

平成22年 5月 13日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360409

研究課題名（和文） 全天に開口したその場計測型超高速微粒子検出器の試作

研究課題名（英文） 4π in-situ-detector for hypervelocity microparticles

研究代表者

宮地 孝 (MIYACHI TAKASHI)

早稲田大学・理工学術院総合研究所・教授

研究者番号：20013401

研究成果の概要（和文）：

全天方向性を有する超高速微粒子検出器を試作した。検出器は圧電性ジルコン酸チタン酸鉛（以下 PZT）を構成要素とする 12 面体構造物で信号処理回路系と一体を成す。検出器特性を超高速微粒子及び Xe イオン照射により調べた。感度特性、方向依存性、素子温度特性、素子集合による影響の有無、事象真偽判断、耐放射線及び校正方法を論じた。地上実験を基礎とする校正方法から衝突微粒子の速度と質量を決定した。水星探査機に搭載するダスト検出器への応用を論じた。

研究成果の概要（英文）：

A detector that was intended to observe hypervelocity microparticles incident from every direction was studied. The detector comprised eleven pentagonal elements, PZT, which were mounted on a dodecahedral frame, and each was a 1 mm thick piezoelectric PZT plate. The detector characteristics were investigated by bombarding them with hypervelocity particles and energetic Xe ions for the following topics; output signal form, sensitivity, incident angle dependence, influence of temperature, possible cross talk, discrimination between true and false events, and radiation tolerance. Data analysis was performed by using events in which the output signal appeared as a single pulsed form. It was pointed out that the response of the element to the hypervelocity collision was not unique. A calibration procedure was proposed, where the amplitude and the rise time of the pulsed signal were pertinent to determine the mass and the velocity of particles during collision. The mass and velocity reproduced by the calibration were compared with those provided with the dust accelerator. As a result, the validity of the present calibration method was discussed by referring to the deviations of the reproduced values from the original ones. Moreover, possible improvements to the present calibration were pointed out. The present result would contribute to mount a dust detector onboard the BepiColombo mission.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2007年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：宇宙利用・探査、宇宙ダスト検出器、PZT

1. 研究開始当初の背景

(1) 日欧共同の水星探査ミッション、BepiColombo 計画、で水星環境のダスト検出器(MDM)の搭載が検討されていた。MDMは圧電性 PZT を検出器とするその場計測機器であり、衝突粒子の属性（質量、速度等）を計測する実質的に最初の試行である。

(2) 安全な宇宙活動のため、デブリ観測機器の必要性が指摘されていた。そのことから、その場計測型微粒子監視機器開発を意図した。

(3) 圧電性 PZT の応答特性を超高速微粒子や高速ゼノンイオンを照射して調べた。校正能力の範囲拡大を意図した。

(4) 圧電性物質を標的とした超高速衝突反応に関する研究は希少である。当該基礎過程を研究し、新規検出器の発展に資する事を要請された。

2. 研究の目的

(1) 超高速微粒子衝突をリアルタイムで観測する機器を試作する。粒子速度 1 km/s ~ 100 km/s, 質量は 10^{-15} ~ 10^{-9} g を想定する。

(2) 機器はその場計測型で、全方位に開口し、衝突時の信号検出と処理機能を有する。その仕様は衝突粒子の属性（質量あるいはサイズ、衝突速度、飛来方向等）を測定できるものとする。

(3) 衝突の有無、衝突時の速度、質量あるいは運動量を取得するに必要な校正方法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 利用できる資源が限られた宇宙環境に於いて、能動的特性を実現のため圧電性 PZT を検出素子母材にとる。

(2) 超高速微粒子衝突下の PZT 特性に関する研究が希少なため、宇宙環境を前提としたデータを集積する。素子特性とその適応性（耐放射線、圧電性保持の温度範囲、長期安定性等）を超高速微粒子及び高エネルギーXe粒子照射実験で集積する。

