

ソーラー電力セイル小型実証機搭載用PVDFダストセンサの校正試験： (その4) アナログ信号と温度履歴の影響評価

矢野創 (JAXA)、平井隆之 (総研大)、岡本千里 (JAXA)、藤井雅之 (ファムサイエンス)、
長谷川直、田端誠、尾川順子 (JAXA)、奥平恭子 (会津大)、岩井岳夫 (東大)、
森山信宏 (クレハ)、田中真 (東海大)、 IKAROS-ALADDIN チーム

1. IKAROS-ALADDINの宇宙実績および本実験の目的

大面積薄膜ダスト検出アレイ計測器「ALADDIN (Arrayed Large-Area Dust Detector in Interplanetary space)」は、2010年5月にJAXAが打ち上げたソーラー電力セイル小型実証機「IKAROS」に搭載されたPVDF (ポリフッ化ビニリデン) 型ダストその場計測器である^{1, 2)}。探査機は2010年12月の金星通過までの通常運用以降も健全であり、延長運用に入った。地球と金星の公転軌道をまたぐように周回を続け、2011年10月までほぼ連続的に取得された宇宙塵衝突の検出データは、その大半が地上に送信済みである³⁻⁵⁾。

2011年末のIKAROS冬眠運用開始後、2012年9月に一時通信が再開されたため、同月15日にALADDINも再度電力を入れて健全性を確認するHKデータを蓄積した。ただし通信レートが乏しく、この間に新たな宇宙塵計測データは生み出していない。10月には再度冬眠運用に戻った。IKAROS延長運用は2012年度末をもって完了し、プロジェクトチームは解散された。ただし2012年に冬眠後通信再開に成功したことにより、今後も数年にわたって通信可能な時期が予測できるようになった。そこで2013年度以降は深宇宙通信試験として、適時にIKAROSとの交信運用を試みる予定である。

ALADDIN自体は、宇宙空間でのダストその場計測史上、最大の検出面積を持つことにより、過去最高のフラックス精度を実現している⁶⁾。有効観測時間の累積は約300日間で、ダスト衝突に起因すると判断された約2800データを記録した。ALADDINの高精度フラックスデータを用いることで、内惑星領域におけるダスト空間数密度の日心距離変化とその原因などの解明につながると期待される。科学目標、機器構成、初期運用成果の詳細は[1-6]を参照されたい。

ダストその場計測器は、宇宙計測データから衝突ダストの質量、速度、化学組成などの特性を推定するため、地上で模擬固体微粒子を用いた衝突実験や数値シミュレーションによる校正が必須である。ALADDINについても過去数年に渡り、フライトスペアを用いた校正実験を実施してきた⁷⁻⁹⁾。本稿では2012年度中に実施した各種校正実験結果について報告する。

2. 計測器校正実験

これまで実施した衝突実験から、ALADDINの校正にはエレクトロニクス部 (ALDN-E) のアナログ信号を計測する必要があることわかった⁹⁾。以下ではALDN-E各種アナログ信号 (プリアンプ出力端、メインアンプ入力端・出力端) を取得した4つの実験について報告する。いずれの実験においても、PVDFセンサをALDN-Eに繋ぎ、オシロスコープを用いて、ALDN-Eの各種アナログ出力信号を測定した。

2.1 ISAS LGG実験

2012年4月にISASの二段式軽ガス銃 (LGG) を用いて微粒子衝突実験を実施した。異なる温度 (+25、+100、+156) を経験させたALADDIN-Sスペアの薄片をターゲットとし、日心距離1AU~0.7AUで実機が経験する温度環境におけるALDN-Sの感度変化を評価するためのデータ取得を目的とした。全12ショット全て単発撃ちで、直径300 μmと550 μmのソーダライムガラス球及び、直径1 mmのアルミニウム球をプロジェクトイルとして使用した。衝突速度は約300 m/sと約2 km/sとした。メインアンプ出力端での信号波形をオシロスコープで取得し、実験パラメータ (表1) との相関を見積もった。取得信号の例を図1に示す。

いずれの信号もALDN-Eの飽和電圧を超えているため、出力電圧値と衝突パラメータとの相関を評価することはできない。一方でパルスの継続時間を見ると、RT、100 degCの信号は120403-3を除いて2 ms以上継続しているのに対し、+156 ケースは全て2 ms未満であることがわかる。これは高温経験により圧電感度が低下したことで、PVDFの電荷出力時間スケールが短くなったためと考えられる。この事実は、別途行った準静的圧縮による圧電感度評価実験の結果とも一致する。より定量的な評価には後述のパルスレーザー照射実験の結果を用いるが、衝突実験においても高温経験による感度低下が確認されたことは、宇宙計測データの解釈において重要である。

