

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560735

研究課題名（和文） 宇宙用ホール推進機の高効率化研究

研究課題名（英文） Study on the high efficiency Hall thruster for space use

研究代表者

宮坂 武志 (MIYASAKA TAKESHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：60303666

研究成果の概要（和文）：

ホール推進機の高効率化を達成するために、ホール推進機内で生成したプラズマと加速チャンネル壁面との相互作用に着目し、壁面がホール推進機作動に与える影響について実験及び数値解析研究を行った。評価は異なる推進剤、異なる半径方向オリフィス位置を持つ陽極について行われた。開発した粒子コードによる数値解析の結果、推進剤としては電離エネルギーの小さいキセノンの場合に放電電流振動振幅が大きく、推進効率が高くなった。また、壁面近傍に設置したオリフィスの場合、放電電流振幅が抑制されるという結果が得られた。この結果は実験によって確かめられた。壁面に近いオリフィスの場合の方が上流部では壁面へのプラズマ損失が大きくなることから、運用時には中央にオリフィスを配置するだけでなく、数値解析によって、放電電流振動及び効率評価を同時に進め、オリフィス位置の決定が重要であることが示された。

研究成果の概要（英文）：

To develop Hall thrusters having high efficiency, focusing on interactions of plasma with acceleration channel walls, effects of acceleration channel on thruster operations were studied experimentally and numerically. Investigations were performed for different propellants and orifice radial positions. As results of numerical analyses using a developed particle code, it is found that in the case of xenon having a small ionization energy, the discharge current oscillation amplitude is large and the thrust efficiency is high. In the case of the orifice installed near the channel wall, the amplitude of discharge current oscillation was suppressed. This tendency was confirmed by the experiments. A loss of plasma to the acceleration channel walls in the upstream region for the orifice installed near the channel wall is larger than that for the orifice installed at intermediate position between the walls. Thus, it is found that in operations, determinations of orifice position by numerical investigations of the discharge current oscillation and thrust efficiency are required.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード： ホール推進機，電気推進機，粒子シミュレーション，壁面効果

1. 研究開始当初の背景

ホールスラスタは宇宙用電気推進機の一つであり中比推力領域で高推進効率が得られることから，姿勢制御用エンジンとして期待され，研究開発が進められている。今もなお解決すべきいくつかの問題があり，その主なものとして推進効率の向上，間欠的電離による放電電流振動現象が挙げられる。高電圧モード下で放電電圧を上げていくと，20kHz帯域で放電電流振動振幅が増大し，推進効率の低下，作動不安定性など推進性能への影響が懸念されている。長期安定作動が求められているホールスラスタにおいて振動制御は解決すべき重要な点である。これまでの研究によりオリフィス形状がこれらの作動特性に影響を及ぼすことが示されており，オリフィス形状を含む加速チャンネル形状について推進効率，放電振動現象へ与える影響を詳細に理解することが，重要であるという考えに至った。

2. 研究の目的

これまでの研究成果を基に，陽極形状を含む加速チャンネルに着目し，生成プラズマの挙動の理解を通じて，プラズマ生成過程における振動，すなわち，放電電流振動現象とチャンネル壁との相互作用，また生成したプラズマ自身が壁面へ損失する様子を検討することにより，推進効率へ与える影響について考察を行った。

具体的な，加速チャンネル内の挙動については，粒子コードをベースにして開発した数値解析コードである，hybrid-PIC(Particle In Cell)・DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)コードを使用し非定常解析を行うことにより評価を行った。数値解析で行った内容としては以下の通りである：

- ・推進剤の違いによる放電電流振幅，推進効率への影響評価
- ・オリフィス位置による加速チャンネル壁との相互作用の評価（異なる半径方向位置による影響について）

異なる推進剤や異なるオリフィス位置を設定することにより，これらの壁面効果が異なってくるため，異なるオリフィス位置に設定した場合における放電電流振動振幅などへ与える影響について，実験と数値解析結果

の比較により，評価を行った。

3. 研究の方法

本研究は，開発した hybrid-PIC(Particle In Cell)・DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)コードの最適化による数値解析研究と大型真空チャンバー内で行われる実験機による実験研究によって実施された。

以下に，それぞれの研究方法を示す。

3. 1 数値解析

ホール推進機は，プレナム室，陽極，加速チャンネルから構成されている。中性粒子の流れはこの順に進み，加速チャンネルで電離・加速される。本解析で用いる形状パラメータは実験で行った値とできる限り同じにとっている。実験では，円形の24個のオリフィスを用いているが，本解析では計算時間短縮のために環状の軸対称モデルとした。このとき，オリフィスの断面積が実験の総オリフィス断面積と一致するように設定されている（図1）。図2に解析領域での軸対称モデルの概略図と形状パラメータを示す。

