

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.018
629.7.036.7

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-669

イオンエンジン推力試験装置の設計と製作

宮崎 勝弘

1994年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

イオンエンジン推力試験装置の設計と製作*

宮崎 勝弘^{*1}

Design and Fabrication of an Ion Thruster Thrust Test Stand

Katsuhiko Miyazaki

Abstract

A thrust test stand to measure the thrust of an ion thruster was designed and manufactured. The stand was calibrated and the thrust of a 14-cm diameter xenon ion thruster was measured.

The stand was composed of a rigid pendulum and knife edges. The thruster was held by the pendulum and the thrust was gauged by the displacement of the pendulum. Propellant-feed piping and electrical cables were connected to the thruster and their stiffness reduced the displacement. The displacement, however, was still found to be linearly dependent on the thrust.

This study presents the minutia of the stand and the calibration, and the results of thrust measurement.

Keywords : ion thruster, thrust test stand

概 要

イオンエンジン推力を直接測定する推力試験装置を設計し、製作した。この試験装置の機能確認のため、校正試験と14cmカスプ型キセノンイオンエンジンを用いて、直接推力測定を行った。

製作した推力試験装置は振り子型で、推力は振り子の変位量から求める。推力と変位量の関係を求めるため、精密に計測した分銅を用いて、校正試験を行った。その結果、この装置は、良い比例関係を持つことが確かめられた。

イオンエンジン推力を直接測定する時、エンジン作動に必要な電力・推進剤の供給は、配線・配管のそれぞれで行った。これらは振り子と同様に動く。そのため、これらの変位量への影響について調べた。その結果、影響は予想以上に大きいことが分かった。

本報告書は、この装置の機能を解説するとともに、この装置が推力測定のために十分な能力を持っているか試験し、その結果について述べる。

1. はじめに

キセノンイオンエンジンは推進剤にキセノンを用い、このキセノンイオンエンジンの放電室内で電離させ、プラズマ状態にする。このプラズマの中からイオンのみを正負高電圧を印加した2枚の電極を用いて抽出加速し、推進力を得る宇宙用機器である。

イオンエンジンの推力レベルは、開発された多くのロ

ケット推進機の中では、非常に小さく微小である。しかしながら、イオンエンジンの比推力(ISP)は、一般的な化学ロケットと比べ、約10倍大きな値が得られることから、長時間作動させることに依って無重量状態で大きな力を発揮することが出来る。

大きな比推力を持つことから、衛星の姿勢制御や軌道変換等の推進機として注目されており、当研究所に於いても実用化に向けた様々な試験を実施している。

* 平成6年8月30日 受付 (received 30 August 1994)

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

実用化のための試験項目として、イオンエンジンの推力を直接測定することは大変重要で、且つ有意義な課題である。ところが、推力測定試験は、イオンエンジン推力が、エンジン本体および測定装置（可動部分）等を加えた重量と比較すると約5千分の1ほどでしかないこと、イオンエンジン試験は真空状態下でのみ実施出来ること等に依って、測定方法に制約が多いため、相当に困難を伴う試験項目の一つであることから、通常試験ではビーム（イオン）電流値から計算で推力を求めている。

この推力を、第1に作業性良く簡便に、次に出来る限り高精度に測定出来る、ことを目標として設計・製作した「イオンエンジン推力試験装置」を項目別に紹介する。更に、製作した装置で数項目の確認試験を実施し、評価した結果について報告する。

2. 設計の基本構想

イオンエンジン推力試験装置（イオンスラスト スラストテストスタンド）の設計に当たって、これ以前に実施された推力測定試験について簡単に述べ、それを基にして設計の基本計画をまとめた。

2.1 過去の実績とその成果を参考に出来ない理由

「はじめに」で述べたようにイオンエンジンの推力測定はイオンエンジン試験項目として相当に困難を伴う項目であることから試験報告論文数は少ない。また、その推力試験装置はピアノ線等を用い、測定装置部全体（エンジン、推進剤、流量制御器、推力測定部）を吊るした構造で、水平方向又は捻りによる変位を検出することで行っている¹⁾²⁾³⁾。そして、そこで用いられている推進剤はすべて水銀であって、現在の推進剤であるキセノンでの詳しい報告は今の所無い。

その理由は、双方の試験装置に於いて、イオンエンジンは推進剤を電離させ、イオンを抽出加速し、推力を得る推進機のため多系統の電源を必要とする（図9参照）。しかしながら、推進剤の相違による電源系統の相違は小さい。これに対して、推進剤の流量制御は大きく異なり、そこに注目し比較すると理解しやすい。

水銀は、質量が大きく、常温では液体で、熱すれば容易に気化することからイオンエンジンの推進剤として最適であった。ところが、水銀は衛星を汚染する可能性があるとして、衛星側からの要請によってキセノンに変更され、現在に至っている。

この水銀の貯蔵及び流量制御は、水銀を薄肉の貯槽（タンク）に貯蔵し、そこに僅かな圧力をかけ、3系統の配管途中に微粉末（タングステン）の焼結金属板を溶接し、此処をヒータ加熱すると水銀は気化し、金属板を通り抜けることで容易に行うことが出来る。システム重

量もそのために軽量で済む。軽量であるために、推力測定装置への搭載も容易となる。

これに対して、キセノンは常温では気体であるから、貯蔵は圧力容器を必要とし、流量制御は、高圧から低圧にするための圧力調整器（必要としないことも可能ではある）と、流量制御器（マスフローコントローラ）を3台必要とする。その為、システム重量も当然重くなる。

また、真空状態で使用できる流量制御器は特別仕様のものが必要で、当研究室では所持してないことから、測定装置への搭載は事実上不可能となっている。

以上の点から、これまでの試験に用いられた方法は採用することが出来ず、新たな発想が必要となる。

2.2 既設装置への適合性及び作業性

推力試験装置は当研究所が現有するイオンエンジン試験用真空装置や、その周辺装置との適合性を図るとともに、簡便に測定するためには作業性等を考慮しなくてはならない。それらには次のような項目がある。

1) 試験用真空槽を大気開放することなく推力測定が実施出来る。

イオンエンジン試験用真空装置は大容積で且つ、真空槽内にキセノンを排気するための極低温（50K以下）のクライオパネルやシュラウドが設置されている⁴⁾⁵⁾。これらから大気開放操作は容易な事ではない。そこで、真空装置には門型弁が設置してある。この門型弁に格納槽を組み付けて、この中にイオンエンジンを収納することで、真空槽を真空保持しつつ試験を可能にしている。この門型弁に試験装置を組み付ける構造とする。

2) 推進剤・電力はフィードスルーを用いて大気側からエンジン各部に供給する。

当研究室が所有する推進剤流量制御器は、真空状態で作動可能な仕様でないことから、従来通り大気側から供給する。電力供給に「水銀ポット」を使えば配線による振れへの抵抗なしに供給出来るが²⁾³⁾、試験装置が相当大型化することや、水銀汚染が心配であるから使わない。

3) 測定装置の振動の影響を排除する。

真空槽や門型弁は、真空槽の排気機械装置や車両通過等に依って振動が生じている。この振動が2mN級試験では問題となった。今回はこの振動が問題とならないよう設計を試みる。ところが、イオンエンジン試験用真空装置は新装置であり、測定装置も2mN級とは異なることから、振動の影響がどれほどであるかは判断しがたい。

2.3 基本設計

前項の「設計に対する適合性及び作業性」検討から、基本設計を次のようにまとめた。

1) 測定装置をピアノ線を用いての「吊り構造」とすると、水平面に対して全く拘束されなくなることから、エンジンに配管・配線を接続するので、その剛性力で装置の位置決めが不可能となる。そこで、一軸のみが可動する剛体構造とすると、振り子型となる。その軸受には、ナイフエッジ機構が最も摩擦抵抗が小さく、且つ真空中でも支障なく使用できること。また、ある程度の荷重を支えることが出来るので採用する。

