

19孔2枚グリッドのイオンビーム軌道解析

Ion Beam Simulation of 19-Aperture-Pair, Two-Grid System

中野 正勝¹⁾

Masakatsu Nakano¹⁾

Abstract: This work presents a numerical study performed on the 19-aperture-pair, two-grid optics set of an ion thruster. To analyze the ion acceleration performance from the multiple apertures of the ion thruster grid set, a high-speed ion-optics simulation code with a flexible mesh generator for multiple aperture array was developed. It is shown that the simulated cross sectional profile of an ion beam agrees very well with that obtained in the measurements; the clear star-shape profiles with six sharp points in the center and the distorted star-shape profiles with two or three sharp points in the periphery of the aperture array. Accel impingement current was also compared to that of the experimental results and shown to be in reasonable agreement. These results show that multiple-aperture-pair ion-optics can be simulated accurately and effectively using the developed ion-optics simulation code.

Keywords : Ion-optics simulation, 19-aperture-pair grid array, Beam cross section, Impingement current

1. 緒言

イオンスラスタは電力によって推進剤をプラズマ化し、電極間に印加した電圧でイオンを加速噴射して推進力を得る宇宙用の推進機である。イオンスラスタはこれまでに人工衛星の位置・姿勢制御から、静止軌道への衛星投入、また惑星間の軌道移行など様々なミッションに適用され成功を収めている。近年では大型衛星ばかりでなく中小型衛星用のイオンスラスタも開発されており、ほどよし4号[1]やPROCYON[2]への搭載が行われた。

イオンスラスタには多くの孔からなる2枚または3枚のグリッドと呼ばれる電極（スクリーングリッドと加速グリッド、3枚グリッドではこの2枚に加えて減速グリッド）があり、電極に印加した電圧によりイオンを加速噴射する。噴射されるイオンの速度が高ければ高いほど、燃費の良さを示す指標の比推力が高くなる一方で、イオンの加速に必要な電力が過大となり電源重量が増加することからミッションに応じて最適な比推力が存在する。

イオンスラスタでは、最終的に得られるイオンの速度はスクリーン電圧の0.5乗に比例することから、比推力はスクリーングリッドの電圧を変えることで変更可能である。すなわちミッションに応じて最適なスクリーン電圧が存在する。スクリーン電圧が異なれば加速されるイオンの軌道も変わるために、イオンスラスタ毎にグリッドの孔径、幅、間隔などの複数のパラメータを同時に最適化する作業が必要になる。実験的にこれらのパラメータを最適化するには多くの時間とコストがかかるために、数値解析によって効率的を図るべくイオンビーム軌道解析が行われてきた。

イオンスラスタのイオンビームの解析については、これ

までに様々な研究が行われ、多くの数値解析コードが開発されている[3-8]。一般的なイオンスラスタでは、グリッド孔は1つの孔に6つの孔が隣接する配置となるために、大半の数値解析コードが多数ある孔の中の1孔に着目し、六角形の対称境界条件を課したモデルを用いている。これは放電室におけるプラズマ生成が一樣で引き出されるイオン飽和電流に偏りが無い場合やプラズマ生成に偏りがあっても孔数が多い場合には妥当な解析結果を与える。なぜならば、孔間の電流密度変化が小さいことと、隣接孔が外側に無い（対称境界条件が成立しない）ために最外周孔の影響が相対的に小さくなるためである。

一方で、日本の小型イオンスラスタ[1,2]では、限られた領域でマイクロ波放電によりプラズマを生成するために、プラズマ密度の高い領域がリング状の分布を取る。したがって、最外周ばかりでなくグリッド中心部でも孔間の六角形の対称性が成立せず、従来の六角形対称領域を対象にしたイオンビーム解析の適用には限界がある。

一般に設計点を外れたビーム電流ではアクセルグリッドとの衝突を起こしやすい。ビーム電流が低い部分ではイオンビームは収束して発散（クロスオーバー）起こし、ビーム電流が高いとビームが収束することなく広がることでアクセル孔を通過できない（パービアンズ限界）ビームが発生する[9]。このとき大きなアクセル電流が流れ、衝突したイオンによる電極がスパッタ損耗を起こす。特に電流の大きい箇所では、グリッド損耗により孔径が拡大するために負の電位領域が喪失して中和電子逆流をもたらしやすい。そのため、電流密度が場所により大きく変化する小型イオンスラスタに対しては慎重なグリッド設計が必要となる。