我々の解析コードは二段階解析から成り立っている。プレナム室と加速チャンネルの間には中性粒子について1～2桁程度のクヌーセン数の差があり，電離・加速過程を含め，すべての領域を同時に解くには計算負荷が膨大になる。また，加速チャンネル入口で一樣な流入条件を与える場合には本解析の主目的である，中性粒子流入効果についての詳細な知見を得るのは困難である。そこで，本解析では第一段階では中性粒子運動のみ全領域において解析を行い，第一段階でのオリフィス出口の条件を第二段階の初期条件として適用し加速チャンネル内での電離・加速過程の解析を行う。

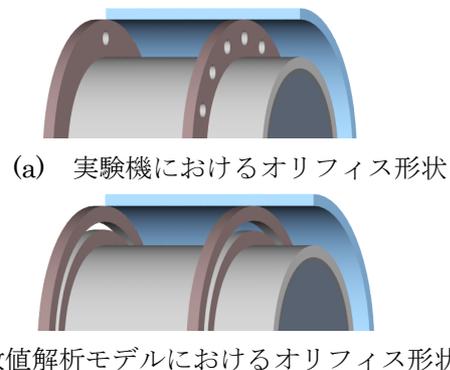


図1 オリフィスモデルの違い

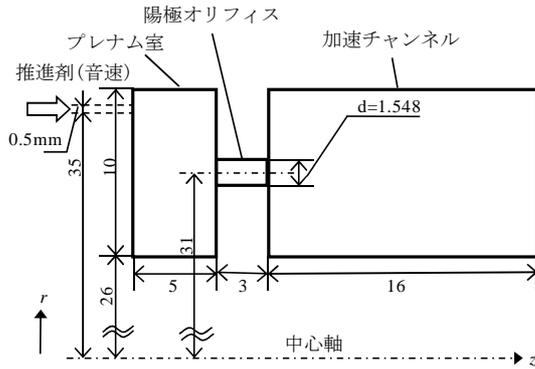


図2 解析領域の概要と形状パラメータ

今回は定性的な評価を行うために計算モデルを下記のように簡単化した。

1. プラズマは準中性。
2. 推進剤はキセノンで一価電離のみを考慮。
4. 磁力線は半径方向のみに簡略化。
5. 温度は半径方向に一樣。
6. 電子は流体とし磁場に平行な方向はボルツマン分布に従い、磁場に垂直な方向はボーム拡散をする。

図3に解析のフローチャートを示す。

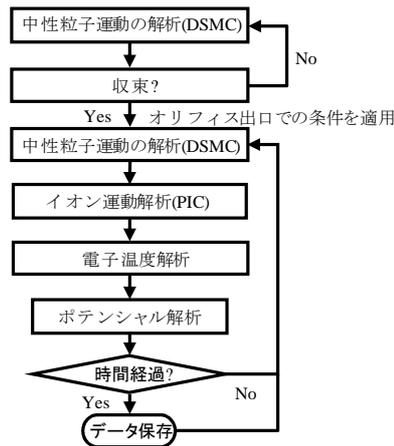


図3 解析のフローチャート

第一段解析では中性粒子のみの解析を Null-Collision 法を適用した DSMC で行い、オリフィス出口での中性粒子条件を第二段解析に適用する。第二段解析では中性粒子運動・イオン運動・電子温度・ポテンシャル解析を行う。中性粒子は DSMC 法、イオンは PIC 法を用いる。

電子は流体モデルを適用することにより電子流束、電子温度を求め、ポテンシャルはボルツマン分布の仮定等から解いている。次に具体的に計算式を記す。電子流束は以下の式(1)で表される。

$$\Gamma_{e,z} = -\mu_{e,z} n_e E_z - \frac{\mu_{e,z} k}{e} \frac{\partial (T_e n_e)}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、プラズマは準中性を仮定しているため、電子数密度はイオン粒子計算の結果を用いている。電子エネルギー保存式は以下の式(2)で表わされる。

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (kT_e \int n_e ds) + \frac{5}{2} \frac{\partial}{\partial z} (kT_e \int \Gamma_e ds) \\ &= -e \Gamma_z E_{e,z} - (1 + \beta) \epsilon_i \int \dot{n}_e ds \\ & - \alpha_L (r_{e,inner} n_{e,inner} + r_{e,outer} n_{e,outer}) kT_e \sqrt{T_e} \end{aligned} \quad (2)$$

