

IKAROS-ALADDIN 宇宙データ解釈のための校正則再現性確認実験

矢野創 (JAXA) , 平井隆之 (総研大/JAXA) , 吉川真 (JAXA) , 長谷川直 (JAXA)

1 これまでの経緯と本実験の目的

これまで JAXA 宇宙科学研究所 (ISAS) の二段式軽ガス銃 (LGG) を主に用い、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「ALADDIN」フライトスペアの地上校正実験を実施してきた。現在までの ALADDIN の宇宙実績及び科学目標については過去の報告書を参照されたい¹⁻⁴⁾。本稿は平成 25 年度の宇宙科学研究所 LGG 共同利用で実施した実験結果を報告するものであり、ALADDIN 地上校正実験の最終報告も兼ねる。平成 25 年度の実験目的は以下の 3 つである: データ拡充及び校正則の再現性確認 (2.1 節), PVDF 熱劣化に伴う検出感度変化の検証 (2.2 節), 衝突角度依存性の検証 (2.3 節)。

2 超高速微粒子衝突実験

ISAS の LGG を用い、計測器センサ部にダスト模擬微粒子を超高速 (>1 km/s) で衝突させ計測器の応答信号を記録・解析した。プロジェクタイトルとして直径 300 μm と直径 500 μm のガラス粒子を用い、3~7 km/s で衝突させた。信号取得できたデータを実験条件とともに表 1 に示す。熱劣化評価のために 156°C で加熱したセンサを用いた (詳しくは 2.2 節参照)。衝突角度依存性を検証するため、衝突角度はセンサ面からの角度で、0°, 30°, 45° と変えた。計測器の信号パラメータである I_s は、アナログ回路最終段に設置した非反転電圧増幅回路の入力端信号を時間積分した信号の強度であり、ここでは任意単位である。 I_s の詳細については参考文献を参照されたい⁵⁾。

表 1. 実験条件と結果。粒子径 100 μm のデータは、プロジェクタイトルはセンサに衝突せず、サボまたはプロジェクタイトルの破片が衝突したと考えられる衝突痕が、センサ面上に残されており、衝突痕直径から衝突体の直径を推定した。

Shot#	Aging Temp (°C)	Impact side	Impact angle (deg)	Projectile diameter (μm)	Impact velocity (km/s)	I_s
130329-1	100	Sensor	0	500	3.111	3881
130329-3	100	Sensor	0	500	6.766	11290
130329-6	100	Sensor	30	500	5.302	5450
130401-1	100	Sensor	0	300	3.328	1083
130401-2	100	Sensor	0	100	5.139	390
130401-3	100	Back	0	300	5.089	7873
131025-1	100	Sensor	0	300	3.185	784
131025-4	100	Sensor	0	500	3.040	4940
131025-5	100	Sensor	0	500	5.102	7460
131028-1	156	Sensor	0	500	3.373	500
131028-2	156	Sensor	0	500	5.484	1950
131028-4	156	Sensor	0	300	3.184	1000
131028-5	100	Sensor	0	100	5.504	370
131029-1	100	Sensor	45	500	5.533	6950
131029-2	156	Sensor	0	500	2.998	1550

2.1 校正則の導出と再現性確認

平成 24 年度の報告では解析途中であった，2013 年 1 月のイギリス・ケント大学 (UKC) での LGG 実験で取得したデータを追加し，ALADDIN の校正曲線を次式のように求めた．

$$I_s = 6.34 \times 10^6 m^{0.52} v^{0.952} \rho^{-2/3}. \quad (1)$$

取得した信号から I_s を見積り，プロジェクトイル質量 m が同じで衝突速度 v が異なるデータを用い， v の依存性 (0.952) を導出した．また，プロジェクトイル密度を用いた $\rho^{2/3}$ は， I_s が衝突痕面積に比例することを表している．

2012 年末から半年間に実施した千葉工業大学・惑星探査研究センター (PERC) におけるナノ秒パルス Nd:YAG レーザー照射実験で取得した非飽和信号⁴⁾を，LGG 実験データで得た校正曲線上に外挿することで，ALADDIN のダイナミックレンジ (0~5 V) に相当するダスト質量を推定した．図 1 は ALADDIN の校正曲線で，LGG 実験データで得られた曲線上に，レーザー照射実験データを 1 AU での平均衝突速度 20 km/s，ダスト密度 2.0 g/cm³ と仮定し^{6,7)}外挿している．以上の LGG 実験データとレーザー照射実験データを組み合わせることで，ALADDIN の質量ダイナミックレンジは， 2×10^{-14} ~ 4×10^{-11} kg (衝突速度 20 km/s，密度 2.0 g/cm³ で直径 2~30 μ m) であることがわかった．実際の宇宙データの解析では，ダストの軌道要素を考慮し衝突速度範囲を ALADDIN の空間位置ごとに見積ることで，検出ダスト質量を推定する．

