

# 可視化イオンエンジンによるイオン抽出系評価

中山 宜典\*, 中野 正勝†

## Ion Extraction Behavior on Visualized Ion Thruster

By

Yoshinori NAKAYAMA and Masakatsu NAKANO

**Abstract :** In order to directly observe the ion production and extraction phenomena within an ion engine, a two-dimensional visualized ion thruster (VIT) have been designed and fabricated. Since the experimental visualized results on ion extraction behavior of the VIT grid system was in good agreement with the numerical results derived from an ion grid erosion analysis code, the VIT may be useful for the inspection and modification of the numerical model of the codes.

**Key words :** Ion Engine, Experimental Visualization, Numerical Model Modification

### 1. はじめに

イオンエンジンは、イオンをグリッドシステムによる静電加速によって推力を得る高比推力・長寿命ロケットエンジンであり、その利点および多くの搭載実績ゆえに、搭載用途に応じた様々なイオンエンジンの開発が求められている[1]。現在の開発においては、多数の実験解析や数万時間級の耐久実験が必要とされているため、その代替となりうる数値計算解析の研究が進められている。特に寿命の主要因であるグリッドシステムの損耗解析は精力的に進められている[2]。しかしその解析妥当性は、グリッドシステムに流入する電流値や長時間作動前後の形状変化から類推的に検証するよりなかった。また3次元解析であるため多大な計算コストを要し、検証件数が少なかった。

この解析妥当性を多角的に検証するために、著者の一人は2次元可視化イオンエンジン（VIT）を設計・製作した。その作動により、イオンの生成から加速までを2次元可視化できること、およびグリッドシステム近傍のプラズマ数密度がほぼ均一であることが認められた[3]。

本研究の目的は、この2次元可視化イオンエンジン（VIT）を用いて、（1）グリッドシステムにおけるイオンビームを視覚的に捉え、（2）数値計算解析結果と比較し、（3）VITが解析妥当性の検証に有用であるかを評価する、ことである。

### 2. VIT 実験および数値計算

#### 2.1. VIT 概要

本研究において使用したVITを図1に示す。VITは、（1）2次元可視化のための直方体形状、（2）発光吸収分光を可能にするための2面平行ガラス、（3）放電経路の変更を行うための3対平面アノード、（4）磁場の設定できる1対L字型ヨークなどの特徴を持つ。放電室内部の大きさは $80 \times 80 \times 50\text{mm}$ である。電子源はフィラメントおよびキーパーから構成され、電子はキーパーの1円孔からイオン生成部へ放出される。イオン生成部に対する探針計測により、電子源近傍を除きプラズマ数密度の2次元性（y方向の均一性）が確認されている。