左辺第一項は内部エネルギー、第二項は発散によるエネルギーを表す。右辺第一項は電界からのエネルギー、第二項は電離と励起によるエネルギー損失、第三項は壁面損失を表す。

次にポテンシャルの軸方向分布は次式から求められる。

次にポテンシャルの軸方向分布は次式から求められる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi^*}{\partial z} = & \frac{\int \Gamma_{i,z} ds - \frac{I_t}{e} - k \int \left\{ \mu_{e,z} n_e \frac{\partial}{\partial z} \left(T_e \ln \frac{n_e}{n_{e,inner}} \right) - \mu_{e,z} n_e \frac{\partial (T_e n_e)}{\partial z} \right\} ds}{\int (\mu_{e,z} n_e) ds} \end{aligned} \quad (3)$$

電子がボルツマン分布をしている仮定から、半径方向のポテンシャル分布は

$$\phi = \phi^* + \frac{kT_e}{e} \ln \frac{n_e}{n^*} \quad (4)$$

で表される。放電電流は設定した放電電圧値に対して式(3)を用いて決定される。

3. 2 実験研究

実験は、図4に示すホール推進機の実験機を用いて行われた。

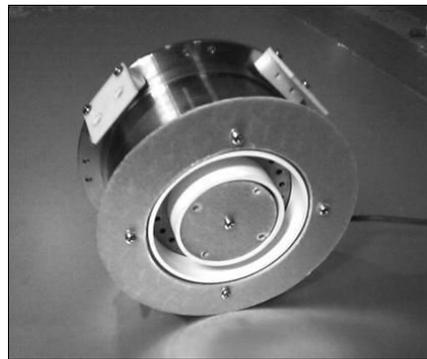


図4 実験に用いられたホール推進機

本実験の実験システムの構成の概略を図 5 に示す。本実験システムは、図 6 に示す直径 1 m の真空チャンバーを中心として構成されており、ロータリーポンプ、メカニカルブースターポンプ、拡散噴射ポンプから構成される真空装置系により、 2×10^{-4} torr 程度までの真空環境で実験を開始した。

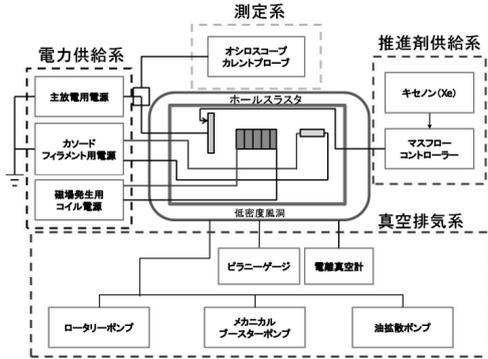


図 5 実験システムの構成



図 6 真空チャンバー

4. 研究成果

4. 1 推進剤の違いによる影響評価

数値解析により、異なる推進剤を用いた場合、推進効率、放電電流に与える影響を壁面との相互作用の観点から評価した。本研究では、推進剤としてキセノン、クリプトン、アルゴンを設定した。

まず、それぞれの推進剤の場合について放電電流振動波形、振幅の結果について図 7 および図 8 に示す。同一条件下（放電電圧 200 V）で解析を行った結果、放電振動振幅は図 8 に示すように $Ar \rightarrow Kr \rightarrow Xe$ の順に大きくなった。これはそれぞれの電離電圧に起因するもので、この順に図 7 の放電電流値が大きくなっていることからわかるように、電離度に違いが生じ、 Ar の場合は中性粒子が比較的欠乏しない状況になっているため、振幅が小さくなっているものと考えられる。このようには放電電圧を統一する場合には、放

電電圧に上限値が存在する（この場合は Xe に対して存在）ことから同一放電電圧下では高電圧モードにおける推進剤の影響は、加速チャンネルとの相互作用ではなく、電離電圧の効果が主に表れていることが示された。

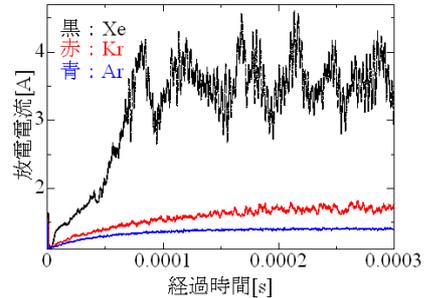


図 7 放電電流波形の比較

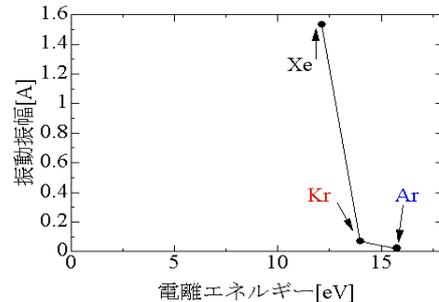


図 8 振動振幅の比較

次に、推進効率について評価を行った。推進効率は、壁面へのプラズマ損失が大きな影響を及ぼす。そこで、まず壁面損失についての結果を示す。図 9 には電位分布の比較を与える。

