

イオン伝導性ガラスを用いた超小型人工衛星に 搭載可能なタンクレス固体推進機の開発

大 幸 裕 介^{*1} 渡 邊 保 真^{*2}

Development of a Tankless Solid Space Propulsion Thruster Installable in Ultra-compact Industrial Satellites Utilizing an Ion Conducting Glass

Yusuke DAIKO^{*1} and Yasumasa WATANABE^{*2}

Space development using nano-satellites weighing less than 50 kg and space observations such as gravitational wave detection have been actively conducted in recent years. There is a strong demand for the development of small propulsion thrusters that can control satellite orbits with a thrust of 1 mN. The ion engine propulsion system onboard the Hayabusa space probe, which ionizes and emits xenon (Xe) gas to propel the spacecraft, has operated for more than tens of thousands of hours. Still, the need for high-pressure components such as gas tanks, pressure regulators, and regulating valves, as well as the restrictions of the High-Pressure Gas Safety Law, has made it very difficult to make the ion engine smaller and lighter. Our team aims to develop a new ion engine based on a method of applying high voltage to sharpened glass that exhibits high silver ion conductivity. Here we report on the ion emission current from the glass under high vacuum conditions and simulation results on the behavior of ions emitted from satellites.

1. はじめに

50 kg 未満の超小型衛星による宇宙開発や重力波検出など宇宙観測が近年盛んに実施され、1 mN の推力で衛星軌道を制御可能な小型の推進器(エンジン)開発が求められている。はやぶさ(宇宙探査機)に搭載されたキセノン(Xe)ガスをイオン化・放出して推進するイオンエンジン推進器は数万時間を超える運用実績があるものの、ガスタンク、圧力調整器や調整バルブなど高圧部材が必要な上、高圧ガス保安法の制約もあり、この機構によるイオンエンジンの小型化・軽量化は難しい。イオン伝導性のイオン液体や水などを推進剤とする液体方式でも、タンクは不可欠で漏洩や宇宙の低温環境での凝固対策などは必要となる。

我々のチームでは、先鋭化した銀イオン伝導性ガラスからの電界イオン放出を利用した新しい全固体推進機の開発を目指している。Ag⁺イオンはガラスと接合する銀電極から供給されることで全固体でありながら連続的な Ag⁺イオン放出が可能である。このガラスはイオン液体(イオン導電率: $\approx 10^{-3}$ S/cm)を凌駕する高いイオン導電率($\approx 10^{-1}$ S/cm)を示し、このことは液体電解質を用いる方式に比べて、より高い推力が得られる可能性を拓く。比較的小さいイオンエンジン(2018 年時)の質量はタンクなどを含めておよそ 8 kg、体積は 13,000 cm³ と報告されており、うち推進剤の Xe ガス重量は 0.89 kg である⁽¹⁾。非常に単純に推進剤を固体(銀)に置き換えたとするとタンクなどが不要で質量 ~ 0.7 kg、体積はおよそ 700 cm³ となり、著しい軽量化および体積 $\sim 1/20$ の小型化が見込まれる。銀は Xe ガスと比べて供給価格変動リスクも低く、また有毒な化学燃料や高圧となるガスや液体と比べて、推進器の全固体化は安全性や取扱いの面でも優位であると考えられる。一方で銀イオンや銀粒子がもし衛星の太陽光パネルや機体に衝突すると、パネルの短絡による電力不足や機体損傷を引き起こす可能性もある。銀は Xe より 2 割程度軽く、本当に銀イオン放出が推進機として利用可能か宇宙空間(真空)でのイオン放出挙動を予め予測する必要がある。ここではガラスの先鋭化や真空条件でのイオン放出実験およびイオン放出挙動の数値解析結果について得られた成果を報告する。

2025年3月1日 受理

^{*1} 名古屋工業大学生命・応用化学類

^{*2} 豊田工業大学大学院工学研究科機械システム分野

2. イオン伝導性ガラスの組成と熱変形

これまで大気圧条件でイオン放出を確認していた $\text{AgI-Ag}_2\text{MoO}_4$ 系ガラスを用いて真空条件(3×10^{-5} Pa)でイオン放出実験を行ったところ、驚くことに加速電圧を 10 kV 近くまで上げてイオン放出は確認されなかった。大気条件ではガラス先端の曲率半径は $\sim 50 \mu\text{m}$ 程度でも Ag^+ イオン放出電流が計測できていたが、真空条件ではさらに鋭く先鋭化することが必要であった。大気圧下での質量分析の結果などから、大気分子との電荷のやり取り(イオン化)がイオン放出に要する加速電圧と関係すると考えている。先鋭化にはガラスの加熱による熱変形を利用したが、ガラス組成によって先鋭化加工の難度が大きく異なったことから、クリープ試験によりガラスの熱変形挙動について調べた⁽²⁾。