2) 作業性を考慮して、推力試験装置は一体構造として床面上にて組立・調整が出来るようにする。それを門型弁に組み付ける。この方式はイオンエンジンを格納槽内で作動することであるから、エンジン周囲を高真空に出来ず芳しいことではないが致し方ない⁹⁾。

3) エンジン本体と測定装置の重量を加えると相当な重さになる。そのため、イオンエンジンの推力レベルでは振り子は殆ど振れないと見込まれるから、この重量を

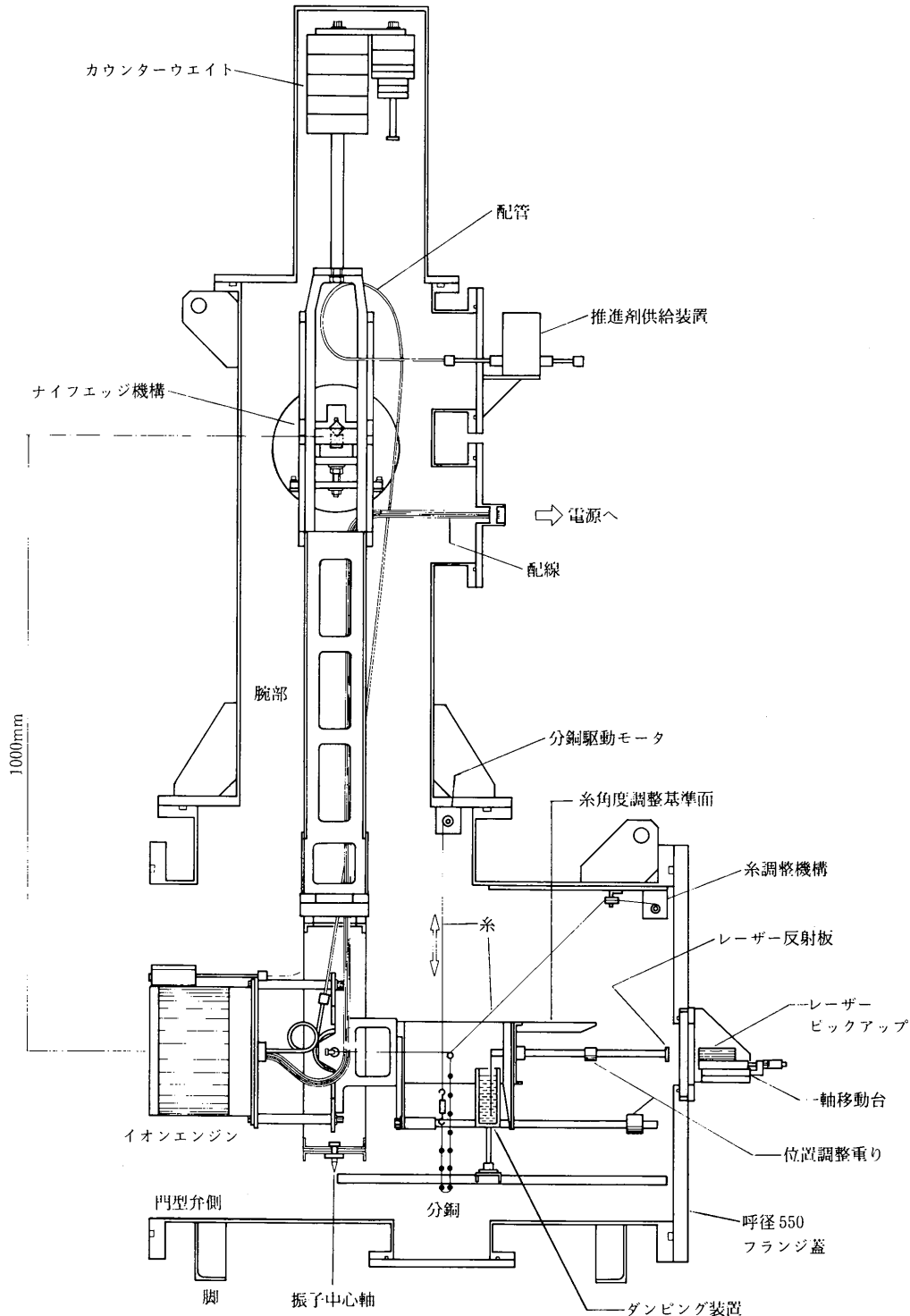


図1 イオンエンジン推力測定装置構成全体概略図

キャンセルするためのカウンターウェイトを設けることにする。また、振り子構体は剛体とするが重量軽減のため軽量化対策を施す。

4) 推力の較正は 2 mN 級水銀イオンエンジンの推力測定に用いた方法で行う³⁾。

5) 配線・配管の重量・剛性は振り子の振れに大きく影響することが予想される。そのため、この影響を押さえる工夫をする。

6) 制作費をできるだけ低く押さえるため可能な限り市販品を利用し、それを追加加工する。

3. 設計・製作

基本構想を基にして推力試験装置の設計・製作を行った。その要点を項目別に説明する。

3.1 測定装置全体図

推力試験装置の要である測定装置全体の概略図を図1に示す。測定装置全体を以後は「振り子」と呼ぶことにす

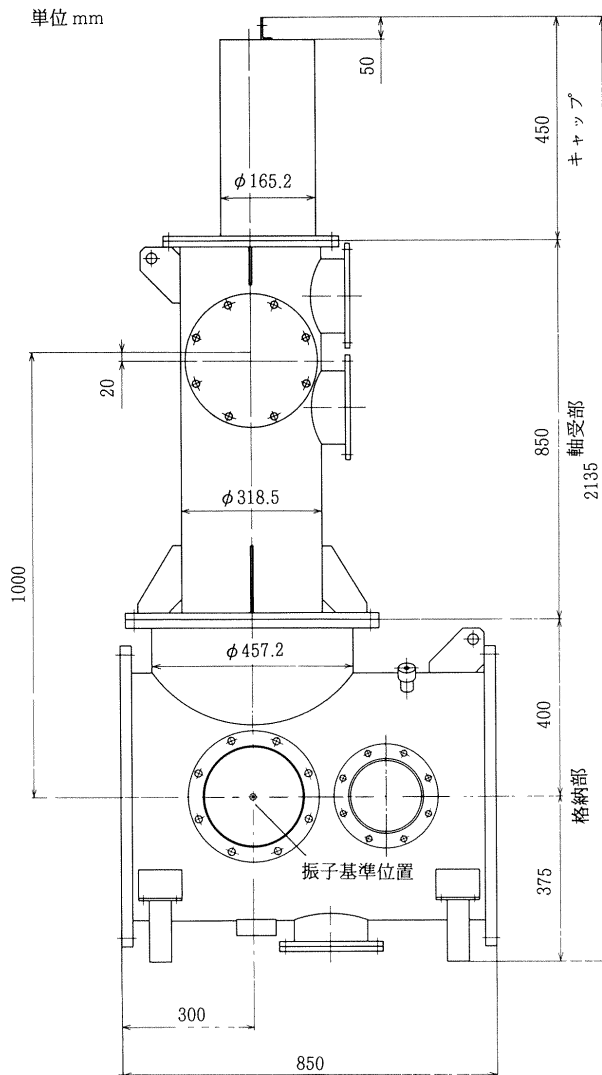


図2 推力試験装置本体外観図

る。振り子は位置関係を表すために、下部からエンジン本体取付け部（推力検出器）、腕部、軸受部、カウンターバランス部とする。振り子の腕長さ（ナイフエッジ支点から本体取付け部中心）は1000mmである。

