# 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

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),田中真(東海大),IKAROS-ALADDIN チーム

# 1. IKAROS-ALADDINの科学目標および機器構成

「ALADDIN (Arrayed Large-Area Dust Detectors in INterplanetary space)」は、2010年5月に JAXA/JSPECが打ち上げたソーラー電力セイル小型実証機「IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun)」に搭載されたダストその場計測器である. ALADDIN は、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、従来未解明だった内惑星領域におけるダストの空間数密度の日心距離変化などを、詳 細に調査中である. その科学目標、機器構成、初期運用成果の詳細は[1,2]を参照されたい.

ALADDINのセンサ部(以下ALDN-S)は、圧電性高分子PVDF(ポリフッ化ビニリデン)薄 膜からなり、厚さ20 umと9 umそれぞれ4Chずつの合計8Chで構成されている[1]. ALDN-Sにダ ストが衝突すると、圧電効果による分極(表面電荷)がPVDF表面に現れる.その電荷を、エ レクトロニクス部(以下ALDN-E)でパルス電圧として読み出し、電圧値dV、時間幅dt、イベ ント時刻などをメモリに記録する.一方地上において、ALADDINのフライトスペアを用いた ダスト模擬微粒子衝突実験を行うことで、微粒子の衝突速度、質量といった物理特性と衝突 信号のdV、dtとの相関を見積もる.ここで得られる相関=校正式を用いることで、宇宙デー タのdV、dtから、ダストの物理特性を推定することができる[3,4].本稿では、ALDN-Eのデ ータ処理評価のために2011年10月、2012年2月実施した校正実験結果について報告する.

#### 2. 計測器校正のための微粒子超高速衝突実験

過去の校正実験[2,3]では、プロジェクタイル (固体微粒子)の衝突速度・質量の範囲を広く カバーしていたが、今回は同一衝突条件で複数 データを取得し、衝突条件に対するSail-I/Fの出 力波形の特徴の変化及び、衝突時に複数Ch間で クロストークが発生した場合の、計測器内の挙 動を把握することを主な目的とした.

本実験にはJAXA宇宙科学研究所の二段式軽 ガス銃を用いた.真空チェンバ内(数十 Pa)に 設置したPVDF(ALDN-S)に微粒子を垂直衝突 させ,発生するパルス電圧をチェンバ外に設置 したALDN-E,上位機器のSAIL-I/F,デジタルオ



図1:LGG真空チェンバ内のセットアップ

シロスコープで計測した(図1).また、衝突確認も兼ねて光電子増倍管(PMT)で衝突発光 も観測した.微粒子サイズによって、単発撃ちと散弾撃ちを使い分けた.そのうえで、SAIL-I/Fから出力されるパケットデータのdV,dt(パルス電圧波形のピーク電圧値と閾値電圧以上 を継続する時間幅に相当)及び、オシロスコープで記録した信号波形を解析した.

# 2-1:2011年10月実験

全ショットにおいて、標的は20 um厚ALDN-Sのフライトスペアとした. プロジェクタイル にはタングステンカーバイト(WC)粒子のみを用い、単発撃ちでは直径300 um球を、散弾撃 ちでは粒度75~150 umの粗粒粉(不定形粒)を使用した. 衝突速度は全て6 km/sとした.

散弾撃ちについては、衝突数をできるだけ少なくするため(理想的には単発衝突), 5 mm

径の穴が空いたポリカーボネート製絞り板をターゲット前面約30 cm に位置に設置した. 衝突 後にPVDF膜面上の衝突痕数を数え,不定形粒を真球と仮定した上で粒径75~150 umの不確定 性を考慮しつつ,総質量・総運動量を見積もって単発衝突を仮定した.