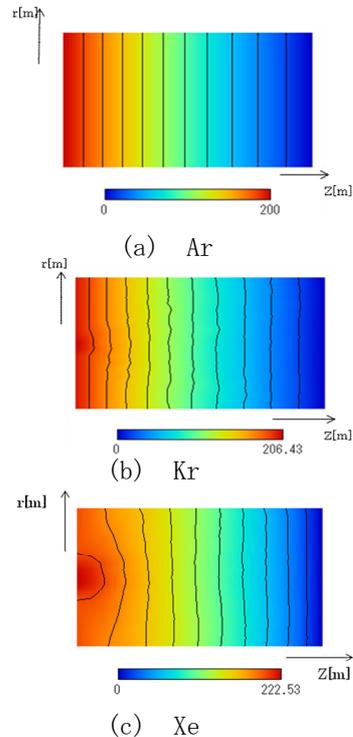


図 9 電位分布の比較

この図 9 から陽極出口近傍で急激に電離している Xe の場合に電位の大きな湾曲が見られる。この湾曲により生成イオンの壁面損失割合は下記の様に評価した：

$$\frac{[\text{壁面イオン電流}]}{[\text{壁面イオン電流} + \text{イオン電流}]}$$

においては Ar→Kr→Xe の順で高くなっていく (表 1)。ここで、「壁面イオン電流」とは壁面に損失するイオンの流束を電流換算したものである。

表 1 壁面損失割合, イオン電流の比較

推進剤	Ar	Kr	Xe
壁面損失割合	0.020	0.067	0.299
イオン電流 [A]	0.52	0.74	1.10

次に, 推進性能について比較を行った。まず, 図 10 に各推進剤における排気速度と推力の結果を示す。

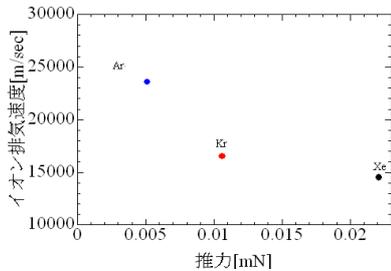


図 10 排気速度と推力の比較

排気速度は, 原子量の小さい順, すなわち Xe→Kr→Ar の順に速い結果を示している。しかし, 表 1 に示される様に Ar→Kr→Xe の順に壁面損失割合は高いにも関わらず, 電離の高さの効果が強く効いてくることにより, イオン電流が大きさは順序が逆になり, Xe で最も高くなる。この効果が大きく, 結果として Ar→Kr→Xe と推力が大きくなる結果となった。最後に推進効率を見積もったものを図 11 に示す。この結果から, 同一の放電電圧の条件下で比較を行うと, 推力と同様の順で高い推進効率が得られることが示された。

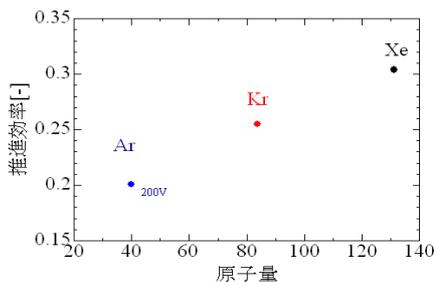


図 11 推進効率の比較

4. 2 オリフィス位置の違いによる影響評価

オリフィス位置, 特に半径方向位置の違いにより生成したプラズマと加速チャンネル壁面との相互作用に影響を及ぼすことが考えられる。そこで, 異なるオリフィス位置を設定し, 壁面との関係性を評価した。図 12 には, 本評価で用いたオリフィスの概念図を示す。

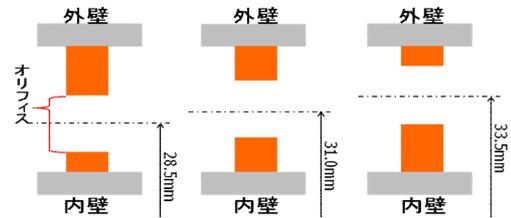
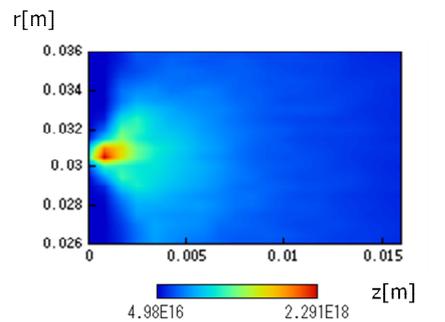


