

# イオンスラスタグリッドシミュレーションに関するレビュー

趙 孟 佑\*

## A Review on Ion Thruster Grid Simulations

By

Mengu CHO\*

**Abstract:** A Literature review has been carried out about computational simulation of ion thruster grid region. The computational region consists of upstream discharge plasma, ion beam going through the ion optics grid system and downstream neutralized plasma. Various plasma species exist such as beam ions, charge exchange ions, discharge chamber electrons, neutralizer electrons and others. Literature of the past 8 years has been studied intensively. Their methodologies, computational geometries, particle modeling, downstream modeling, Poisson solver and discharge plasma modeling have been compared. Based on the literature review, the strategy toward building the future grid simulation tool has been discussed with suggestions of future works.

**Key words:** Ion thruster, Grid erosion, Plasma simulation, Particle-in-Cell, Flux-Tube, Charge exchange

### 1. はじめに

イオンスラスタのグリッド領域については、最適推進性能をもたらすグリッド配置を決定するために、イオン粒子を追跡する beam optics シミュレーションが古くから行われてきている。近年のはやぶさや DS-1 の成功によりイオンスラスタの主推進化が実現したが、寿命決定要因としてグリッド部の耐久性能がクローズアップされるようになってきた。数万時間を超える動作を要求される中で、地上試験による耐久試験にかかる人的・時間的・設備的・金額的成本は莫大なものとなっており、設計パラメータを幅広く取った上で最適設計を実験的に見いだすということは不可能に近くなっている。

計算機の発展と共に、グリッド領域の数値計算をイオン粒子軌道計算だけでなく、グリッド部分の耐久性評価にも適用しようという動きが 90 年代より始まっている。計算機シミュレーションを使うことで、一つの設計パラメータの組み合わせについて、グリッドシステムの性能を実験に比べて遥かに短時間で知ることができる。そのため、実験では不可能であったパラメトリックな研究開発が可能になる。

イオンスラスタグリッド領域のシミュレーションは主に以下の 3 つの目的をもって行われている。

- (1) 最適性能をもたらすイオン軌道を作るためのイオン光学システムの設計支援
- (2) スラスタ寿命を決定するためのグリッド浸食過程の決定。グリッド浸食によるスラスタの機能損失モードとしては、グリッド部の構造的破壊やグリッド穴が拡がりすぎることによる中和電子の逆流などがあげられる
- (3) 放電室内プラズマやスラスタプルームのシミュレーションに対して下流または上流境界条件を与える

---

\* Kyushu Institute of Technology

本稿では主に 1999 年以降の IEPC と 2000 年以降の AIAA ミーティングとジャーナルを中心とした文献調査を行い、各シミュレーション研究のレビューを行なうことを目的としている。Reference に本稿で対象とした文献一覧を示す。ここに示されたもの以外にも多くの文献が出されているが、同一の著者グループからの一連の論文については、最後のまとめとなる論文一件のみを示している。現在のところ、米国で積極的にこの分野で活動しているグループは JPL, バージニア工科大学, コロラド州立大学, GRC, ミシガン大学などである。欧州については, IEPC を中心として見る限り, 目立った発表が少ない。

本稿の第 2 章では各文献で採用している計算手法及び計算結果の検証手法に付いて述べ, 第 3 章では JAXA で計画されているイオン加速グリッド耐久認定用数値シミュレーションツール開発に向けて必要とされる諸課題について述べる。

## 2. 計算手法

### 2.1. 放電室モデリング

#### 2.1.1. ビームイオン

主イオンビームのモデル化に関しては, 表 1 に示した 2 種類に大別される。ここで Time-dependent とは, 一個のイオンが放電室から下流プラズマに抜けていくまでの間に空間電荷による電場が変動するかどうかを意味する。Time-dependent に分類されるものに Particle-in-Cell(PIC)法がある。PIC 法は更にイオンと電子の両方を超粒子として計算する Full-PIC と, 電子はボルツマン分布で近似してイオンだけを超粒子として計算する Hybrid-PIC の 2 つに分けられる。Time-independent に分類されるものは Flux-tube (FT), Streamline PIC, Gun model と様々な呼び名はあるが, 基本的には同一のものである。Time-dependent も Time-independent もビームイオンの空間分布が定常となるまで解かれることには違いはない。

Table 1 : Modeling Methods of Main Beam Ions

Ref.	Authors	Affiliation	Time dependent?
1	Peng et al	U. Tennessee	Yes
2	Hayakawa	NAL	No
3	Muravlev et al	KRC	No
4	Okawa et al	TMIT	Yes
5	Tartz, et al	IOM	No
6	Nakano et al	U. Tokyo	No
7	Crofton et al	U. Michigan	Yes
8	Brophy et al	JPL	No
9	Wang et al	VPI	Yes
10	Nakayama et al	NDA	No
11	Farnell et al	CSU	No
12	Malone et al	GRC	No
13	Kafafy et al	VPI	No
14	W. Emhoff et al	U. Michigan	Yes

