

電気浸透流ポンプの圧力-流量特性評価及び スラスタへの応用検討

Evaluation of Pressure-Flow Characteristics of Electro-osmotic pumps and its application to thrusters

○長谷川凌大, 鈴木大登, 伊東山登, 松岡健, 笠原次郎 (名古屋大学)
川崎央 (静岡大学), 内田圭亮 (高砂電気工業)

○Ryota Hasegawa, Yamato Suzuki, Noboru Itouyama, Ken Matsuoka and Jiro
Kasahara(Nagoya University), Akira Kawasaki(Shizuoka University)
Keisuke Uchida(Takasago fluidic system)

Abstract

The electro-osmotic pump (EOP) has no mechanical moving parts, and the flow rate can be regulated by controlling the applied voltage. Since there are no severe space constraints, EOPs can be applied to various missions of small satellites and are expected to be adapted to in-orbit refueling and attitude control thrusters with variable thrust. In this study, an EOP using silica was developed and pressure-flow characteristic evaluation tests were conducted using purified water and hydrogen peroxide. The performance as a single-component thruster using hydrogen peroxide and platinum was also evaluated.

1. 背景および目的

近年, IT 技術の進歩により, 人工衛星の小型化が進み, 小型化に伴い人工衛星の製造期間の短縮及び, 製造費用の削減を実現し, 2021 年の人工衛星の打ち上げ数は 2011 年の打上数に対して約 14 倍にまで増加した[1]. 小型衛星には, 数百~数千基の小型衛星によるコンステレーションで通信網を構築する計画[2]や, 大気抵抗補償や, デブリ化防止, 軌道上の衛星に対する燃料補給

など[3], 多様なミッションが要求される. これに対して, 大半の小型衛星は大きさが故に, スラスタを搭載しておらず, 上記のミッションに対応することが困難である. 従来のスラスタシステムは加圧系の燃料供給システムが大半を占めており, 小型化には限界がある. したがって小型衛星に搭載できるようなスラスタシステムや小型衛星への燃料補給が可能になるような超小型燃料供給ポンプの研究開発が求められる. その

で本給では燃料供給機構に電気浸透流ポンプを応用することを提案する。

電気浸透流ポンプ (Electro-Osmotic Pump, 以下 EOP) とは, ポンプ内部の多孔質セラミックス体における電気浸透流現象を利用し, 電圧印加により電場方向に内部の流体を駆動できるポンプである. 二酸化ケイ素の多孔質セラミックス体を用いた電気浸透流ポンプを想定し, 多孔質体の1本のキャピラリにおける電気浸透流の原理を説明する. マイクロ流路に石英ガラスやホウケイ酸ガラスといったポリマー材質を用いた場合, これらの材質は表面極性基にシラノール基 (SiOH) を持ち, シラノール基の脱プロトン反応によって表面電荷が負に帯電する [6]. すなわち, 多孔質体表面と水溶液が接すると多孔質体表面が負に帯電する. これによって界面に生じた電荷の偏りを中和するために溶液内の対イオンが壁面近傍に引き寄せられ, 固定層 (stem layer) と拡散層 (diffuse layer) の2つの層からなる電気二重層 (electric double layer) を形成する. 形成された電気二重層に電場を印加すると, 外部印加電場が電気二重層内の電荷担体に力を加えることで電気二重層部分が動き出し, その動きに引きずられるようにして周囲の流体も移動する. これが電気浸透流の原理である.

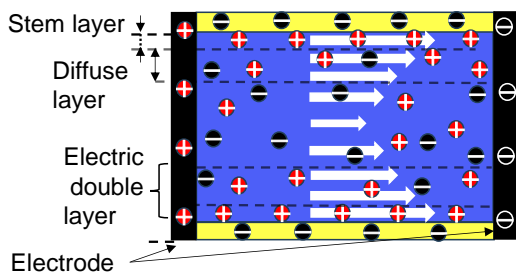


Fig1 Schematic diagram of Electro Osmotic Flow

EOP 内部を流れる質量流量は, キャピラリ内部の流れを定常非圧縮で, 流路方向のみに流速成分 u_z があると仮定すれば, Navier-Stokes 方程式, 連続の式, Poisson 方程式を用いて, 以下のように書くことができる [4][5].

