

## ガスシートを用いた二次元ビームプロファイルモニタのための ガス分布測定装置の開発

### DEVELOPMENT OF GAS DISTRIBUTION MEASUREMENT SYSTEM FOR A TWO-DIMENSIONAL BEAM PROFILE MONITOR WITH A SHEET-SHAPED GAS

山田 逸平 <sup>\*A,B)</sup>, 荻原 徳男 <sup>C)</sup>, 引地 祐輔 <sup>A)</sup>, 神谷 潤一郎 <sup>A)</sup>, 金正 倫計 <sup>A)</sup>

Ippei Yamada <sup>\*A,B)</sup>, Norio Ogiwara <sup>C)</sup>, Yusuke Hikichi <sup>A)</sup>, Junichiro Kamiya <sup>A)</sup>, Michikazu Kinsho <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>J-PARC center (JAEA)

<sup>B)</sup>Graduated School of Science and Engineering, Doshisha University

<sup>C)</sup>J-PARC center (KEK)

#### Abstract

The beam profile monitor is needed for measuring one of the beam parameters of high intensity accelerator to avoid radioactivating the systems. A monitor with sheet-shaped gas can measure the beam profile nondestructively in two dimensions. One of issues to introduce the monitor in accelerator is that the gas distribution is not homogeneity. Obtaining correct beam profile data needs gas distribution. The device to measuring gas distribution in three dimensions is developing. When an electron beam pass through the gas sheet, the gas molecule is ionized and ions are produced. Electric field guides the ions to a micro channel plate(MCP) that increases intensity of signal. A phosphor detects the electrons emitted from MCP. Finally, the image in the phosphor is taken photo that has one-dimensional distribution data. The three dimensional distribution data are obtained by moving gas sheet in two dimensions. In this paper, the details of this device and the region that the device can measure distribution are reported.

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は 400 MeV の線形加速器 LINAC、3 GeV シンクロトロン RCS、および 50 GeV シンクロトロン MR の 3 つの加速器から成り、RCS でのビーム出力で 1 MW の運転に向けて調整中である。このようなビーム強度での加速器の運転では、わずかなビームロスでも機器が放射化し、安定な加速器運転の妨げや保守点検作業時間を制限することにつながる。安全かつ安定な運転を行うためにはビームの位置、エミッタンス、プロファイルなどをモニタリングし、ビームロス原因を特定して対処する必要があるため、これらのモニタは必須である。ビームプロファイルモニタに関しては、現在主流のワイヤモニタは精度よく測定できる反面、大強度ビームでワイヤが損傷する、そのためユーザー利用運転中は測定できない、および測定に時間がかかるなどの課題点がある。これらを解決する一つの方法として、中性ガスを積極的に導入するものが開発されており [1,2]、J-PARC ではシート状に形成したガスを導入する方式のモニタの開発が進められている [3]。このモニタは、シート状のガスを局所的に導入し、そのガスとビームの衝突に伴い発生するイオンないしは光を検出するものである。そのため、ビームの二次元プロファイルの測定が可能であり、希薄なガスを利用することから大強度ビームの測定でもモニタが破損せず、ビームに対して非破壊なモニタである。測定原理を Fig. 1 に示す。加速器ビームの横方向断面を切るようにシート状の中性ガスを発生させる。この時、ガスシートはビーム平行方向に対して角度  $\theta$  で導入する。このシート中のガスと加速器ビームの衝突によりガスのイオン化および発

光が生じる。このうちイオンを電場で誘導し MCP を通して蛍光板で検出し、カメラで撮影しプロファイルデータとする。あるいは発生した光を光学系を用いて輸送し、CCD カメラで撮影しプロファイルデータとする。この時、ガスシートは必ずしも 3 次元的に一様ではなく分布を持つため、より正確なプロファイルデータを得るためにはこの分布を測定し、データを換算する必要がある。本稿では、このガスシートの 3 次元分布を測定するための装置を提案し、分解能、得られる信号強度、およびシミュレーションに基づくイオン軌道の検証を行ったので報告する。

