

ISSN 0389-4010
UDC 629.7.018,
629.7.036.7

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1282

14cmキセノンイオンエンジンの推力測定試験

宮崎勝弘・早川幸男・北村正治

1996年1月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

14cmキセノンイオンエンジンの推力測定試験*

宮崎 勝弘*¹ 早川 幸男*¹ 北村 正治*¹

Thrust Measurement of a 14-cm Xenon Ion Thruster

Katsuhiro MIYAZAKI*¹, Yukio HAYAKAWA*¹ and Shoji KITAMURA*¹

Abstract

The thrust of a 14-cm xenon ion thruster was directly measured. The ion thruster was set on a pendulum, and the displacement of the pendulum depended on the thrust. The displacement was measured using a laser displacement meter. Estimated error in the thrust measurement was about 1%. The measured thrust was compared with the calculated thrust derived from the ideal thrust with compensation of doubly charged ions and ion-beam divergence. It was found that the calculated thrust was about 103% of the measured thrust.

Keywords : ion thruster, beam divergence, electric propulsion, thrust measurement

概要

真空槽内で14cm(25mN級)キセノンイオンエンジンを振子に載せ、作動時の変位を測定することにより、推力を測定した。測定に影響を与える要因を検討した結果、誤差は1パーセント程度であることがわかった。

本測定で用いた推力測定装置の製作、調整、較正、実測等を通し、推力測定技術を確立することができた。

実測値を、理想推力にイオンビーム広がりと2価イオンの補正を加えた計算値と比較した結果、両者はよく一致した。計算により求めた推力は実推力の103パーセント程度になることがわかった。

はじめに

イオンエンジンは荷電粒子を静電的に加速し、その反力によって推力を得る人工衛星用の推進機である。この原理により、イオンエンジンの推力は荷電粒子の数あるいはそのエネルギーを制御することによって、極めて容易かつ精密に制御することが可能である。

理想的なイオンエンジンは、等しい運動エネルギーを有する荷電粒子を、完全に平行に加速する。しかし現実のイオンエンジンでは、荷電粒子のエネルギーを等しくすることもこれらを完全に平行に加速することも非常に困難であり、このために現実のイオンエンジンの推力は理想

的なイオンエンジンのそれよりも小さくなる。この推力の低下については他の測定等によってある程度の予測がつくが、予測がどの程度正確であるかについては実推力を測定しなければ評価できない。

そこで実推力を測定するための推力測定装置¹⁾を製作し、測定を試みた。この装置はイオンエンジンを振子に載せ、作動時の振子の位置の変化から推力を求める方式のものである。装置を較正するために分銅を使用した。当初はこの使用法が適切でなく、振子の変位が大きいときに誤差が生じるという問題があった。今回は分銅の使用法を変更し、この部分の誤差を無くして測定を行った。

* 平成7年10月25日 受付 (received 25 October 1995)

*¹宇宙研究グループ (Space Technology Research Group)

第1章 推力測定方法

推力測定装置の概略図を図1に、測定装置の写真を図2(a), (b)に示す。図2(a)はエンジン側から、(b)は較正装置側から見たものである。この装置は文献¹⁾に示したものに若干の改良を加えたもので、主な改良点については付録1で述べる。この装置による測定原理を図3に示す。これはイオンエンジンを振子上に設置し、推力を発生しているときとしていないときの振子の位置をそれぞれレーザ変位計で読み取り、その振れ幅から推力の値を求めようとするものである。図中のバネに相当するものは、イオンエンジンに電力を供給する配線と、推進

剤を供給する配管の弾性である。また減衰器は振子の振れを急速に減衰させるために取り付けられたものである。

以下で頻出する「較正」のここでの定義は、力と振子の振れ幅の関係を求めることである。この力は水平方向に作用し、かつ大きさが正確に求められるものでなくてはならない。そのためここでは精密に測定された分銅と滑車を使用して水平方向の力を発生させている。較正は一連の推力測定の前後で行い、推力測定時の較正線の信頼性を確保している。

イオンエンジンは発熱体であるため、測定装置は温度変化の影響を受け、レーザ変位計の出力値は緩やかではあるが大きく変動する。変動が十分に小さくなるまでに

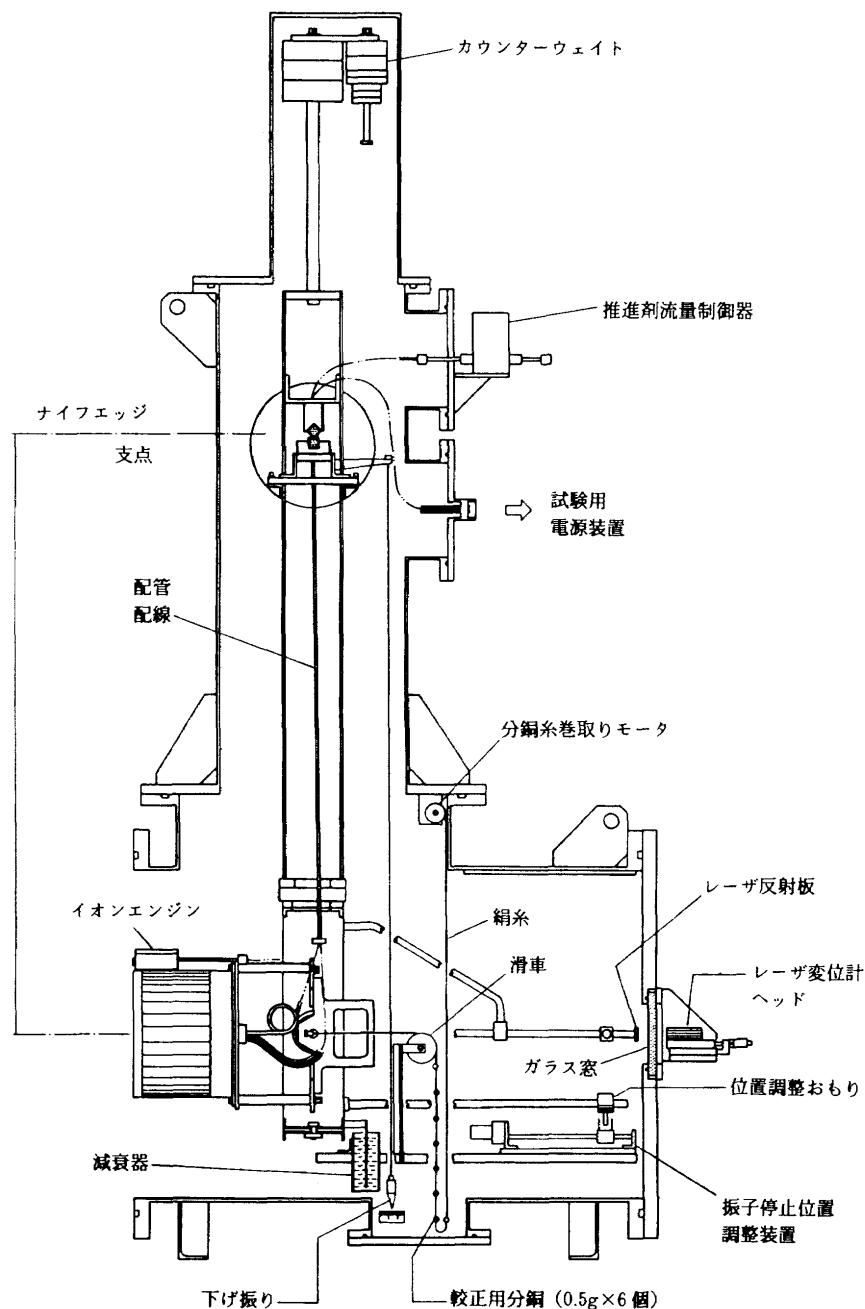
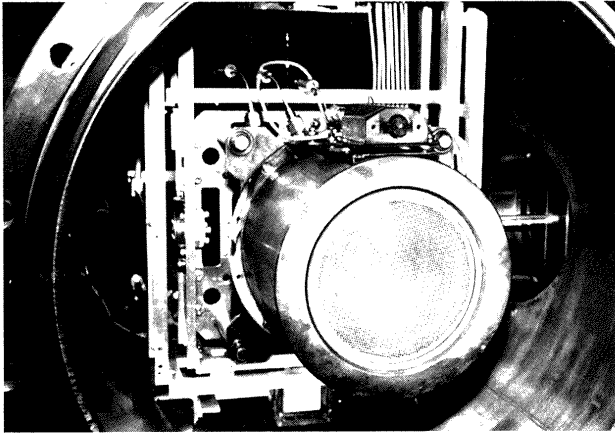
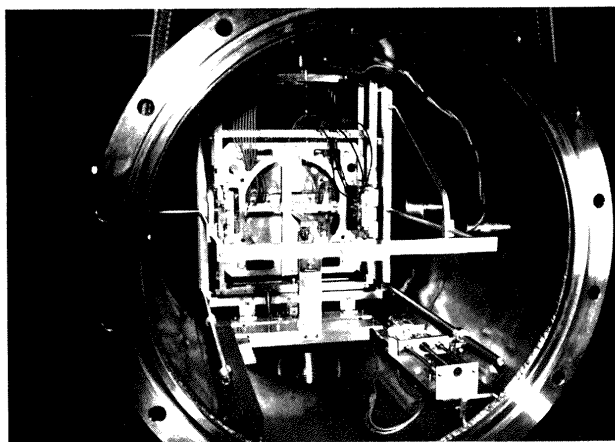