PMTを用いた衝突発光観測も実施した.単発撃ちでは,チェンバ窓を通して衝突点を斜め 45°でのぞきこむようにチェンバ大気側にPMT(浜松ホトニクスR2076/H3168MOD)を設置し, 衝突点間の距離は約60 cmとした.散弾撃ちでは,チェンバ内の絞り板と標的の間に,衝突点 を斜め45°で見込むようにPMT(浜松ホトニクスR7400U/E5780)を設置し,衝突点間の距離は約 20 cmとした.単発撃ちと散弾撃ちで,PMTの設置方法を変更した理由は,(1)絞り板を使わ ない単発撃ちではPMTへのプロジェクタイルの誤衝突が懸念されたためと,(2)単発撃ちでは 粒子が大きく十分な発光量を得られ,チェンバ外から十分計測可能と予想されたためである.

PVDF信号に対しては3通りの方法で計測を行った.1つ目はALDN-E及びSAIL-I/Fを経由し パケットデータを取得する方法,2つ目はチェンバのBNCフィードスルーに直接同軸ケーブル を接続してオシロスコープで波形を取得する方法,そして3つ目はT字二分配コネクタを使用 しての両者の併用である.パケットデータ取得においては,ALDN-E全8ChのうちCh1に標的 PVDFを接続し,その他7Chには静電容量90 nF程度のダミーPVDFを接続した.

## 2-2:2012年2月実験

この回の実験の目的は、(1) ALDN-E内部のアナログ回路終端部における電圧信号を取得する ことにより、アナログ信号波形の特徴(電圧値、パルス時間幅)と衝突条件の相関を見積も ることと、(2) 従来より小さな衝突運動量に対するALADDINの出力波形(アナログ信号)を取 得すること,の二つである. SAIL-I/Fを経由しなかった理由は、2011年10月実験後、パルスジ ェネレータを用いた疑似信号入力試験を実施し、デジタル回路系のサンプリングレートを見 積もったところ、衝突条件と出力波形の特徴の相関を解析するデータを定常的に得るには、よ り高い時間分解能が必要であることが判明したためである.

この回も全ショットの標的は20 um厚ALDN-Sのフライトスペアとした. プロジェクタイル には、単発撃ちでは直径1.6 mmのアルミナ球を、散弾撃ちでは直径100 umのソーダライムガ ラス球を使用した. 衝突速度は前回の1/10にあたる約 0.6 km/sとした. 主に衝突確認のため、 チェンバ内の絞り板と標的の間20cmの位置に、衝突点を斜めに見込むPMT(浜松ホトニクス R7400U/E5780)を設置した. PVDF信号に対する計測系は、ALDN-Eアナログ回路終端部にお ける電圧信号をデジタルオシロスコープで取得する方法のみとした.

#### 結果と考察

#### 3-1.2011年10月実験

実験結果を表1にまとめた.単発撃ちで形成されたPVDF表面上の衝突痕を図2に、衝突 痕直径と衝突エネルギー間の正の相関を図3に示す.SAIL-I/Fのパケットデータを取得した 111003-1~111004-4の6回では、衝突条件はほぼ同じながらも、dVに約2桁のばらつきが見られ た(図4,5). dVが4.84848 V (ALDN-Eの飽和電圧に相当)の場合、ALDN-Eはdt = 18[4]を、 0.07331 V以下で9[2]を出力することから、dVが大きいほどdtも大きくなることが確認された. 111004-4では、クロストーク確認用のCh2において、dV = 4.84848 V、dt = 9[2]とdVの場合に標 的Chと同等の出力を示した.111004-4と111005-5の2回では、PVDF信号、PMT信号ともに、 衝突速度が約100 m/s速かった111004-4の方が111005-5より大きな出力が得られた.

散弾撃ちでPVDF信号を取得した111005-3, 111005-4の2回については, 111005-3は単発撃ち (111004-4, 111005-5)に比べて出力強度が数桁小さく(図6,7), 111005-4では最も少ない3つの 衝突痕が確認されたのみで, PVDF信号も確認できず, PMT信号も他に比べ最も小さかった.

