

粒子法を用いたプラズマ推進機の運動論的シミュレーション

Particle simulation for plasma thruster

研究代表者：西山和孝（宇宙航空研究開発機構）
nishiyama.kazutaka@jaxa.jp

研究分担者：月崎竜童（宇宙航空研究開発機構）
tsukizaki.ryudo@jaxa.jp
担当：解析結果比較用のレーザ計測

：山下裕介（Stanford 大学）
yusukeya@stanford.edu
担当：コード開発・シミュレーション実施

：濃野歩（宇宙航空研究開発機構）
nono.ayumu@ac.jaxa.jp
担当：コード開発・シミュレーション実施

：張科寅（宇宙航空研究開発機構）
choh.shinatora@jaxa.jp
担当：コード開発・シミュレーション実施

研究目的 (Research Objective):

イオンエンジンをはじめとするプラズマ推進機では、推進剤を電離することでプラズマを発生させ、イオンを後方排気することで推進力を得る。化学推進と比べて燃費が良いことも相まって宇宙機用推進機として利用されることが増えている。宇宙機に搭載されたプラズマ推進機の寿命を律速する要因となるものの一つとして、電荷交換衝突イオン (Charge exchange ion, CEX ion、以下 CEX イオン) が挙げられる。CEX 衝突は、高速イオンが推進機から漏れ出た推進剤ガス (中性粒子) の間で起こる衝突であり、低速なイオンが発生する。この低速イオンは、宇宙機・排気プラズマ間の電位差によって宇宙機に向かって、逆流イオンとして輸送される。この逆流イオンは周辺の電子機器の故障などを引き起こすことが懸念されている。

本研究では、CEX イオンの物理過程を明らかにするべく、CEX イオンの生成を考慮したシミュレーションモデルを構築する。宇宙機・排気プラズマ間領域の電位構造を Hybrid particle in cell (Hybrid-PIC) 法によって解く。Hybrid-PIC では、イオンは粒子として扱われ、電子は流体として扱われる。本研究によって取得される計算結果を、本研究グループによって別途実施される実験的計測結果と比較し、計算結果の妥当性を検証する。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究の手法に関する特徴は以下である。

- 1) 計算領域は 2 次元直交座標で行われた (Fig. 1)。
- 2) イオンビームは、実験的な測定値¹⁾をもとにした解析的な近似モデルで代替した。下式は、今回新たに考案された混合ガウス分布によるビーム電流密度 j_{bi} の近似モデルである。

$$j_{bi} = \frac{I_b}{\pi r_b^2} \sum_{m=1}^M w_m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{\hat{r}_m^2}{2\sigma_m^2}\right)$$

I_b はビーム電流値、 $r_b = r_T + z \tan\alpha$ 、 r_T は推進機半径、 α はビーム発散角、 σ_m, \hat{r}_m, w_m はすべてフィッティングパラメータである。なおここでは $M=3$ とした。2 次元空間でも電流保存則が満たされるように設計した。

- 3) 中性粒子分布は、解析的な近似²⁾にて表現した。下式は、推進機下流静電グリッドの各孔から漏れ出す中性粒子の数密度分布を 3 次元空間でモデル化したものである。今回のシミュレーションでは 2 次元であるが、簡単のためにこのモデルを用いた。 N_{grid} は孔数、 θ はグリッド面法線と孔中心からの位置ベクトルがなす角、 n_{n0} はグリッド上流部での中性粒子密度、 r は孔中心からの距離、 A は孔の断面積である。式中の和記号は、各孔からの漏れ出し効果を足し合わせることを意味する。

$$n_n = \sum^{N_{grid}} \frac{n_{n0} \cos\theta}{4 \pi r^2} A$$

- 4) 準中性電子流体近似下で、CEX イオンを粒子として扱った。
- 5) 電子温度は、電子がポルトロップ流体であると仮定することでモデル化した。ポルトロピック index はシングルプローブで実験的に計測された電子温度分布に最も整合するように定められた。
- 6) 宇宙機表面は、シース効果を考慮した境界条件³⁾にてモデル化した。
- 7) 計算結果を別途実施された実験結果と比較検証した。

