space Utilization” promoted by Japan Space Forum, and is partially supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research from JSPS.

- 1) S. Kibe: private communication.
- 2) S. Auer: *Instrumentation in Interplanetary Dust*, eds. E. Gruen, B. A. S. Gustafson, S. F. Dermott and H. Fechtig (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001) p. 385.
- 3) T. Miyachi *et al.*: to be published in Jpn. J. Appl. Phys.

# REAL-TIME DETECTOR FOR HYPERVELOCITY MICROPARTICLES USING PIEZOELECTRIC MATERIAL

T. Miyachi<sup>1</sup>, N. Hasebe<sup>1</sup>, H. Ito<sup>1</sup>, T. Masumura<sup>1</sup>, H. Okada<sup>1</sup>, H. Yoshioka<sup>1</sup>,  
K. Nogami<sup>2</sup>, T. Iwai<sup>3</sup>, H. Shibata<sup>3</sup>, Y. Hamabe<sup>4</sup>, S. Sasaki<sup>4</sup>, S. Sugita<sup>4</sup>, S. Hasegawa<sup>5</sup>, H. Yano<sup>5</sup>,  
H. Ohashi<sup>6</sup>, K. Muranaga<sup>6</sup>, M. Sato<sup>7</sup> and T. Tou<sup>7</sup>

<sup>1</sup> *Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University,  
Tokyo 169-8555, Japan*

<sup>2</sup> *Department of Physics, Dokkyo School of Medicine, Tochigi 321-0293, Japan*

<sup>3</sup> *Research Center for Nuclear Science and Engineering, The University of Tokyo,  
Ibaraki 319-1106, Japan*

<sup>4</sup> *Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science,  
The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan*

<sup>5</sup> *Planetary Science Division, the Institute of Space and Astronautical Science,  
Kanagawa 229-8510, Japan*

<sup>6</sup> *Department of Physics, Tokyo University of Fisheries, Tokyo 108-8477, Japan*

<sup>7</sup> *Honda Electronics Co. Ltd., Aichi 441-3193, Japan*

## ABSTRACT

Piezoelectric lead-zirconate-titanate was studied by bombarding with silver particles in the mass range from 2 to 100 pg, and the velocity range from 2 to 8km/s. Output signals were uniquely identified on impact. It was found that incident energies above 100 nJ were measured unambiguously by a single lead-zirconate-titanate element. The detector characteristics were studied with respect to incident particle energy, angular dependence and size effects. Even though we have still unknown processes inherent in this detection method, the piezoelectric element has a potential as a real-time detector, if it is well calibrated.

## INTRODUCTION

The present project was aimed at realizing a real-time detector to detect cosmic dust and/or space debris. According to a report (Kibe, 1999), it is recommended to develop detecting techniques for space debris and micro-meteoroids. We are interested in particles, whose size is one micron or less and velocity greater than 2km/s. So far dust detectors have been developed for exploring cometary dust and microparticles (Auer et al., 2001. A number of references are listed.). Because of lack of resources in space, such a detector should be designed with a simple structure, reliable, for long-time operation and low power consumption. Thus, the piezoelectric elements have been used ultimately as a counter (McDonnell, 1987). On the other hand, parameters such as mass and velocity have not been determined by the piezoelectric element.

A lead-zirconate-titanate (PZT, an efficient piezoelectric material) element was studied as a low-sensitive radiation detector (Miyachi et al., 2003a). The PZT output voltage is proportional to the number of Xe ions. In terms of the energy loss in the element, it corresponds to  $10^2$  to  $10^4$  nJ. That is, this energy range overlaps with that of the kinetic energy of hypervelocity particles under consideration. Hence we employed the piezoelectric PZT as an energy-sensitive detector material, because this material is operated without bias voltage due to its piezoelectricity. Recently, piezoelectric PZT and  $\text{LiNbO}_3$  crystals have been reported as dust detectors (Manning et al., 2002).

