

日本独自のメテオロイド&デブリ捕集器・計測器開発の 実績・展望における超高速衝突実験の役割

矢野創 (JAXA/ISAS)

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」フライトスベ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。プロジェクティルとして直径 $300\ \mu\text{m}$ と直径 $500\ \mu\text{m}$ のガラス粒子を用い、 $3\sim 7$ 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⁾。

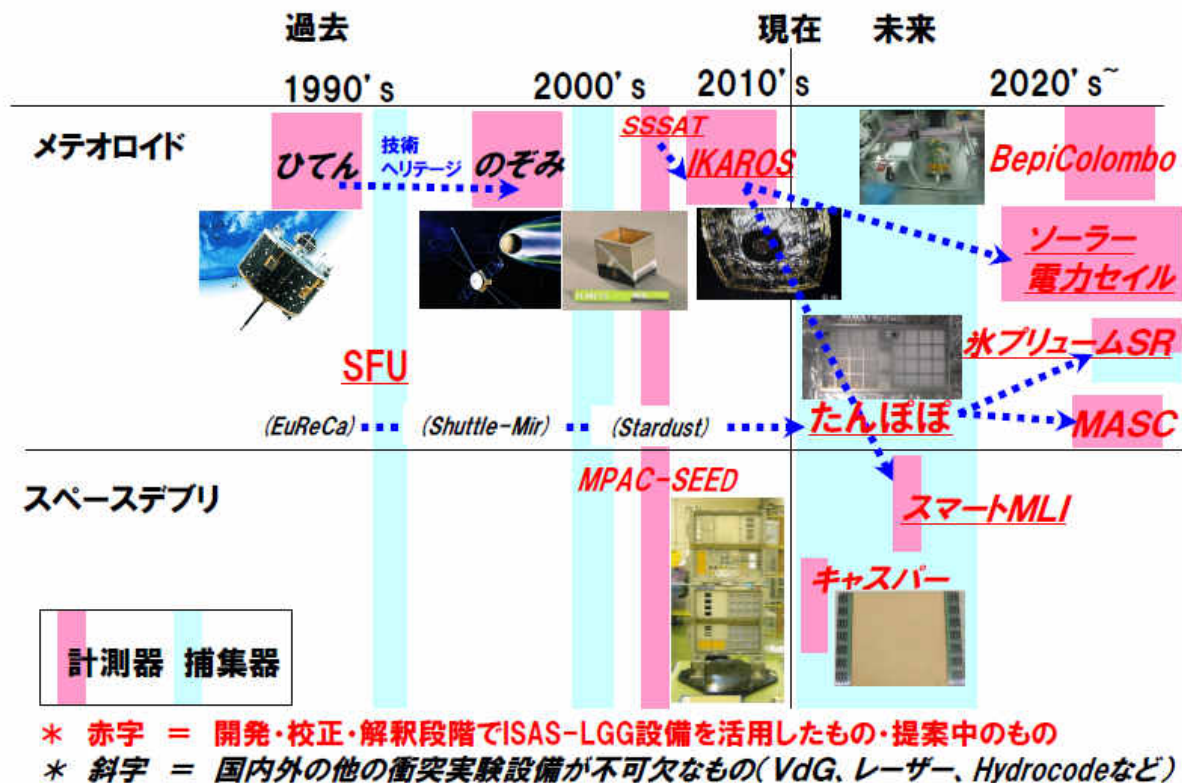


図 1. 1990 年代から 2020 年代にいたる日本でのメテオロイド&デブリ直接計測・捕集装置の開発状況と太陽系探査・宇宙実験機会間の技術ヘリテージの展開状況。

