

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760661

研究課題名（和文） 実験的可視化によるイオンエンジンビーム軌道解析の検証

研究課題名（英文） Experimental Visualization of Ion Engine Beam Optics for Simulation Code Validation

研究代表者

中山 宜典（NAKAYAMA Yoshinori）

防衛大学校・システム工学群・准教授

研究者番号：80532770

研究成果の概要（和文）：

宇宙用ロケットの一種であるイオンエンジンを2次元可視化し、大型化および高密度化を併せて行い、適切な光学計測系を構築したことにより、イオンエンジンのイオン流れを高解像度かつ鮮明に撮像できるようになった。様々な条件下において実験的に取得したイオン流れの形状データ等は、イオンエンジン寿命評価の数値解析の妥当性を多角的かつ客観的に検証できる国内外で唯一のデータであり、今後の研究開発に貢献できた。

研究成果の概要（英文）：

An ion thruster, which is the one of space propulsion system, was two-dimensional visualized. The visible area of this thruster ion flows is larger than conventional ion thruster, and the luminance of the flows was improved with higher density ion production. With approved construction of optical measurement system, clear and high-resolution photo-images of the ion flows were experimental obtained. Their geometry data with experimental condition data are unique in both our country and overseas, and worth a lot to objectively-validate the ion thruster endurance simulation codes from various perspectives, for the efficiently development of the thrusters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	0	1,900,000
2010年度	1,100,000	0	1,100,000
2011年度	500,000	0	500,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	0	3,500,000

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：推進・エンジン、イオンエンジン、ビーム軌道、可視化、計算解析、解精度検証

1. 研究開始当初の背景

(1) イオンエンジンは、推進剤である希ガスを放電室内でプラズマ化し、生成されたイオンをグリッドシステムと呼ばれる複数枚の多孔電極によって静電加速させて推力を発生させる、電気推進ロケットの一種である。イオンエンジンは、高比推力（低推進剤消費率）・低推力・長時間作動の特徴があり、従来のロケットエンジンよりも少ない推進剤で大きな軌道変換（推力×作動時間）を行える。

(2) 一般的にイオンエンジンは1年から2年間作動する。宇宙機に搭載するには寿命評価（耐久性評価）が必要である。その実証には時間とコストを要するため、性能向上や新規開発を阻む要因となっており、数値解析によって耐久性を代替評価する試みが国内外で進められている。

(3) イオンエンジンの寿命評価用数値解析において最も基幹となるのがグリッドシステム部におけるイオンビーム軌道解析（加速イオンの流れシミュレーション）である。しかし、その解妥当性を検証できる直接的な実験データはなく、電流値などの間接的なデータを用いて妥当性を類推していた。

(4) イオンビーム軌道解析の解妥当性を客観的かつ多角的に検証できるデータが不十分であるため、妥当な代替評価ができず、長時間の耐久試験をせざるを得なかった。

2. 研究の目的

(1) 一般にイオンエンジンは2次元軸対称の円筒形状をしており、金属壁で覆われている。これを直方体形状にし、4面をイオンエンジン作動に、残る2面1対をガラスにし、可視できるようにしたのが、代表者が開発してきた2次元可視化イオンエンジン（VIT）である。イオンビームがシート状であるため、イオンの光量が重畳され、視認しやすい特徴を持つ。

(2) このVITをイオンビームの視認性を向上できるように改良し、高解像度で撮像できれば、イオンビーム軌道解析の解妥当性を客観的かつ多角的に検証できる実験データとして供出できるのではないかと考えた。

(3) VITの改良および計測装置の改善を行い、高解像度データを取得し、そのデータを国内外へ広くデータを供出し、計算コードの解析妥当性および信頼性を検証することを通して、計算コードの解析精度向上に寄与することが本課題の目的である。

3. 研究の方法

(1) イオンビームを高解像度で撮像するためには、測定対象（被写体）であるイオンビームそのものを大きくする方法と、より高精度で光学計測する方法がある。本課題では、前者に対しては、イオンエンジンの大型化、イオン密度の向上、グリッドシステムの改良、等を採用入れ、後者に対しては、視野角0で正しく撮像できる光学系の構築、高画素数のカメラ導入、等を採用入れた。

