

# 大強度陽子ビームのためのマルチスクリーンを用いた高ダイナミックレンジ 2次元ビームプロファイルモニター

## A TWO-DIMENSIONAL BEAM PROFILE MONITOR WITH HIGH DYNAMIC-RANGE USING MULTI-SCREEN FOR INTENSE PROTON BEAMS

橋本義徳<sup>#, A)</sup>, 秋野英之<sup>C)</sup>, 三橋利行<sup>B)</sup>, 大森雄基<sup>C)</sup>, 大津 聡<sup>C)</sup>, 手島昌己<sup>A)</sup>, 外山 毅<sup>A)</sup>  
Yoshinori Hashimoto <sup>#, A)</sup>, Hideyuki Akino<sup>C)</sup>, Toshiyuki Mitsuhashi<sup>B)</sup>, Yuki Omori<sup>C)</sup>, Satoru Otsu<sup>C)</sup>,  
Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK/J-PARC: 2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Naka-Gun, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> KEK: 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.: 2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

### Abstract

An instrument for beam shape measurement including the halo is strongly required in intense proton accelerators such as the J-PARC. For diagnosing of the beam halo and halo cut at the injection beam line (3-50 BT) which connects the rapid cycling synchrotron (RCS) and the main ring (MR) in the J-PARC, we have developed a high sensitive two-dimensional profile monitor with screens. The beam core was observed with OTR from titanium foil screen, and the beam halo whose density were less almost three orders than it of the beam core was observed with fluorescence (FL) from chromium doped alumina screens placed in the four directions around the beam space. These alumina screens and remote movable system were installed in this spring, and they can be used with existing OTR screens simultaneously. These OTR and FL are focused in the same optical system having large opening angle of 30 degree, and these are observed by a camera with an image intensifier (II). By these method, two-dimensional beam profile contained the beam halo of high-intensity proton beam of  $1.5 \times 10^{13}$  was measured successfully with a dynamic range of more than six orders in magnitude.

Two typical measured results as below are discussed mainly in this paper: (i) halo cut by the beam collimators, (ii) simultaneous measurement of the beam halo of the minus 4<sup>th</sup> order with the beam core. These high-sensitive two-dimensional data give powerful information for beam diagnosing. As further topics, increasing the sensitivity of the beam halo measurement and simultaneous measurement of beam halo with beam core with wider dynamic range, their studies are planned this autumn, are also described.

### 1. 経緯と装置概要

はじめに装置の概要を中心にして、特徴的な事柄の要約を述べる。

#### 1.1 経緯

J-PARC の 3-50 BT における MR への大強度入射ビームの形状測定のためのマルチスクリーンプロファイルモニターでは、ビームコアの計測はチタンフォイルからの OTR を用い、ビームハローの計測

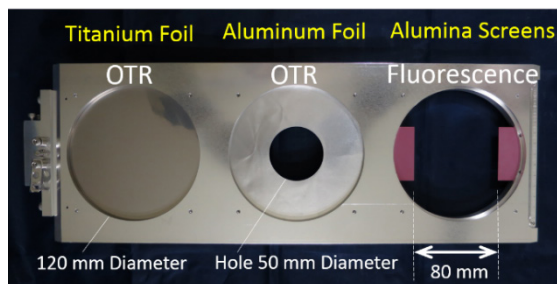


Figure 1: The triple screen.

は Cr ドープのアルミナセラミックスクリーンからの蛍光を用いる。昨年、スライド式の3連スクリーン(Fig.1)を用いて、チタンフォイルとアルミナスクリーンを切り替えて測定することで、ビームコアからハローまでを  $10^6$  程度のダイナミックレンジ

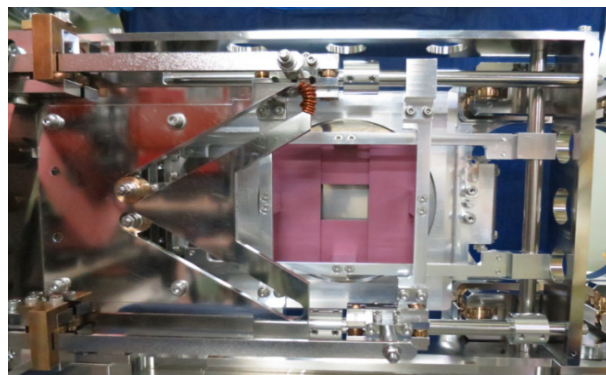


Figure 2: Newly installed H-V (horizontal and vertical) alumina screen and movable mechanics. All alumina screens were set at the closed position. Behind them there is an existing Ti foil of the triple screen.