振り子構体は主にアルミ合金製の形材を用いて製作した。カウンターウェイトは黄銅材を用いた。構体は軽量化を目的として各パーツに溝加工等を施している。

振り子の全重量は左右2箇所のナイフエッジ（図4参照）で支え、且つナイフエッジに懸かる荷重を左右等しくするため、構体の対象性を重視した。

エンジン本体取付け部は2軸可動構造としてあるが、今回の試験では動かしていない。

3.2 試験装置（スタンド）本体

試験装置本体は、完全一体型とすることで重量を軽くでき、且つ真空漏れに対しても最も確実な方法ではあるが、組立・調整に支障を来す。そこで、フランジ継手を用いて3分割した。それぞれを下から格納部、軸受部、キャップと呼ぶことにする。試験装置本体の外観概略図を図2に示す。写真を図3に示す。全体の大きさは、幅が850mm、高さが脚から2135mmである。格納部の左側端が門型弁に組み付けるフランジ面である。イオンエ

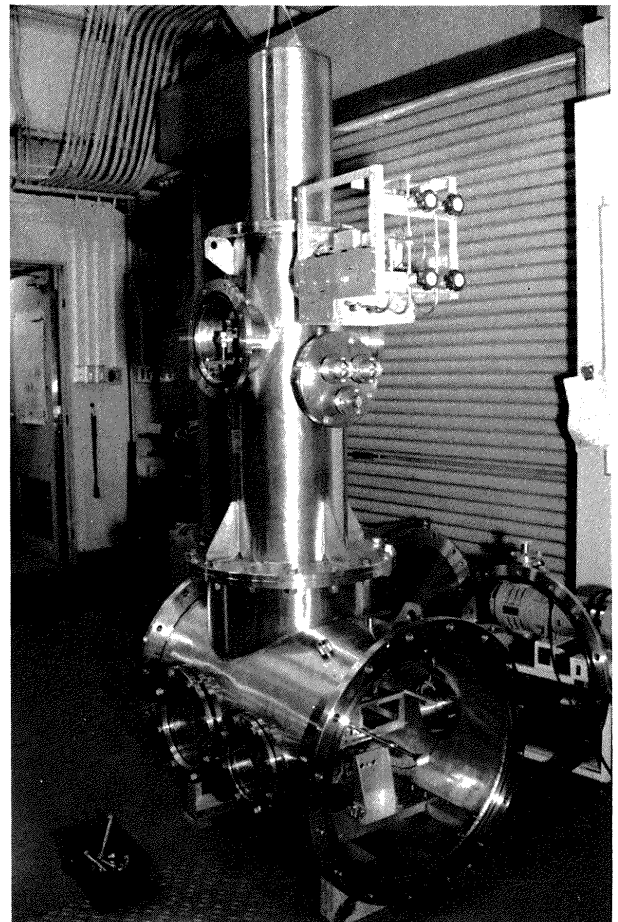


図3 推力試験装置本体外観写真

エンジンは門型弁に向けてエンジンのシールドケース下流面（図1参照）がフランジ面となるように取付ける。本体は、錆を防ぐため SUS304 系のステンレス鋼を使用し、真空引き時の脱ガスを少なくするため、内面はバフ研磨を施した（電解研磨を施すのが高真空装置では一般的であるが高価格である）。

格納部径は門型弁の呼び径が 550mm であるから同径とし、この中にエンジン本体、測定装置の検出部が入るようにした。また、ここには組立・調整用として、呼び径 200 と 150 のフランジ継手（ノズル）が 5 箇所（箇所）に設けてある。図示側の前面 2 箇所は覗き窓である。左側窓は振子中心軸上に設けてある。この窓には振子が鉛直線であることを示す基準線が設けてある。基準線は分銅を軸受の位置から吊るして決めた。

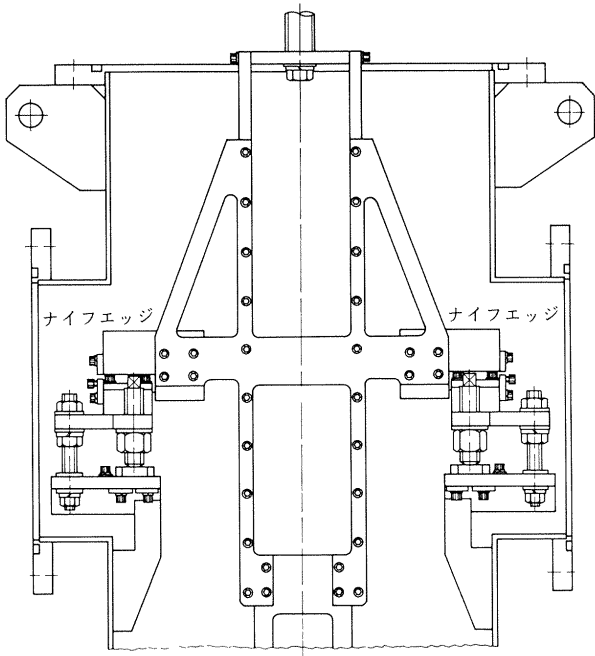


図4 ナイフエッジ機構概略図

軸受部前面の呼び径 200 フランジ内部には振子の軸受であるナイフエッジ機構が取付けてある。側面の呼び径 150 フランジの下側は電力・計測線用のフィードスルー、上側は推進剤供給装置を取付ける。

上部のキャップ内にはカウンターウエイトが入っている。キャップにはフック掛けを付けた。

試験装置本体には、門型弁に組み付ける際の吊り上げ作業が容易になるようにクレーンフックの掛け場所を設けてある。

3.3 ナイフエッジ機構

ナイフエッジ機構の概略構成図を図4に示す。また、ナイフエッジの詳細構成図を図5に示す。また、機構の容器取付け状態写真を、フランジ蓋を外した状態で、図6に示す。

ナイフエッジは「刃と座」で構成される。その支点は線状に接触し、ここから転がり運動することから、摩擦抵抗が非常に小さい。支点が転がり運動するためには、支点到振子重量が加わった状態でも、構成材が弾性変形内であることが要求されるから、高硬度材料を用いなくてはならない⁷⁾。ここでは、旋盤等の刃物用として 14

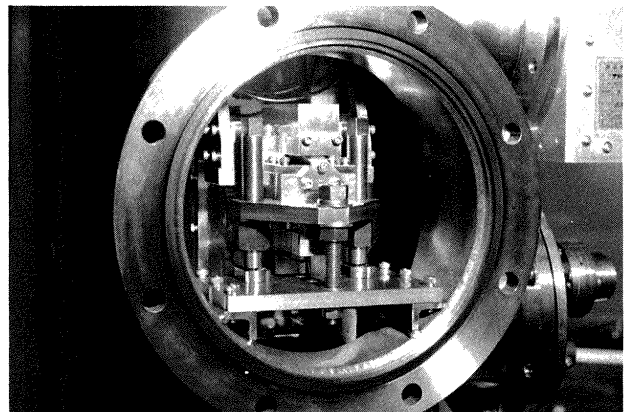


図6 ナイフエッジ機構写真
(フランジ蓋を外した状態)

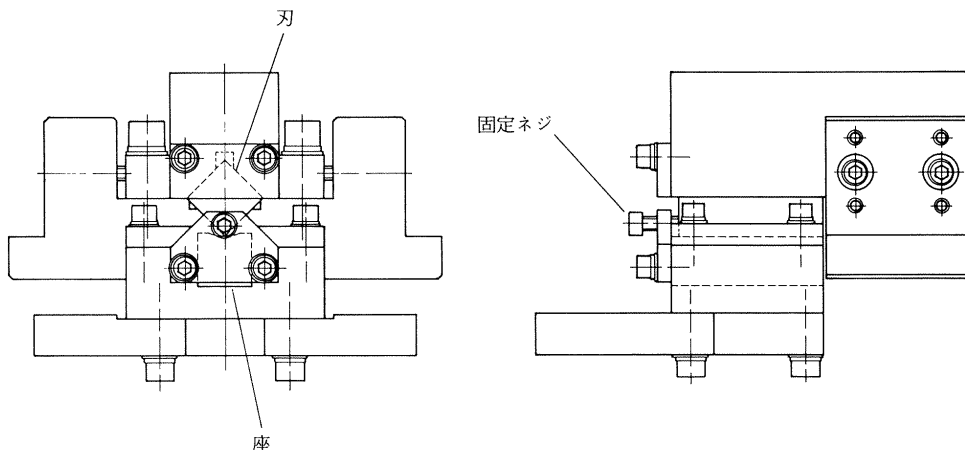


図5 ナイフエッジ詳細図

mm 角の角棒材に成形された高速度鋼 (SKH10) から製作した。その形状は、刃を角棒の角部を 0.3R に仕上げ使用し、座を角棒の平面部に 5R の溝を設けて使用した。刃長は 40mm である。高速度鋼はそのままでは錆を生じるので拡散ポンプ油を薄く塗布した。