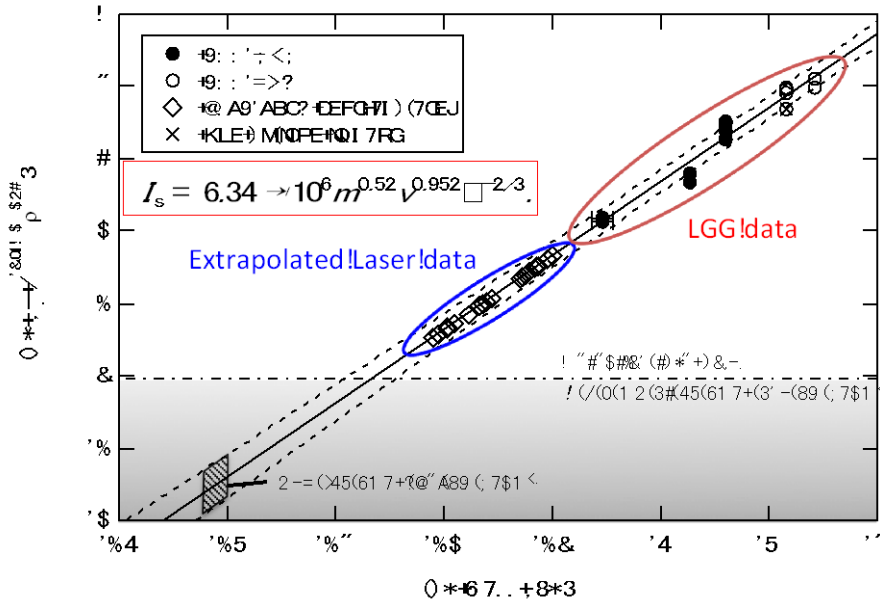


図 1. ALADDIN の校正曲線．対数グラフ上にプロットした LGG 実験データに最小二乗法を適用することで得られる．レーザー実験データは，衝突速度とプロジェクトイル密度を仮定することで校正曲線上に外挿している（詳しくは本文を参照）．バンデグラフ静電加速器 (VdG) を用いた実験で衝突させた粒子の速度-質量範囲は，今回得られた校正曲線から推定される検出下限閾値（一点鎖線）より十分低く，信号が観測されなかった実験事実と整合的である⁴⁾．LGG 斜め衝突データもプロットしている．

2.2 PVDF の熱劣化評価

PVDF はある程度高温に晒されると、その圧電性が低下することが知られている⁸⁾。ALADDIN のフライト品及びフライトスペアのセンサ部は、この圧電性の温度依存性を軽減するため 100°C でエイジング処理されている。図 2 は日心距離とフライト品センサ部温度の相関である。ALADDIN センサ部は 0.7~1 AU を周回する間に約 80~180°C 程度の温度履歴を経験することがわかる。エイジング処理の 100°C を超える日心距離領域では、ALADDIN の検出感度は低下していると考えられる。そこで、この熱劣化の影響を評価するために、156°C で加熱したセンサ (156°C センサ) を用い衝突実験を行い、100°C エイジング処理済みのフライトスペア (100°C センサ) と同様に信号解析することで、計測器の出力低下を見積った。