表1. 2012年4月ISAS LGG実験パラメータ

ショット番号	標的	衝突速度 (km/s)	弾丸直径 (μm)	弾丸材質	弾丸質量 (g)	弾丸運動量 (kg*m/s)
120402-1	25 degC (#7)	2.02	300	Soda-lime glass	3.53E-05	7.12E-05
120402-2	100 degC (#4)	2.04	300	Soda-lime glass	3.53E-05	7.21E-05
120402-4	156 degC (#1)	2.05	300	Soda-lime glass	3.53E-05	7.25E-05
120403-1	156 degC (#1)	2.34	300	Soda-lime glass	3.53E-05	8.28E-05
120403-2	156 degC (#1)	2.06	300	Soda-lime glass	3.53E-05	7.27E-05
120403-3	100 degC (#4)	2.03	300	Soda-lime glass	3.53E-05	7.17E-05
120403-4	25 degC (#7)	2.06	300	Soda-lime glass	3.53E-05	7.29E-05
120404-2	100 degC (#4)	0.31	1000	Al	1.41E-03	4.41E-04
120404-3	156 degC (#1)	0.31	1000	Al	1.41E-03	4.37E-04
120404-4	156 degC (#1)	0.29	550	Soda-lime glass	2.18E-04	6.21E-05
120404-5	156 degC (#1)	0.29	550	Soda-lime glass	2.18E-04	6.25E-05
120404-6	100 degC (#4)	0.21	550	Soda-lime glass	2.18E-04	4.46E-05

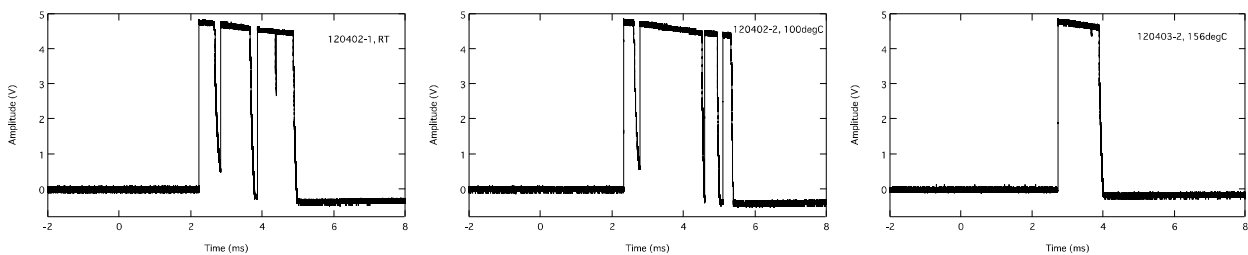


図1. 異なる温度にさらした3種のPVDF小片のアナログ出力信号例。いずれもプロジェクトイル直径は300μm、衝突速度は約2 km/sである。

2.2 マックスプランク核物理学研究所VdG実験

同じく2012年4月に、ドイツ・マックスプランク核物理学研究所 (MPIK) のヴァンデグラフ型静電加速器 (VdG) を用いて微粒子衝突実験を実施した。ターゲットには2.1で用いた温度サンプル小片3種と、室温のみを経験している9 μm及び20 μm厚の実寸ALDN-Sスペアを使用した。

20 μm厚ALDN-Sを使用した際の衝突微粒子 (鉄) の速度、質量分布を図2に示す。結果として、図2の衝突パラメータ範囲では20 μm厚ALDN-Sからの信号を確認することはできなかった。また20 μm厚に比べ相対的に検出感度が高い9 μm厚、温度サンプル3種についても、VdGでは信号を確認できなかった。以上からMPIK-VdGで実現できる質量・速度範囲では、ALADDINシステム直接の校正は困難であると判断された。

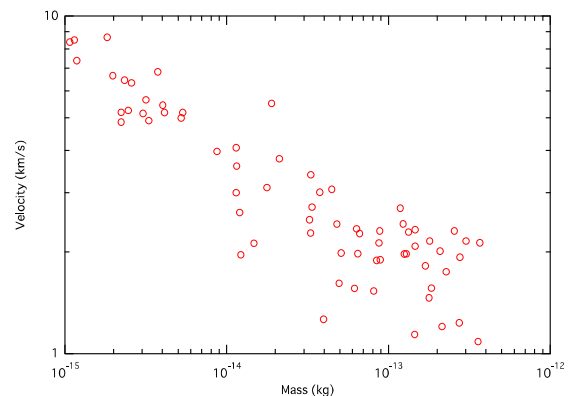


図2. 2012年4月MPIK VdG実験における鉄粒子の速度・質量分布。

2.3 ケント大学 LGG実験

2012年9月と2013年1月に、ISAS-LGGとは散弾撃ちの質量・速度範囲が異なるイギリス・ケント大学 (UKC) の二段式軽ガス銃を用いて、室温のみ経験した20 μm厚ALDN-Sについて校正実験を行った。