PIC 法は FT 法に対して, 計算コストが高い。この欠点は, Poisson 方程式を各タイムステップ (計算格子をイオンが横切る時間よりも短い) で解かなければならないためと, 計算領域の端から端まで超粒子で埋めないといけないので FT 法よりも多くの粒子軌道を一度に追跡しなければならないことによる。一方で, PIC 法は FT に比べて仮定が少

ないという利点を有している。PIC 法は、個々の粒子の運動に基づいて現象を追いかける第 1 原則により近い方法であるので、プログラミングが楽であり、またシース境界等もより正しく再現できる。また、反射などによって速度ゼロが現れたり、マクスウェル分布から外れたりした時でも柔軟に対応できる堅牢さをもっている。

グリッドシミュレーションで PIC 法を採用するか FT 法を採用するかは精度と計算時間のトレードオフであると言えるが、最大の関心は放電室内でスクリーングリッドの穴近傍のシース形状が正しく再現できるかどうかにある。PIC 法は放電室内の上流境界をスクリーングリッドから離せば離す程 self-consistent なプレシース境界を形成することができ、ビームイオンはシース境界で自動的にボーム速度をもつことができる。一方、FT 法は PIC 法よりも、もうひとつ仮定を積み重ねており、ボーム速度はどこかで持たせることになる。PIC 法をベースに書かれた計算プログラムを FT 法に改造することは比較的容易であるので、同じ計算プログラムを用いて PIC 法と FT 法で同一のシース境界を再現できるかどうかの比較計算を実施することが今後求められる。

### 2.1.2. 放電室電子

放電室内の電子については、PIC 法でも FT 法でもボルツマン分布を仮定して、以下の式で表したケースが殆どである。

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{\phi - \phi_0}{T_e}\right) \quad \phi < \phi_0 \quad (1)$$

ここで、 $\phi_0$  はスクリーングリッドに対する放電室プラズマ電位であり、これは人為的に与えなければならない。更に式(1)を用いるということは、計算領域に関する限りは放電室内の電子は単一で様な温度を持っていることを意味している。

過去に文献 4 だけが電子も超粒子として取り扱う Full-PIC 法で計算している。文献 4 では電子をマクスウェル分布に高エネルギー電子を重畳した分布を仮定して計算を行なっている。Full-PIC を使うと Hybrid-PIC よりも計算が大変だと思われるが、実はそれほどでもない。特にグリッドシミュレーションの場合、定常状態だけが必要とされているので、電子の超粒子の質量をイオンの超粒子の質量と同じとしても、計算結果は変わらないはずである。それであれば、粒子の運動方程式を解く部分については、計算時間は 2 倍になるだけである。一方電子の密度分布に式 (1) を使わないことによって、Poisson 方程式が線形になるので、計算格子幅を矩形で一様にさえできれば高速フーリエ変換を用いることができ、Poisson 方程式を解くのにかかる時間が圧倒的に短くなる。更にプログラミングもより簡単になるという利点がある。故に、矩形計算格子において PIC 法を用いるのであれば、電子も超粒子で扱う Full-PIC 法も十分考慮に値する。

## 2.2. 計算格子と電界計算

表 2 に各文献で採用している計算格子システムを示す。計算機資源が豊かになると同時に計算も 2 次元から 3 次元に移りつつある。2 次元計算は円筒座標系を元にしており、軸 (z) 方向には一様幅の計算格子を使用しているものが多い。半径方向では、PIC 法の場合、軸付近の超粒子の数を保つために格子幅を大きくしたり、超粒子の重みを変えたりする工夫が必要になる。また、円筒座標系を使うと、軸付近での運動量またはエネルギー保存に誤差が生じやすいので注意が必要である (文献 10)。

3 次元計算はスラスタグリッドの穴と穴の間の壁部分が浸食されていく過程を調べるには必須である。また複数のグリッド穴からでたビーム同士の干渉を調べることもできる。図 1 に文献 9 で採用された計算格子を示す。スラスタグリッドが 4 方向について対称であることを利用し、4 分の 1 の領域だけを取りだしている。このようにスラスタグリッドがいくつもの穴で形成されるある対称性をもったパターンであることを利用して、一部だけを計算領域に取り込んだ例が多い。但し、最近では一個の穴全体を組み込んだシミュレーション (文献 13) も登場している。文献 13 の計算領域を図 2 に示す。

