

ガスシートプロファイルモニタのための比感度係数分布測定 MEASUREMENT OF RELATIVE SENSITIVITY DISTRIBUTION FOR GAS SHEET BEAM PROFILE MONITOR

山田逸平^{*A,B)}、神谷潤一郎^{B)}、金正倫計^{B)}、和田元^{A)}

Ippei Yamada^{*A,B)}, Junichiro Kamiya^{B)}, Michikazu Kinsho^{B)}, Motoi Wada^{A)}

^{A)}Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University

^{B)}J-PARC center(JAEA)

Abstract

We have been developing a non-destructive beam profile monitor using a gas sheet for a high intensity ion beam accelerator. The monitor detects a charged particles/photons produced by a beam-gas interaction. A sensitivity distribution determined by the gas density distribution and the detection efficiency is necessary for reconstructing the beam profile from the signal measured by the monitor. A method of the relative-sensitivity distribution measurement of a gas sheet monitor was developed using a narrow electron beam that simulates the target proton beam. By scanning the position of the electron beam, local light emission intensity due to the gas sheet injection was calibrated as a function of position. In this paper, the details of the method and the distribution measurement results are reported.

1. 研究背景・研究目的

大強度イオン加速器ではわずかなビーム損失でも機器の放射化を引き起こす。そのため、様々なモニタを利用してビームの状態を測定し、加速器構成機器を適切に制御する必要がある。しかし、破壊型モニタによる大強度ビームの測定はモニタの破損・放射化を引き起こす可能性がある。我々は特にビームの実空間分布、すなわちプロファイル为非破壊で測定するために、ガスシートモニタ (Fig. 1) の開発を行っている。このモニタはシート状に形成したガスとビームの相互作用で生じる荷電粒子または光子の分布からビームプロファイルを測定するモニタである。荷電粒子検出は、電場を利用するため生成した粒子のほとんど全てを収集することができる効率の良い手法である。しかし、荷電粒子収集用電場の非一様性、ビームとのクーロン相互作用、生成した粒子同士のクーロン相互作用などによりプロファイルが歪むという課題がある。一方、光子検出方式は、電磁気力による相互作用が働かないため、上記の課題を全て克服することができる。しかし、荷電粒子検出と異なり、光子は光学レンズの径で決まる立体角に入る光子しか検出できない。一般に立体角による制限により、検出可能な光子数は生成した光子数の $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 倍程度である。したがって、荷電粒子検出方式に比べて得られる信号強度が著しく小さいという課題がある。ガスシートモニタは、希薄気体力学の原理に基づいてガスフローを制御することで、ビームラインの圧力を大きく変化させることなくガスを導入できる。そのため信号強度が得られやすいという利点があり、光子検出の課題を克服できる可能性を持つ。そこで、本研究はガスシートモニタを用いた光子検出によるビームプロファイル測定を目指している。

ガスシートモニタで得られる光子信号はシートガスの密度分布および検出器の検出効率分布に依存する。

これらの分布の積を比感度係数分布 (relative-sensitivity distribution) と定義すると、得られた信号からビームプロファイルに変換するためには、そのモニタの比感度係数分布の情報が必須である。そこで本論文では、考案した比感度係数分布の測定手法の詳細、および実測した比感度係数分布について議論する。

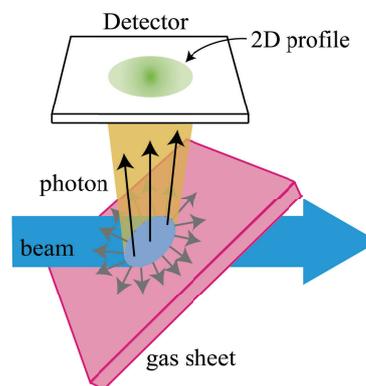


Figure 1: A schematic diagram of a gas sheet monitor.