板状に加工したガラスにインコネル製の球形圧子を 3 N の荷重になるように押し当てて、PID 制御により荷重を保持しながら $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温速度で昇温したときの温度と荷重の時間変化を Fig. 1(a)に、また $\text{AgI-Ag}_2\text{MoO}_4$ ガラスに対する温度と圧入深さの関係を Fig. 1(b)に示す。圧入深さの温度変化の傾きが急激に大きく変化するときの温度がガラス転移温度に対応する。また本スカラ共同研究で新たに作製したガラスの結果を Fig. 1(c)に示す。圧入深さが大きく変化する開始温度(Fig. 1b と c の下矢印 \downarrow)から $60 \mu\text{m}$ 圧入するのに必要な温度をガラスの熱変形の 1 つの指標として採用すると、加工しやすいソーダ石灰ガラス(いわゆる窓ガラス)は $60 \mu\text{m}$ の圧入に必要な温度はおよそ 60°C である。一方、Fig. 1(b)に示す $\text{AgI-Ag}_2\text{MoO}_4$ ガラスは 19.8°C となり、ソーダ石灰の 1/3 以下であった。 $\text{AgI-Ag}_2\text{MoO}_4$ ガラスはわずかな温度変化で一気に変形して、溶けることを意味している。プロセス温度窓がかなり狭いため、加熱による粘性流動を利用した本ガラスの先鋭化が困難であったと考えられる。またアレニウスプロットより、ガラス転移温度以下の熱変形に対する活性化エネルギーは 55 kJ/mol と見積もられた。一方、Fig. 1(c)に示すガラスは、 $60 \mu\text{m}$ の変形に 31°C を要し、変形の活性化エネルギーは 18 kJ/mol とかなり低い値を示した。本研究で新たに作製したガラスは $\text{AgI-Ag}_2\text{MoO}_4$ 系と比べてプロセス温度窓が 1.5 倍に広がり、変形の活性化エネルギーも低いため、加熱による粘性流動を利用した先鋭化が可能になったと考えられる。ガラスのネットワークフォーマーが 2 つのガラスで異なっている。

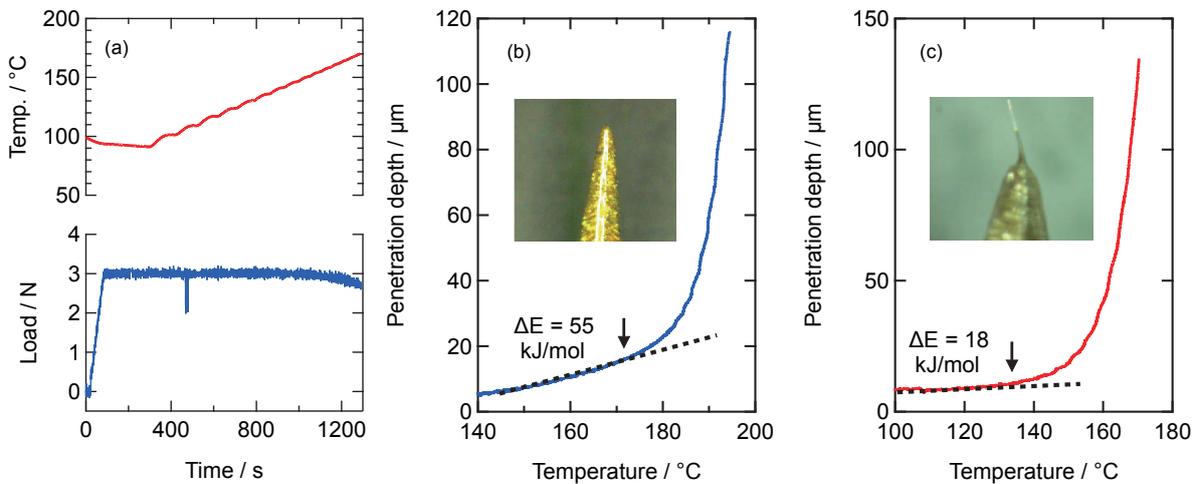


図1 (a) クリープ試験時の荷重と温度の時間変化、(b) $\text{AgI-Ag}_2\text{MoO}_4$ ガラスおよび (c) 新たに作製したガラスの圧子圧入深さと温度の関係。