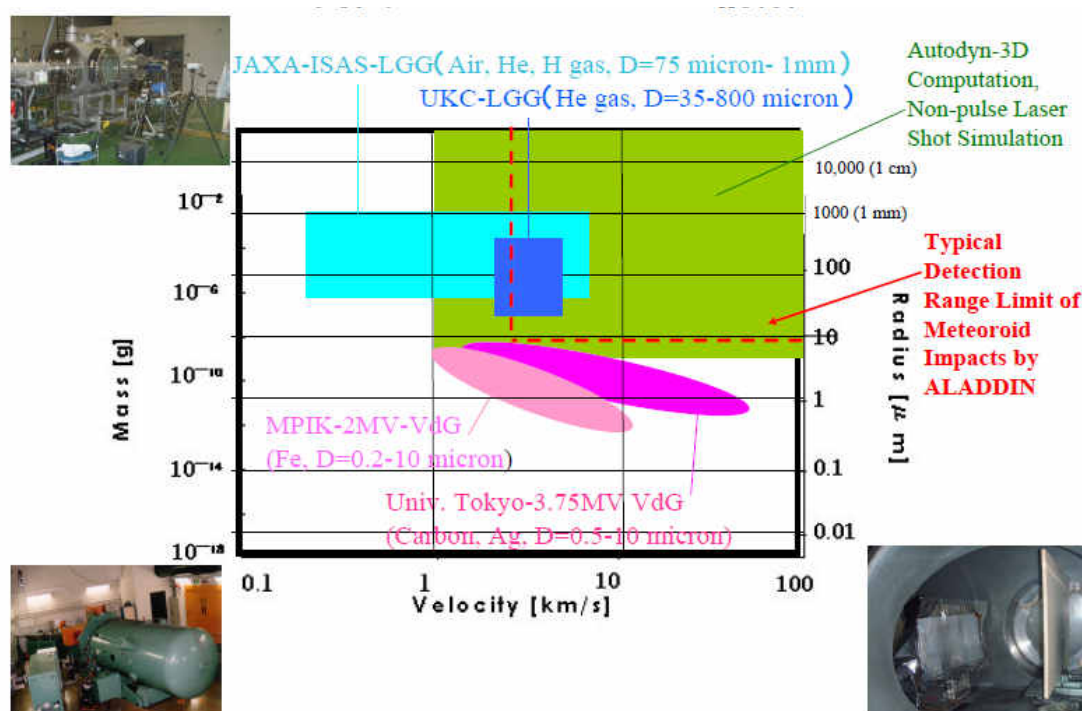


図 2. ISAS 二段式軽ガス銃をはじめとする国内外の主要超高速衝突実験設備と数値シミュレーションが再現できる質量・速度範囲と、宇宙探査機搭載計測器の検出範囲（例：IKAROS-ALADDIN）の関係。

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。

取得した信号から I_s を見積り，プロジェクティル質量 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，プロジェクティル密度を用いた $\rho^{2/3}$ 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， $2 \times 10^{-14} \sim 4 \times 10^{-11}$ kg（衝突速度 20 km/s，密度 2.0 g/cm³ で直径 2～30 μm）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。

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℃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℃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℃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℃で加熱したセンサ（156℃センサ）を用い衝突実験を行い，100℃エイジング処理済みのフライトスペア（100℃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 3 では 100℃センサと 156℃センサの校正曲線を比較している。100℃センサの校正曲線は図 1 と同一である。一方 156℃センサについては，傾きを 100℃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。

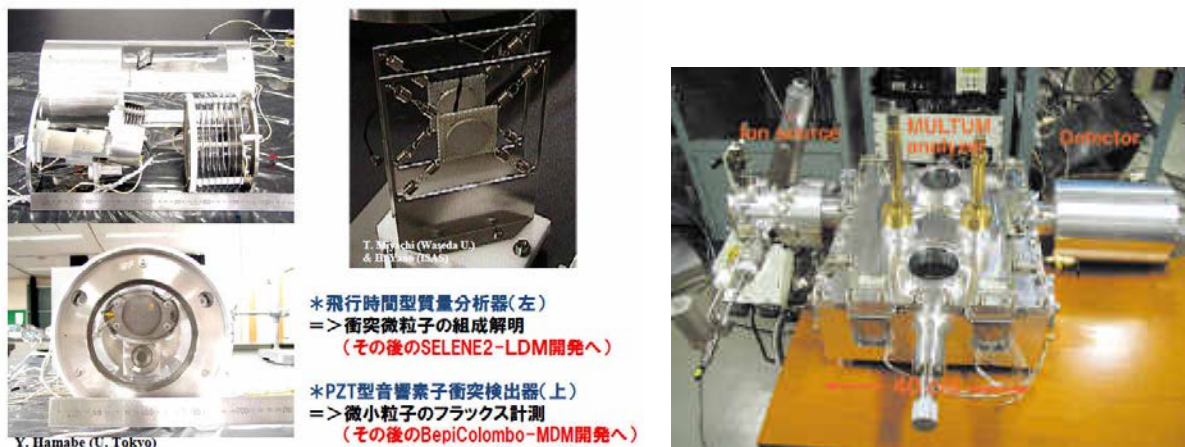


図 3. ISAS 二段式軽ガス銃をはじめとする国内外の主要超高速衝突実験設備と数値シミュレーションが再現できる質量・速度範囲と、宇宙探査機搭載計測器の検出範囲（例：IKAROS-ALADDIN）の関係

