

数値シミュレーションを用いたホールスラスタの背圧効果に関する予備検討

張 科寅 (JAXA) ・ Burak Karadag (総研大) ・ 渡邊 裕樹 (首都大) ・ 窪田 健一 (JAXA)
・ 船木 一幸 (JAXA)

Key Words: Hall thruster, facility pressure effect, numerical simulation, Particle-In-Cell

Abstract: Facility pressure effects of Hall thruster vacuum chamber test was investigated via Particle-In-Cell plasma simulation. Facility pressure effects were modeled by injecting neutral background gas, and parametric study was conducted for different pressure conditions. Unlike previous studies, not only the effect of static pressure but also that of dynamic one was investigated. The result shows that the experimentally observed unexpectedly high specific impulse increment due to facility pressure effects, which was known to be unaccountable by static pressure, can be reasonably explained with the existence of estimated dynamic pressure. Quantitatively, it was shown that the specific impulse increment due to facility pressure effects can exceed 5 % even the testing standard ($<3.0 \times 10^{-5}$ torr) is fulfilled if the backflow speed is higher than 300 m/s.

1. はじめに

ホールスラスタは宇宙機用非化学推進の一つであり、その高い比推力や推力電力比から地球近傍ミッションや探査ミッションで用いられ、今後ますますの利用拡大が期待される電気推進機である。ホールスラスタの開発において最も大きな障害の一つとなるのが、真空チャンバで地上試験を行う際のチャンバ背圧の影響であり、有限の真空度が試験結果に与える影響の定量的な評価や、試験基準の作成は現在電気推進コミュニティで最も盛んに議論されている話題の一つである^{1,2)}。

チャンバ背圧がホールスラスタの試験に与える主な影響は、放電チャンネルへ逆流したチャンバの残留ガスが電離し、加速されることで、実際以上の放電電流や推力が計測される現象として理解されている。そのため、チャンバの壁温などから逆流する背景ガスの流量を見積もり、それが投入推進剤流量に対し一定の割合以下 ($<1\%$ など) になるように試験基準が定められてきた。近年では大型の真空設備で真空ポンプの作動台数を変更することで、真空度を能動的に変化させ、背圧の影響を定量的に見積もる試みが増えている。ところがこれら感度解析の結果から、観測された異なる真空度における推進性能の差分 (背圧効果) が単純な逆流ガス流量の見積もりでは説明できないことがわかってきている。つまり、背景ガスを流れがなく、室温にあるチャンバと熱平衡にあるものと仮定し、 $nv/4$ から算出されたランダムフラックスとチャンネル断面積を掛けた逆流ガス流量は、実際に観測された背圧効果の 10% 程度しか説明できなかったことが報告されている³⁾。これらは、これまでの背圧効果の原因に対する理解と、用いられてきた試験基準に疑問を投げかける結果であるといえる。

ところで、2012 年に発表された Aerospace 社の試験報告では、真空チャンバの側壁ではなく、チャンバ内のスラスタ付近に電離真空計を置いた Internal IG によって計測された真空度が報告されている⁴⁾。これによると、電離真空計の捕集

面をスラスタと同じビームターゲットを直視する向きに設置した場合と、そこから 90 度回転させて横を向かせた場合とでは、後者の方が測定される背圧が実に 70% も低かった、とのことである。これは、ビームターゲットからスラスタに向かって逆流する背景ガスの流れがあり、これまで考えられていたようなランダムフラックスではないことを示唆している。このような動圧の存在は逆流する背景ガスの流量に大きく影響するため、この効果によって実験でみられるような予測を大きく上回る背圧効果を説明できるのではないかと推測される。本研究ではこの仮説の検証を目的とし、数値シミュレーションを用いて感度解析を行った。

2. 解析手法

背景ガスがスラスタの放電や推進性能に与える影響を調査するため、スラスタの放電チャンネルと近傍場を対象とし、スラスタの作動条件を固定したまま背景ガスの特性を変化させてプラズマ放電シミュレーションを行った。

解析手法としては、プラズマをシミュレーション粒子に代表させてラグランジュ的に捉え、静電場を格子上で計算する Particle-In-Cell (PIC) を用いた。解析手法の特徴としては、計算の加速のため電子と重粒子の質量比をスケールダウンしており、さらに数値的な加熱を抑えるために静電場をセミインプリシットに解いている。手法の詳細や妥当性検証については参考文献 5) を参照されたい。本研究で用いた解析条件を表 1 に示す。スラスタの作動条件は加速電圧 300 V で推進剤のキセノン流量は 1.36 mg/s とした。