(3) 全方位計測機能を実現する視点から 12 面体を採用した。この結果素子形状を五角形とした。

(4) 信号を波形として記録する。波形解析により、速度と質量に関する情報をえる。

(5) 環境雑音信号識別方法を実用し予想される雑音反応除去を検討する。

(6) 地上実験を行い、校正方法を確立する。東大重照射施設でテスト実験する。マックスプランク原子核研究所(以下 MPI)の加速器で主に Fe 微粒子を照射する。

(7) PZT 素子の耐放射線及び物性に関するデータを放射線医科学総合研究所加速器で高エネルギーXe粒子を照射して集積する。

(8) MPI の加速器で得られた高速微粒子の質量及び速度の分布を図 1 に示す。

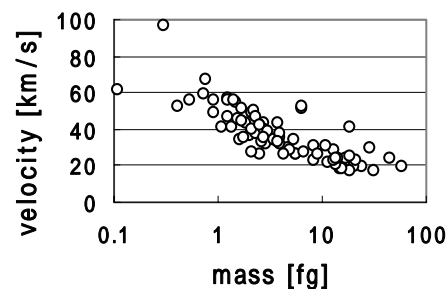


図 1.微粒子の質量と速度分布。

4. 研究の成果

本研究の所期目標を達成した。なお微粒子加速装置の能力の為質量範囲が 2 桁程度低質量側にシフトした。また予期せぬ現象が見つかり実用に向けた課題を認識できた。

(1) 検出器システム

① 検出器外形は正十二面体の球殻構造とした（図 2 右）。その一面に正五角形の圧電性 PZT 素子を装着した（図 2 左）。

素子表面は端辺の細電極と中心部の五角形の電極で構成された。一边長は 23 mm、厚さ 1 mm である。中心電極は集塵と衝突信号の検出に使われた。端辺電極は信号伝播時間を利用し、衝突位置と衝突時間の測定に供した。このように電極機能を分離して、情報の正確さを確保した。



図 2. 五角形素子 (左) と 12 面体枠 (右)。

② 端辺電極により衝突位置を特定できた。この機能により、事象真偽判定及び衝突時間の計測を孤立した素子系の内で達成できた。

③ 10 nF 程度の静電容量素子に適合した回路を開発した。中心電極信号処理と信号真偽判定機能を有する回路系を開発した。

④ 出力信号

出力信号の一例を図 3 に示す。図(a)は衝突発光を示し、正常衝突を確認した。(b)図は中心部の電極からの信号である。後述する振幅と立上り時間を夫々 a と r で定義した。(c)と(d)図は二つの端辺電極からの信号で衝突位置情報を与えた。

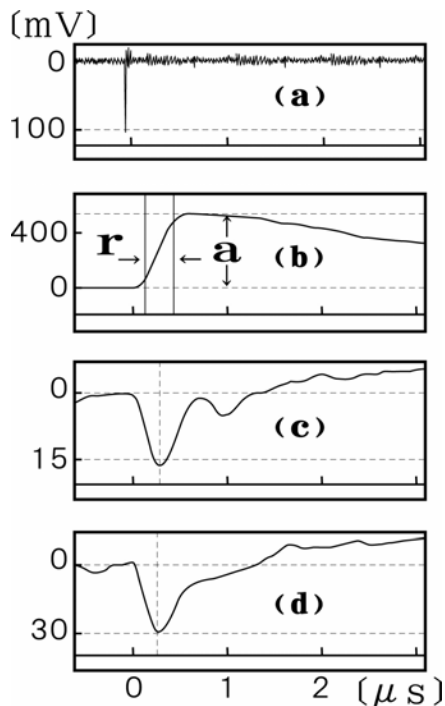


図 3. 素子出力波形。(a) フォトマル信号で衝突発光を示す。(b) 素子中心電極信号波形。振幅と立上り時間を夫々 a と r で定義する。(c)と(d)は端辺電極信号で衝突位置情報を与える。

(2) 加速器照射実験による検出器特性の評価
 ① 検出器感度。出力波形は速度に依存する： i. 低速衝突では弾性的特性が優勢であり、運動量と振幅の間の一次の関係がある、ii. 高速($> 20 \text{ km/s}$) では塑性的特性が優勢であり、信号は単調なパルス状で振幅と立上り時間に相関性が存在する。以上に加えて、本研究で素子の応答が複数の組に分類されることを示した (図 4)。