We have studied the detector characteristics by bombarding hypervelocity microparticles. Indeed, it was possible to study the detector characteristics fairly precisely in the impact energy region from 100 to 1000 nJ, whenever the particles were well collimated and hit the element in the right place. Since some of the results were reported elsewhere (Miyachi et al., 2003b), this paper is concerned with (1) energy dependence, (2) angular dependence and (3) size effects, using silver particles.

## EXPERIMENT

The detector was made of a PZT disk, whose soft mechanical quality factor was around 75. A standard size detector (S) was 2mm thick and 20mm in diameter as shown in Figure 1. For determining the dependence of the signals on the dimensions of the detector element, we made other types; A (0.6mm thick, 20mm in diameter), C(2,30), and D(3,20), respectively. The detector was mounted on a frame which was suspended by springs to prevent mechanical disturbances.

The experimental arrangement is schematically shown in Figure 2. The particles are accelerated by the Van de Graaff accelerator of the High Fluence Irradiation Facility, of the University of Tokyo (HIT). The particle passes through a beam transport duct, along which two electrostatic electrodes ( $T_1$  and  $T_2$ ) are installed at a distance ( $L$ ) 1.3m apart. At 0.7m downstream from  $T_2$ , the PZT element was placed, onto which the incident particle hit at an angle  $\theta$ , defined between the particle flight direction and the normal to the detector surface. A beam diameter at the element is collimated  $\sim 10$ mm by an aluminum screen placed in front of the detector. By this configuration, the flight time ( $t$ ) between  $T_1$  and  $T_2$  determines the velocity  $v=L/t$ , and its charge  $q$  is given by  $q=CV$ , where  $V$  is the induced voltage on  $T_2$  and  $C$  the feedback capacitance of the electrode of 1pF. Then the particle energy  $E$  is given by  $E=qU$ , with acceleration voltage  $U$ . Consequently, the particle mass  $m$  was determined as  $m=2qU/v^2$ . Throughout the experiment, the acceleration voltage  $U$  was varied over 2~2.7MeV. The light flash on impact was viewed by a photomultiplier (PM), which served also as a time reference.

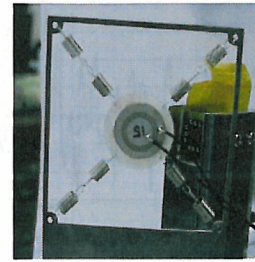


Fig.1. Standard size detector suspended by springs to prevent mechanical disturbances.

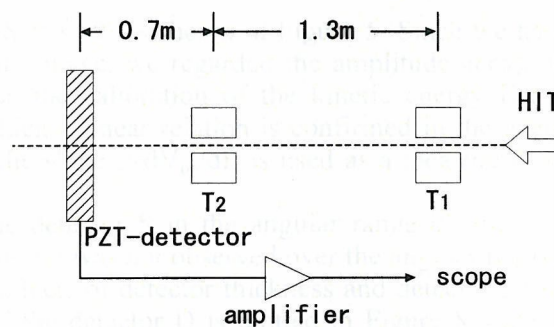


Fig.2. Experimental arrangement is shown schematically.

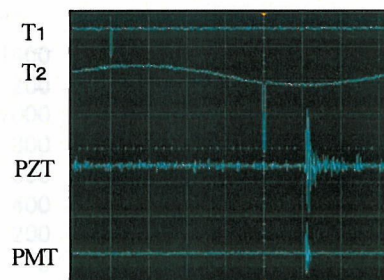


Fig.3. Typical display of output signals. From top to bottom, signals from  $T_1$ ,  $T_2$ , PZT and photomultiplier.

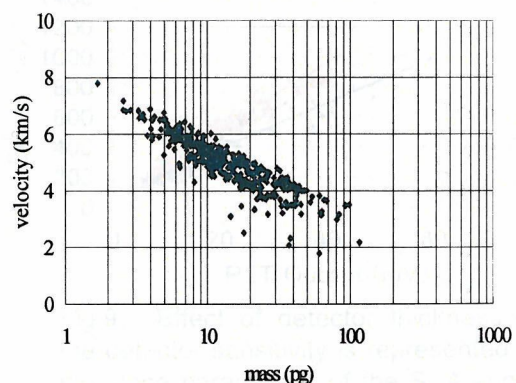


Fig.4. Mass vs velocity of the silver particles

The output signal was treated with a fast amplifier of bandwidth  $\sim 400\text{MHz}$ , and it was processed by a digital scope. One of the typical events was monitored as in Figure 3, where signals of  $T_1$ ,  $T_2$ , PZT element and PM are represented.