2. 比感度係数分布とその測定手法

ガスシートモニタを用いて、ビーム・ガス相互作用で生じる光子の分布からビームプロファイルを測定する手法について述べる。発光断面積を σ 、ガス密度を n_g 、ビームの電流密度を j 、ビーム粒子の電荷を q とすると、単位時間あたりに生成する光子密度 n_p は以下で表される。

$$n_p = \sigma n_g j / q \quad (1)$$

Figure 2 のように、ビーム (図中の "Beam") が z 方向に進行し、光子検出器を y 軸上に $-y$ の向きに設置する場合を考える。ビームの横方向粒子密度分布、つまり横方向

* ip.yamada@icloud.com

プロファイルを $f(x, y, t) = j/q$ (t は時間)、ガス密度分布を $n(x, y, z)$ 、発光断面積を含む係数を検出効率分布として $\alpha(x, y, z)$ と書き直す。生成した光子 n_p は検出器上で y 方向に積算され、また測定時間 Δt だけ時間で積算されて検出される。検出器上の信号分布に対して、ビームプロファイルの x, y 方向成分の情報を持つ座標をそれぞれ \tilde{x}, \tilde{y} とする。幾何学的には、 $\tilde{x} = x, \tilde{y} = z = y/\tan\theta$ の関係となる。検出器上の信号分布 $g(\tilde{x}, \tilde{y})$ は以下で書ける。

$$g(\tilde{x}, \tilde{y}) = \int_{\Delta t} \int_{\ell} n_p dy dt \quad (2)$$

$$= \int_{\Delta t} \int_{\ell} \alpha(x, y, z) \cdot n(x, y, z) \cdot f(x, y, t) dy dt$$

積分区間 ℓ はビームの y 方向の全幅以上の領域である。検出効率分布 $\alpha(x, y, z)$ は発光断面積や光学系の透過率などの定数係数や、検出器の各素子間の感度比 (\tilde{x}, \tilde{y} の関数) を含む。また、検出可能な立体角は y 座標に依存し、検出される信号強度に差を与える。 $\alpha(x, y, z)$ は、このような効果を全て含む係数である。ガス密度分布 $n(x, y, z)$ や検出効率分布 $\alpha(x, y, z)$ の情報を用いて式 (2) の積分方程式を解くことで、ガスシートモニタにより測定時間 Δt だけ積算されたビームプロファイル $f(x, y)$ を得ることができる。

比感度係数分布はガス密度分布や検出器の配置・性能で決まるため、プロファイルモニタの系に大きく依存する。そこで、プロファイルモニタの系を変更することなく、任意のプロファイルモニタに対して適応可能な比感度係数分布の測定手法を考案した。本手法は、プロファイル測定したいビーム (Fig. 2 の "Beam") の代わりに十分細かいプロファイルを持つ電子ビームを利用するものである。理想的な場合として、太さが無視できる電子ビームを考える。 (x_0, y_0) を通る電子ビームが生成する光子信号分布は、プロファイル測定したいビームの一部 $f(x_0, y_0, t)$ が生成する信号分布 $g(\tilde{x}_0, \tilde{y})$ を模擬する。電子ビームは時間のみに依り $f_e(t)$ とかけるため、検出される信号は以下で書ける。

$$g(\tilde{x}_0, \tilde{y}) = \int_{\Delta t} \alpha(x_0, y_0, z) \cdot n(x_0, y_0, z) \cdot f_e(t) dt \quad (3)$$

よって、 x, y 方向に電子ビームをスキャンして得られる各分布を三次元で再構築することで、比感度係数分布 $\alpha(x, y, z) \cdot n(x, y, z)$ を得ることができる。厳密には電子ビームの強度がかかった分布が得られるが、分布形状が重要であり、絶対値は規格化して利用できる。また、現実的な場合は電子ビームが有限の太さ ($\Delta x, \Delta y$) を持つが、 (x_0, y_0) を $(x_0 \sim x_0 + \Delta x, y_0 \sim y_0 + \Delta y)$ に書き換えるだけで上記の議論が成り立つ。この時、電子ビームの太さが比感度係数分布測定の分解能を決定する。

本手法の利点は、非破壊でガス密度分布と検出効率分布を測定可能な点である。一般的な真空計プローブを利用する手法 [1-3] は、測定によりガス密度分布を乱す、またはプロファイル測定に利用する位置での測定ができない。さらに、光子信号を利用しないため、検出効率分布の測定ができないといった課題がある。本手法はこれらの課題を解決する手法であり、より高精度なビームプロファイル測定を可能とする。

