

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

矢野創, 岡本千里(JAXA), 田中真(東海大), 平井隆之(総研大), 長谷川直, 田端誠, 尾川順子(JAXA), 岩井岳夫(東大), 奥平恭子(会津大), IKAROS-ALADDIN チーム

1. IKAROS-ALADDINの科学目標および機器構成

半世紀にわたる太陽系探査の歴史を経てもなお、内惑星領域の太陽系ダストの分布モデルは不十分である¹⁻³⁾。これは太陽に近いために地上光学観測が困難であることに加え、探査機による直接観測・検出の機会が十分得られてこなかったことに起因している。1970年代のPioneer8-9, Helios-1, 2, 1990年代のGalileo, Ulyssesなどが限定的な計測を行っているのみで、日心距離によるメテオロイドの数密度・フラックスの上昇を議論することは難しかった。

2010年5月、JAXA/JSPECは「ソーラー電力セイル」の小型技術実証機である「IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun)」を打上げた、地球公転軌道から金星近傍までのダスト連続計測の機会を得た。そこで科学観測機器の一つとして、PVDF(ポリフッ化ビニリデン)を使った軽量・薄型・大面積のダスト計測器(「大面積薄膜ダスト検出アレイ計測器 (Arrayed Large-Area Dust Detector in Interplanetary space)」、以下「ALADDIN」と略す)が、総面積200 m²のセイル膜面上の一部(0.3%)に搭載された(図1)。

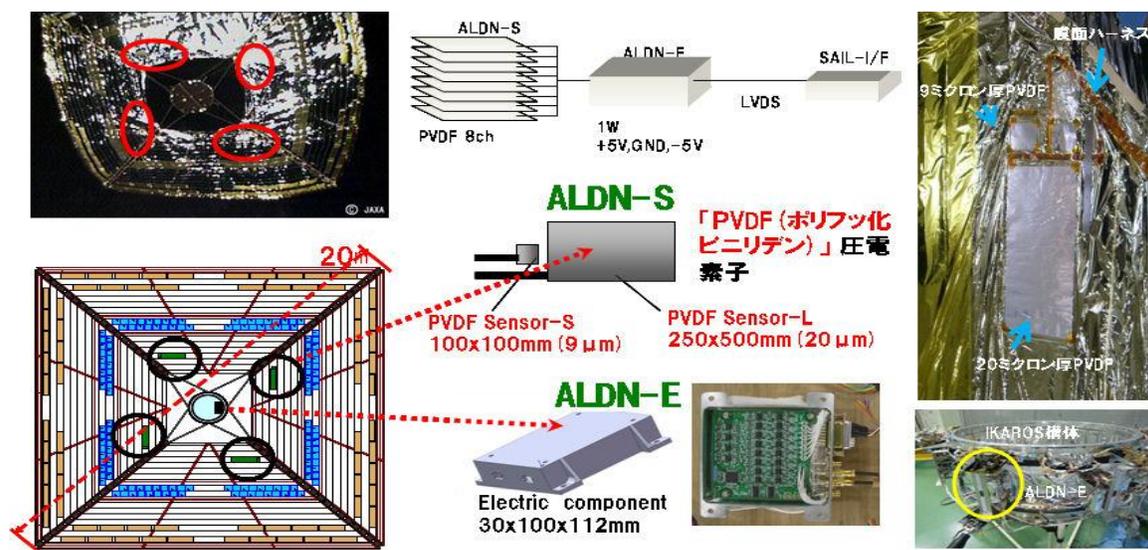


図1：IKAROS-ALADDINの機器構成

ALADDINは4枚のセイル膜に9ミクロン厚と20ミクロン厚の二枚のPVDFセンサのペアが搭載されたセンサ部 (ALDN-S; 表1) と、それらからの衝突信号を8チャンネルまとめて処理する電子回路部 (ALDN-E; 表2) をフレキシブルケーブルでつなぎ、その処理後信号をSail Interface(Sail I/F)回路部を通じて通信部に送るという構成になっている。なお、ALDN-Sは、総面積0.54m²という宇宙探査史上最大規模の有効検出面積を持つ宇宙塵検出器である。

従ってALADDIN独自の目標は、以下の二つである。(1) 技術開発：将来の外惑星探査ミッションに活用する予定の大面積ダスト検出器の深宇宙での実証と、(2) 科学研究：1~0.7 AUにおけるクルージング期間で、過去実績よりも同一観測期間内で一桁以上多いダスト衝突を検出し、大型ダストのフラックス精度、時間・空間分解能を向上させ、内惑星領域における、ダスト分布の日心距離依存性を評価する⁴⁻⁶⁾。

