

小型衛星用プラズマ推進システムの必要性と課題 Needs and Problems of Plasma Propulsion Systems for Small Satellites

小泉 宏之
Hiroyuki KOIZUMI

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

近年の小型衛星利用は、従来の大学等機関による教育的開発に加え、小型衛星企業の創出ならびにNASAのキューブサット宇宙探査利用にまで拡大している。これら動向は、毎年8月に米国ユタ州で開催される Small Satellite Conference¹の参加者数の急増に顕著に表れている（なお、同会議は単独セッションのみで構成され、発表採択率は2012年時点で3割と激戦である。Websiteから全ての発表原稿およびプレゼン資料がダウンロードできる）。そして、近年では10 kg級キューブサットへのコールドガススラスト搭載はデフォルトとも言えるべき数に至る。小型衛星ミッションの幅は、地球近傍の大規模コストレーションから宇宙科学探査・資源探査まで拡がり、小型推進系の実証実用が追いついていないのが現状と言える。

小型推進系に求められる能力は多様であり、1つの推進系が全てをカバーすることはない。必要な推進能力を大別すれば短時間軌道遷移、多軸並進／回転制御、長時間軌道遷移と分けることができる。短時間軌道遷移は、大推力が可能な化学推進の独壇場であり地球圏脱出、惑星軌道投入、重力天体着陸などに不可欠である。多軸制御能力は、通常、RCS (Reaction Control System)として実装され、小型性・制御性に適した推進系が適用される。そして、長時間軌道遷移においてプラズマ推進（電気推進）が真価を発揮する。本格的な軌道遷移には、「はやぶさ」やスマート1の2 km/s級から、ベピコロンの5 km/s級、そしてDAWNの10 km/s級と大規模 ΔV が必要となる。このような ΔV に化学推進を使うと、衛星本体の2倍から20倍の推進剤質量が必要となる。予算と打ち上げ機会に恵まれる大型衛星では機体重量増とスイングバイを利用することで不可能ではないが、低コスト、短期開発、相乗り打上が求められる小型衛星では話にならない。重量制限が厳しく、投入軌道を選べ

ない小型衛星にとってこそ、大 ΔV を実現する小型プラズマ推進（電気推進）システムは渴望されている。

小型衛星用プラズマ推進システムにおける課題は、第一位に実現性、第二位に取扱生、第三位に性能と考えている。現在直面している具体的な課題は次節に述べるが、上記は衛星サイズによらない共通課題である。取扱生が性能よりも優先度が高い点は小型推進系の大きな特徴である。これは、小型衛星としての利点、すなわち低コスト・短期開発、を失わせては無意味なためである。例えば、大型衛星では標準である「射場における特別法令措置下での推進剤充填」といったことはできない。安全な推進剤、充填済み輸送、長期間放置、コールドローンチ（電源OFF打上）が可能であることは、推進性能以上にメリットがある。

現状、50 – 150 kg小型衛星に対する最大の架台は、信頼性と性能向上と考えている。ほどよし4号およびPROCYONにおける小型イオンスラスト^{2,3}の実績により、従来のキセノン推進剤型の小型化による実現性、ならびに取扱生（キセノンの事前充填と空輸）に関しては、既にクリアしている。残る課題が上記2項目である。PROCYONにおける実績作動時間は200時間であり、現状の ΔV 要求（100-1000 m/s）には一桁、将来的な ΔV （> 1 km/s級）には二桁、作動時間が足りていない。既に実現性が見えているこのクラスでは、大型衛星並に信頼性を高めることが必須である。さらに、ミッション時間の制限（長くても1年）を考えると、1 mN級への大推力化は必須項目である。

そして、50 kg以下の小型衛星に対しては、さらに大きな課題として脱キセノン（脱高圧ガス）を挙げる。高圧ガスに関する標準規制（日本では高圧ガス保安法）を満たした上での小型