電子流体は、無磁場仮定下でドリフト拡散近似を用いて解かれ、CEX イオンを含めたプラズマ密度が定常状態に遷移し、十分に時間が経てば、計算を打ち切った。時間刻み幅は 1.0 ns で、全体の計算継続時間は、物理時間で 5.0 ms とした。定常状態に遷移するまでに、1) 電位計算のみを行う段階、2) 電位計算と粒子の運動の計算を行う段階、と 2 段階に計算することで計算の発散を抑えた。

格子による空間分割数は 101×61 であり、用いた超粒子は 60,000 個である。超粒子の挙動を解く際には OpenMP を用いて並列化した一方で、電位計算時における楕円型方程式を解く際には並列化はせず、プロセッサ間の通信量を抑えた。そのため、ほぼプロセッサ数に比例した計算速度の上昇が実現できている。シミュレーションコードは、当研究グループによって開発されたものである。

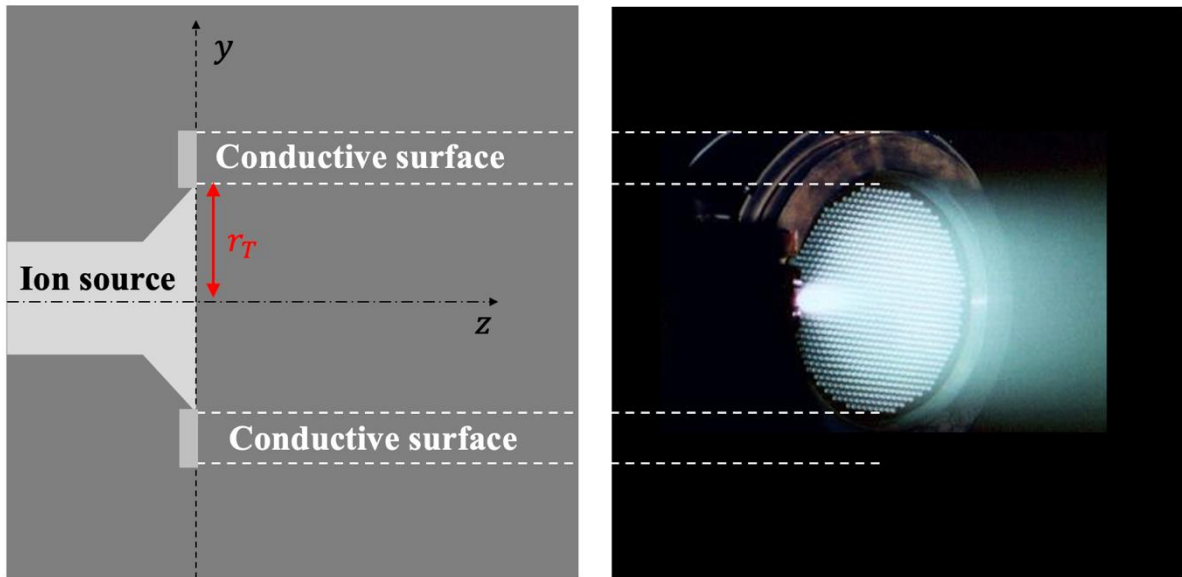


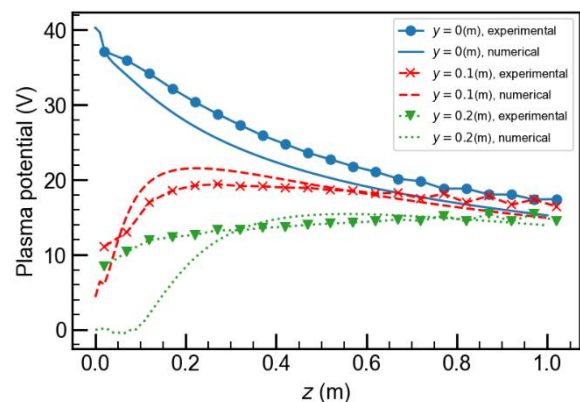
Fig.1 Left: 計算領域における座標の定義。Right: 解析対象であるマイクロ波放電式イオンエンジンの写真

研究成果 (Accomplishments) :