2012年9月の実験では、35、73、103 μmのソーダ石灰ガラス粒子をそれぞれ散弾撃ちし、衝突した粒子の総質量を一粒の仮想粒子に変換して、< 300 μm、> 1 km/sの「単発」衝突データの取得を目標とした。メインアンプ出力端での信号波形をオシロスコープで取得し、実験パラメータとの相関を見積もった。表2に実験パラメータと結果を、図3に代表的な信号波形と、衝突運動量・ALADDINのピーク電圧値の相関を示す。

35 μmは2ショットとも信号を確認できなかったが、75、103 μmについては、LGG実験で飽和電圧以下の信号を取得できた (図3左)。ただしショット9の電圧値は、波形の外挿により見積もったため参考値とする。ショット5と7を比較すると、衝突パラメータ (図2では運動量) に1桁近い差があるにもかかわらず、ピーク電圧はほぼ同程度であった。また103 μmのショット9、11、12については、運動量の数倍の変化に対しピーク電圧に3桁以上の差がある。このような応答特性がALADDINシステムの性能であるとも考えられるが、トータル衝突パラメータが同程度でも衝突数や粒径が異なることなどによってもたらされたばらつきとも考えられる。よってここでは、これ以上の散弾撃ちの複数衝突データの解釈は行わず、単発撃ちデ

ータを取得した上で散弾撃ちデータはその補助として利用し、ALADDINの校正を進めることとする。

表2 . 2012年9月Kent Univ. LGG実験パラメータ&結果 .

ショット番号	衝突速度 (km/s)	弾丸直径 (um)	衝突数	総質量 (kg)	仮想弾丸直径 (um)	総運動量 (kg*m/s)	総運動エネルギー (J)	ピーク電圧 (V)	パルス時間幅 (s)
3	2.07	35	7	3.850E-10	67.0	7.970E-07	8.249E-04	Not observed	Not observed
4	2.07	35	15	8.250E-10	86.3	1.708E-06	1.768E-03	Not observed	Not observed
5	2.05	73	2	9.981E-10	92.0	2.046E-06	2.097E-03	6.25E-04	1.44E-04
7	2.09	73	13	6.487E-09	171.6	1.356E-05	1.417E-02	6.79E-04	9.30E-05
9	2.09	103	11	1.542E-08	229.1	3.223E-05	3.368E-02	35	6.00E-04
11	2.07	103	9	1.262E-08	214.2	2.611E-05	2.703E-02	5	4.28E-04
12	2.14	103	4	5.607E-09	163.5	1.200E-05	1.284E-02	1.31E-02	2.16E-04

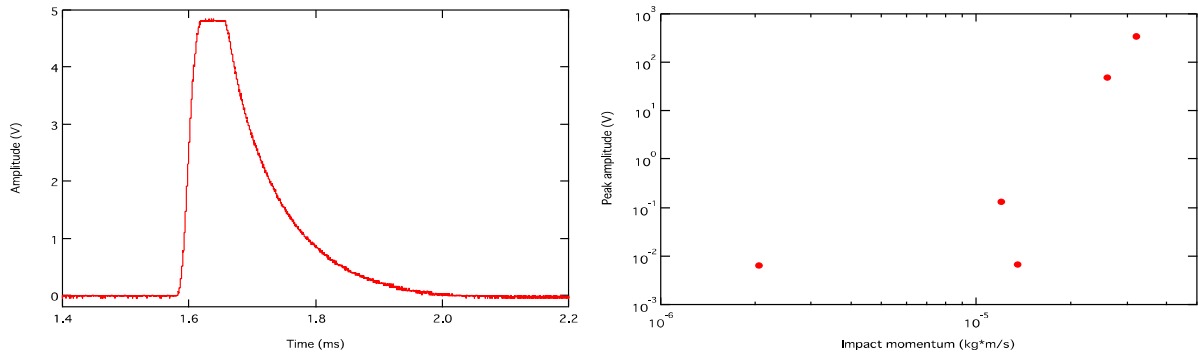


図3 . (左) ショット番号11の信号波形。4.8 V付近で飽和電圧に達しているが、およそ5 Vの出力があったことがわかる。(右) 衝突運動量とALADDINのピーク電圧値の相関。