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 航空宇宙工学コース

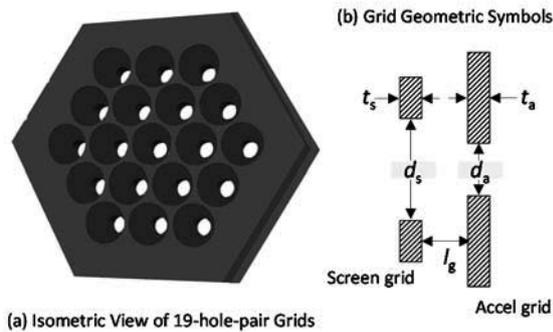


図1 19孔2枚グリッドシステム

表1 グリッド寸法および作動条件 (ビーム断面)

d_s, d_a (mm)	7, 3
t_s, t_a, l_g (mm)	0.5, 3, 5.5
スクリーングリッド開口比(%)	90
推進剤	クリプトン
スクリーン, アクセル電圧(V)	10000, -420
ビーム電流 (mA)	1.05
2価イオン比	0.15
放電電圧 (V)	40
プラズマ電子温度 (eV)	10

表2 グリッド寸法および作動条件 (アクセル電流)

d_s, d_a (mm)	7, 3.5
t_s, t_a, l_g (mm)	1.5, 3, 4.5
スクリーングリッド開口比(%)	90
推進剤	クリプトン
アクセル電圧 (V)	-420
ビーム電流 (mA)	0.58
2価イオン比	0.15
推進剤利用効率 (%)	18
放電電圧 (V)	40
プラズマ電子温度 (eV)	10

グリッドの各場所でビーム電流に違いがないと見なすことができれば電流値に応じた1孔解析を行えばよく、ビーム電流が孔毎に変化しても隣接孔との間の変化が小さいならば孔ごとに電流値を変えて1孔解析を行えばよい。しかしながら、小型イオンスラスタのように孔間でビーム電流に大きな違いがある場合やグリッドの孔数が少ない場合など、1孔解析が前提とする六角形の対称性が満たされない。グリッド全孔を対象とした解析が理想であるが、計算コストが著しく増大することからこれまでは1孔もしくは数孔程度の解析が主流であった。

本研究では今後の更なる計算機の高速化を見据え、イオンスラスタのグリッド全領域を一度に解析することが可能な数値解析コードの開発を行った。この数値解析コードはグリッドの孔数が変わっても柔軟に拡張できるものであり、本稿で扱う19孔グリッド[10]や $\mu 10$ イオンスラスタの高比推力化版である $\mu 10\text{Hisp}$ [11]の163孔の一部、また、小型イオンスラスタMIPS[1, 2]の211孔の解析を可能とするものである。

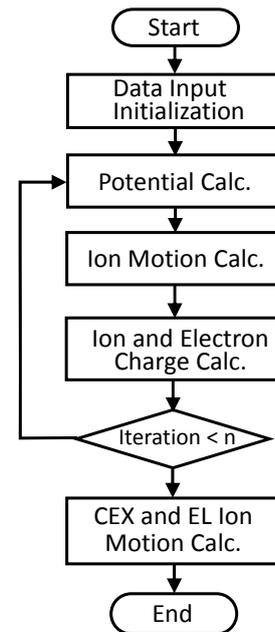


図2 フローチャート

このイオンビーム解析コードで得られる結果の妥当性を判断するためには実験との比較による検証が必要であるため、本稿ではWilburらの19孔高比推力イオンスラスタの実験データ[10]との比較・検証を行う。実験では19孔のグリッドから加速されるイオンビームの断面形状をアクセルグリッド上面に置いた 0.013 mm のTaの薄膜の損耗により取得しており、イオンビーム断面は中心部で六角形の星形状をし、周辺孔で不均一な星形状になることが分かっている。不均一な星形状の断面は従来の対称性を利用した1孔解析では得られない。このビーム断面を再現できれば、コードの妥当性の一つの根拠となる。また、スクリーン電圧に対するアクセル電流の計測も行われており、実験値をどの程度再現できるかで数値解析コードの適用度が決まる。