\* National Defense Academy of Japan

† Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

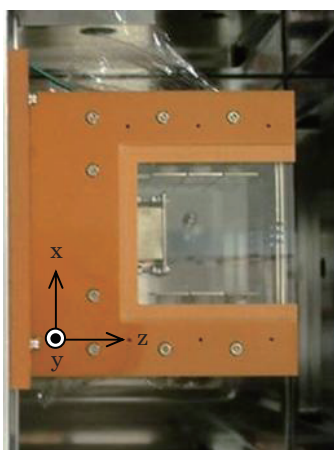


図1 2次元可視化イオンエンジン

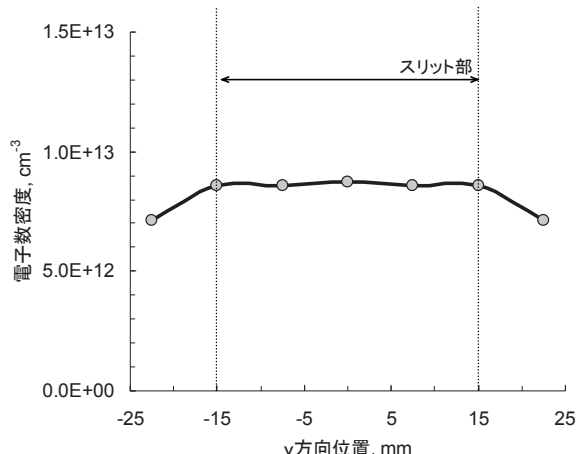


図2 電子数密度分布（グリッドシステム近傍）

グリッドシステム近傍における電子数密度分布を図2に示す。グリッドシステムは2枚の長方形板からなり、各グリッドには、一般のグリッド円孔に相当するスリットが3つある。グリッドシステムの幾何諸元およびその近傍のプラズマ諸元を表1に示す。中性粒子密度はグリッド幾何形状のコンダクタンスから求めている。スリットの観測側に溝をつけてイオンビーム軌道のほとんどを可視化する工夫を施してある。一般にイオンビームは光量が小さいためその1本1本を視認することは難しいが、VITではスリット状のイオンビームとなるため、スリット長方向（y方向）に光量が積み重ねられ、視認しやすい。これらの詳細については参考文献に譲る[3-5]。

表1 グリッド幾何およびプラズマ諸元

プラズマ（グリッド近傍）		スクリーングリッド		アクセलगリッド	
電子数密度	$8.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	スリット幅	3.0 mm	スリット幅	2.0 mm
電子温度	3.0 eV	スリット長	30.0 mm	スリット長	30.0 mm
空間電位	53.0 V	スリット間隔	5.0 mm	スリット間隔	5.0 mm
中性粒子密度	$8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	スリット数	3	スリット数	3
中性粒子	キセノン	グリッド厚	1.5 mm	グリッド厚	1.5 mm
		→		グリッド間隔	0.8 mm

## 2.2. VIT 実験手法

VITの作動の様子を図3に示す。一般のイオンエンジンではイオンエンジン下流側（+z方向）からのみ視認できるが、VITではy方向からも視認することができ、イオンの生成から加速までのイオン分布を捉えることもできる。

本研究では、グリッドシステムのスリット部が主な撮像対象となる。この撮像には望遠レンズを用いる。これは一般的な広角レンズでは2次元イオンビームを正しく撮像できないためである。本報告におけるイオンビーム撮像はすべて同一レンズ、カメラおよび撮像条件（絞りや露光時間）にて行う。

VITは、推進剤としてキセノンを用い、イオン生成はすべて同一条件（電流・電圧・推進剤流量）にて作動させる。作動安定後、アクセलगリッドに-200Vを印加し、その後スクリーン電圧に最大2.0kVまで印加させ、各グリッドの流出入電流を計測するとともに、撮像する。

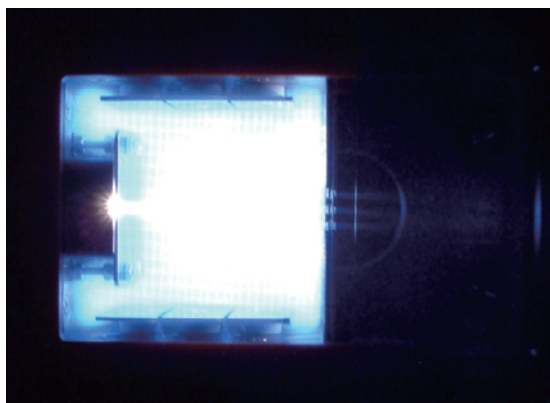


図3 作動の様子

### 2.3. 数値計算解析コード

イオンエンジングリッドシステムを対象とする数値計算解析コードはいくつか開発されている。著者の一人が開発しているコードは、グリッド損耗量を解析できる3次元数値解析コードであり、はやぶさ搭載イオンエンジン $\mu 10$ 等の寿命評価にも使用されたことがある[6]。本研究では、このコードによる数値計算結果と比較する。

図4に解析領域を示す。このコードは、グリッドシステムの上流プラズマ領域、下流の中和プラズマ領域ともに電子を取り扱うことができる。解析対象はVITのスリット1孔近傍とし、プラズマ等の条件は表1に示された値を用いる。電位計算にアイソパラメトリック要素を用いた有限要素法、イオンの移動にFlux Tube法を用いている。このコードの詳細については参考文献に譲る[6]。なおVITのグリッドシステムは2次元形状（スリット）であるが、コードは2次元化せずに3次元のまま計算解析に供している。これは、検証する数値計算モデルを変更することなく、計算時間を短縮できる（対象が2次元ゆえに低要素数で済む）ことを意味する。

