

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04573

研究課題名(和文)電気推進機推進剤の希薄動圧計測評価

研究課題名(英文)Rarefied Dynamic Pressure Measurement for Electric Propulsion Propellant Flow Evaluation

研究代表者

中山 宜典(Nakayama, Yoshinori)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授

研究者番号：80532770

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文):地上試験装置(真空装置)内作動時と宇宙空間作動時との推進性能差を知るため、電気推進機推進剤の希薄流れに着目し、光ファイバを利用した希薄動圧計測器の小型化および高精度化を図り、設置姿勢によらず計測できるように改良を行った。この計測器を用いて真空装置内の推進剤流れを3次元計測した結果、真空装置壁面反射による影響、および真空ポンプ排気による影響が真空装置内全域にわたり影響を与えており、それが推進性能に差異を生む原因となることが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、真空装置内における推進機的位置や設置方向によって推進性能に影響を与えることだけでなく、推進機のパフォーマンスを評価する様々な計測器もその位置や設置方向によって計測妥当性に影響を与えることが直接的に確かめられた。また真空ポンプ排気の可視化にまで成功しており、電気推進機推進性能の妥当評価に貢献できるだけでなく、真空装置の設計や数値解析等、宇宙工学以外にも寄与できると十分推察される。

研究成果の概要(英文): In order to estimate the difference in electric propulsion thruster performance between the operation in the ground test facility (vacuum chamber) and the operation in space, rarefied dynamic pressure measuring instrument using an optical fiber was miniaturized and modified to be able to detect the rarefied propellant flow regardless of the installation position/attitude. Through the three-dimensional measurement of the propellant flow in a vacuum chamber using this instrument, it was confirmed that the effect of the vacuum system wall reflection and the effect of the vacuum pump evacuation affected the flow in the whole of the vacuum chamber and the adequate thruster performance evaluation.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：宇宙推進工学 電気推進 推進剤 希薄気体 圧力計測 真空工学 宇宙工学 可視化

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) イオンエンジンやホールスラスタ等の電気推進機は、これまでのたゆまない研究開発により、推進剤を節約できる宇宙用ロケットとして宇宙機に搭載されるようになってきた。

(2) 電気推進機の研究開発は地上試験装置（真空装置）内で行われるが、地上試験装置内作動では、宇宙空間作動と異なり推進剤が真空ポンプで排気されるまで滞留し続け、推進機に逆流して推進機推進性能に影響を与える。その影響（推進性能差）を知ることができれば設計開発や改良に寄与できるが、真空装置内で主となる粒子は推進剤の中性粒子であり、希薄でもあることから直接計測が困難であり、より多くの性能確認試験を要していた。

(3) 申請者が独自開発した希薄動圧計測器は、懸架した極細光ファイバの上端から導光したLED光を下端側に設けた小型カメラで計測するしくみであり、研究開始前において、計測分解能約0.1 mPaで水平面方向の希薄動圧ベクトルを計測できていた。〈図1〉

### 2. 研究の目的

(1) この希薄動圧計測器の小型化および高精度化を行い、真空装置内における電気推進機推進剤の流れを3次的に計測・推測し、電気推進機作動に与える影響を知ることが目的である。

(2) 研究開始当初は垂直方向の計測ができなかったため、空間的緻密な計測を行うことにより、水平面方向は計測値直読で、垂直方向は水平面方向流れ計測値からの数値的類推で把握する予定であった。

### 3. 研究の方法

(1) 本計測器は3つの技術（ファイバ加工技術・ファイバ支持構造・撮像データ解析アルゴリズム）から成立しており、これらを基礎から見直して再設計することにより小型化と高精度化を同時に達成させるとともに、空間的緻密な計測のため移動機構を、時間分解能向上のために電子計算機を導入し、真空装置内の推進剤流れを詳細に計測し考察する計画とした。

(2) 初年度は計測器の小型化・高精度化および計測準備（移動機構の真空装置内設置）、第2年度は様々条件に対する3次元計測、第3年度は計測結果まとめ・報告、とする計画であった。