<sup>#</sup> yoshinori.hashimoto@kek.jp

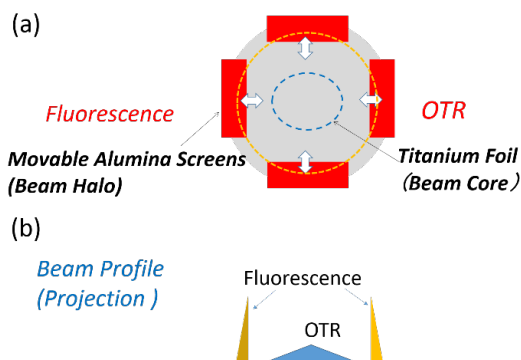


Figure 3: Conceptual view of simultaneous measurement with OTR for beam core and fluorescence for beam halo. (a) schematic layout of screens, (b) a layout of expected light projection.

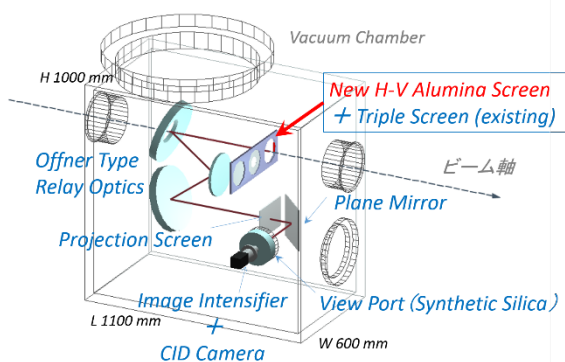


Figure 4: A layout of the instrument. An Offner type optical system placed in a vacuum was made up with a spherical convex mirror of diameter 200mm and two spherical concave mirrors having a diameter of 300mm.

で測定できることを実証した [1,2,3]. 今年度は, 4 方向の可動式のアルミナスクリーン(Fig.2)をこの 3 連スクリーンの直前 13mm の位置に設置した[4]. これにより OTR 用のチタンフォイルと 4 方向 (水平ペア, 垂直ペア) のアルミナスクリーンを同時に配置 (Fig.2, 3) することが可能になり, コアとハローを同時に計測するためのセットアップができた.

### 1.2 装置概要

装置のレイアウトを Fig.4 に示す. 真空容器内の上記のスクリーンからは, OTR と蛍光が放射される. 3 GeV 陽子ビームからの OTR は, 放射角 $\pm 13.5$ 度 を有するために, これをカバーする大きな開口角 ( $\pm 15$ 度)をもつオフナータイプのオフアクシスリレー光学系で集光する. 蛍光も同じ光学系で集光され, この大口径は等方向放射の蛍光に対してもさらに高い集光効率をもたらす. このリレー光学系によりターゲット直下に位置するプロジェクションスクリーンにビームイメージは結像される. これを大気側にセットしたイメージインテンシファイア(II) 付 CID (Charge Injection Device) カメラにより撮像する.

### 1.3 計測されたデータにおける光量の規格化

OTR と蛍光の 2 種類の光を用いており, また II ゲインをそれらの光の収量に応じて最適化しているために, コアからハロー領域までを一つのプロファイルデータとして統合するためには, 光量の規格化が必要になる. 規格化には, 二つの校正値を用いる [1,2]. 一つは, OTR と蛍光の収量比である 1314.6 である. これは, II ゲート時間 (露光時間) 10  $\mu$ s のとき, 50 mm 直径の穴あきターゲットのエッジ部で検出した OTR の光量と, このエッジ位置にアルミナスクリーンをセットしたときの蛍光の光量の積分比から求めた値である. もう一つは II の校正カーブであり, テストベンチで光量とゲインの相関を測定したものを使用する.