(2) VITの基本設計を踏襲し、可視面（有効グリッド面）を約2倍になるように大型化したVIT-2を設計した。エンジン筐体はベークライト、放電室壁は軟鉄を用いてフライス盤で加工製作した。可換性をもたせるため、すべて板状（平板）部品で構成した。可視面は一般板ガラスを主とし、用途に応じてパイレックスガラスあるいは石英ガラスに取換えた。

(3) イオンビーム軌道を大型化するとイオン密度（1画素あたりの光量に比例）が低くなるため、VIT-2ではVITよりもイオン生成を高める必要がある。イオンは推進剤に高エネルギーの電子を衝突させて生成でき、磁場の適用によりその衝突確率を高めることができる。本課題ではVIT-2にカウフマン型磁場を適用した。磁場は解析ソフトウェアを用いて設計し、永久磁石を適宜配置した。グリッドシステムの上流部のイオン密度分布を均様にするため、電子源位置をエンジン作動中においても可動できる構造や電子流れを有意に制御するためのバップルも採用入れた。

(4) VITのそれよりも大型化したグリッドシステムを設計製作し、VIT-2に適用した。シート状のイオンビーム本数も3本から5本へ増加させた。イオンビーム軌道のほとんどを可視できるように撮像系側を切削するアイデアを踏襲するとともに、イオン生成に伴う発光をなるべく撮像系側へ反射させないような工夫を新たに採用入れた。

(5) グリッドシステム上流近傍のイオン密度はイオンビーム軌道に強い影響を与える。本課題では15本1組のシングルプローブ（プラズマ探針）を製作し、各プローブの補正後、VIT-2イオン密度の同時計測を行い、その均様性を評価した。

(6) 視野角が0でない撮像では撮像中心から離れるほど位置精度が悪くなり、正しいイオンビーム形状を捉えられない。本課題申請時ではイメージファイバを近接して使用する予定だったが、市場を再調査したところ、本課題に適切かつ比較的安価であるテレセ

ントリックレンズが存在することが判明したため、視野角改善効果を思慮し、後者を導入した。

(7) イオンビーム軌道を高分解能で撮像するため、上記のテレセントリックレンズをアタッチできる高画素数のデジタルカメラを導入した。テレセントリックレンズは光軸および焦点距離の許容範囲が小さいため、微動調整装置も導入した。

(8) 作動誤差や計測誤差を抑えるため、直流電源、微小電流センサ、耐高電圧電線等を導入し、VIT-2 の電力供給系および計測系を改良した。数多くの作動を行うため、推進剤であるキセノンガスを入手した。またテレセントリックレンズの焦点距離に合わせ、VIT-2 を真空槽壁の観測窓へさらに近接させるため、放電破壊対策を行った。

(9) VIT-2 を作動させ、イオン密度分布計測を行った後、様々な加速条件下におけるイオンビーム軌道を高精度で撮像し、評価した。

4. 研究成果

(1) VIT-2 を製作・組立調整した後に作動させたところ、VIT より大型化しているにもかかわらず、磁場適用効果や様々な改良を採り入れたことにより、イオンビームの1画素あたりの光量を高めることに成功した。これにより、撮像対象であるイオンビーム軌道を、分解能比4倍（面積比、 2×2 倍）で、かつコントラスト比（明暗比）を大幅に向上させて撮像できるようになった。これは本課題申請時の予想を上回る成果につながった。

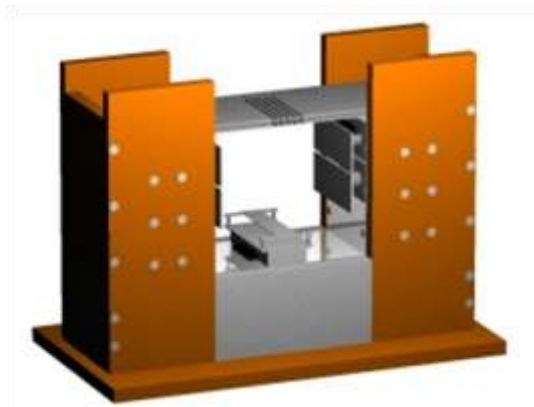


図1 VIT-2 外観
紙面右手前から左奥にかけて
イオンビーム軌道を観測する

(2) 上流プラズマはイオンビーム軌道に強い影響を与えるが、15本1組のシングルプローブによるイオン密度分布の同時計測を行ったところ、グリッドシステム上流近傍では、ほぼ均様であることがわかった。すなわち、