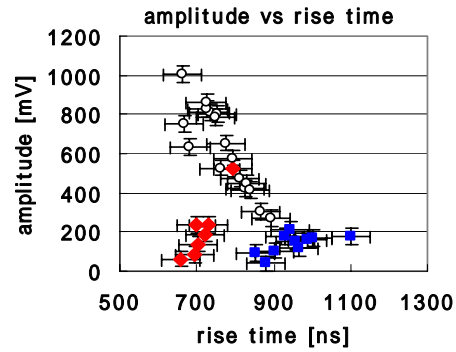


図 4. 中心五角形電極の信号の振幅と立上り時間の相関関係。白、赤、青で示される 3 組の応答群が存在する。

なお以下事項を実験的に確認した。

② 素子感度の入射方向依存性。素子面法線となす角度 θ が $0 \leq \theta \leq 75^\circ$ の範囲で、素子感度が $\cos \theta$ の角度依存性を示さない。素子感度は θ に関して直線的に減少する。 $\theta = 75^\circ$ の感度は 0° の感度の $1/2$ 程度である。

③ 環境温度特性。室温 $\sim 150^\circ \text{C}$ の範囲で素子感度は殆ど変化しない。

④ 耐放射線特性。 10^{12} 程度の Xe イオン照射で感度変動は認められない。

⑤ 集合効果。素子間のクロストークの問題はない。

⑥ 宇宙環境で予想される輻射による素子温度上昇を抑制する為に使用する反射材の塗布に付随する感度劣位が見られる。

⑦ 感度の位置依存性を確認できない。

⑧ 事象真偽方法。端辺電極の信号から衝突位置を決定し、その位置が素子感度域に属することを条件とする方法が有効である。

⑨ 校正データ。適応性に富む校正法の確立の為に衝突直後に達せられる温度を測定した。温度 - 速度変換率として 900 K/km/s を

報告した。

(3) 校正実験と実験式

① 衝突状態を PZT 素子から得られる振幅と立上り時間で記述する。状態は二元的な量で分類される (図 4)。従って二元変数により、個々事象の属する組は一義的に標識される。その上で、実験的に構築された各組固有の経験則を適応すればよい。しかし素子応答の多価性は未解明なので、実用の視点から多価性の影響の少ない校正法を考察した。ここでは、振幅 a と立上り時間 t を粒子質量 m で規格した変数をとる (夫々換算振幅 $a_r = a/m$ と換算立上り時間 $t_r = t/m$ と仮称する)。

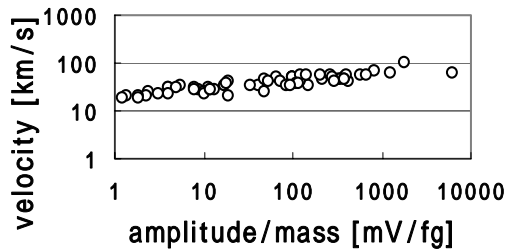


図 5. 振幅と衝突速度の相関。速度と換算振幅が簡単な関係式で記述できる。

加速器実験により、 a_r と t_r の関数として速度 v が実験的に決定できる、

$$v = f_1(a_r), \quad (1)$$

$$v = f_2(t_r). \quad (2)$$

ここで f_1 と f_2 は実験的に求める。例えば f_1 は図 5 に示すデータから求めた。式 (1) と (2) から、式(3)により質量 m が決定できる；

$$m = f_3(a, t). \quad (3)$$

この m を (1) あるいは (2) に代入して、 v が決定できる。

即ち地上実験で素子固有の校正式 f_1 、 f_2 と f_3 を知れば、 a と t から m と v が決定できる。

② 速度と質量の再現性に関して述べる。

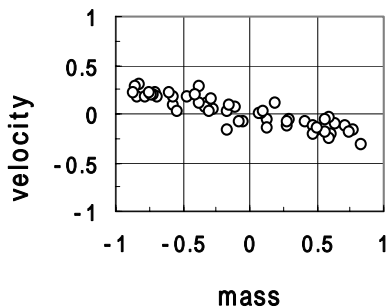


図 6. 速度と質量の再現値。素子で測定された振幅と立上り時間から衝突粒子の速度と質量の再現範囲を示す。

式(3)で再現された質量を m とする。 m_0 を加速器で表示された質量とし、比 $(m - m_0) / (m + m_0)$ を定義する。同様に、速度についても測定値 v と再現値 v_0 により、比 $(v - v_0) / (v + v_0)$ を定義する。これらを夫々横軸と縦軸とする二次元プロットを図 6 に示す。この図から、速度は測定値 v 程度の精度で、質量は測定値 m 程度のオーダーとして計測される。このように速度と質量は圧電性 PZT 素子の波形から、振幅と立上り時間を測定して、再現される。

