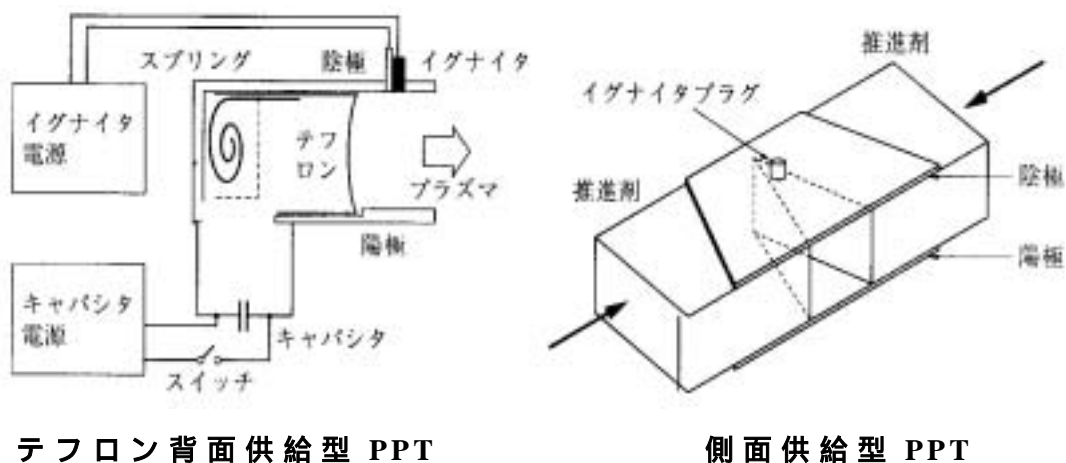


パルスプラズマスラスタ

パルスプラズマ推進機 (Pulsed Plasma Thruster: PPT) は、一般には固体 / 昇華性のポリテトラフルオロエチレン PTFE(通称テフロン[®]) を推進剤としたパルス電磁加速型電気推進機である。その研究開発は 1960 年代から始められ、宇宙機に搭載された最初の電気推進機となった火星探査機 Zond-2 (1964 年) の太陽指向調整用、10 年間 8900 時間作動した通信衛星 LES-6(1968 年) の東西位置制御用、また静止気象衛星 SMS (1974 年) や TIP/NOVA シリーズ(1976-1984 年) の大気抵抗補償用等に利用されてきた。日本でも 1974 年 L-4SC-3 号機や、1981 年 ETS-IV (70 時間、30 万回作動) に搭載され、軌道試験が行われた。

図 1 に示すように平行平板電極型 PPT では、主パルス放電のエネルギー源となるキャパシタは低インダクタンス回路により電極に直接接続されており、トリガ放電 (約 0.1W 程度) によって、固体推進剤の表面に沿って大電流のパルス放電が開始される (主放電回路は LCR 回路で近似され、その放電は通常 10μ 秒程度の減衰振動波形となる) 。主放電により推進剤が昇華・解離、電離されてプラズマが形成され、このプラズマが放電電流と自己誘起磁場により発生する電磁力および高圧プラズマの気体力学的膨張によって加速される。



テフロン背面供給型 PPT

側面供給型 PPT

図 1 平行平板電極型パルスプラズマ推進機の構造と加速原理

こうして PPT はシンプルな機器であり、数 μ 秒間のメガワットクラスの大電流パルス放電により、パルス状のインパルスビットを発生させる。数分の 1Hz から数 Hz のこの繰り返しが平均推力となる。PPT の動作範囲は、イン

パルスビット $10\text{-}1000\ \mu\text{N}\cdot\text{s}$ 、比推力 $400\text{-}1000$ 秒、時間平均電力数 $W\text{-}200W$ 程度である。