図1 推力測定装置の概略図



(a) エンジン側



(b) 校正装置側

図2 測定装置写真

は、非常に長い時間の連続運転をしなくてはならない。一方推力測定においては推力を発生・停止させなくてはならず、それぞれの状態で発熱量が異なるのでこの条件は満たされない。このため推力を求める基礎となる振幅を求める際の2回の位置測定は、レーザ変位計の出力値の変動に比べて、十分短い時間間隔で行われなくてはならない。そこで位置測定の順序は、推力を発生している状態での測定を先に行い、推力を停止した状態での測定を後にした。反対の順序で振幅を求めることは適当でない。これはイオンエンジンは作動パラメータを設定してから推力が安定するまでに数分を必要とするからである。先に推力を停止している状態での測定を行うと、推力を発生している状態での測定までにこの数分が余分に必要になってしまう。実際の測定においては、振子の静止位置の変化による振動が減衰するまでの1分弱の時間間隔で2回の位置測定を行うことができた。

図4に測定に供したイオンエンジンを、その代表的作動条件および性能を表1に示す。推進剤のキセノンは各流量制御器から主陰極と分配器を通して放電室へ送られ、ここで電離される。供給された推進剤の約9割がイオンとして2枚の電極により加速され、残りは中性原子のま

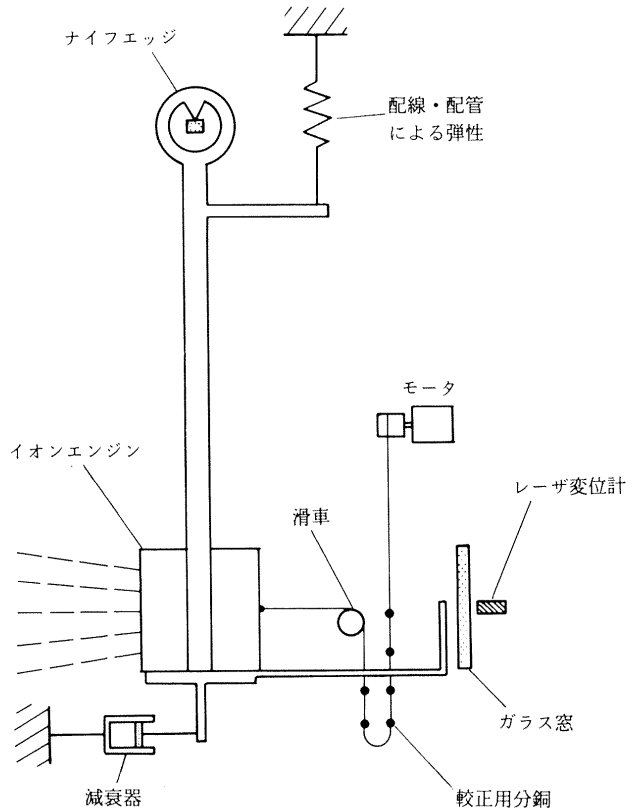


図3 推力の測定原理

表1 イオンエンジンの代表的作動条件および性能

公称推力	25mN
比推力 I_{sp}	3500s
ビーム電圧 V_b	~1035V
ビーム(イオン)電流 J_b	478mA
放電電圧 V_d	~32.5V
放電電流 J_d	~3.2A
加速電極電圧 V_a	-400V
主供給流量 \dot{m}_m	478mA 相当
主陰極流量 \dot{m}_c	53mA 相当
中和器流量 \dot{m}_n	90mA 相当
推進剤利用効率 $J_b / (\dot{m}_m + \dot{m}_c)$	90%
イオン生成コスト $V_d \cdot J_d / J_b$	~210W/A
$V_a \cdot (J_d - J_b) / J_b$	~180W/A

ま熱速度で電極孔から放出される。このイオンの内の数パーセントは2価イオンであり、損失の原因となる。また放電室内のプラズマの電位はほぼスクリーン電極電位と放電電圧の和であり、これがビーム電圧となりイオンの最終的な運動エネルギーを決定する。