表1: ALDN-Sの機能・諸元

項目	機能	性能	備考
ALDN-S大センサ	超高速衝突微粒子の検出	厚み20 μ m, 寸法250x500mm、各ペダル一枚。合計4枚（有効面積：0.50 m ² ）	反太陽面
ALDN-S小センサ	超高速衝突微粒子の検出	厚み9 μ m, 寸法80x100mm、各ペダル一枚。合計4枚（有効面積：0.04 m ² ）	反太陽面
PVDFサブストレート大	ALDN-S大センサの支持構造	厚み9 μ m, 寸法80x100mm、各ペダル一枚。合計4枚	太陽面
PVDFサブストレート小	ALDN-S小センサの支持構造	厚み20 μ m, 寸法250x500mm、各ペダル一枚。合計4枚	太陽面
合計質量		36.88g（裏支持材含む）	
熱特性		α S（吸熱量）0.099, ϵ N（放熱量）0.0465	
キュリー温度		融点（ \sim 170 $^{\circ}$ C）までなし。120 $^{\circ}$ C付近に感度ピーク	

表2: ALDN-Eの機能・諸元

項目	機能	性能	備考
ALDN-Eボックス	微粒子の衝突時刻、信号ピーク値、信号減衰時間の計測・記録・データ送信（SAIL I/F経由）	検出threshold値の段階設定、自動設定モード、探査機円筒部外側に設置。	
チャンネル数	個別衝突信号の検出	8チャンネル（20 μ m x 4センサ、9 μ m x 4センサ）	
寸法		30x100x112 mm	
合計質量		210 g	<300 g
消費電力		0.26W（待ち受け時）	<1 W

2. ALADDIN初期運用成果

ALADDINは、IKAROSが打ち上げられた1か月後、2010年6月21日から稼働を開始した。試験運用は順調に進み、日本で初めて製作・校正された宇宙塵計測器として、宇宙塵の超高速衝突データを8チャンネル全てで検出することができた。一例では、同年6月30日から累積25日間で、宇宙塵（ $>$ 数ミクロン）の衝突信号を100個以上検出したが、この数は火星探査機「のぞみ」に搭載されたドイツ製ダスト計測器（MDC）が、1998年8月から45か月間にわたって検出した全データ数に相当する。これにより、短期間で宇宙塵衝突を大量に検出でき、統計的に精度の高いデータを生み出す大面積ダスト検出器としての有効性が実証でき、将来の木星圏探査での宇宙塵計測に向けた、日本独自の技術基盤を確立した、と言える。

宇宙塵分布の日心距離依存性については、時代やエラーレンジを問わなければ過去の探査機が最低一度計測した範囲は図2のようになる。このうちIKAROSと続くソーラー電力セイルにはALADDINシステムを搭載して、信頼性の高いフラックス計測を0.7~5.2 AUまで連続計測を実現することを目指している。今回IKAROSでは、累積24時間ほどの細かい時間分解能、つまり日心距離をかつてない微細に区分して、折々の宇宙塵の分布を計測することに成功した。その結果、地球近傍から金星近傍までの領域で、太陽に近づくに連れて、多少ばらつきを持ちつつも、ほぼ1ケタ連続的に上昇する宇宙塵の分布構造が明らかになった（図3）⁷⁻⁹⁾。

3. ALADDINフライトスペア校正衝突試験

こうしたALADDINが出す実宇宙計測データについて、質量と速度に応じて表3のように複数の設備での校正衝突実験が必要である。そのうち、ISAS二段式軽ガス銃を使った実験には、以下の二つの目的があった。

(1) 宇宙計測データの再現・検証： ALDN (FM) が深宇宙で記録するダスト衝突データの比較検証を行い、衝突データを精査する。すなわち、宇宙実測におけるダスト検出動作、および機器の不具合幻聴の検証である。

(2) ALDNセンサの超高速衝突データライブラリの充実： ダスト衝突を模擬し、実験結果を外挿および内挿するために、様々な速度領域・ダスト質量について、衝突実験を行う。