推進機は東京大学小紫研の 500W 級 SPT 型ホールスラスタ UT-SPT-62 を計算対象とした。図 1 に計算領域と境界条件を示す。本スラスタは通常のホールスラスタと同じく 2 つのリング状の Boron Nitride (BN) のチャンネル壁に挟まれた円環状の放電室を持つが、これを周方向には均一であると仮定し、円筒座標で半径方向と軸方向の r - z 面における 2 次元 (ただし粒子の速度は 3 次元) 解析を行った。

背景ガスについては、計算領域端 (ブルーム境界) におけ

る静圧を仮定することにより模擬した。つまり、ブルーム境界上の各セルの圧力が仮定した静圧より低くなった際に、仮定した静圧になるように背景ガスを流入させた。流入させる背景ガスはすべて推進剤のキセノンであるとし、また背景ガスはチャンバと熱平衡にあり温度は 300 K であると仮定した。

背景ガスの流速は、0 m/s (動圧なし)、300 m/s、700 m/s と変化させ感度解析を行った。これは、Aerospace 社の報告から、背景ガスの全圧のうちおよそ 70% が動圧であったと考えられることから⁴⁾、これは等エントロピー流れを仮定するとおよそマッハ 1.4 に相当し、温度が 300 K の仮定から背景ガスの流速は有効数字 1 桁でおよそ 300 m/s であるとの見積もりから決定した数値である。本スラスタで 300 V の加速電圧で排出されるイオンはおよそ 15,000 m/s の平均速度を持つため、その 2% 程度の流速を持ったビームターゲットからスラスタに向かうバックフローがある、という問題設定である。

表 1. 解析条件

Timestep	1.0×10^{-11}
Grid spacing	2.0×10^{-4} m
Artificial mass ratio	Electron mass multiplied by $f^2 = 2,500$ Magnetic field correction $f_B = f^{(2/3)} = 13.6$
Artificial permittivity	NOT used
Self-similarity scaling	NOT used
Macro particle	4.0×10^7 real particles/simulation particle
Bohm diffusion coefficient	1/16
Particle species	e, Xe, Xe ⁺ , Xe ⁺⁺
Collision	e - Xe elastic scattering e - Xe excitation e - Xe ionization e - Xe ⁺ ionization Coulomb collision
Magnetic field	No induced field
Potential, Electric field	Second-order central-difference
Particle mover	Runge-Kutta 4th order
Particle and field weighting	Linear weighting
Inter-particle collision	Monte Carlo Collision