第2章 測定結果

2.1 振子特性

振子に0.5gの分銅による力を6個分まで順次加えた後、力を取り去る一連の過程における振子の変位を図5

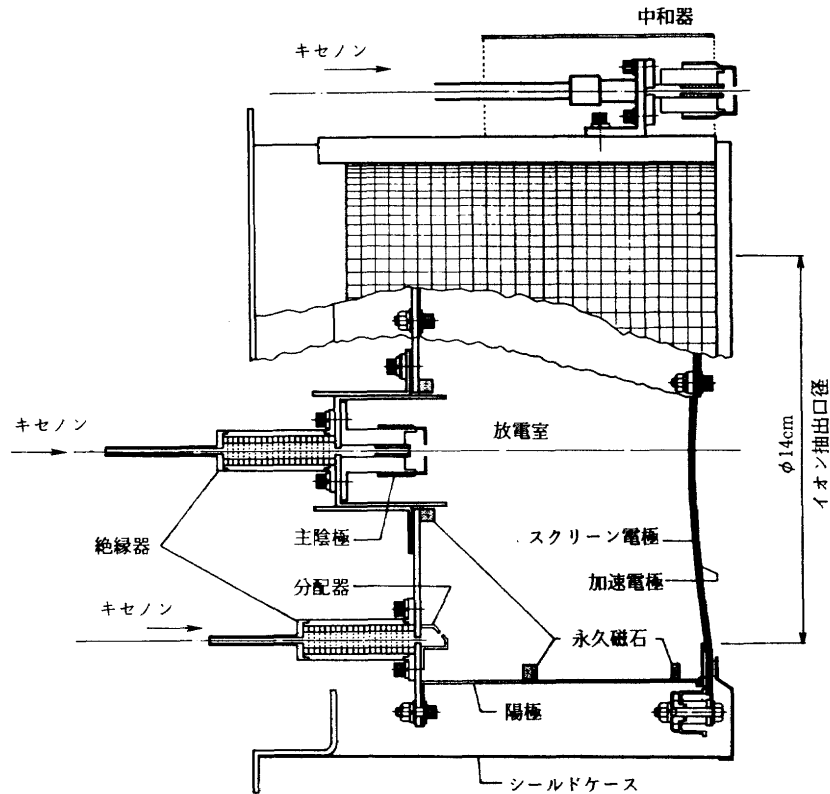


図4 供試体 (カスプ型イオンエンジン)

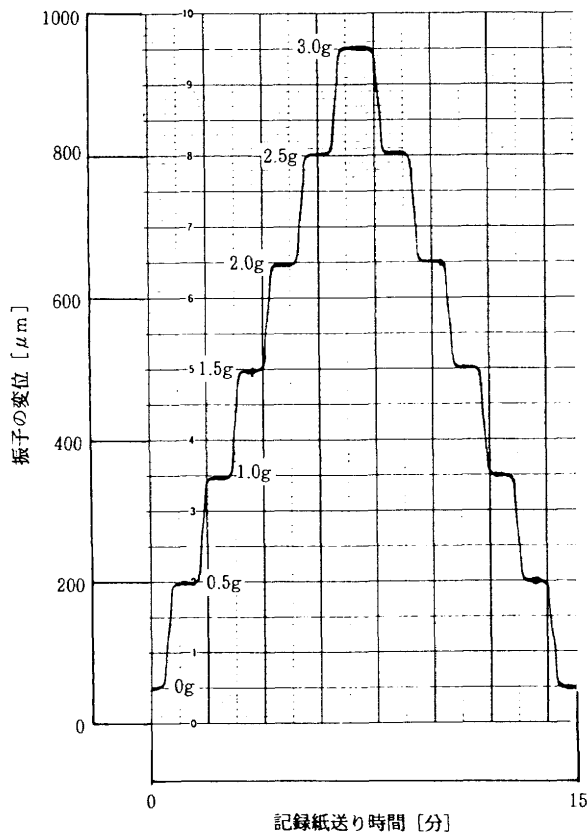


図5 分銅による力と振子の変位 (エンジン非作動状態)

に示す。原点の位置にはほとんど変化が無く、振子本体には履歴の問題がないことがわかる。また測定の再現性にも特に問題がないことも確認した。

2.2 較正

表2に分銅によって得られた振れ幅と分銅の重量の関係を示す。この測定を行っている間、供試イオンエンジンは温度を保つために放電モード(イオンを引き出すための電圧を加えていない状態)で作動している。一連の推力測定には数時間を要したが、推力測定前と測定後の較正において振れ幅は1g以下を除いてあまり変化をしていないことがわかる。図6は表2をもとに振子に加わる力と振れ幅の関係を図で示したものである。両者の間には極めて良好な直線関係があり、数値処理をすることによって振れ幅から精度良く推力を求めることができることがわかる。最小二乗法によれば、振れ幅 D_p (μm)

表2 推力測定前後の較正における振子の振れ幅の比較

分銅重量 g	振子振れ幅 μm	
	測定前	測定後
0.5	148.0	152.2
1.0	299.4	305.0
1.5	453.8	453.0
2.0	609.2	610.0
2.5	762.4	764.8
3.0	922.8	922.4

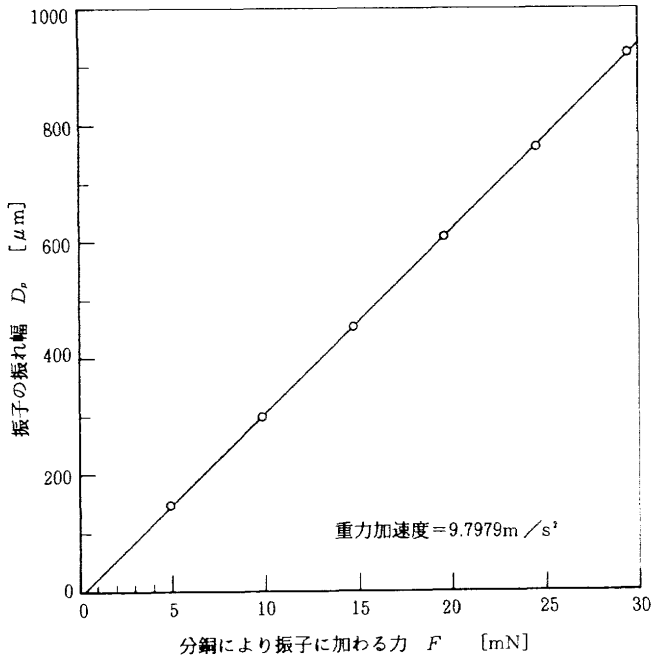


図6 振子に加わる力と振幅の関係

と推力 F (mN) の間には
 $F = 0.03165 D_p + 0.2943$
 の関係がある。

図7にイオンエンジンの定常作動時における振子の静止位置が時間経過に伴ってドリフトする様子を示す。位

置の変化を振幅と見なし、これを推力の変化に換算すると、推力の変化量は測定直前で0.01 (mN/分) となる。今回の測定では最大でも1分以内に個々の測定を行っているので、熱の影響による誤差は最悪でもこの程度に収まっている。実際には分銅による振幅の測定にも同じ影響が現れるので、誤差はこれよりも小さいと考えられる。