③ 図 6 では右下がりの傾向が見られる。校正法を改善する余地があろう。さらに測定精度を改善のため、図 4 に示す様な応答の多価性を考慮した校正法を確立する必要がある。

(4) 模擬宇宙実験

加速器実験場の雑音環境の中で一つの素子を微粒子軌道におき測定した。衝突位置が有感領域にある信号のみを取り出し、中心電極で観測された波形を記録し、オフライン解析した。オフライン解析により、“真”と標識された事象を記録したことを確認した。

(5) 波及効果

① 圧電性 PZT 素子は超高速微粒子に対する能動的な検出素子として機能し、波形解析からダストの速度と質量が得られることを示した。本研究の結果は BepiColombo ミッションで搭載するダスト検出器(MDM)の校正法の確立に資する。

高エネルギー重イオンによる素子への直接照射実験により素子機能に関する多面的検討が可能となった。重イオン実験データは地上実験による校正方法を補完する。

② 素子応答が多価的であることを明らかにした。この結果、PZT 素子の使用範囲を限定する。応答の多価性を詳細に解明できれば、衝突をより詳細に再現でき、校正方法の信頼性が向上する。

③ 応答の多価性の原因は未解決である。応答に関する将来の課題として指摘した。

④ 地上実験で校正データを取得できる領域は限られるので、校正法は今後継続する課題である。地上実験で提案された校正法の信頼度を保障する為に、衝突現象を“状態”の概念で一般化することになる。この場合、衝突直後の温度と圧力の情報が必要となる。本研究に於いて従来の方法と異なる処方で 40 km/s 程度までの衝突温度を測定した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (査読有、計 13 件)

1. Study of the characteristic lead zirconate titanate radiation detector using a pulsed xenon source, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, O.Okudaira, S.Takechi, A.Kurozumi, S.Morinaga, T.Uno, H.Shibata, M.Kobayashi, T.Murakami, Y.Uchihori, N.Okada, to appear in J. Appl. Phys. **107**.

2. Development of the Mercury dust monitor (MDM) onboard the BepiColombo mission, K.Nogami, M.Fujii, H.Ohashi, T.Miyachi, S.Sasaki, S.Hasegawa, H.Yano, H.Shibata, T.Iwai, S.Minami, S.Takechi, E.Grün, R.Srama, Planet. Space Sci. **58**, 108 (2010).

3. Behavior of piezoelectric lead zirconate titanate irradiating with high-energy xenon ions, S.Takechi, S.Morinaga, A.Kurozumi, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, H.Shibata, Y.Uchihori, N.Okada, Nucl. Instrum. Methods **A609**, 272 (2009).

4. Dependence of thickness of lead zirconate titanate material used as radiation detector, S.Takechi, S.Morinaga, A.Kurozumi, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, H.Shibata, T.Murakami, Y.Uchihori, N.Okada, J. Appl. Phys. **105**, 084903, (2009).

5. Detection of high-energy heavy ions using piezoelectric lead zirconate titanate, S.Takechi, S.Morinaga, A.Kurozumi, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, H.Shibata, T.Murakami, Y.Uchihori, N.Okada, J. Appl. Phys. **105**, 084903(2009).

6. Characteristics of piezoelectric lead zirconate titanate multilayered detector bombarded with hypervelocity iron particles, S.Takechi, T.Onishi, S.Minami, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, K.Mori, K.Nogami, H.Ohashi, S.Sasaki, H.Shibata, T.Iwai, E.Grün, R.Srama, N.Okada, Adv. Space Res. **43**, 455 (2009).

7. Measurement of temperature after hypervelocity collision of microparticles in the range from 10 to 40 km/s, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, M.Miyajima, O.Okudaira, S.Takechi, T.Onishi, S.Minami, H.Shibata, H.Ohashi, T.Iwai, K.Nogami, S.Sasaki, E.Grün, R.Srama, N.Okada, Appl. Phys. Lett. **93**, 174107 (2008).