**Table 2 : Computational Grid Systems**

Ref.	Authors	Affiliation	Computational grid system
1	Peng et al	U. Tennessee	2D 1.14 mm $\times$ 3.868 mm 12 $\times$ 47 cells
2	Hayakawa	NAL	3D All of 1-hole, periodic BC
3	Muravlev et al	KRC	2D rectangular
4	Okawa et al	TMIT	2D 1.25 mm $\times$ 5 mm 60 $\times$ 250 cells, Constant $\Delta z$ , variable $\Delta r$
5	Tartz, et al	IOM	2D?
6	Nakano et al	U. Tokyo	2D $\Delta = 0.5 \times \text{debye}$ and 3D
7	Crofton et al	U. Michigan	2D regular $\Delta = 20\sim 40\mu\text{m}$
8	Brophy et al	JPL	2D regular
9	Wang et al	VPI	3D rectangular $\Delta x = \text{debye} = 37\mu\text{m}$ , 30 $\times$ 30 $\times$ 400
10	Nakayama et al	NDA	3D cylindrical 15 degrees of circular aperture r 29* $\theta$ 10* z 230
11	Farnell et al	CSU	3D rectangular uniform $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ 30 $\times$ 50 $\times$ 300
12	Malone et al	GRC	3D Combined with commercial mesh generator for a finite-element solver
13	Kafafy et al	VPI	3D Combination of rectangular meshes for particle pushes and tetra hedra meshes for field solver
14	W. Emhoff et al	U. Michigan	2D uniform rectangular

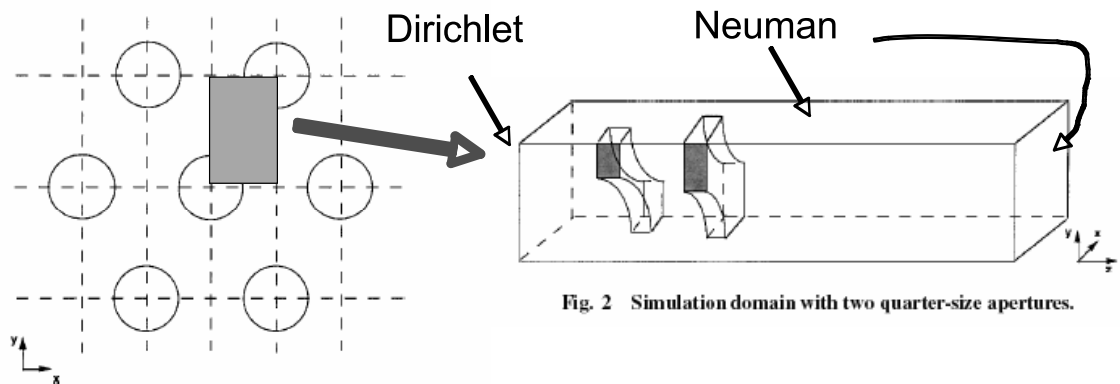
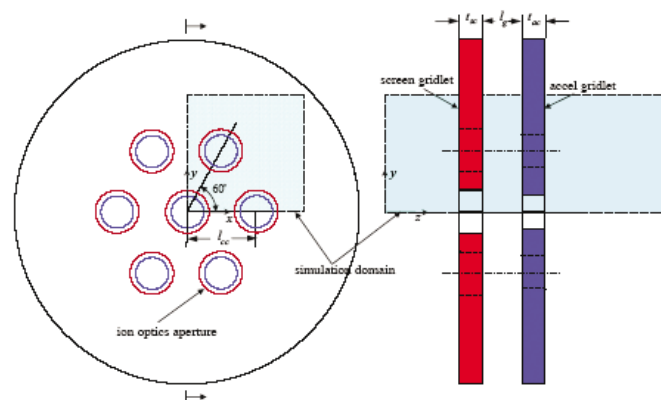


Fig. 1 Cross section of a simulation domain with multiple apertures.

From Wang et al, JPP 2003

**Fig.1 Example of Three-dimensional Computational Domain (Ref.9)****Figure 5. Simulation domain of a whole subscale gridlet with seven apertures.****Fig.2 Example of Three-dimensional Computational Domain Containing a Full Grid Aperture (Ref.13)**

3次元の計算格子については、矩形格子を採用する場合と、穴の曲線をより正確に表現するために適合格子を採用する場合に分かれる。適合格子を用いた場合の問題点は、粒子軌道計算との相性である。粒子軌道を計算する際には、格子内にある粒子に働く力は、周囲の格子点の電界を内挿して求める。粒子がどの格子に囲まれているかを判定するのに、矩形格子であれば単純に事が済むが、適合格子の場合は非常に複雑である。矩形格子を用いるか適合格子を用いるかは、適合格子を用いた場合のプログラミングの複雑さと判定にかかる時間と、矩形格子を使うことによって生じる誤差のトレードオフで決まる。

表3に各文献がPoisson方程式をどのように解いているかをまとめる。矩形格子を用いる場合は、差分法によってPoisson方程式を解いているが、電子についてボルツマン分布を仮定する限りPoisson方程式は非線形であり、SORやADIといった繰り返し法が必要となる。適合格子を使用した場合には有限要素法が用いられている。これも基本的には繰り返し法である。