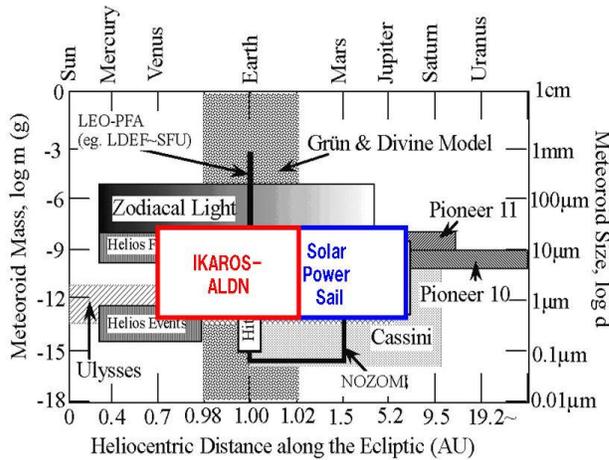


図2：過去の探査機による太陽系ダスト分布の計測実績とALADDINシステムで計測する領域

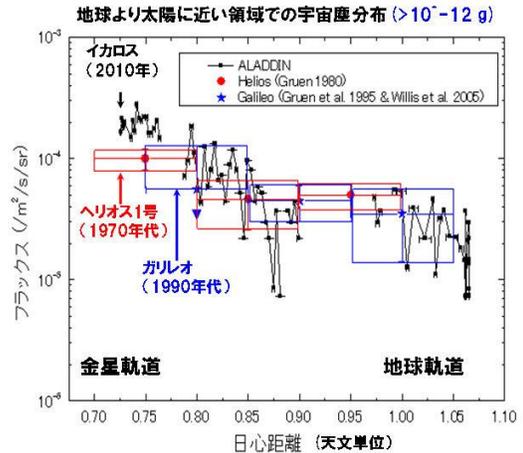


図3：IKAROSの地球～金星近傍への往路でのダスト計測と過去の探査機との比較

表3： IKAROS-ALADDINに使用した超高速衝突校正実験設備

施設	JAXA_LGG (相模原)	東京大学HIT (東海村)	MPI-K (ドイツ)
設備	2段式軽ガス銃	VdG静電加速器	VdG静電加速器
弾丸	100~330ミクロン径ガラス、金属粒子	~1ミクロン径銀粒子	数ミクロン径鉄粒子
衝突速度	2~7 km/s	1-3km/s	1-20 km/s

2010年3、8、10月にALDN-Sの二種のPVDFセンサ (500mm x 250mm x 20ミクロン厚と100mm x 80mm x 9ミクロン厚) のフライトスペアを標的として、JAXAに設置された2段式軽ガス銃を用いて、直径100~330ミクロンのガラスビーズおよび金属球 (アルミ, SUS, タングステン) のショットガンないしシングルショットの超高速衝突実験を行った (図4) ¹⁰⁾。PVDFセンサがIKAROSに8枚 (8CH) 搭載されている状態を模擬するため、標的用センサ以外にもダミーセンサ7枚を真空チャンバ内に配置した。衝突速度範囲は3.6~6.6 km/s、衝突角度は正面衝突、真空度は30Pa以下であった。計測にはFMと同一ロットの回路部品から制作されたALDN-Sフライトスペアを用いた。BNCコネクタで、PVDFセンサの信号線を真空チャンバの外に出してALDN-S⇔ALDN-E⇔Sail-I/F間を接続し、衝突で発生する微小電荷を内部アンプで増幅、電圧値へ変換したのち、衝突時刻、衝突信号強度ピーク値、信号減衰時間を記録した。

4. 実験結果と考察

衝突によるダスト信号のパルス幅 ΔT は十数 μs ~30 μs 、発生電位 ΔV は数Vであった (表4,5)。ただしPVDFの厚みに関わらず、100ミクロンダストの衝突に関しては、複数個の衝突の重ね合わせた結果を計測しているため、パルス幅は正確に計測できなかった。AI壁がある場合は、2次デブリがPVDFへ衝突している可能性が示唆された。

PVDFダミーセンサがない場合、信号線のCH以外のCHでノイズが生じたものの、弾丸の衝突場所を変えても衝突速度、弾丸サイズが同等の場合には、同じ発生電圧、パルス幅の波形が得られた。つまり、PVDFセンサへのダスト衝突の位置依存性は見られなかった。一方、PVDFダミーセンサをつけて実験した場合、信号線のCH以外のCHでノイズの発生はダミーな