As the result, we picked up samples shown in Figure 4, from which the mass and velocity ranges are from 2 to 100pg, and from 2 to 8km/s, respectively.

We found no appreciable deterioration in the detector sensitivity due to the bombardment.

## RESULT

One of the observed signals of the detector S at  $\theta=0^\circ$  is shown in Figure 5. Since we had a priori no prescription how to define the output voltage, we regarded the amplitude across the first peak-to-peak  $V_{pp}$  as output voltage. Then the calibration of the kinetic energy  $E$  as a function of  $V_{pp}$  is plotted in Figure 6, from which a linear relation is confirmed in the energy range from 100 to 1000 nJ. In the following, the slope  $s=dV_{pp}/dE$  is used as a measure of the detector sensitivity.

The slope parameters were measured by the detector S in the angular range  $0^\circ < \theta < 30^\circ$  as shown in Figure 7. A significant angular dependence was not observed over the angular region.

As for the size effect, we checked possible effects of detector thickness and detector area to the detector sensitivity. The  $E-V_{pp}$  relation of the detector D is plotted in Figure 8, together with the standard S. A significant reduction of the sensitivity is apparent, mainly due to the capacitance of the detectors. The thickness effect was examined by using the three detectors S, A and C. In Figure 9, the effect is expressed in the respective slope parameters. The result is that the sensitivity is increasing with decreasing thickness.

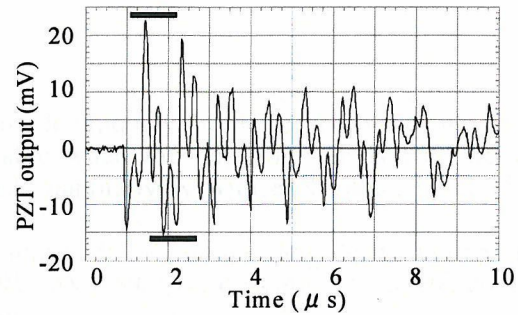


Fig.5. Typical output form of the S detector at  $\theta=0$ . The output amplitude is defined as indicated by the bars.

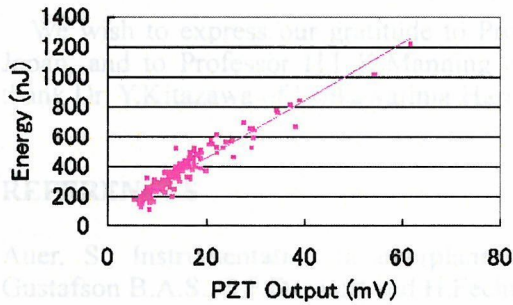


Fig.6. PZT output vs particle kinetic energy for the S detector at  $\theta=0$ .

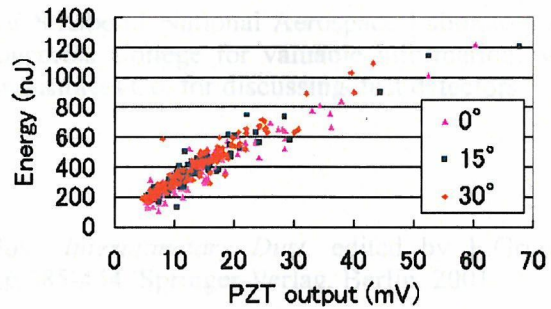


Fig.7. Angular dependence of the S detector.