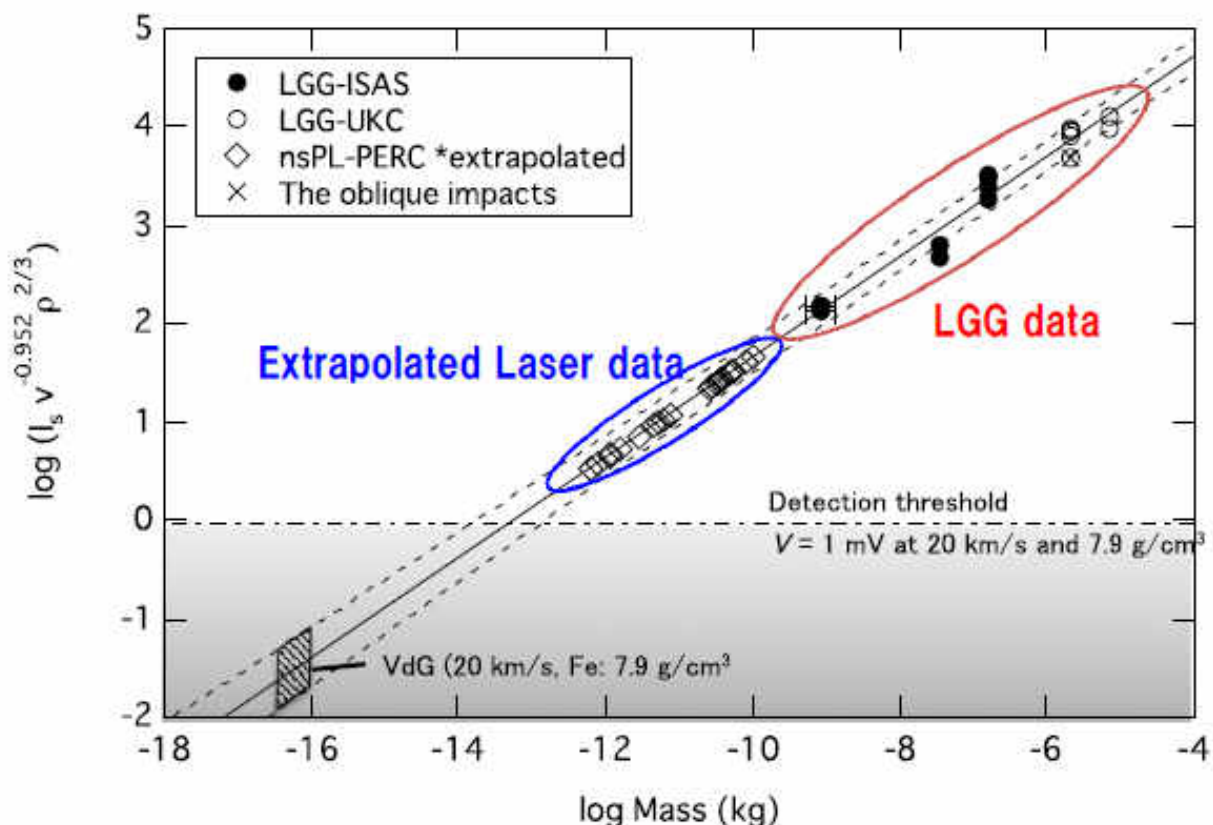
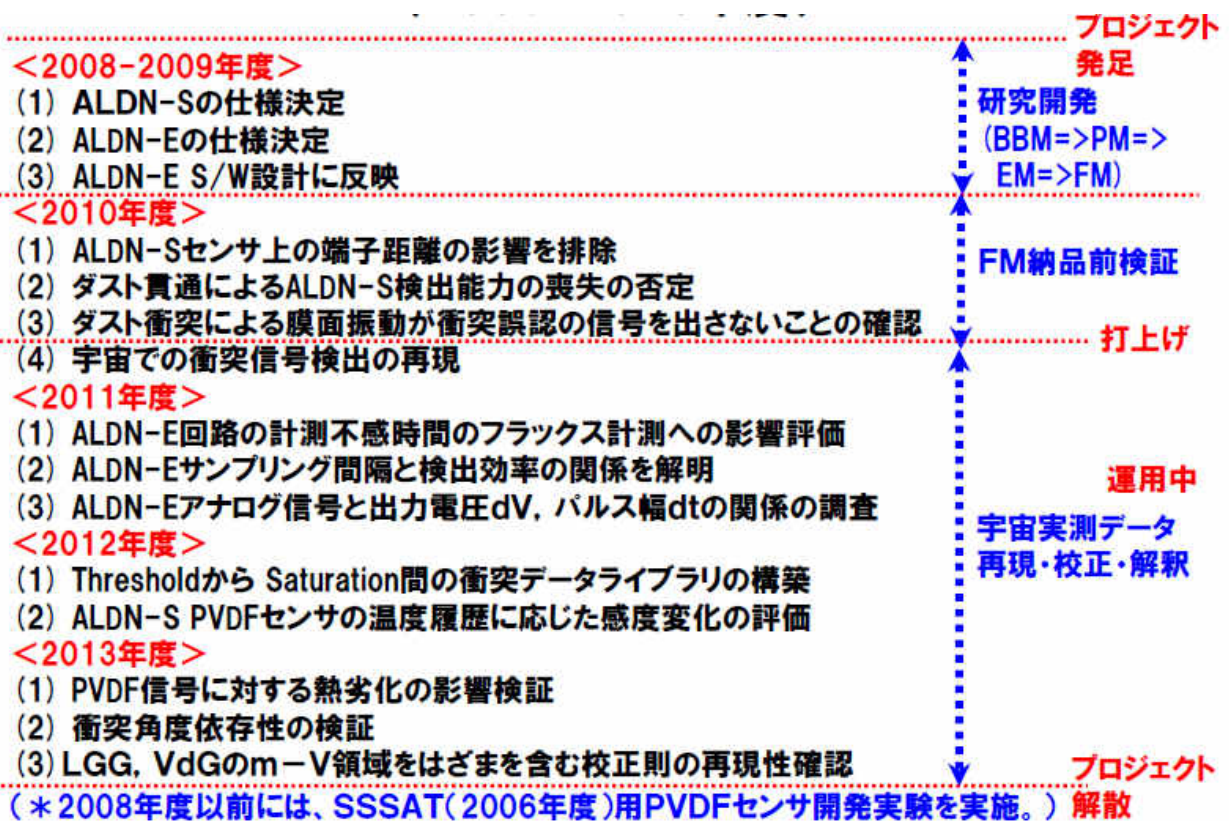