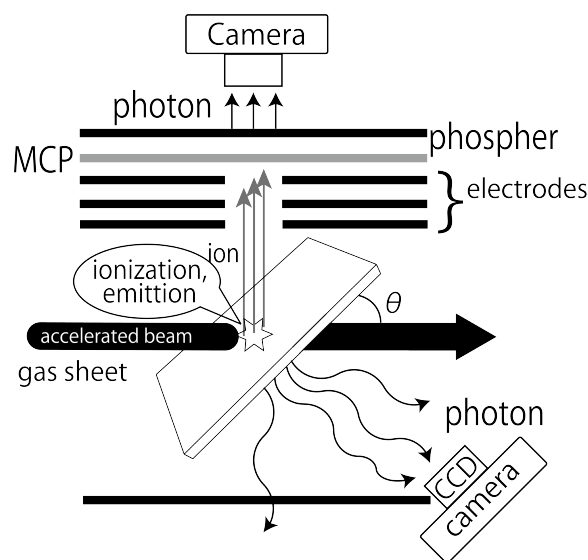


Figure 1: The schematic diagram of the beam profile monitor with sheet-shaped gas.

\* ip.yamada@icloud.com

## 2. 実験原理

ガスの3次元分布測定装置の原理を述べる。概要としては、Fig. 1 に示したイオン検出型のプロフィールモニタの原理に着目し、プロフィールが既知の電子ビームをガスに照射して生じたイオンの位置情報からガス分布を得るというものである。測定原理について詳細に述べ

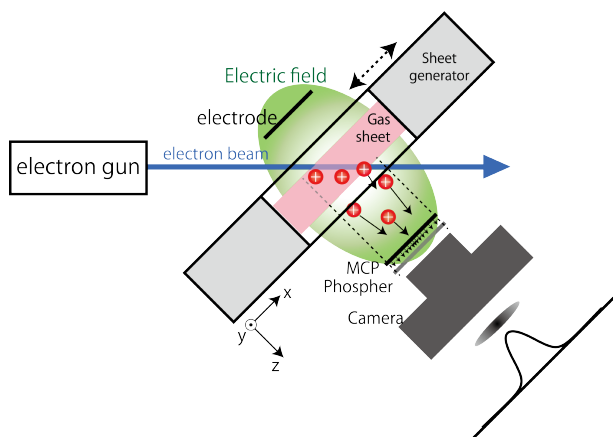


Figure 2: The schematic diagram of the gas distribution measurement system.

る。Figure 2 に示すように、測定するガスシートをビームに対して角度  $\theta$  で導入し、電子ビームを照射する。これにより生じるイオンを電場を用いて MCP に誘導し、信号を増幅したのち、蛍光板を用いて検出する。この時、Fig. 3 に示すように、ガスシートに対してシート面を  $x, y$  方向、厚み方向を  $z$  方向として定義すると、得られるガス分布は  $x, z$  成分を持った情報を  $\cos\theta$  で射影したものとなる。この情報を  $x$  および  $z$  成分に分解することは困難であるため、ビーム進行方向を  $s$  軸と定義し、あるシート生成器位置での  $s$  方向成分のデータとする。ガスシートを  $xy$  平面で移動して同様の測定を行う。この時、測定位置は常に Fig. 4 の濃い青の領域であり、シートを移動することで薄い青の領域のデータが蓄積する。すなわち、ガスシートが移動しても電場が変化せずイオン軌道が一定であれば、濃い青のある点で発生したイオンは常に蛍光板上の同じ位置で検出されるため、得られる画像データを解析することで、3次元分布とすることができる。また例として、濃い青と一つ右の薄い青のある測定点の緑の領域に着目すると、その中間にある白い領域は緑の領域の値の  $1/2$  ずつの和となる。このように得られたデータを  $s$  方向から  $z$  方向に変換し、 $x, y, z$  系での3次元分布とすることができる。次に測定分解能について述べる。得られる測定データはビーム径が十分小さく無視できるとすれば任意に分割できるが、ビーム径が  $d$  の場合は Fig. 4 のように、 $d/\cos\theta$  ごとに分割する必要がある。したがってこれが  $x$  方向の分解能となり、ビーム径で決まる。得られる情報に  $x, z$  成分が含まれていることから、 $x$  方向分解能に付随して  $z$  方向の分解能もビーム径に依存し、 $d/\sin\theta$  となる。 $y$  方向については  $x, z$  とは独立であるが、同様にビーム径  $d$  程度とする。また、MCP および蛍光板の分解能は  $0.1$  mm 程度である。ガ

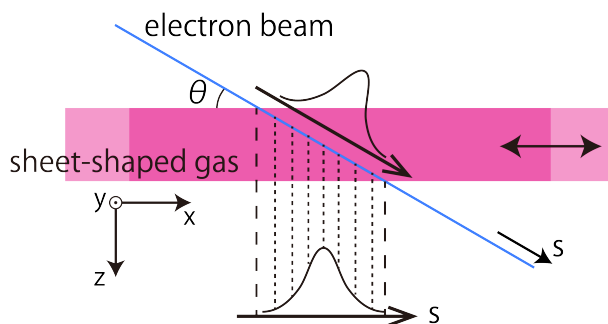


Figure 3: The obtained data and the processing way of the data to gas distribution.