### 2.3. 電荷交換イオンと中性ガス粒子

表4に各文献が電荷交換イオンをどのように取り扱っているかをまとめたものを示す。電荷交換イオンを取り扱っていないものもあるが、これらは主にビーム軌道計算を目的としているか、ビームイオンの衝突によるグリッド浸食を取り扱っている。電荷交換イオンの生成については、Volumetric ProductionとPIC-MCC(Monte Carlo Collision)に大別される。前者は、各計算格子におけるビームイオン密度、中性気体密度、イオン速度、衝突断面積を用いた以下の式

$$\frac{dn_{cex}(x)}{dt} = n_b n_n v_i \sigma_{cex}(v_i) \quad (2)$$

を使って、各格子点での単位時間あたりの生成量を計算するものである。後者は、ビームイオンの軌道を追っていく過程でモンテカルロシミュレーション的要素を入れて乱数でビームイオンと中性ガスとの衝突の有無を判定して各格子点での電荷交換イオンの生成量を計算するものである。PIC-MCCは粒子の速度分布をある関数で表すのが難しい時に適しているが、グリッドシミュレーションのように衝突前の高速イオンの速度が非常に揃っているような場合にはVolumetric Productionでもそれほど問題はないと思われる。但しPIC-MCCを使うもう一つの利点として、弾性衝突によって曲げられたイオンがグリッド壁を直撃する効果を容易に計算することができるという点がある。

Table 3: Poisson Solvers

Ref.	Authors	Affiliation	Poisson solver
1	Peng et al	U. Tennessee	unknown
2	Hayakawa	NAL	Finite-element
3	Muravlev et al	KRC	SOR
4	Okawa et al	TMIT	Gauss elimination with sparse-matrix refinements
5	Tartz, et al	IOM	unknown
6	Nakano et al	U. Tokyo	Finite-element
7	Crofton et al	U. Michigan	ADI
8	Brophy et al	JPL	Unknown
9	Wang et al	VPI	DADI
10	Nakayama et al	NDA	SOR
11	Farnell et al	CSU	Gauss-Seidel+SOR
12	Malone et al	GRC	Finite-element
13	Kafafy et al	VPI	Finite-element
14	W. Emhoff et al	U. Michigan	unknown

Table 4: CEX Production and Neutral Particle Modeling

Ref.	Authors	Affiliation	CEX production	neutral particle modeling
1	Peng et al	U. Tennessee	PIC-MCC	Constant
2	Hayakawa	NAL	No	NA
3	Muravleve et al	KRC	Yes	BGK model (elastic collisions included)
4	Okawa et al	TMIT	No	NA
5	Tartz, et al	IOM	Volumetric production from $j_b, n_n, \sigma_{cx}$	free molecular flow
6	Nakano et al	U. Tokyo	Volumetric production from $j_b, n_n, \sigma_{cx}$	DSMC
7	Crofton et al	U. Michigan	PIC-MCC	DSMC
8	Brophy et al	JPL	Monte Carlo?	unknown
9	Wang et al	VPI	Volumetric production from $j_b, n_n, \sigma_{cx}$ 500K Maxwellian	Free molecular flow
10	Nakayama et al	NDA	Volumetric production from $j_b, n_n, \sigma_{cx}$	Free molecular flow
11	Farnell et al	CSU	Volumetric production from $j_b, n_n, \sigma_{cx}$	Free molecular flow
12	Malone et al	GRC	Not yet	NA
13	Kafafy et al	VPI	No	NA
14	W. Emhoff et al	U. Michigan	PIC-MCC	DSMC

中性ガスについては、表4に各文献での取り扱いを示すが、自由分子流とDSMC (Direct Simulation Monte Carlo) に大別される。どちらを取るべきかは、考慮した計算領域の中でどれくらいの衝突が起きるかで決まるが、中性ガスの密度を  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  程度（文献9）、Xe-Xeの衝突断面積を  $10^{-18} \text{ m}^2$  程度（文献7）とすれば、平均自由行程は1mであって、高々数mm程度のグリッド領域では中性粒子同士の衝突は殆ど無視できる。

#### 2.4. 下流モデル

表5に各文献のスラスター下流のモデル方法を示す。電子密度について、殆どのが以下のボルツマン分布で表している。

$$n_e = n_\infty \exp\left(\frac{e(\phi - \phi_\infty)}{\kappa T_{e\infty}}\right) \quad (3)$$

ここで、はある基準点の電位であり、下流境界の値を用いるものが多い。下流境界条件については、電位をゼロとしてDirichlet型の境界条件を採用しているもの（文献1,2,6,13）や電界をゼロとしたNeumann型の境界条件を採用しているもの（文献9）がある。文献9と11は式(3)ではなく、下流域の電位が基準点電位を超えて式(3)のexpの中が正になっても対応できるように、以下のように電子密度を決定している。

$$\begin{aligned} n_e &= n_\infty \exp\left(\frac{e(\phi - \phi_\infty)}{\kappa T_{e\infty}}\right) & \phi < \phi_\infty \\ &= n_\infty \left[1 + \frac{e(\phi - \phi_\infty)}{\kappa T_{e\infty}}\right] & \phi > \phi_\infty \end{aligned} \quad (4)$$