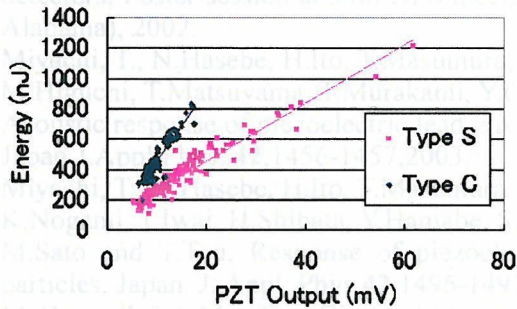


Fig.8. Area dependence of the detector sensitivity. The slope parameters for the S and D detectors are plotted.

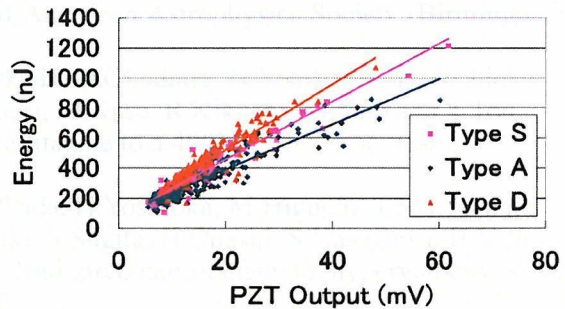


Fig.9. Effect of detector thickness on the detector sensitivity is represented by the slope parameters of the S, A and C detectors.

## DISCUSSION

It is still open how to define the detector amplitude uniquely. In the present work, we fix  $V_{pp}$  by the output amplitude, which seems reasonable when the detector size is well defined. Therefore, experimental results can be compared quantitatively with each other, if they were calibrated well.

By assuming a linear relation between output amplitude ( $V_{pp}$  in mV) and kinetic energy (E in nJ), the kinetic energy is determined as  $E(\text{nJ}) = 19V(\text{mV}) + 69$ . Consequently, the kinetic energies were determined uniquely by a single PZT element.

The PZT element was sensitive to particles with kinetic energies above 100 nJ. This means that the PZT element has a potential as a real-time detector. When the output signal was analyzed in detail, we could extract information on the kinetic energy above 100 nJ by a single PZT element. That is, the PZT element can be employed as an energy measuring device.

As for the energy resolution, the energy transferred to the detector could be separated within a statistically significant level. The result of Figure 7 shows almost no angular dependence over the measured range. This would reflect unknown processes inherent to this detector.

The effect of the detector thickness on the sensitivity is unclear. It is further required to investigate not only physical processes between mechanical and electrical conversion, but also the generation mechanisms on impact.

Using the output waveform, it is possible to extract information on impact. Therefore, it is essential to measure the waveform as precisely as possible.

In conclusion, the PZT element is sensitive to microparticles of energies greater than 100 nJ. In case of detection we determined the particle energy unambiguously. Thus, the PZT element has a potential as a real-time detector that is not only a counter, but also an energy measuring device for hypervelocity microparticles.

## ACKNOWLEDGMENTS

We wish to express our gratitude to Professor S.Kibe of National Aerospace Laboratory of Japan, and to Professor H.L.K.Manning of Concordia College for valuable information. We thank Dr. Y.Kitazawa of Ishikawajima-Harima-Industories Co. for discussing dust detectors.

## REFERENCES

- Auer, S., Instrumentation in interplanetary dust, *Interplanetary Dust*, edited by E.Gruen, Gustafson B.A.S., S.F.Dermott and H.Fechtig, pp.385-444, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- Kibe, S., private communication, 1999.
- Manning, H.L.K., I.H.Cambell, K.A.Nelson and J.R.Yager, Piezoelectric pins for use as dust detectors, Poster session at 34th DPS meeting of American Astrophysics Society (Birmingham, Alabama), 2002.
- Miyachi, T., N.Hasebe, H.Ito, T.Masumura, H.Okada, O.Okudaira, N.Yamashita, H.Yoshioka, M.Higuchi, T.Matsuyama, T.Murakami, Y.Uchihori, M.Kase, R.Kikuchi, M.Sato and T.Tou. Acoustic response of piezoelectric lead-zirconate-titanate to a 400MeV/n xenon beam, Japan J.Appl.Phys. **42**,1456-1457,2003.
- Miyachi, T., N.Hasebe, H.Ito, T.Masumura, H.Okada, H.Yoshioka, M.Higuchi, T.Matsuyama, K.Nogami, T.Iwai, H.Shibata, Y.Hamabe, S.Sasaki, S.Sugita, H.Ohashi, S.Hasegawa, H.Yano M.Sato and T.Tou, Response of piezoelectric lead-zirconate-titanate to hypervelocity silver particles, Japan. J. Appl. Phys.**42**,1496-1497,2003.
- McDonnell J.A.M., The Giotto dust impact detection system, J.Phys. E: Sci. Instrum.**20**, 747-758, 1987.