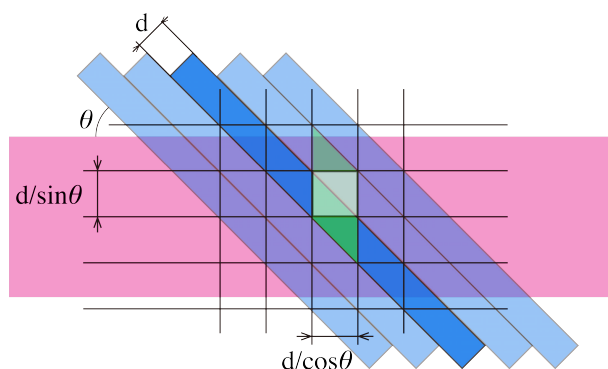


Figure 4: The obtained data and the processing way of the data to gas distribution.

スシートの厚みは全値半幅で  $1$  mm 程度であるという計算結果 [4] があるため、分解能としては十分である。

次に得られる信号強度について見積もる。既存の電子銃を用いることを考え、エネルギー  $30$  keV、ビーム径  $0.5$  mm、ビーム電流  $10 \mu\text{A}$  に対し、ガスシート部の圧力を  $10^{-4}$  Pa、厚みを  $5$  mm と仮定すると、断面積は  $10^{-18}$   $\text{cm}^2$  であること [5] から、発生するイオンの数は  $10^6$  個/s 程度となる。これは電流に直すと  $0.1$  pA オーダであり、MCP で  $10^6$  倍で増幅されると考えれば、 $0.1 \mu\text{A}$  オーダとなる。この電流量であれば蛍光板で十分に検出可能である。

以上が測定原理であるが、この分布測定において正確なガス分布情報を取得するために最も重要な点は、シート生成器の移動に対してイオン軌道が一定であるかということである。シート生成器の移動により金属境界の位置が変化するため、電場を変動させると予想される。したがって、計算に基づいた電位配置を行い、イオン発生位置に対してイオン軌道が一意的であるか確認する必要がある。次節ではイオン軌道計算を詳細に行った結果を示す。

## 3. イオン軌道計算

本節では有限積分法を主としている CST studio [6] を用いてイオン軌道計算を行った結果を示す。直径  $0.5$  mm の電子ビームが厚み  $5$  mm の一様に分布した  $\text{N}_2$  ガスシートに入射するとして、直径  $0.5$  mm、高さ  $7$  mm (=  $5 \text{ mm}/\sin 45^\circ$ ) の  $45$  度傾いた円筒型粒子ソースを仮定し

た。この円筒の側面から垂直向きに 300 K の Maxwell 分布の熱速度を初速として与えた。本来はシートに明確な境界は存在しないが、z 方向のイオン発生位置に対する測定精度を調べることでどの領域の測定が可能であるかを見積もるため、この仮定のもと計算を行った。

### 3.1 計算モデル

次に計算を行ったモデルについて説明する。イオン軌道付近に金属境界が存在すると、電場に影響を与え軌道が乱れると予想されるため、ガスシート中心位置と測定精度の関係を調べた。まず座標系として Fig. 5 のように、電子ビームと MCP の中心軸との交点を原点と定義して、ガスシートの中心の座標を  $X_c, Y_c$  とする。ガスシート生成器の形状はより高密度、均一なシートを形成できると予想されている円形 [4] を仮定し、境界は半径 25 mm、高さを半径以下の xy 平面に垂直方向な円筒の側面とし、後の議論のためにそれぞれ  $D, T_{\text{slit}}$  と定義する。また生成器全体の系は 200 mm を仮定した。さらに、外径 60 mm、開口部 28 mm の GND 電極にカバーされた MCP を、電子ビームに干渉しないようにガスシート中心から 30 mm 離して設置した。