化に限界がある。実際、ほどよし4号小型イオン推進システム質量8 kgのうち、約50%が高圧ガス関連の乾燥質量である。この克服方法として、Busek Co Inc.によってヨウ素を推進剤としたイオンスラスター⁴/ホールスラスター、東京大学によって水を推進剤としてイオンスラスター⁵が研究・開発されている。前者は、実験室レベルでは既に十分な性能を示し、現在、NASAのSLS相乗りキューサットにおいて実証/実用を計画している。後者は、性能向上の研究段階であるが、水レジストジェットRCSと組み合わせることによる統合推進系を提案している。このために、同じくSLSキューブであるEQUULEUS⁶において水レジストジェットの実証/実用を計画している。さらに水の利用には、将来的な月および小惑星における水の現地調達の展望がある。また、従来から着目されているPTFEを利用したパルス型プラズマスラスター⁷も、脱高圧ガスを元から克服している点が最大の魅力である。しかしながら、固体のアブレーション供給方式では、幾何形状による推進剤量制限、つまり ΔV 制限が課題である。例えば、典型的な10 J級作動では2 cm²程度の昇華断面積が必要であるが、50 cm長のPTFE角材を使用しても0.2 kgの推進剤搭載となる。

最後に今後のプラズマ推進系の発展の鍵となる衛星電力環境に関して述べる。大型衛星を含め近年のプラズマ推進系の発展は、衛星電力供給能力の向上に支えられたものである。そして、今後、使用可能電力の上昇はプラズマ推進系の適用範囲を大きく拡大する。実際、JAXAにおいては、薄膜太陽電池セルを利用した軽量化により、質量あたりの発生電力を大幅に向上させる研究開発がある⁸。一方、電力能力の向上により別の問題が明るみに出る。衛星における熱制御、放熱能力の欠如である。プラズマ推進の消費電力の数割は衛星への発熱となる。仮に100 kg衛星が1 kWプラズマ推進機の搭載が可能となった場合、500 W級の放熱能力が衛星に求められる。大放熱の必要性和熱環境の激変、これは現在の小型衛星にとって容易なことではなく、新たな放熱機構が必須となる。

結局、プラズマ推進系はあくまで衛星における機器であり、推進性能だけではなく、実現性、取扱性、衛星電力および熱環境、これら全体のバランスが必須とである。現状、ミッションにおける律速要因を、逐次判断し解決していくことが最重要であると言える。

¹ Hicks, M. T. and Niederstrasser, C., "Small Sat at 30: Trends, Patterns, and Discoveries" Proceedings of the 31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC16-III-02.

² Koizumi, H. Komurasaki, K., Aoyama, J., and Yamaguchi, K., "Engineering Model of the Miniature Ion Propulsion System for the Nano-satellite," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 12, No. ists27, 2014, pp.Tb_19-Tb_24.

³ Koizumi, H., Kawahara, H., Yaginuma, K., Asakawa, J., Nakagawa, Y., Nakamura, Y., Kojima, S., Matsuguma, T., Funase, R., Nakatsuka, J., and Komurasaki, K., "Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System installed on Small Space Probe: PROCYON," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14, No. ists30, 2016, p. Pb_13-Pb_22

⁴ Tsay, M., Frongillo, J., Hohman, K., and Malphrus, B. K., "LunarCube: A Deep Space 6U CubeSat with Mission Enabling Ion Propulsion Technology," SSC15-XI-1, 2015

⁵河原大樹, 中川悠一, 小泉宏之, 小紫公也, "水およびブタンの小型衛星用イオンスラスターへの適用", 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2015-4654

⁶ Campagnola, S., Ozaki, N., Oguri, K., Verspieren, Q., Kakiyama, K., Yanagida, K., Funase, R., Yam, C. H., Ferella, L., Yamaguchi, T., Kawakatsu, Y., Kayama, Y., Suda, S., Yarnoz, D. G., "Mission Analysis for EQUULEUS, JAXA's Earth-Moon Libration Orbit Cubesat", 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, Mexico, IAC-16-B4.8.1, 2016.

⁷ Burton, R. L. and Turchi, P. J., "Pulsed Plasma Thruster," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, 1998.

⁸ 中村徹哉, 柴田優一, 住田泰史, 今泉 充, 豊田裕之, 川勝康弘, "DESTINY 用薄膜軽量太陽電池パドルの開発", 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2015-4325.