### 1.4 Cr ドープのアルミナの蛍光時間

Cr ドープのアルミナからの蛍光の特徴として, 蛍光時間が比較的長いことがある. これを, 3 GeV 陽子ビームを用いて測定した結果を Fig.5 に示す. 10  $\mu$ s の II ゲートで時間スキャンしている. 横軸がログスケールのグラフにおける直線であり, 1/10 に減衰するまでの時間がおおよそ 1 ms であった. II ゲート時間を変えることで蛍光の収量を変えることができることが本計測方法及び装置としての特徴と言える. ただし, 現在までは II ゲート時間を 10  $\mu$ s に固定して使用している(後述 4).

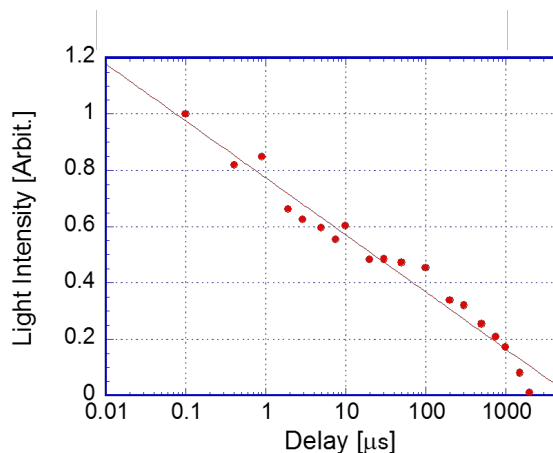


Figure 5: A results of afterglow measurement of a Cr doped alumina screen, with 3 GeV proton beam and fixed image intensifier gate time of 10  $\mu$ s.

## 2. ビームコリメータでのビームカット時の 2次元ハロー分布の測定

3-50 BT ラインの, 本モニターの約 120 m 上流に設置されているビームコリメータ[5] は, 前段加速器である RCS からの 3GeV ビームのハローをカットする役割をもつ. このコリメータの ON と OFF でのビームの空間的な強度分布の違いを測定した.

測定に用いたスクリーンは, ビームコア領域とその周辺の OTR 測定用には, 10  $\mu$ m<sup>2</sup> のチタンフォイル

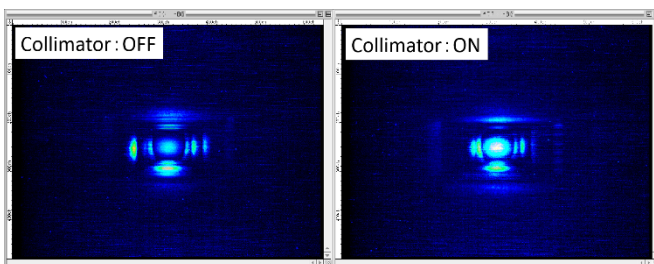


Figure 6: Superimposed measured images on measurement of collimator effects. Left: collimator OFF, and Right: collimator ON.

ルスクリン及び 50 mm の穴あきの 100  $\mu\text{m}^2$  のアルミフォイルスクリーンであり、ハロー領域の蛍光の測定には、4 方向アルミナスクリーンを用いた。この測定では、従来通り[1,2]に、コアやその周囲の OTR の測定時には、4 方向アルミナスクリーンを全開にして OTR 用スクリーンだけを用い、またハロー領域の蛍光の測定時には、OTR 用のスクリーンを退避させて 4 方向アルミナスクリーンだけを用いて測定した。アルミナスクリーンは、水平方向ペアと垂直方向ペアを合わせてそれらのエッジ位置を 20