2.3 推力測定

表3にビーム電圧、加速電極電圧およびビーム電流をパラメータとして変化させたときの測定結果をまとめた。推進剤利用効率はいずれも90%になるように推進剤流量を調整している。表中でターゲット電流比というのは、イオンエンジンの正面の4m程度離れたところに置かれた直径2.4mのイオンターゲットに流れ込むイオン電流をビーム電流で除した値のことで、これが大きいほどイオンビームの収束性がよいことを示している。また図8から図10までに各パラメータと推力の関係を示す。図8はビーム電流と推力の関係を示し、図9はビーム電圧の平方根と推力の関係を示している。推力がビーム電流とビーム電圧の平方根にほぼ比例していることがわかる。図10は加速電極電圧と推力の関係を示している。加速電極電圧と推力の間には、わずかな負の相関が見られる。

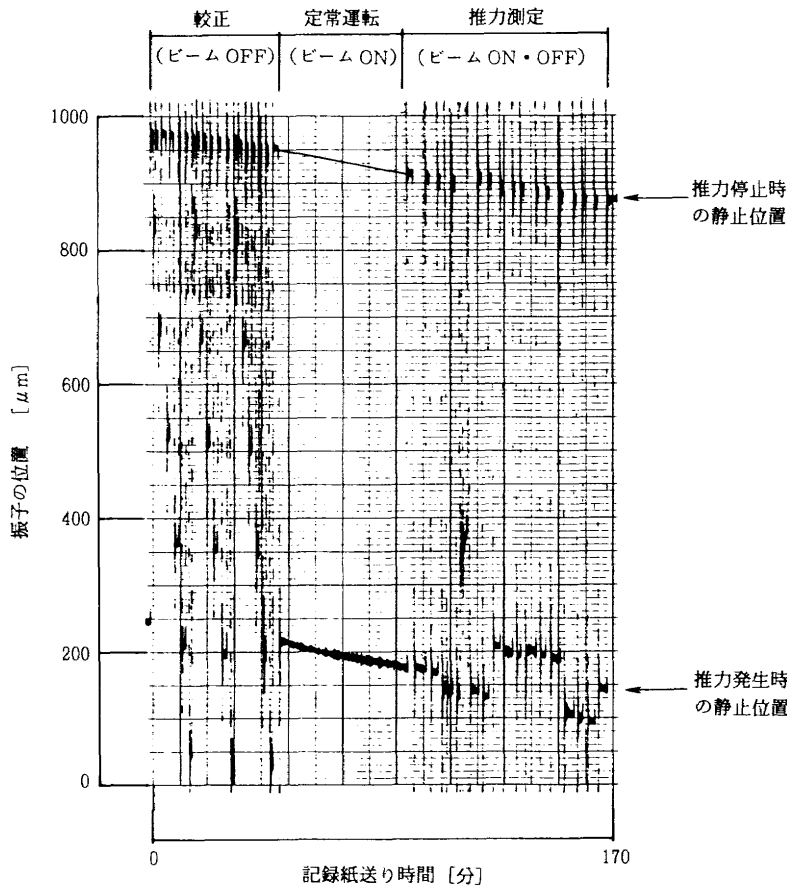


図7 時間経過に伴う振子の平衡停止位置の変位

表 3 各パラメータでの推力測定結果一覧

ビーム電流 J_b mA	ビーム電圧 V_b V	加速電極電圧 V_a V	振子振幅 D_p μm	測定推力 F_a mN	推力比較 F_a/F_i %	理想推力 F_i mN	ターゲット電流比 J_i/J_b %
478	1034	-400	736.0	23.59	92.98		73.4
478	1035	-300	737.6	23.64	93.18	25.37	77.4
478	1035	-200	740.0	23.72	93.50		81.0
479	1134	-400	768.0	24.60	92.62		71.2
478	1134	-300	771.4	24.71	93.03	26.56	75.5
478	1135	-200	773.2	24.77	93.25		79.1
478	936	-400	691.8	22.19	91.96		74.1
478	936	-300	697.0	22.35	92.62	24.13	79.3
478	936	-200	700.2	22.46	93.08		82.6
451	1036	-400	690.2	22.14	92.44		71.8
451	1036	-300	692.6	22.22	92.78	23.95	76.5
451	1036	-200	695.8	22.32	93.19		80.3
504	1035	-400	773.4	24.77	92.60		74.2
504	1035	-300	777.8	24.91	93.12	26.75	78.8
504	1035	-200	779.4	24.96	93.31		81.9