E-mail address of T.Miyachi [miyachi@waseda.jp](mailto:miyachi@waseda.jp)

## Velocity response of a lead-zirconate-titanate element to hypervelocity microparticles

T.Miyachi<sup>1</sup>, M.Fujii<sup>1</sup>, N.Hasebe<sup>1</sup>, M.Kobayashi<sup>1</sup>, E.Kuraza<sup>1</sup>, A.Nagashima<sup>1</sup>, Y.Nakamura<sup>1</sup>, O.Okudaira<sup>1</sup>, N.Yamashita<sup>1</sup>, K.Nogami<sup>2</sup>, T.Iwai<sup>3</sup>, S.Sasaki<sup>4</sup>, H.Obashi<sup>5</sup>, K.Muranaga<sup>5</sup>, S.Hasegawa<sup>6</sup>, H.Yano<sup>6</sup>, H.Shibata<sup>7</sup>, N.Okada<sup>8</sup>, and T.Tou<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan

<sup>2</sup>Department of Physics, Dokkyo University School of Medical, Mibu, Tochigi 321-0293, Japan

<sup>3</sup>Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo, Tokai-Mura, Ibaraki 319-1106, Japan

<sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>5</sup>Faculty on Environment, Tokyo University of Fisheries, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan

<sup>6</sup>Planetary Science Division, The Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

<sup>7</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

<sup>8</sup>Honda Electronics Co. Ltd., Toyohashi, Aichi 441-3193, Japan

### ABSTRACT

We have been interested in a direct measurement. The term “direct measurement” means that the PZT element is used such a detector that absorbs kinetic energy of dust on impact and subsequently outputs electric signal in itself. Presumably, useful information on impact could be involved within the first one-cycle, in particular, in a region of a rising region, when it seems free from effects of reflections of shock wave at boundaries of the detector. We consider that the time behavior could reflect the velocity at impact. Therefore, the mass of incident particle is obtained provided that the momentum on impact is known by the amplitude analysis, independently. This paper concerns further investigation using data by HIT and by MPI in Heidelberg.

In previous reports[1,2,3], we discussed fast responses in thickness expander mode of piezoelectric lead-zirconate-titanate (PZT) to hypervelocity microparticles, in which we proposed that a PZT element has potential as a realtime detector for space dust. Indeed an output signal of the PZT element could have information on impact, that is, its amplitude was proportional to its kinetic energy. In addition to amplitude analysis, it is reasonable to extract other information, e.g. velocity and/or mass of the particles from observed waveform. Since the particle energy is determined using an empirical relation,



we can obtain the mass and the velocity on impact with a single PZT element.

In order to measure the velocity, we improved experimental configuration, with which events occurred outside a central part of the detector were ruled out, using a collimator of a hole of 10mm in diameter, as shown in Fig.1.

The elements were fabricated by piezoelectric PZT, whose soft mechanical quality factor was around 75. Its dimension was 20mm in diameter and 1mm in thickness. The polarization axis was parallel to the thickness direction, along which hypervelocity particle was incident.

In Fig.2, the output signal measured by a 1mm thick element is shown for several cycles of waves vibrating between both sides. The amplitude increases gradually and begins to drop after several cycles. By Fourier analysis, this wave was decomposed into several components. There appear a prominent peak at 2.3 MHz and satellite peaks at around 6.9, 16.5MHz and so on. They are assigned as the fundamental, third and fifth components of the reciprocal motion in the direction of the thickness.