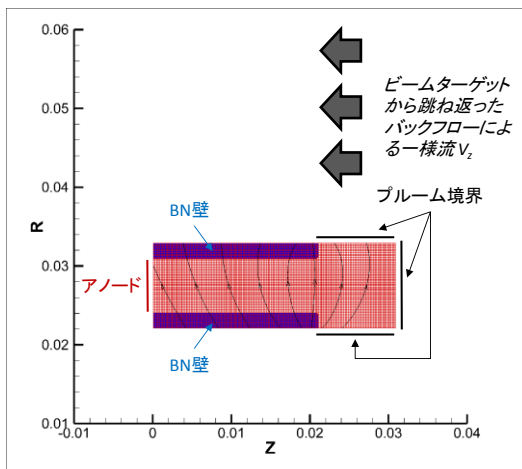


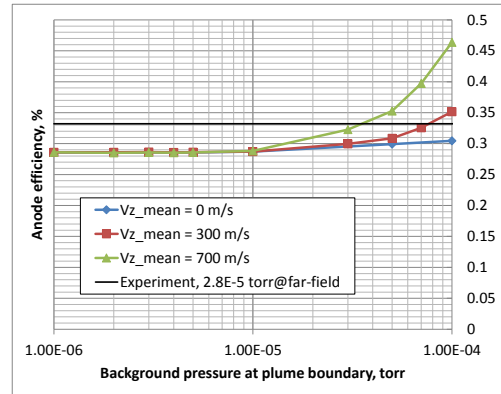
図 1. 計算領域と境界条件

3. 結果

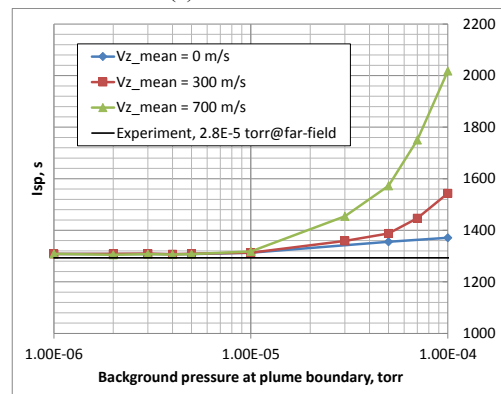
図 2 にアノード効率と比推力に対する背圧効果を示す。横軸は計算領域端 (ブルーム境界) に仮定した静圧であり、三本のマーカー付きの実線はそれぞれことなる一様流速を仮定した時の (a) アノード効率と (b) 比推力の変化を示している。また、参考のため背景圧力 2.8×10^{-5} torr にて計測された実験値を黒線で表している。この実験の際に測定された背圧は、チャンバ側面に備え付けられた電離真空計によるものであり、横軸にとっているブルーム境界の静圧には直接対応できないことに注意されたい。

グラフからはまず、ブルーム境界の圧力が 1.0×10^{-5} torr 以下の仮定では、背圧効果は存在しないことがわかる。これは、スラスタの推進剤利用効率が 100% でないことから、チャンバからイオン化されずに漏れ出る中性ガスによる圧力が、仮定した圧力より高かったため、背景ガスの流入が計算上行われなかったためである。

次に、実験で観測されているように仮定した背圧の上昇により、アノード効率も比推力も上昇していくが、その変化の大きさは動圧により大きく異なることがわかる。動圧がない流速 0 m/s の条件では、背圧が 1.0×10^{-5} torr から 1 桁上昇しても実験で見られるような 10% 以上の比推力の増加は生じない。一方動圧が存在する流速 300 m/s や 700 m/s の条件では、 3.0×10^{-5} torr の試験基準²⁾を満たす真空度でも 5% 以上の大きな増分がみられる。これにより、背圧効果は動圧に大きく影響されており、その定量的な評価のためには動圧を考慮する必要がある、ということが示された。



(a) アノード効率



(b) 比推力

図 2. 背圧による推進性能の変化

シミュレーションによって模擬された背圧効果の根本的な原因を調査するため、図2を横軸に背景ガスの逆流流量にとり、プロットしなおしたグラフを図3に示す。動圧の存在による直接的变化は背景ガスの逆流流量の増加であり、もし背圧効果が逆流流量の変化のみによって記述できる現象であれば、図3のグラフは動圧によらずすべて同じ曲線になるはずである。しかしながら実際には図3が示す通り、逆流流量が同じでも流速（動圧）が高ければ高いほど背圧効果が大きい、という結果が得られた。これは、動圧の違いにより放電の状態が変化しており、逆流した背景ガスがどのように再利用されて推進性能に寄与しているかに相違があることを示している。