## 3. 結果および考察

### 3.1. イオンビーム形状

図5にスクリーングリッド印加電圧に対するイオンビーム形状を、図6に各グリッド電流を示す。図5により、スクリーン印加電圧が高くなるにつれて、(1)イオンシース形状が下流方向に凸型から凹型へ変わっていること、(2)イオンシースの位置が上流へ遡上すること、(3)イオンビームの焦点位置が遡上すること、(4)アクセラグリッドへのイオンビーム衝突位置・領域が変わること（1.25 kV以上）、がわかる。プラズマの生成条件が不変であることを考慮すると、(1)および(2)はChild law sheath理論で説明できる。これまでイオンビームの焦点位置はアクセラグリッド上流面の孔中心にあると仮定されていたため、印加電圧によって移動することを実験的に示した(3)は意義が大きいと考えられる。(4)のアクセラグリッドへのイオン流入（衝突）現象は図6の流入電流と一致しており、衝突の位置・領域、およびその衝突平均角度も得られることを示している。イオンの発光強度を高分解能で計測できれば、イオンビームの数密度分布を得ることもできると考えられる。

図5におけるイオンビーム焦点位置およびイオンシース位置のスクリーン印加電圧に対するプロットを図7に示す。この図を焦点位置とシース位置との距離（以下、シース距離）として描き改めたグラフにアクセラ電流衝突率を併せたものを図8に示す。これらの図より、(5)スクリーン印加電圧が高くなるにつれて焦点位置およびシース位置が共に上流へ遡上すること、(6)アクセラグリッドにイオンビームが衝突しているときのシース距離がほぼ同じになっていること、(7)焦点位置がアクセラグリッドよりも上流にあるときアクセラグリッドへの衝突現象が起きていること、がわかる。これらのことから知見を導くにはデータが不足していることは否めないが、少なくとも、焦点位置やシース位置に着目することは今後のグリッドシステムの開発における新しいアプローチになりうると推察される。