式(3)をとるにせよ(4)を取るにせよ、温度  $T_{e\infty}$  と密度  $n_\infty$  は何らかの形で与えられなければならない。電子温度については、中和器プラズマの電子温度を元に決めている例が多い。密度については、予めある値を仮定しておくか、下流境界のイオン密度の平均値を使うという例もある。

下流域のモデル化についての問題点の一つとして、どこまで下流境界をとるかという問題がある。文献6のようにKerslakeのモデルを採用すると明示しているのもあるが、それ以外はどれも確固たる理由があって下流境界の位置は

決められていない。下流境界を近くに取りすぎると、電荷交換イオンの総発生量が小さくなるので、グリッド浸食を過小評価することになる。文献 11 のように、計算領域の外側で生成される電荷交換イオンも考慮して、その分を計算領域内で生成される電荷交換イオンの総数を補正するという方法もある。しかしながら、下流境界を近くに取りすぎた時のもう一つの問題点として、下流域の電界が実際よりも高くなってしまい、電荷交換イオンや逆流電子の軌道に影響を与えてしまうという点がある。

下流域のモデル化のもう一つの問題として、下流プラズマの電位の基準をどこにとるかという問題がある。式 (3) のボルツマン分布を使う限り、電位の基準点はその領域で最大電位をとる点を使わなければ、Poisson 方程式が発散してしまう。式 (4) のような改良は可能であるが、それも電位差が電子温度に比べて小さい範囲に収まっている時だけである。下流に行くほど電位は高くなっていくと思われるので、下流境界の電位を基準とすることで、計算が発散することはなくなるが、別の問題が発生する。図 3 にあるように、放電室プラズマ電位  $\phi_p$ 、スクリーングリッド電子  $\phi_{sc}$ 、アクセルグリッド電位  $\phi_{acc}$  は、本来、衛星構造体電位を基準として与えられるものである。一方下流境界電位  $\phi_{BC}$  はプラズマ電位であり、これが衛星構造体電位と等しくなる保証はない。むしろプルーム中心の電位は中和器電子をひき寄せるために、衛星構造体電位よりも正の電位をもっていると考えるのが妥当である。よって下流境界電位  $\phi_{BC}$  を単純にゼロとするのではなく、プルーム中の最大電位を持たせるのが望ましい。その時は無論下流境界の場所もプルーム電位が最大電位をもつところまで拡げる必要がある。

**Table 5: Modeling Methods of Downstream Plasma**

Ref.	Authors	Affiliation	Downstream modeling
1	Peng et al	U. Tennessee	$\phi = 0$ at the downstream boundary. $n_e = n_0 \exp(e\phi/kT_e)$ , $n_0 = 10^{14} \text{ m}^{-3}$
2	Hayakawa	NAL	$n_e = n_0 \exp(e\phi/kT_e)$ . $n_0$ = average ion density at the boundary $\phi = 0$ at the downstream boundary
3	Muravlev et al	KRC	yes?
4	Okawa et al	TMIT	no
5	Tartz, et al	IOM	Unknown
6	Nakano et al	U. Tokyo	$n_e = n_0 \exp(e\phi/kT_e)$ . $n_0$ = average ion density at the boundary $\phi = 0$ at the downstream boundary
7	Crofton et al	U. Michigan	$n_e = n_0 \exp(e\phi/kT_e)$ . $n_0$ = a given value inferred from CEX density ( $2 \sim 6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ )
8	Brophy et al	JPL	$n_e = n_0 \exp(e\phi/kT_e)$ .
9	Wang et al	VPI	Yes. $f$ can be + or - compared to the reference potential
10	Nakayama et al	NDA	No
11	Farnell et al	CSU	Yes. $f$ can be + or - compared to the reference potential
12	Malone et al	GRC	unknown
13	Kafafy et al	VPI	$n_e = n_0 \exp(e\phi/kT_e)$ . $n_0$ = average ion density in the down stream $\phi = 0$ at the downstream boundary
14	W. Emhoff et al	U. Michigan	yes