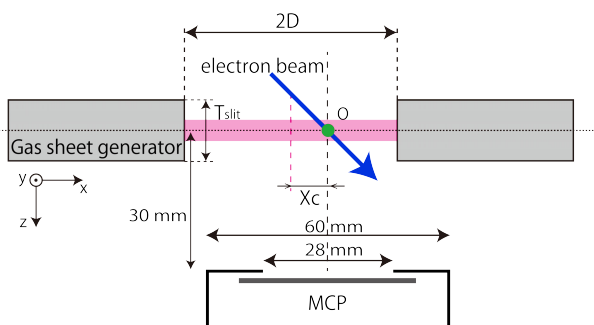


Figure 5: The model of gas sheet slit and MCP geometry.

### 3.2 電位配置および電子ビームへの影響

まず、電位配置について述べる。シート生成器の移動により電場の形が変化しないような電位配置に加えて、イオンの初速度による位置情報に対するノイズの影響が少なくなるような配置にする必要がある。これらの課題に対して、シート生成器の移動で電位系の変化がなくなるように金属メッシュをシート生成器の上下面に設置し、また初速度の影響を小さくし直線的にイオンを輸送するために円筒の電極を追加し、メッシュ、円筒電極、および MCP の電位を同電位とした (Fig. 6)。これにより、イオンが受ける電場は金属メッシュ中の直線的な電場が支配的となり、イオン発生から検出まで直線的に輸送することができる。この結果、Fig. 6 のように、 $X_c = 0, 0.6D$  についてはイオン軌道に大きな変化は見られなかったが、 $X_c = 0.8D$  についてはシート生成器の存在によりイオンソース付近の電場に影響があるため大きく軌道が乱れる結果となった。この時、電子ビームは金属メッシュ、円筒電極を貫通する必要があるため、電子ビームの軌道上に穴を開けることで対処する。しかし、電子ビームのエネルギーがメッシュ電位と同程度であれば大きく影響を受けるため、金属メッシュに与える電位が制

限される。今回の計算では対向電極メッシュに 5 kV、もう一方のメッシュ、円筒電極、MCP には -5 kV を印加し、電子ビームのエネルギーを 30 keV とした。これにより、電子ビームは約 0.25 mm (ビーム径の 50%) 程度 z 方向上下に移動した。また、イオンの初速度の影響を低減するために、メッシュを 5 kV としたが、電子ビームのエネルギーを 35~25 kV に変化させる結果となった。これにより電離断面積が 2 割程度増減するため、正しいガス分布情報が得られない。そのため、Fig. 6 の結果を用いて電子ビームのエネルギー変化にともなう断面積の変化を考慮し、データを補正する必要がある。

### 3.3 軌道計算結果

上記の条件を固定して、分布測定可能な空間的範囲について調べた。ガスシートの直径が xy 平面で  $2D (=50 \text{ mm})$  であるため、 $X_c$  を  $-0.8D \sim 0.8D$ 、 $Y_c$  を  $0 \sim 0.8D$  (y 方向に関しては対称形であるため) の範囲で動かし、その時の MCP 上で検出される点の分布を比較した。Figure 7 に  $T_{\text{slit}} = 0.2D$ 、 $(X_c, Y_c) = (0, 0), (0.8D, 0)$  の時の検出分布例を示す。赤のプロットが検出点で、青の線が MCP から見たイオンソースの概形である。 $X_c = 0$  の場合、青の枠に対して x 方向の検出幅はほとんど同じ大きさで、y 方向の検出幅はイオンの初速度の影響で約 1.5 倍となった。また、 $X_c = -0.8D$  の場合のように、 $X_c$  や  $Y_c$  が大きな値をとる場合は大きく分布形状が変化すると、ガスシートの形状が測定位置によって変化すると、ガスシートの形状の位置依存性が得られない。これを定量的に評価するため、各  $(X_c, Y_c)$  の点の分布に対してある幅を持った短冊を考え、その内部の点の数  $n$  をプロットしたヒストグラムを作成した結果を Fig. 8 に示す。各々のヒストグラムの比較を行うために、 $(X_c, Y_c) = (0, 0)$  のヒストグラムに対する任意の  $(X_c, Y_c)$  のヒストグラムの偏差を以下の式のように計算した。

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - n_{i0})^2} \quad (1)$$

ただし、 $n_i$  は任意の  $(X_c, Y_c)$  のヒストグラムの  $i$  番目の要素の度数、 $n_{i0}$  は  $(X_c, Y_c) = (0, 0)$  のヒストグラムの  $i$  番目の要素の度数、 $N$  はヒストグラムの要素の総数である。この時、各要素の検出点数の平均値  $\bar{n}$  を用いて

$$\text{Error} = \frac{s}{\bar{n}} \quad (2)$$

をシート生成器の移動により生じる誤差と定義して各パラメータを変化させた時のグラフを比較した。

まず、 $(X_c, 0), (0, Y_c)$  で  $X_c, Y_c$  を変化させた場合の x 軸への射影、y 軸への射影に対する誤差  $e = s/\bar{n}$  の変化を Fig. 9(a),(b) に示す。(a) のグラフより、 $X_c$  を変化させた場合は x 軸に沿った分布の変化が、y 軸に沿った分布の変化より大きいことがわかる。誤差の大きい x 軸に沿った分布の変化 (赤のプロット) に着目すると、 $X_c$  が大きくなるに従い急激に誤差が大きくなっていることが読み取れる。したがって、誤差が小さく、一定とみなせる範囲を決定することができ、測定可能範囲とすることができる。一方、 $Y_c$  を変化させた場合は y 軸に沿った