$$\dot{m} = \rho N \left(-\frac{\pi a^4}{8\mu} \frac{dp}{dz} - \frac{E_e \varepsilon \zeta_w \pi a^2}{\mu} \right) \quad (1)$$

ここで, a をキャピラリ半径, ζ_w をゼータ電位, EOP 内のキャピラリの総数を N , 誘電率を ε , キャピラリに作る電場を E_e とする. 次に, 多孔質体の特性値として, ねじれ率 τ , 空隙率 ϕ を以下のように定義する.

$$\tau = \left(\frac{L_e}{L} \right)^2 \quad (2)$$

$$\phi = \frac{U_e}{U} \quad (3)$$

ただし添え字 e は各キャピラリの平均を意味し, キャピラリの平均流路長さ L_e , 多孔質体長さ L , キャピラリの平均体積 U_e , 多孔質体体積 U である. これらを (1) 式に導入し, $dp/dz = \Delta p/L_e$ と多孔質体断面積 $A = U/L$, 多孔質体にかかる電位差 $V = L_e E_e$ を用いれば, 質量流量は以下のように表せる.

$$\dot{m} = \left(-\varepsilon \zeta_w V - \frac{\Delta p a^2}{8} \right) \frac{\phi A \rho}{\mu L \tau} \quad (4)$$

多孔質体の特性値は先行研究より明らかになっている [6]. また, 先行研究において, EOP を推進剤供給機構に用いた, 燃料過酸化水素の一液式スラスタの燃焼試験が行われ, 流量 $66 \mu\text{l}/\text{min}$, 推力 0.39 mN を獲得した. この時使用された EOP は直径 3 mm , 長さ 4 mm の多孔質体で作られている. ここで EOP の多孔質材の直径と長さを変えることで, (4) 式より多孔質体断面積 A と多孔質体長さ L が変化して, EOP の流量が変

化することは明らかである。EOP に断面直径 15mm, 長さ 2mm の多孔質体を使用した場合, 先行研究の 50 倍の流量が見込まれる。本研究ではより広い流量帯を出せる EOP を開発すべく, 上記の多孔質材を用いた EOP に精製水を送液したときの圧力流量特性を評価する。

2. 実験結果および考察

試験に使用した EOP の装置図を Fig2 に示す。電極には炭素製ウールと炭素棒を使用し, 多孔質体の両側から挟み込む形で配置, 外殻は樹脂製のハウジングを使用した。EOP 下流部に設けたボールバルブをわずかに締めた状態で, 炭素電極棒に繋いだ直流安定化電源から電圧を印加し, EOP 上流から精製水を送液する。EOP とボールバルブの間の流路に流量計と圧力計を配置して, 送液された精製水の流量 \dot{m} と, 電圧印加前から圧力を計測する。今回は電圧 5V を 30 分間印加した。

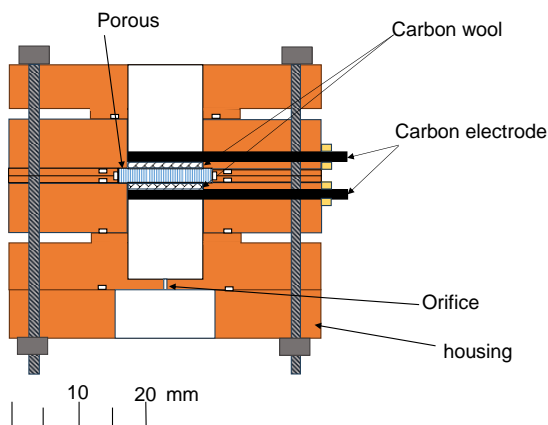


Fig2 Schematic drawing of EOP

Fig3 に試験で得られた印加電圧 V , 印加電流 I , 流量 \dot{m} , 電圧を印加する前の圧力との差圧 Δp の時間履歴を示す。電圧を印加した時間を $t=0$ と定義した。圧力は上昇し続

けたのに対して流量は電圧印加後約 15 分で流量が約 24 $\mu\text{l}/\text{min}$ で一定になったので, このとき流れはチョークしたとみられる。