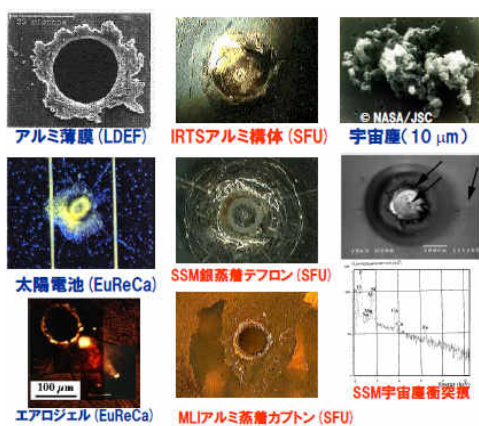
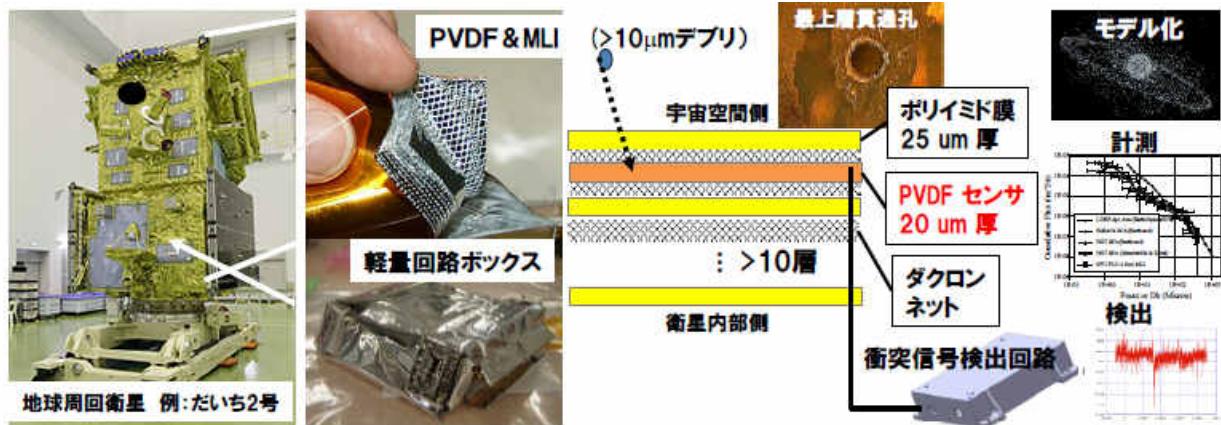