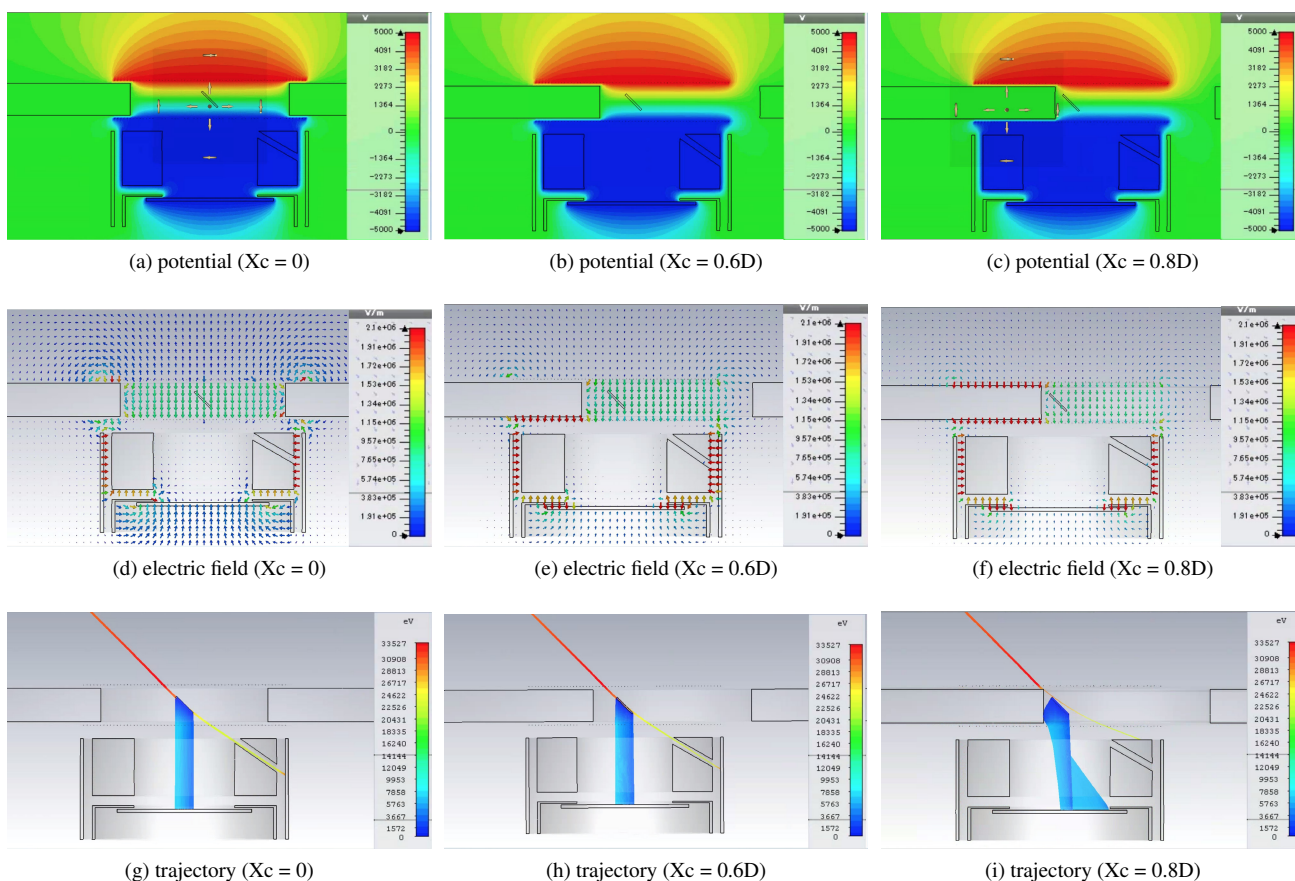


Figure 6: The example of potential and electric field geometry at  $X_c = 0, 0.6D,$  and  $0.8D$ . The ion and electron beam trajectories with those geometry.

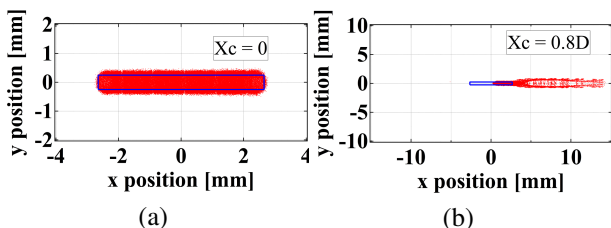


Figure 7: The ion detection distribution on MCP at  $X_c = 0$  and  $X_c = 0.8D$ .

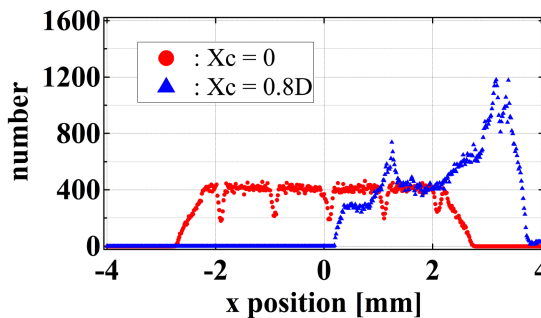


Figure 8: The histogram of Figure 9 against x axis.

分布の変化の方が大きい結果となった。以降は  $X_c$  を変化させた場合は  $x$  軸への射影、 $Y_c$  を変化させた場合は  $y$  軸への射影によって得られたヒストグラムの比較を行う。

次にシート生成器の厚み  $T_{slit}$  を  $0.04D \sim 0.4D$  で変化させた場合の誤差の変化を Fig. 10 に示す。この場合、 $T_{slit}$  が小さいほどより大きな  $X_c, Y_c$  の値まで小さな誤差で測定できることが読み取れる。ただし  $X_c, Y_c = 0.8D$  においては、イオン発生部が金属境界に非常に接近しているため、軌道の乱れ方が大きく、 $x, y$  軸への射影によってその影響が低減されたため、今回の評価方法では評価できていないと考えられる。そこで  $X_c, Y_c = 0.6D$  までを拡大すると Fig. 11 となる。例えば誤差 5% 程度で測

定を行う場合、 $T_{slit} = 0.04D, 0.1D$  において  $X_c = 0.6D$  まで測定可能である。 $Y_c$  に関しては  $0.4D$  まで、もしくは  $T_{slit} = 0.04D$  においては  $0.6D$  まで測定可能である。すなわち、 $T_{slit} = 0.04D$  では半径  $0.6D$  の円内、 $T_{slit} = 0.1D$  では  $x$  方向に  $0.6D$ 、 $y$  方向に  $0.4D$  の楕円内で測定可能であるということを示している。ここで、ガスシートを用いたビームプロファイル測定を考えるとガスシートは加速器ビームに対してある角度を持って導入するため、ビームから見た円形の領域は本稿で定義した  $x, y$  座標では楕円形となることを考慮すると、測定が

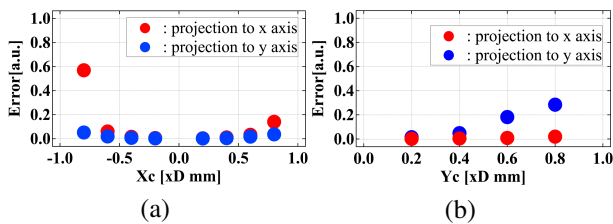


Figure 9: The detection error against moving gas sheet slit along x and y axes at  $T_{\text{slit}} = 0.2D$ .