本研究の目的は1) グリッド全領域を一括に解析することが可能なイオンビーム解析コードの開発および2) 19孔グリッドを用いた実験との比較による数値解析コードの妥当性の検証である。

2. 解析対象と数値解析モデルの説明

2.1 解析対象

本稿で対象とするのはWilburらにより実験が行われた直流放電式の19孔イオンスラスタ[10]である。グリッドはSUS製で19孔の2枚グリッドシステムを用いて一連の実験が行われた。この実験の中から本稿ではビーム断面計測とアクセル電流計測のデータを用いて比較を行う。このイオンスラスタのグリッド部の寸法を表す記号の位置関係は図1右に示されている。ビーム断面計測実験のグリッド寸法と作動条件を表1に、アクセル電流測定用のグリッド寸法と作動条件を表2に示す。いずれも推進剤はクリプトンを用いている。

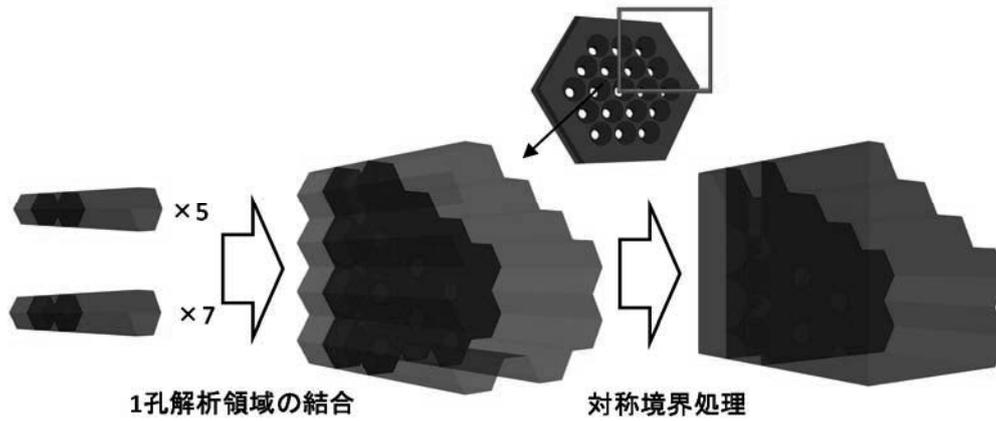


図3 解析領域の生成方法

2.2 数値解析モデル

本研究ではイオンスラストのイオン加速部の寿命認定のために開発された JAXA Ion Engine Initiative (JIEDI) tool [8]の中から、イオンビーム軌道解析コードの一部を拡張して用いた。このコードのフローチャートを図2に示す。この数値解析コードはこれまでの一連の研究の成果から次の仮定に基づいてモデル化されている。

- 1) 放電室で生成されるイオンのうち 10-15%が2価イオンであることから、1価と2価イオンを対象とする。
- 2) イオンと中性粒子間の衝突として衝突断面積の大きい電荷交換衝突と弾性散乱衝突を考慮する。
- 3) 放電室の磁場の影響は小さいものとし、イオン加速部のみを取り扱う。

計算ではグリッドの諸元や作動条件を入力した後、グリッドに印加された電圧により形成される電位場を求める。電位場は静電場のポアソン方程式により記述される。

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_i - \rho_e}{\epsilon} \quad (1)$$

ここで、 ϕ は電位、 ρ_i はイオン密度、 ρ_e は電子密度である。このうち、イオンはビームとして追跡され、その密度は計算格子の各頂点に分配される。電子の密度はボルツマン分布の関係式からプラズマ密度 ρ_{e0} と電子温度 T_e を用いてプラズマ電位 ϕ_0 との差によって求められる。

$$\rho_e = \rho_{e0} e^{\frac{e(\phi - \phi_0)}{k_B T_e}} \quad (2)$$

式(1)のポアソン方程式は有限要素法により離散化されるが、得られる方程式群は式(2)の指数関数に起因する非線形連立一次方程式となるため、Newton法を用いてプラズマ電位周りに線形化し、繰り返し計算により解を求める。この連立一次方程式は、代数マルチブロック法を用いたICCG法により並列化することで高速に解くことができる[12]。