その他の材料は、高硬度アルミ (ANP72) とステンレス鋼 (SUS304 系) である。

ナイフエッジ機構は本装置の要とも言える所であるから、刃側は左右一体として組み上げるように工夫した (一方の座は振子構体の形状で採用できなかった)。特に「刃と座」の「当たり」調整が大切であるから定盤上にて組立・調整を慎重に行った。これを、振子位置の調整を行うための調整機構を持った容器に取付けた。

この作業で、調整機構の機能は不十分であること、また、「刃と座」を組み合わせた状態を崩すことなく取り扱える構造とすることが重要であると判明した。

3. 4 推力の検出方法 1

振子は加わる力が変化すると、本来止まるべき位置を中心として減衰振動して停止する。振子変位量は、力が変化する前の停止位置と変化後の停止位置の差とする。変位量は、レーザー変位計の出力を XY 記録計上に描き出し、描かれた振動波形からスケールで読み取った。

レーザー変位計は、変位計からレーザーを発し、その反射光を捕らえることに依って距離を測る。そのため、測定物まで離れることが出来るので大気側から距離を測ることを可能にする。

レーザー光の発受光部であるピックアップ部は、後方側の呼び径 550mm フランジ蓋の中心に窓と取付け台を設け、更に、この取付け台に一軸移動台を組み付け、その上に取付けた。一軸移動台はピックアップ部を適当な位置に動かすためである。レーザー光を反射させるためのアルミナ板を、振子側にパイプを設け、その先端に付けた (図 1 参照)。

3. 5 推力の検出方法 2

今回用いた方法は、分銅の重さに依って当然振子の停止位置は変わり、校正のために張り巡らした糸の角度の関係は崩れてしまう。よって、振れ幅を大きく取った場合は分銅振子変位の関係は一次関数から大きく外れ、補正する必要がある。そこで、振子の停止位置を変位させずに推力を検出する方法について考察する。その構成概略を図 7 に示す。振子が推力 (分銅重量) に依って変位する時、この変位をレーザー変位計 (または差動トランス) で検出しつつ、変位計の出力をコントロールアンプに接続する。アンプはフィードバックコイルの電流を制御して反力を発生せる。これで振子は元の位置で停止す

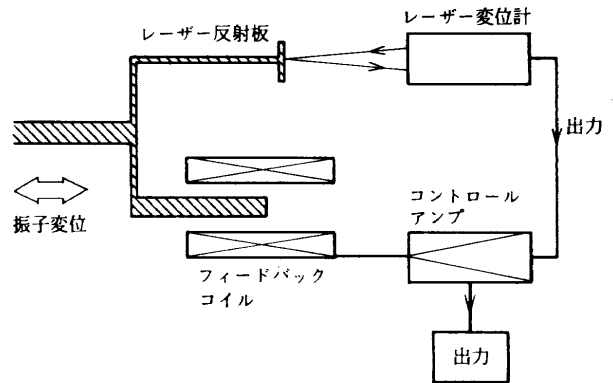


図 7 推力検出装置 (振子位置不変の方式)

る。コイル電流と反力は比例関係にあるので、コイル電流を計測すれば推力が得られる。

この方法は、初期目的の 1 項目であったが採用が出来なかったため考察のみとした。採用については、以後の課題とした。

3. 6 推力校正装置

校正装置は推力を正しく測ることが出来るか検証するために必要である。校正方法は 2 mN 級水銀イオンエンジンで用いた方法と原理は同じである。その原理図を図 8 に示す。分銅は分銅糸に付いているから鉛直線上にある。振子に接続された振子糸是分銅糸と直角を作る。分銅糸と振子糸の交点から引き上げ糸を出し、引き上げ糸を振子糸と反対側上部に 135 度の角度に保つと分力に依って分銅と同じ力を振子に与えることが出来る。

糸角度 135 度を容易に得られるように「糸角度調整基準面」を振子構体に設けた (図 1 参照)。この基準面を作り出すために構体組立てを次のような順序で行った。1) 軸受・腕並びにエンジン本体取付け部枠の中心が鉛直線上に沿うように組立てる。2) 本体取付け部枠に基

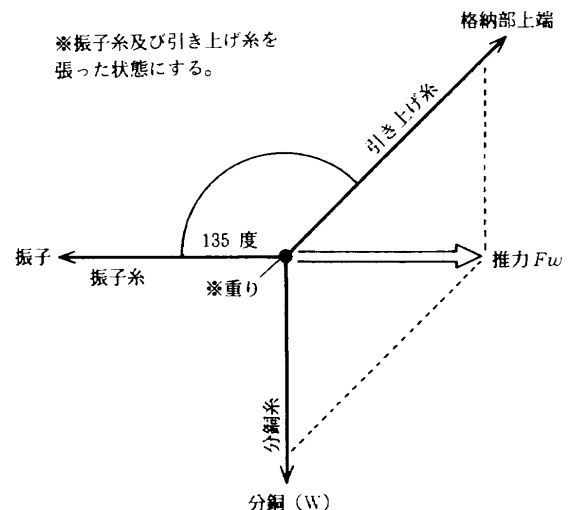


図 8 分銅を用いた推力校正の原理図

準面用の枠を直角定規を当てつつ組み付ける。これに依って、基準面は鉛直線に対して水平となる。

糸角度の調整は次のように行う。1) 振子中心軸を基準位置に固定する。2) 全ての糸を張る。3) 基準面上に板を乗せ、ここに予め組立・調整をした45度面(厚さ3mm)を持つ自立する定規を置く。4) 引き上げ糸の角度を定規を当て調整する。5) 水平糸の水平を基準面からの距離を測定して取る。6) 4)と5)を分銅糸の交点位置並びに引き上げ糸の長さを調整しつつ繰り返す。

最終調整後の糸の関係は、糸長さは引き上げ糸は347mm、水平糸は172mmで、角度については引き上げ糸角度は 135 ± 0.2 度以内に、水平糸角度は ± 0.1 度以内に納めることが出来る。

この場合の推力誤差を見積もると、引き上げ糸による誤差は最大で $\pm 0.7\%$ 、水平糸はほぼ 0% である。

分銅は0.1mgまで計測可能な天秤を用いて作成した。分銅1個の重量は 249 ± 0.5 mgである。また、分銅糸も計測してある。糸は全て絹糸を使用している。糸の重さ・伸びによる誤差を無くするため交点の所に重りを掛け、糸が常に張った状態を推力0mNとした。

糸角度の調整が容易になるよう引き上げ糸上端部には調整機構(図1参照)を設けてある。これは、大気側か

らも操作できる。

3.7 配線・配管の引き回し

イオンエンジンを作動させるには各部に電力を供給しなくてはならない。作動に必要な電源系統図を図9に示す。配線は図で分かるように7系統必要とする。

線材はビーム(スクリーン)電圧がDC1kVであるから高耐電圧のシリコン電線を使用している。被覆材のシリコンは、柔軟性に富み、且つ耐熱性があるため脱ガスも少ないことから優れている。ところが、ここで用いた製品は耐電圧が15kVであることから、被覆が厚く、そのため重い。そこで、振子に線重量が加わらないようにするため配線を上部から吊り下ろした。