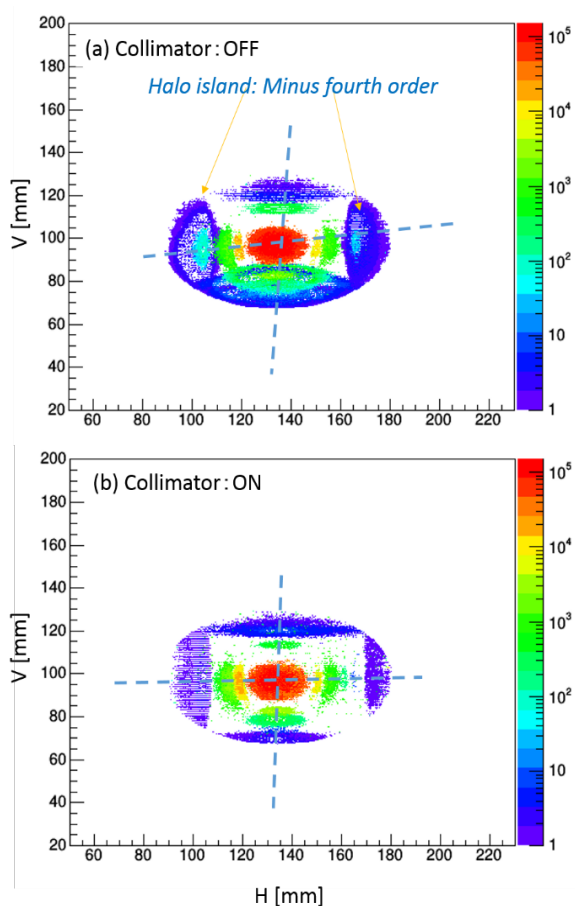


Figure 7: Two-dimensional color contour map obtained by the scaling mentioned in 1.3. Each contour was colored by log scale. (a) Collimator OFF, and (b) Collimator ON.

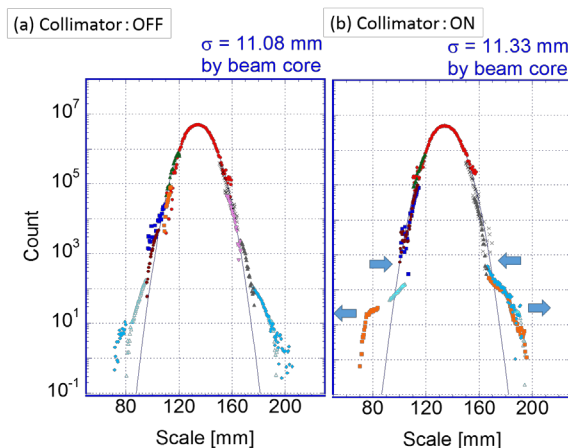


Figure 8: Projected beam profiles in the horizontal direction. (a) Collimator OFF, and (b) Collimator ON.

通りに変えて測定した。それぞれの測定時には、検出光量が飽和しないように II ゲインを最適化した。また、各位置での測定は 5 ショットの平均を求めた。OTR の計測と合わせて計 125 ショットの測定であった。ビーム条件は、RCS の入射は  $50\pi$  のペンディングを行い、2 バンチ入射スキームのフロントバンチのみを用い、その強度は  $1.5 \times 10^{13}$  protons/bunch であった。計測されたイメージデータをスーパーインポーズしたものを Fig.6 に示す。イメージ内のそれぞれの光の像は II ゲインを変えて測定したものであるため、この絵だけではビームのおおよその形状程度しか認識できない。これらのデータを 1.3 で示した規格化処理[1,2]し、その結果を 2 次元のログスケールのカラーコンターマップとして Fig.7 に示す。この図から次の 3 点がわかる。i) 測定された光の強度分布のダイナミックレンジは 4 から 5 桁である。ii) コリメータが OFF のときは、水平方向に  $10^4$  オーダーのハローのアイランドが見えているが、コリメータを ON することで、薄くなるかまたは消えている。iii) 左右・上下のハローの中心付近を通る直線を破線で図示すると、これらはコリメータが OFF のときは、それぞれ水平・垂直から有意に傾いているように見えた。これに対して、コリメータを ON にするとこれらの傾きが小さくなるように見えた。

Fig.8 では、これらの水平方向の射影を示す。この図からは、次の 5 点がわかる。i) ビームプロファイルを 6 桁程度のダイナミックレンジで計測できた。ii) ピークに対して  $10^6$  程度のレンジでは、ビームサイズが 120 mm 程度にまで大きくなっている。iii) OTR で計測したビームコアをフィットしたガウシアンカーブに対して、4 桁程度下までの間はほぼカーブに乗っているが、それより下のレンジでは広がりが顕著になる(コリメータ OFF)。iv) コリメータ ON では、ピークに対して  $10^4$  のオーダーにウェストができ、 $10^6$  以下の領域ではビームサイズがさらに広がったように見えている。v) コアをフィットしたガウシアンカーブの  $\sigma$  は  $11.2 \pm 0.1$  mm 程度であり、コリメー