電位場が求まったら再びイオンを放出して追跡し、計算格子にイオンの正電荷を割り当てることで式(1)の右辺の正電荷が得られ、電位から式(2)により電子密度も得られるので、再び式(1)のポアソン方程式を解く。これを繰り返して電位場とイオンビームの軌道が自己無撞着に決定されるよ

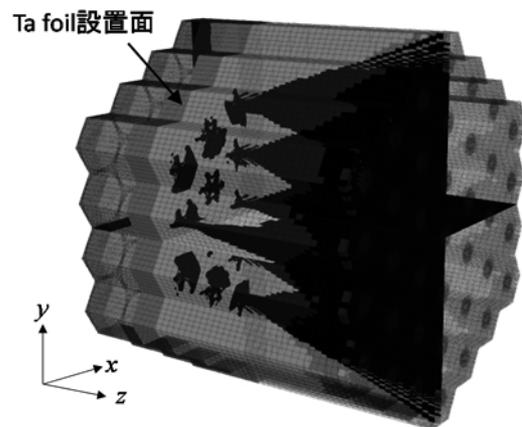
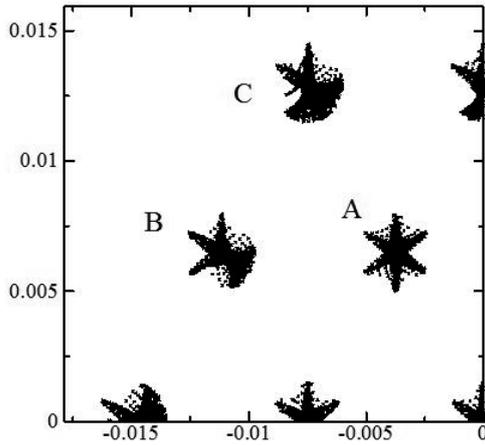


図4 中心孔を通る軸方向2平面(xz, yz平面)とTa薄膜設置面(xy平面)におけるビーム断面。

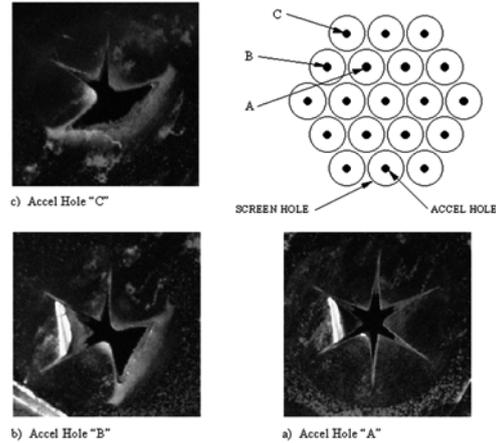
うにする。この後、中性粒子とイオンとの間で生じる電荷交換と弾性散乱によって生じたイオンと中性粒子の軌道を追跡し、グリッド電流やグリッドの損耗量を算出する。グリッド電流は、直接衝突によるイオン、電荷交換イオン、弾性散乱イオンの衝突により流れる。

2.3 解析領域

一般にイオンスラストのグリッドは対称な孔配置をしているために、19孔の解析領域も1/12または1/4の解析領域にすることで計算資源の範囲内で格子の密度を上げ精度を向上させることができる。ここではグリッド全体の1/4をカバーする領域を解析するものとした。この領域は図3に示されるように正六角柱の1孔解析領域を組み合わせることにより形成する。それぞれの正六角柱の1孔解析領域は、孔のある孔有り解析領域または孔の無い孔無し解析領域である。19孔であれば、1/4の領域を5つの孔有り解析領域と周辺部を囲む7つの孔無し解析領域で構成することができる。これによって全体領域を構成した後、対称境界条件を導入するために対称境界の外側に位置する要素を取り除いて最終的なメッシュを作る。なお、この孔有り解析領域と



(a) 計算結果



(b) 実験

図5 ビーム断面の比較. (a)計算結果, (b)実験結果 (文献[9]の Fig.3 より)

孔無し解析領域を用いることにより計算機的能力が許す範囲で任意の孔数のグリッドの解析領域生成を行うことができる。

なお、2枚グリッドではアクセルグリッドよりも下流で中和が行われるため、数値解析の条件として下流境界の長さを適時設定しなくてはならない。ここでは電位勾配がゼロとなる距離[13]の2-3倍を目安に設定した。