しと比べて減少した。今後回路解析により、ノイズの発生メカニズムを解明する必要がある。

これらの衝突実験後のPVDFの性能評価を行うため、センサ上のクレータ観察を行った。散弾式の場合、約数～十数個のガラスビーズが衝突したことが観察された。100ミクロン径のダスト衝突の場合、ダストが衝突した個所がわずかにへこんだように観察された。300ミクロン径の場合、ダスト直径に対しセンサが十分薄いため、衝突箇所が破れていた。

続いて、330ミクロンのガラスビーズを6.5km/sで衝突させて、PVDFを貫通した。センサ両面の導通によるセンサ機能の消失が起こるかを検証したところ、今回行った実験すべてで衝突前後ともにPVDFセンサの静電容量は20ミクロン厚でおよそ735nF、9ミクロン厚で110 nFであり、静電容量はほぼ変化しないことを確認した。つまり、より小さなダストが卓越している宇宙空間でも、ダスト衝突によるセンサ機能の消失が起こる可能性が低いと考えられた。

さらに、ダスト衝突後のPVDFの性能評価を行うため、衝突後の振動によるセンサのノイズ発生について調べた。衝突前後のPVDF膜の挙動を高速カメラ（HPV-1およびE-2）を使ってその場観察を行ったが、ノイズ源となる可能性があるセンサ膜面の振動は観察されなかった。一方衝突後にガス銃の上流から来る後追いガスにより、大きくセンサ膜が振動してノイズ発生の可能性が考えられたが、膜面が前後に大きく揺さぶられてもそうした信号は検出されなかった。これは、ALDN-E回路上でパルス幅を検出し、スパイク状の短い幅以外のノイズをカットするバンドパスフィルタ機能が正しく行われているため、ダスト衝突信号の検出は1データにつき1つの衝突イベントそのものを示していることが確認された。

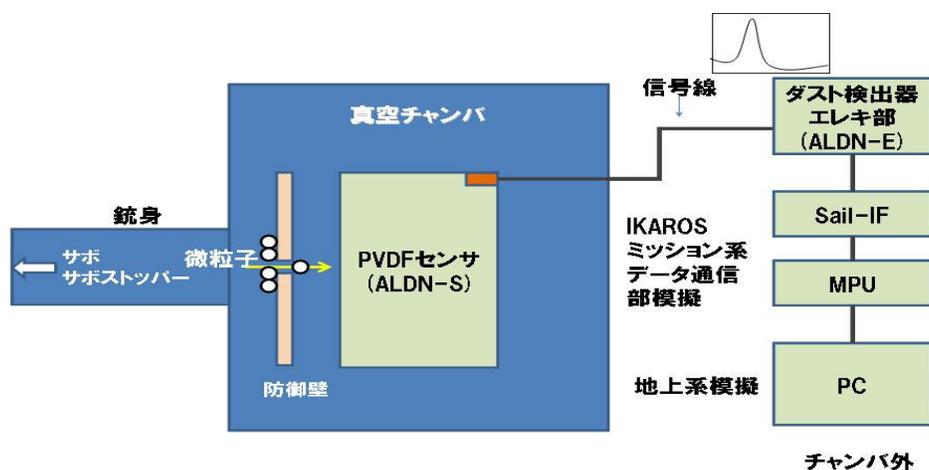


図4： ALDNフライトスペアのLGG校正衝突実験のセットアップ

表4： ALDNフライトスペアへのLGGG実験条件および結果

Shot number	PVDF thickness (μm)	V_i (km/s)	弾丸直径 (μm)	発生電圧 (V)	パルス幅 (μs)	衝突位置	衝突角度	AI膜
100316-1	20	6.59	100	4.85	—	中央	90	あり
100316-2	20	3.65	100	0.0587	—	中央	90	あり
100316-3	20	6.42	100	4.85	—	センサ端	90	あり
100317-1	20	6.52	330	4.85	18	センサ端	90	なし
100317-2	9	6.59	100	1.80	—	中央	90	あり
100317-3	9	3.96	100	4.85	18	中央	90	なし
100317-4	9	6.44	100	4.85	—	中央	90	なし
100317-5	20	6.42	100	0.308	18	中央	90	なし