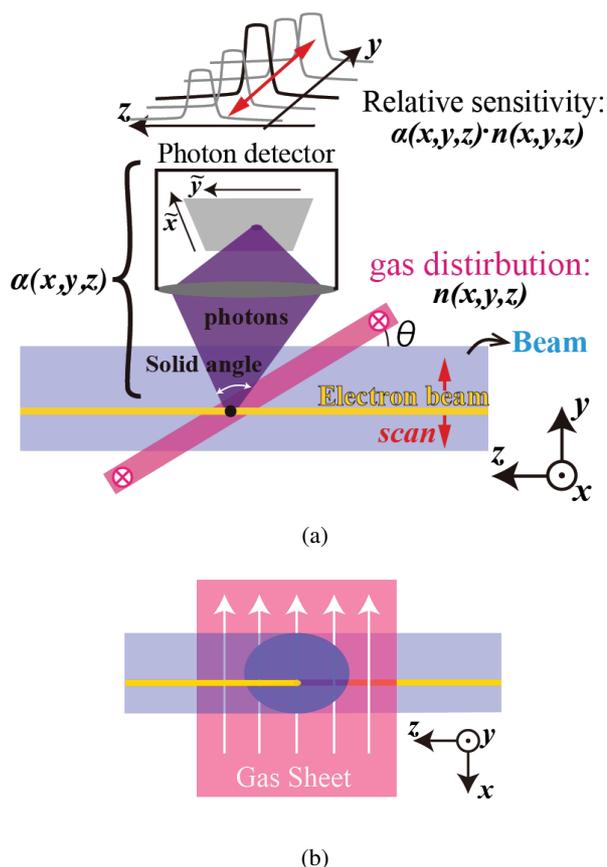


Figure 2: The principle of relative-sensitivity distribution measurement. (a) describes side view and (b) describes top view.

3. 比感度係数分布測定系

比感度係数分布の測定系は、ガスシートモニタのビームラインポートに電子銃と電子ビーム回収用のファラデーカップを設置したものである。詳細を以下に示す。

3.1 ガスシートモニタ

ガスシートモニタの概略図を Fig. 3 に示す。ガスシートモニタは、カバーチャンバで囲まれたガスシート生成機、ビームラインポートを持つメインチャンバ、真空ポンプ、光子検出系で構成される。

3.1.1 真空系 ガスシート生成機は、希薄気体力学に基づいてガスだまりから特定の方向を向いたガス粒子を取り出すことでシートを形成するものである。方向成分の選択には $100 \text{ mm} : 50 \text{ mm} : 0.1 \text{ mm}$ の矩形の薄く長い流路を利用した [3]。ガス流路は有限の厚みを持つため、形成されるガスシートは広がりを持つ。ガスシート分布の裾野はプロファイル測定に対して不利に働く、および真空度の悪化を引き起こすため、ビームラインに導入せず事前に排気することが望ましい。そこで、Fig. 4 に示すように、ガスシート生成機をチャンバ (カバーチャンバ) で囲い、排気速度 420 l/s のターボ分子ポンプを設置した。カバーチャンバには、ガスシート生成機の出口