有限要素モデル生成においては、プラズマ領域で接点間隔がデバイ長以下となるように分割している。それぞれの正六角柱の1孔解析領域は、接点数 81588、要素数 78120 の6面体1次要素で分割されており、全体領域は重複点等を除去した接点数 746616、要素数 722610 の要素で分割された。

3. 結果および考察

3.1 ビーム断面

図4は19孔グリッドから流れるイオンビームの断面を3次元的に表示したものである。中心孔を通る直交する2面(xz, yz平面)とTa薄膜設置面(xy平面)の3つを示している。xz, yz平面に示されるイオンビームの軌道はアクセルグリッド付近で収束しその後発散するもので1孔解析から得られるものと同様である。一方で、xy平面に示されるイオンビームの断面は孔ごとに異なっている。図5に示すが、Ta薄膜設置場所におけるイオンビーム断面の比較である。計算ではTa膜設置面であるアクセルグリッド上流面を通過するイオンビームをプロットし、実験ではTa薄膜に空いた孔を示している。

孔位置をA, B, Cとすると、実験で得られたビーム断面と計算結果は孔Aで六角形の星型となる点で一致しており、孔Bでは外側に突起が3つ、孔Cでは外側に突起が2つ形成され、それぞれ内側が円弧上になる点でよい一致をしている。孔Aの星型形状のビーム断面は、周辺を取り囲む6つの隣接孔との関係で生じるもので、対称1孔解析でも導くことができるが、孔Bと孔Cの形状は六角形の対称性が無

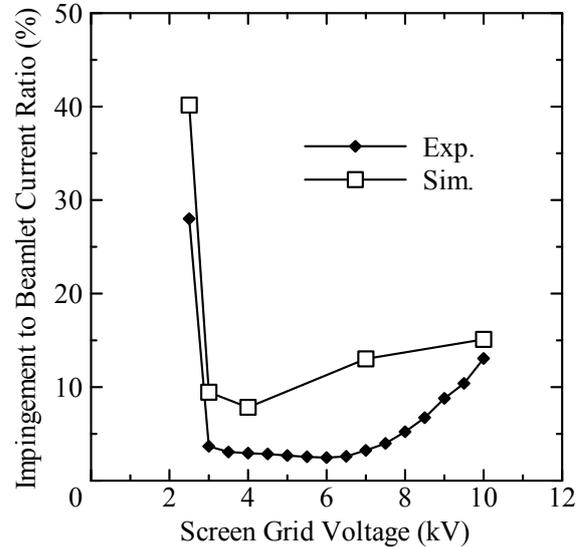


図6 アクセル電流とスクリーン電圧の関係

く全孔一括解析が必要であることを示している。なお、孔Bと孔Cのようにビーム断面が不均一である場合、ビームの一部がグリッドに衝突することで損耗を生じやすい。これはグリッドの寿命を制限する要素となるため、今回のような全孔解析が重要であることを示している。

3.2 アクセル電流

図6は表2のグリッド形状と作動条件のもとで求めたアクセル電流とスクリーン電圧の関係である。アクセル電流はスクリーン電圧に対してバスタブ型の曲線形状を示し、スクリーン電圧が低い領域ではビーム径が大きくなることでイオンビームがアクセルグリッドに衝突する Perveance limit によりアクセル電流が急増し、逆にスクリーン電圧が高い領域ではビームの収束部がアクセルグリッドの上流側に移動することによる Cross-over Limit によってアクセル電流が急増する。計算結果は Perveance Limit ならびに Cross-

over Limit によるアクセル電流の急増をとらえているものの、実験値よりも 5-10% 大きく定量的な一致にまで至っていない。計算ではスクリーングリッド電圧 4-7 kV の範囲でアクセルグリッドに直接衝突しているイオンビームは無く、全てが電荷交換と弾性散乱により生じたイオンの衝突による電流であることから、実験時の中性粒子密度分布を過大に評価したことが原因と考えられる。本解析では、単純にイオン源への推進剤流量から中性粒子密度を算出したが、中性粒子のグリッド孔以外への漏れ等によって実験時の中性粒子密度が低かった可能性もある。