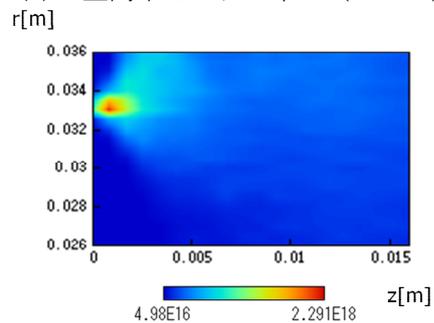
図 12 異なるオリフィス位置設定の概念図

ここで, オリフィス位置の基準として, 円環オリフィスの中心位置は, 加速チャンネル外壁, 内壁の中心に設定した推進機中心から 31mm, 内壁に近い 28.5mm, 外壁に近い 33.5mm の 3 種類に設定した。また円環オリフィスの幅は, それぞれのオリフィス断面積が同一になるように設定されている。以下では, 31mm, 33.5mm の場合について結果の比較を行う。まず, 数値解析の結果を示す。

図 13 に 2 つのオリフィス位置の場合のイオン数密度分布の比較を示す。



(a) 壁間中心オリフィス (r=31mm)

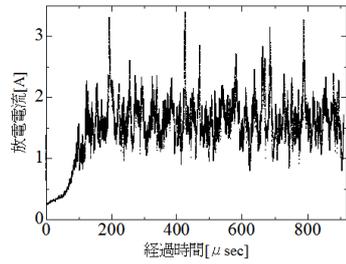


(b) 外壁に近いオリフィス (r=33.5mm)

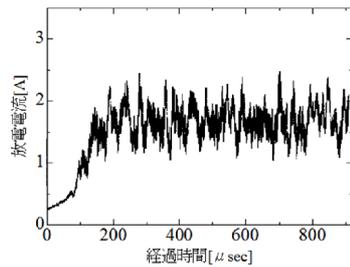
図 13 イオン数密度分布の比較

2 つの結果を比較すると, (b) の外壁に近いオリフィスの場合電離領域が壁近傍に存在

していることが分かる。この違いにより、(b)の方が電子の壁面損失により電離が緩やかになり、その結果として図 14 に示すように放電電流振動振幅が(b)の場合に緩やかになったと考えられる。



(a) 壁間中心オリフィス (r=31mm)



(b) 外壁に近いオリフィス (r=33.5mm)

図 14 放電電流振動の比較 (数値解析)

推進効率へ影響を及ぼすイオンの壁面損失量に関しては(b)の方が上流部では外壁への損失が大きいが、(a)の場合さらに下流で外壁だけでなく内壁への損失も増加するため、実際の作動条件下での数値解析評価が重要である。

実験は円形オリフィスの中心位置、オリフィス断面積を数値解析と同一にし、行った。放電電圧、推進剤流量はモデル、環境に基づき決定し、数値解析・実験では異なっており定性的な比較を行った。図 15 には実験の作動中の様子を示した。



図 15 ホールスラスタ実験機の作動の様子

実験で観察された放電電流振動と数値解析の結果を比較したものが図 16 である。この図 16 から数値解析で得られた放電電流振動振幅のオリフィス位置依存性について実験で同様な依存性が確認できた。

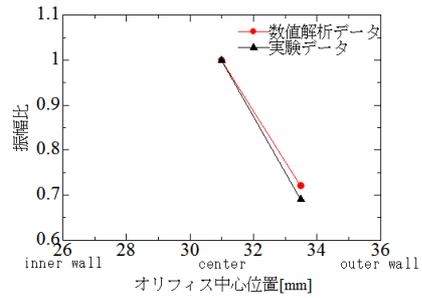


図 16 放電振動振幅の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

① K. Segawa, T. Miyasaka, and K. Asato, Experiment and Particle Simulation on Periodic Phenomena of a Hall Thruster, The Fourth Workshop International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, March 12, 2011, Melbourne.

② 瀬川和秀, 宮坂武志, 安里勝雄, 陽極形状によるホールスラスタ作動制御, 第 49 回航空原動機・宇宙推進講演会, 2009 年 3 月, 長崎.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~asatolab/densuihan.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮坂 武志 (MIYASAKA TAKESHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 60303666

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

なし。