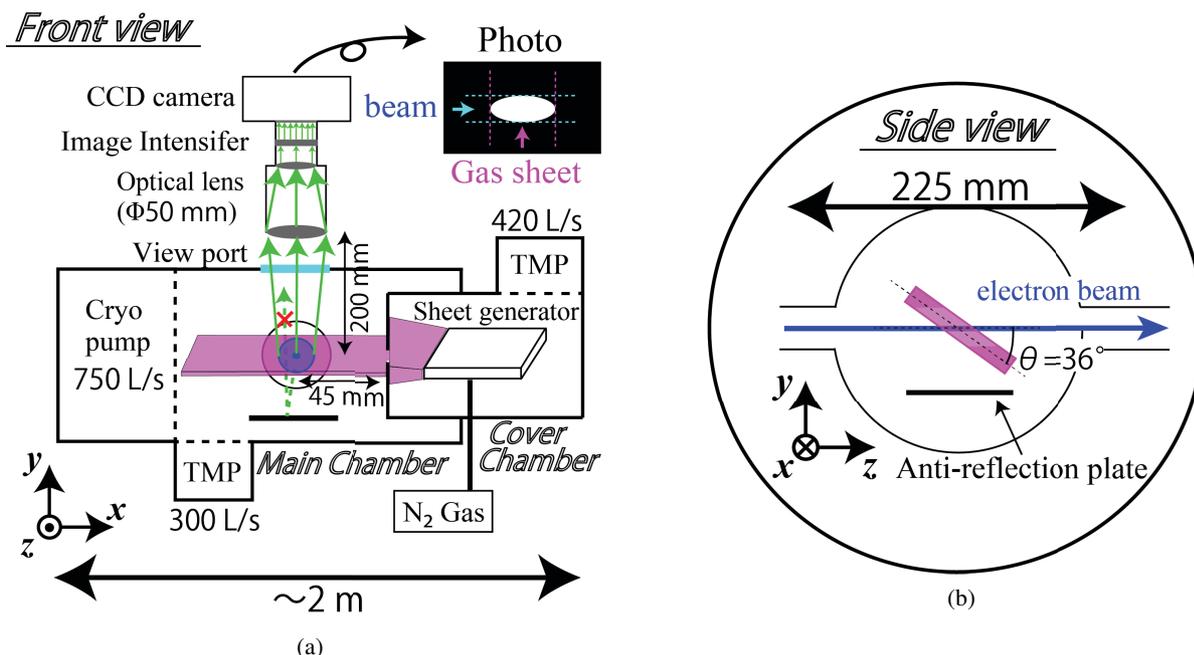


Figure 3: The gas sheet monitor system. (a) describes front view and (b) describes side view.

から下流 10 mm の位置に 0.5 mm×50 mm のスリットを設けた。導入したガス内、約 90% の流量のガスがカバーチャンバで排気され、残りの 10% がシートコアとしてメインチャンバに流入した。メインチャンバに導入されたガスは、排気速度 750 l/s のクライオポンプと 300 l/s のターボ分子ポンプで排気される。

て検出器に入射すると、光子分布情報を乱すため、検出器の対向部に反射防止板を設置した。

検出された画像の距離校正を行うために、1 mm 刻みの目盛りをつけたターゲットをビームガス相互作用点に挿入して外部光源を用いて撮影した。その結果、画像の 31 px が 1 mm に相当することが得られた。

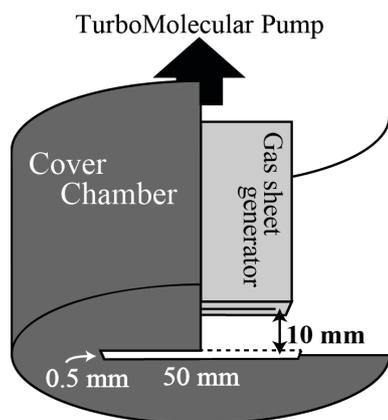


Figure 4: A schematic diagram of the cover chamber and the gas sheet generator.

3.1.2 光子検出系 生成した光子を Nikon 製の光学レンズ (AI Nikkor 35 mm 1:1.4) で集光し、浜松ホトニクス社製のイメージンテンスファイア (C9016-02) で増幅して Bitran 製 CCD カメラ (BU-66EM) で検出した。CCD カメラの素子配列は 1920 px×1080 px であり、素子のダイナミックレンジは 16 bit である。この時、光学レンズとビームガス相互作用点の中心の距離 (200 mm) とレンズ直径 (50 mm) から、検出可能な立体角は 0.05 sr であった。また、生成した光子がチャンバ内壁で反射し

3.1.3 導入ガス ガスシートを形成するために導入したガスは、アルゴンやキセノンと比べて大きな発光断面積を持つことが報告されている窒素ガスとした [4]。また、窒素ガスとビームの相互作用により生じる主な発光の過程は、first negative band ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$) のうち、 $(v', v'') = (0, 0), (0, 1)$ の 391.4 nm, 427.8 nm であると考えられる。