2013年1月の実験では、2012年9月の実験結果を受け、800 μm ステンレススチール球単発をプロジェクトイルとして使用した。計測系の改良として、メインアンプ出力端に加えプリアンプ出力端、メインアンプ入力端で電圧計測し、オシロスコープで信号波形を取得した。本報告時点でデータ解析は完了していないため、途中報告にとどめる。取得信号の例を図4に示す。

プリアンプ出力(緑)にALDN-Eへの供給電圧 ± 5 Vで飽和している非常に大きな振動波形が見られる。このうち後段のバンドパスフィルタにより32 ~ 320 kHz成分が後段のアナログ出力に寄与する。メインアンプは約100倍の増幅率を持つため、メインアンプ入力信号(赤)から最終的なアナログ出力であるメインアンプ出力信号(黒)のピーク電圧がどの程度か推測可能である。図3の例ではメインアンプ出力端でのピーク電圧は約300 Vであることがわかる。また、2012年9月で見られた同一衝突パラメータで信号のピーク電圧が桁で異なるということとはなかった。

各種アナログ出力端で信号計測することにより、ピーク電圧の推定が可能であることを確認できた。これらケント大学で取得したデータに、より小さいプロジェクトイルを単発撃ち可能な宇宙研LGGのデータを追加して、ALADDINの検出閾値と思われる数十μmサイズまで相関を外挿したい。

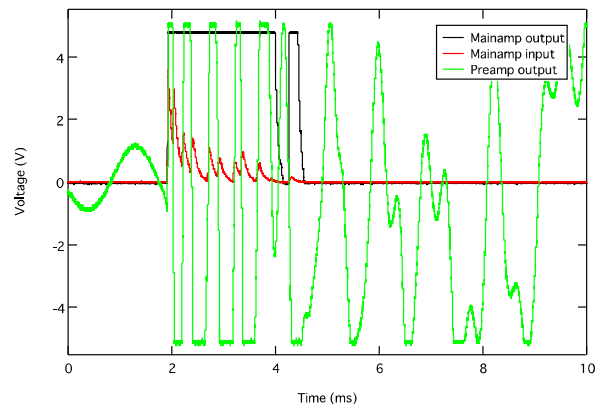


図4 . 2013年1月ケント大学LGG実験における取得信号波形例。メインアンプ出力端信号(黒)は飽和電圧に達しているが、約100倍電圧の小さいメインアンプ入力端信号(赤)は約3 Vのピーク電圧であることがわかる。

2.4 PERCナノパルスレーザー照射実験

技術上質量・速度範囲が限定的な微粒子衝突実験を補完するための新たな校正手段として、Nd:YAGナノパルスレーザーも使用した。照射実験は千葉工大・惑星探査研究センター(PERC)で2012年末から年始にかけて実施した。ターゲットには他の実験同様に、9 μm、20 μm厚原寸ALDN-Sと温度サンプル小片3種を用いた。こちらも取得データは解析途中であるため、本稿では初期報告にとどめる。

照射実験ではパルス時間幅7 ns、波長1024 nm、スポット径0.2-1.0 mmのNd:YAGレーザーを使用した。レ

レーザー光軸上にスライドガラスを設置することでレーザーのエネルギー強度の調整を行い、照射前後にパワーセンサでエネルギーを測定した。

図5に代表的取得信号と、レーザーエネルギー-ALDN-Eメインアンプ出力端でのピーク電圧値の相関を示す。メインアンプ出力端において飽和電圧未滿の信号を取得することが出来た。温度サンプル3種については相対感度が分かればよいため、ここで得られた飽和電圧未滿のピーク電圧値から、センサ温度の検出感度への影響の定量評価が可能である。レーザーエネルギーとメインアンプ出力信号のピーク電圧との相関は、各エネルギーにつき1サンプルのみ使用して見積もったものだが、よい線形関係を示すことがわかった。今後レーザーエネルギーの衝突パラメータへの変換方法を考案し、微粒子衝突データの補助としてALADDINの校正に用いる予定である。