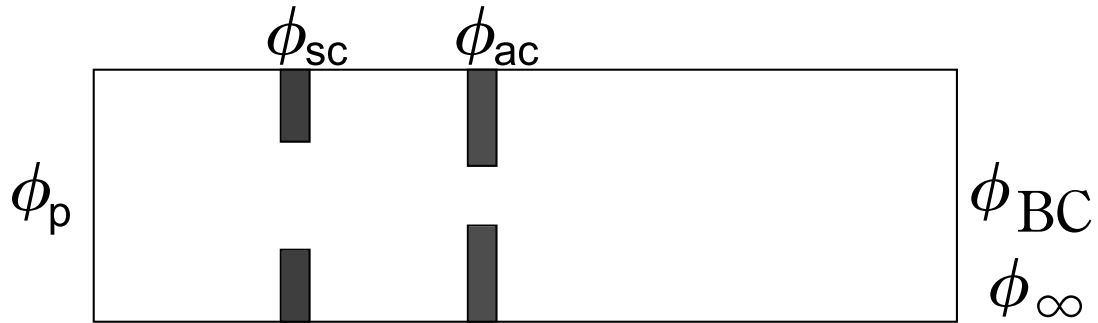


Fig.3 Potentials to be Defined in Ion Thruster Grid Simulations

### 2.5. 検証手法

表 6 に各文献が計算結果の検証のために用いたイオンスラスタと仮定したプラズマパラメータ等を示す．地上での実験データが多数残されている NSTAR と NEXT を対象としたものが多い．計算結果の検証方法としては，初期の頃はビームイオン分布（図 4），グリッド収集電流（図 5），グリッド質量減少率（図 6）といった巨視的なパラメータが多かった．NSTAR で詳細なグリッド損耗パターンが計測されて以来は，図 7 のように所謂 Pits & Grooves といわれるグリッド損耗のパターンを実際と比較することが行われている（文献 6，9）．また文献 9 ではグリッド損耗の深さ分布も定量的に比較する試みがなされている．

Table 6: Simulated Ion Thrusters

Ref.	Authors	Affiliation	Ion thruster	Grid	$\phi_p - \phi_{sc}$ (V)	$T_e$ (eV)	$n_o$ ( $m^{-3}$ )	$T_{e\infty}$ (eV)
1	Peng et al	U. Tennessee	30cm	2	28	1.5	$5 \times 10^{18}$	1.5
2	Hayakawa	NAL	Experimental argon	2	45	5	$9 \times 10^{16}$	3
3	Muravlev et al	KRC	10cm Kaufmann type	2				
4	Okawa et al	TMIT	30cm Cusp ion thruster	2		4.5	$3 \times 10^{17}$	
5	Tartz, et al	IOM	ISQ 40 RF	3				
6	Nakano et al	U. Tokyo	MUSES-C and NSTAR	2 and 3				
7	Crofton et al	U. Michigan	T5	3	40	5		3
8	Brophy et al	JPL	NSTAR	2				
9	Wang et al	VPI	NSTAR	2	26	5	$2 \times 10^{17}$	1.5
10	Nakayama et al	NDA	Experimental thruster with 19 holes	2 and multiple grids				
11	Farnell et al	CSU	SUNSTAR (Scaled up NSTAR)	2				
12	Malone et al	GRC	NEXT	2				
13	Kafafy et al	VPI	NEXT	2	20	5	$1 \times 10^{17}$	1.5
14	W. Emhoff et al	U. Michigan	NEXT	2	24			



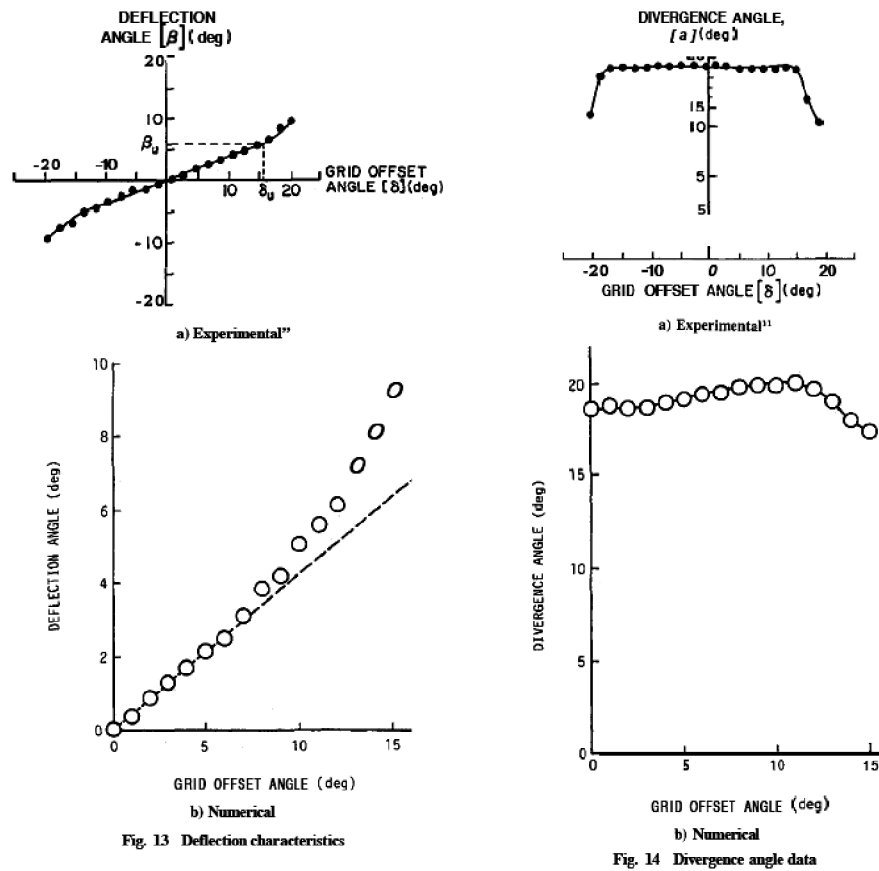


Fig. 13 Deflection characteristics

Fig. 14 Divergence angle data

Fig.4 Validation of the Simulation Results by Comparison with the Experimental Results Regarding the Beam Ion Profile (Ref.2)