### 4. 研究成果

(1) 光ファイバの懸架方法（支持方法）を工夫し、ROI（一部の画素領域だけを計測できる）機能を有する小型カメラを適用した結果、 $20 \times 45 \times 75$  mm（キャラメル箱相当）の大きさで計測分解能0.004 mPa（4 micro-Pa）であることがわかった。また撮像データ解析アルゴリズムの改良により計測精度向上（計測誤差抑制）が認められた。これらは研究開始前に比べ、容積比約15%、計測速度比約3.3倍、計測性能比約4倍であり、十分な小型化・高精度化が達成された。〈図2〉

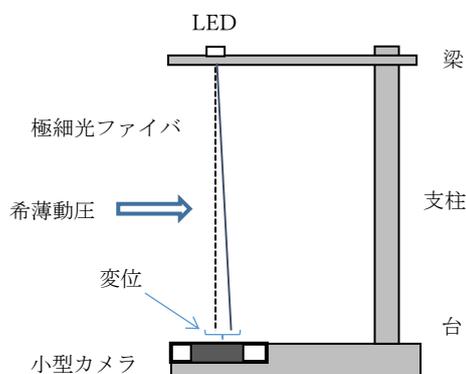


図1 希薄動圧計測器概要  
光ファイバ端光面の変位を撮像するしくみ

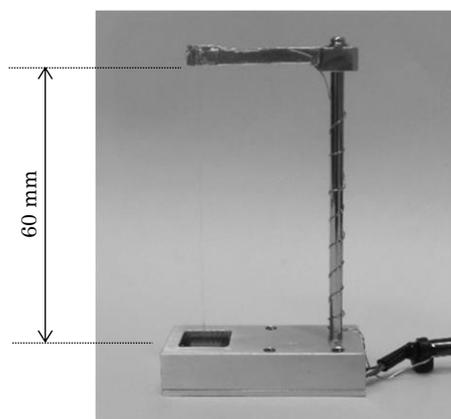


図2 改良型希薄動圧計測器  
設置姿勢によらず高精度計測可能

(2) 上記改良に加え、新たな工夫を加えた結果、計測器の設置姿勢（重力方向）によらず計測できるようになり、垂直方向も直接計測が可能になった。すなわち、従来の計測器では水平面方向流れ計測値から垂直方向流れを数値的類推するしかなかったが、垂直方向流れ計測も水平面方向流れ計測と同等の計測精度で評価できるようになった。〈図2〉〈エキストラ成果〉

(3) 真空装置内に設置できる移動機構の設計・導入・設置を行い、位置精度および繰返し精度が十分であることを確認した。長時間を要する多点計測となるため、自動計測・制御できるように計測制御ソフトウェアを自主開発した。〈図3〉

(4) これらを用いて、直方体形状真空装置内の推進剤流れを用いて3次元計測した結果、宇宙空間作動時では等方拡散的流れとなるのに対し、真空装置内においては真空装置の影響を強く受けることが確かめられた。特に真空装置壁面における推進剤反射の影響、および真空ポンプによる排気の影響、はそれらの近傍だけでなく、真空装置内全域にわたり影響を与えていることが確かめられた。〈図4〉

(5) これは真空装置内における推進機的位置や設置方向によって推進性能に影響を与えることだけでなく、推進機の性能を評価する様々な計測器（真空計、電流計、エネルギーアナライザ等）もその位置や設置方向によって計測妥当性に影響を与えることを意味している。これらは数値解析によって推論されていたものであるが、本研究によってはじめて直接示せた成果である。  
 〈位置づけ・インパクト〉