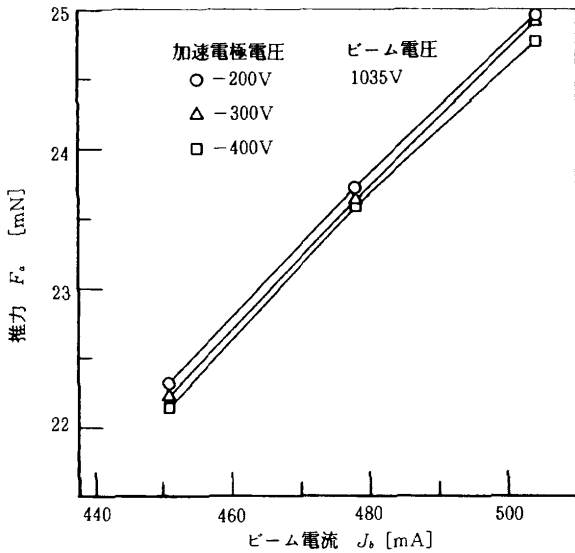


図 8 ビーム電流と推力の関係

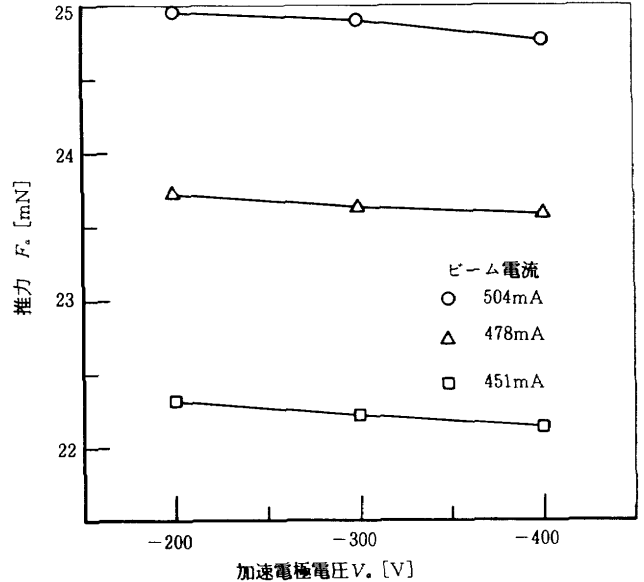


図 10 加速電極電圧と推力の関係

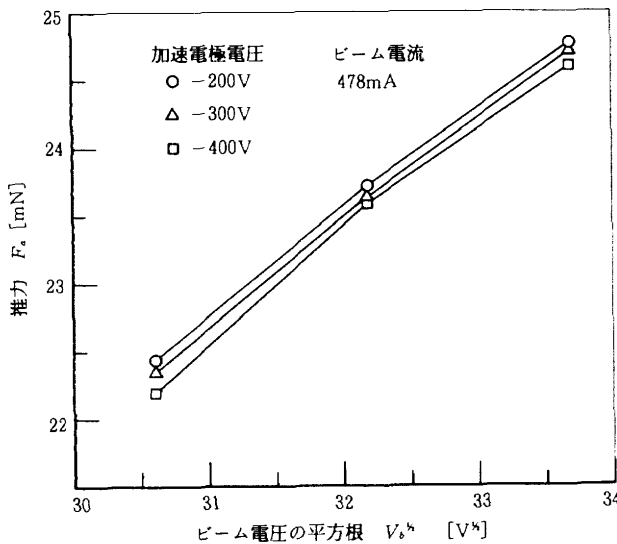


図 9 ビーム電圧と推力の関係

これは加速電極電圧はイオンのエネルギーには無関係であるが、後述するイオンビームの広がりに関わっているため、結果的に推力にわずかな影響を及ぼすためと考えられる。

なお、推力測定結果の誤差の評価については、付録 2 に示す。

第 3 章 推力損失

理想的なイオンエンジンの推力 F_i (N) は次式で与えられる。

$$F_i = J_b \sqrt{\frac{2m_i V_b}{e}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで J_b はイオンビーム電流 (ビーム電流) (A), m_i はキセノンイオンの質量 ($131.3 \times 1.661 \times 10^{-27}$ kg), V_b はイオンを加速するときの電圧 (ビーム電圧) (V), e は素電荷 (1.602×10^{-19} C) である。供試イオンエンジンの標準的な値として, ビーム電流 $J_b = 478$ mA, ビーム電圧 $V_b = 1035$ V を代入すると, 理想推力 $F_i = 25.37$ mN を得る。

3. 1 2価イオンによる推力損失

荷電粒子の運動エネルギーが一定にならない理由としては, 次の2項目があげられる。

1. イオンが熱速度を持っている。
2. イオンの電荷が一定でない。

このうち1については, イオンを生成する放電室の温度が高々480Kであり, イオンの熱運動のエネルギーは0.5eV以下となり, 約1000eVの並進運動エネルギーに比べて無視できるほどに小さい。一方2については, 現実的には3価以上のイオンは微量であり, 問題となるのは大多数の1価イオンに数パーセント混ざっている2価イオンである。(1)式はすべてのイオンが1価であると仮定した場合のものであり, 1価イオン電流に対する2価イオン電流の比を λ としたときの推力 F は

$$F = \alpha F_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ここで α を2価イオンによる推力補正係数と呼び,

$$\alpha = \frac{1 + \lambda / \sqrt{2}}{1 + \lambda}$$

である³⁾。例として $\lambda = 0.09$ を代入すると, $\alpha = 0.976$ となる。電流比 λ は, 同じ電圧で加速された場合の1価イオンと2価イオンの速度が違うことを利用して, E×Bプローブによって測定することができる^{4), 5)}。

3. 2 ビーム広がりによる推力損失

次にイオンビームの平行度の影響についてであるが, イオンビーム中のイオンの軌道は, ほぼ軸対称であると推定できる。この他に次の二つの仮定を導入する。

仮定1: 空間中の1点において, 全てのイオンは同一の速度ベクトルを持つ。

仮定2: イオンエンジンからある程度離れたところにおいては, イオンビームは単調に広がる。すなわち, イオンエンジンからの距離を z , 中心軸からの距離を r で示すと, $z_1 > z_0$ のとき, $z = z_0$ で $r = r_0$ を通過したイオンは $z = z_1$ では $r_1 \geq r_0$ なる r_1 を通過する。また $z = z_0$ で $r_2 > r_0$ なる r_2 を通過したイオンは $z = z_1$ で $r_3 > r_1$ なる r_3 を通過する (図11)。

以上のように仮定することにより, イオンエンジンの

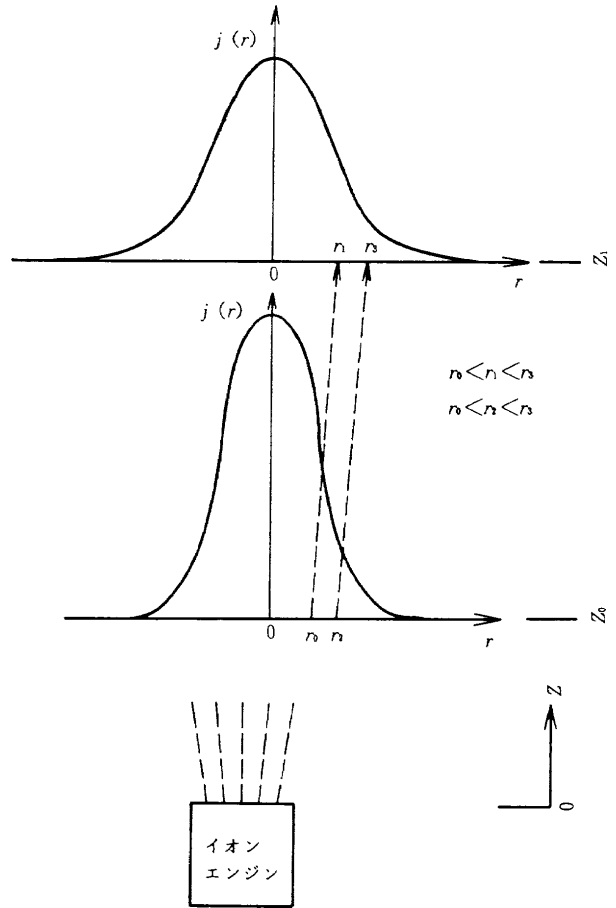


図11 ビーム広がり測定における仮定2の説明

推力は次式で表すことが可能となる。

$$F = \gamma F_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, γ をビーム広がりによる推力補正係数と呼び, これはイオンエンジンからある程度離れた場所におけるイオン電流密度 $j(r)$ を用いて次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{1}{J_b} \int_0^\infty 2\pi r j(r) \cos \theta dr$$

ここで r は中心軸からの距離, θ は半径 r から $r + dr$ までの円環部を通過するイオンが中心軸と成す角度である。イオン電流密度 $j(r)$ はファラデーカップを用いて測定することができる^{3), 4), 5)}。またここでの J_b は電源側の電流計によるものではなく

$$J_b = \int_0^\infty 2\pi r j(r) dr \quad \dots\dots\dots (4)$$

によって求めたものを使う。これにより, ファラデーカップによる測定では電流密度の相対値を得ればよいことになり, 測定誤差が大幅に減る。

以上によりイオンエンジンの計算推力は,

$$F_c = \alpha \gamma F_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表される。なお, 計算推力を求める過程での誤差の評