Forms of the first cycle shown in Fig.3 of 1mm in thickness and 0.5 mm in thickness for comparison. At a glance, the latter form is different from that of former. This would suggest a fact that shock wave due to impact makes pressure constant until rarefaction waves arrive in the element. When the shock wave is reflected at the opposite free surface, it unloads the pressure while traveling the element. As the result, the observed signal behaves like rectangular as shown. . On the other hand, it is unloaded before it grows completely in the case of the latter element, Consequently, the first one cycle, in particular, the rising portion is considered free from effects due to reflection of waves. Furthermore, there is a restriction on thickness to accumulate its polarization thoroughly.

In this report, the output amplitude is defined as a gap between bottom and top across the rising portion. Then the output amplitudes are plotted as a function of the particle momentum in Fig.4, from which it is found that its amplitude is exactly proportional to the momentum on impact in the velocity range from 1.5 to 6.5 km/s.

As for the risetime, it seems positive that the rectangular pulse shape is squeezed with increasing the velocity in this velocity range. Owing to a comparatively narrow velocity range, however, it is difficult to show a sizable effect between the particle velocity and the risetime. According to an experiment carried at Max-Planck Institut at Heidelberg, where it was available faster particles, we have obtained a correlation in which the risetime shrinks with increasing the particle velocity as shown in Fig.5, from

which we anticipate a possible relation of a form in the observed velocity range

$$v = c / \Delta t,$$

$$\Delta t = T_r + d,$$

where  $\Delta t$  is a relative risetime,  $T_r$  risetime,  $v$  particle velocity and parameters  $c$  and  $d$ .

In summary, the PZT element can be used as a realtime detector to hypervelocity microparticles. The output waveform is closely related to the thickness of the element. The amplitudes are exactly linear in the momentum. The first one cycle, in particular, risetime is genius to find the particle velocity. Accordingly, a single PZT element has potential as a realtime detector, which can measure energy and velocity, that is, mass and velocity of hypervelocity dust in space.

#### References

- [1] T.Miyachi et al., Response of a low-Q PZT detector to hypervelocity microparticles, The 23rd ISTS proceedings (Matsue, 2002) 1706-1710.
- [2].Miyachi et al., Response of piezoelectric lead-zirconate-titanate to hypervelocity silver particles, Jpn. J. Appl. Phys. 42(2003)1496-1497.
- [3]T.Miyachi et al., Real-time detector for hypervelocity microparticles using piezoelectric material, to be published in Adv. Space Res.

## Figures

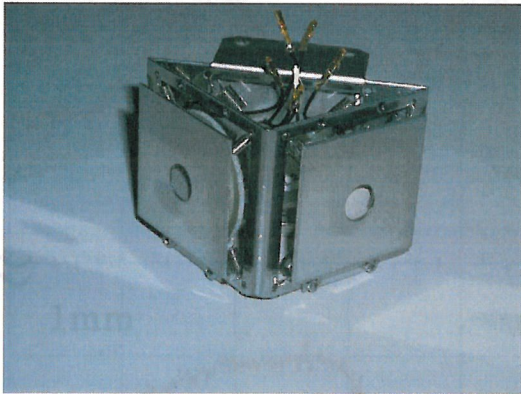


Fig.1 The element is masked by a hole of 10mm in diameter.