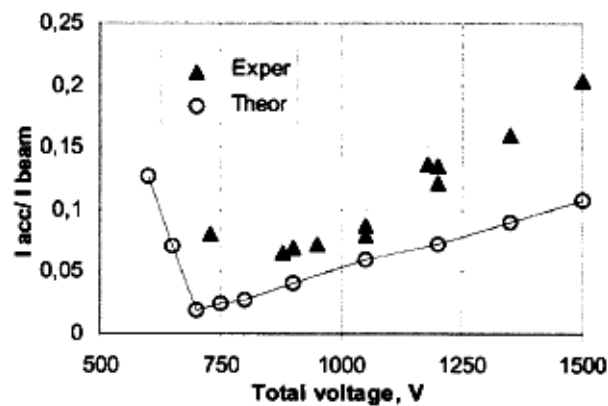


Fig. 6 Accelerator-to-beam current ratio versus total voltage

Fig.5 Validation of the Simulation Results by Comparison with the Experimental Results Regarding the Accelerator Grid Current (Ref.3)

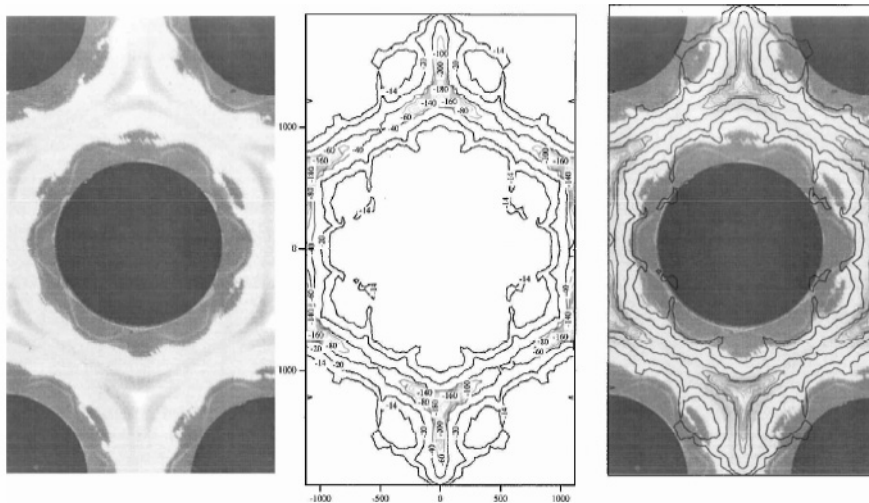
**Table 2: Ratio of accel grid current to beam current.**

	Vacuum Chamber		Space Operation	
	Total	Isotropic CEX	Total	Isotropic CEX
Exp.	1.25 %	—	—	—
Calc.	0.994 %	0.53 %	0.324 %	—

**Table 3: Accel grid mass loss.**

	Vacuum Chamber		Space-Operation	
	Total	Downstream	Total	Downstream
Exp.	44.8 g	—	—	—
Calc.	54.1 g	24.9 g	24.5 g	5.33 g

**Fig.6 Validation of the Simulation Results by Comparison with the Experimental Results Regarding the Grid Erosion Rate (Ref.6)**



**Fig. 10 Comparison of simulation results with experimental data. Grid-erosion pattern on accel grid downstream surface: left, photograph of erosion and deposition pattern after 8200 h of operation; middle, simulation results for the same operating conditions; and right, direct comparison of the erosion pattern.**

**Fig.7 Validation of the Simulation Results by Comparison with the Experimental Results Regarding the Grid Erosion Pattern (Ref.9)**

### 3. まとめ

これまで過去 10 年近くに亘って内外で行われてきてイオンスラスタグリッドシミュレーションについて見てきたが、いずれも設計に計算結果を反映するには至っていない。イオン加速グリッド耐久認定用数値シミュレーションツールとして設計にも使えるツールを目指すのであれば、まずはツールによって予測される寿命の誤差が許容範囲に収まることを実証する必要がある。ツールの使用方法としては、耐久試験を実際に行なう前の設計パラメータの大まかな選択に使用するという方法と、1000 時間程度の短時間で耐久試験を終了してその後の結果を外挿して求めるために使うという方法の 2 種類が考えられるが、後者の場合に 1 万時間を超える誤差が含まれるのは論外であろう。前者の場合には大きくふられたパラメータに対して定性的に正しい挙動を示すことが第一であり、定量的正確さは耐久試験の代替ではないのでそこまで要求されないと思われる。