EOP に断面直径 15mm, 長さ 2mm の多孔質体を使用した EOP に 5V の電圧をかけたときの, (4)式から予測される, 圧力と流量

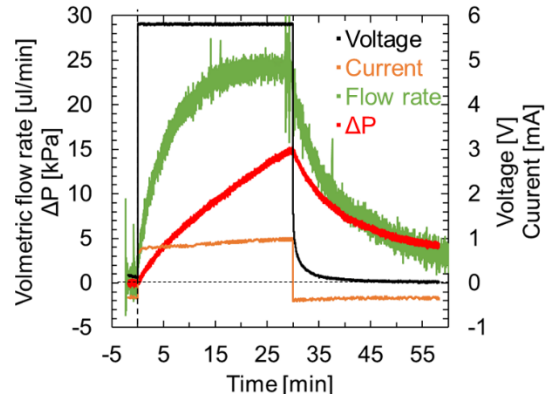


Fig3 Results of the experiments (porous length 2mm, diameter15mm)

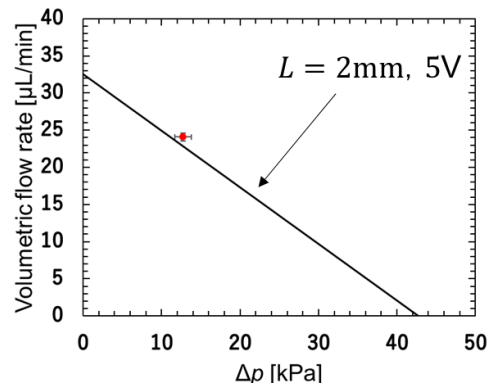
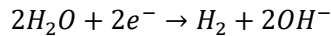


Fig4 P-Q diagram of H₂O (porous length 2mm, diameter15mm Voltage 5V)

量の関係と, 電圧印加中で, チョークしている時間の間に計測された流量と差圧それぞれの平均値を Fig4 に示す。(4)式から得られた予測値よりも実験値は右にずれた, 子の要因として考えられるのが電極における精製水の電気分解である。EOP 下流側の陰極において以下のような反応が起こり, 水

素が発生する。



発生した水素の気体膨張により圧力が上昇する。発生した水素の体積は Faraday's law より求める。

$$\frac{I \cdot t}{F} \times \frac{22.4}{z}$$

ここで、 I は電流、 t は時間、 F はファラデー一定数 (96500C/mol)、 z はイオン価数である。求めた体積から、標準状態の水素の状態方程式を用いると、気体膨張によって上昇した圧力は 0.85kPa と分かった。これは予測値と実験値とのずれとおおよそ一致する。これより EOP の圧力-流量特性を評価する上で、電気分解により発生した気体について考慮する必要があると考察される。

3. まとめ

新たな推進剤供給機構として提案する、電気浸透流ポンプの原理について整理した。また、断面直径 15mm、長さ 2mm の多孔質体を使用した EOP で精製水の送液試験を行い、得られた実験値から EOP の圧力-流量特性について評価した。

参考文献

- [1] 経済産業省, “宇宙開発を巡る産業の動向について”, 経済産業省, 経済解析室, https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20220722hitokoto.html
- [2] Foreman, V. L., Siddiqi, A., De Weck, O. L., “Large Satellite Constellation Orbital Debris Impacts: Acse Studies of OneWeb and SpaceX Proposals” AIAA SPACE and

Astronautics Forum and Exposition, pp.1-15, 2017.

[3] 内閣府, “新たな宇宙利用の姿”, <https://www8.cao.go.jp/space/committee/keitei/vision-sankou3.pdf>

[4] C. L. Rice, R. Whitehead, “Electrokinetic Flow in a Narrow Cylindrical Capillary,” Journal of Chromatography, Vol.69, No.11, pp.4017-4023, 1965.

[5] Shulin Zeng, Chuan-Hua Chen, James C. Mikkelsen Jr. Juan G. Santiago, “Fabrication and characterization of electroosmotic micropumps,” Sensors and Actuators B, Vol. 79, pp.107-114, 2001.

[6] 堀田樹, “電気浸透流ポンプを用いた超小型推力可変スラストの研究開発”, 修士学位論文, 名古屋大学, 2021 年度