近年、小型衛星の研究開発の活性化、需要の増大により、小型・軽量の衛星推進系の必要性から、PPT が再び注目されるようになった。その理由としては、

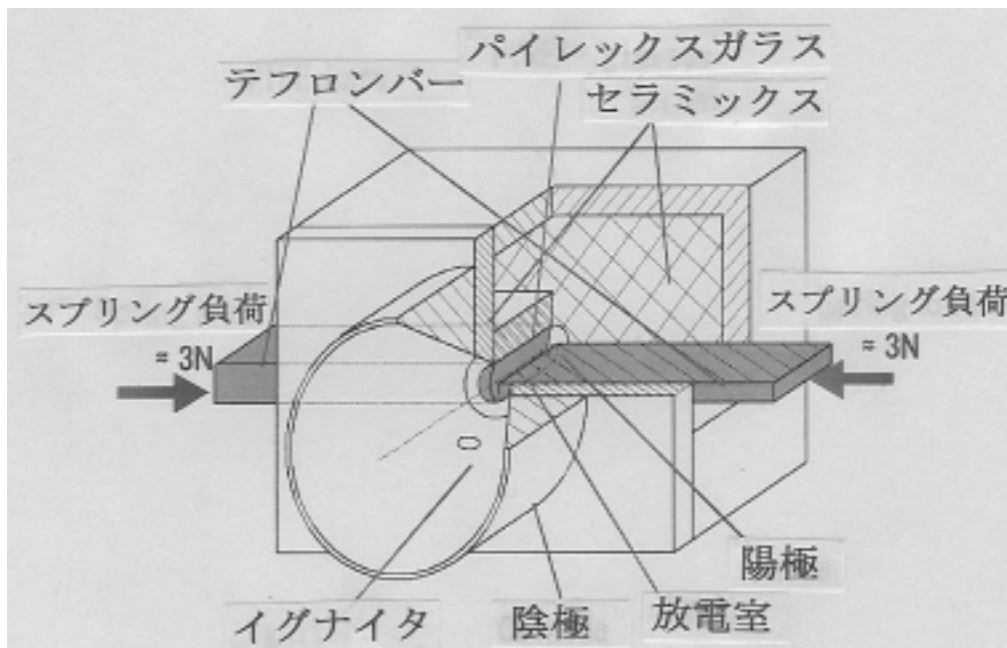
- (1) 構成が簡単で、小型・軽量・低電力で高信頼性の推進機を、低コスト、短期間で開発することが可能であること、
- (2) 固体推進剤の場合、タンク・バルブ等やウォームアップ・待機電力が不要、かつ μG 、極低温、真空環境で変質せず、非腐食性、無毒で、長期保管が可能であること、
- (3) 任意時間間隔で、微小パルス推力を発生できるので、衛星のフォーメーションフライト等に重要な姿勢・位置制御のための全力積を正確に発生でき、かつ任意の推力レベルに設定できること、
- (4) インターフェイスが簡素で、数 W 程度の電力供給を受けるだけで作動でき、搭載レイアウト上の制限がないこと、

などが挙げられる。小型衛星用推進機として、アメリカでは 2000 年に EO-1 (質量 529kg) のピッチ軸制御用に搭載され、フォーメーションフライトが計画されている Dawgstar Nano-Satellite (質量 15kg) にも搭載される予定である。日本でも質量 数 $10\ \text{kg}$ 程度の高機能小型衛星への搭載を目指した研究開発が行われている。

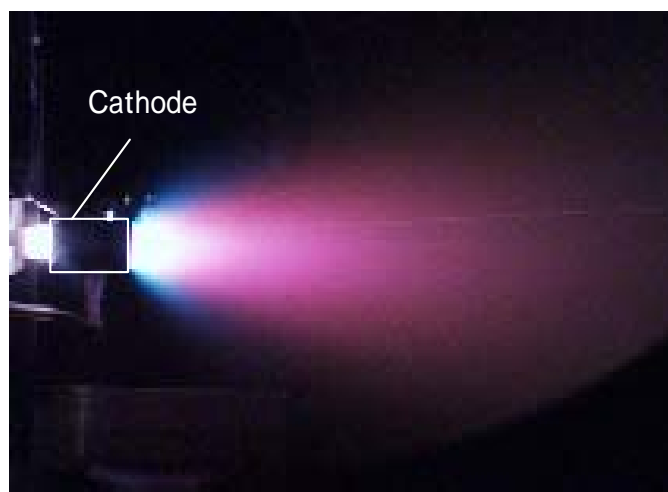
近年、コスト削減とリスク低減の観点から、ロケットの余剰ペイロードを活用して打ち上げられる小型衛星、軌道上におけるフォーメーションフライト等の計画が世界的に増加している。こうした小型衛星の研究開発の活性化、需要の増大により、小型・軽量・低電力の衛星推進系として PPT が再び注目されている。アメリカでは 2000 年に EO-1 (質量 529kg) のピッチ軸制御用に搭載され、フォーメーションフライトが計画されている Dawgstar Nano-Satellite (質量 15kg) にも搭載される予定である。日本でも数 10kg 程度の高機能小型衛星への搭載を目指した研究開発が行われている。