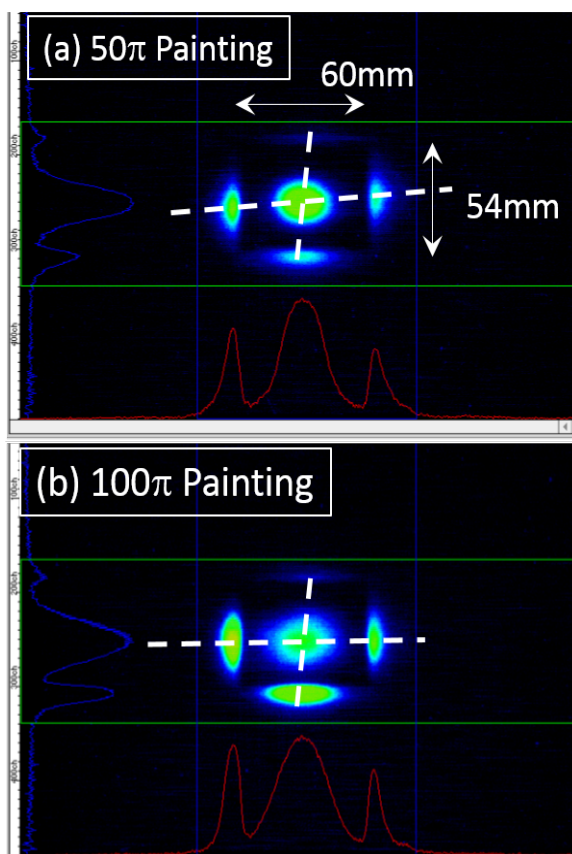


Figure 9: Simultaneous measurement of the halo of under the minus 4th order with the beam core. Differences in the painting area of  $50\pi$  (a) and  $100\pi$  (b) of the RCS injection were measured.

タ ON, OFF でほとんど変わらなかった。ここで iv) のウェストは, Fig.7 の 2次元のカラーコンターで示した  $10^{-4}$  の水平方向のハローのアイランドが消失した現象に対応するものでビームコリメータでのハローカットの効果と考えられる。カットされたハローが, v) の広がりをもたらしたと推測している。

これらに示したように, コアからハローまでの実空間での 2次元情報により, ビーム光学, コリメータでのビームカットの確認などに対して有益な情報を提供することができるようになった。

### 3. $10^{-4}$ 領域のハローとビームコアの同時測定

4 方向アルミナスクリーンとトリプルスクリーンのチタンフォイルを併用することで, ビームコアと  $10^{-4}$  領域のハローの同時計測を行った。使用したビームは連続する 2 バンチでその強度は  $3.0 \times 10^{13}$  protons/2bunch であった。またコリメータは OFF にした。この測定では, RCS の入射ペインティングエリアを  $50\pi$  と  $100\pi$  での比較を行った。計測は, いずれも 5 ショットの平均である。4 方向アルミナスクリーンの水平・垂直方向のそれぞれのペアの内側エッジの距離は, 60, 54 mm であった。測定されたビームイメージを Fig. 9 に示す。またそれらの水