値については、付録 3 に示す。

第 4 章 計算推力と実推力との比較

2 価イオンによる補正係数 α を求めるために必要な λ は、文献⁹⁾ のデータを参考にした。文献中のイオンエンジンは今回の測定に使用したものとはほぼ同一であるが、今回はおそらく主陰極の状態が良好でないために放電電圧が概して 3 V 程度高めである。 λ は放電電圧と推進剤利用効率に影響されるので、今回の測定の場合と正確に一致する取得済みのデータは無いが概ね $\lambda \approx 0.09$ と推定される。 $\lambda = 0.09$ 近傍の α と λ の関係を図 12 に示す。図中の λ として予想される範囲の上限は放電電圧のみを根拠にした場合、下限は推進剤利用効率のみを根拠にした場合である。これにより、 α は、 0.976 ± 0.005 の範囲で収まることがわかる。

イオンビームの広がりによる補正係数 γ を求めるためのデータは、今回新たに測定を行って求めた。測定は $z = 80\text{cm}$ から 140cm まで 30cm 間隔で行い、 γ を求めるのに加速電圧が -200V と -300V のときには $z = 110\text{cm}$ および 140cm のデータを、 -400V のときには $z = 80\text{cm}$ および 110cm のデータを使用した。 z を大きく取った方が広がり単調性の点で望ましいが、大き過ぎるとファラデーカップの可動範囲の関係で大きな発散角を持つイオンが測定されず、(4)式が満たされなくなることからこのような z の組み合わせを選んだ。結果を表 4 に示す。表 5 には $\alpha = 0.976$ としたときの $\alpha \gamma$ の値を示す。

表 6 は表 5 の推力損失補正係数に基づく計算推力 F_c を表 3 の実推力 F_a で除した値を示す。これから比 F_c / F_a が 1.02 から 1.04 の範囲に収まっているということが

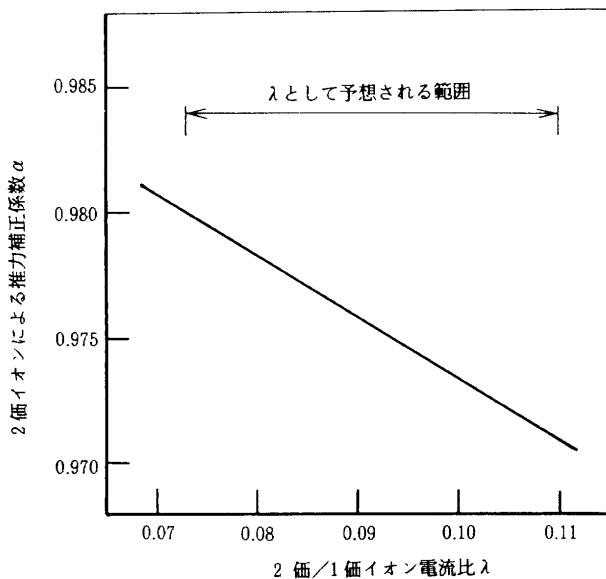


図 12 2 価対 1 価イオン電流比 $\lambda = 0.1$ 近傍の α と λ の関係

表 4 ビーム広がり影響のみによる推力損失補正係数 γ

加速電極電圧 ビーム電流	-200V (Z=110/140)	-300V (Z=110/140)	-400V (Z=80/110)
504mA	0.992	0.982	0.978
478mA	0.987	0.983	0.975
451mA	0.982	0.984	0.976

表 5 ビーム広がり と 2 価イオンによる推力損失補正係数 $\alpha \gamma$

加速電極電圧 ビーム電流	-200V (Z=110/140)	-300V (Z=110/140)	-400V (Z=80/110)
504mA	0.968	0.958	0.955
478mA	0.963	0.959	0.952
451mA	0.958	0.960	0.953

表 6 計算推力 F_c の実推力 F_a に対する比 F_c / F_a

加速電極電圧 ビーム電流	-200V	-300V	-400V
504mA	1.037	1.029	1.031
478mA	1.035	1.035	1.035
451mA	1.028	1.035	1.023

言える。

なお今回イオンビームの広がり測定を 2 度行ったが、それぞれから求めた γ の差は最大で 0.008 であった。

結 論

本研究によって、次の結論が得られた。

1. 本推力測定装置は、イオンエンジンの推力を十分な精度（付録 2 より総合誤差 0.42% ）で測定することができた。
2. 計算推力の基礎となるイオンビーム広がりおよび 2 価イオン電流比のデータが十分な確度で得られた場合、推力は計算推力から十分正確に予測できることがわかった。
3. 測定装置の精度向上に関し、次の指針を得た。
 - 1) 本装置は振子に分銅力を加える方法として滑車を使用し良い結果を得た。しかし滑車による誤差は相対的には大きく、より高精度の滑車を用いれば推力測定精度を上げることができる。
 - 2) イオンエンジンの発熱による構造材（主にアルミ合金）各部の熱膨張が起こり振子の静止位置が変化する。これが誤差の原因となることから熱膨張を小さくする工夫が望ましい。

引用文献

- 1) 宮崎勝弘；イオンエンジン推力試験装置の設計と製作 航空宇宙技術研究所資料 TM-669, 1994.
- 2) Y. Hayakawa, K. Miyazaki and S. Kitamura ; Ion Beam Characteristics of a 14-cm Xenon Ion Thruster, AIAA paper 94-2852, 1994.
- 3) R. P. Vahrenkamp ; Measurement of Double Charged Ions in the Beam of a 30-cm Mercury Bombardment Thruster, AIAA paper 73-1057, 1973.
- 4) Y. Hayakawa, K. Miyazaki and S. Kitamura ; Performance Test of a 14-cm Xenon Ion Thruster, AIAA paper 92-3147, 1992.
- 5) H. Takegahara, et al. ; Beam Characteristics Evaluation of ETS-VI Xenon Ion Thruster, IEPC paper 93-235, 1993.