2種類のガラスの導電率の温度変化を図2に示す。いずれのガラスも室温 $\sim 80^\circ\text{C}$ 付近で 10^{-2} S/cm に迫る比較的高い値を示し、新規ガラスの銀イオン伝導に対する活性化エネルギーは 7 kJ/mol であった。バルク AgI の α 相(超イオン伝導相)と同程度の低い値である。なお、これらのガラスは電圧がかかると銀電極からガラスに Ag^+ イオンが拡散する(逆側の電極では銀が析出する)。銀とガラスの界面インピーダンスを下げることで Ag^+ イオン拡散が促され、イオン放出の長寿命化と直結している。

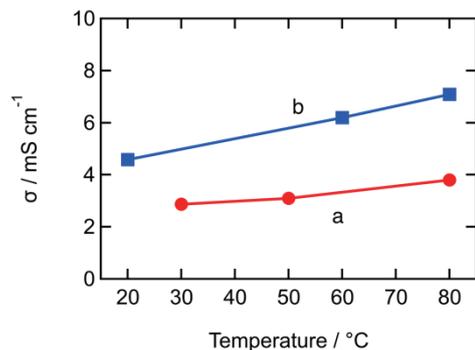


図2 導電率の温度変化 (a: $\text{AgI-Ag}_2\text{MoO}_4$, b: 新規ガラス)。

3. 真空条件でのイオン放出実験

先鋭化したガラスを真空チャンバにセットして、中央に孔の空いた引抜電極と銀ロッド電極との間に高電圧を印加する装置を自作した。ターボ分子ポンプを用いて減圧し、真空度は 3×10^{-5} Pa程度を保持した。図3にイオン電流値の時間変化を示す。当初使用した $\text{Ag}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ 系は粘性が高く先鋭化は比較的容易であったもののイオン放出電流は pA オーダー程度と低く、さらにイオン放出のために 300°C 以上の加熱が必要であった。宇宙空間での使用や衛星の消費電力を考慮すると、イオン放出はできるだけ低温の方が望ましいと考えられる。上述のガラス組成探索により、新たに作製した AgI 系のガラスでは 50°C 付近でも nA オーダーと 1,000 倍ほど電流値が向上した。ただ図3に示すように、電流値が増加すると突然発光を伴いながら放電して先端が破損することも複数回確認している。銀電極からガラスへのスムーズな銀イオンの拡散が極めて重要になる。この銀電極からガラスへの銀拡散は 1990 年代頃まで日本を中心に精力的な研究が行われており、当時の深遠な基礎研究の成果に改めて注目してガラス組成の更なる最適化を進めている。

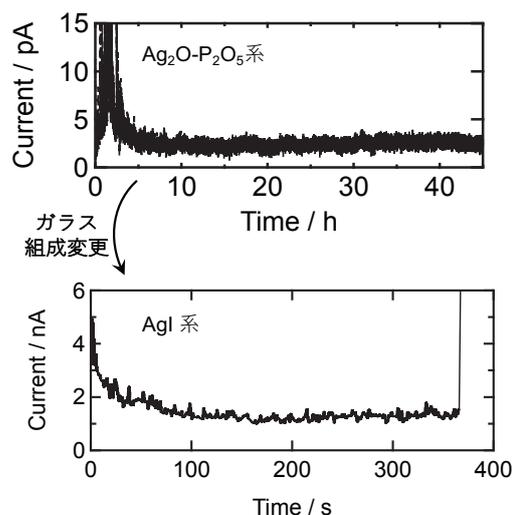


図3 一定加速電圧におけるイオン電流値の時間変化。

図3 一定加速電圧におけるイオン電流値の時間変化。当時の深遠な基礎研究の成果に改めて注目してガラス組成の更なる最適化を進めている。

4. 推進剤の宇宙空間放出特性と衛星への影響評価

周囲が高真空環境である宇宙空間では、人工衛星推進器から噴射された推進剤が、大気中とは異なり大きく拡散して広がるという特徴的な挙動をとる。特に、ごく一部の推進剤は噴射方向とは逆方向に拡散し流れてゆくことが知られており、銀を推進剤とする提案推進器では衛星との衝突時に表面に付着し積層する懸念がある。そのため、宇宙空間に放出された銀イオン、銀原子の挙動を解明することは喫緊の課題である。

提案するイオンエンジン出口での流れの希薄度を表すパラメータであるクヌーセン数 Kn を推算すると 10 以上の値であったことから、希薄流体解析手法である Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) 法⁽³⁾による衛星周囲での推進剤挙動予測を行った。

本研究の最終目標である、超小型衛星の軌道制御を想定し、搭載目標の 3U サイズ (10 cm x 10 cm x 30 cm サイズ) の衛星の天板中央に直径 30 mm の銀噴射口を設定し、理想的な排気速度として 1 km/s を想定した希薄流体解析を実施した。