VIT-2 作動によって得られたイオンビーム軌道の撮像に妥当性があることが確かめられた。



図2 VIT-2 作動一例
図中上の複数の細白線は15本プローブ

(3) テレセントリックレンズ、微動調整装置、高画素デジタルカメラ、VIT-2 の真空壁近接設置等により、イオンビーム軌道を視野角0°、および1画素あたりの分解能14マイクロメートル、で鮮明に撮像できること確かめた。本課題実施前にはイオンビーム軌道の特異点（ビーム軌道焦点）のみを取得できていたが、本課題実施により、イオンビーム軌道の形状を取得できるようになった。



図3 VIT-2 イオンビーム全体撮像一例
5本のビームが視野角0°で撮像されている

(4) 自作の画像処理ソフトウェアにより、取得したイオンビーム軌道形状の位置情報および輝度情報を高精度に抽出（算出）できた。

(5) 予想よりも鮮明かつ高精細な撮像が得られたため、イオンビーム軌道の形状だけでなく、ビーム軌道内のイオン密度分布も導出できると考えられた。市販の画像処理ソフトウェアを導入して評価したところ、迷光や反射光（イオン生成に由来）を妥当に除去するためのリファレンス光をもとにすれば評価可能であることが分かった。

<補記>公開画像データは画像処理を一切加えていないものである。

(6) 様々な加速条件で作動させて撮像したイオンビーム軌道は、静電加速理論と合致していることが確かめられ、撮像結果に妥当性があることが示された。



(a) 正味加速電圧 1.50 kV



(b) 正味加速電圧 1.75 kV



(c) 正味加速電圧 2.00 kV



(d) 正味加速電圧 2.25 kV



(e) 正味加速電圧 2.50 kV

図4 加速条件に対する撮像ビーム軌道

(7) イオンビーム軌道解析と比較検証が行いやすいよう、複数の撮像データから位置情報を抽出し、解精度検証に必要なイオンエンジン作動条件・電流電圧値・プラズマ諸量と併せて、公開した。

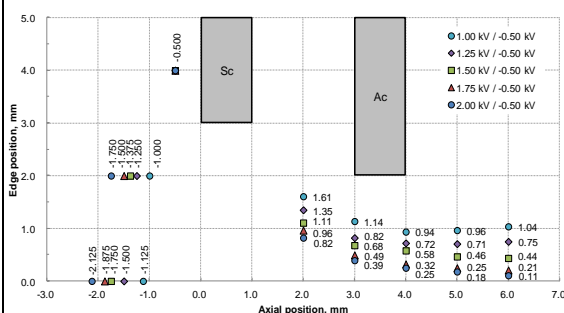


図5 標準データ (公開済)

インターネットを通じてダウンロード可

(8) いくつかのイオンビーム軌道解析との比較検証評価を行ったところ、ある解析コードは解妥当性が高く、ある解析コードは解妥当性が低いとわかった。またそれぞれの解妥当範囲についても検証評価ができた。これらの検証により、一部の解析コードは修整あるいは改善された。

(9) これらの検証データを、ビーム軌道解析を行っている研究者に広く利用していただけるよう、最終年度に、国際会議 (3件)、国内会議 (2件)、学術雑誌 (1件) を通して報告し (国際会議論文および学術雑誌論文はインターネットを通じてダウンロード可能)、研究目的を達成した。

(10) 本課題によって実験的に得られたイオンビーム軌道の形状データ・諸データは、国内外で唯一であり、国内外で利用されはじめ、高い評価を受けるに至っている。本課題とは異なる様々な条件に対してのイオンビーム軌道データの取得および公開が望まれており、本課題終了後もデータ取得および発信をしていきたい。