以上をまとめると、ALDN-S PVDFセンサ自体の出力は衝突条件に対して正の相関を持つ が、ALDN-E処理を経由したピーク電圧値・パルス時間幅の値には衝突条件との強い相関が見 られないため、ALDN-EがALDN-S上で発生する信号波形の電圧値・時間幅といった特徴を広 い計測範囲で捉えるのには性能が不十分であることがわかった.また、機上の観測データで しばしば確認される複数Ch間のクロストーク現象については、比較的衝突強度の大きかった ショット(111004-3)では観測されたが、地上実験でクロストークを起こすCh数、頻度は機 上よりも少なく、宇宙での状況を再現しきれていない.この原因としては、地上実験と機上 ではグラウンドの状況が異なること、ダミーPVDFが実際の静電容量、インピーダンスとは異 なることなどが考えられる.前者については再現が困難であるが、後者については同程度の 静電容量を持つコンデンサなどの等価回路を用いることで、次回以降の校正実験に反映する。

ショット番号	標的	衝突速度	弾丸直径	弾丸材質	単発/散弾	絞り板(5 mmΦ)有無	衝突痕数	衝突痕直径	総弾丸質量	総弾丸運動量	SAIL-I/F 出力パケット		PVDF 信号直接計測	
		(km/s)	(um)					(um)	(g)	(kg*m/s)	dV	dt	同期フラグ有無	
111003-1	20 um 厚 ALDN-S	5.88	300	WC	単発	無し	1	650	2.38E-04	1.40E-03	0.03421	9[2]	無し	無し
111003-2	20 um 厚 ALDN-S	5.91	300	WC	単発	無し	1	570	2.38E-04	1.40E-03	4.84848	18[4]	無し	無し
111004-1	20 um 厚 ALDN-S	5.93	300	WC	単発	無し	1	640	2.38E-04	1.41E-03	0.07331	9[2]	無し	無し
111004-2	20 um 厚 ALDN-S	5.99	300	WC	単発	無し	1	720	2.38E-04	1.42E-03	0.07331	9[2]	無し	無し
111004-3	20 um 厚 ALDN-S	5.93	300	WC	単発	無し	1	710	2.38E-04	1.41E-03	0.06843	9[2]	無し	有り
111004-4	20 um 厚 ALDN-S	6.06	300	WC	単発	無し	1	740	2.38E-04	1.44E-03	4.84848	18[4]	ch2: dV=4,85, dt=9[2]	有り
111005-3	20 um 厚 ALDN-S	5.91	75 <b>~</b> 150	WC	散弾	有り	9	N/A	3.33E-05~2.70E-04	2.07E-04~1.71E-03	N/A	N/A	N/A	有り
111005-4	20 um 厚 ALDN-S	5.83	75~150	WC	散弾	有り	3	N/A	1.11E-05~9.00E-05	6.90E-05~5.70E-04	N/A	N/A	N/A	有り
111005-5	20 um 厚 ALDN-S	5.93	300	WC	単発	無し	1	640	2.38E-04	1.41E-03	N/A	N/A	N/A	有り

表1. 2011年10月ISAS-LGG校正実験結果



図2:2011年10月実験単発撃ちの衝突痕例.



図4: 2011年10月実験単発撃ちのPVDF信号, PMT信号, レーザートリガー信号例.



(黒線)と二項フィルタ(赤線)処理後

3-2:2012年2月実験



図3: 2011年10月実験単発撃ち7回の衝突痕直 径と衝突速度の相関. エラーバーは顕微鏡下 での直径の測定誤差±50 umを表す.



図5:図4黒線のPVDF信号を拡大したもの.