表5： 様々な弾丸のPVDFセンサへのシングルショット条件および結果

Shot number	PVDF thickness (μ m)	V_i (km/s)	ショット種類	弾丸直径 (μ m)	発生電圧 (V)	パルス幅 (μ s)	衝突位置	衝突角度	Al壁	弾丸材質
101018-1	20	5.67	シングル	330	0.943	18	中央	90	なし	ガラス
101018-2	20	5.85	シングル	330	1.4	18	中央	90	なし	アルミ
101018-3	20	5.89	シングル	330	4.85	18	中央	90	なし	タングステン
101019-1	9	5.82	シングル	100	2.42	27	中央	90	なし	アルミ
101019-2	9	5.71	シングル	100	4.85	18	中央	90	なし	アルミ
101019-3	9	2.7	シングル	300	4.85	27	中央	90	なし	タングステン
101019-4	9	2.76	シングル	300	4.85	18	中央	90	なし	タングステン
101019-5	9	1.9	シングル	330	0.235	9	中央	90	なし	ガラス
101019-6	9	1.9	シングル	330	4.85	18	中央	90	なし	ガラス
101020-1	9	1.93	シングル	330	4.85	27	中央	90	なし	ガラス

5. 今後の予定

IKAROSが取得している宇宙空間での衝突データを外挿するため、来年度もISAS-LGGでの校正データライブラリの充実につとめるとともに、東大およびMPI-KのVdG静電加速器も並行して実験を行い、内惑星系でのALADDINデータのより正確な評価を目指す。

6. 引用文献

- 1) 矢野創、長谷川直・石黒正晃・松浦周二・今村剛: ソーラーセイル推進を使った惑星探査・天文観測、第3回宇宙科学シンポジウム講演集, 文部科学省宇宙科学研究所, pp.109-112. (2003).
- 2) H. Yano, S. Hasegawa, Y. Kasaba, S. Matsuura, F. Usui, and D. Yonetoku: Scientific observations onboard the JAXA/ISAS solar powered sail mission, Abst. the 35th COSPAR, Paris, France, CD-ROM, (2004).
- 3) 臼井文彦、矢野創、長谷川直、中村良介、松浦周二、藤原顕、石黒正晃、岩井岳夫、上野宗孝、大坪貴文、大橋英雄、向井正: ソーラーセイルによる太陽系ダストの分布構造の解明、第4回宇宙科学シンポジウム講演集, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部, pp.215-218, (2004).
- 4) H. Yano and Solar Power Sail Dust Detector Team: Large Area Dust Detector onboard Solar Power Sail Spacecraft, Abst. the 37th COSPAR, Montreal, Canada, CD-ROM, (2008).
- 5) 矢野創、田中真、長谷川直、奥平恭子、津田雄一、船瀬龍、森治、岩井岳夫: 小型ソーラー電力セイル実証機による内惑星領域の宇宙塵計測、第8回宇宙科学シンポジウム講演集、JAXA/ISAS, (2008).
- 6) 矢野創、田中真、岡本千里、長谷川直、田端誠、岩井岳夫、奥平恭子、IKAROS-ALADDINチーム: ALADDIN: IKAROS搭載用大面積薄膜ダスト検出アレイの開発と期待される成果、第10回宇宙科学シンポジウム講演集、JAXA/ISAS, (2010).
- 7) H. Yano, M. Tanaka, C. Okamoto, N. Ogawa, S. Hasegawa, M. Tabata, T. Hirai, T. Iwai, and K. Okudaira, ALADDIN: Arrayed Large-Area Dust Detector in Interplanetary Space onboard JAXA's IKAROS Solar Sail Spacecraft, Abst. Dusty Vision 2010, Getttingen, Germany, CD-ROM, (2010).
- 8) H. Yano, M. Tanaka, C. Okamoto and IKAROS-ALADDIN Team: The Arrayed Large-Area Dust Detectors in Interplanetary Space (ALADDIN) Onboard the IKAROS Solar Sail Demonstrator: the 38th COSPAR, Bremen, Germany, CD-ROM, (2010).
- 9) H. Yano, M. Tanaka, C. Okamoto, T. Hirai, N. Ogawa, S. Hasegawa, T. Iwai, K. Okudaira, Cosmic Dust Detection by the IKAROS-ALADDIN (Arrayed Large-Area Dust Detectors in Interplanetary space) from the Earth to Venus, Abst. the 42nd Lunar and Planetary Science Conference, Houston, TX, U.S.A., CD-ROM, (2011).
- 10) 矢野創、田中真、岡本千里、長谷川直、田端誠、IKAROS-ALADDINチーム: 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).