

# 力とエネルギー効率：なぜ High Power Mission に電磁推力が期待されるか？

佐宗章弘

Why Electromagnetic Thrust is Suitable for High-Power Mission

By

Akihiro Sasoh\*

**Abstract** : Electromagnetic acceleration is suitable for high-power, large-thrust operation when electrothermal-electrostatic energy conversion is effectively done through thermoelectric effect.

**Key words** : Electromagnetic thrust, Hall effect, Magnetoplasmadynamics thruster, Thermoelectric thrust, Applied-field

## 1. はじめに

近い将来必要となる、大電力電気推進装置として、電磁加速方式が有用であることを説明したい。そのために、電気推進におけるエネルギーの流れと推力発生機構の整理をし、著者が過去に行った研究結果に言及する。

電気推進機の性能を評価する基本的な変数は、推力  $F$ 、推力/電力比（あるいは、運動量結合係数）  $C_m$ 、推力効率  $\eta$  と排気速度  $u_{ex}$ （あるいは比推力）である。これらの間には、以下の関係が成り立つ。

$$F = \dot{m}u_{ex} = \frac{2\eta J_d V_d}{u_{ex}} = \sqrt{2\eta \dot{m} J_d V_d} \quad (1)$$

$$C_m = \frac{F}{J_d V_d} = \frac{2\eta}{u_{ex}} = \sqrt{\frac{2\eta \dot{m}}{J_d V_d}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} u_{ex}^2}{J_d V_d} \quad (3)$$

( $J_d$  ; 放電電流,  $V_d$  ; 放電電圧,  $\dot{m}$  ; 推進剤質量流量)

これから、 $C_m$  と  $u_{ex}$  は反比例し、その係数は  $\eta$  に比例することなどがわかる。すなわち、大電力電気推進では、この両者のトレードオフに幅広い範囲で対応する必要がある。イオンスラスタは空間電荷制限のために推力密度に上限がある。これに対して、電磁力が小さいアークジェットでは、排気速度を高めることが難しい。電磁力を用いれば、これらの複合的な推力が可能である。

## 2. 推力発生機構の整理

Jahn[1]は、電気推進の加速機構を電熱加速 (electrothermal acceleration)、静電加速 (electrostatic

acceleration), 電磁加速 (electromagnetic acceleration) の三つに大別した. これは, 直観的にわかりやすい分類であるが, 実は電熱加速はエネルギーベースに, 電磁加速は推力ベース, 静電加速はその両面を併せ持つ考え方であり, あいまいなところがある. 例えば推進機が発生する推力は, これらの成分の単純な和にはならない. Sasoh & Arakawa はこれをエネルギー保存関係の中で定義し, 電磁加速について電磁力をもたらす電流, 磁場の成分とそれが推進剤になす仕事によって, ホール加速, スワール加速, 自己誘起磁場加速に分類した. 一般化されたオームの式と電界の内積をとることによって, 推進剤に投入される電力は以下のように書き表すことができる. [2]

$$\int \{\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}\} dV = \int \left\{ \frac{j^2}{\sigma} + (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{u} \right\} dV = \frac{1}{2\eta} \dot{m} u_{ex}^2 \quad (4)$$

( $\mathbf{j}$  ; 電流密度,  $\mathbf{E}$  ; 電界,  $\sigma$  ; 電気伝導度,  $\mathbf{B}$  ; 磁場の強さ,  $\mathbf{u}$  ; 流速ベクトル,  $V$  ; 体積)

最初の等式右辺第1項, 第2項はそれぞれジュール加熱によるパワー入力, 電磁力によるパワー入力を表す.

さらに, 一般化されたオームの式において, 熱電子効果 (電子の圧力勾配に起因する項) によって推進剤が持つ熱エネルギーを投下的な電気エネルギーに変換できることを示し, 既存の推進機 (アークジェット, MPDスラスタ, イオンスラスタ) の作動条件の位置付けをした. [3]

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{\nabla p_e}{ne} \quad (5)$$

( $\mathbf{E}'$  ; 実効電界,  $p_e$  ; 電子の圧力,  $n$  ; 電子数密度,  $e$  ; 電荷素量)

式(5)は, 右辺第2項の熱電気効果によって実効的な電界が強まることを意味している. そのエネルギー源は電子の熱エネルギーである. 軸対称のMPDスラスタでは, 中心軸に陰極がありその付近で電子密度が高く, 実効電界は熱電気効果によって高められる. 中心軸付近では, サーマルピンチによって高温領域が保持されるので, このような複合推進に適した推進機形状であるといえる.