これまで研究開発されてきた小型衛星用 PPT の多くは電磁力を主推力とするものである。この電磁加速型 PPT は、数 μNs ~ 百 μNs 程度の微小インパルスビット (1 ショット当たりの発生力積) を発生するため微小な位置・姿勢制御には適しているが、南北位置制御やフォーメーションフライト等のためには発生インパルスビットの大幅な増大が必要である。ミシガン大学、

首都大学東京、大阪工業大学では電磁加速型 PPT よりも高いインパルスビットが期待できる、図 2 に示すような電熱加速型 PPT の開発を進めている。気体力学的加速により推力を得る電熱加速型 PPT は、比推力に関しては電磁加速型よりも劣るが、固体推進剤を用いる限り、推進剤タンク・バルブが不要であるため、多少の推進剤重量の増加は他の推進機と比べて不利な要因とはならない。



(a) 固体推進剤供給機構をもつ電熱加速型 PPT の概略図



(b) 噴出プラズマ流の写真

図 2 電熱加速型パルスプラズマ推進機の概略図

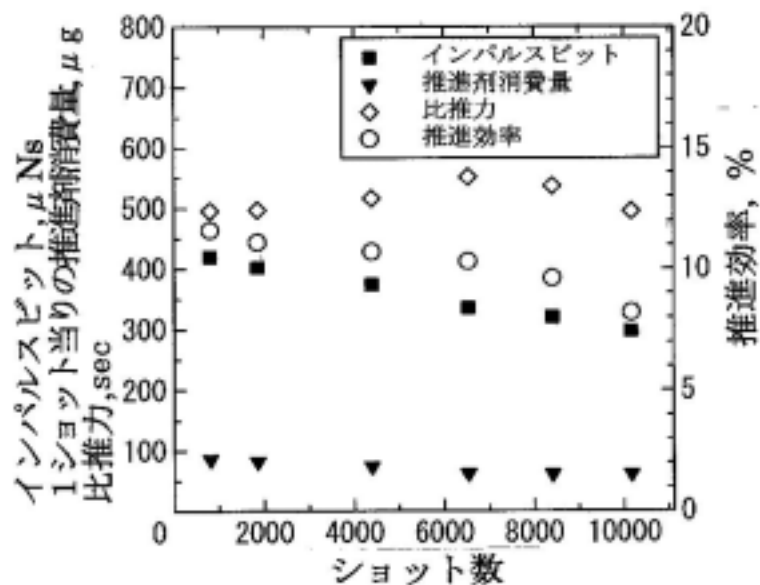


図3 電熱加速型 PPT の 1 万ショット連続作動特性

図3に示す電熱加速型 PPT の 1 万ショット連続作動試験より、電磁加速型に比べるとインパルスビットの大幅な増加を達成した ($150 \mu\text{Ns} \sim 1\text{mNs}$ 、比推力 500 秒) もの、十分とは言えず、ミッションによっては数十 mNs のインパルスビットが切望されている。さらに、連続作動ではショット数の増加とともに性能の低下が観察される。これは、テフロン放電室壁の空間的に不均一な溶融・昇華が起こり、放電室体積が増えたためであり、推進剤テフロンの供給方法や放電室形状の改良が今後必要である。また一般的に PPT の推進効率は低く (数% から十数%)、この原因として電源回路と推進機本体とのインピーダンス不整合、固体推進剤の昇華、プラズマ生成・加速過程の効率の悪さなどが考えられる。これらの改善が今後の大きな研究課題である。