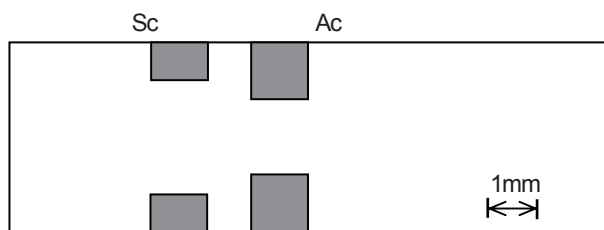


図4 数値解析の対象領域（白枠内）

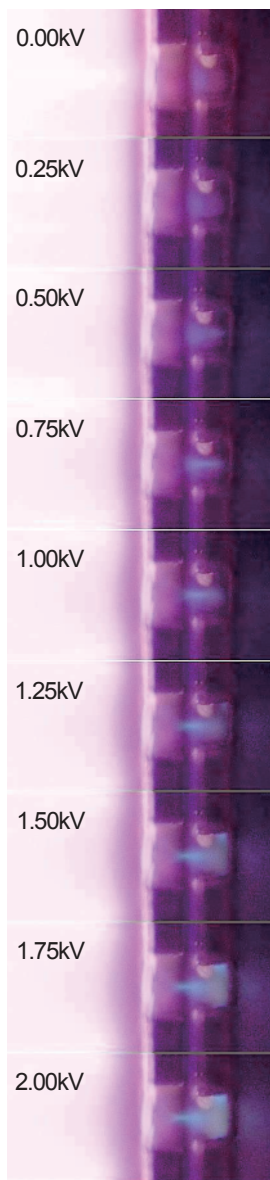


図5 イオンビーム

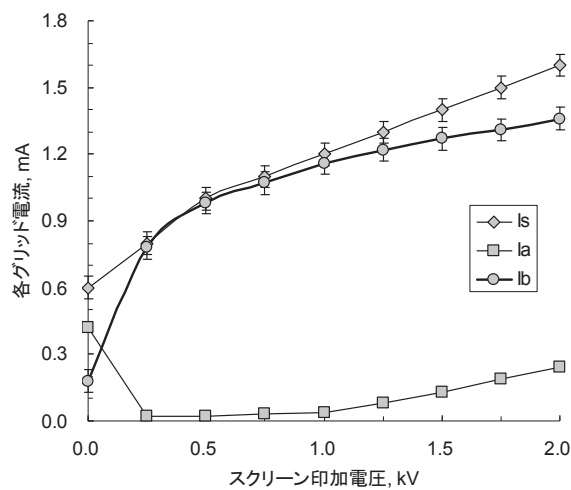


図6 グリッド流出入電流

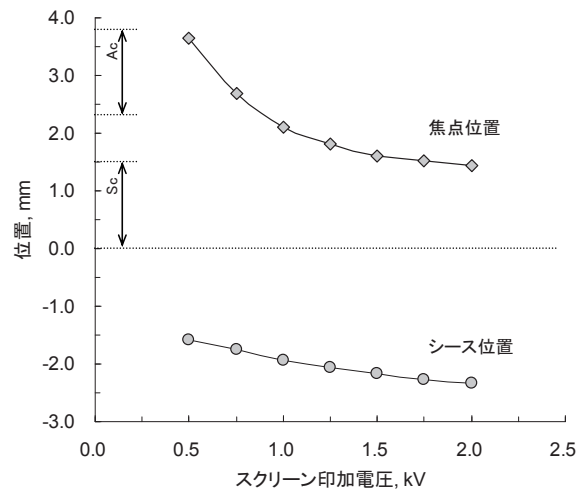


図7 焦点およびシース位置

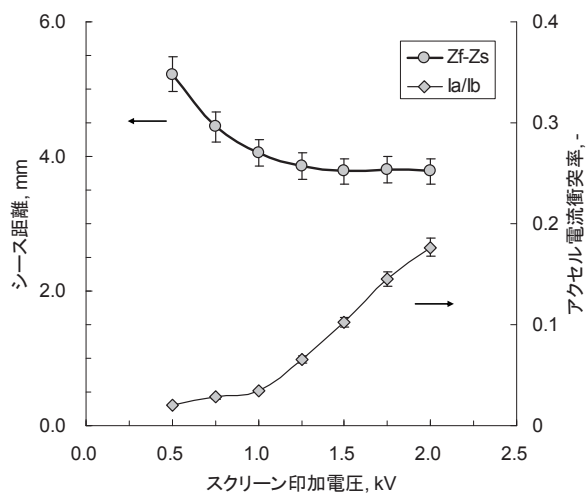


図8 シース距離およびアクセル衝突電流率

### 3.2. 数値解析コードの検証

ビーム軌道の解析結果の一部を図9に示す。また、アクセル電流衝突率の比較結果を図10に、衝突位置およびシース位置の比較結果を図11に示す。これらの図および図5～8から、実験結果と数値計算解析結果は、電流値だけでなく、アクセルグリッドへのイオンビーム衝突位置・領域、イオンビーム焦点位置およびイオンシース位置など、多角的によく一致していることがわかる。したがって、この数値計算解析コードはVITの実験結果を精度良くシミュレートすることができており、このコードに適用されている数値計算モデルはほぼ妥当であると言える。

このコードは現状では十分な精度ではあるものの、これらの比較結果にはわずかながら相違がある。より精緻な解を得る必要があれば解析モデルの改良が必要であるかもしれない。しかしその改良が正しいかどうかは、VITにおける実験誤差を考慮する必要があるものの、VITの実験結果との比較で確かめることができるだろう。

これから、VITは、これまで唯一の実験的検証データであった電流値だけでなく、位置や分布などの多角的な検証データを供与できており、数値計算解析コードの検証に十分有用なイオンエンジンであると考えられる。

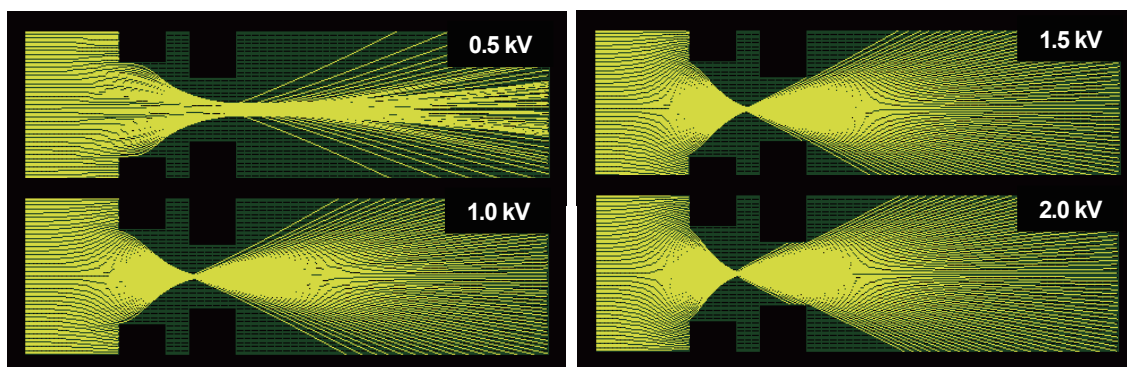


図9 イオンビーム (数値解析)