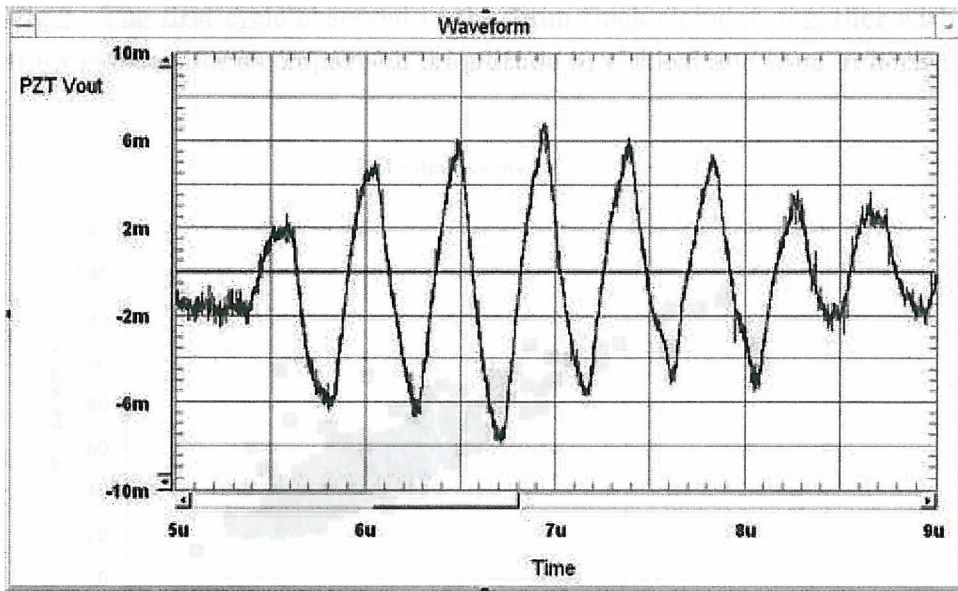


Fig.2 Output waveform found in the 1 mm thick element over an interval of several periods,( amplitude in vertical and time in horizontal).

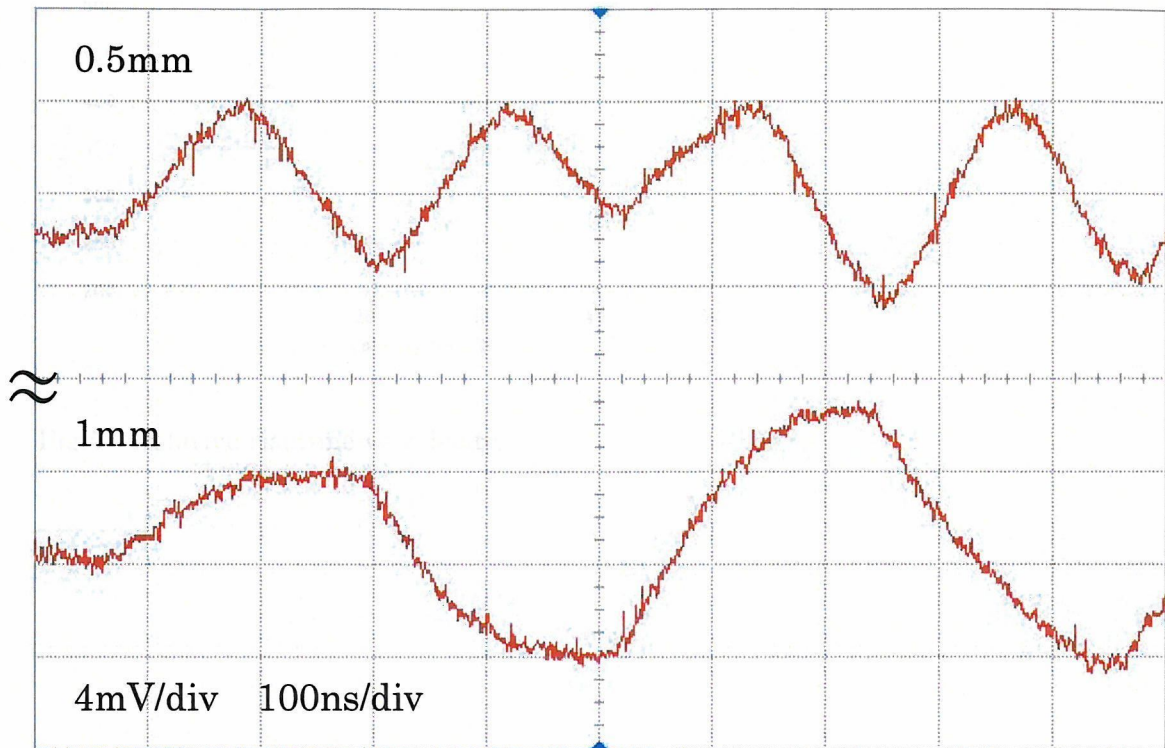


Fig.3 The first cycle observed in the 1mm thick element, together with that in 05mm thick element for a comparison (amplitude in vertical and time in horizontal).