8. Response of piezoelectric lead zirconate titanate detector to oblique impact with hypervelocity iron particles, S.Takechi, T.Onishi, S.Minami, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, K.Mori, K.Nogami, H.Ohashi, S.Sasaki, H.Shibata, T.Iwai, E.Grün, R.Srama, N.Okada, Earth Planets Space **60**, 1187 (2008).

9. Measurement of incident position of hypervelocity particles on piezoelectric zirconate titanate detector, S.Takechi, T.Onishi, S.Minami, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, K.Nogami, H.Ohashi, S.Sasaki, H.Shibata, T.Iwai, E.Grün, R.Srama, N.Okada, Rev. Sci. Instrum. **79**, 043303 (2008).

10. Response of a pentagonal PZT element as a component of a 4 π -real-time detector, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, G.Kuraza, K.Mori, O.Okudaira, N.Yamashita, S.Sasaki, T.Iwai, K.Nogami, H.Matsumoto, H.Ohashi, H.Shibata, S.Minami, S.Takechi, T.Onishi, E.Grün, R.Srama, N.Okada, Adv. Space Res. **41**, 1147 (2008).

11. Position sensitive elements for hypervelocity microparticles using a piezoelectric plate, T.Miyachi, G.Kuraza, A.Nagashima, M.Fujii, N.Hasebe, N.Yamashita, K.Nogami, T.Iwai, H.Ohashi, H.Shibata, S.Minami, S.Takechi, T.Onishi, E.Grün, R.Srama, N.Okada, Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 3772 (2008).

12. Comparison between two piezoelectric lead-zirconate-titanate detectors bombarded with high-energy xenon beam, S.Takechi, T.Onishi, S.Minami, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, K.Mori, H.Shibata, T.Murakami, Y.Uchihori, N.Okada, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 1704 (2007).

13. Evaluation of piezoelectric lead-zirconate-titanate multilayered detector by Fourier analysis, S.Takechi, T.Onishi, S.Minami, T.Miyachi, M.Fujii, N.Hasebe, K.Mori, H.Shibata, T.Murakami, Y.Uchihori, N.Okada, Nucl. Instrum. Methods **A577**, 741 (2007).

[学会発表] (計 5 件)

1. T.Miyachi, Study of the characteristic of a piezoelectric PZT radiation detector using a pulsed Xe source, IEEE NSS/MIC (2009/10/26, Orlando).

2. T.Miyachi, Calibration of pentagonal PZT element as a component of a 4π real-time detector, 37th COSPAR Scientific Assembly (2008/07/16, Montreal) .

3. T.Iwai, Temperature dependence of a PZT piezoelectric sensor for Mercury Dust Monitor up to 150 °C, 37th COSPAR Scientific Assembly (2008/07/16, Montreal) .

4. S.Takechi, Progress report on Mercury Dust Monitor for BepiColombo mission, 37th COSPAR Scientific Assembly (2008/07/13, Montreal)

5. T.miyachi, Response of a pentagonal PZT element as a component of a 4π real-time detector, 36th COSPAR Scientific Assembly (2008/07/18, Beijing) .

[その他]

1. 大西 俊之、水星探査機搭載 PZT 素子の微粒子入射角特性に関する研究、修士論文(大阪市立大学、平成 18 年度)。

2. 森永 慎也、高エネルギー重イオン粒子照射による圧電性 PZT 検出器能力の検討、修士論文(大阪市立大学、平成 21 年度)。

9. 研究組織

(1) 研究代表者

宮地 孝 (MIYACHI TAKASHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 20013401

(3) 連携研究者

長谷部 信行 (HASEBE NOBUYUKI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 10127901

宮島 光弘 (MIYAJIMA MITSUHIRO)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 50044756

武智 誠次 (TAKECHI SEIJI)
大阪市立大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 40336764

岩井 岳夫 (IWAI TAKEO)
東京大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30272529

小林 正規 (KOBAYASHI MASANORI)
千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員
研究者番号: 70312060

奥平 修 (OKUDAIRA OSAMU)
早稲田大学・理工学術院・講師
研究者番号: 30386718

(4) 研究協力者

藤井 雅之 (FUJII MASAYUKI)
早稲田大学・理工学術院・研究員

岡田 長也 (OKADA NAGAYA)
本多電子株式会社・社員