【Hybrid-PIC 法による電位計算】

Fig.2 は z 方向電位分布の数値計算結果と実験測定結果の比較を示す。推進機中心軸上付近 ($y = 0, 0.1(\text{m})$) では、数値計算結果と実験測定結果では、大きな乖離はみられず、計算結果について一定の妥当性を確認することができる。一方で、推進機中心軸

上から離れた領域 ($y = 0.2(\text{m}), z = 0(\text{m})$ 付近) では、顕著な乖離が見られた。この領域では、プラズマ密度が他の領域に比べて低く、実験による測定結果は妥当性に欠いてしまうことと、準中性仮定では、表面周辺部の



非中性なプラズマを再現できていない可能性がある。将来的には、非中性効果もモデルに組み込むことを検討している。

【相互作用の評価】

宇宙機-プラズマ間の相互作用の一つに、プラズマから宇宙機表面に向かって流れる逆流イオンがある。そこで、逆流イオンの挙動を調査した。壁面に衝突する際の衝突角度分布を取得した。Fig.3 に衝突角度分布を示す。50 度以上に分布しており、一定の角度を持って壁面に衝突していることがわかった。

また、イオンスパッタレートは角度のほか、粒子エネルギーにも依存する。Fig.4 に壁面に衝突したイオン粒子のエネルギー分布を示す。35V 付近をピークに、最大 40V を示した。最大値 40V は、推進機排気プラズマ内の電位の最大値と一致している。したがって、推進機直下の最大電位領域からも壁面に向かって逆流イオンが流れていることがわかった。

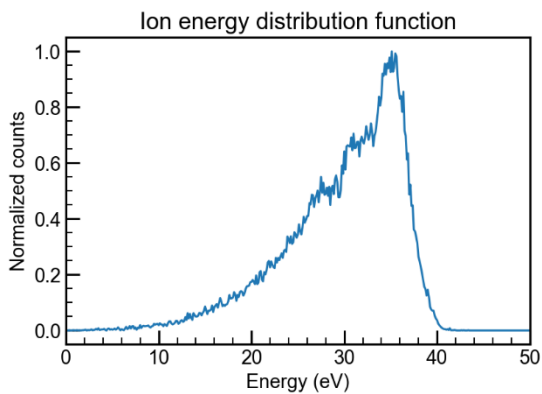


Fig.3 壁面衝突イオン粒子の角度分布

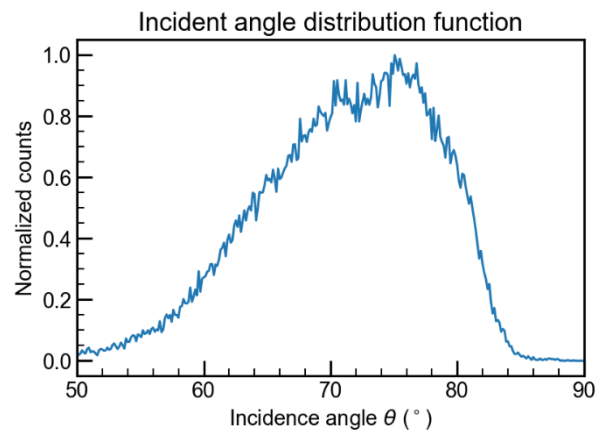


Fig.4 壁面衝突イオン粒子のエネルギー分布

【実験結果との比較】

本研究による計算結果は、逆電位アナライザーを用いて実験的に取得されたイオン粒子のエネルギー分布と比較された。エンジン作動パラメータのひとつである、投入ガス流量を変更させた場合における、各々のエネルギー分布を比較した。

実験的計測によるエネルギー分布の特徴としては、二峰性のエネルギー分布であることと、投入ガス流量を変更させるとエネルギー分布も変化することが挙げられた。

計算結果と同様に最大エネルギー値が 40V 付近であった。一方で、計算-実験間でいくつかの相違も確認された。具体的には、計算結果ではエネルギー分布は単峰性であったのに対して、実験では二峰性であったことや、計算結果では population のピークは 40eV 弱であったのに対して、実験では 10eV 程度であったことである。