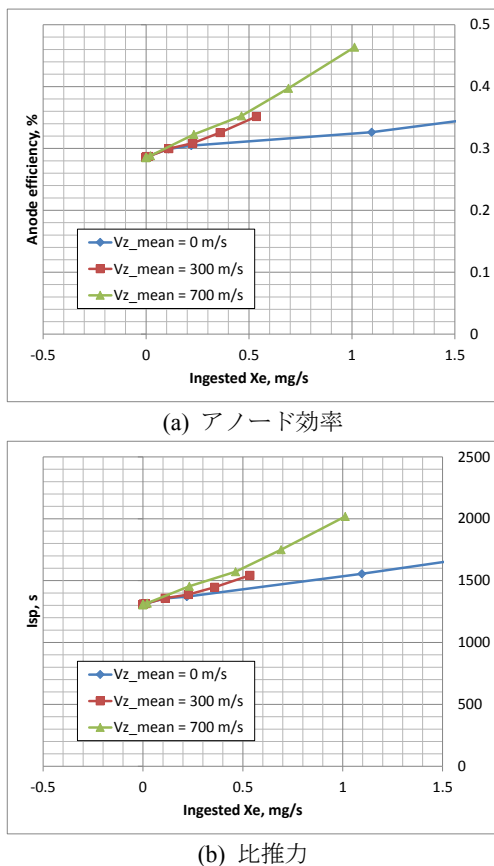


図3. 背景ガスの逆流流量に対する推進性能の変化

図4に静圧固定時の動圧によるプラズマ諸量の変化を示す。コンターはそれぞれプラズマ電位と電子温度を示しており、矢印付きの黒の流線は印加磁場の磁力線を表している。先の議論の通り、動圧の違いにより放電の状態が変化しており、動圧が高ければ高いほど電位勾配（電場）の強い領域や電子温度のピークがチャンネル上流に向かって移動している様子が見て取れる。これは、動圧が高いほど逆流背景ガスの電離長が長くなり、対応して電離波面が上流に移動したためと考えられる。結果として逆流背景ガスから生じたイオンが電場から得るエネルギーが増加するため、図3で見られた傾向を定性的に説明できるといえる。

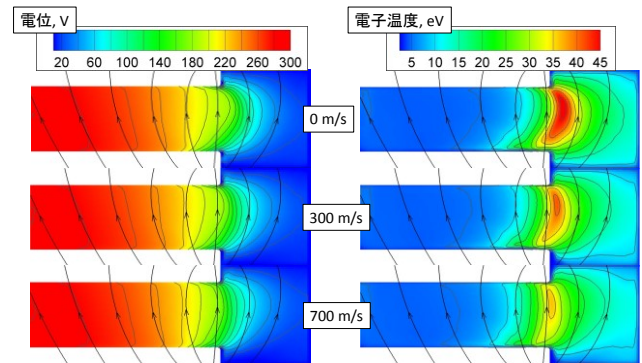


図4. 静圧一定 (1.0×10^{-4} torr) 時の動圧によるプラズマ電位

4. 結論

ホールスラスタの地上試験における真空チャンバの背圧効果の定性的な理解のため、背景ガスを導入したプラズマシミュレーションによる感度解析を行った。これまでの背圧効果の見積もりで見落とされていた、背景ガスの動圧を考慮することにより、実験で観測される予測を大きく上回る背圧効果を無理なく説明できることが示された。これまで 3.0×10^{-5} torr 以下などと定められてきた試験基準を満たしていても、チャンバ内の流れによっては5-10%以上の推力などの過大評価が生じる可能性があるため、試験精度向上のためには動圧の低減や、その定量的な測定が重要であることが示唆された。また、動圧による直接的な影響は逆流背景ガスの流量の増加であるが、単純な逆流流量のみならず放電状態も変化していることが背圧効果に寄与していることが予測された。

さらなる発展としては、背圧効果の実験結果との比較や、今回は考慮しなかった背景ガスの温度やガス種の影響などについても調査し、背圧効果をより定量的に評価・補正することで試験とシミュレーションの連携を強化し、ホールスラスタの開発に資することが期待される。

謝辞

UT-SPT-62 スラスタの形状・磁場・試験データを提供して下さった東京大学小紫小泉研究室に感謝します。

参考文献

- 1) Dankanich, J. W., et. al.: A Step Towards Electric Propulsion Testing Standards: Pressure Measurements and Effective Pumping Speeds, *48th Joint Propulsion Conference*, July 2012, Atlanta. AIAA 2012-3737.
- 2) Dankanich, J. W. and Walker, M.: Recommended Practice for Pressure Measurements and Calculation of Effective Pumping Speeds during Electric Propulsion Testing, *33rd International Electric Propulsion Conference*, October 2013, Washington, D.C.. IEPC-2013-358.
- 3) Walker, M. L. R. and Gallimore, A. D.: Performance Characteristics of a Cluster of 5-kW Laboratory Hall Thrusters, *Journal of Propulsion and Power*, vol. 23, No. 1, pp. 35-43, 2007. DOI:10.2514/1.19752.
- 4) Diamant, K. D., et. al.: The Effect of Background Pressure on SPT-100 Hall Thruster Performance, *50th Joint Propulsion Conference*, July 2014, Cleveland. AIAA 2014-3710.
- 5) Cho, S., Komurasaki, K., and Arakawa, Y.: Kinetic Particle Simulation of Discharge and Wall Erosion of a Hall Thruster, *Physics of Plasmas*, 20, 063501 (2013). DOI:10.1063/1.4810798