(11) VITならびにVIT-2はイオンエンジン作動を視覚的に容易に理解できるため、他大学・他機関から多くの見学者をお迎えし、イオンエンジンや宇宙用ロケットエンジンの理解にもお役立ていただくことになった。また、VIT-2はイオン生成を故意に不均様にできるため、その影響評価を行い、派生成果として国内外の会議を通じて報告した。

(12) 本課題は、国内外の発表やコミュニケーションを通じて、数多くの貴重なご助言によって進められたものである。本課題終了後も継続して進めていける成果を挙げられたことに謝意を表したい。

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3件)

- ① 中山宜典、イオンエンジンビーム軌道の高精度可視化計測、航空宇宙技術、査読有、11巻、2012年、pp.51-56、DOI: 10.2322/astj.11.51
https://www.jstage.jst.go.jp/article/astj/11/0/11_0_51/_article/-char/ja/
- ② 中山 宜典、中野 正勝、可視化イオンエンジンによるイオン抽出系評価、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 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論文集、査読有、JAXA-RR-09-004、2010年、pp.60-65、http://repository.tksk.jaxa.jp/dr/arc/japan/contents/AA0064642000/64642000.pdf?IS_STYLE=jpn
- ③ Yoshinori Nakayama、Experimental Visualization of Ion Thruster Discharge and Beam Extraction、Trans. JSASS Space Tech. Japan、査読有、Vol. 7、2009年、pp. Pb_29-Pb_34
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tstj/7/ists26/7_ists26_Pb_29/_article

[学会発表] (計9件)

- ① 中山宜典、可視化イオンエンジンにおける中性粒子分布計測の試み、平成23年度宇宙輸送シンポジウム、2012年1月20日、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (神奈川県)
- ② 中山宜典、イオンビーム軌道計算コード検証用の可視化計測結果、第55回宇宙科学技術連合講演会、2011年11月30日、愛媛県県民文化会館 (愛媛県)
- ③ Yoshinori Nakayama、Validation Data for Ion Thruster Beam Optics Simulation、32nd International Electric Propulsion Conference、2011年9月12日、Wiesbaden Kurhaus (Wiesbaden, Germany)
- ④ Yoshinori Nakayama、Experimental and Numerical Evaluation of Multi-Ion-Beam Optics、47th AIAA Joint Propulsion Conference、2011年8月12日、San Diego Convention Center (San Diego, USA)
- ⑤ Ikkoh Funaki、Yoshinori Nakayama、他6名 (5番目)、A Numerical Tool for Lifetime Evaluation of Ion Thruster

s Ion Optics、47th AIAA Joint Propulsion Conference、2011年8月12日、San Diego Convention Center (San Diego, USA)

- ⑥ 中山宜典、岩崎純一、イオンビーム軌道の2次元可視化、第51回航空原動機・宇宙推進講演会、2011年3月4日、広島YMCAホール (広島県)
- ⑦ 岩崎純一、中山宜典、可視化イオンエンジンによるビーム軌道計測、平成22年度宇宙輸送シンポジウム、2011年1月21日、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (神奈川県)
- ⑧ 中山宜典、岩崎純一、小栗崇督、不均一プラズマに対するイオンエンジンビーム軌道の2次元の評価、第54回宇宙科学技術連合講演会、2010年11月18日、静岡県コンベンションアーツセンター (静岡県)
- ⑨ 岩崎純一、中山宜典、2次元可視化イオンエンジンの大型化、平成21年度宇宙輸送シンポジウム、2010年1月14日、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 (神奈川県)

[その他]

本課題研究代表者ホームページアドレス (検証用可視化データ PDF へのリンク元) :
http://www.nda.ac.jp/cc/aerospace/lab/Propulsion/fc_nakayama.html

研究成果詳細を記載した学会発表論文③は ERPS (Electric Rocket Propulsion Society) を通じて、公開済 (購読料不要にてダウンロード可能)

ERPS アドレス :

<http://erps.spacegrant.org/>

論文掲載アドレス :

https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Ferps.spacegrant.org%2Fuploads%2Fimages%2Fimages%2Fiepc_articledownload_1988-2007%2F2011index%2FIEPC-2011-055.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 宜典 (NAKAYAMA Yoshinori)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号 : 80532770

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし