

# イメージスキャナを用いた平板C/Cグリッド孔径の統計的分析

豊田康裕\*, 西山和孝\*\*, 國中均\*\*

Statistical Analysis on Aperture Diameter of Flat C/C Grids Using Image Scanner

By

Yasuhito Toyoda\*, Kazutaka Nishiyama\*\* and Hitoshi Kuninaka\*\*

**Abstract :** The erosion of accelerator grid aperture due to impingement of charge-exchange ions limits the normal operation of the microwave discharge ion engine, in which long life and high reliability are inherent because of electrode-less plasma generations. A commercially available image scanner and image-analysis software enabled to statistically analyze the diameters of the huge number of apertures in the flat C/C grids. This measurement method was applied to the accelerator grids of  $\mu 10$  ion engine after the 20,000 hour endurance test and  $\mu 20$  ion engine under ion machining in 30 hours. As a result, it was revealed that the erosion distribution of the  $\mu 10$  grid had the azimuthal dependence. Moreover, we obtained the design guide for the next  $\mu 20$  accelerator grid, to make the apertures with tapered shape on the side of upstream.

**Key words :** Ion Thruster,  $\mu 10$ ,  $\mu 20$ , Aperture Diameter Measurement, Grid Erosion

## 1. はじめに

イオンスラスターの寿命を決定する要因の一つとして、イオンを加速するグリッド部の損耗がある。特に、アクセルグリッドの孔径拡大はスラスターの性能に大きな影響を与える。そして、耐久性評価を行なうためには数万時間に及ぶ耐久試験が必要となる。しかし、時間的、人的なコストが莫大であるため、グリッド損耗機構のモデル化とシミュレーションによる耐久性評価を行なうコードの開発が行なわれている。そこで、実際のグリッドの損耗形状を測定することは、数値解析結果の妥当性を評価する上で重要である。

これまでの損耗形状の測定には、針をグリッド表面に接触させ測定を行なう方法や、レーザーを用いて測定を行なう方法などがあるが [1][2]、これらは一つもしくは数個の孔形状について測定することは可能であるが、グリッドの全孔形状を測定するには非常に多くの労力が必要となる。また、グリッドの直径が大きくなれば測定に要する時間はより多くなる。

また、現在本研究室で開発が進められている 20cm 級マイクロ波放電型イオンエンジン  $\mu 20$  は [3]、アクセルグリッドにイオンビームが直撃する程孔径が小さく設計されている。これは、長時間運転により孔径のイオンビームによる加工を行い、その時の全孔径分布を測定することにより必要最小限の孔径にて次期アクセルグリッドの設計を行なう為である。

これらの理由から、手軽かつ安価にグリッドの全孔径分布を測定するためにイメージスキャナーを用いた測定を試みた。本稿では、30時間耐久試験後の  $\mu 20$  アクセルグリッドと、2万時間耐久試験後の  $\mu 10$  の各グリッドについてのイメージスキャナーを用いた全孔径分布の測定結果について報告する。

## 2. イメージスキャナーによる孔径分布の測定

### 2.1. 測定方法

イメージスキャナーによって孔径分布の計測を行うには、 $\mu$  シリーズのグリッドシステムで採用されているような平板グリッドである必要がある。今回用いられた民製のイメージスキャナーを図.1に示す。スキャナーのみを用いてグリッドの画像を取得すると図.2に示すような画像が得られる。この画像から、孔の縁を確認することができるが、孔を画像処理により抽出することは、孔の中に拡がった影が要因で非常に困難である。その

\* The University of Tokyo

\*\* ISAS/JAXA



図. 1: イメージスキャナーと面光源

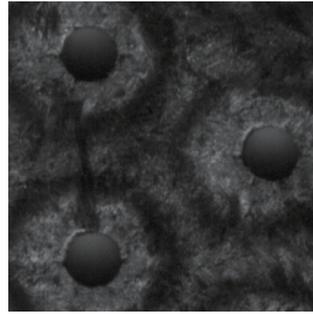


図. 2: グリッドのスクャナー画像. 面光源なしの場合.

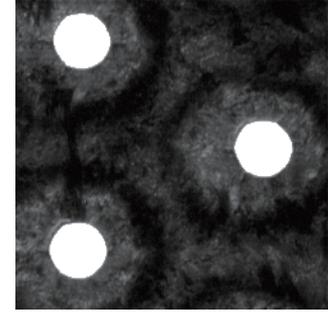
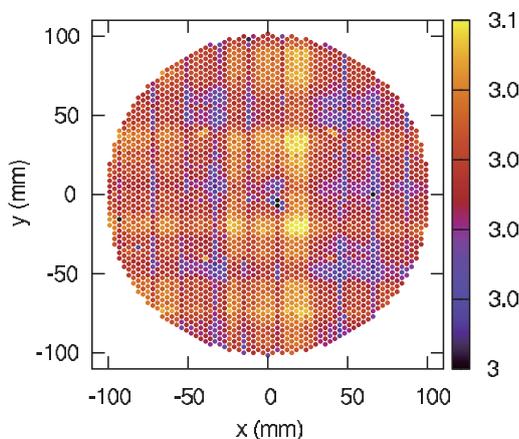
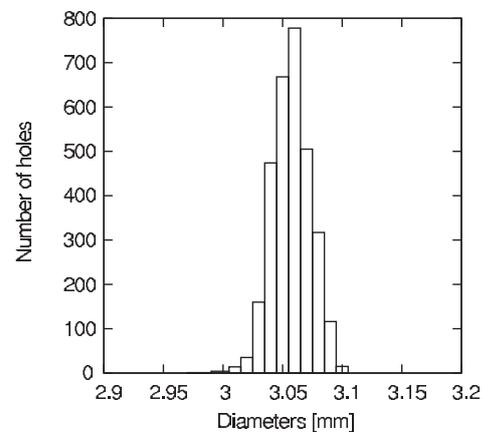


図. 3: グリッドのスクャナー画像. 面光源とトレーシングペーパー 35 枚を使った場合.

図. 4:  $\mu$ 長時間運転前の20 スクリーニンググリッドの孔径分布図. 5:  $\mu$ 長時間運転前の20 スクリーニンググリッドの孔径のヒストグラム

ため、背面から面光源で照らすことにより孔の中に拡がった影の除去を行なう。しかし、グリッドを背面から直接照らしてしまうと孔を透過する光が強すぎるため、実際よりも孔径を大きく測定してしまう。そのため、グリッドと面光源の間にトレーシングペーパーをはさむことにより透過光の調節を行う。トレーシングペーパーの枚数は、図. 2 の画像の孔の縁とよく一致するように決定する。図. 3 が最適なトレーシングペーパー枚数でのスクャナー画像の一例である。また、図. 1 には本測定で用いられた面光源を併せて載せてある。また、トレーシングペーパーの枚数を調整することにより、グリッド表面での孔形状だけでなく長時間運転後のアクセルグリッドでよく見られる、糸巻き状の孔形状（板中央において最も孔径が小さく、板の両側に行くにつれて径が大きくなっている形状）の最も小さな孔径を測定することも可能である。

取得した画像は、画像処理を行うことにより、グリッドの全孔についてそれぞれの位置や面積のデータを取得することができる。そして、全ての孔の形状が正円であると仮定することにより、面積データより孔径を導出する。

## 2.2. スキャナーによる測定方法の妥当性

スキャナーによる孔径分布測定の妥当性を評価するために、 $\mu$  20 のスクリーングリッドについて全孔径分布

表. 1:  $\mu$ 20 グリッドシステム諸元

グリッド	孔数 [個]	印加電圧 [V]	孔径 [mm]	厚み [mm]
Sc.		1300	3.05	0.75
Ac.	3087	-150	0.9, 1.0, 1.1, 1.	1.0
De.		-30	2.5	1.0

の測定を行った。このグリッドは、長時間運転を行う以前のものであり損耗がほとんどおこっていないので、設計値と比べることにより測定結果の妥当性を評価することができる。このグリッドは合計 3087 個の直径 3.05mm の孔があいている。μ 20 用グリッドの諸元を表 .1 に示す。計測された全孔径分布の結果を図 .4 に示す。縦と横に格子状の孔径のむらがあることがわかる。これは、スキャナーの走査方向に対して垂直、平行方向となっているので、スキャナーの受光素子の間隔や走向速度が一定ではないため生じる誤差と考えられる。しかし、図 .5 に示すように、± 0.05mm 以内の精度で測定されていることがわかる。

### 3. 30 時間耐久試験後の μ20 アクセルグリッド

#### 3.1. アクセルグリッドの諸元

μ 20 のアクセルグリッドは、図 .6 に示すように位置により直径 0.9, 1.0, 1.1, 1.3mm の 4 段階の孔がある。このグリッドは、これまでに測定されたビーム電流密度プロファイルより、グリッド設計支援ツール「OPT」を用いてビームがアクセルグリッドに直撃しない程度に孔径を小さくした設計がされている。しかし、現実には直撃するイオンビームが存在するので、イオンビームを用いた孔径の整形を行い、その時の孔径分布を測定することにより次期アクセルグリッドの設計指標とすることが考えられている。

#### 3.2. 測定結果

図 .7, 8 に 33 時間運転後のアクセルグリッドの全孔径分布と、設計値からの孔径の変化分布を示す。それぞれの図で a) はグリッドの下流側表面、b) は上流側表面での孔形状となっており、a), b) の位置関係は下流側からみた時と一致している。これらの図より下流側は設計値からの孔径変化が小さいことがわかる。一方、上流側は全体的に孔径が拡大しており、特にグリッド中央付近や図の座標で (x, y) = (-50, 50), (50, -50) の付近より時計回りに孔径の拡大が大きい領域がある。また、下流側で設計値よりも孔径が縮小している領域があるが、この領域をデジタルマイクロスコープを用いて観察すると、孔の壁面が隆起しており実際に孔径が縮小していた。上流側

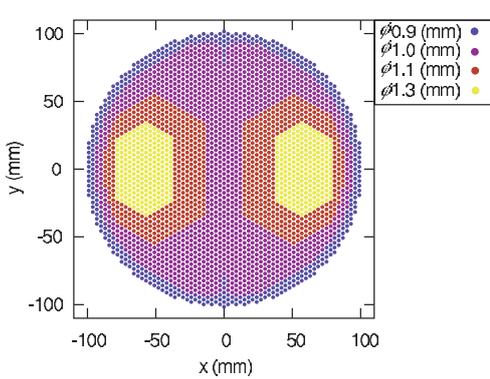


図. 6: μ20 アクセルグリッドの設計値

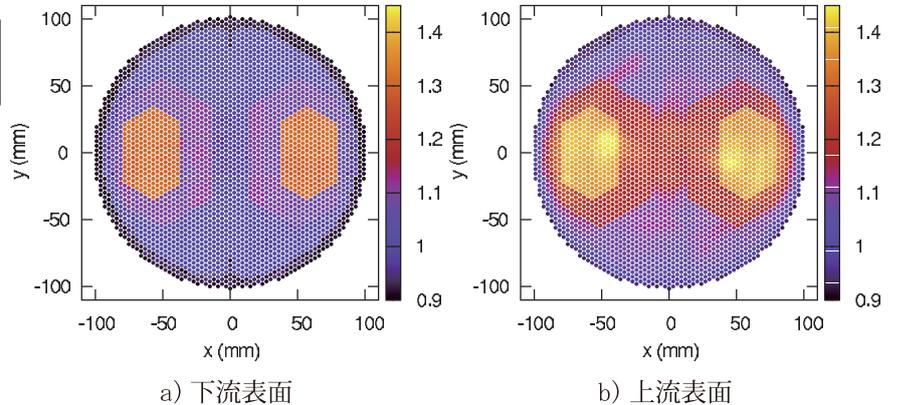


図. 7: 33時間試験後の μ20 アクセルグリッドの孔径分布

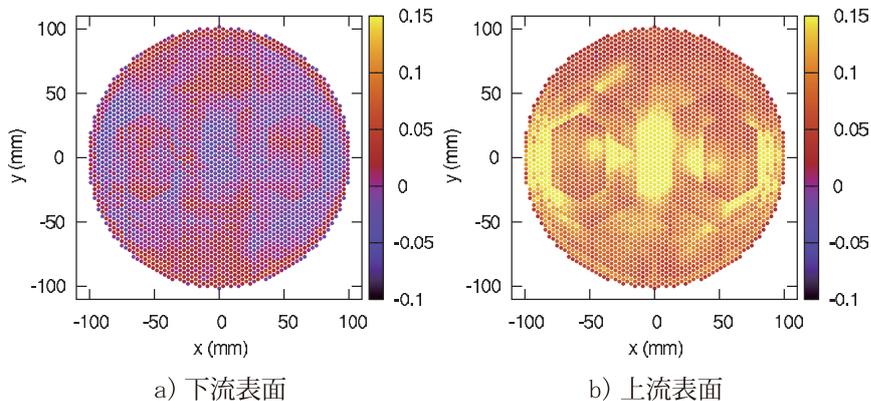


図. 8: 33時間試験後の μ20 アクセルグリッドの孔径変化分布

で発生したフレークが孔壁面に再付着したものと考えられる。

イオンビームによるグリッド孔の加工はこの後も行なわれているが、今回の結果より次期アクセルグリッド設計の際には、現グリッドと孔径分布は同様とし上流側にはテーパをつける設計指針が示された。現在は耐久性評価と併せ 1000 時間の耐久試験を行なっており、耐久試験後に再度全孔径分布を測定する予定である。

#### 4. 2万時間耐久試験後の $\mu 10$

##### 4.1. グリッドシステム

$\mu 10$  の 2 万時間耐久試験は 2000 年ごろに行なわれており、その当時の各グリッドの印可電圧やグリッドの諸元を表 2 に示す [4]。  $\mu 10$  は、スクリーン、アクセル、ディセルグリッドの孔径は全面に対して一律に 3.05, 1.8, 2.5mm であり、855 個の孔が分布している。

表. 2:  $\mu 10$  グリッドシステム諸元

グリッド	孔数 [個]	印加電圧 [V]	孔径 [mm]	厚み [mm]
Sc.		1500	3.05	0.95
Ac.	855	-300	1.8	1.0
De.		0	2.5	1.0

##### 4.2. 測定結果

2 万時間耐久試験後の  $\mu 10$  の各グリッドの孔径分布をイメージスキャナーを用いて測定を行なった。図 9 で下のグラフは、それぞれの孔について半径方向の位置に対する孔径の関係となっている。半径方向の位置が正值とは、図 10 ~ 12 の座標系で第一象限、第四象限を、負値は第二象限、第三象限での位置を表している。また、図 9 の上のグラフは現在試験が行なわれている  $\mu 10$  でのビーム電流密度を表している。図 10 ~ 12 に、各グリッドの孔径分布を示す。アクセルグリッドのみ、孔形状が糸巻きのような形状になっているので上流下流側表面での孔径だけではなく、最小孔径の分布も併せて示してある。

スクリーングリッドは、上流側表面の高電流密度の領域で孔径が拡大傾向にあるがその量は軽微で、2 万時間作動後も元の形状をほぼ維持している。マイクロ波放電型イオンエンジンではプラズマとスクリーングリッドとの電位差が小さく、スクリーングリッドの侵食が少ないと予測されていたが、このことが証明された。

アクセルグリッドは低電流密度領域で孔径の拡大が大きく、上流側、最小孔径の分布はよく似た傾向がある。下流側は、外周部分の領域で第二象限付近については孔径拡大が小さく、第四象限付近については拡大が大きくなっており、上流側、最小孔径の分布とは逆の傾向がある。アクセルグリッドの孔径は、設計値の 1.8mm から最大 2.3mm まで拡大したが、「OPT」の評価ではこの最大径でも電子逆流には至らない。また、アクセルグリッドは半径方向のみに依存して孔が損耗するのではなく、周方向によっても損耗の度合いは異なることがわかる。

ディセルグリッドは、上流側のほとんどの領域で孔径の拡大は小さいと言える。下流側は全グリッド中最も拡大が大きく、特に、低電流密度の領域でより損耗が激しい。また、下流側のディセルグリッドの孔形状は六角形の形状である。

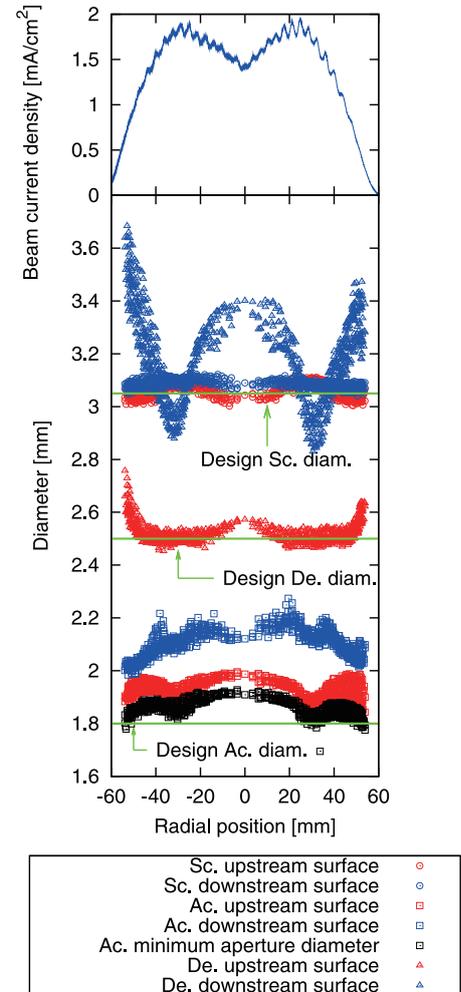


図. 9: 半径方向に対する孔径の関係. ビーム電流分布は流量 2.35 sccm でビーム電流 124 mA 作動時に、ディセルグリッド下流 15 mm の位置にて測定した値である。Sc. は Screen grid, Ac. は Accelerator grid, Dc. は Decelerator grid の略である。

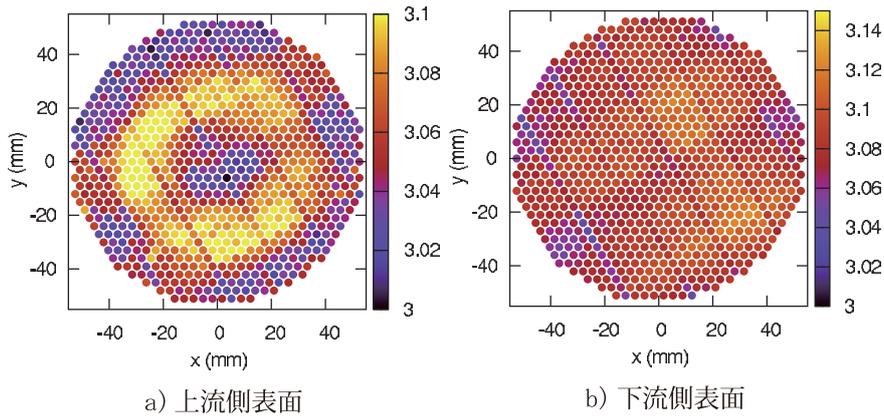


図. 10: 2万時間耐久試験後の $\mu 10$ スクリーングリッドの孔径分布

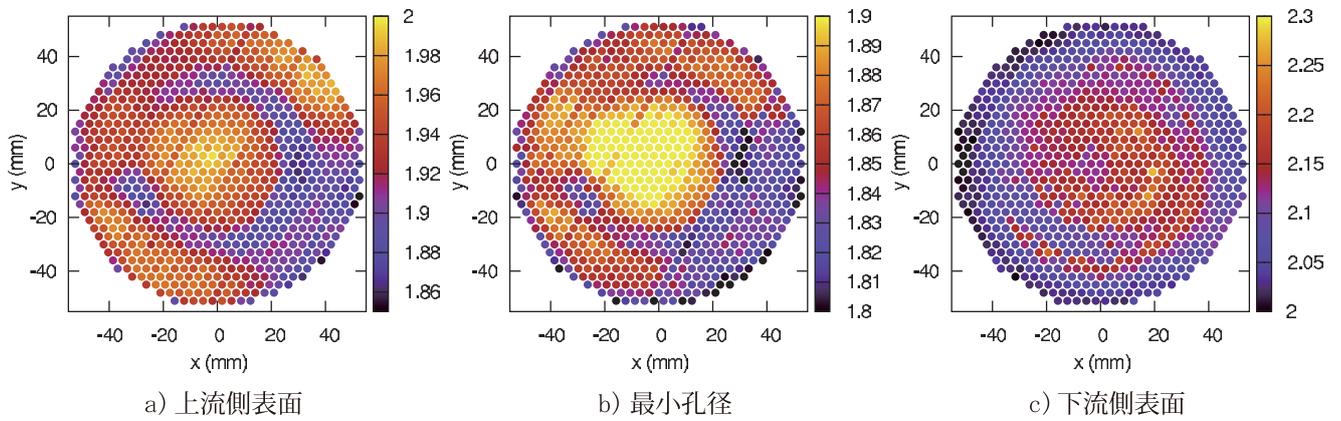


図. 11: 2万時間耐久試験後の $\mu 10$ アクセルグリッドの孔径分布

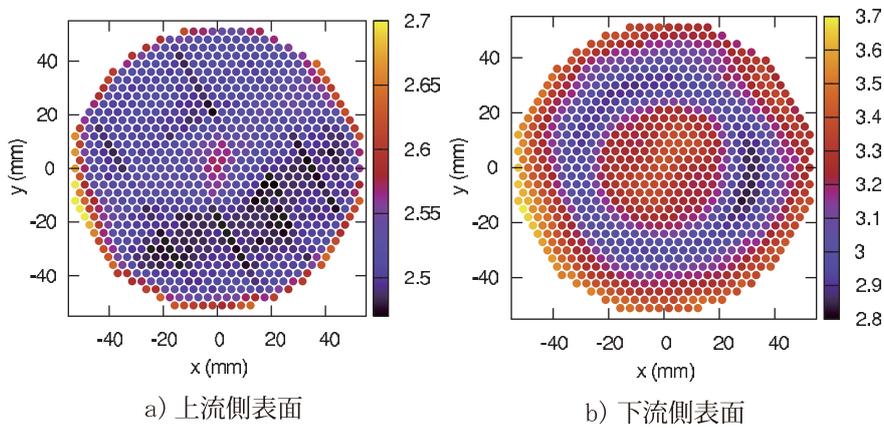


図. 12: 2万時間耐久試験後の $\mu 10$ ディセルグリッドの孔径分布

## 5. まとめ

本報告では、イメージスキャナーを用いて、簡便にかつ安価にグリッドの全孔径を一括して測定した結果について述べた。

この方法を用いて、30時間運転後の $\mu$  20のアクセルグリッドの全孔径分布を測定した。その結果、次期アクセルグリッド設計の指針として、現アクセルグリッドの孔径の設計値を踏襲し、上流側にテーパを付けた孔形状にすることが示された。また、2万時間耐久試験後の $\mu$  10の全孔径分布の測定より、孔の損耗度合いは半径方向のみに依存するのではなく、周方向にも依存していることが明らかになった。

## 参考文献

- [1] N.C.Wallace and Michael Corbett, “Optimisation and Assessment of the Total Impulse Capability of the T6 Ion Thruster”, IEPC-2007-231, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
- [2] J.S.Meserole and D.E.Hedges, “Comparison of Erosion Rates of Carbon-carbon and Molybdenum Ion Optics”, IEPC-93-110.
- [3] K.Nishiyama, H.Kuninaka, and T.Nakai, “Two-Dimensional Characterization of Microwave E-fields and Beam Profiles of the ECR Ion Thruster  $\mu$ 20”, IEPC-2007-25, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
- [4] M.Usui and H.Kuninaka, “Measurement of Hole Shape on Carbon-Carbon Composite Grids after 20,000-Hour Endurance Test”, IEPC-2007-90, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.