付録 1. 推力測定装置の改良

本推力測定装置は、引用文献 1) に示す旧装置に対し、次の改良を行ったものである。

(1) 較正方法の改良

本推力測定装置においては、既知の大きさの水平方向の力を振子に加えて、推力と振子の振れ幅の関係を求める必要がある(較正)。このため、重量を精密に測定した分銅を使用し、分銅に加わる鉛直方向の力を水平方向の力に変換する。

旧装置では、力の方向の変換のため、水平方向および鉛直下方方向に対し 135 度(斜め上方 45 度)をなす補助糸を使用した。すなわち、水平方向、鉛直下方方向および斜め上方 45 度の 3 方向における力の釣合から水平方向と鉛直方向の分力が等しくなることを利用した。

旧装置における補助糸の使用による較正では、次のような問題が生じた。水平方向、鉛直方向および斜め 45 度の糸の角度設定に誤差があると、推力測定精度を悪くする。このうち、水平方向と鉛直方向の角度設定の誤差は 2 次の微量となり、極めて小さいが、斜め 45 度の補助糸の角度設定誤差は 1 次の感度をもち、推力測定誤差にかなり影響する。試験初期に補助糸の角度を精度良く設定しても、測定試験の進行とともに変動が生じた。変動の原因には、振子および糸等の設置環境が大気から真空へ変わること(設定等は大気中で行うが、実測は真空中で行う)、およびイオンエンジンの発熱による振子の温度上昇がある。振子および糸等の設置環境が大気から真空へ変わると、乾燥により糸が縮む。また、大気中で作用していた振子の浮力がなくなり、振子の平衡停止位置が変化する。イオンエンジンの発熱による振子の温

度上昇は振子に熱膨張を生じさせ、これも振子の平衡停止位置を変化させる。

このような補助糸の角度誤差を取り除くため、様々な工夫をしたが、いずれも不十分であったため、本測定装置においては補助糸に替え滑車を使用した(本文図 3 参照)。滑車を使用する場合には、滑車の重量平衡、摩擦、真円度等が問題になる。重量平衡については、滑車をピボット軸受に取付けた状態で平衡調整をとり、重量平衡が十分とれていることを確認した。摩擦は、較正あるいは実測における振子の振動の振幅がほぼ零に収束することから、十分小さいことを確認した。真円度については、付録 2 で述べる方法で誤差を見積もった。

(2) 推力測定装置の取付けおよび調整の精度向上

本測定装置を納めた真空容器は、門型弁を介して真空槽に取り付ける構造となっているが、その取付精度は必ずしも良好ではない。真空容器を真空槽に取り付け、内部を真空にする際、真空容器は大気圧に押されて取付角に変動が生じる。このため、測定装置の調整を真空槽に取り付けられない状態で行っても、十分な精度は得られない。

この対策として、真空容器の傾斜を測定する下げ振りと振子の停止位置を調整する装置を新たに設けた。この下げ振りは、測定装置の入った真空容器に吊したもので、鉛直方向の基準を与える。測定装置自体はこれを基準方向として調整する。また、振子停止位置調整装置は、真空容器の外部から振子の平衡停止位置を変える機能をもつ。これらを利用し、真空容器が真空排気された後に、傾斜測定用の下げ振りを基準として振子の平衡位置を再調整することにより、測定装置の調整精度を向上させた。

(3) 振子の改良(振れに対する抵抗の低減と振れ幅の再現性の向上)

イオンエンジンの推力を振子の振れ幅から求めようとする推力測定装置では、発生推力相当の力による振子の振れ幅が精度良く測定できる必要がある。このためには、振れ幅が十分大きく、かつ振れ幅の再現性が良好でなければならない。旧装置においては、いずれにも不十分な点があったため、以下に述べるように、振子の軽量化、配線・配管方法の変更およびナイフエッジ抵抗の低減等を行い、振れに対する抵抗の減少および振れ幅の再現性の向上をはかった。

振子の振れ幅を増大させるには、振子を平衡位置に戻すように作用する重力モーメントを小さくすればよい。このため、振子、特にその腕部(エンジン取付け部)の軽量化をはかった。なお、カウンターウェイトを増加させて重心位置を上げ、重心と支点(すなわちナイフエッジ)の間の長さを短くすることによっても振れ幅は増大するが、この方法は、ナイフエッジに加わる荷重の増加をまねくため望ましくない。

推力測定装置には、エンジンに電力を供給する配線とキセノンを供給する配管が取り付けられている。配線・配管の片端は振子と共に動くが、他端は振子外にあり、真空容器につながっている。旧装置では、配線・配管は真空容器からエンジンへ直接つながれていた。このため、これらは振子の動きに対する抵抗となり、振子の振れ幅を減少させた。また、振子に対する配線・配管の位置が変わると抵抗も変わり、振子の振れ幅の再現性を悪くする原因でもあった。本装置においては、配線・配管の片端を振子に固定し、他端を真空容器に固定し、その際、配線・配管が振子の回転軸（すなわちナイフエッジ）の延長線を通るよう配置した。これにより、配線・配管の影響を最小にするとともに、配管・配線位置の移動による振れ幅の再現性の悪化を減らした。

ナイフエッジの抵抗を小さくするためには、その組立方法を改良した。本装置のナイフエッジは、設計の都合上2分割されている。2分割されたナイフエッジを一直線上にあるように組み立てれば、ナイフエッジ本来の機能が発揮できる。旧装置でのナイフエッジの組立は必ずしも高精度ではなかったため、組立治具を改良し、2分割されたナイフエッジを一体的に組み立てた後、装置に組み込む手順をとった。これにより、ナイフエッジとその座との当たりが改善され、振れ幅の再現性の向上にも寄与した。

付録 2. 実推力測定における誤差の評価

ここでは、推力測定装置を使用する推力測定にともなうて生じる誤差を見積もる。誤差には、推力測定装置の校正の段階で生じるものと実際の推力測定時に生じるものがある。

推力測定装置の校正では、既知の力を加え、加える力と振子の振れ幅との関係を得る。これに伴い、分銅重量、分銅・糸の浮力、滑車の精度（真円度・摩擦・重量非平衡）、振子の振れ幅の測定誤差、振子の変位の時間的ドリフト、

振子の変位測定精度および水平系の角度誤差を考慮する必要がある。

分銅重量については、重量計測用精密天秤の計測精度を考慮した。分銅・糸の浮力については、分銅と空気の密度・体積より誤差を推定した。滑車の精度については、下記に述べるような誤差評価試験を行った。振子の振れ幅の測定誤差については、レーザ変位計等の計測精度を考慮した。振子の変位の時間的ドリフトは、イオンエンジンの発熱による振子の熱膨張のため振子の平衡位置がずれることによって生じる。この誤差は、毎分のドリフト量と測定に要する時間から見積もった。振子の変位測定精度については、装置の校正に際しランダムに生じる誤差を考慮し、校正線を得るための最小2乗法による直線の当てはめにおける標準偏差として誤差を見積もった。水平系の角度誤差については、最大1度の水平系設定誤差を仮定した。

実際の推力の測定においては、振子の振れ幅の測定から、実推力値を得る。このときの誤差として、振子の振れ幅測定誤差、振子の変位の時間的ドリフトおよび推力軸の設定誤差がある。それぞれ、校正時の誤差の対応項目と同様の意味をもち、誤差も同一とした。推力軸の設定誤差として、エンジン取付け角度誤差およびビーム軸の傾き等を含め最大3度を仮定した。これらの誤差の見積を表 A に示す。