図4に銀原子の宇宙空間での振る舞いの一例を示す。通常の希薄空気の挙動から予測された通り、銀原子を推進剤として放出した場合も、噴射方向とは逆方向である領域 ($x < 0.2$ m) に広がっており、このエリアに太陽電池パネルを設置すると銀積層により短絡などの事象を引き起こし得るために注意が必要であることが判明した。また、図5に示す推進器設置面の銀積層速度予測の一例より、推進器の連続運転時間が長い場合は天板面には銀の付着してゆくために注意が必要となることが明らかとなり、本研究で提案するイオンエンジンを用いる場合の衛星設計指針を得ることができた。

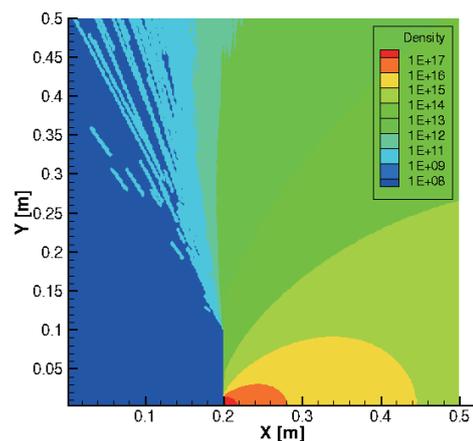


図4 人工衛星周囲での銀原子数密度分布の一例。

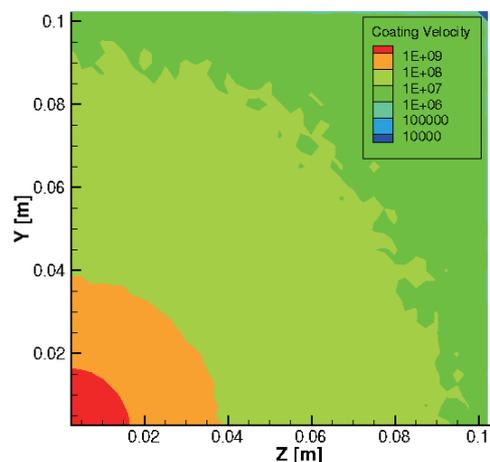


図5 推進器設置面において単位時間単位面積あたりに積層する銀原子数予測結果の一例。

5. 推力計測

本研究で提案する推進機構の実証を行うため、振り子式の推力計測装置を開発し、推力発生に伴う推進器の変位をレーザー変位計にて算出した。計測では 10^{-4} Pa 以下に保ち地球低軌道環境を模した高真空チャンバー内に、細糸でイオン伝導性ガラスを塗布した銀ロッドを引き抜き電極と共に吊り下げ、2 kV の電圧印加時に発生する推力を計測した。推力発生に伴い、吊り下げられた推進ユニットが推力および重力の合力方向に変位する。これを計測精度 $1 \mu\text{m}$ のレーザー変位計で検出し、力の釣り合いから推力を計測した。現時点ではノイズの影響などが大きく見られるが、想定した方向に推力が発生していることが確認でき、本研究にて提案する銀+イオン伝導性ガラスの組み合わせによる、全く新しい全固体イオンエンジンに関し、推進原理の実証ができたと考えられる。

6. 今後の研究計画

Ag^+ イオンの質量とイオン電流の関係から、およそ $30 \mu\text{m}$ 間隔でスパイク状にガラス表面を加工できれば、試算では 3 cm 角程度の面積で $0.1 \sim 1 \text{ mN}$ の推力達成が可能と見積もっている。 1 mN の推力が得られれば、超小型衛星を高度 400 km の軌道から数分のイオン噴射により軌道半径を 100 m 以上遷移させることができ、衛星の座標調整や減速・加速、また衛星の運用終了後に大気突入によって焼失させることで、深刻な宇宙ゴミ(デブリ)の問題解決にも繋がる。外注も利用しながらマイクロニードルアレイ構造の作製を進めていく。ガラスは電子と Ag^+ イオンを分離する分離膜のように働き、厚みは薄い方が放出されるイオン電流値も向上する。これまでは熔融したガラスに銀棒を浸漬してガラスエミッタを作製してきたが、今後はスパッタ法なども積極的に採用してガラス電解質を製膜することも検討し、チーム一丸となって目標値(1 mN , 数 100 時間運転)を達成して衛星を打ち上げる。本文を読んでもしも「一緒にやってみたい」とか「こんな実験をやってみたら」といったご提案があれば是非とも声をかけて頂きたい。

REFERENCES

- 1) H. Koizumi, K. Komurasaki, J. Aoyama and K. Yamaguchi, *J. Propuls. Power*, **34** (2018) 960.
- 2) M. Sakai and S. Shimizu, *J. Am. Ceram. Soc.*, **85** (2002) 1210.
- 3) G. A. Bird, Clarendon Press, Oxford, 1994.