当研究室では、このシリコン電線を様々な装置の配線に使用している。その性能は試験済みであるので推力測定装置には重量的に問題が残るが、ここでも使用した。

推進剤供給は3系統必要とする。キセノン流量制御は人気側にある推進剤供給装置で行われ、人気側から真空側に導入される。よって、装置内部の供給系は配管のみを引き回し、エンジンに接続する。配管は1/8インチのシンフレックスチューブ(ナイロン系)を用いた。この管は剛性が相当あるので上部から垂らす様に用い、さ

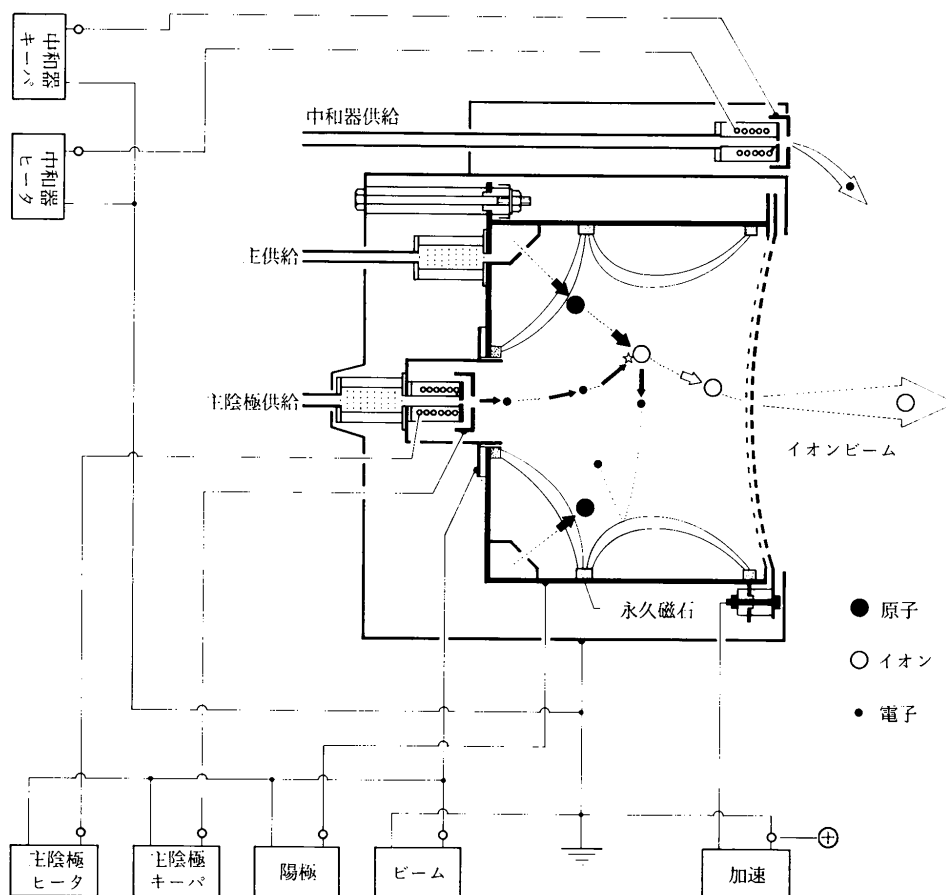


図9 イオンエンジン電源・配線系統図

らに、出来るだけ振子に影響を及ぼさないようにした。

3. 8 ダンピング装置

振子は加えられた力が急に变化すると減衰しながらも長い時間振れ続ける。これでは、データの処理が大変であるばかりか正確に推力を計れない可能性があった。そこで、ダンピング装置（図1参照）を設けて早い時間に振れが停止するようにした。ダンピングの方法はアクリル製ポットの中に拡散ポンプ油（DC705）を入れ、振子側にアルミ板のフィンを設けて、このフィンに浸すことによって行った。これによって、停止時間は約 $\frac{1}{3}$ に短縮した。

ここで、拡散ポンプ油を使用した理由は、低温時に於いても粘度はそれ程大きくはないが、ポンプ油の蒸気圧が 2×10^{-9} Pa（20℃）で非常に小さいことを重視したからである⁸⁾。

3. 9 振子のバランス及び位置調整

振子及びエンジン本体等重量を加えるとかなりの重さ（実際の重量は計測していない）となる。そのため、イオンエンジンの推力レベルでは振子はほとんど振れずに周囲から来る振動の中に埋もれてしまうことが予想された。これでは、正確な変位量を検出することは出来ない。イオンエンジンは作動条件を変えなければ、ほぼ一定の推力が連続して得られることから慣性の影響は小さい。このことから軸受を中心とした偶力のつり合いを取れば振れ幅を拡大することが出来る。そこで、軸受上部に更に腕を出し、カウンターウェイトを設けた。重りの材質は比重と加工性を加味して黄銅とした。

また、振子は基準位置に停止させる必要があるから、位置調整用の重りを設けた。この重りには「主調整用重り」及び「微調整用重り」がある（図1参照）。材質はアルミである。

4. 試験装置の組立・調整

推力試験装置の組立・調整の第一段階は床上にて行う。組立順は次の通りである。まず始めに格納部の水平を取り、軸受部の組立・測定装置である振子の組立、エンジン取付け、配管・配線の接続、カウンターウェイトの取付け、較正装置の取付けとなる。

配管・配線の接続では、配管は剛性が大きいので、剛性の影響を押さえるため軸受上部で固定した。配線は軸受位置から吊り降ろした状態を作り出した。カウンターウェイトは振子の動きを見ながら重量を増した。

較正装置の取付けは、振子を固定し、較正糸を3.6項に従って張り、レーザー反射板を取付ける。

ここで、また振子を可動状態にし、振子停止位置が基

準停止位置で停止するように主調整重りで調整する。

床上での組立・調整作業はこれで終了する。振子並びにナイフエッジ保護のため、それぞれを固定金具で固定し、門型弁への組み付け作業となる。更に、装置を吊った状態で、格納部下側に一本の脚を取付ける。脚は、装置重量が大きいことから片持ち構造の危険性を避けるためである。装置の門型弁への組み付けはイオンエンジン実験棟にある2台のチェーンブロックを利用している。

門型弁組み付け後の作業は、推力較正用糸の角度が正しく保たれているか再度3.6項に基づいて確認してから固定金具を外し、振子を可動状態にする。

次に、振子停止位置を反射板軸の微調整重りで決める。ここでは、振子停止位置は分銅を2g与えたときに基準位置となるように重りを調整した。これによって、振子は基準位置を境にして前後に動くことになる。

この後は、レーザー変位計のピックアップ部を取付けたフランジで蓋をし、真空引きとなる。準備完了状態の写真を図10に示す。

振子のバランスは、1) 真空引きすると大気浮力がなくなることに依って、2) エンジン作動熱による構成材の伸びに差がある（振子は主にアルミ材であり、エン

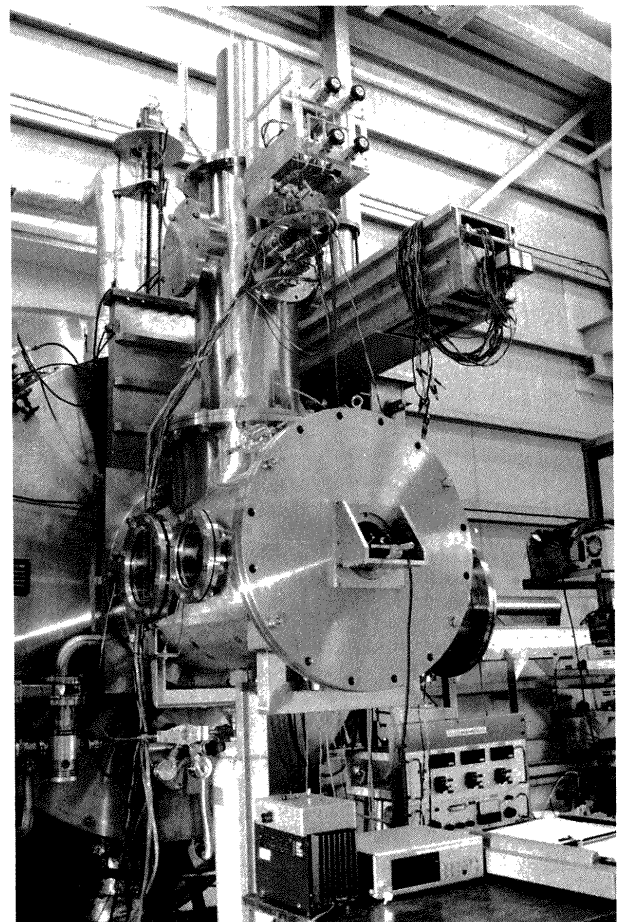


図10 推力試験装置セットアップ完了写真
（門型弁に組み付けた状態）

ジンはステンレス材である) ことに依って、崩れてしまう。そのため、振子の停止位置は変位する。そこで、予め変位を見越した補正を加えた。変位の補正量は経験に依って取得した。ところが、配線・配管作業を行うと補正量が変わってしまうために、新たに補正量を知る必要が生まれ作業性が非常に悪い。