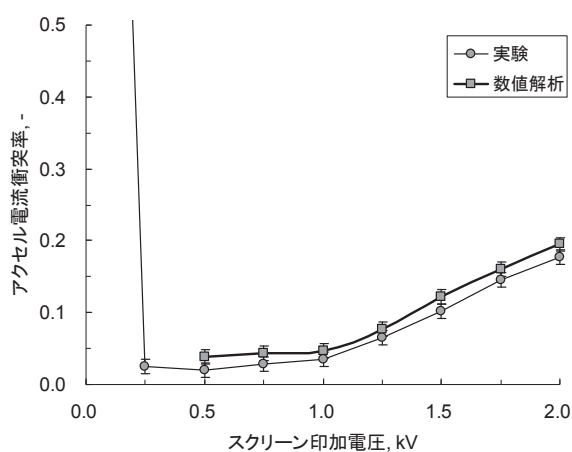


図10 アクセル衝突電流率 (比較)

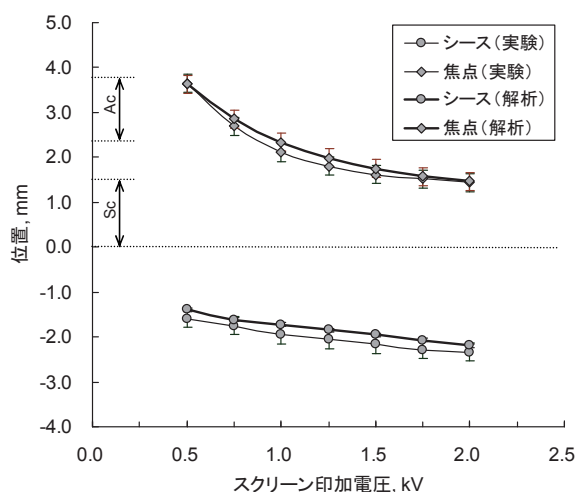


図11 焦点およびシース位置 (比較)



#### 4. まとめ

2次元可視化イオンエンジン (VIT) により,

- (1) Child law sheath 理論に則ったイオンシース形状およびイオンビーム形状を実験的に視認できる
- (2) 従来は固定と仮定していたイオンビーム焦点位置が作動条件によって移動することを確認できる
- (3) 唯一の実験的検証データであった電流値だけでなく、アクセルグリッドへのイオンビーム衝突位置・領域、イオンビーム焦点位置およびイオンシース位置など、多角的な実験データを供与できる
- (4) 数値計算解析コードの妥当性評価ができ、検証に有用である

#### 謝 辞

本研究には寺浦康弘氏 (海上自衛隊) の協力を得た。ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和孝, “イオンエンジンによる動力航行”, コロナ社, 第3章, 2006年12月.
- [2] 宇宙航空研究開発機構, “イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書”, 宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-06-019, 2007 年 3 月.
- [3] 寺浦康弘, 中山宜典, “可視化イオンエンジンの分光および探針計測”, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, pp.1-6, 2007 年 10 月.
- [4] 中山宜典, 寺浦康弘, 吉田幸司, 東裕司, “可視化イオンエンジンの試作”, 平成 18 年度宇宙輸送シンポジウム, pp.322-325, 2007 年 1 月.
- [5] Yoshinori Nakayama, Yasuhiro Teraura, “Feasibility Study on Visualized Ion Thruster”, IEPC-2007-43, 30th International Electric Propulsion Conference, pp.1-8, 2007 年 9 月.
- [6] 中野正勝, 荒川義博, “イオンエンジンのグリッド耐久性能計算”, 日本航空宇宙学会論文集, pp.111-117, 2000 年 4 月.