図 2. 日心距離とフライト品センサ部温度の相関

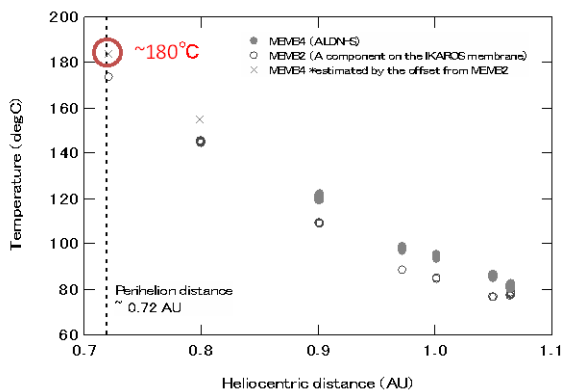


図 3. 100°C センサと 156°C センサの校正曲線の比較。100°C センサの校正曲線は図 2 と同じであるが、グラフ軸の範囲が異なることに注意。

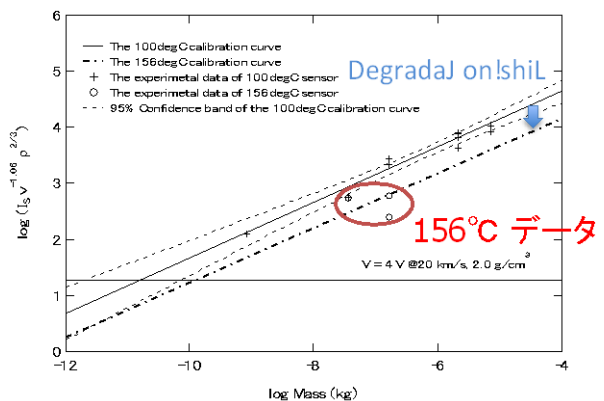


図 3 では 100°C センサと 156°C センサの校正曲線を比較している。100°C センサの校正曲線は図 1 と同一である。一方 156°C センサについては、傾きを 100°C センサと同様と仮定し、取得データの縦軸値、横軸値の平均値を通る曲線を、156°C センサの校正曲線とした。PVDF の熱劣化により校正曲線がシフトしていることがわかる。このシフト量とセンサの経験温度を線形近似し、実際に ALADDIN がフライト中に経験する最高温度 180°C におけるダイナミックレンジを見積ると、ダスト直径で 10~70 μm となった。一方で、宇宙計測実績として 180°C 経験前後のダストフラックスはほぼ同程度であっ

た⁹⁾。平均値を用いた校正曲線のシフト量からは、100°Cセンサよりも劣化するものの、実験データプロットのばらつきを考慮すれば宇宙実績と矛盾しないと考えられる。

2.3 衝突角度依存性

これまではセンサ面に対し垂直に衝突させ校正データを取得してきたが、今回計測器出力の衝突角度依存性を検証するため、センサ面から30°と45°で斜め衝突させ、垂直衝突と同様出力信号を解析し比較した。ターゲットにはどちらも同一の100°Cセンサを用いた。図1で示すとおり、斜め衝突データの分布は、垂直衝突データの分布とほぼ一致しており、センサ面から30°～90°について出力の衝突角度依存性はないことがわかった。また、惑星間空間において、ダストが計測器センサ面に等方的に入射する場合、平均衝突は45°であり15°以下で浅く衝突する確率は6.7%と低い¹⁰⁾。以上から、ALADDINにおいては衝突角度の影響はほぼ無視できると結論付ける。

3 まとめ

ALADDINのダイナミックレンジは、LGG、VdGの速度—質量範囲のはざまに相当したため、従来の直接的な衝突校正実験は困難であったが、アナログ最終段の電圧増幅前の信号の診断と、ナノ秒パルスレーザーによる衝突模擬信号の活用により、校正を可能にした。得られた校正則から、ALADDINは10～100 μmの大型ダストを検出するのに適していることがわかった。金星近傍（～0.7 AU）でのPVDFの熱劣化は存在するが、衝突実験データのばらつきの範囲内にとどまると考えられ、ダストサイズ推定への影響は限定的である。信号強度の衝突角度依存性はほぼないことがわかった。以上からIKAROS-ALADDINの宇宙実測データを、地球軌道や金星軌道周囲のダスト凝集域のその場計測といった科学的発見や解釈に用いることが可能になった。

4 参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [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:(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)
- [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4)アナログ信号と温度履歴の影響評価, 2012年度スペースプラズマ研究会講演集, Webpage,(2013)
- [5] T. Hirai, *et al.*: Microparticle impact calibration of the arrayed large-area dust detectors in INterplanetary space (ALADDIN) onboard the solar power sail demonstrator IKAROS. *Planetary and Space Science*, in revision (2014).
- [6] E. Grün, *et al.*: Collisional balance of the meteoritic complex. *Icarus* **62**, 244 – 272 (1985).

- [7] D. Nesvorný, *et al.*: Cometary origin of the zodiacal cloud and carbonaceous micrometeorites. implications for hot debris disks. *The Astrophysical Journal* **713**, 816 (2010).
- [8] G. Eberle, *et al.*: Thermal depolarization of pvdf: anomaly at 180 degC. *Electrical Insulation, IEEE Transactions* **27**, 768–772 (1992).
- [9] H. Yano, *et al.*: ALADDIN first results. *Nature Geoscience*, in preparation (2014).
- [10] E. Pierazzo, and H.J. Melosh,: Understanding oblique impacts from experiments, observations, and modeling. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **28**, 141–167 (2000).