計算結果と実験的計測結果の相違の要因として、計算モデルは 2次元で 3次元的效果を考慮できていないことが考えられる。計算モデルには、電子源が含まれておらず、エンジン中心軸に関して対称的となっており、実験計測条件とは異なる。さらに、現実には円筒様なエンジンが、計算モデルでは奥行方向に無限に伸びる直方体で表現されている。また実験計測では、本来宇宙空間には存在しない地上実験特有の施設効果を見逃すことも要因として挙げられる。

【妥当性検証】

昨年度における研究では、電子を流体として扱い、イオンを粒子として扱う Hybrid-PIC 法が用いられていた。本研究で用いられたモデルの妥当性検証に際して、両極性

拡散問題の解析解との比較が詳細に行われた。両極性拡散問題では、電子もイオンも

両方とも流体として扱われる。さらに、時間項と慣性項が落とされる、Drift-Diffusion 近似を適用することで解析解を得ることができる。Hybrid-PIC 法にお

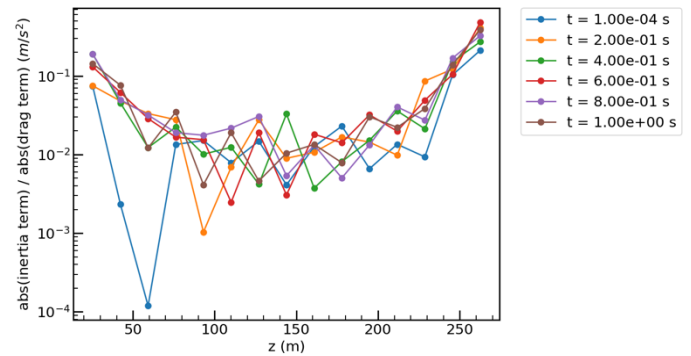


Fig.5 検証問題における慣性-抗力比の空間分布

ける妥当性の検証はこれまで細かく議論

されたことはほとんどなく、本研究によって整理されることとなった。イオンが粒子として扱われる Hybrid-PIC 法と比較し、モデルの妥当性を検証するとともにイオンの kinetic な効果を定性的に評価した。下記に、いくつか実施された検証問題のうちの一例を示す。

Fig.5 に同様の問題を解いたときに、慣性項-抗力項比の空間分布を示す。Drift-Diffusion 近似は、慣性項が抗力項よりも十分に小さいことを仮定している。Fig.5 によると、左右の境界付近で比が大きくなっており、最大で 0.1 程度である。これは Drift-Diffusion 近似が左右の境界付近では成立するか十分な議論が必要なことを示している。

【異方性拡散方程式に対する新たな解法の模索】

本研究では、上述の Drift-Diffusion 近似に加えて準中性仮定を採用することで電位に関する楕円型方程式を解く。この時、磁力線とメッシュが直交しない場合、方程

式は異方性拡散方程式となる。異方性拡散方程式を解く方法はいくつかあるが、本研究では、より簡便な方法を模索するべく Symmetric stencil を用いた方法を検討した。

これは Gunter らによって提案された手法⁴⁾であり、離散化の際にステンシルの取り方を工夫するものである。通常、異方性拡散方程式を離散化した場合、フラック

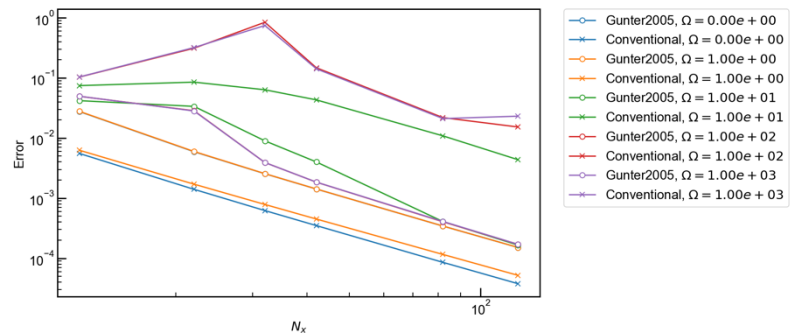


Fig.6 テスト問題における誤差評価

ス評価時に、磁場の向きによってはx方向とy方向とで、ステンシルの数が異なってしまふ。Gunter らはこの評価ステンシル数の違いが異方性拡散を解きづらくする要因の一つであることを明らかにし、方向によってステンシルの数が変わらないような Symmetric stencil な離散化方法を提案した。本研究でもこの離散化方法を導入することを目的に、テスト問題を設定し検証した。