なお、今回のように数 keV を超えるスクリーン電圧を用いた場合、イオンがアクセルグリッドに衝突する際に 2 次電子放出をもたらす、衝突したイオンの電流以上の電流が流れるが、グリッドに用いた SUS に対する Kr の 2 次電子放出係数のデータが不明であったために、計算では 2 次電子放出の影響は含めなかった。そのため高電圧側で計算結果は実験結果を過小評価する結果となっている。SUS に対する Kr 入射時の 2 次電子放出係数のモデル化と数値解析コードへの組み込みは今後の課題である。

4. まとめ

イオンスラストのグリッド設計や性能の最適化においてイオンビーム解析は重要である。イオンスラストのグリッドには多数の孔があるが、これまでのイオンビーム解析の多くが隣接孔との対称性を利用して 1 孔のみを解析してきた。これはこれまで使用されてきたイオンスラストが比較的大型で、隣接孔の無い周辺孔の数が相対的に無視できるとともに孔間でのビーム電流の差が小さかったからである。しかしながら、小型イオンスラストなど、孔数が限られ、不均一なプラズマ生成を行うものも登場しているため、全孔を一括して扱うことのできるイオンビーム軌道解析が必要とされている。

本研究ではイオンスラストのグリッドの全孔を解析できるようにビーム軌道計算コードを拡張するとともに、任意孔数の領域形成が可能なメッシュ構築方法を提案した。この方法に基づいて、19 孔グリッドモデルを作成し、実験結果の再現の有無を確認した。計算結果は実験で得られたビーム断面形状とよい一致を示した。これは従来の 1 孔解析では得られないものである。また、アクセル電流とスクリーン電圧の関係を概ね妥当に再現した。

今後は孔数の多い MIPS や $\mu 10\text{Hisp}$ などへの適用や定量的な評価を行うために 2 次電子放出のモデル化を行う予定である。

5. 参考文献

- [1] H. Koizumi, K. Komurasaki, J. Aoyama et al. : Engineering Model of the Miniature Ion Propulsion System for the Nano-satellite: HODOYOSHI-4, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 12, pp.Tb_19-Tb_24, 2014.
- [2] H. Koizumi, H. Kawahara, K. Yaginuma et al. : Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System installed on Small Space Probe: PROCYON, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 14, Pb_13-Pb_22, 2016.
- [3] Y. Hayakawa : Three-Dimensional Numerical Model of Ion Optics System, J. Propulsion and Power, 8, pp. 110-117, 1992.
- [4] Y. Okawa, H. Takegahara and T. Tachibana : Numerical Analysis of Ion Beam Extraction Phenomena in an Ion Thruster, 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-097, 2001.
- [5] Y. Nakayama and P. J. Wilbur : Numerical Simulation of Ion Beam Optics for Multiple-Grid Systems, Journal of Propulsion and Power, 19, pp.607-613, 2003.
- [6] C. C. Farnell and J. D. Williams : Ion Thruster Grid Design Using an Evolutionary Algorithms, Journal of Propulsion and Power, 26, pp.125-129, 2010.
- [7] J. Wang, J. Polk, J. Brophy et al. : Three-Dimensional Particle Simulations of Ion-Optics Plasma Flow and Grid Erosion, Journal of Propulsion and Power, 19, pp. 1192-1199, 2003.
- [8] M. Nakano : JIEDI Tool: Numerical Life Qualification Tool for Ion Engine Optics, Tran. JSASS, Aerospace Tech. Japan, 10, pp. Pb_85-Pb_90, 2012.
- [9] 荒川義博, 国中均, 中山宜典ほか: イオンエンジンによる動力航行, コロナ社, 62-64, 2006.
- [10] P. J. Wilbur, J. Miller, C. C. Farnell et al. : A Study of high Specific Impulse Ion Thruster Optics, IEPC-01-098.
- [11] H. Hayashi, H. Kusunaka, M. Usui et al. : R&D on 10,000sec Isp Ion Engine Driven by Microwave, AIAA Paper No.2008-4810, 2008.
- [12] 染原一仁, 藤野清次, 代数マルチブロック技法による ICCG 法の並列化性能の向上, 情報処理学会論文誌, 47, pp.21-30, 2006.
- [13] R. Kaufman : One-Dimensional Analysis of Ion Rockets, NASA TN D-261, 1960.