図 1. ALADDIN の校正曲線. 対数グラフ上にプロットした LGG 実験データに最小二乗法を適用することで得られる. レーザー実験データは, 衝突速度とプロジェクトイル密度を仮定することで校正曲線上に外挿している (詳しくは本文を参照). バンデグラフ静電加速器 (VdG) を用いた実験で衝突させた粒子の速度-質量範囲は, 今回得られた校正曲線から推定される検出下限閾値 (一点鎖線) より十分低く, 信号が観測されなかった実験事実と整合的である⁴⁾. LGG 斜め衝突データもプロットしている.



3 まとめ

- * 日本独自のメテオロイド&デブリ捕集器・検出器の開発は、1990年代より開始されてきた。
- * 黎明期は海外の衝突実験設備の利用に完全依存していたが、藤原銃に始まるISAS-LGGで固体微粒子加速を可能にすることで、国内の独自開発・校正の道が開かれた。
- * 衝突実験設備は、メテオロイド&デブリ捕集器・検出器全てのケースで、開発・校正・解釈の全ての段階で必要となっている。
- * 国内外の他の衝突実験設備（VdG, レーザー, Hydrocodes など）と相補的な能力の分担が重要である。
- * 2015年より2020年代にかけて、さらに多くの日本独自の装置が宇宙へ行き、M&D分野に貢献する。ISAS-LGG設備は今後も活躍が期待されている。

4 参考文献

- [1] 矢野創: 特別セッション「我が国の超高速衝突実験の展望」パネルディスカッション・「ISAS/JAXAの共同利用設備への期待」報告, 2006年度スペースプラズマ研究会講演集, p169-188, (2007).
- [2] 長谷川直, 阿部琢美, 矢野創, 他: 宇宙科学研究所スペースプラズマ共同利用の現状, 第11回宇宙科学シンポジウム, P7-100, 第11回宇宙科学シンポジウム講演集CD-ROM, (2011).
- [3] 矢野創: 回収型人工衛星上の超高速衝突痕の形状に関する考察, 第16回衝撃波シンポジウム講演論文集, p239-242, (1996).
- [4] 柴田裕実, 濱邊好美, 矢野創, 他: 超高速微粒子による星間塵計測用飛行時間(TOF)型質量分析器の開発, 第12回タンデム加速器及びその周辺技術研究会予稿集, (1999).
- [5] 野上謙一, 柴田裕実, 矢野創, 他: 水星探査機ベピ・コロomboでのダスト計測, 第一回宇宙科学シンポジウム講演集, p419-422, (2001).
- [6] 田中真, 矢野創, 奥平恭子, 長谷川直: 宇宙機搭載を想定した微粒子衝突センサの開発, 2005年

度スペースプラズマ研究会講演集, (2006).

- [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)
- [10] 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)
- [11] 矢野創 他: IKAROS-ALADDIN 宇宙データ解釈のための校正則再現性確認実験 2013 年度スペースプラズマ研究会講演集, Webpage,(2014)
- [12] 矢野創, 木部勢至朗, S.P. Deshpande, M.J. Neish: SFU 衝突痕調査の概要, 第 17 回衝撃波シンポジウム講演論文集, 衝撃波研究会・文部省宇宙科学研究所・東北大学流体力学研究所, p229-232, (1997).
- [13] 奥平恭子, 矢野創, 小野瀬直美, 長谷川直: エアロジェルによる粒子捕集および変成のモデルについての考察, 2006 年度日本惑星科学会秋季講演会講演集, ppP32, (2006).
- [14] 土山明, 杉田精司, 矢野創, 他: 非品質ケイ酸塩のエアロジェルへの衝突実験: スターダストサンプルとの関連, 2005 年度スペースプラズマ研究会講演集, (2006).
- [15] 山岸明彦, 横堀伸一, 矢野創, 他: 鉱物, 有機物, 微生物の高速衝突による変性の研究, 2009 年度スペースプラズマ研究会講演集 Webpage,(2010).