振子停止位置の基準位置からの変位は推力誤差を拡大させることから、誤差評価のためにも停止位置は任意に設定出来ることが求められる。しかしながら、今回の装置には大気側から振子の停止位置を調整できる機構を備えて無い。

(詳しい誤差の考察はここでは省略し、次報告で行う。)

5. 測定装置の機能確認試験とその結果

本装置の配管・配線の振れへの影響を組立途中で調べ、機能確認試験を真空状態で行った。

5. 1 振れの確認

本測定装置は、振子型であるので振れ幅が最も大事である。振れ幅が小さいと動きの直線性を確かめるのが困難であるばかりか、外部振動の影響も強く受けることとなる。そこで、配線・配管の引き回し、カウンターウェイトの増減による振れ幅への影響を調べた。

配線ならびに配管の振れ幅への影響は予想したより遙かに大きく約1/2にまで落ちた。

カウンターウェイトは重量を増すことに依って、振れ幅は拡大することを確認した。重量増で拡大すると言っても、ナイフエッジの弾性限界があるからむやみに増加しなかった。

これに依って、配線は、耐電圧 1kV 程で脱ガス等条件を多少犠牲にしても、もっと軽量且つ柔軟性に富む線材を使用する必要がある。配管についても同様である。配線・配管の引き回しについては、今回より更に上方から行い、工夫する必要がある。そのためには、キャップの改造が必要とある。

振子構体は軽量化のための加工を加えてあるが、まだ剛性には充分余裕があり、更に軽量化できる。振れ幅を拡大させるには、構体重量を軽量化することが最善であると思われるので実施したい。

5. 2 分銅による較正試験とその結果

較正試験は分銅重量と振れ幅の関係を調べることである。方法は、分銅を懸けた時の振子の動きを、レーザー変位計出力をXY記録計に出力させながら観測する。振子の動きが停止した後に、分銅を一気に除去すると図11に示すような波形が記録できる。ここで、用いたレーザー変位計並びにXY記録計の諸元を表1に示す。

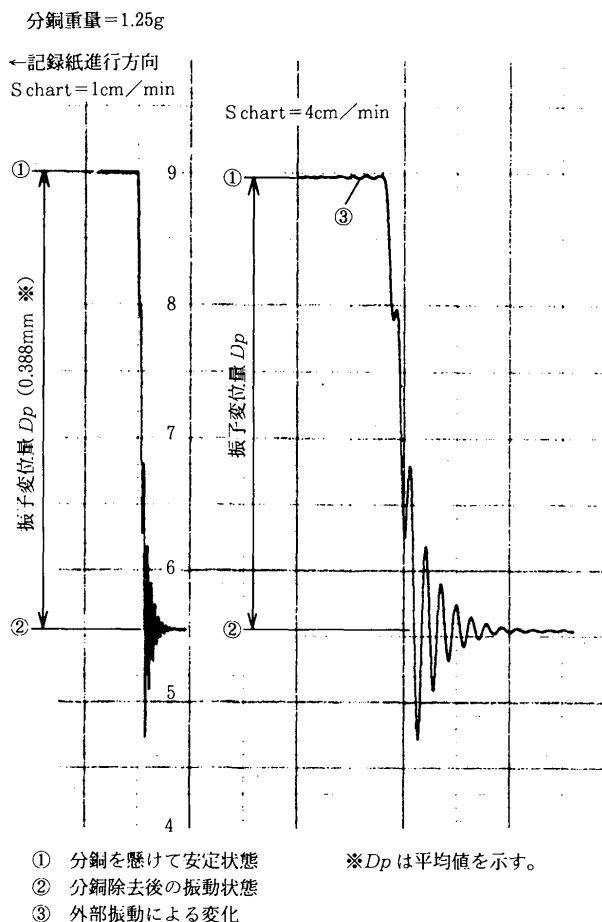


図11 較正時の分銅除去に伴う振子振動波形及び振子変位量

表1 測定機器の性能諸元

製品名	レーザー変位計	XY記録計
製造会社	キーエンス(株)	理研(株)
型式名	LC2320	F-15
測定範囲	±8mm (50mm 離)	1mV~500V/F. S.
性能	0.5μm (分解能)	±0.25% (精度)
出力	±4V/±8mm	

振子変位量 (D_p) はXY記録計の減衰振動波形の中心線を目視で引き、安定部分からの距離をスケールで測って求める。この操作を1つの分銅に対して5回行い、それを平均して振子平均変位量 (D_{pa}) を求めた。分銅各重量は推力 (F_w) に換算し⁹⁾、較正試験結果として、推力と振子平均変位量との関係で図12に示す。

較正試験は分銅各重量に対して各5回実施した。そこで各分銅での振子平均変位量 (D_{pa}) と各変位量 (D_p) の偏差について調べると、1.5gに於ける+0.4%、2.5gに於ける+0.25%それぞれ各1点を除いて、全て±0.2%以下である。これから試験装置は非常に良い再現性を

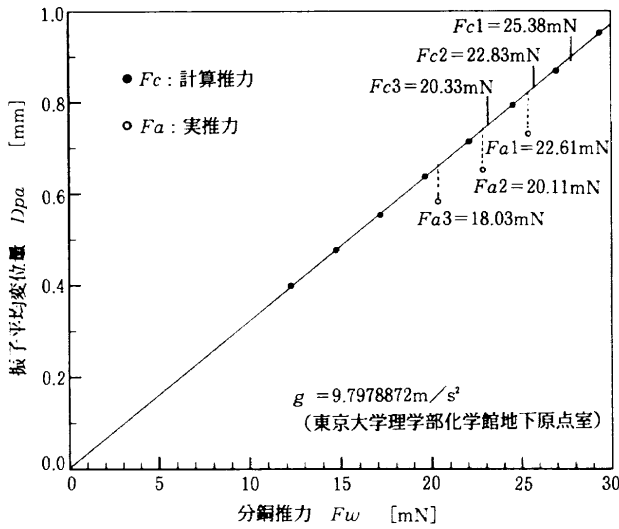


図12 校正試験結果による分銅推力に対しての振り平均変位量

示している。

また、図12より、各分銅の平均変位量には特異点もなく、推力と平均変位量の関係はほぼ比例関係にあることから、測定装置は直線性にも問題ないことが分かる。

この時の振り位置の変位による糸角度のずれによる誤差を見積もると、振子の平均変位量は25mNに対して0.812mmであるから、振子が基準位置を前後して、約±0.5mm範囲で変位したと仮定すると±0.7%以内の

誤差を含んでいることになる。

図11で、安定状態でも僅かな振動が有るのは、真空装置の機械系の振動である。また、安定状態振動が大きく変化する原因は当研究所柵沿いの路上を車両が通過するために依るものである。車両通過に伴う振動が極端に大きい時に、振子の停止位置が変わってしまうことがあった。この原因はナイフエッジの刃は座に乗っているだけであることから、支点位置が変わってしまったことによるものと思われる。