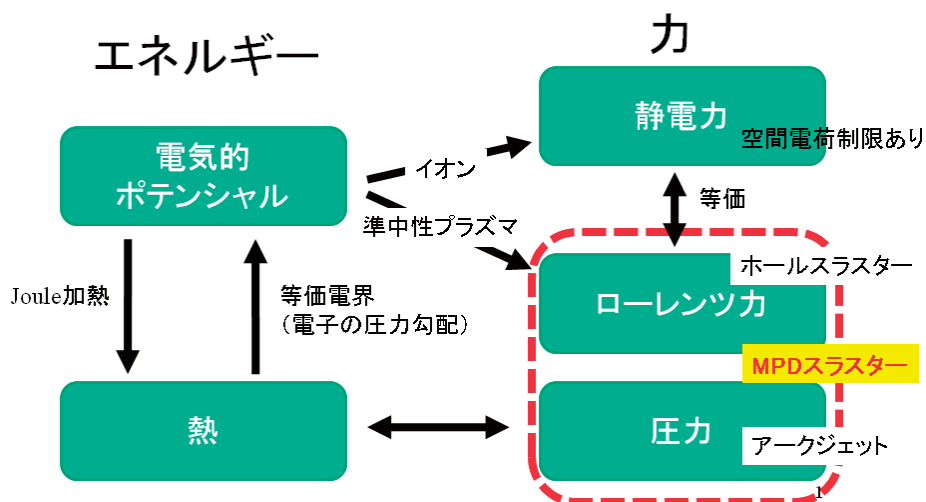


図1 電熱-静電エネルギー変換と推力発生の関係

図1に示すように、電熱エネルギーと静電エネルギーは、熱電気効果を通じて変換可能であり、それらの推力発生への寄与の割合で、既存の電気推進を位置付けることができる。

### 3. MPDスラスタにおけるホール加速

Sasoh & Arakawa は、外部磁場を持つ定常作動MPDの作動において、Hall 電流を測定し、推力への寄与を評価した。特に、推進剤流量を低くし、水素、ヘリウムなどの軽ガスを用いると、ホール加速が支配的になっていると考えられる作動を得た。[4-6]

### 4. 名古屋大学の取り組み

以上のことがらを背景に、名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻電離気体力学研究グループでは、外部磁場のある定常作動MPDスラスタの実験研究を開始した(図2)。



図2 実験装置. 左;真空チャンバーと操作パネル, 右;排気プルーム(推進剤;アルゴン)

### 5. まとめ

電気推進の推力発生を、放電パワーの流れから考えると、静電パワーと電磁力がなすパワーの二つに分けることができ、両者は熱電気効果によって変換可能である。いわゆる電磁推力は、これらの複合的な作動を実現するものであり、両者の寄与のトレードオフによって、広範な作動条件への適用が可能である。軸対称のMPDスラスタは、これを引き出すことに適した形状をしており、この利点を大いに生かすことがブレークスルーの鍵となると考えている。また、いずれにしても推力効率を高めることが重要であり、技術革新が必要である。名古屋大学では、ホール効果、熱電気効果を大いに生かした電磁加速推進機の開発を目指している。

### 参考文献

- [1] R. G. Jahn, "Physics of Electric Propulsion," 著者, "表題", 雑誌名, 巻数, ページ, 発行年
- [2] A. Sasoh & Y. Arakawa, "Thrust Formula for Applied-Field Magnetoplasmdynamic Thrusters Derived from Energy Conservation Equation," JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 11, No. 2, March-April 1995
- [3] A. Sasoh, "Generalized Hall Acceleration," JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 10, No. 2, March-April 1994
- [4] Y. Arakawa & Akihiro Sasoh, "Steady-State MPD Arc Thruster with a Permanent Magnet," Journal of Propulsion and Power, Vol. 4, No. 3, p.287-, 1988.
- [5] Y. Arakawa & A. Sasoh, "Steady-State Permanent Magnet Magnetoplasmdynamic Thruster," J. PROPULSION & POWER, VOL. 5, NO. 3, p. 301-, MAY-JUNE 1989.
- [6] A. Sasoh & Y. Arakawa, "Electromagnetic Effects in an Applied-Field Magnetoplasmdynamic Thruster," J. PROPULSION VOL. 8, NO. 1, p.98-, 1991.
- [7] G. Kruelle, M. Auweter-Kurtz & A. Sasoh, "Technology and Application Aspects of Applied Field Magnetoplasmdynamic Propulsion," JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 14, No. 5, 1998