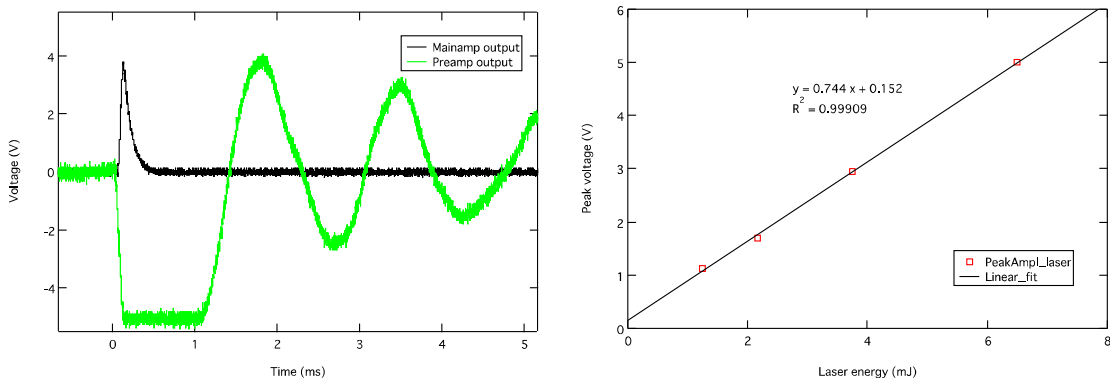


図5. (左) PERCレーザー照射実験における取得信号波形例。(右) レーザーエネルギー-ALDN-Eメインアンプ出力端でのピーク電圧の相関。

3. まとめと今後の方針

宇宙データの全貌を解釈するため、本年度はISAS、MPIK、UKC、PERCの各種衝突装置を駆使し、ALDN-Eのアナログ信号を計測することで、「検出限界からスケールアウトまでのアナログ信号強度の変化」と「宇宙実績に沿った温度履歴によるセンサ部の感度変化」について調査を行った。

VdGの速度-質量範囲では、ALDN-Eの検出限界を超える衝突条件を得ることは困難であった。LGGの速度-質量範囲では、ALDN-Eメインアンプ出力信号はスケールアウトするが、メインアンプ入力端の信号を計測することで、ピーク電圧値の計測が可能であることがわかった。高温を経験したALDN-S (PVDF)は、融点付近の+156を一度経験すると不可逆的に感度が落ちることを確認した。温度ごとの相対的感度の違いは、LGG実験とナノパルスレーザー照射による疑似衝突実験の比較により定量評価が可能である。これら取得データを総合的に解釈し、ALADDINの検出閾値決定とセンサ温度の影響評価を完了させる予定である。

4. 参考文献

- [1] H. Yano, et al.: The Arrayed Large-Area Dust Detectors in Interplanetary Space (ALADDIN) Onboard the IKAROS Solar Sail Demonstrator: Abst. the 38th COSPAR, Bremen, Germany, CD-ROM, (2010).
- [2] H. Yano, et al.: Cosmic Dust Detection by the IKAROS-ALADDIN (Arrayed Large-Area Dust Detectors in Interplanetary space) from the Earth to Venus, Abst. the 42nd LPSC, Houston, TX, USA, CD-ROM, (2011).
- [3] H. Yano, et al.: The Multiple Round Trip Measurement of Cosmic Dust Flux Completed by IKAROS-ALADDIN in the Inner Planetary Region, Abst. the 43rd LPSC, #1632, Houston TX, USA, USB Key, (2012).
- [4] H. Yano, et al.: Micrometeoroid Flux in the Earth-Venus Region Measured by the IKAROS-ALADDIN, Abst. the 39th COSPAR, B0.5-0002-12, Mysore, India, USB Key, (2012).
- [5] H. Yano, et al.: Micrometeoroid Detection in the Inner Planetary Region by the IKAROS-ALADDIN: Abst. the IAU 2013, Beijing, China, USB Key, (2012).
- [6] H. Yano, et al.: Hypervelocity Micrometeoroid Impacts on the Arrayed Large Dust Detectors in Interplanetary Space (ALADDIN) onboard the IKAROS Solar Sail Spacecraft, Abst. the ACM 2013, Niigata, Japan, USB Key, (2012).
- [7] 矢野創 他: ソーラー電力セイル小型実証機搭載用PVDFダストセンサの校正試験, 2009年度スペースプラズマ研究会講演集, CD-ROM, (2010).
- [8] 矢野創 他: ソーラー電力セイル小型実証機搭載用PVDFダストセンサの校正試験: (その2) IKAROS宇宙計測データの実証, 2010年度スペースプラズマ研究会講演集, Webpage, (2011).
- [9] 矢野創 他: ソーラー電力セイル小型実証機搭載用PVDFダストセンサの校正試験: (その3) ALDN-Eのデータ処理評価, 2011年度スペースプラズマ研究会講演集, Webpage, (2012).