Fig.6 にテスト問題における誤差評価の結果を示す。従来の方法を用いた場合(凡例: Conventional)と symmetric stencil を用いた場合(凡例: Gunter2005)の比較をプロットしている。ハイパーパラメータとして、ホールパラメータ Ω を変化させた。なお、ホールパラメータが大きいほど異方性が強いとみなせる。縦軸が誤差で、横軸が単位長さあたりのセル数である。このテスト問題では、境界条件はディリクレ条件を適用

し、境界値は解析解で与えられた。このテスト問題の結果によると、ホールパラメータが0である場合、つまり等方性拡散方程式を解く場合は、従来の手法の方が誤差は小さい。一方で、ホールパラメ

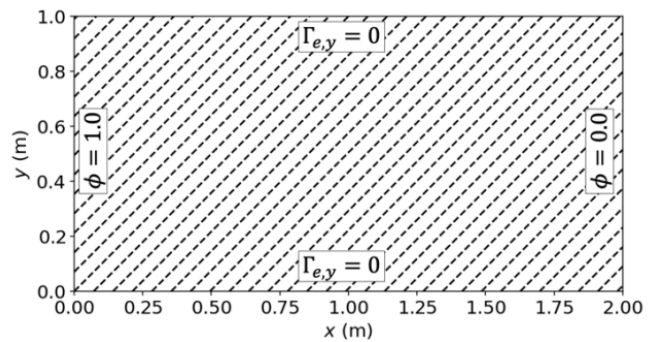


Fig.7 ノイマン条件を含むテスト問題

ータが大きく異方性拡散方程式を解く場合は、symmetric stencil を用いた方が誤差は小さいことがわかった。これらの結果は Gunter らの報告と整合する。

Fig.7 に次に行ったテスト問題の境界条件を示す。左右の境界はディリクレ条件で与えられ、上下の境界はノイマン条件で与えられた。磁場の向きは破線で示した。このテスト問題に対して Gunter らの方法を適用すると、発散し解が得られなかったり、明らかに非物理的な数値振動を含むような解しか得られなかったりすることがわかった。このことから、異方性拡散方程式を解く際にはステンシルの取り方以外にも、境界条件の処理も議論する必要があることがわかった。実問題における境界条件ではノイマン条件を含むことが多く、Gunter の方法をより実問題に近い形でテストすることができ、その限界を把握することができた。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. Ayumu Nono, Yusuke Yamashita, Ryudo Tsukizaki, and Kazutaka Nishiyama, Gaseous Electronics Conference, Sendai, Japan, Oct. 2022
2. 濃野歩, 山下裕介, 月崎竜童, 西山和孝, 数値流体シンポジウム, オンライン, Dec.

2022

3. A. Nono, Y. Yamashita, T. Muranaka, M. Kato, K. Nakata, Y. Nakayama, K. Ueno, R. Tsukizaki, and K. Nishiyama. International Symposium on Space Technology and Science, Kurume, Japan. Mar. 2023.
4. A. Nono, Y. Yamashita, R. Tsukizaki, and K. Nishiyama. International conference on plasma science, Santa Fe, NM, USA, 2023.

参考文献

- 1) Tani Y, Tsukizaki R, Koda D, Nishiyama K, Kuninaka H. Performance improvement of the $\mu 10$ microwave discharge ion thruster by expansion of the plasma production volume. *Acta Astronaut.* 2019;157: 425–434.
- 2) Bird GA. *Molecular gas dynamics.* 1976.
- 3) Hara K, Mikellides IG. Characterization of low frequency ionization oscillations in Hall thrusters using a one-dimensional fluid model. 2018 Joint Propulsion Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2018.
- 4) Günter S, Yu Q, Krüger J, Lackner K. Modelling of heat transport in magnetised plasmas using non-aligned coordinates. *J Comput Phys.* 2005;209: 354–370.