3.2 電子銃

利用した電子ビームのエネルギーは 3 keV、電流値は $\sim 10 \mu\text{A}$ である。電子ビームの射影プロファイルの測定例を Fig. 5 に示す。電子ビームの強度分布に比例して光子が生成するため、その分布から比感度係数測定の空間分解能が決定される。例えば、Fig. 5 のビームで 2 mm ステップで測定する場合を考える。中央部 2 mm の領域の強度を積分すると、電子ビームの全強度のうち約 60% となる。この領域に含まれるビーム成分が信頼できる光子信号を生成する。残りの 40% 分は隣接する別の測定点に対する信号を生成するため測定精度の劣化を引き起こす。より高精度・高分解能の測定は、電子ビームを細く形成するか、二次元断面プロファイルを別の手法で測定して換算し直すことで可能である。

4. 比感度係数分布測定

電子銃が $(x, y) = (0, 0)$ の位置にある場合の取得画像例を Fig. 6 に示す。電子ビームやガスシートの配置は

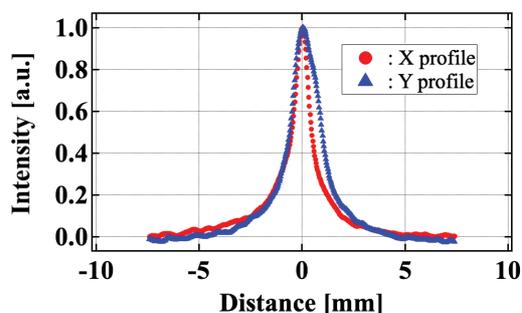


Figure 5: The projected spatial profiles of the electron beam.

Fig. 3 の通りである。 x, y 軸の原点はガスシートモニタのビームラインポートの中心点とし、 z 軸の原点は検出器接続ポートの中心点とした。また、 \tilde{x}, \tilde{y} 軸の原点は、それぞれ x, z 軸の原点に一致させた。この画像は露光時間 30 s の写真を 20 枚取得して平均化したものである。チャンバ内雰囲気ガスによる電子ビームに沿った信号と、ガスシートコア部による信号が検出されていることが読み取れる。信号を \tilde{x} (画像の縦) 方向に積算して一次元化した \tilde{y} 方向の信号強度分布を Fig. 7 に示す。この信号強度分布が式 (3) の $g(0, \tilde{y})$ に相当するため、比感度係数の z 方向分布、 $n(0, 0, z) \cdot \alpha(0, 0, z)$ を示す。ガスシートのコアの部分に対して高い比感度を持つことが読み取れる。 x, y 方向に電子銃をスキャンした時の z 方向分布を並べることで、三次元の比感度係数分布を得ることができる。

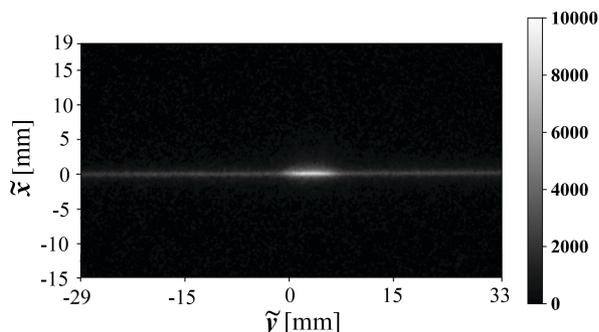


Figure 6: An example of the captured photo. The white part describes photon signal.

Figure 8 に、電子銃を 2.00 mm 間隔で x 方向および y 方向にそれぞれ一次元的にスキャンして、二次元の比感度係数分布を測定した結果を示す。 x 方向のスキャン時は y の位置は原点、 y 方向スキャン時は x の位置は原点に固定した。 $y-z$ 平面に対する比感度係数分布 (Fig. 8(b)) は斜めに感度を持っており、ガスシートの設置角を反映していると考えられる。信号強度のピークを与える位置を、直線でフィッティングし、その直線と z 軸の成す角を求めると 35° であった。これはガスシートの設置角 36° (Fig. 3(b)) に概ね一致し、妥当な結果が得られたことが示された。

理想的な比感度係数分布は z 方向に短く、 x, y 方向に

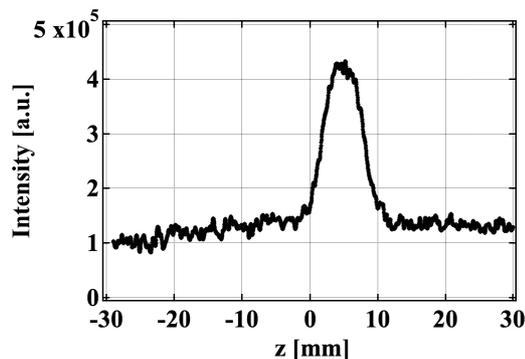
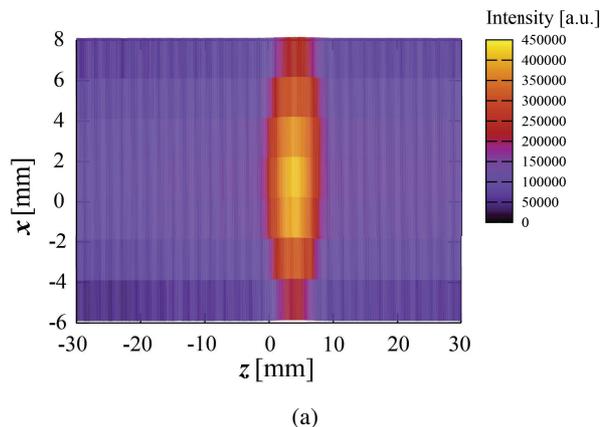
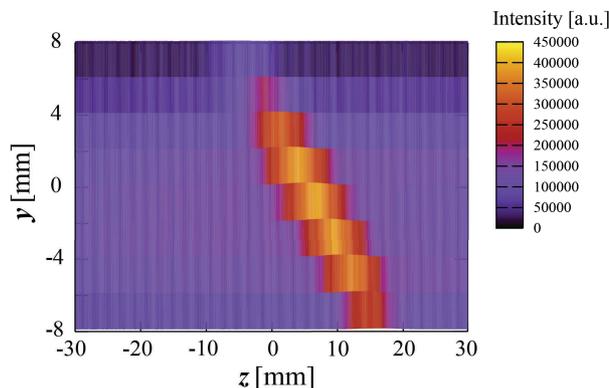


Figure 7: An example of the detection efficiency distribution along z axis. The electron gun position $(x, y) = (0, 0)$.

一樣なものであるが、今回の測定により z 方向には 10 mm 程度の幅を持ち、 x, y 方向には急峻な変化を持つことが明らかとなった。例えば、J-PARC Linac 上流部のビームの典型的な横方向サイズは $1\sigma = 2 \sim 3$ mm であり、全値全幅は 20 mm 程度である。このようなビームに対しては Fig. 8 は大きな比感度係数分布として働き、無視できない。すなわち、このガスシートモニタによるプロファイル測定で正しい情報を得るためには、比感度係数分布の実測および信号校正が必須である。



(a)



(b)

Figure 8: The relative-sensitivity distributions in two dimensions of (a) $x-z$ plane and (b) $y-z$ plane.

5. まとめ

以下に本論文のまとめと今後の展望を示す。

- ガスシートを用いた非破壊型プロファイルモニタのための比感度係数分布測定手法を考案した。
- 考案した手法をガスシートモニタに適用し、電子ビームにより生成した光子信号の検出に成功した。
- 電子銃を二方向にスキャンして比感度係数分布の測定を行い、比感度係数が大きく分布を持つことを明らかにした。
- 今後、三次元の比感度係数分布を測定し、J-PARC Linac のビームプロファイル測定に適應する。

参考文献

- [1] Y. Hashimoto *et al.*, Oxygen gas-sheet beam profile monitor for the synchrotron and storage ring, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 527 (2004) 289-300.
- [2] A. Salehilashkajani *et al.*, Commissioning of the prototype for a new gas curtain beam profile monitor using beam introducing fluorescence for HL-LHC, Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, WEPGW093.
- [3] N. Ogiwara *et al.*, A non-destructive profile monitor using a gas sheet, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, WEOBB03.
- [4] M. A. Plum, E. Bravin, J. Bosser, and R. Maccaferri, N₂ and Xe gas scintillation cross-section, spectrum, and lifetime measurements from 50 MeV to 25 GeV at the CERN PS and Booster, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 492 (2002) 74-90.