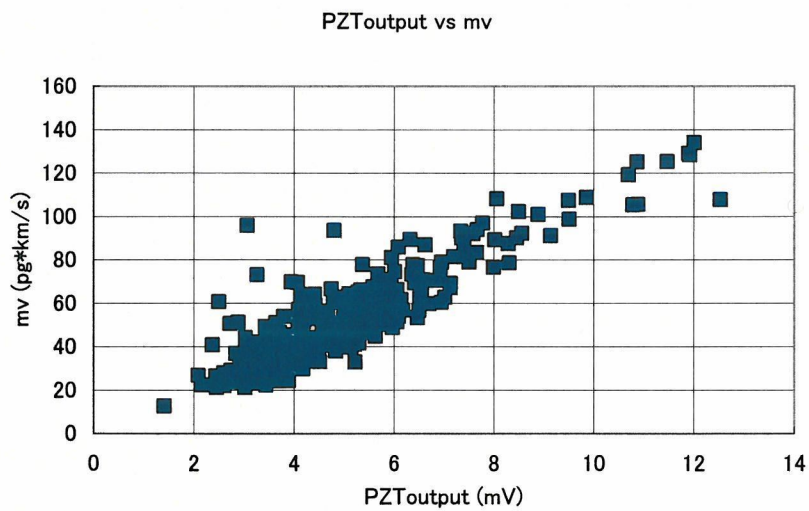


Fig.4 Relation between output amplitude and particle momentum.

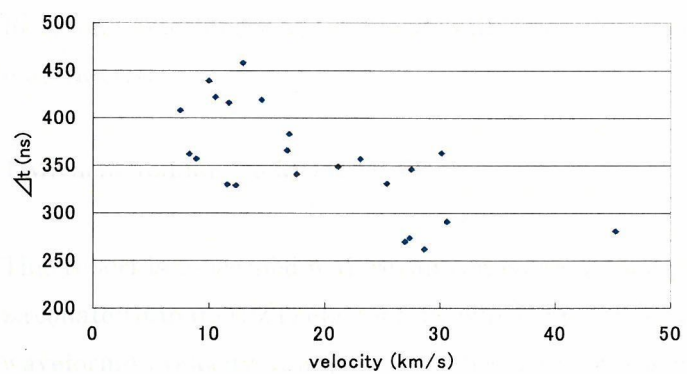


Fig.5 Relative risetime vs velocity.

## Real-time detector for hypervelocity microparticles using piezoelectric material (II)

T.Miyachi and/or the MDM TEAM

This report is concerned with results on response of a piezoelectric lead-zirconate-titanate (PZT) element, by which a possible relation of output waveform to velocity at impact is studied. At first, we point out a meaning of output waveform, in particular, a behavior of the output signal within a few hundred nanoseconds immediately after impact (named as “first one cycle”), which is free from interference with reflected waves and could contain impact hysteresis. Accordingly, we deal with the first one cycle, and analyze it with respect to its amplitude and frequency components. We obtain the following results: 1. Output amplitude is proportional to the momentum of particles below 6 km/s. 2. Its rise-time is related to the particle velocity above 10km/s. 3. There exists a transition region in between. 4. The sensitivity is confirmed to be independent of the element thickness, contrary to the results in [1,2], in which the amplitude was defined as the maximum peak-to-peak amplitude, which was outside the first one cycle. We propose that a single PZT element can be used as a velocity sensitive detector if the output signal is measured at a sampling rate of ~50MHz. We discuss a PZT detector that is to be employed as a real-time dust monitor to onboard the BepiColombo mission, MDM. This could discriminate real and junk events by analyzing the waveform.

[1] T.Miyachi et al., to be published in Adv. Space Rev. ( JASR 6550).

[2] T.Miyachi et al., Jpn.J.Appl.Phys.42(2003)1496.