必要な領域は楕円形であると言える。したがって、上述の議論で言えば、 $T_{\text{slit}} = 0.04D$ ,  $0.1D$  どちらの場合でもプロファイル測定時に導入する角度が  $45$  度程度までならば、利用できるガス分布情報は同程度である。最後

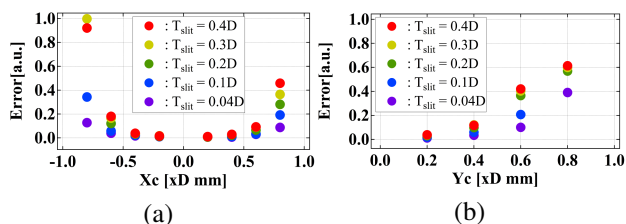


Figure 10: The characteristics of errors as function of the slit center position.

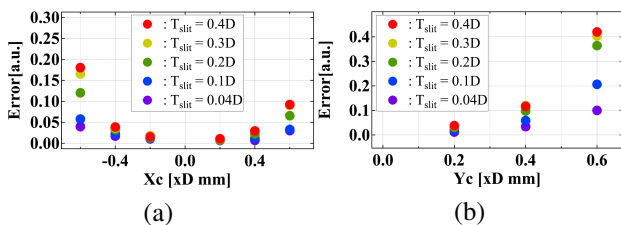


Figure 11: The expand graph of Figure 10.

に  $z$  方向の測定可能範囲に関して述べる。測定範囲の制限は金属境界の存在によりイオン軌道が乱れることに起因するため、境界とイオン発生源の位置関係によって決まる。これはイオン発生源のサイズを変化させることで確認できるが、イオン発生源のサイズが一定の場合でも  $T_{\text{slit}}$  を変化させることで、相対的な変化としてイオン発生源のサイズを変化させたことと同等であるため、上記の議論に組み込まれている。したがって、Fig. 10 のグラフを用いることでこの装置でのある誤差での測定可能範囲が決定できる。

また、本稿ではシート径  $2D=50$  mm についてのみ計算結果を示したが、シート径を増加させても、シート上下面には十分大きなメッシュ電極を設置するため、シート径の増加による電位配置の変化はイオン軌道に影響を与えない。シート径のみが大きくなれば  $2D/T_{\text{slit}}$  が大きくなるため、相対的に  $T_{\text{slit}}$  が減少したことと等価であるため、測定可能範囲は広がると考えられる。

## 4. まとめ

本稿ではガスシートの 3 次元分布を測定する装置の開発を行ったことを報告した。以下に得られた結果、および今後の方針についてまとめる。

- 電子ビームを用いてガスをイオン化し、そのイオンを測定することでガス 3 次元ガス分布測定を行う装置の発案を行った。
- 電子ビームがメッシュ電極を通過する際、エネルギー変化によるイオン生成数の非一様性が生じることが得られた。
- 電場計算の結果を用いて電子ビームのエネルギー変化に伴う電離断面積の変化を考慮し、得られるガス分布のデータを補正する必要がある。
- この装置における空間的な測定範囲の評価を行い、シート生成器の厚みがガスシート径の  $1/5$  以下である場合、シート径の約半分の径の領域の測定が可能であるということが得られた。
- 今後、電子銃や電位配置の最終的な決定を行い、この装置の開発を行う。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、J-PARC センターの皆様にご協力いただきましたこと感謝いたします。

## 参考文献

- [1] V. Tzoganis, Hao D. Zhang, A. Jeff, and Carsten P. Welsch, Phys. Rev. Accel. and Beams, **20**, 062801 (2017).
- [2] Y. Hashimoto, T. Fujiwara, T. Morimoto, Y. Fujita, T. Honma, S. Muto, K. Noda, Y. Sato, T. Uesugi, and S. Yamada, Nucl. Instrum. Method A, **527** (2004) 289.
- [3] N. Ogiwara, Y. Hikichi, Y. Namekawa, J. Kamiya, M. Kinsho, K. Hatanaka, T. Shima, M. Fukuda, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, WEOBB03.
- [4] N. Ogiwara, J. Vac. Soc. Jpn., **56** (2013) 4.
- [5] Schram B. L., de Heer F. J., Van der Wiel M. J. and Kistermaker J., Physica 31, 94-112 (1965).
- [6] [http://www.aetjapan.com/software/CST\\_Overview.php](http://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php)