そこで求められるツールとしては、計算時間は少々かかっても得られた結果を信用するに足る定量的正確さを備えた高精度バージョンと、Try & Error を可能にする高速性を備えた高速バージョンが求められる。二つのバージョンが違った計算アルゴリズムを採用するのは仕方がないにしても、ユーザインターフェースや計算格子等は極力共通化することが望ましい。高精度バージョンについては、計算時間のターゲットをどこに設定するかは今後決められていくべきことであるが、100 ～ 200 時間程度が常識的には上限と思われる。即ち実験に対して 100 倍程度の加速が得られるのであれば、ツール使用は正当化されると思われる。高速バージョンについては、インタラクティブに計算を行なうのであれば数 10 分程度で一つのパラメータの組み合わせに対する結果が出てくることが望ましい。

今後定量的正確さを確保していく上で様々な課題がある。2.1.1 でも述べたが、Flux-Tube 法を用いて定量的な正確さが得られるかどうかについて、PIC 法との詳細な比較が望まれる。また、電子をボルツマン分布で近似するべきかどうかについても、Full-PIC 法との比較が望まれる。下流境界をどこまでとるべきかについても、下流境界の長さによるグリッド浸食パターンの違いを実験結果等と比較して、合理的な境界の長さを設定すべきである。グリッドが浸食されていくと、削れていったグリッドの凹凸面によって電界分布が初期状態から大きく違ってくる可能性がある。この影響を考慮しながら計算を行なう必要があるが、凹凸面をどのように計算格子によって表現するか、どれくらいの頻度でグリッド形状を更新するか等の点について検討する必要がある。電荷交換イオンや中性粒子については DSMC で計算している例があるが、その他の衝突（イオン同士やイオンと電子のクーロン衝突等）についてはミシガン大学で行われているだけである。それらについても検討の余地がある。最後に、如何に高度な計算コードを作ったとしても、計算中で使われる物性パラメータが最終的な精度を左右する。グリッドシミュレーションにおいては、グリッド壁材のスパッタ率が計算結果を左右する最重要パラメータであると言えるが、同パラメータについては今後高精度の実験データを蓄積していく必要があると思われる。

## References

- [ 1 ] Xiaohang Peng, Dennis Keefer, Wilhelmus M. Ruyten, "Plasma Particle Simulation of Electrostatic Ion Thrusters", Journal of Propulsion, Vol.8, No.2, March-April, pp.361-366, 1992.
- [ 2 ] Yukio Hayakawa, "Three-Dimensional Numerical Model of Ion Optics System", Journal of Propulsion, Vol.8, No.1, pp.110-117, 1992.
- [ 3 ] V.A. Muravlev and A.A. Shagyda, "Numerical Modeling of Extraction Systems in Ion Thrusters", IEPC-99-162, 1999.
- [ 4 ] Y. Okawa and H. Takegahara, "Particle Simulation on Ion Beam Extraction Phenomena in an Ion Thruster", IEPC-99-146, 1999.
- [ 5 ] M. Tartz, E. Hatrmann, R. Deltschew, H. Neumann, "Validation of a Grid-Erosion Simulation by Short-time Erosion Measurement", IEPC-99-147, 1999.
- [ 6 ] M. Nakano and Y. Arakawa, "Ion Thruster Lifetime Estimation and Modeling using Computer Simulation", IEPC-99-145, 1999.
- [ 7 ] Iain D. Boyd and Mark W. Crofton, "Grid Erosion Analysis of the T5 ion Thruster," AIAA 2001-3781, 2001.
- [ 8 ] John R. Brophy, Ira Katz, James E. Polk, John R. Anderson, "Numerical Simulations of Ion Thruster Accelerator Grid Erosion", AIAA2002-4261, 2002.
- [ 9 ] Joseph Wang, James Polk, John Brophy and Ira Katz, "Three-Dimensional Particle Simulations of Ion-Optics Plasma Flow and Grid Erosion", Journal of Propulsion and Power, Vol.19, No.6, Nov-Dec., pp.1192-119, 2003.
- [ 10 ] Yoshinori Nakayama and Paul J. Wilbur, "Numerical Simulation of Ion Beam Optics for Multiple-Grid Systems", Journal of Propulsion and Power, Vol.19, No.4, July-August, pp.607-613, 2003.
- [ 11 ] C. C. Farnell, J. D. Williams and P. J. Wilbur, "Numerical Simulation of Ion Thruster Optics", NASA- CR-2003-212305, 2003.
- [ 12 ] Shane P. Malone and George C. Soulas, "Computational Ion Optics Design Evaluations", AIAA-2004-3786, 2004.
- [ 13 ] R. Kafafy and J. Wang, Whole Subscale Ion Optics Simulation, "Direct Ion Impingement and Electron Backstreaming",

AIAA-2005-4789, 2005,

- [14] Jerold W. Emhoff and Iain D. Boyd , “Modeling of Total Thruster Performance for NASA’s Evolutionary Xenon Thruster Ion Optics”, Journal of Propulsion and Power, Vol.22, No.4, July-August, pp.741-748, 2006.