5.3 イオンエンジンを用いた推力測定

5.3.1 供試体イオンエンジンと推力計算式

ここで、今回用いた供試体イオンエンジンと推力の計算式について述べておく。

供試体イオンエンジンは公称推力25mNのカスプ型キセノンイオンエンジンである¹⁰⁾。その断面概略図を図13に示す。また、イオンエンジンの諸元を表2に示す。イオンエンジンビーム抽出口径は14cmである。推進剤供給系の、主陰極供給及び主供給から供給された推進剤が放電室内に導入され、イオンとなって抽出加速される。中和器は宇宙作動で衛星等が負に帯電するのを防ぐ働きをする。

次にビーム電流値による推力 $[F_c]$ の計算式を式1)で示す⁹⁾。ここでは、推力25mNが得られる値を代入してある。

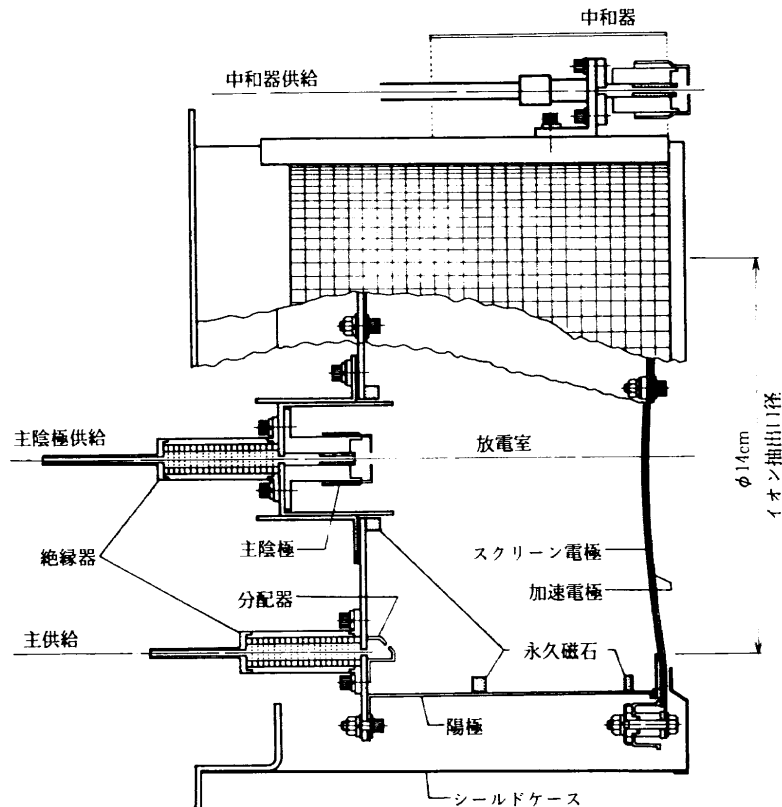


図13 供試体 (25mN級キセノンイオンエンジン)

表2 イオンエンジンの作動条件と性能

定常推力	25mN
定常比推力 (ISP)	3500s
ビーム (スクリーン電極) 電圧 V_b	1000V
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 $\{(\dot{m}_m + \dot{m}_c) / J_b\}$	90%
イオン生成コスト $(V_d \times J_d / J_b)$	210W/A
イオン抽出口径	14cm
放電容器径	16cm
放電容器長	10cm

$$F_c = J_b \sqrt{\frac{2m \cdot V_{net}}{e}} \dots\dots\dots 1)$$

$$= 2.497 \times 10^{-2} \text{ N} = 25 \text{ mN}$$

$$m = \text{セキノン質量} = 2.1865 \times 10^{-28} \text{ kg}$$

$$V_{net} = \text{ビーム電圧 [V}_b\text{]} + \text{放電電圧 [V}_d\text{]}$$

$$1000\text{V} + (\ast 0\text{V})$$

$$e = \text{電荷量} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$J_b = \text{ビーム電流} = 0.478 \text{ A}$$

放電電圧は宇宙空間作動では、そのままの値を代入することが出来る。一方真空装置内作動では、イオンを衝突させるターゲットが絶縁されて設置されているので、この電位の影響を受けて放電電圧は相殺される。(ただし、ここでは放電電圧を0Vとしてある。)

この計算式は以下の仮定を用いている。①抽出加速されたイオンは加速電極径のまま、つまり円柱状で一切拡がらない。②イオンは全て一価に電離している。③真空槽内に滞留する推進剤の放電室への大量の逆流がない。

①、②は推力が小さくなるように作用し、特に①の影響は大きく、ビームに拡がりはビーム拡がり試験によって明らかにされている^{10), 11)}。

③は推力が大きくなるように作用するが、殆どの場合無視できる値である。また、これは真空槽の圧力が高いために起こる現象であるから宇宙作動では全く影響がなくなる。

5. 3. 2 イオン加速による推力測定試験

試験に入る前に、イオンエンジンは作動させると熱を発生するので熱的安定と、作動安定のためビーム噴射状態で約4時間作動放置させてから試験を実施した。推力測定試験は、全ての分銅を上方に巻き上げ、本文3.6項説明の0mN状態で行う。

試験結果の取得方法は校正試験と同様である。まず試験ビーム電流値でイオンエンジンを安定作動させる。レー

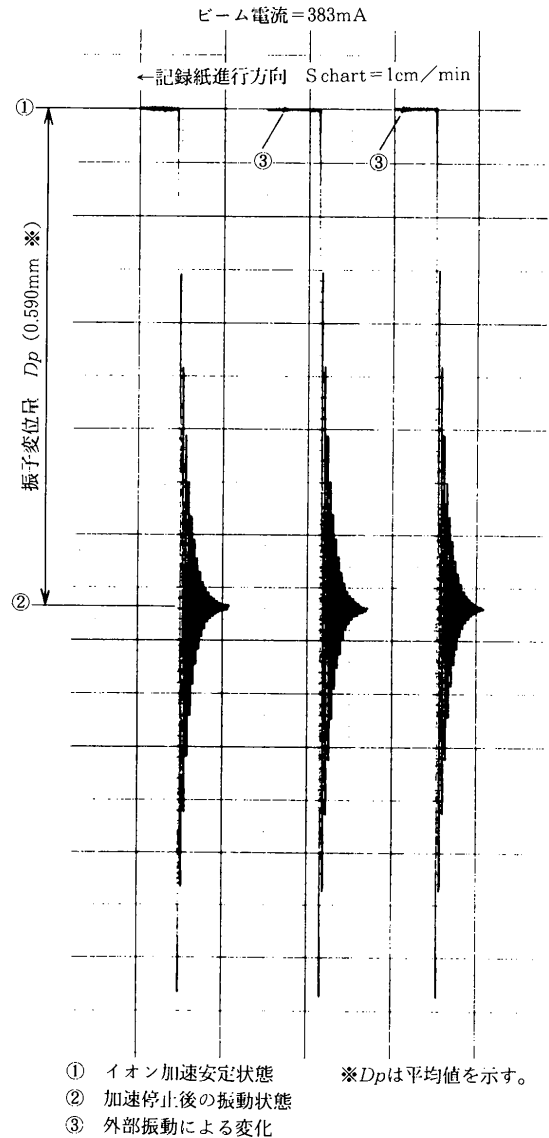


図14 推力測定時のイオン加速停止に伴う振子振動波形及び振子変位量

ザー変位計の出力をXY記録計にX軸を時間軸として作動安定状態を記録し、引き続いてイオン加速停止を行わない変化を記録する。得られた波形を図14に示す。変位量は、これを5回実施し、平均して求めた。

試験したビーム電流値は3ケースである。試験ビーム電流値での推力を計算推力(F_c)として計算式1)から求めた。その結果は、25.38mN, 22.83mN, 20.33mNである。