滑車の精度の見積は、次の方法で行った。推力測定に使用した滑車（滑車1）に糸を掛け、糸の片端に一定重量（公称推力値程度）の分銅（分銅1）を吊す。糸の他端は水平方向に延ばし、他の滑車（滑車2）を経由して、分銅1よりも重い分銅（分銅2）を吊す。この状態で分銅2を精密天秤上に載せると、精密天秤は両分銅の重量差を示す（指示値1）。次に、分銅1をもちあげ、分銅1による加重をとると、精密天秤は分銅2の重量を示す（指示値2）。指示値2から指示値1を引くと分銅1の重量となり、これが校正時に振子に加える力に相当する。

表 A 実推力測定における誤差

項目	代表値	誤差絶対値	相対誤差 (%)	備考
校正における誤差				
分銅重量	500mg	0.05mg	0.01	分銅1個当たり
分銅・糸の浮力	500mg	0.05mg	0.01	分銅1個相当
滑車の精度			0.2	別途試験による
振子の振れ幅測定誤差	800 μm	1 μm	0.1	計測器精度
振子の変位ドリフト			0.1	時間的変動
振子の変位測定精度			0.3	最小2乗法での標準偏差
水平系の角度誤差	0度	1度	0.02	想定最大誤差角
実測における誤差				
振子の振れ幅測定誤差	800 μm	1 μm	0.1	計測器精度
振子の変位ドリフト			0.1	時間的変動
推力軸の傾き	0度	3度	0.1	想定最大誤差角

誤差評価のためには、滑車1を90度づつ回転させ、それぞれの回転位置で上記の計測を行う。このとき、もし滑車1が完全（真円度、摩擦、重量平衡等）であれば、滑車1の各回転位置での違いはなく、それぞれの計測値は同一となるはずである。しかし、実際には滑車の不完全さのため異なった値を示す。この値のばらつきから滑車の精度を見積もった。

以上の各誤差評価から、全体的な誤差を見積もる。本測定において、各誤差は同一の感度をもつので、各相対誤差の2乗和の平方根を求めればよい。表Aの各相対誤差から、推力測定装置の較正での誤差は0.39%、実際の推力測定時に生じる誤差は0.17%、総合誤差は0.42%となる。

付録3. 推力予測における誤差

推力予測は、理想推力の計算、ビーム広がりによる推力損失計算および2価イオンによる推力損失計算によって行う。したがって、これらの各計算での誤差を考慮する必要がある。次に示す誤差推定によれば、真空槽の寸法が有限であるためビーム測定範囲に制限があることおよび2価イオン量の推定誤差が、推力予測における主要な誤差要因であると考えられる。

(1) 理想推力の計算での誤差

放電電圧の測定値には、配線による電圧降下のため2V程度の誤差がある。このため理想推力の計算に0.1%程度の誤差を生じる。なお、モニタ線を付ければ放電電圧は高精度で測定できるが、本測定では、推力測定装置の振子の変位への影響を最小にするため、配線本数を減らすことを優先させた。

(2) ビーム広がりによる推力損失計算での誤差

ビーム広がりによる損失を考慮した推力予測計算においては、半径方向のビーム分布のデータの取得の際、誤差が生じる。主要な誤差要因として、真空槽の寸法が有限であるための測定範囲の制限、イオンビームのクロスオーバー、大きい半径位置でのプローブ有効口径の減少等がある。

まず、ビーム広がりによる測定範囲に制限があることによって生じる誤差を考える。当所の真空槽の半径は1.5mであるが、ビーム広がり測定用プローブの可動範囲は更に狭まり、1m弱となる。このため本文の(4)式の積分範囲が十分大きくとれない。実際、(4)式によるビーム電流の積分値はビーム電源の電流値に較べ5%程度小さくなる。これはビーム広がりによる過小評価となり、推力予測を過大とする。推力予測に対する誤差の定量的な評価は行われていないが、これが誤差の主要な要因のひとつであると思われる。

次に、イオンビームのクロスオーバーの影響を見積もる。

クロスオーバーは、イオンビームがエンジンの一点から噴射されるのではなく、エンジンのイオン抽出口径（以下口径と呼ぶ）にわたって噴射されることによって生じる。すなわち、ある測定点において、プローブに入射する多数のイオンはイオンの噴射点に応じて異なった速度方向をもつ。例えば、エンジン口径の中心から来るイオンと口径の端から来るイオンとはエンジン噴射口の半径7cmだけ離れた位置から出るので、エンジンから100cmの測定点では、約4度の方向差をもつ。ビーム広がりから推力測定計算をするとき、この方向差を無視し、プローブに入るイオンの速度方向は全て同一であると仮定している。

クロスオーバービームによる誤差の見積のため、ビーム広がり範囲には、エンジン口径の各部分から一様にビームが噴射されるモデルを考えた。実際には、エンジンの中心部でのビームが大きいので、このモデルは誤差の上界を与える。このとき、0.1%程度の過大な推力予測を与えるが、誤差としては十分小さいことがわかる。

最後に、大きい半径位置でのプローブ有効口径の減少について検討する。使用したプローブは、ファラデーカップの前にオリフィス（口径2.6mm、厚さ0.5mm）が付いた構造となっており、このオリフィスが入射イオン量を決める。オリフィスは有限の厚さをもつため、プローブがイオンビームの中心軸に近い場合、正しい計測ができるが、中心軸から遠い場合には問題が生じる。オリフィスに入射したイオンは、プローブがイオンビームの中心軸に近い場合には全てファラデーカップに達する。しかし、中心軸から遠くなると、イオンビームの入射角が大きくなり、オリフィスの前端口を通過したイオンの一部はオリフィス側壁にあたり、ファラデーカップには入らなくなる。すなわち、入射角の増大はオリフィスの有効口径を減少させる。

オリフィスの有効口径は幾何学的な考察により算出でき、使用したプローブの場合、入射角10度のとき、有効口径面積は4.3%の減少、入射角20度のときは8.9%の減少となる。

プローブの有効口径面積の減少自体はかなりあるが、それがビーム広がりによる測定あるいは推力予測計算に与える誤差は、それほど大きくないと考えられる。簡単なモデル計算によれば、推力予測に対する誤差は0.2%以下で収まる。これは、大入射角となるのは、測定点が中心軸から大きく離れた場合なので、ビームの量の割合も小さくなるからである。例えば、入射角20度以上となるイオンビームの割合は5%程度である。ただし、正確な評価のためには誤差感度の詳細な計算が必要となる。

(3) 2価イオンによる推力測定計算での誤差

本研究では、2価イオンの割合は実測によらず、過去

の同一イオンエンジンでの実測値から推定した。一般に 2 価イオンの割合は、放電電圧と推進剤利用効率によって決まるが、今回のデータと両者が一致する過去の実測

結果がなかったため、放電電圧が一致するデータおよび推進剤利用効率が一致するデータから補正係数を求めた。その結果補正係数は、 0.976 ± 0.005 となった。

航空宇宙技術研究所報告1282号

平成8年1月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊎182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17

Printed in Japan