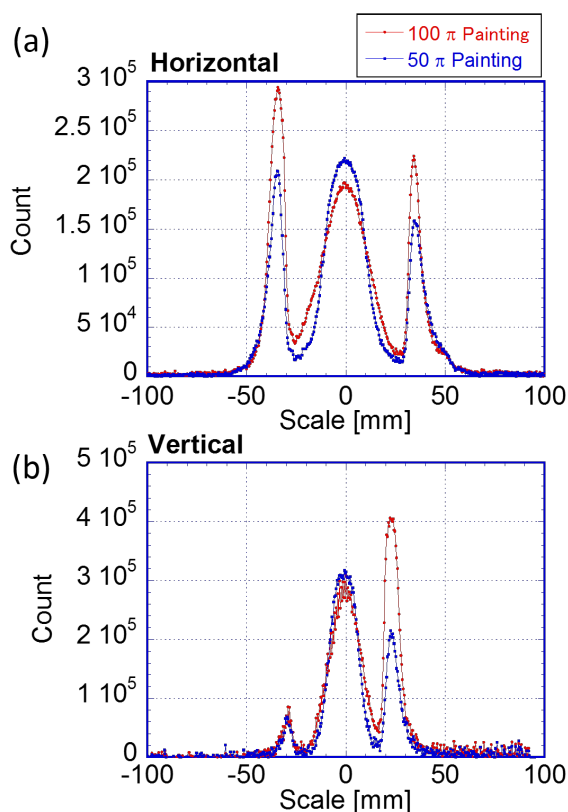


Figure 10: Projections of beam image shown in Fig. 9, in horizontal (a) and vertical (b) directions.

平と垂直方向の射影を Fig.10 に示す。これらの結果からわかる顕著なこととして, i)  $50\pi$  ペインティングビームは  $100\pi$  ペインティングビームよりもシャープである, ii) 左右・上下のハローの中心を結ぶラインはそれぞれ水平・垂直から傾きをもっている。ただし,  $100\pi$  ペインティングビームの水平方向の傾きは小さい, iii) 水平方向の射影(Fig.10 (a))で,  $100\pi$  ペインティングビームは, コアもハローも大きくなっている, iv) これに対し, 垂直方向の射影(Fig.10 (b))では, コアの大きさは両者でそれほど変わらないが,  $100\pi$  ペインティングビームでは, 下側のハローが,  $50\pi$  ペインティングビームのハローに対して 2 倍程度大きい, といったことがあげられる。

ワンショットで, 4 桁目のハローとビームコアを測定できたのは, コアの計測に用いる OTR のための II のゲインと 4 桁目のハローを測定するための前述のアルミナエッジ位置での蛍光のための II ゲインが一致できたためである。このような測定方法により, ワンショットなどの短時間でコアとハローの状況の情報を得ることができるようになった。

### 4. ビームコアとハローの同時計測の方法とハローの更なる高感度計測に向けて

今までは, II ゲート時間を  $10\ \mu\text{s}$  に固定して使用してきた。また使用したカメラは, CID カメラであり, そのアナログ Video 信号を 10 bit ADC でデジタ

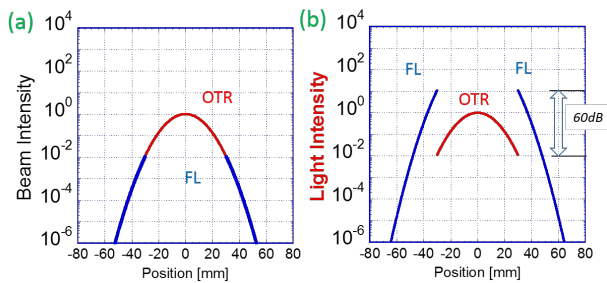


Figure 11: Adjustment of light yield ratio of Fluorescence and OTR (FL/OTR) for simultaneous measurement of the beam core and the beam halo. (a) Beam intensity distribution curve which colored by kind of light to be measured. (b) Light intensity distribution curve in case that FL/OTR equals one thousand.

ル化して使用していた。これらの条件においてのデジタルに変換された信号のノイズレベルの評価として、1024 階層のうち下位の 60 程度がノイズとなっている。これはトンネルから地上のローカル制御室 (LCR) までの間でアナログビデオ信号を 400 m の 75  $\Omega$  同軸ケーブル (5D) で転送しており、この区間でノイズを拾ってしまうためである。このノイズの周波数はビデオ信号の周波数領域に近いために除去することが難しい。このようなノイズの影響によりピークに対して 1.5 桁程度下までが信号処理できる範囲である。これを改善してダイナミックレンジを広く取ることがまず必要になる。そこでトンネル内から GigE (ギガビットイーサネット) のカメラ信号を LCR まで転送することを検討している。12bit monochrome の GigE 出力をもつ CMOS カメラ (Basler acA1300-60gm) をトンネル内の CID カメラと同じ場所に設置しての試験を行っている。CMOS カメラは CID カメラなどに比べて耐放射線性に劣るため、5 cm 厚みのポリエチレンと鉛で放射線に対するシールドを行った。GigE 信号を LAN と光ケーブルを用いて地上のローカル制御室までの 400m を転送している。GigE 信号では、従来のノイズによる影響はほとんどなかった。すなわち 1000 程度 (60 dB) の S/N でデータを取得することができるようになる。と期待される結果を得た。