つぎに、イオン加速による実推力を(F_a)とし、実推力を試験によって得た振子の変位量から図12を用いて求めた。試験した電流値や計算結果等をまとめて表3に示す。

この計算推力結果と実推力の結果を比較(F_a/F_c)した。比較結果は、89.1%, 88.1%, 88.7%となる。結果から実推力と計算推力との間には、約11%~12%の

表3 計算による推力と実推力との比較

加速電圧	(V)	417±3		
ビーム電圧	(V)	1000	1000	1000
ビーム電流	(mA)	478	430	383
放電電圧	(V)	32.4	32.5	32.6
計算推力 F_c	(mN)	25.38	22.83	20.33
実推力 F_a	(mN)	22.61	20.21	18.03
比較 F_a/F_c (%)		89.1	88.1	88.7

差がある。

今回実測された推力が妥当な値であるか検証しなくてはならない。検証としてはビーム拡がり、二価イオンとの相関等がある。相関についても、次回の報告書で詳しく言及したい。

5. 3. 3 放電による推力測定試験

次に、放電エネルギーによる推力測定を試みた。イオンエンジンの放電室内には放電によってプラズマが生成されている。この時の放電電圧は約30Vである。キセノンイオンはこの電圧で加速され、加速電極穴から出て推力となる。推力の測定方法は放電維持状態からイオンエンジン完全停止（シャットダウン）することによって得た。また、それに続いて推進剤供給系完全停止も行い、推進剤による推力も得た。試験結果を図15に示す。

図15で、初めの安定状態は放電維持状態で、シャットダウンによる振子の振動が起り、引き続き推進剤供給停止の変化を描いている。

6. 試験装置の評価

本推力試験装置は、イオンエンジン推力を「簡便で且つ高精度」に測定出来ることを目標として設計・製作を行ったが、本装置の評価結果をまとめると次のようになる。

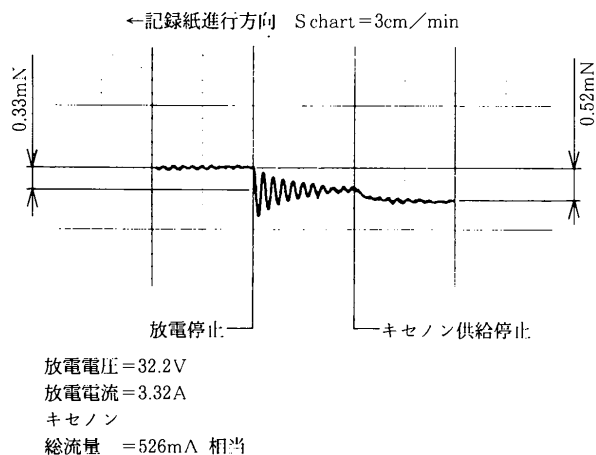


図15 放電電圧による推力試験結果
(放電停止に伴う振子振動波形)

1. 本装置の分銅重量対変位量の関係を調べた結果、再現性も良く、ほぼ比例関係にあることから、改良を加えれば実推力測定に供することが可能である。
2. 本装置は「1軸」のみを動く構造としたことに依って、各部の組み立て・イオンエンジンの本体取り付け・調整等の作業が容易に行うことが出来ることを確認した。
3. 本装置の校正用糸の角度関係は、測定誤差となるので正確な角度調整を必要とする。特に、振子停止位置は誤差発生の原因になるので、停止位置を大気側から操作出来る調整機構を新たに設ける必要がある。
4. 本測定装置には電力・推進剤供給に配線・配管を用いているが、これらの振れ幅への影響は予想以上に大きく、設置前後で振れ幅が約1/2に減少した。配線・配管を用いなくてはならない現状では、新たな材料の選択と引き回し方法に検討を加える必要がある。
5. 振子構体の重量は過大で、振れ幅を確保するためのカウンターウエイト重量も大きい。そのため、ナイフエッジへの負担も大きくなっていることから軽量化する必要がある。軽量化は僅かな設計変更で構造強度を落とすことなく可能である。
6. 外部振動の影響は、大であった。しかしながら、これを取り除く方策は現在ないので、外部振動が静となった時を見計らって試験を行った。

7. まとめ

イオンエンジンの推進剤であるキセノンに対応した「イオンエンジン推力試験装置」を設計・製作し、技術的内容を確認試験と共にまとめた。

製作結果は前項でも述べたように機械・構造的には、幾つかの改良で推力試験が可能であることから、基本的な点ではほぼ目標を達成出来た。一方、測定に関して今回用いた校正方法では、その精度について問題や課題が多いことが明らかとなった。測定精度向上のためには、校正の方法・精度の向上が必要である。

校正の問題でその原因の一つは、本装置に用いた校正方法は、2mN級水銀イオンエンジン推力測定に用いた方法と同じで実績があることから採用した点にある。

それを簡単に述べると、イオンエンジンを含め装置全体をピアノ線で吊り、この装置を真空槽内に直接に設置した。推力はピアノ線の捻り力とのバランスで得られ、検出方法は、3.5項の図7の構成とほぼ同様（但し、変位検出に作動トランスを使用）である。

当初の設計案は此の方法で推力を検出する構造であったが、振れ確認試験において検出器が能力不足であることが判明し採用を取りやめた。そこで、レーザー変位計の距離測定精度は高いことから、エンジン差動時の振子

の位置変位と分銅による位置変位を測定することで、推力を検出する方法に切り替えた。これでも推力測定は充分可能であるが、振子の位置変化による較正誤差の見積もりと補正を必要とした。

今回の用いた較正方法は糸角度の調整が大変であるために、設計のもう一つの目標であった「簡便に推力測定できること」に対して、改良を加えても困難さは残ると思われるから、新たな較正方法も検討中である。例えば、①振子腕長さを正確に計測し、分銅の掛け方を変え、変位を計測し、計算で求める。②真空中での使用が可能な精密天秤を購入し直接計測する、等である。

改良や新たな方法を実施するには現装置の改造を必要とするが、僅かな改造で対応出来る。

参考文献

- 1) H. J. Junge, et al. : Direct Thrust Measurements and Beam Diagnostics on the Ion Thruster ESKA 18-P, AIAA Paper 72-433, 1972.
- 2) Bruce Banks, et al. : Direct Thrust Measurement of a 30-cm Ion Thruster, AIAA Paper 75-340, 1975.
- 3) Azuma, H., et al. : Direct Thrust Measurement on 5 Centimeter Diameter Mercury Ion thruster with a Torsion Type Thrust Balance, AIAA/DGLR IEPC Paper 78-700, 1978.
- 4) Kitamura, S., Miyazaki, K., Hayakawa, Y. and Nakamura, Y. : Vacuum Facility for Xenon Ion Thruster Testing, Proc. of 16th ISTS, pp. 95-100, 1988.
- 5) Kitamura, S., Miyazaki, K., Hayakawa, Y. and Nakamura, Y. : Xenon Ion Test Facility-Design and Thruster Operation, DGLR/AIAA/JSASS IEPC Paper 88-60, 1988.
- 6) 宮崎勝弘, 早川幸男, 北村正治 : イオンエンジン作動真空の向上のためのエンジン移動取付台の製作とその機能評価, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1198, 1994.
- 7) O. リヒター, 他著, 前田禎三訳 : 精密機器の要素, 東京図書, p. 259, 1957.
- 8) 実用真空技術総覧編集委員会, 埴 輝雄 : 実用真空技術総, (株)産業技術サービスセンター, p. 129, 1990.
- 9) 東京天文台編, : 理科年表, 丸善.
- 10) Hayakawa, Y., Miyazaki, K. and Kitamura, S. : Performance Test of a 14cm Xenon Ion Thruster, AIAA Paper 92-3137, 1992.
- 11) Takegahara, H., et al. : Beam Characteristics Evaluation of ETS-IV Xenon Ion Thruster, AIAA/AIDAA/DGLR/JSASS IEPC Paper 93-235, 1993.

航空宇宙技術研究所資料669号

平成6年11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