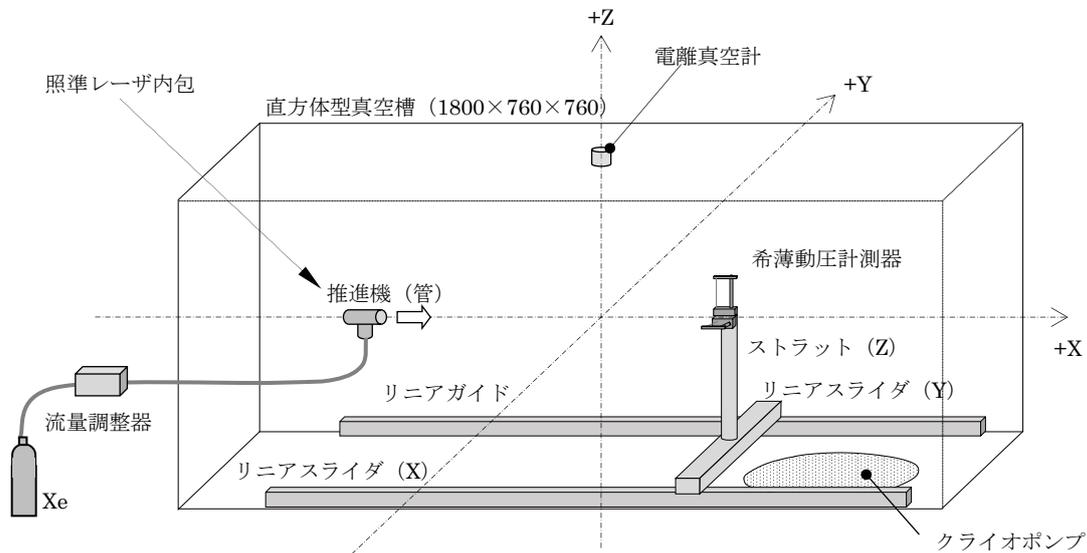


図3 実験装置概略（一例）

計測器2台（水平面用・垂直面用）を移動機構に上載して計測

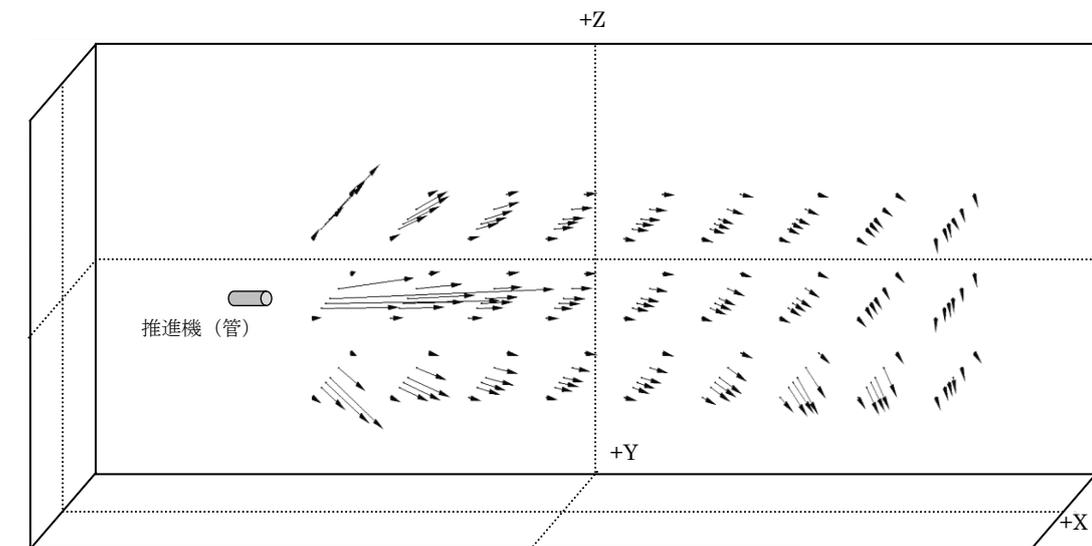


図4 希薄推進剤流れ直接計測結果（一例。図3参照）

（希薄動圧は流れの不均様性を示しており、壁面反射・真空排気の影響が表れている）

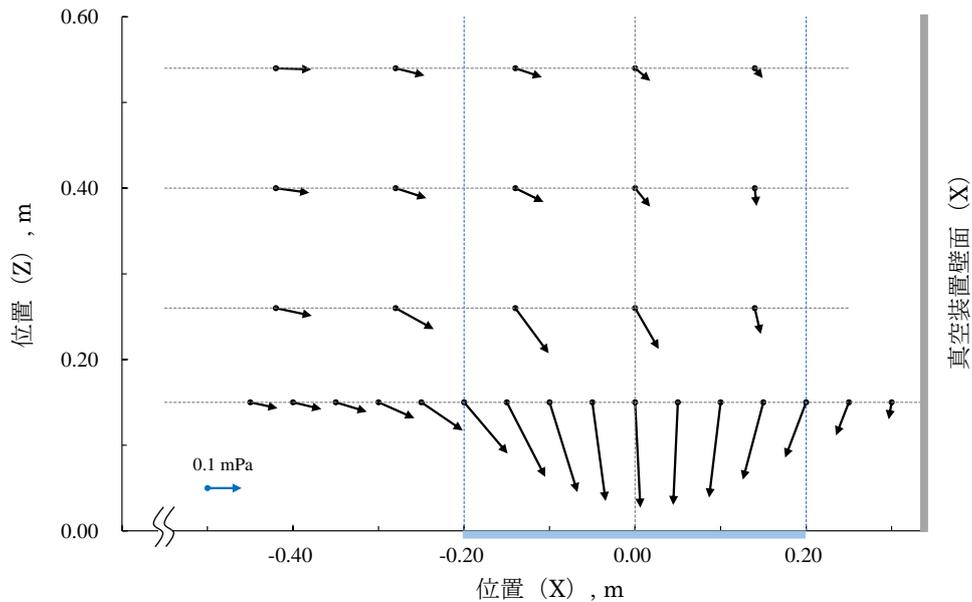


図5 真空ポンプ近傍の希薄動圧ベクトル（垂直面方向）

（真空ポンプは入射粒子の一部を反射させない装置であり、希薄動圧を発生させる）

(6) また真空ポンプの排気による影響は、真空ポンプを見込む立体角と強い相関性があることが確かめられた。大学等の研究機関で汎用する小型真空装置の真空ポンプは1台ないし2台であり、推進機や気体放出機器を、真空ポンプを見込む立体角値がなるべく小さい地点・領域に設置することが適正評価のために望ましいといえ、本計測器はこれらの評価確認手段として有用であると考えられる。〈図5〉〈新たな知見〉

(7) 本研究の希薄動圧計測器は真空槽の大きさに比べ十分小型であり、真空槽内の希薄流に影響を与えにくいと考えられる。この計測器を用いて壁面反射の影響を評価すれば、実利用中の壁面（非清浄、被損傷等）に適した適応係数やガス粒子反射モデルを検証できる可能性があり、DSMC法などの希薄流コードに適用することによって、より妥当な解析結果取得に寄与できると考えられる。〈今後の展望〉

(8) 本計測器の動圧分解能は約0.004 mPaであり、複雑な形状をした真空槽内の流れやフランジ面からのガスリーク評価にも寄与できると考えられる。また計測誤差が大きい静圧計測（～30%）を補正・補間できる可能性がある。〈今後の展望〉

(9) これらの成果は、学術雑誌（査読付）4件、国際会議2件、国内会議3件として、いずれも単著にて報告した。

(10) 当初の目的を十分達成したことに加え、真空ポンプ排気の可視化にまで成功しており、電気推進機推進性能の妥当評価に貢献できるだけでなく、真空装置の設計や数値解析等、宇宙工学以外にも寄与できると十分推察される。したがって本研究実施による学術的意義は十分あったと言える。〈位置づけ・インパクト〉

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshinori Nakayama	4. 巻 17
2. 論文標題 Propellant Flow Analysis within Electric Propulsion Test Facility	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 276-281
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.17.276	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 NAKAYAMA Yoshinori	4. 巻 18
2. 論文標題 Rarefied Propellant Flow Vector Measurement within a Vacuum Chamber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 174 ~ 179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.18.174	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中山 宜典	4. 巻 86
2. 論文標題 真空ポンプ近傍の希薄動圧分布計測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 20 ~ 00167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00167	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 中山 宜典	4. 巻 68
2. 論文標題 真空排気装置内における電気推進機推進剤流の3次元計測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 204 ~ 211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/jjsass.68.204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yoshinori Nakayama
2. 発表標題 Rarefied Propellant Flow Vector Measurement within a Vacuum Chamber
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinori Nakayama
2. 発表標題 Three-dimensional Vector Measurement of EP Propellant Flow within a Vacuum Chamber
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山宜典
2. 発表標題 電気推進機推進剤希薄流の3次元計測
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山宜典
2. 発表標題 電気推進機推進剤流れ評価用希薄動圧計測装置の改良
3. 学会等名 第 62 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山 宜典
2. 発表標題 電気推進機推進剤流れの真空槽内多点計測
3. 学会等名 第 59 回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関