このような CMOS カメラを使い、次に述べる方法によって、5 桁程度のダイナミックレンジでビームコアからハローまでの同時計測ができると期待される。まず、測定するビームのビーム強度分布は、Fig.11 (a) に示すような分布を仮定する (図はガウス分布)。この分布においてピークを 1 とした時、 $1 \times 10^{-2}$  までを OTR で、それ以下を蛍光 (FL) で計測する。このとき、蛍光の収量を OTR の 1000 倍 (60 dB) に選べば、計測器 (II + CMOS カメラ) に入力される光の強度分布は Fig. 11 (b) となる。したがって図中に示した 60 dB の光量領域を上記の CMOS カメラで測定すればよい。

またハローだけをより高感度に測定するには、Cr ドープのアルミナスクリーンからの蛍光の長い蛍光時間 (Fig.5) での光を用いることで実現できると考

えている。今までは、II のゲインを 10  $\mu$ s に固定して使用していたが、1ms までの蛍光時間まで II ゲートを伸ばすとき、10 倍のオーダーでの光量の増加が期待できる。ただし、蛍光の減衰で信号強度が落ちるために相対的に S/N は劣化していくことも考えられことから、適度なゲート時間に抑えなければならない可能性もある。今までは、地上からトンネルまでの 400 m を 50  $\Omega$  で成端して -200 V ピークの II ゲートパルス (フォトカソード用) を転送していたが、この生成に使用した MOS-FET アンプが 10  $\mu$ s の限界を決めていた。この時間制限を超えるために、II のゲート回路を TTL (50  $\Omega$ ) レベルのタイミングで動作できるようにし、ミリ秒オーダーまでのパルスが転送できるシステムに改良しているところである。

## 5. まとめ

OTR とアルミナスクリーンからの蛍光を組み合わせることでビームコアからハローまでを 2 次元で計測することができ、射影したプロファイルでは、6 桁程度のダイナミックレンジがあることを示した。特に 2 次元の強度分布図によるビームコアからハローまでの測定結果では、その特徴的な形状を示すことができ、コリメータでのハローカットの状況を示すことができるようになった。

ビームコアとハローの同時計測に関しては、それらのスクリーンからの光の収量をほぼ等しくするように、新規に導入した 4 方向アルミナスクリーンのエッジ位置を調整してやることで、コアとその 4 桁下の領域のハローの同時計測を行うことができた。この方法で、上流のシンクロトロンでの入射ペインティングエリアの違いによるハローの分布の差異を実空間で評価できるようにした。今後この同時計測をさらに進化させて 5 桁程度の連続したレンジにまで広げるための方法を示した。また、3 GeV 陽子での Cr をドープしたアルミナからの蛍光は、光量が 1/10 になるまでの時間が 1 ms と長いことを示し、計測の露光時間を長くすることでさらに高い感度でのハロー測定の可能性も示した。

## 参考文献

- [1] M. Tejima, Y. Hashimoto, et al., A Two-Dimensional Beam Profile Monitor Having High Dynamic Range by Using Multi-Screen, Proc. 10th PASJ, 2013, p.697-701.
- [2] Y. Hashimoto, et al., A Development of High Sensitive Beam Profile Monitor Using Multi-Screen, Proc. IBIC2013, 338-341.
- [3] M. Tejima, et al., Fabrication Summary on the Equipment of an OTR Beam Profile Monitor for the J-PARC 3-50BT, Proc. 10th PASJ, 2013, p.662-666.
- [4] Y. Omori, et al., New Target Positioner for Beam Halo Measurement and Characteristics of Optical Devices and Detector on the Multi-Screen Profile Monitor, in these procs.
- [5] M. J. Shirakata, et al., UPGRADE OF RADIATION SHIELD FOR BT COLLIMATORS, proc. IPAC2010, Kyoto, Japan, p4246-4248.