図6: 2011年10月実験散弾撃ちのPVDF信号例 図7: 2011年10月実験散弾撃ちのPMT信号例 (赤線)と二項フィルタ(緑線)処理後

実験結果を表2にまとめた. 120220-4, 120220-5についてはオシロスコープの電圧分解能が 高いためにアナログ信号がスケールアウトしたため,参考データとする. 120220-5では2つのパ ルスが観測された. 120220-8は,過去の軽ガス銃実験では最大の1.6 mmのアルミナ粒子を使 用したため,アナログ信号は飽和電圧に達し,PMT信号も非常に大きな信号を示した. 一方 で120220-7と120220-9は,アナログ信号にパルス出力は見られなかった. PMT信号では,衝

突の運動量・エネルギーがより大きな120220-7が,120220-9より5倍大きい信号を出力した.

以上から,100 umガラス粒子が約0.6 km/s で衝突する場合,数個の衝突ではアナログ信 号の出力は見られず,8個衝突でようやく数V の出力が得られることがわかった.今後は, 実際の宇宙空間で期待される,より速い衝突 速度でのアナログ信号の取得が必要である.



図8: 2012年2月実験のALDN-Eアナログ信号 (黒線)とPMT信号(赤線)例.

表2.	2012年2月ISAS-LGG校正実験結果

ショット番号	標的	衝突速度	弾丸直径	弾丸材質	単発/散弾	絞り板(10 mmΦ)有無	衝突痕数	総弾丸質量	総弾丸運動量	電圧値	パルス時間幅
		(m/s)	(um)					(g)	(kg*m/s)	(V)	(us)
120220-4	20 um 厚 ALDN-S	573	100	Glass	散弾	無し	> 400	> 5.24E-4	> 3.00E-4	Scale out	591
120220-5	20 um 厚 ALDN-S	569	100	Glass	散弾	有り	8	1.05E-05	5.96E-06	Scale out	596
120220-7	20 um 厚 ALDN-S	565	100	Glass	散弾	有り	3	3.93E-06	2.22E-06	No signal	No signal
120220-8	20 um 厚 ALDN-S	538	1600	Al2O3	単発	無し	1	8.51E-03	4.58E-03	Saturated	610
120220-9	20 um 厚 ALDN-S	547	100	Glass	散弾	有り	2	2.62E-06	1.43E-06	No signal	No signal

## 4. まとめと今後の課題

ALADDINは2011年5月末にIKAROS復路の全データを再生し、その後10月の計測データ蓄積 モード移行まで準リアル再生を行った.年末にIKAROSは冬眠運用に入った後は、ALADDINも 新規の実測データを取得していない.それでもALADDINは有効観測時間約300日間で約2800も のダスト衝突データを記録した.約600usの長いサンプリング間隔でも、微小重力下での膜の 衝突振動の減衰時間は地上試験時よりもはるかに長いため、衝突回数自体は高い信頼性で検出 できており、フラックス値と、標準モデルや過去データとの間に不整合はない。

一方,衝突エネルギーを出力電圧dVとパルス幅dtから求めるには、衝突信号の継続時間,強度(サチュレーション未満),検出効率を総合的に考慮する必要がある.本実験の結果により, それにはALDN-Eデジタル回路系の出力であるパケットデータよりも,オシロスコープなどで アナログ回路系の出力波形を直接計測する方がより有効であることが判明した.

ALDNデータは内惑星領域のダスト環境を理解するうえで貴重であり、正しい解釈のためには、地上校正実験が引き続き重要である.そこでALDN-Sの検出限界の確認実験には、東日本大 震災の影響で依然閉鎖されている東海村・東大HITと同等の性能を持つドイツ・MPI-KのVdG 静電加速器の利用を調整中である.また、限られた衝突実験機会を補うため、次年度はISAS-LGG 実験に加えて、パルスジェネレータ試験やパルスレーザー照射実験も取り入れていく.

## 5. 参考文献

- H. Yano, et al.: The Arrayed Large-Area Dust Detectors in Interplanetary Space (ALADDIN) Onboard the IKAROS Solar Sail Demonstrator: 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 42<sup>nd</sup> LPSC, Houston, TX, U.S.A., CD-ROM, (2011).
- [3] 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).
- [4] 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、Webapge, (2011).